

Kapitel 7

Modellierung der 3D Effekte

Sowohl die Darstellung der Induktionspfeile als auch die Widerstands- und LATORRACA-Ellipsen in Kapitel 4.6 und 6 haben einen Eindruck über die komplizierte Leitfähigkeitsverteilung des Messgebiets vermittelt. Wünschenswert wäre sicherlich, ein 3D-Modell zu finden, dass die Messkurven für jeden oder zumindest den Großteil der Messpunkte anpasst. Dass dies für das gesamte Profil nicht möglich ist, verdeutlicht folgende Überlegung:

Das Messgebiet ist in etwa $20km \times 20km$ groß und wurde durch das Hauptprofil mit einem Stationsabstand von $500m$ vermessen. Um mittels hoher Leitfähigkeitskontraste und komplizierter Strukturen 3D-Effekte zu modellieren, benötigt man einen sehr gut diskretisierten Modellraum. Das 3D-Modellierungsprogramm von Mackie *et al.* [1993], das im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde, hat horizontal eine maximale Anzahl von 80×80 Modellzellen. Um zu gewährleisten, dass das Modell auch bei starken Leitfähigkeitskontrasten konvergiert, müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein: Die Modelle müssen so groß generiert sein, dass die Felder bei langen Perioden abgeklungen sind. Zusätzlich sind Bereiche hoher Leitfähigkeitskontraste feiner zu diskretisieren. Um beide Anforderungen zu erfüllen, würde zur Modellierung des gesamten Messgebiets die maximale Anzahl von 80 Modellzellen nicht ausreichen. Aus diesem Grund können an dieser Stelle nur Modellstudien gemacht werden, um einige grundsätzliche Effekte in den Daten zu erklären. 3D-Effekte lassen sich auch teilweise durch 2D-Modelle mit Anisotropie erklären. Dieser Ansatz soll jedoch nicht dahingehend interpretiert werden, dass die Gesteine des Messgebiets tatsächlich intrinsisch anisotrop sind. Vielmehr dient diese Modellierung als Hilfsmittel, weil eine 3D-Modellierung aufgrund der Leitfähigkeitskontraste, der dichten Messlokationen und der daraus resultierenden großen Modellgitterzahl nahezu unmöglich ist. Zunächst möchte ich anhand eines 3D-Modells die MT-Antwort eines gut leitenden Rings mit den Beobachtungen an den Stationen in der Umgebung der ringförmigen Struktur im Norden des Messgebiets vergleichen.

Ein weiterer Abschnitt widmet sich dem gesamten nördlichen Teil des Messgebiets, bei dem an Stationen in einem Bereich von $10km$ Phasen über 90° zu langen Perioden beobachtet werden. Der Teil südlich der WF/OL zeigt zwar nur zu langen

Perioden 3D-Effekte, doch sind diese durch die innerhalb des großen Induktionsraumes befindlichen starken Anomalien beeinflusst. Um einen Eindruck von der Leitfähigkeitsverteilung zu erhalten, passe ich für dieses Teilstück die Daten mit einem 2D-Modell an.

7.1 Die Ringstruktur im Norden des Messgebiets

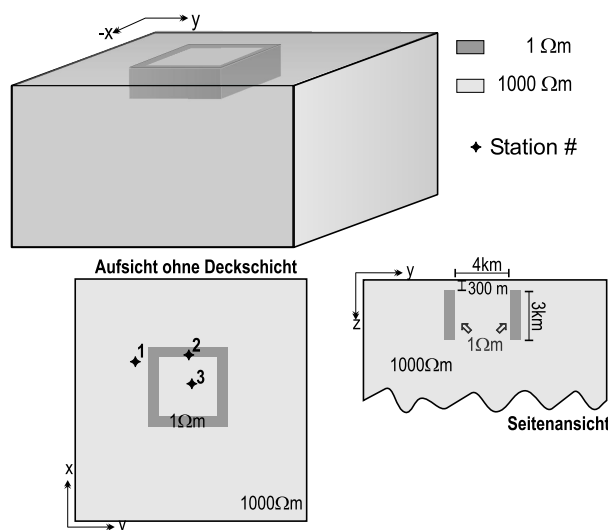


Abbildung 7.1: Das 3D-Modell besteht aus einer gut leitenden, ringförmigen Anomalie ($1\Omega m$) in einem schlecht leitenden Halbraum ($1000\Omega m$). An den eingezeichneten Stationen sind die Modellantworten berechnet worden.

Die Ringstruktur im Norden des Messgebiets wird durch die Induktionspfeile sowie durch die Ellipsen nach der *PNA* und der *SVD* als Leitfähigkeitsanomalie abgebildet. Außerdem sind an Stationen auf, bzw. in der Nähe, dieser Anomalie starke 3D-Effekte, wie sie in Kapitel 4 beschrieben sind, zu beobachten. Ziel ist es, ein Modell zu finden, das Phasen über 90° und vergleichbare Widerstandsellipsen produziert.

Aus der Geologie schließen wir, dass die Ringstruktur durch eine Aufwölbung und anschließende Erosion entstanden ist. Zurück blieb neben anderen Gesteinen der Damara Abfolge unter anderem ein Ring mit Karbonatgesteinen (vgl. Abb. 3.4). Feldproben an verschiedenen Stellen dieser Struktur ergaben, dass die Marmore einen hohen Anteil Graphit enthalten. Messungen der elektrischen Leitfähigkeit durch NOVER (persönliche Mitteilung) an Gesteinsproben von der Erdoberfläche zeigen, dass zwar in den Marmoren Graphit vorhanden, er jedoch durch die Verwitterung nicht über mehr als 3cm verbunden ist. Liegt keine Vernetzung der Graphitbahnen über eine große Distanz vor, so sind sie nicht als gute Leiter zu erkennen. Möglich

ist jedoch, dass unter der Verwitterungsschicht eine leitende Verbindung der Graphitbahnen besteht.

Die hier angestellten Überlegungen führen schließlich zu einem Ersatzmodell eines leitfähigen Rings, das in Abbildung 7.1 dargestellt ist. Der Ring besitzt einen Widerstand von $1\Omega m$ und ist in einen $1000\Omega m$ Halbraum eingebettet. Auch im Inneren befindet sich schlecht leitendes Material. Die Seiten des Kastens sind $500m$ dick und erstrecken sich bis in eine Tiefe von $3000m$. Über der Anomalie befindet sich eine etwa $300m$ mächtige, schlechtleitende Deckschicht. Dieses Modell entspricht näherungsweise der Ringstruktur mit aufliegender Verwitterungsschicht.

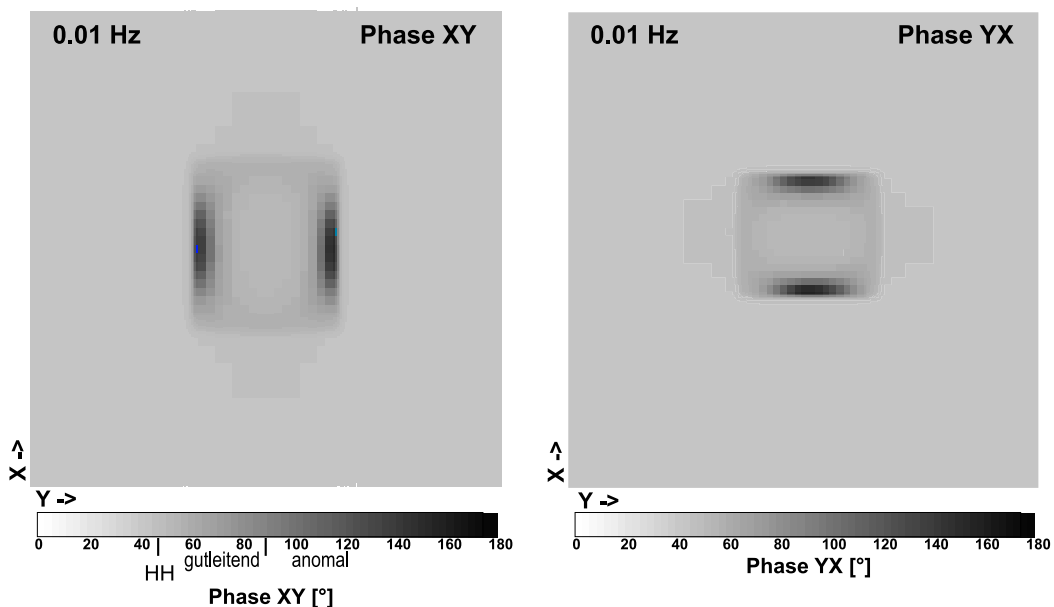


Abbildung 7.2: In einigen Bereichen über dem leitenden Ring befinden sich die Modellphasen der beiden Nebendiagonalelemente in dem für sie unüblichen Quadranten über 90° (HH \cong homogener Halbraum). Dieses anomale Verhalten wird durch ein Bündeln und Ablenken der induzierten Ströme erzeugt.

Um das Phasenverhalten von Stationen über diesem Modell zu untersuchen, sind in Abbildung 7.2 die Phasen der xy- (links) und der yx-Komponente (rechts) für eine Periode von $100s$ dargestellt. Direkt über dem leitenden Ring sind Phasen über 90° zu beobachten. Welche Komponente der Phasen den Quadranten verlässt, hängt von der Polarisation des anregenden Magnetfeldes und des induzierten elektrischen Feldes ab. Ein magnetisches Feld, das in y-Richtung angeregt wurde, erzeugt normalerweise ein elektrisches Feld und Ströme in x-Richtung. Die zugehörige Übertragungsfunktion ist Z_{xy} . Betrachtet man nun die Phasen der xy-Komponente in Abbildung 7.2, so sind an den Seiten des Ringes, die parallel zur x-Achse sind, Pha-

sen über 90° zu erkennen. Eine Erklärung dieser anomalen Phasen liegt im extrem gut leitenden Ring. Die Ströme werden in x-Richtung angeregt und, da sie den Weg des geringsten „Widerstands“ nehmen, im guten Leiter gebündelt und horizontal verbogen. Ein solches Modell bezeichnet man auch als *Channelling*-Modell

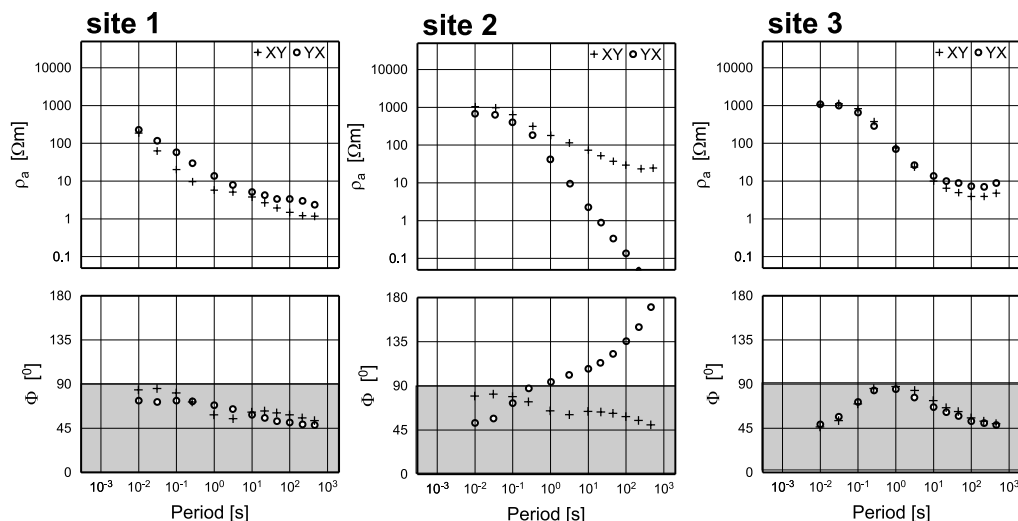


Abbildung 7.3: ρ_a - und Phasenkurven der drei in Abb. 7.1 eingezeichneten Modellstationen. Die Phasen an Station 2 über dem leitfähigen Ring liegen für lange Perioden über 90° .

Abbildung 7.3 zeigt ρ_a - und Phasenkurven an drei Beispielstationen, die in Abbildung 7.1 gekennzeichnet sind. Station 2 über dem Ring zeigt den extremsten Verlauf der scheinbaren spezifischen Widerstände und Phasen. Zu langen Perioden hin fällt die yx-Komponente von ρ_a über einige Dekaden ab. Die dazugehörige Phase verläßt zu langen Perioden hin den Quadranten zwischen 0° und 90° . Auch in der xy-Komponente ist die oberflächennahe, gut leitende Anomalie zu beobachten. Sie äußert sich in einem Abfall der scheinbaren spezifischen Widerstände von $1000\Omega m$ auf $100\Omega m$. Wählt man dagegen eine Modellstation über der in x-Richtung streichenden Anomalieseite, so zeigt nun die xy-Komponente Phasen über 90° und einen steilen Abfall in den Widerständen. Die Orientierung der jeweiligen Ringseite beeinflusst, welche Nebendiagonalkomponente das beschriebene Verhalten zeigt. An Station 1 außerhalb des Ringes beobachten wir nur einen geringen Einfluß der Anomalie. Station 3 befindet sich innerhalb der Anomalie. Sie besitzt nahezu 1D-Verhalten.

Ein Vergleich mit dem Kurvenverlauf an Stationen im Norden des Messgebiets verdeutlicht, dass der genaue Verlauf der Messdaten durch dieses Modell nicht angepasst wird. Das Ringmodell kann jedoch grundsätzlich die beobachteten Effekte, wie Phasen über 90° , erklären. Verglichen mit Station 094 ist das Modell zwar in

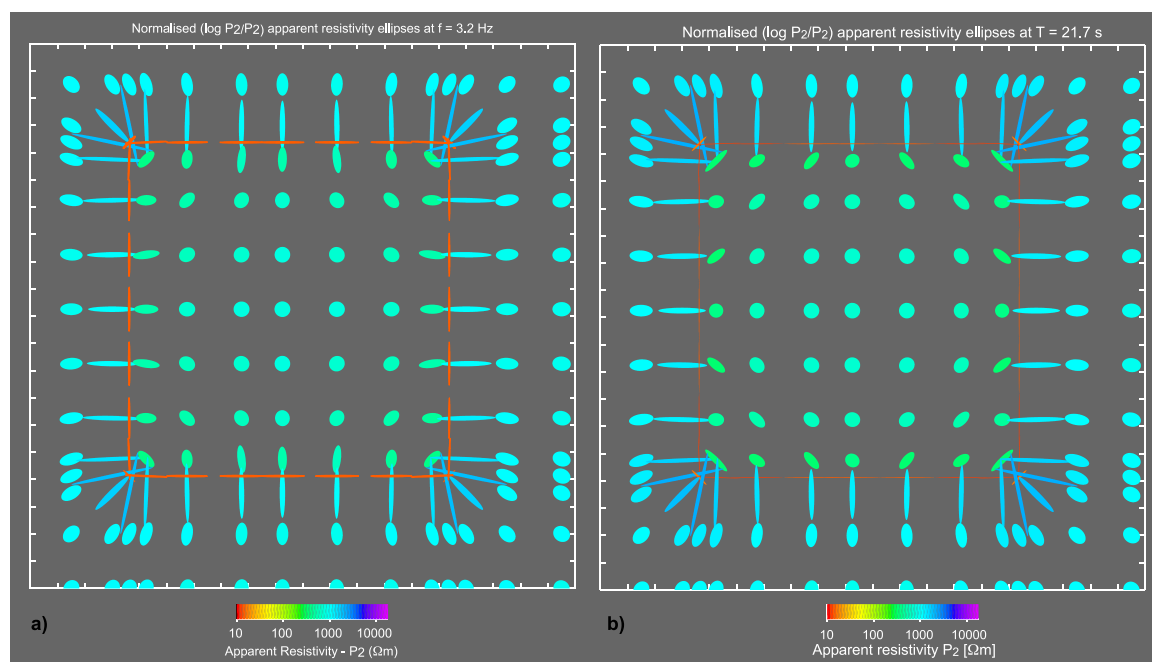


Abbildung 7.4: Anhand der Widerstandsellipsen für 3.2 Hz (a) ergibt sich ein gutes Abbild des Modells. Innerhalb der Ringstruktur deuten lang gestreckte Ellipsen einen Ringstrom an. Im Inneren zeigen sich 1D-Verhältnisse. Auch zu längeren Perioden von 21.7 s (b) ist die Leitfähigkeitsverteilung bis auf etwas geringere Widerstände vergleichbar.

der Lage, Phasen über 90° zu produzieren, aber der Verlauf der Widerstandskurven ist nicht sehr gut angepasst. Im Messgebiet befindet sich diese Ringstruktur nicht in einem homogenen Halbraum, vielmehr deuten die Nachbarstationen an, dass der gesamte nördliche Messbereich 3D-Effekte aufweist. Der Ring aus graphitisierten Marmoren ist also höchst wahrscheinlich in eine Umgebung mit komplizierter Leitfähigkeitsverteilung eingebettet, bzw. induktiv gekoppelt.

Bei dem Versuch, das hier vorgestellte Modell in eine komplizierten 3D-Umgebung einzubauen, stößt man sofort wieder an die Grenzen der 3D-Modellierung. Das hier verwendete Modellgitter beträgt $80 \times 80 \times 35$ Zellen, was die Möglichkeiten des Modellierungsprogramms zumindest in horizontaler Richtung ausschöpft. Damit das Ring-Modell konvergiert, ist eine sehr feine Diskretisierung des Modellraums nötig: Der Ring ist mit Gitterzellen von 50 m Länge diskretisiert. Durch mehrere Modellrechnungen hat sich gezeigt, dass für eine Zellenlänge von mehr als 100 m über der Anomalie entweder die Modellrechnung nicht konvergiert oder aber die Übertragungsfunktionen an Modellstationen nicht stetig sind.

Dadurch, dass zur Erklärung der Messdaten (Phasen $> 90^\circ$) in der Umgebung der

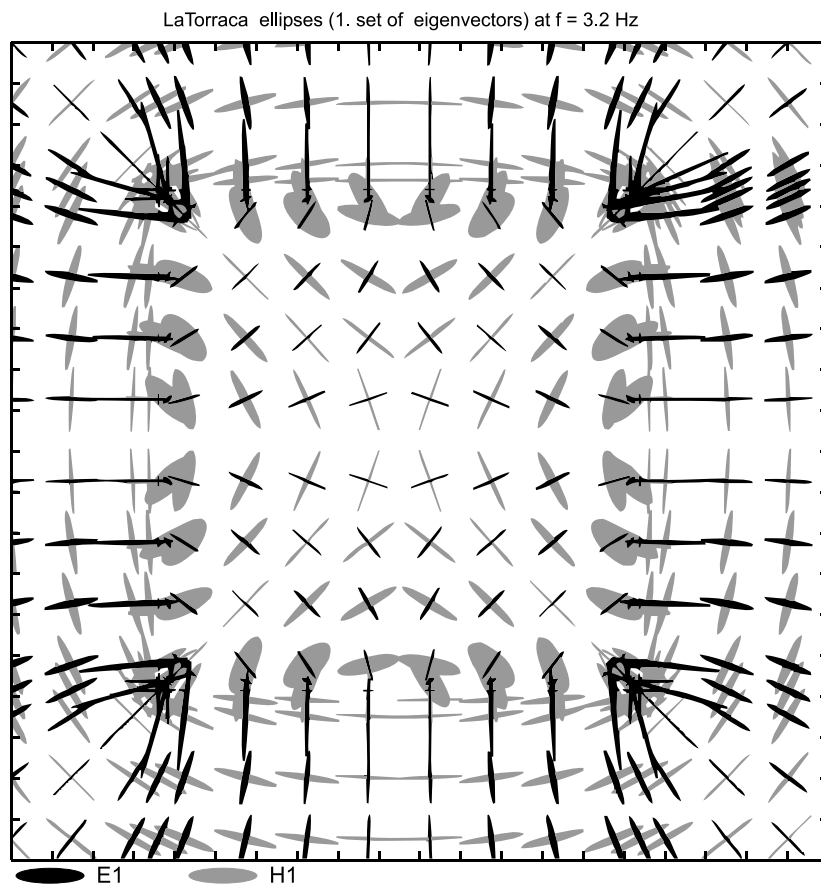


Abbildung 7.5: LA TORRACA Ellipsen für das Ringmodell bei 3.2 Hz . Sie geben zwar die Geometrie des Modells wieder, doch aufgrund der gemeinsamen Darstellung von magnetischen und elektrischen Ellipsen verliert die Abbildung an Übersichtlichkeit.

Ringstruktur ebenfalls fein diskretisierte, strombündelnde Anomalien nötig wären, läßt sich im Rahmen der Möglichkeiten kein geeignetes und zugleich konvergierendes Modell finden. Grundsätzliche Effekte wie das Phasenverhalten lassen sich studieren und vergleichen. Weiterhin macht dieses Modell deutlich, dass eine oberflächennahe Anomalie, die in der Lage ist, Ströme zu bündeln und umzulenken, die markantesten Effekte in den scheinbaren, spezifischen Widerständen und Phasen bei langen Perioden, das heißt großen Eindringtiefen, hat. Dieses Verhalten muss besonders bei langperiodischen MT-Messkampagnen mit großem Stationsabstand berücksichtigt werden. Befindet sich eine Station auf einer solchen Struktur und liegen nur langperiodische Messdaten vor, dann besteht die Gefahr, Effekte in diesem Periodenbereich fälschlicherweise als tiefe Anomalien zu interpretieren.

Im folgenden soll nun das Ring-Modell mit den im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Abbildungsmethoden abgebildet werden. Dazu wird über dem gut leitenden

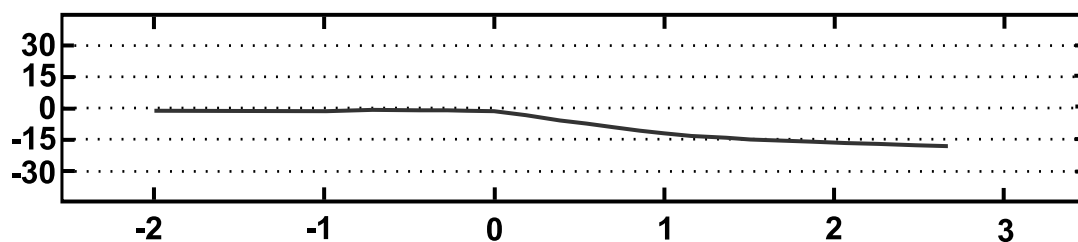


Abbildung 7.6: LATORRACA Skew für Station 2 über dem leitenden Ring: Zu langen Perioden zeigt sich ein Abweichung von der Orthogonalität zwischen magnetischer und elektrischer Hauptachse um 15°

Ring ein Modellstationsnetz verteilt, dessen Übertragungsfunktionen für die Berechnung der jeweiligen Ellipsen verwendet werden.

Abbildung 7.4 zeigt die Widerstandsellipsen für eine Frequenz von 3.2Hz . Sehr deutlich ist der leitfähige Ring durch rote, lang gestreckte Ellipsen abgebildet. Sie geben den in der Struktur fließenden Kreisstrom wieder. Außerhalb der Anomalie sind die Widerstandsellipsen senkrecht zur Anomalie ausgerichtet. Innerhalb beobachtet man dagegen runde Ellipsen, die eigentlich Hinweis für einen 1D-Feldverteilung sind. Die Übertragungsfunktionen an Stationen innerhalb des gut leitenden Kreises scheinen also von der sie umgebenden 3D-Struktur nahezu unbeeinflusst. Insgesamt kann man durch die Widerstandsellipsen die ursprüngliche Leitfähigkeitsverteilung gut reproduzieren. Dadurch, dass nur die Ellipsen von Stationen in unmittelbarer Nähe zur Anomalie eine stärkere Elliptizität aufweisen, lassen sich die Geometrie und die laterale Ausdehnung der gut leitenden Bereiche realistisch abschätzen. Mit Hilfe der Farbkodierung gibt diese Darstellung ebenfalls die Widerstände der Anomalie und der Umgebung ungefähr wieder.

Die LATORRACA Ellipsen in Abbildung 7.5 lassen die Geometrie des Modells ebenfalls erkennen. Wir beobachten an Stationen direkt über dem leitfähigen Ring elektrische Ellipsen, die seinem Verlauf folgen. Obwohl auch für das Ringmodell die Ellipsen des ersten elektrischen Eigenwerts nach LATORRACA und die Widerstandsellipsen große Ähnlichkeit besitzen, wird deutlich, dass die gemeinsame Abbildung der magnetischen und elektrischen Ellipsen sehr unübersichtlich sein kann.

Stellt man jedoch die Abweichung von der Orthogonalität zwischen elektrischer und magnetischer Hauptachse (LATORRACA Skew) für Station 2 (siehe Abb. 7.1) dar, so ist eine Abweichung um über 15° zu langen Perioden zu beobachten. In den Messdaten zeigen sich zwar viel höhere Werte der LATORRACA Skew (siehe Abb. 4.9), aber immerhin besitzen Stationen über dem leitenden Ring ein ähnliches Verhalten.

Zuletzt möchte ich die EGGERS Eigenwert-Analyse auf die Modelldaten anwenden.

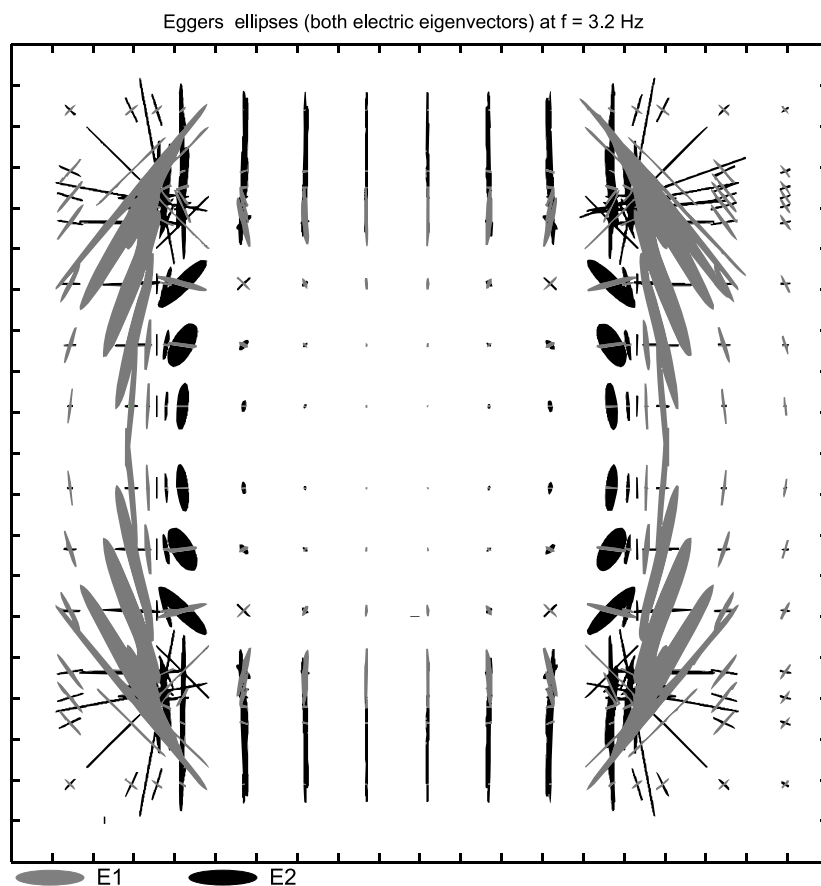


Abbildung 7.7: Die beiden elektrischen Eigenwert-Ellipsen nach EGGERS über dem Ringmodell zeigen für die Frequenz von 3.2 Hz ein undurchsichtiges Verhalten: Obwohl das Ringmodell vier Symmetrieachsen besitzt, lassen die Ellipsen auf eine Leitfähigkeitsverteilung mit lediglich einer Symmetrieachse schließen.

Abbildung 7.7 zeigt die beiden elektrischen Polarisationsellipsen. Im Vergleich zu den Widerstands- und LATORRACA-Ellipsen erhalten wir diesmal kein Abbild der Leitfähigkeitsstruktur mit all seinen Symmetrieachsen. Das vorgegebene Ringmodell besitzt je eine Symmetrieachse parallel zur x - und y -Achse sowie die beiden Winkelhalbierenden. Diese Symmetrieachsen sind auch in den beiden zuvor beschriebenen Verfahren zu erkennen. Das Abbild der EGGERS-Ellipsen besitzt aber völlig unterschiedliche Nord-Süd und Ost-West verlaufende Symmetrieachsen. Das Fehlen zweier Symmetrieachsen erschwert die Erkennbarkeit der Leitfähigkeitsverteilung enorm, besonders ist sie ja im Gegensatz zu dieser Modellstudie a priori nicht bekannt. Unklar bleibt vor allem, weshalb die Ellipsen des ersten Eigenwerts an den Nord-Süd verlaufenden Kanten so viel stärker ausgeprägt sind. An diesem Modell wird deutlich, dass die Ellipsen nach EGGERS auf eine bestimmte Leitfähigkeitsverteilung reagieren und für manche Bereiche auch die erwartete Aus-

richtung besitzen. Jedoch ist es nicht möglich, von den Ellipsen auf die zugrunde liegenden Strukturen der Leitfähigkeit zu schließen.

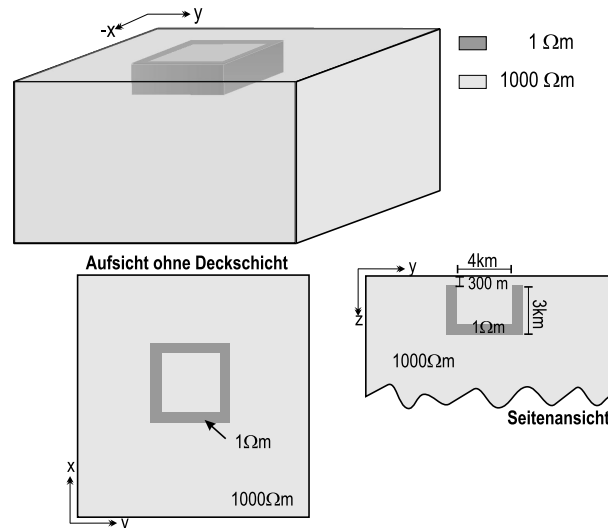


Abbildung 7.8: Das 3D-Modell besteht aus einer sehr gut leitenden Schachtel mit Boden ($1 \Omega m$) in einem Halbraum mit ($1000 \Omega m$) Widerstand. Auch innerhalb der Schachtel befindet sich schlecht leitendes Material.

Die vorangegangenen Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem Modell eines leitfähigen Rings Phasen über 90° erzeugt werden können. Es war inspiriert von der Kenntnis über die geologischen Gegebenheiten, nämlich der Ringstruktur im Norden des Messgebiets, und durch die Widerstandsellipsen, die einen Ringstrom in diesem Bereich in den Messdaten angezeigt haben. Weitere, hier nicht näher dargestellte Studien mit einem Ringmodell zeigen, dass Phasen über 90° , die vergleichbar mit denen an Station 094 sind, nur erzeugt werden können, wenn die Geometrie des Modells in gewissen Grenzen liegt. Die schlechtleitende Deckschicht von $1000 \Omega m$ über der Ringstruktur kann zwischen $250 m$ und $500 m$ variieren. Die Mächtigkeit des leitenden Rings darf bei einem gleichbleibenden Leitfähigkeitskontrast zwischen $2.5 km$ und $5.5 km$ liegen. Verändert man Durchmesser, die Seitendicke oder den Leitfähigkeitskontrast, ergibt sich, dass bei einer signifikanten Erhöhung des Kontrastes das Modell nicht mehr konvergiert. Möglich ist allerdings, gleichzeitig die Leitfähigkeit des Rings zu erhöhen und dafür die Seitendicke geringer zu wählen (oder umgekehrt), so dass der Leitwert gleich bleibt. Generell ist bei allen Geometrien eine gute Diskretisierung dieses Modells nötig, um eine numerische Stabilität zu erreichen.

Es stellt sich nun noch die Frage, welche Variationen des Ringmodells auch zu Phasen über 90° führen. Dazu möchte ich zunächst ein Ringmodell vorstellen, das einen

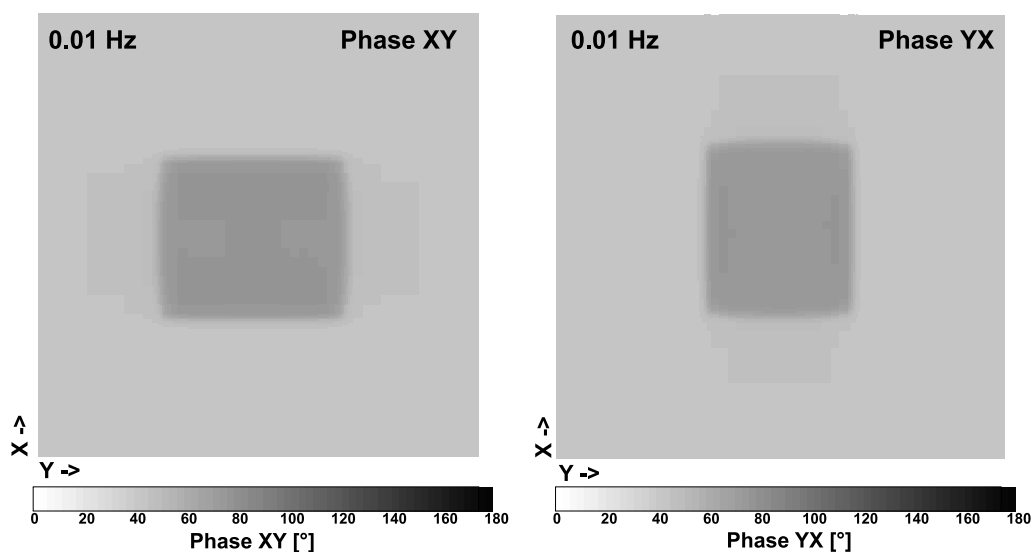


Abbildung 7.9: Im Gegensatz zu Abb. 7.2 sind für das Schachtelmodell keine Phasen über 90° für lange Perioden zu beobachten. Der leitende Boden des Modells bildet sich durch hohe Phasen im Vergleich zu der Umgebung ab.

leitenden Boden besitzt. Im folgenden bezeichne ich dieses Modell als Schachtelmodell. Es ist in Abbildung 7.8 dargestellt. Alle Dimensionen des zuvor gezeigten Ringmodells (Abb. 7.1) wurden beibehalten, lediglich in einer Tiefe von 3km ist die unterste Schicht durch einen leitfähigen Boden ($1000\Omega\text{m}$) ersetzt.

Um das Verhalten der Phasen über dem Modell für lange Perioden zu verdeutlichen, stelle ich für die Periode von 100s die Phasen beider Nebendiagonalelemente dar (Abb. 7.9). Während die kurzen Perioden vergleichbar mit denen des Ringmodells (Abb. 7.4) sind, beobachten wir bei 21.7s , dass die Phasen zwar recht hoch sind, aber innerhalb des Quadranten von $0^\circ - 90^\circ$ liegen. Der Boden der leitfähigen Schachtel bildet sich durch hohe Phasenwerte im Vergleich zu der Umgebung ab.

Die Abbildung des Modells mit den Stromellipsen (Abb. 7.10) macht den Unterschied deutlich: Für eine Frequenz von 3.2Hz deuten die Stromellipsen vergleichbar mit Abb. 7.4 eine ringförmige Leitfähigkeitsverteilung an. Sie zeigt sich in einem Ring hellgrüner Ellipsen. Auffällig ist, dass diese Ellipsen im Vergleich zur Umgebung eine geringere Elliptizität und Leitfähigkeit besitzen. Auf beiden Seiten des Kontrasts stehen die Ellipsen erwartungsgemäß senkrecht. Betrachtet man dagegen die *PNA* Ergebnisse für eine längere Periode von 21.7s , so ist der Ring verschwunden und durch ein Rechteck mit roten, runden Ellipsen ersetzt. Das Rechteck ist durch langgestreckte Ellipsen gegenüber der schlechtleitenden Umgebung abgegrenzt. Diese entsprechen den leitfähigen Seiten der Schachtel.

Zuletzt möchte ich das im Rahmen der Dekompositionsmethoden häufig verwendete

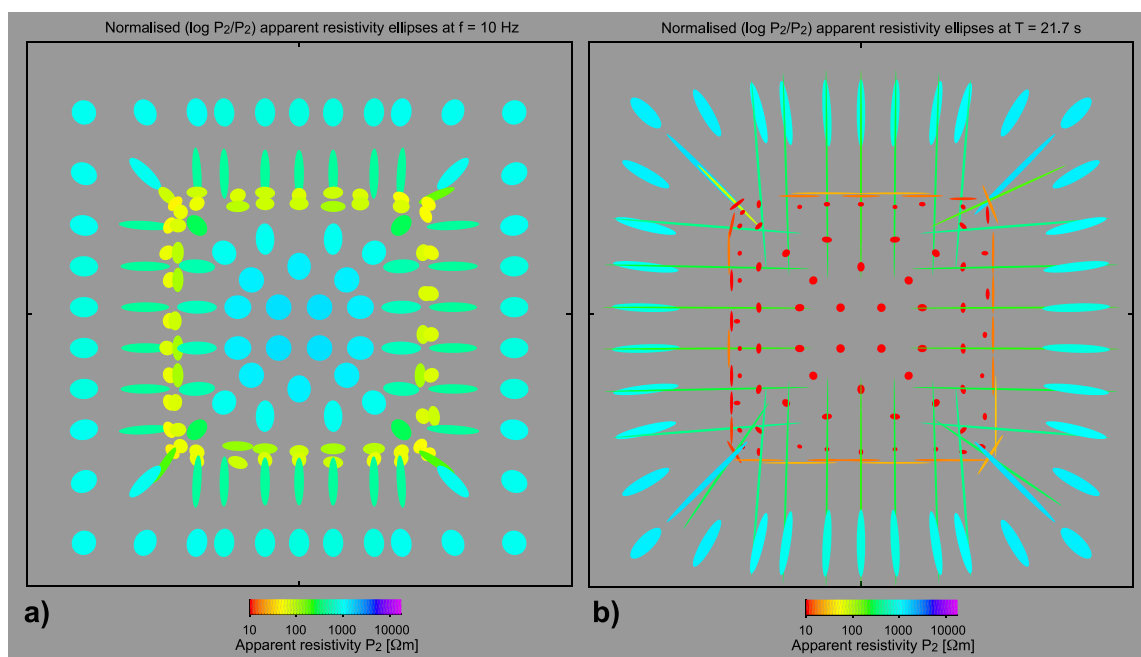


Abbildung 7.10: Widerstandsellipsen für a) 10 Hz und b) 21.7 s über der schachtelförmigen Anomalie: Für hohe Frequenzen (a) deutet sich ein leitfähiger Ring durch hellgrüne Ellipsen an. Zu längeren Perioden (b) wird der Einfluß des gut leitenden Bodens durch rote, runde Ellipsen deutlich. Zusätzlich produzieren die leitenden Seiten der Schachtel stark gestreckte Ellipsen direkt am Leitfähigkeitskontrast zur Umgebung.

Blockmodell vorstellen (Abb. 7.11). Es besitzt die gleichen Dimensionen wie das Schachtelmodell und ist mit gut leitendem Material von ($1\Omega\text{m}$) gefüllt. Es stellt also in Bezug auf die langen Perioden eine oberflächennahe, kleinräumige Inhomogenität dar, an der Ladungsansammlungen auftreten können. Um zu verdeutlichen, dass solch ein Modell keine Phasen über 90° produziert, sind in Abbildung 7.12 die Phasen der Nebendiagonalelemente für eine Periode von 100 s dargestellt. Dies ist die Frequenz, bei der in Abbildung 7.2 anomale Phasen zu beobachten sind. Für ein Blockmodell entstehen zwar hohe Phasenwerte für lange Perioden, sie verlassen aber nicht den Quadranten. Dass ein solches Modell auch nicht die beobachteten Widerstandsellipsen reproduzieren kann, zeigt Abbildung 7.13. Für eine Frequenz von 3.2 Hz ist ein gut leitendes Rechteck durch hellgrüne Ellipsen abgebildet. Diese Ellipsen sind über dem Block nahe dem Kontrast parallel orientiert und werden zur Mitte hin schnell rund. Dieses Verhalten unterscheidet sich deutlich von dem der leitenden Schachtel. Außerhalb des Rechtecks stehen die Widerstandsellipsen senkrecht zu dem Kontrast.

Vergleicht man nun die Widerstandsellipsen der hier vorgestellten drei Modelle mit

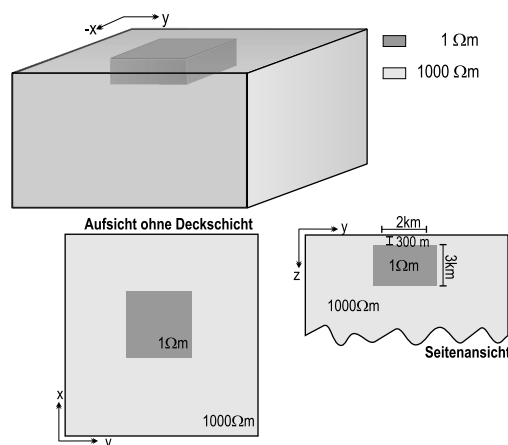


Abbildung 7.11: Dieses 3D-Modell ist das „klassische“ *static shift*- oder Dekompositionsmodell. Ein gut leitender Block ($1\Omega m$) befindet sich in einer schlecht leitenden Umgebung ($1000\Omega m$).

den beobachteten Widerstandsellipsen des Namibia-Datensatzes, so lässt sich folgern, dass die Ringstruktur im Norden aus einem leitend verbundenen Band bestehen muss. Um die beobachteten Ellipsen und Phasen zu langen Perioden erklären zu können, darf die Unterkante dieses Ringes nicht leitend verbunden sein. Außerdem zeigen die Ergebnisse des Blockmodells, dass die beobachteten 3D-Effekte nicht von kleinen Heterogenitäten erzeugt werden, wie sie für die Dekompositionsmethoden vorausgesetzt werden. Das könnte auch der Grund dafür sein, dass die auf die Daten angewendete GB Dekomposition nicht erfolgreich eingesetzt werden konnte. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch die 3D-Modellstudien die exakten Kurvenverläufe nicht modelliert werden können. Ein geometrisches Ringmodell entspricht bestimmt nicht den natürlichen geologischen Gegebenheiten. Trotzdem zeigen diese Studien, welche Modellklassen grundsätzlich die beobachteten 3D-Effekte erzeugen können. Angaben über Dimension und Leitfähigkeiten des Rings ist mit Vorsicht zu begegnen: Dadurch, dass die modellierte Anomalie stark vereinfacht ist, ist es wahrscheinlich, dass zusätzlich noch andere Leitfähigkeitsverteilungen in der Umgebung existieren, die induktiv mit der Ringstruktur gekoppelt sind und die 3D-Effekte verstärken¹.

¹Siehe hierzu Lezaeta & Haak [2001], die eine induktive Kopplung zweier leitfähiger Strukturen als mögliche Ursache für 3D-Effekte annehmen.

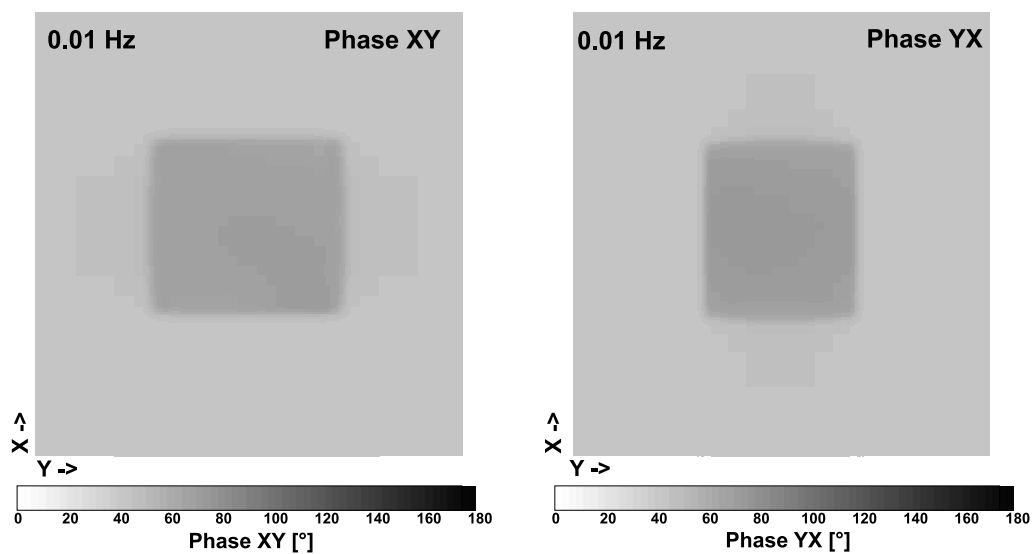


Abbildung 7.12: Für das Modell mit dem leitenden Block befinden sich die Modellphasen der beiden Nebendiagonalelemente im Quadranten von 0° bis 90° .

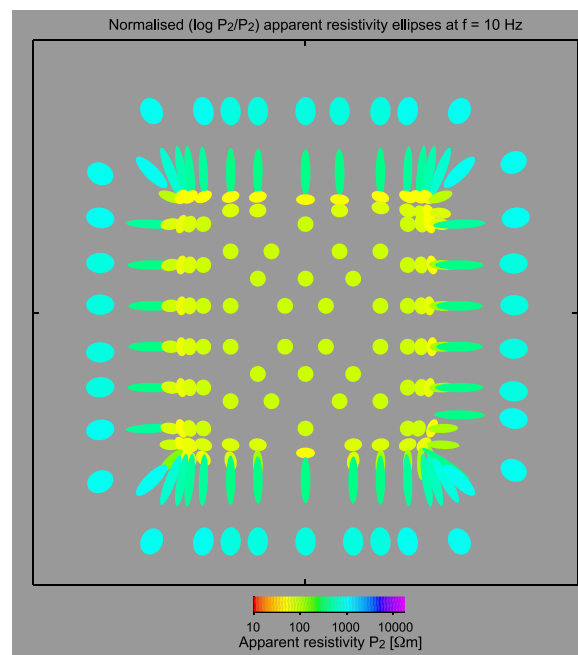


Abbildung 7.13: Widerstandsellipsen für 10 Hz über dem leitenden Block: Er grenzt sich durch hellgrüne Ellipsen von dem schlechtleitenden Umfeld ab. Extrem langgestreckte Ellipsen wie bei den beiden vorigen Modellen sind nicht zu beobachten.

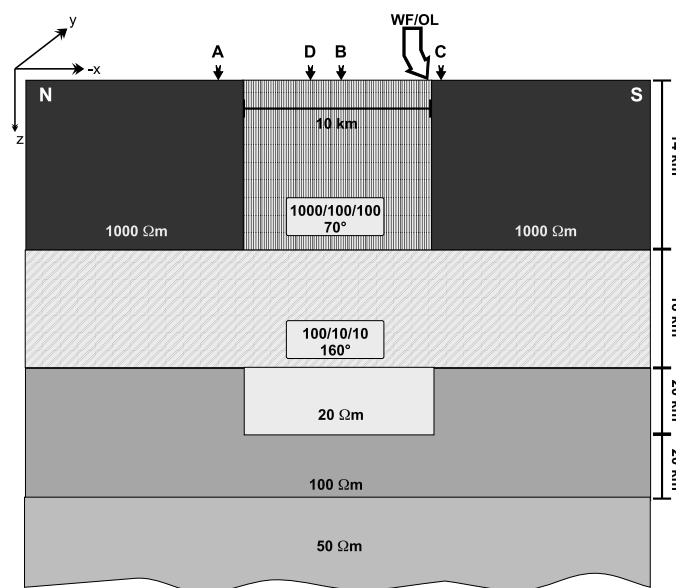


Abbildung 7.14: Das anisotrope 2D-Modell für den nördlichen und zentralen Bereich (Stationen 074-088) besteht aus einem anisotropen Block, der 14km mächtig ist und bis an die Erdoberfläche reicht, umgeben von zwei schlecht leitenden Viertelblöcken ($1000\Omega m$). Darunter schließt sich eine weitere anisotrope Schicht von 18km Mächtigkeit an. In der nächsten Schicht von $100\Omega m$ befindet sich direkt unter dem anisotropen oberflächennahen Block ein guter Leiter von $20\Omega m$. Das Modell wird von einem $50\Omega m$ Halbraum abgeschlossen.

7.2 Modellierung der 3D Effekte im zentralen Bereich

Im zentralen und nördlichen Bereich des Messgebiets beobachten wir Phasen, die den Quadranten verlassen. Die Modellstudien im vorangegangenen Abschnitt machen aber deutlich, dass Phasen über 90° bei einem Ringmodell in einem lateral stark begrenzten Gebiet auftreten. Um über einen Bereich von 10km ein solches Phasenverhalten zu erzeugen, müssen andere leitfähige Strukturen vorliegen. Die Widerstandsellipsen geben hierfür einen guten Hinweis: Im Messgebiet nördlich der WF/OL (Station 074-088) beobachten wir parallel zur Fault orientierte, langgestreckte Ellipsen. Parallele Ellipsen entstehen, wie die Modellstudien gezeigt haben, in der Nähe eines Leitfähigkeitskontrasts über dem schlechten Leiter (siehe z.B. Abb. 7.11). Ein solcher Kontrast könnte für das Messgebiet entweder im Westen oder im Osten der Profile liegen. Eine weitere Möglichkeit ist ein Modell mit leitfähigen Lamellen, die parallel zur Fault ausgerichtet sind. Eine solche Leitfähigkeitsverteilung entspräche einer Makro-Anisotropie. Diese für einen großen Bereich mit einem 3D-Modell zu modellieren, würde wieder einen sehr fein diskretisierten Modellraum

erfordern. Besitzen die leitenden Lamellen zusätzlich einen Winkel zu der Gitterausrichtung, lassen sich keine glatten Strukturen generieren, sondern sie entarten zu stufenförmigen Bändern. An ihren Ecken sind erfahrungsgemäß un stetige Übertragungsfunktionen zu beobachten. Um diese Problematik zu umgehen, verwende ich ein anisotropes 2D-Modell. Mit dem 2D-Vorwärtsmodellierungsprogramm von Pek & Verner ist es möglich, intrinsische Anisotropie in alle drei Raumrichtungen vorzugeben. Für eine detaillierte Beschreibung sei auf die Arbeit von Pek & Verner [1997] verwiesen.

Das 2D-Modell, das als Skizze in Abbildung 7.14 dargestellt ist, ist so angelegt, dass es in Profilrichtung verläuft. Die WF/OL ist um 70° im Uhrzeigersinn gegenüber der dem Profil (x-, bzw. Nord-Achse) gedreht. In der obersten Schicht befindet sich ein anisotroper Block, der bis an die Oberfläche reicht. Seine laterale Erstreckung ist vergleichbar mit der Breite des Gebiets, in dem fault-parallele, langgestreckte Widerstandsellipsen und ein Richtungswechsel in den Induktionspfeilen zu beobachten ist. Die Widerstände der anisotropen Schicht betragen in x-Richtung $100\Omega m$, in y-Richtung $1000\Omega m$ und vertikal $100\Omega m$. Die horizontale Anisotropie ist um 70° im Uhrzeigersinn gedreht, so dass die Richtung der höheren Leitfähigkeit parallel zur WF/OL verläuft. Rechts und links des $10km$ breiten anisotropen Blocks befindet sich je ein schlechtleitender Viertelraum von $1000\Omega m$. Direkt unter ihm schließt

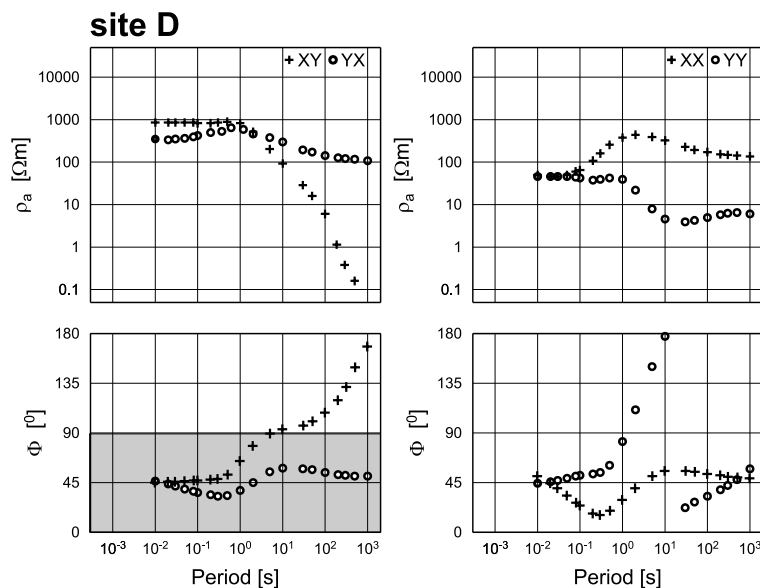


Abbildung 7.15: Die Übertragungsfunktionen über dem anisotropen Block haben über die gesamten $10km$, abgesehen von den Rändern, die gleiche Form. Station D zeigt die scheinbaren spezifischen Widerstände und Phasen für beide Haupt- (rechts) und Nebendiagonalelemente (links). Vergleichbar ist dieses Ergebnis mit dem von Station 085 des Namibia-Datensatzes (vgl. Abb. 4.5 und 4.6).

eine 18km mächtige anisotrope Schicht mit $10\Omega\text{m}$ in x -, $100\Omega\text{m}$ in y - und $10\Omega\text{m}$ in z -Richtung an. Unter dieser Schicht liegt unter dem oberflächennahen anisotropen Block eine mit $20\Omega\text{m}$ gut leitende Anomalie, eingebettet in eine 20km mächtige Schicht. Darunter schließt das Modell mit einem $50\Omega\text{m}$ Halbraum ab.

Im folgenden werden die Modellergebnisse an vier Stationen, die in Abbildung 7.14 eingezeichnet sind, mit den Daten aus Namibia verglichen. Dazu verwende ich die in Kapitel 4.3 beschriebene Station 085, deren Ergebnisse exemplarisch für Stationen des Bereichs nördlich der WF/OL sind.

Abbildung 7.15 zeigt die ρ_a - und Phasenkurven der Neben- und Hauptdiagonalelemente der Modellstation D. Die yx -Komponente des scheinbaren spezifischen Widerstands besitzt einen Kurvenverlauf, der bei etwa $300\Omega\text{m}$ zu kurzen Perioden beginnt und bei 1s sein Maximum bei ca. $1000\Omega\text{m}$ besitzt. Zu langen Perioden ist ein Abfall des Widerstands auf $100\Omega\text{m}$ zu beobachten. Die Phasenkurve ist dementsprechend unter 45° bei kurzen Perioden und über 45° bei langen Perioden. Die scheinbaren spezifischen Widerstände der xy -Komponente weisen hingegen einen steilen Abfall auf Werte von unter $0.1\Omega\text{m}$ auf. Die dazugehörigen Phasen verlassen den ersten Quadranten zu langen Perioden ab 5s . Ein Vergleich mit den ρ_a - und Phasenkurven an Station 085 des Namibia-Datensatzes zeigt starke Ähnlichkeit. Zwar ist der genaue Kurvenverlauf durch die Modellstation nicht angepaßt, doch ist das generelle Kurvenverhalten sehr gut wiedergegeben. Die Messdaten zeigen lediglich zu etwas kürzeren Perioden den steilen Abfall sowie Phasen über 90° . Auch die ρ_a - und Phasenkurven der Hauptdiagonalelemente weisen grundsätzlich ein ähnliches Verhalten auf: Die Phasen der yy -Komponente verlassen den ersten Quadranten bei etwa 1s und durchqueren den zweiten Quadranten innerhalb der Dekade zwischen 1s und 10s . Zu langen Perioden sind die Phasenwerte anstelle im dritten Quadranten wieder in den ersten Quadranten gespiegelt. Dieses Verhalten ist auch in den Messdaten zu beobachten.

Wendet man die *PNA* auf die synthetischen Ergebnisse an Modellstationen über dem Profil an, so sind auch in den Widerstandsellipsen große Ähnlichkeiten zu erkennen: Abbildung 7.16 zeigt die Widerstandsellipsen der Modellstationen für drei Frequenzen (a, c und d) sowie die der Messstationen des Hauptprofils (b). Für eine Frequenz von 8Hz entstehen über dem anisotropen Block entlang der höheren Leitfähigkeit ausgerichtete Ellipsen. Jedoch erhalten wir relativ runde Ellipsen südlich und nördlich dieses Bereichs, die nach Nordnordwest weisen. Die Ellipsen über dem anisotropen Körper besitzen für diese Frequenz eine etwas geringere Leitfähigkeit als die sie umgebenden. Ellipsen mit vergleichbarer Länge und Ausrichtung sind auch an den Messstationen für 5.56Hz zu beobachten (Abb. 7.16b). Zu kurzen Perioden (Abb. 7.16 c) sind keine auffälligen Änderungen an den Widerstandsellipsen festzustellen. Zu langen Perioden hingegen werden die Ellipsen langgestreckter und unterscheiden sich deutlich in ihrer Leitfähigkeit von denen der umgebenden

Stationen. Dieses Verhalten ist auch zu langen Perioden für die Widerstandsellipsen der Messdaten zu beobachten (vgl Abb. 6.8).

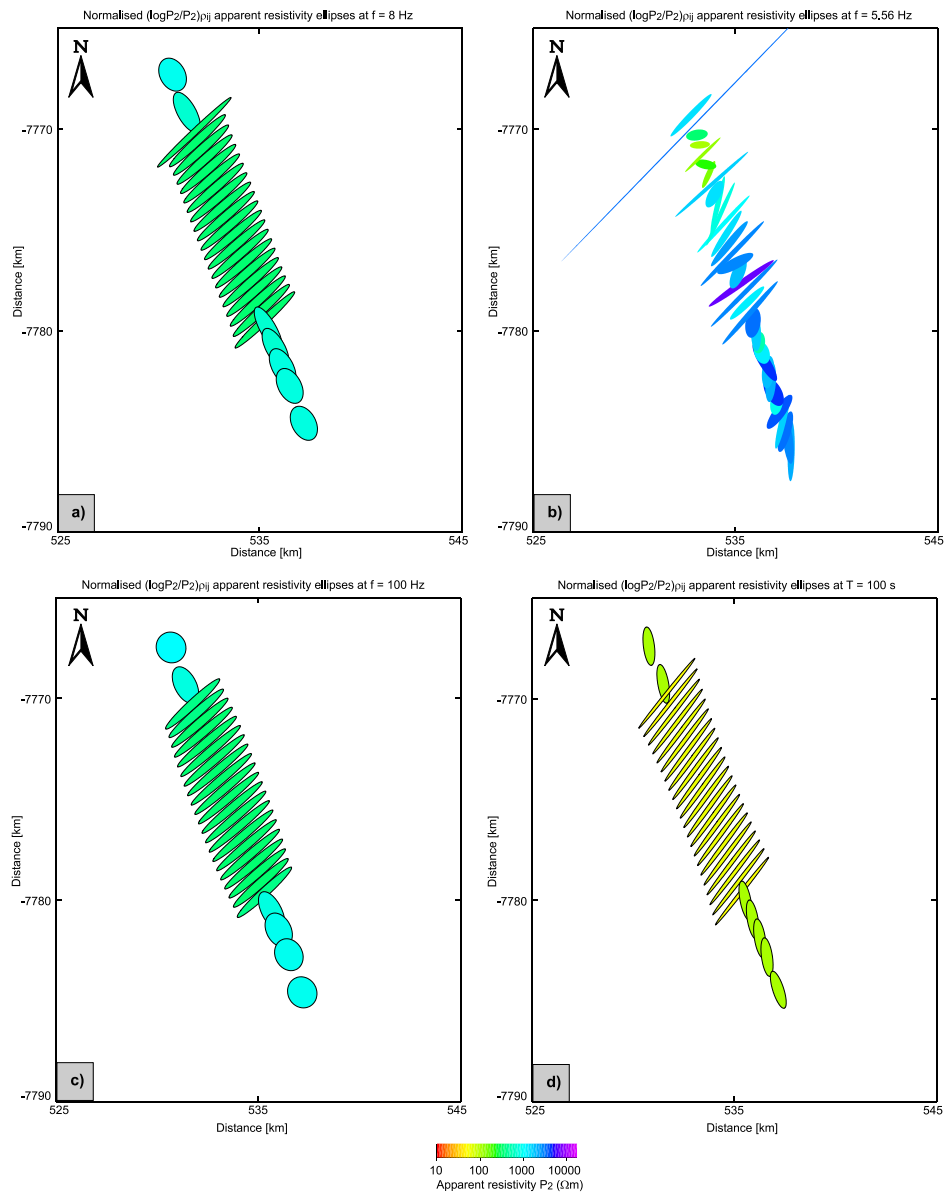


Abbildung 7.16: Die Widerstandsellipsen für das anisotrope 2D-Modell (siehe Abb. 7.14) wurden für vier Frequenzen berechnet: a) 8 Hz , c) 100 Hz und d) 0.01 Hz , bzw. 100 s . Zum Vergleich sind ebenfalls die Widerstandsellipsen des Hauptprofils für die Frequenz 5.56 Hz (b) dargestellt. Die Anisotropierichtung von 70° bezüglich der x-Achse des Modells scheint Ellipsen zu erzeugen, die die gleiche Ausrichtung wie die beobachteten Ellipsen des Hauptprofils besitzen. Bei diesem Winkel handelt es sich um die Streichrichtung der WF/OL. Weitere Erläuterungen im Text.

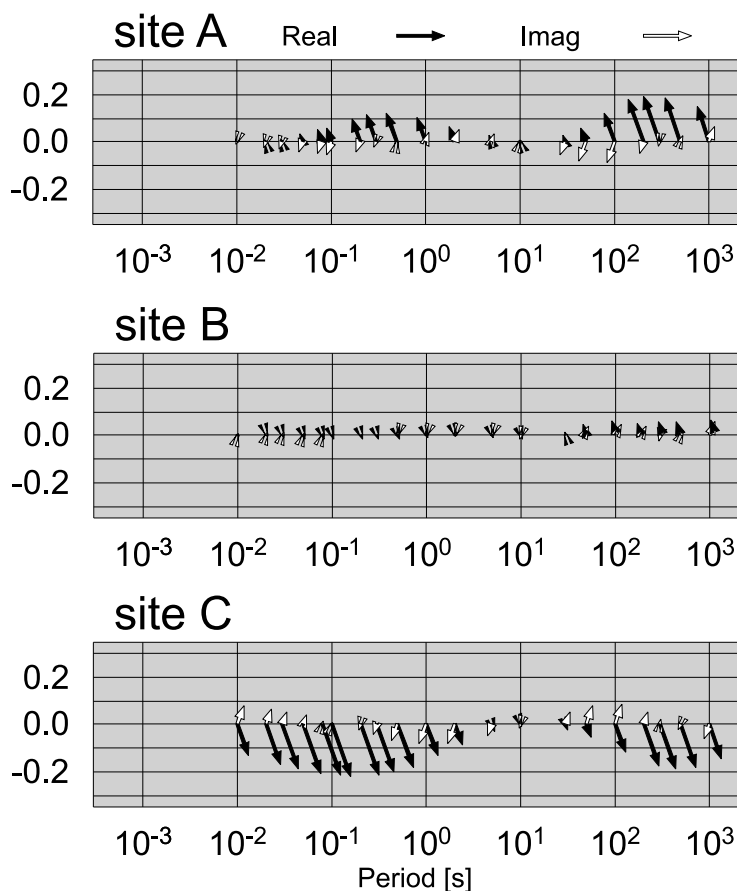


Abbildung 7.17: Induktionspfeile der Stationen A, B und C (siehe Abb. 7.14): Die Stationen nördlich (A) und südlich (C) des anisotropen Blocks besitzen Realpfeile zu kurzen Perioden, die von ihm wegweisen. In einem mittleren Periodenbereich von $5\text{ s} - 50\text{ s}$ sind keine Induktionspfeile zu beobachten, während zu langen Perioden die Induktionspfeile durch den Leitfähigkeitskontrast in 32 km Tiefe beeinflusst sind (siehe Abb. 7.14). An einer Station direkt in der Mitte sind verschwindende Induktionspfeile zu beobachten.

Dieses anisotrope Modell scheint die wesentlichen Eigenschaften der Ergebnisse an Stationen des nördlichen Bereichs gut anzupassen. Um der Frage nachzugehen, welche Strukturen des Modells hierfür notwendig sind, habe ich mehrere Studien durchgeführt, deren Resultate ich hier kurz zusammenfassen möchte. Bei diesen Untersuchungen werden die Anisotropie sowie die Lage, Dimension und Leitfähigkeit der Modellkörper verändert. Um über einen Bereich von 10 km hinweg Phasen über 90° beobachten zu können, muss die Tiefenerstreckung etwa 14 km sein. Bei geringeren Mächtigkeiten tritt dieser Effekt nicht auf. Ist dieser Block wesentlich mächtiger als 14 km , so verlagert sich der steile Abfall in der einen Widerstandskurve zu wesentlich längeren Perioden. Ebenso ist die tiefere anisotrope Schicht notwen-

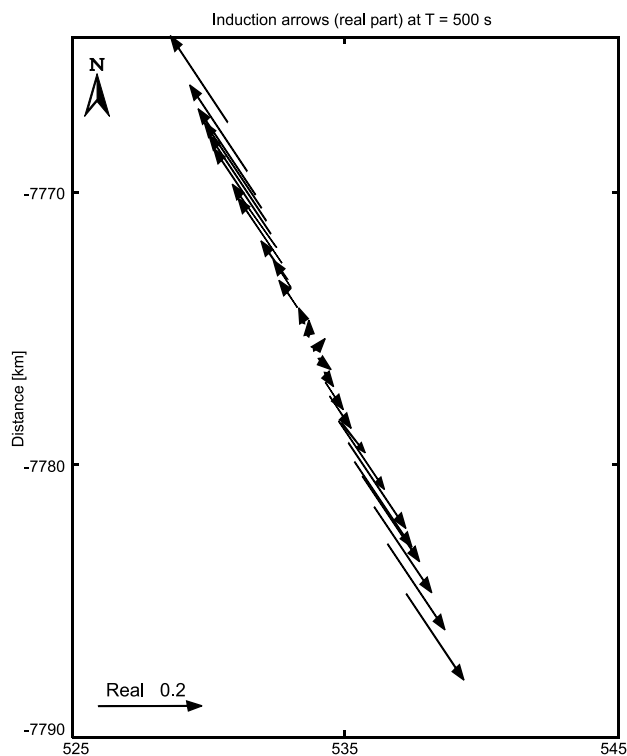


Abbildung 7.18: Eine flächenhafte Darstellung der Realpfeile für eine Periode von 500s macht deutlich, dass nördlich und südlich des zentralen Bereichs nord- und südweisende Pfeile zu beobachten sind. Abbildung 4.13 d) zeigt ein ähnliches Verhalten für die Induktionspfeile im Messgebiet.

dig, um die hohen Phasenwerte zu erzeugen. Die Richtung der höheren Leitfähigkeit muss allerdings nicht unbedingt senkrecht zu der des darüberliegenden Blocks stehen. Allerdings muss sie um mindestens 30° von der ersten abweichen, um Phasen außerhalb des zu erwartenden Quadranten zu erzeugen. Der beste Phasenverlauf im Vergleich zu Station 085 ergab sich bei einer Richtungsdifferenz von 90° . Um lediglich die MT-Ergebnisse anzupassen, ist die 20km mächtige, gutleitende Anomalie in ca. 32km Tiefe nicht nötig. Möchte man mit dem gleichen Modell gleichzeitig die Induktionspfeile zu langen Perioden anpassen, so gelingt dies nur mit der tiefen Anomalie.

Abbildung 7.17 stellt die Induktionspfeile an drei Modellstationen A, B und C vor (siehe Abb. 7.14). An Station B in der Mitte des anisotropen Blocks sind für den gesamten Periodenbereich die Real- und Imaginärpfeile verschwindend klein. Die Stationen nördlich und südlich des anisotropen Blocks besitzen zu kurzen Perioden Realpfeile, die senkrecht auf diesem Kontrast stehen und in der WIESE Konvention von ihm wegzeigen. In einem Periodenbereich von etwa $5\text{s} - 50\text{s}$ werden die In-

duktionspfeile sehr klein und deuten erst zu noch längeren Perioden hin den tiefen Leitfähigkeitskontrast an. In dem Periodenbereich, in dem die Induktionspfeile verschwinden, ist der Einfluß der anisotropen Schicht in 14km Tiefe, die durch das Fehlen eines lateralen Leitfähigkeitskontrasts keine Pfeile erzeugen kann, zu erkennen. In den Messdaten sind für diesen Periodenbereich ostweisende Pfeile zu beobachten. Diese können mit dem hier verwendeten 2D-Modell nicht erzeugt werden, da hierzu ein Leitfähigkeitskontrast parallel zum Profil nötig wäre. Eine solche Struktur ist mit der gewählten Streichrichtung nicht vereinbar.

Um jedoch die gemessenen Induktionspfeile zu langen Perioden (siehe Abb. 4.13) mit denen des anisotropen Modells besser vergleichen zu können, zeige ich abschließend eine flächenhafte Darstellung der Pfeile (Abbildung 7.18). Ähnlich den gemessenen Realpfeilen weisen die modellierten an Stationen nördlich und südlich der gutleitenden Anomalie von ihr weg.

7.3 Die Leitfähigkeitsverteilung südlich der WF/OL

Südlich der WF/OL haben wir in den Messdaten keine starken 3D-Effekte beobachten können. Auch die Widerstandsellipsen deuten durch ihre fast runde Form eher auf einen geschichteten Halbraum als auf eine komplizierte Leitfähigkeitsverteilung hin. Um dennoch einen Eindruck von den Leitfähigkeiten im Untergrund zu bekommen, verwende ich für die Stationen 061-073 eine 2D-Inversion von Rodi & Mackie [2001] (RLM2DI). An dieser Stelle möchte ich nicht auf die 2D-Inversion im Detail eingehen und verweise auf die Arbeiten von Rodi & Mackie [2001] und Schwalenberg [2000]. Für die Inversion habe ich die ins Profil gedrehten Nebendiagonalelemente verwendet. Abbildung 7.19 zeigt das Inversionsmodell mit einer akzeptablen Anpassung (rms error = 1.4, Fehler in ρ_a 5%, Fehler in der Phase 2%). Für die Modellierung wurde der Modellraum mit 133×84 Zellen diskretisiert und der Regularisierungsparameter $\tau = 10$ gewählt. Die Modellkurven für ρ_a und Phase der Stationen 061-073 sind im Anhang A5 zusammen mit den Messergebnissen dargestellt.

Für die Modellierung wurden Frequenzen von 500Hz bis 0.1Hz berücksichtigt, was also nur Aussagen über die obere Kruste zuläßt. Eine verlässliche Leitfähigkeitsverteilung zu größeren Tiefen kann grundsätzlich nicht erwartet werden, da das angepaßte Teilprofil weniger als 10km lang ist. Um zu gewährleisten, dass die elektromagnetischen Felder innerhalb des Modells zu den Rändern und die Tiefe hin abgeklungen sind, ist ein weitaus größer dimensioniertes Modell nötig. Liegt keine Überdeckung des äußeren Modellraums mit Messstationen vor, verlagert der Inversionsalgorithmus Strukturen, die zur Anpassung der langperiodischen Daten benötigt werden, in diese Bereiche. Aus diesem Grund ist die Tiefenerstreckung des Modells auf 9km begrenzt. Bei der Inversion wurden Effekte durch *static shift* (siehe Kapitel 2.2.2) als freie Parameter mit angepasst, was auch sehr hohe *static shift*-Faktoren

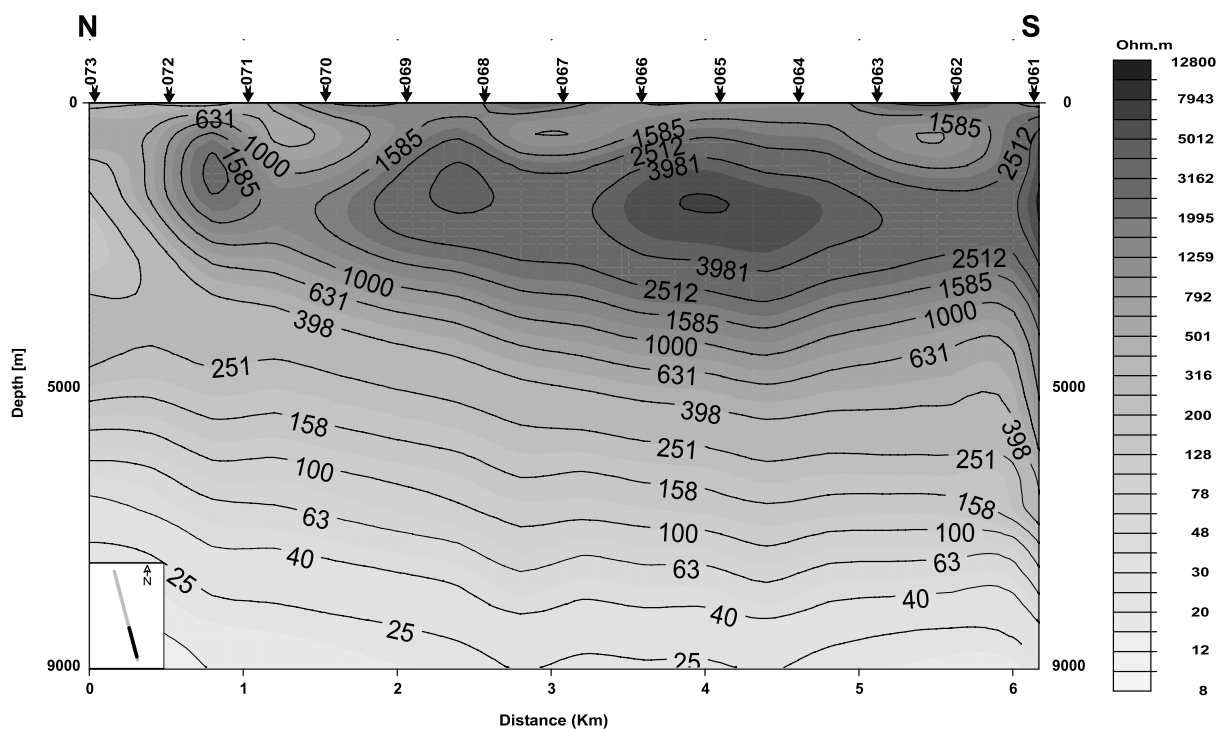


Abbildung 7.19: Um einen Eindruck von der Leitfähigkeitsverteilung südlich der WF/OL zu erhalten, wurden die Ergebnisse der Stationen 061-073, die keine starken 3D-Effekte zeigen, durch ein 2D-Inversionsmodell angepasst. Die Skizze unten links zeigt die Lage der zur Inversion verwendeten Stationen auf dem Hauptprofil. Es ergibt sich im wesentlichen ein geschichteter Halbraum mit Widerständen über $1000\Omega m$ in geringer Tiefe und Widerständen unter $100\Omega m$ in Tiefen größer als $5km$.

an einigen Stationen zur Folge hat.

Das Inversionsmodell stützt im wesentlichen die Vermutung, dass südlich der WF/OL eine einfachere Verteilung der Leitfähigkeit vorliegen muss. Unter einer schlechtleitenden Deckschicht von über $1000\Omega m$ befindet sich eine ausgedehnte gutleitende Struktur mit Widerständen unter $100\Omega m$. Zu größerer Tiefe hin wird der Untergrund immer besser leitend. Lediglich Stationen in direkter Nähe der WF/OL zeigen schon deutlich den nach Norden hin beginnenden anomalen Bereich (vgl. Abschnitt 7.2). Dieses Leitfähigkeitsmodell stellt allerdings nur eine Näherung dar, die durchaus nicht vernachlässigbaren Hauptdiagonalelemente bleiben dabei unberücksichtigt.

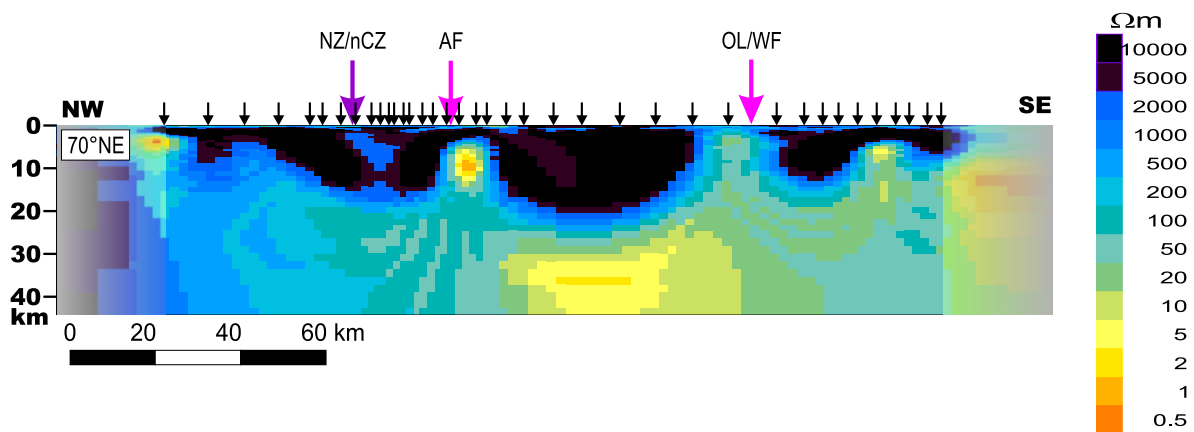


Abbildung 7.20: 2D-Inversionsmodell der gesamten Traverse von RITTER (pers. Mitteilung). Eine der wesentlichen Strukturen dieses Modells der gesamten Erdkruste ist eine sehr gut leitende mittlere Kruste. Außerdem sind oberflächennahe schmale, subvertikale, gut leitende Anomalien zu beobachten, die mit großen Scherzonen des Damara Gürtels zusammenfallen.

7.4 Diskussion

Die in diesem Kapitel beschriebenen Modellstudien führen zwar nicht zu einer hochauflösenden Abbildung der Leitfähigkeitsstruktur im Messgebiet, doch sie liefern wesentliche Erkenntnisse über die WF/OL.

Scherzonen sind häufig leitfähiger als das umgebende Gestein, da sie Fluide, Sulfide oder Graphit enthalten können [Unsworth *et al.*, 1997, Echternacht *et al.*, 1997, ELEKTB Group, 1997, Jones *et al.*, 1992]. Dies impliziert eine subvertikale Leitfähigkeitsanomalie, wie sie zum Beispiel an der San Andreas Fault [Unsworth *et al.*, 1997] oder an der West Fault in Chile [Hoffmann-Rothe, 2002] zu beobachten sind. Ähnlich zeigt sich auch die WF/OL, wenn man die Stationen der langen Traverse interpretiert. Das Inversionsmodell [Ritter, pers. Mitteilung] ist in Abbildung 7.20 dargestellt. Mit einer dichten Vermessung jedoch stellt sich die WF/OL nicht mehr als gutleitende subvertikale Anomalie dar, sondern als die südliche Begrenzung eines anomalen, etwa 10 km breiten Bereichs. Er ist als anisotroper Block mit einer erhöhten Leitfähigkeit parallel zur WF/OL modelliert worden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Gesteine in diesem Gebiet intrinsisch anisotrop sein müssen, wie es durch das 2D-Modellierungsprogramm angenommen wird. Dieses Modell ist vielmehr als Ersatzmodell für eine Makro-Anisotropie zu betrachten [siehe auch Eisel & Haak, 1999]. Trotzdem stellt sich die Frage nach der Ursache der beobachteten Leitfähigkeitsanomalie und weshalb sich eine erhöhte Leitfähigkeit parallel zur WF/OL zeigt. Zuvor habe ich mögliche Leitfähigkeitsmechanismen, die für eine Scherzone in Frage kommen, aufgezeigt. Im Messgebiet wurden beispielsweise Marmore mit einem hohen Graphitanteil gefunden, weshalb anzunehmen ist, dass sie für die

Leitfähigkeitsanomalien verantwortlich sind. Da es sich um eine fossile Scherzone handelt, ist eine hydrothermale Alterationszone im Bereich der Fault auszuschließen. Besonders bei Scherprozessen können Rahmenbedingungen herrschen, die zur Entstehung von Graphit beitragen können [Kontny *et al.*, 1997]. Durch weitere Scherbewegungen kann dieser zu dünnen verbundenen Graphitbahnen verschmieren [ELEKTB Group, 1997]. Vorstellbar wären also mit Graphit angereicherte Scherbahnen, die parallel zur WF/OL verlaufen. Es handelt sich somit bei der WF/OL nicht nur um eine separate Scherbahn, sondern um eine ausgedehnte Scherzone mit vielen graphitisierten Scherbahnen. Diese muß zudem mindestens 14km tief reichen, um die beobachteten Phaseneffekte zu erklären. Die Tiefenerstreckung ist vergleichbar mit der der subvertikalen Anomalie im 2D-Inversionsmodell der großen Traverse (Abb 7.20).

Das Anisotropiemodell besitzt in 14km Tiefe eine weitere anisotrope Schicht. Sie ist nötig, um Phasen über 90° zu erzeugen. Eine geologische Interpretation dieser Schicht fällt allerdings schwer. Da ihre Anisotropie ein für das Damara Orogen untypisches Streichen besitzt, bzw. die Streichrichtung nicht aufgelöst werden kann, könnte diese Schicht eventuell durch ein geändertes Spannungsfeld erzeugt worden sein. Denkbar wäre auch, dass diese anisotrope Schicht eine Abscherungsfläche (*detachment*) widerspiegelt, die bereits zu pan-afrikanischen Zeiten aktiv war und seither (mehrfach) reaktiviert worden sein könnte. Wichtig ist jedoch, dass diese Schicht geringere Widerstände als die sich darüber befindlichen Strukturen besitzt. Diese erhöhten Leitfähigkeiten ab einer Tiefe von 14km (siehe Abb. 7.14) stimmen gut mit denen des Gesamtmodells überein. Anzunehmen ist jedoch, dass eine isotrope 2D-Modellierung die Leitfähigkeiten in größerer Tiefe etwas überschätzt, wenn zum Beispiel der große Widerstandsabfall, hervorgerufen durch die Anisotropie, mit einem isotropen Modell erklärt werden soll.

Insgesamt gesehen zeigt sich für den Bereich südlich wie auch nördlich der WF/OL, dass die mittlere Kruste gut leitend ist.

Abbildung 7.21 präsentiert in Form eines Cartoons eine Zusammenstellung der leitfähigen Strukturen im Messgebiet. Sie zeigt die Ringstruktur aus graphitisierten Marmoren im Norden als leitfähige Anomalie. Eingebettet ist sie in eine breite, anomale Zone mit erhöhter Leitfähigkeit parallel zur WF/OL, deren Oberflächenlage durch Satellitenaufnahmen bestimmt wurde. Eine weitere, wichtige Struktur ist die im wesentlichen Nord-Süd verlaufende Anomalie im Westen des Messgebiets. Sie ist in den Widerstandsellipsen zu erkennen und wahrscheinlich für die ostweisenden Induktionspfeile verantwortlich. Mit Fragezeichen sind all die Bereiche gekennzeichnet, für die keine klaren Aussagen getroffen werden können. Unklar ist, wie weit sich die anomale Zone nach Osten und Westen weiter fortsetzt. Um diese Frage beantworten zu können, wären weitere Stationen in diesem Gebiet nötig. Aufgrund zu geringer Stationsüberdeckung kann die Anomalie im Westen ebenfalls nicht weiter verfolgt werden. Auch ob sie sich südlich der WF/OL fortsetzt, kann mit dem hier vorliegenden Datensatz nicht geklärt werden.

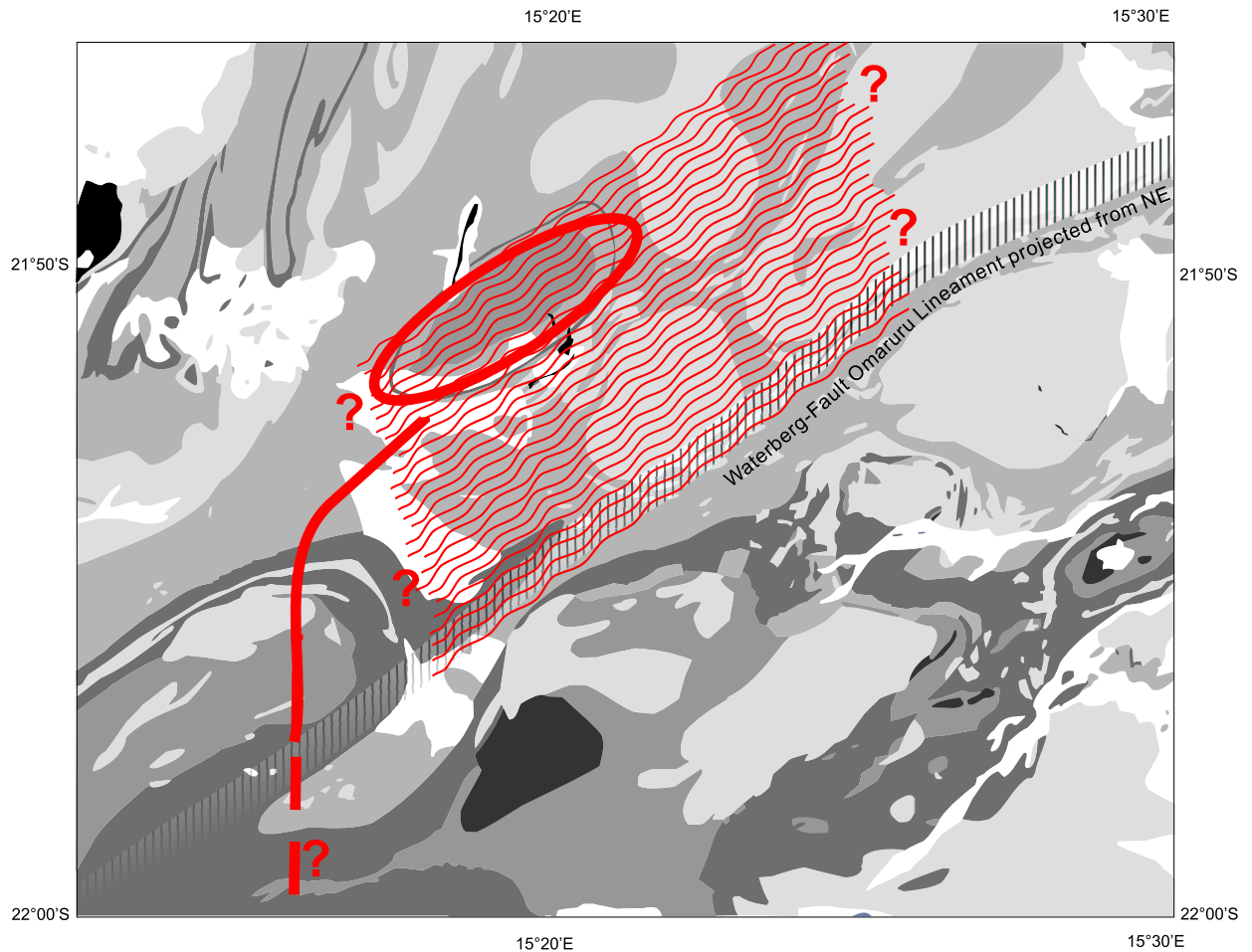


Abbildung 7.21: Zusammenstellung der leitfähigen Strukturen in der Umgebung der WF/OL: Im Norden zeichnet sich eine Ringstruktur mit graphitisierten Marmoren als Anomalie ab. In einem etwa 10km breiten Gebiet nördlich der WF/OL beobachten wir eine erhöhte Leitfähigkeit parallel zur Fault. Diese könnte durch graphitisierte Scherbahnen hervorgerufen werden. Im Westen des Messgebiets verläuft eine vorwiegend Nord-Süd streichende Anomalie. Die Fragezeichen deuten Bereiche an, für die die Stationsdichte nicht ausreicht, um verlässliche Aussagen über den Untergrund zu treffen.