

Kapitel 6

Anwendung der Abbildungsmethoden

Im vorangegangenen Kapitel sind drei Abbildungsmethoden vorgestellt worden: die EGGERS' *Eigenstate Analysis*, die LATORRACA *Singular Value Decomposition* und die *Propagation Number Analysis*. Eine Darstellung der Eigenwert-, bzw. Widerstandsellipsen für einen speziellen Impedanztensor hat gezeigt, dass sie grundsätzlich vergleichbare Ergebnisse liefern. Dieser Beispiel-Impedanztensor aus der Literatur hatte jedoch keinen Bezug zu einer bestimmten Leitfähigkeitsverteilung, so dass zwar die Methoden untereinander verglichen, aber keine Eigenschaften der Ellipsen in der Umgebung eines Leitfähigkeitskontrasts untersucht werden konnten. Anhand eines 2D-Modells soll nun das Verhalten der Eigenwert-, bzw. Widerstandsellipsen in Bezug auf eine einfache Leitfähigkeitsverteilung verdeutlicht werden. Um ein intuitives Abbildungsverfahren zu erhalten, ist es notwendig, die physikalische Information in eine graphische umzusetzen. Wichtig wird in diesem Zusammenhang vor allem, wie die Form und Ausrichtung der Ellipsen zu interpretieren sind.

Mit dem Wissen, wie sich die Widerstands- und Polarisations-Ellipsen über einem Leitfähigkeitskontrast verhalten, soll dann die Leitfähigkeitsverteilung über der WF/OL anhand der unterschiedlichen Abbildungsmethoden diskutiert werden. Dazu ist vor allem auch eine Abschätzung der Fehler notwendig.

6.1 Die Abbildung eines 2D Untergrundes durch Ellipsen

Anhand eines 2D Modells und seiner Modellantworten möchte ich nun die unterschiedlichen Abbildungsverfahren miteinander vergleichen. Über dem Modell wird ein synthetisches Stationsnetz verteilt und an diesen Stellen die aus dem Impedanztensor berechneten Ellipsen abgebildet. Anhand der Form und Größe lassen sich wesentliche Eigenschaften der Ellipsen bei einem lateralen Leitfähigkeitskontrast studieren.

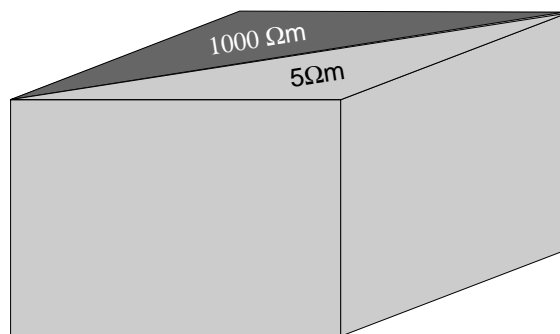


Abbildung 6.1: Zum Testen der unterschiedlichen Abbildungsverfahren wird ein 2D-Modell verwendet, das eine 45° Streichrichtung besitzt

Das in Abbildung 6.1 dargestellte 2D-Modell besteht aus zwei aneinander grenzenden Blöcken mit Widerständen von $5\Omega m$ und $1000\Omega m$. Gegenüber der Nordrichtung besitzt der Leitfähigkeitskontrast ein Streichen von 45° . Obwohl es sich eigentlich um ein 2D-Modell handelt, sind die Modellantworten mit dem 3D-Vorwärtsalgorithmus von Mackie *et al.* [1993] berechnet worden, um eine flächenhafte Überdeckung zu erhalten. Im folgenden werde ich für drei Frequenzen ($100Hz$, $1Hz$ und $0.022Hz \hat{=} 45s$) die aus den Impedanztensoren berechneten Ellipsen zeigen. Um durch die 2D-Erweiterung des inneren 3D-Modellblocks Randeffekte ausschließen zu können, werden Stationen in der Mitte des Modells gewählt. Das Modell ist mit einem $200m$ -Gitter diskretisiert und besitzt eine Tiefenerstreckung von etwa $60km$, darunter schließt sich ein $100km$ mächtiger, homogener Halbraum mit $100\Omega m$ an. Die dargestellten Stationen haben Abstände von ca. $2km - 2.5km$.

Im vorangegangenen Kapitel ist erläutert worden, wie sich aus einem Impedanztensor und seinen Eigenwerten die Form einer Ellipse ergibt (siehe Abbildung 5.4), so dass an dieser Stelle darauf verzichtet wird. Das Zentrum der Ellipse befindet sich an den Lokationen der synthetischen Stationen über dem 2D-Modell.

Abbildung 6.2 (a - c) zeigt das erste Eigenvektorpaar nach der EGGERS' Eigenwert-Analyse. Schwarz stellt die Ellipse des elektrischen, grau die des magnetischen Eigenvektors dar. Das erste Eigenvektorpaar gibt das maximale elektrische Feld an, das bei einer gegebenen Leitfähigkeitsverteilung von einem Einheitsmagnetfeld produziert werden kann. Im 2D Fall entarten offensichtlich die elektrischen und magnetischen Ellipsen zu Linien.

Die elektrischen Ellipsen auf dem schlechtleitenden Viertelraum links oben sind lang und stehen senkrecht auf dem Kontrast. Auf dem guten Leiter rechts unten werden die Ellipsen klein und liegen parallel zum Leitfähigkeitskontakt. Die Größe der Ellipse steht also in Zusammenhang mit der Leitfähigkeit des Untergrundes. Erwartungsgemäß zeigt sich, dass die magnetischen Ellipsen immer senkrecht zu den elektrischen stehen. Betrachtet man die Abbildungen bei längeren Perioden, so ist

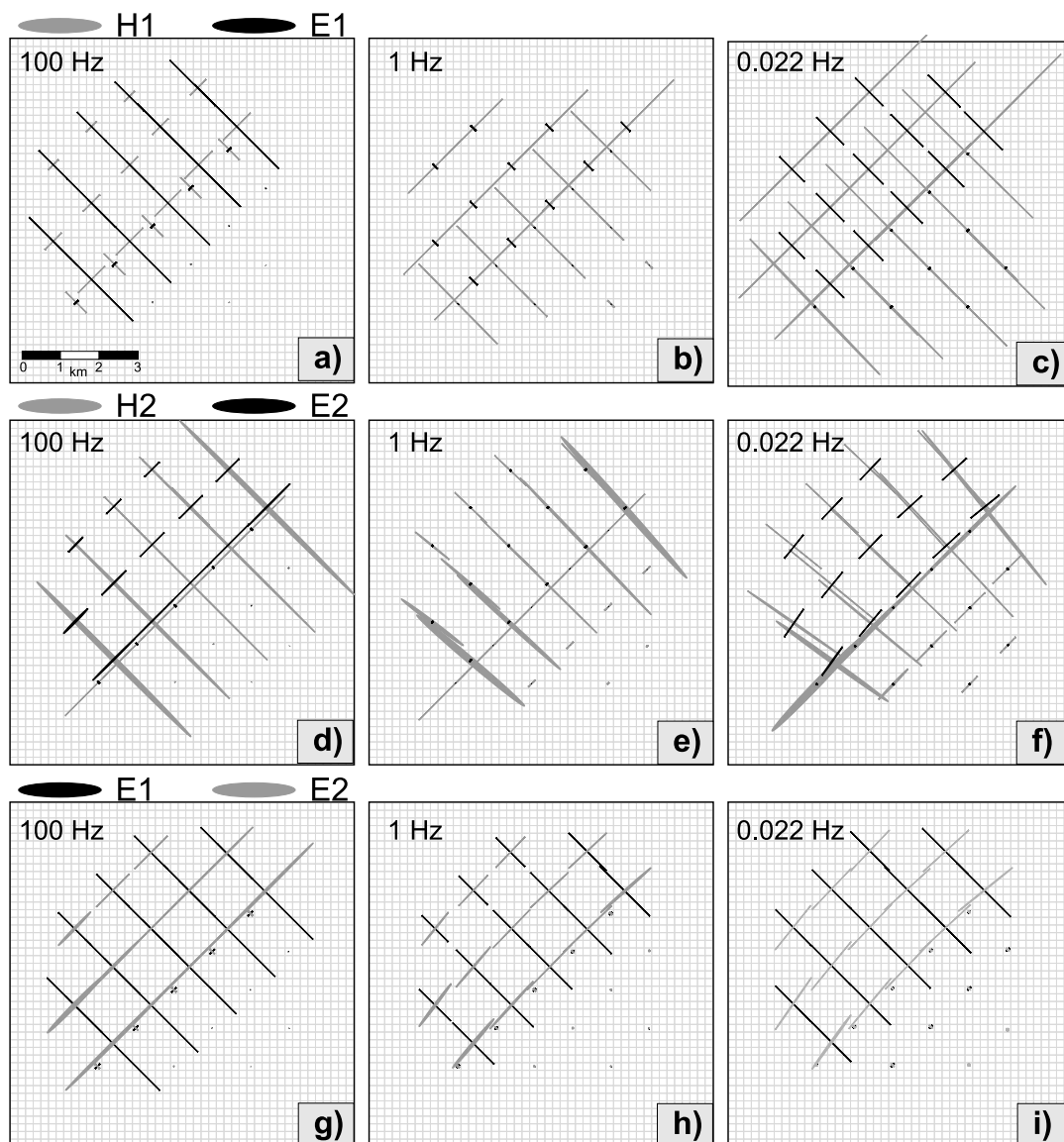


Abbildung 6.2: An jeder Modellstation werden die Eigenwerte nach der EGGERS Eigenwert-Analyse in Form von Ellipsen dargestellt. Die obere Reihe (a - c) zeigt das erste Eigenvektorpaar (elektrisch in schwarz, magnetisch in grau) für drei verschiedene Frequenzen. Der 45° streichende Leitfähigkeitskontrast zeigt sich im Drehen der Ellipsen von senkrecht zum guten Leiter orientiert nach parallel zu ihm verlaufend. Einheitliches Verhalten diesbezüglich zeigen jeweils die Stationen im Dreieck links oben (schlechter Leiter) und rechts unten (guter Leiter). Das zweite Eigenvektorpaar ist in der mittleren Reihe (d - f) dargestellt. Die untere Reihe (g - i) zeigt die beiden elektrischen Polarisationsellipsen jeweils für drei Frequenzen.

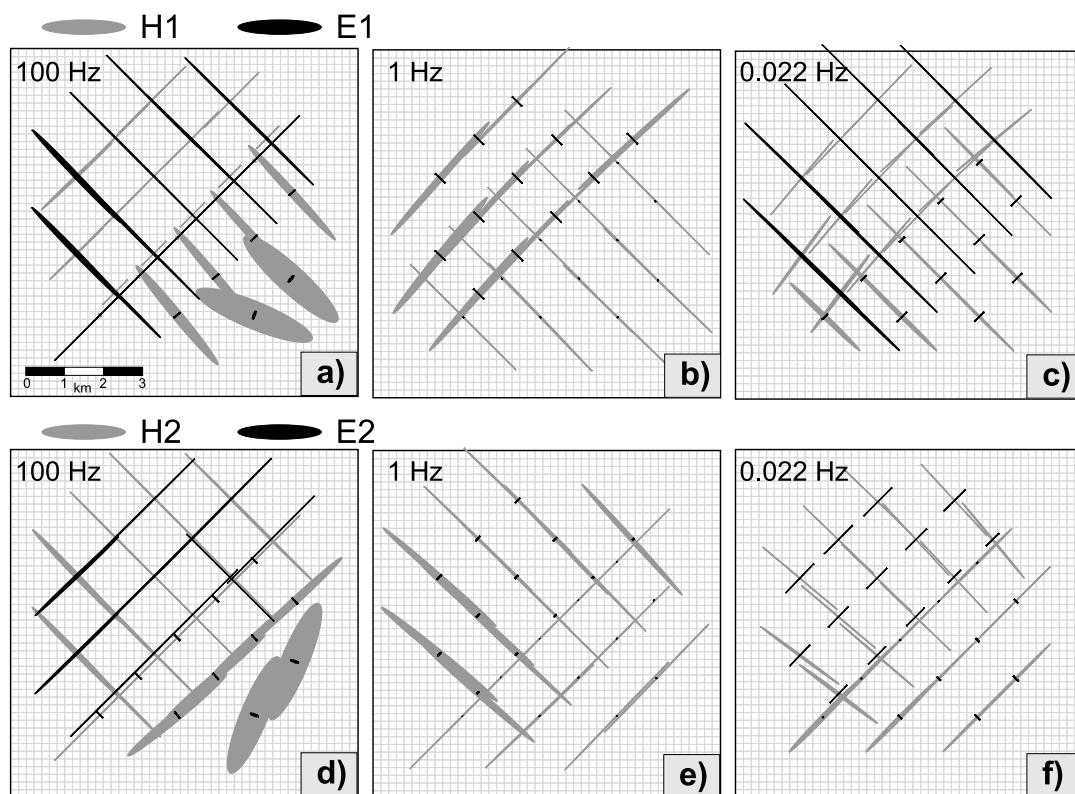


Abbildung 6.3: Für die gleichen Modellstationen und Frequenzen sind die beiden LATORRACA SVD Ellipsenpaare dargestellt. Auch sie geben den Leitfähigkeitskontrast wieder und sind in ihren Eigenschaften vergleichbar mit denen aus Abb. 6.2. Für die Frequenz von 100 Hz (a und d) zeigen die Ellipsen an Stationen über dem guten Leiter (Bereich rechts unten) Instabilitäten. Weitere Erläuterungen sind dem Text zu entnehmen.

der Leitfähigkeitskontrast durch die Länge und Richtung der Ellipsenhauptachse erkennbar.

Da die Eigenwerte aus den Impedanztensoren berechnet werden, beinhalten sie eine starke Frequenzabhängigkeit. Aus diesem Grund müssen die Abbildungen je nach Frequenz unterschiedlich skaliert werden. Das bedeutet aber, dass die Größe der Ellipsen keine aussagekräftige Information liefert, wenn die dazugehörige Frequenz unbekannt ist. Außerdem ist es zum Teil aufgrund starker Größendifferenzen nötig, die magnetischen und elektrischen Ellipsen unterschiedlich nachzuskalieren. Die Richtung der Ellipsen, die in diesem Zusammenhang die wichtigere Eigenschaft ist, bleibt durch diese Skalierung unbeeinflusst.

Die Ellipsen sind, da sie aus den Eigenwerten der Impedanztensoren entstehen, nicht mit einer anschaulichen Größe wie dem Widerstand vergleichbar. Man erhält vor allem geometrische Aussagen über eine Leitfähigkeitsverteilung. Geht man je-

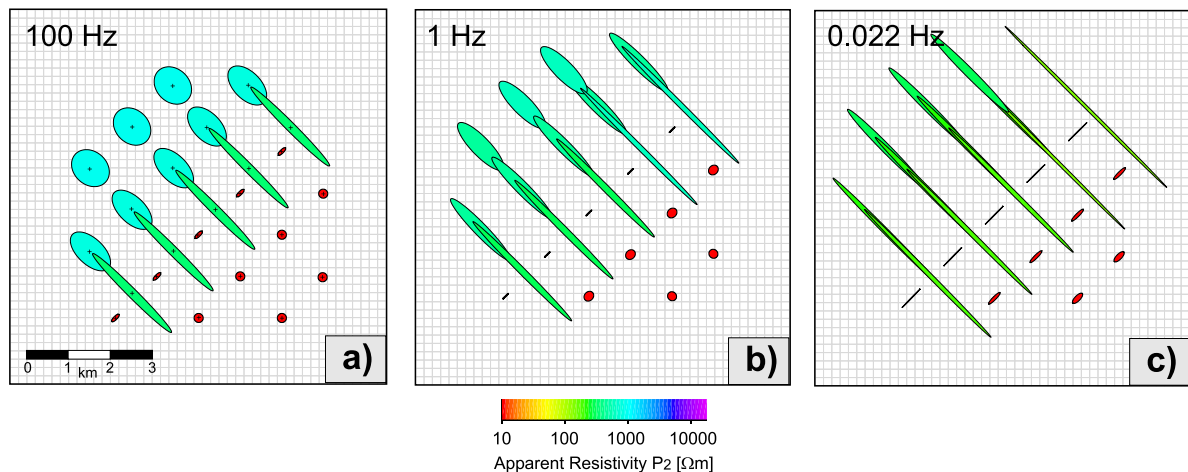


Abbildung 6.4: Die Widerstandsellipsen nach der *Propagation Number Analysis* für das gleiche Stationsnetz ergeben ein Abbild der Leitfähigkeitsverteilung. Farbkodiert ist die Determinante des Widerstandstensors, wodurch eine Zuordnung der Leitfähigkeiten im Untergrund möglich wird.

doch davon aus, dass die beiden Eigenwerte eine maximale und minimale Impedanz wiedergeben, so lassen sich aus ihnen Hauptwiderstände (*principal resistivities*) berechnen [Eggers, 1982].

Die mittlere Reihe (d - f) zeigt das zweite Eigenvektorpaar. Dieses gibt das minimale elektrische Feld, das durch das Einheitsmagnetfeld erzeugt wird, wieder. Im Vergleich zum ersten Eigenvektorpaar stehen die elektrischen und magnetischen Ellipsen, da es sich um einen 2D Untergrund handelt, senkrecht zu den ersten. Bei einer komplizierten Leitfähigkeitsverteilung kann das zweite Ellipsenpaar einen beliebigen Winkel zum ersten besitzen. Dagegen stehen die magnetischen und elektrischen Hauptachsen immer rechtwinklig aufeinander. Deshalb ist es sinnvoll, die beiden elektrischen Polarisierungen in einer Darstellung zu zeigen. Dies gibt die untere Reihe in Abbildung 6.2 (g - i) wieder. Wie erwartet, stehen die beiden elektrischen Polarisierungen für den 2D-Untergrund senkrecht aufeinander. Darüber hinaus verliert das Skalierungsproblem bei der Darstellung der beiden elektrischen Ellipsen an Bedeutung.

Zum Vergleich stellt Abbildung 6.3 für dieselben Modellstationen die durch die LA-TORRACA *SVD* erhaltenen Eigenwerte in Form von Ellipsen dar. Die obere Reihe gibt das erste Paar der charakteristischen elektrischen und magnetischen Vektoren wieder. Grundsätzlich ergeben sie ein ähnliches Bild wie die Ellipsen nach EGGERS. Da es sich bei diesem Modell um eine 2D Leitfähigkeitsverteilung handelt, stehen elektrische und magnetische Ellipsen senkrecht aufeinander. Im Gegensatz zu EGGERS' Ellipsen gilt diese Beziehung nicht per definitionem, sondern ist ein Hinweis für eine 2D-Feldverteilung. Die elektrischen Ellipsen über dem schlechten

Leiter sind größer und senkrecht zum Leitfähigkeitskontrast orientiert, während sie auf dem guten Leiter kleiner und parallel zu ihm ausgerichtet sind. Die elektrischen und magnetischen Ellipsen des zweiten Vektorpaars (d - f) sind grundsätzlich senkrecht zu den ersten. Aus diesem Grund bringen die Abbildungen der unteren Reihe keine wesentlichen neuen Informationen bezüglich der Leitfähigkeitsverteilung. Da diese Ellipsen ebenfalls aus den Impedanztensoren hergeleitet sind, sind auch sie stark frequenzabhängig, was eine sinnvolle Skalierung nötig macht.

Die beiden hochfrequenten Abbildungen (a und d) zeigen besonders auf dem guten Leiter einige Instabilitäten. Die Ellipsen weichen von der für einen 2D Untergrund üblichen langgestreckten Form ab und haben eine Hauptachse, die nichts mit den gegebenen Leitfähigkeitsverteilung zu tun hat. Auch LaTorraca *et al.* [1986] beschreiben bei ihren Modellrechnungen, dass die Ellipsen für hohe Frequenzen und an Stationen, die nicht direkt über dem Leitfähigkeitskontrast liegen, ein „unregelmäßiges Verhalten“ aufweisen. Zu langen Perioden nimmt dieses Phänomen deutlich ab, während bei der Periode von 45s der Einfluß der 2D-Erweiterungen um den 3D-Modellblock als Abweichung von der Streichrichtung andeutungsweise zu erkennen sind.

Die LATORRACA Skew oder die Abweichung von der Orthogonalität ist für einen 2D Untergrund und für den gesamten betrachteten Periodenbereich Null. Dies ist zu erwarten und gleichbedeutend damit, dass, wie in diesem Beispiel erkennbar ist, die elektrischen und magnetischen Hauptachsen senkrecht aufeinander stehen.

Die Ellipsen, die ich aus der *Propagation Number Analysis* erhalte, stellen im Gegensatz zu den vorherigen Abbildungen eine anschauliche Größe, den Widerstand, dar. Das Inverse des spezifischen Widerstands, die Leitfähigkeit, verknüpft Ströme mit elektrischen Feldern. Die gewonnenen Ellipsen können demzufolge als Feldellipsen bezeichnet werden. Da Felder aber im allgemeinen eher eine abstrakte Größe sind, ist es anschaulicher, bei diesen Ellipsen von Widerstandsellipsen oder Stromellipsen zu sprechen und sie als Indikatoren von Vorzugsrichtungen der Ströme zu verstehen¹. Der Vergleich mit Strömen ist solange sinnvoll, wie wir langgestreckte Ellipsen erhalten, kreisförmige Ellipsen dagegen sind so zu interpretieren, dass es keine Vorzugsrichtung von Strömen gibt.

Während man bei den vorangehend beschriebenen Verfahren jeweils mehrere Abbildungen erhält, so gibt es bei der Darstellung des Widerstandstensors pro Frequenz lediglich eine Abbildung. Sowohl bei der Eigenwert-Analyse als auch bei der SVD ergeben sich Vektorpaare, deren Relation zueinander eine wesentliche Rolle spielt. Die Widerstandsellipsen entstehen zwar aus dem Impedanztensor, in den das magnetische und elektrische Feld eingehen, dargestellt wird jedoch nur der Widerstand, bzw. im übertragenen Sinn der damit verbundene Strom. Durch die Farbkodierung der Ellipsen mit der Determinante des Widerstandstensors (siehe Gl. (5.48)) erhält man sofort einen quantitativen Eindruck von den Leitfähigkeiten. Die Fläche jeder

¹Dabei sollte man beachten, dass elektrische Felder und Ströme unterschiedlichen Randbedingungen gehorchen.

einzelnen Ellipse ist auf die Determinante des Widerstandstensors (P_2) normiert, womit gewährleistet ist, dass alle Ellipsen deutlich zu erkennen sind. Sowohl die Ellipsen als auch der Widerstand sind unabhängig vom verwendeten Koordinatensystem, da sie aus Invarianten berechnet werden.

Abbildung 6.4 zeigt die Widerstandsellipsen für das 2D-Modell. Auf dem schlechten Leiter (im Ausschnitt oben links) sind sie auf den guten Leiter zu gerichtet, so wie in der Analogie auch Ströme auf gut leitfähige Bereiche zufließen. Innerhalb eines guten Leiters beobachtet man eine höhere Stromdichte, bzw. Ströme, die diesem Leiter folgen, was sich durch langgestreckte und parallel zur Leitfähigkeitsgrenze ausgerichtete Ellipsen ausdrückt. Die Farbcodes bilden sehr gut die tatsächliche Widerstandsverteilung ab. Dadurch, dass die Widerstandsellipsen in einer Entfernung von ca. $3km$ zum Kontrast kreisförmig werden, deuten sie lokal eindimensionale Verhältnisse an. Dieses Verhalten kann also dazu benutzt werden, die Erstreckungen von leitfähigen Strukturen abzuschätzen. Erst mit langen Perioden und einem größeren Induktionsraum zeigen auch entferntere Ellipsen den Leitfähigkeitskontrast an.

6.2 Anwendung der Darstellungsmethoden auf die Daten aus Namibia

Die Anwendung der Abbildungsverfahren auf eine 2D Leitfähigkeitsanomalie im vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass es weder bei der Eigenwert-Analyse noch bei der *SVD* notwendig ist, alle Eigenwerte und -vektoren darzustellen. Beim Verfahren nach LATORRACA werde ich im folgenden auf die Abbildung des zweiten Paares der charakteristischen Vektoren verzichten. Ebenso werde ich für die Methode nach EGGERS lediglich die beiden elektrischen Eigenwerte darstellen.

Abbildung 6.5 zeigt die beiden elektrischen Eigenwerte nach der Eigenwert-Analyse für die Frequenz $f = 5.6Hz$. Der erste Eindruck dieser Darstellung, die ja ein Abbild der Leitfähigkeitsverteilung liefern soll, ist verwirrend. Abgesehen von einer relativ einheitlichen Streichrichtung von E_2 im mittleren Bereich des Gebiets, läßt sich kaum ein systematischer Zusammenhang zwischen den Ellipsen erkennen. Für einen zweidimensionalen Untergrund beträgt der Winkel zwischen beiden Ellipsen 90° . An fast allen Stationen ist jedoch eine Abweichung davon zu beobachten, was auf 3D Effekte schließen läßt. Die größeren grauen Ellipsen des ersten Eigenvektors geben das maximale E-Feld an. Es ist bis auf wenige Ausnahmen an allen Stationen nach Nordnordwest gerichtet; es lassen sich also keine Unterschiede über der WF/OL erkennen. Anders die schwarzen Ellipsen des zweiten Eigenvektors: In einem mittleren Bereich sind sie langgestreckt und parallel zur Fault ausgerichtet, während es im Süden einige Stationen gibt, an denen auch rundere, schwarze Ellipsen beobachtet werden können. Bis auf diese Ausnahmen sind alle Ellipsen von E_2 im Vergleich zu denen von E_1 recht schmal. Unklar bleibt, welche Strukturen

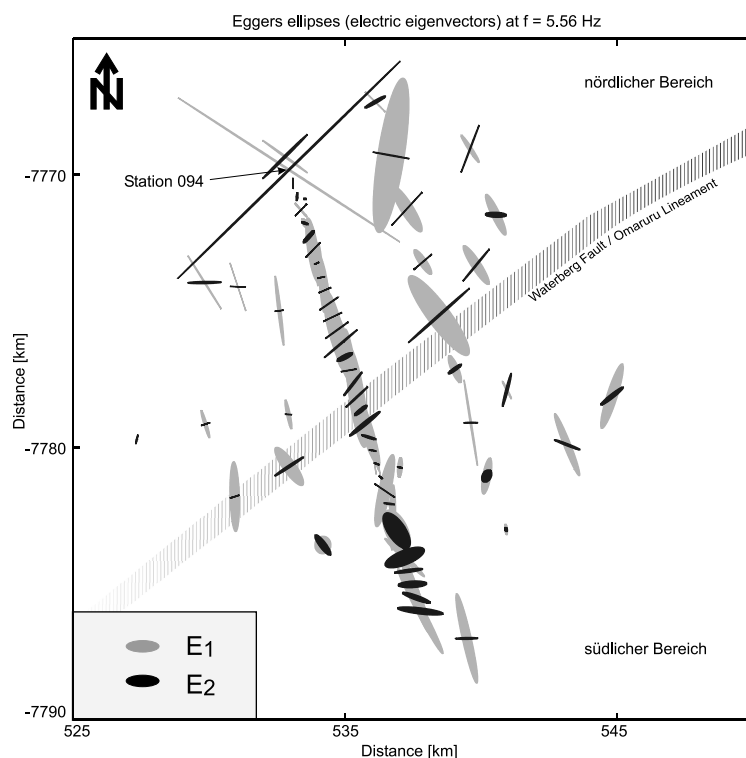


Abbildung 6.5: Die beiden elektrischen Eigenvektoren nach EGGERS geben für die Frequenz 5.6 Hz an einigen Stationen die Streichrichtung der WF/OL wieder. Vor allem die ersten elektrischen Eigenwerte (graue Ellipsen) zeigen keine markanten Unterschiede in Ellipsenform und -ausrichtung.

rundere Ellipsen des zweiten elektrischen Eigenvektors verursachen können. Auffällig ist Station 094 (2. Station von Norden auf dem Hauptprofil): Beide elektrischen Eigenwerte sind gleich groß und extrem lang. Dies ist die Station, die sich auf der Ringstruktur mit graphitisierten Marmoren befindet (vgl. Kapitel 3.1). Besonders an dieser Station wird deutlich, dass zwar grundsätzlich Streichrichtungen durch die Ellipsen nach EGGERS abgebildet werden können (siehe 2D Modell, Kap. 6.1), doch eine Reproduktion von leitfähigen Strukturen mit diesem Abbildungsverfahren nur unbefriedigend möglich ist.

Die charakteristischen Vektoren nach der LATORRACA SVD sind ebenfalls für die Frequenz 5.6 Hz in Abbildung 6.6 dargestellt. Der magnetische Vektor (grau) ist auf den Einheitsvektor normiert und somit an allen Stationen gleich lang. Er besitzt, abgesehen von einigen Verzerrungen, eine Ost-West-Ausrichtung. Die Ausrichtung der zugehörigen elektrischen Vektoren ist sensitiv bezüglich der Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund. Der nördliche Bereich ab Station 075, bzw. 114 (siehe Abb. 4.2) besitzt eine nahezu einheitliche Streichrichtung der elektrischen Ellipsen. Sie ist parallel zur WF/OL. Im Süden dagegen sind die elektrischen Ellipsen nach Norden

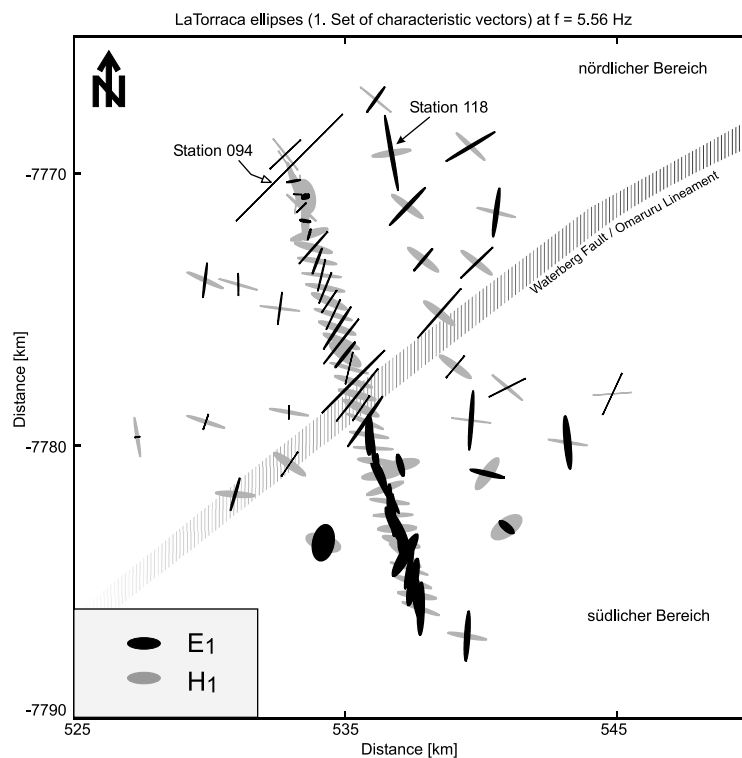


Abbildung 6.6: Für die gleiche Frequenz wie in Abb 6.5 ist das erste Eigenvektorpaar nach der LATORRACA SVD dargestellt. Die WF/OL wird in der Form einer Änderung der Ellipsenausrichtung und Elliptizität des elektrischen Eigenvektors (schwarz) angezeigt.

ausgerichtet und weisen auf die Fault hin. Das Nebenprofil wie auch die Stationen im Osten zeigen vergleichbare Eigenschaften der Ellipsen. Lediglich im Westen der Profile sind die meisten elektrischen Ellipsen nach Norden ausgerichtet. Geht man davon aus, dass die elektrischen Vektoren im guten Leiter parallel zu diesem orientiert sind, so deutet sich hier - vergleichbar zu den Induktionspfeilen bei $1s$ - eine gut leitende, etwa N-S streichende Struktur im Westen des Messgebiets an (vergleiche 4.13).

Der elektrische charakteristische Vektor an den Stationen 094 und 118 ist sehr lang gestreckt und scheint den Verlauf der Ringstruktur anzugeben. Auffällig ist, dass im Bereich der Ringstruktur die magnetischen Ellipsen im Gegensatz zu einer ansonsten über das gesamte Messgebiet homogenen Ausrichtung stark streuen.

Verglichen mit den *Eggers* Ellipsen erhalten wir hier einen besseren Eindruck von der Struktur der Leitfähigkeitsanomalien, die somit auch mit der Oberflächengeologie (siehe Abb. 3.4) korrelieren. Eine Einschätzung der tatsächlichen Leitfähigkeiten im Untergrund anhand der Größe der LATORRACA Ellipsen ist nur äußerst begrenzt möglich.

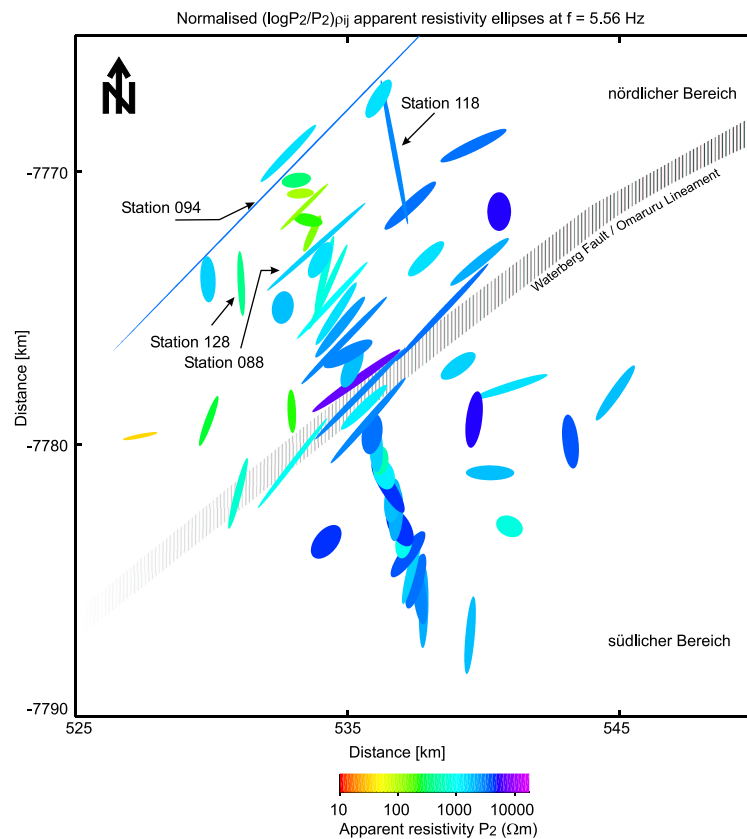


Abbildung 6.7: Für die Frequenz von 5.6 Hz sind die Widerstandsellipsen für die Namibia-Stationen dargestellt. Farbkodiert ist die Invariante P_2 (Determinante des Widerstandstensors). Die Ellipsenform ändert sich deutlich über der WF/OL: Südlich erhalten wir rundere Ellipsen, während die langgestreckten Ellipsen im nördlichen Bereich auf eine ausgedehnte anomale Leitfähigkeitsstruktur parallel zur Fault hinweisen.

Die durch die *PNA* berechneten Widerstandsellipsen für 5.56 Hz sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Wir erhalten nur eine Ellipse, wodurch sich die Darstellung vereinfacht und ihre Interpretation klarer wird. Ähnlich wie bei den *LATORRACA* Ellipsen erkennen wir eine deutliche Änderung der Ausrichtung der Ellipsen über der WF/OL. Südlich von ihr erhalten wir etwas rundere, Nord-Süd ausgerichtete Ellipsen. Die Stationen über und nördlich der Fault sind langgestreckt und liegen parallel zu ihr. Besonders deutlich bildet sich die Ringstruktur im Norden ab. An den Stationen 094, 118, 088 und 125 sind Widerstandsellipsen zu beobachten, die sich zu einem Ringstrom „zusammensetzen“ lassen. Für die hier dargestellte Frequenz bildet sich der Ringstrom eher durch die Form als durch die den Ellipsen zugeordnete Leitfähigkeit ab. Dies ist dadurch bedingt, dass die scheinbaren spezifischen Widerstände zu kurzen Perioden hin für alle Stationen recht hoch sind.

Jedoch müssen größere Leitfähigkeitskontraste vorhanden sein, damit stark verzerrte Ellipsen entstehen können. Die Farbe der Ellipsen stellt die Invariante P_2 , also die Determinante, des Widerstandstensors dar. Sie nimmt für diesen Periodenbereich Werte zwischen $100\Omega m$ und $2000\Omega m$ an. Diese hohen Werte entstehen also vor allem dadurch, dass drei Elemente des Impedanztensors sehr viel größer als das vierte sind.

Vergleichbar mit den LATORRACA Ellipsen sehen wir auch bei den Widerstandsellipsen im Westen der Profile eine Ausrichtung nach Nord-Süd. Ein in diese Richtung verlaufender Leitfähigkeitskontrast hätte demnach nach Osten weisende Induktionspfeile zur Folge.

Vergleicht man die drei Abbildungsmethoden miteinander, so zeigen die Ellipsen nach LATORRACA und der PNA eine deutliche Änderung der Ellipsenform und -richtung über der Waterberg Fault / Omaruru Lineament. Die Ellipsen nach EGGERS zeigen zwar auch Änderungen ihrer Eigenschaften, doch lassen sie sich nur mit Kenntnis der geologischen Strukturen zuordnen und interpretieren. Wünschenswert ist es jedoch, ohne Vorkenntnisse eine Aussage über Leitfähigkeitsverteilungen machen zu können.

Abgesehen von einigen Stationen fällt auf, dass die Widerstands- und die elektrischen LATORRACA Ellipsen große Ähnlichkeiten in ihrer Form und Richtung besitzen. Obwohl die Widerstandsellipsen und die elektrischen LATORRACA Ellipsen bei den Namibia-Daten ähnliche, strukturelle Merkmale abbilden, ist sowohl die Bedeutung als auch die Darstellung der Widerstandsellipsen anschaulicher als die von magnetischen und elektrischen charakteristischen Vektoren.

In Abbildung 6.8 sind die Widerstandsellipsen sowohl für eine höhere als auch eine niedrigere Frequenz dargestellt. Die Form und Ausrichtung der Ellipsen ähnelt denjenigen in Abbildung 6.7. Für $90.5Hz$ (Abb. 6.8 links) beobachten wir über das gesamte Profil höhere Widerstände. Die Ellipsen deuten über und nördlich der WF/OL wieder eine zu ihr parallel verlaufende Vorzugsrichtung der Ströme an. Auch die Ringstruktur im Norden des Messgebiets ist bei dieser hohen Frequenz zu erkennen. Auch für eine lange Periode von $90.5s$ bleiben die Eigenschaften der Widerstandsellipsen im wesentlichen erhalten. Trotzdem sind an einigen Stationen deutlich schmalere und längere Ellipsen zu beobachten. Diese Ellipsen befinden sich in der Mitte des Messgebiets und besitzen meistens einen sehr geringen Widerstand. Sie sind bedingt durch die extrem niedrigen Widerstände eines Nebendiagonalelements zu längeren Perioden. An den südlichen Stationen sind - vergleichbar mit den höheren Frequenzen - rundere Ellipsen zu erkennen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die leitfähigen Strukturen im Messgebiet recht oberflächennah sein müssen und sich eventuell bis zu langen Perioden in die Übertragungsfunktionen „durchpausen“. Dies wird vor allem auch in Abbildung 6.9 anhand der Darstellung der Widerstandsellipsen des Hauptprofils bezüglich ihrer Bo-

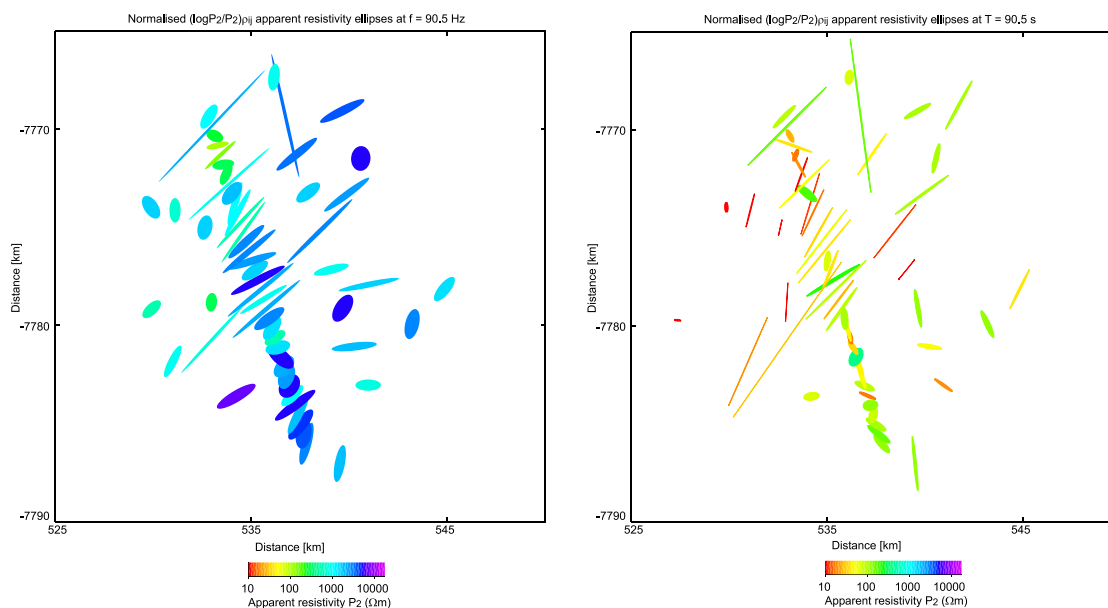


Abbildung 6.8: Die Widerstandsellipsen nach der *PNA* für eine hohe (90.5 Hz , links) und eine tiefe Frequenz ($90.5 \text{ s} = 0.011 \text{ Hz}$, rechts) geben ein ähnliches Bild wieder wie in Abb. 6.7. Die Form der Ellipsen bleibt sowohl für die tiefere als auch die höhere Frequenz erhalten. Die Farbkodierung der Determinante des Widerstandstensors macht deutlich, dass hohe Widerstände für kurze Perioden und niedrige für lange Perioden vorherrschen.

sticktiefe [Bostick, 1977] deutlich. Um eine grobe Abschätzung der Tiefenlage der Anomalien zu erhalten, wurde aus der zweiten Invariante, also der Determinante, des Widerstandstensors die Bosticktiefe berechnet. Selbst bei Eindringtiefen von wenigen 100 m sind die extrem langgestreckten Ellipsen im nördlichen Bereich zu beobachten. Sie setzen sich relativ konsistent zu größeren Tiefen hin fort. Im Süden des Messgebiets sind die Widerstandsellipsen zu geringen Tiefen relativ rund, während sie zu größeren Tiefen hin ebenfalls langgestreckt sind. Ihre Richtung in größerer Tiefe deutet auf einen nahezu Ost-West verlaufenden Leitfähigkeitskontrast weiter nördlich hin.

Unklar ist bislang, wie signifikant die Widerstandsellipsen die Leitfähigkeitsstrukturen abbilden, das heißt, ob zum Beispiel größere Fehler in den Übertragungsfunktionen zu langen Perioden hin die Größe und die Ausrichtung der Ellipsen beeinflussen. Abbildung 6.10 zeigt die „Fehlerbalken“ (siehe Kapitel 5.3.2) für 90.5 Hz links oben, 5.6 Hz rechts und 0.011 Hz links unten. Bei hohen Frequenzen sind die Impedanzensorelemente sehr gut bestimmt, was sich auch in kleinen Fehlerbereichen der Ellipsen äußert. Die beiden Linien der Fehlerkreuze fallen in der Regel zusammen, und auch die Länge der Ellipsen variiert nicht auffällig. Ein ähnlich gutes Bild ergibt sich für die Frequenz 5.6 Hz . Auch hier sind die Fehlerbereiche der Impedanzensorelemente

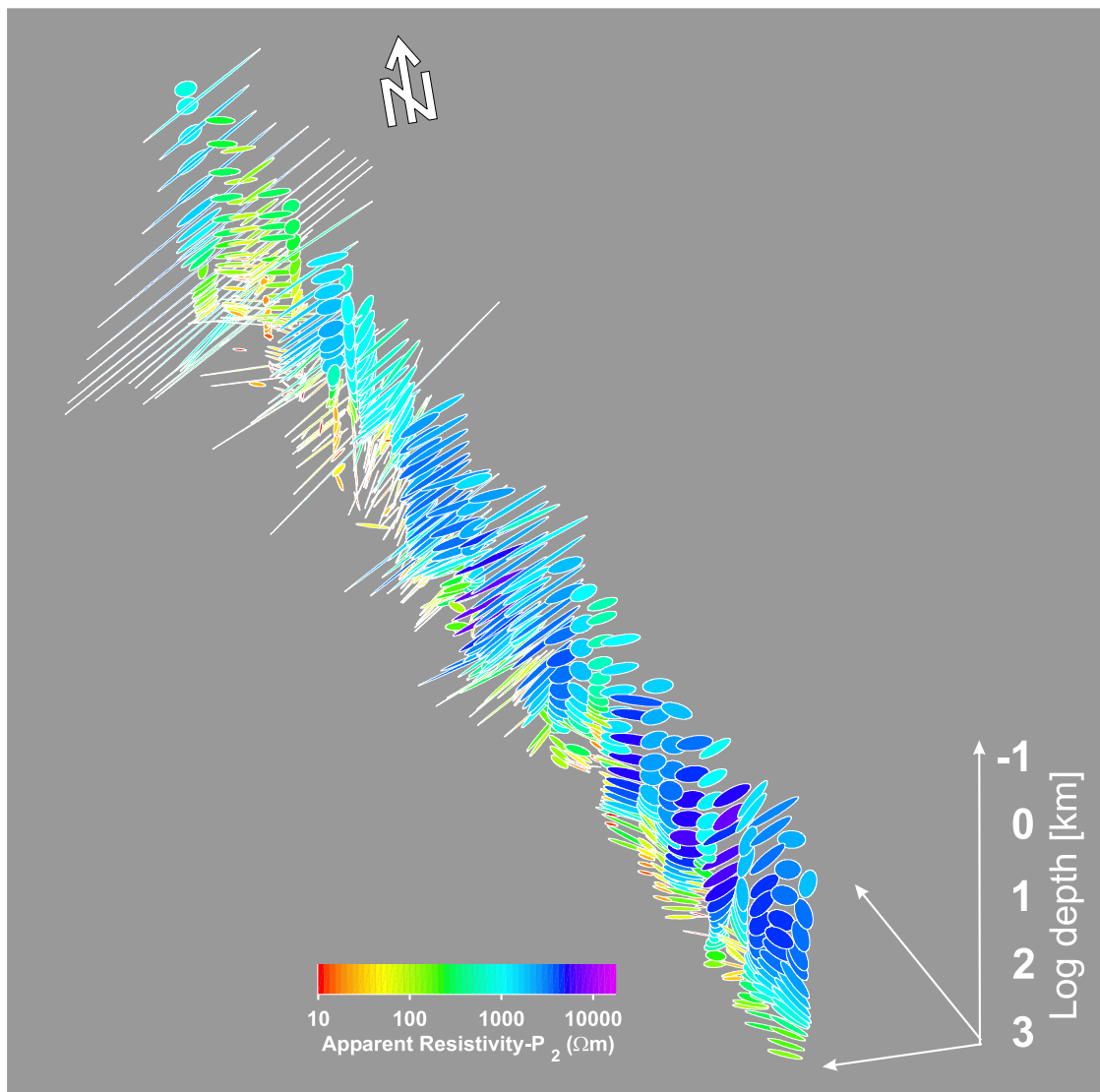


Abbildung 6.9: Für Profil 1 sind die Widerstandsellipsen bezüglich ihrer Bostick-Tiefe dargestellt. Ihre Form setzt sich von der Oberfläche bis in größere Tiefen fort, während die Widerstände zu größeren Tiefen hin geringer werden.

sehr klein und sowohl die Richtung als auch die Länge der Widerstandsellipsen sind bei diesen Frequenzen verlässliche Größen.

Bei 90.5s weisen die Übertragungsfunktionen besonders an Stationen im mittleren Bereich des Messgebiets große Fehlerbalken auf. Dies zeigt sich auch in der Darstellung der Fehlerbereiche für die Widerstandsellipsen (Abbildung 6.10 links unten). Obwohl an einigen Stationen Fehlerbalken über einige Dekaden in den MT-Daten auftreten, bleibt die Richtung der Ellipsen aber erstaunlicherweise gut bestimmt; sie variiert für diese Periode maximal um 10°. Dies läßt darauf schließen, dass trotz

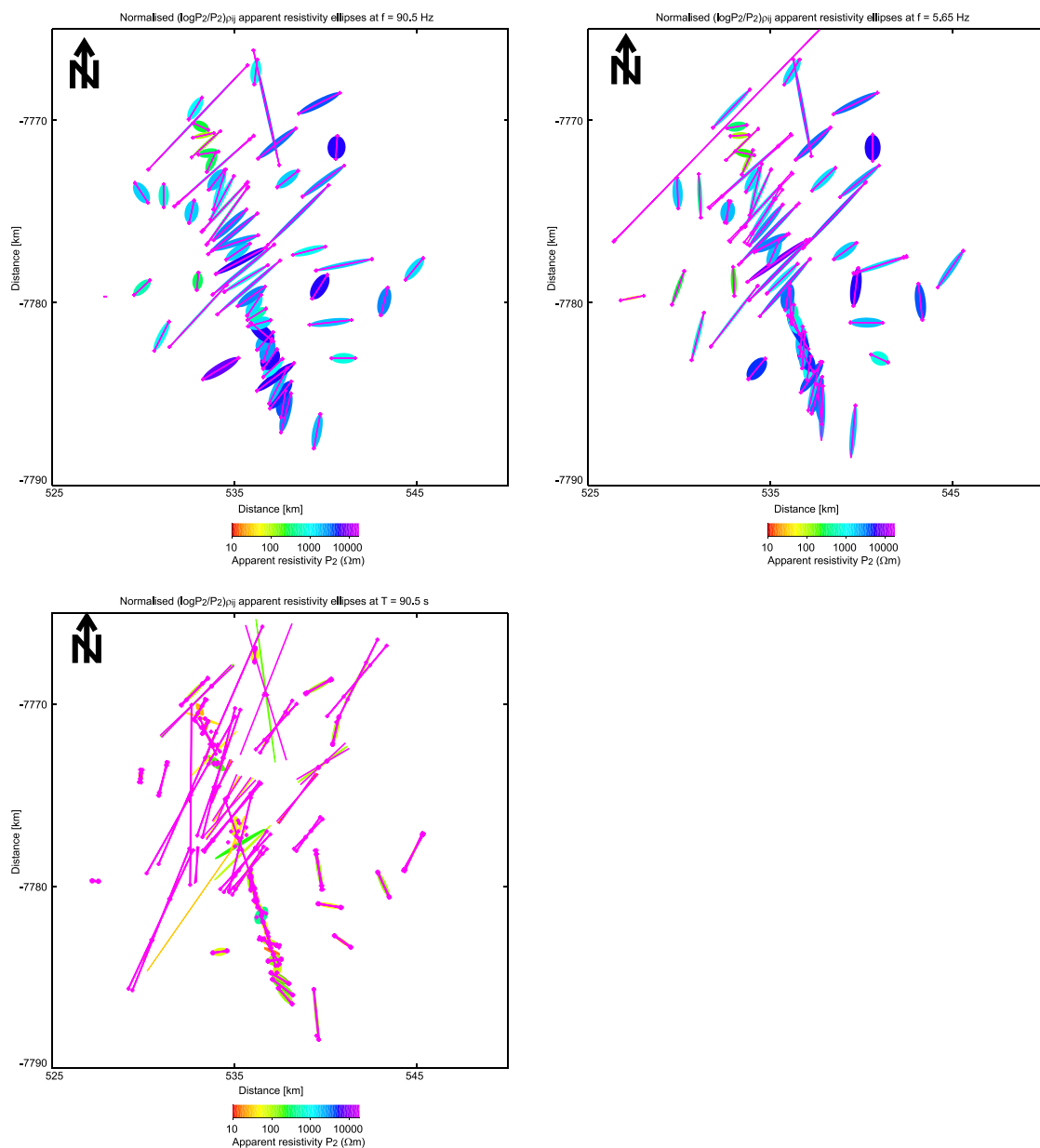


Abbildung 6.10: Innerhalb ihrer Fehlerbereiche wurden 500 zufallsverteilte Impedanzensorelemente gewählt und analysiert, so dass maximale und minimale Größe der Ellipse sowie die Genauigkeit ihrer Ausrichtung abgeschätzt werden können. Dargestellt sind die „Fehlerbalken“ für die Frequenzen 90.5 Hz , 5.6 Hz und 0.011 Hz .

fehlerbehafteter Daten die Richtung der Widerstandsellipsen recht gut bestimmt ist. Demgegenüber scheint die Länge der Ellipsenhauptachse stärker auf fehlerbehaftete Daten zu reagieren. Sie kann um bis zu $(\pm 50\%)$ variieren. Die runderen Ellipsen südlich der WF/OL scheinen generell sehr gut bestimmt zu sein.

Diese Fehlerbetrachtung zeigt, dass bei fehlerbehafteten Impedanzensorelementen unter Umständen die Stärke eines Leitfähigkeitskontrasts falsch eingeschätzt werden kann; die Geometrie von Leitfähigkeitsanomalien ist dagegen sehr gut bestimmt.

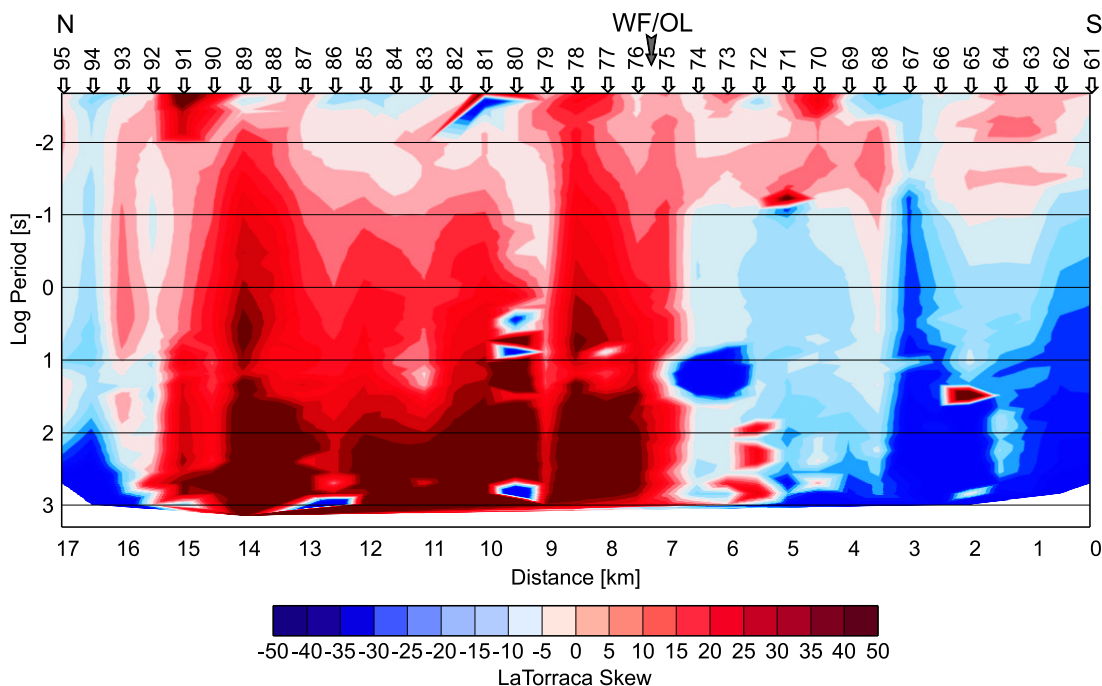


Abbildung 6.11: Die Pseudosektion der LATORRACA Skew des Hauptprofils: Bei langen Perioden ist über dem gesamten Profil eine Abweichung von der Orthogonalität der elektrischen und magnetischen Felder zu beobachten. Über der Fault an Station 74 ändert sich jedoch das Vorzeichen.

Wie vorangehend beschrieben, ist die Abbildung von Widerstandsellipsen anschaulicher als die der charakteristischen Vektoren nach der LATORRACA *SVD*. Jedoch erhält man über die nach der *SVD* berechneten elektrischen und magnetischen „charakteristischen“ Vektoren eine weitere aussagekräftige Größe: die LATORRACA Skew (5.54). Sie gibt die Abweichung von der Orthogonalität der elektrischen und magnetischen Hauptrichtungen an und sollte im 2D-Fall Werte nahe Null annehmen. Abbildung 6.11 zeigt diese Größe als Pseudosektion über dem Hauptprofil. In Rot sind Abweichungen in positive Richtung, in Blau in negative Richtung dargestellt. Positiv ist in diesem Zusammenhang so definiert, dass zwischen magnetischer und elektrischer Hauptachse ein spitzer Winkel liegt, negativ bedeutet dagegen einen stumpfen Winkel. Abgesehen von einigen Ausreißern zeigen die Skewwerte eine Teilung des Profils im Bereich der WF/OL: Südlich davon herrschen negative Werte vor, nördlich positive. Lediglich die Ringstruktur im Norden des Profils besitzt eine negative Abweichung von der Orthogonalität.

Diese Größe scheint ein vergleichbares Verhalten wie die univariaten Kohärenzen zu besitzen (siehe Abb. 4.10). Wenn die parallelen Felder E_x und B_x eine hohe Kohärenz aufweisen, dann äußert sich das in einer negativen LATORRACA Skew. Liegt die hohe Kohärenz zwischen E_y und B_y , so erhalten wir positive Skewwerte. Diese Größe kann für einen Vergleich von Messdaten und Modelldaten hilfreich sein. Die univariate Kohärenz ist ein Parameter, den wir durch die statistische Auswertung erhalten. Für Modelldaten liegt er jedoch immer bei 1 und ist somit nicht von Bedeutung. Über die LATORRACA Skew haben wir einen Parameter erhalten, der mit den univariaten Kohärenzen vergleichbar ist und sowohl für Mess- als auch Modelldaten berechnet werden kann.

6.3 Diskussion

Die Anwendung der Abbildungsmethoden auf die Messdaten aus Namibia verdeutlicht, dass alle drei Methoden grundsätzlich in der Lage sind, leitfähige Strukturen im Untergrund abzubilden. Die Eigenwert-Analyse nach EGGERS liefert zuweilen ein Bild, das sich nur schwer interpretieren läßt. Obwohl die Anwendung der Eigenwert-Analyse und der *SVD* auf einen Beispieltensor oder ein 2D-Modell ähnliche elektrische und magnetische (Eigen-) Vektoren liefert, so unterscheiden sie sich doch stark bei einer Anwendung auf Messdaten mit starken 3D-Effekten. Sowohl die Ellipsen nach LATORRACA als auch die Widerstandsellipsen ergeben ein ähnliches Abbild der Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund. Für den Betrachter ist es jedoch einfacher, Größe, Richtung und Farbe einer einzelnen Ellipse anstelle von Größe und Richtung zweier Ellipsen sowie deren Verhältnis untereinander zu interpretieren. Aus diesem Grund sind die Widerstandsellipsen als Abbildungsmethode besser geeignet. Trotzdem zeigt sich deutlich, dass die Ellipsen nur einer bestimmten Leitfähigkeitsverteilung zugeordnet werden können, wenn ein genügend dichtes Stationsnetz vermessen wurde. Die Ausrichtung einer Ellipse an einer einzelnen Station oder von weit entfernten Stationen ergibt keine interpretierbare Information. Dies wird vor allem dann deutlich, wenn man sich das weniger dicht vermessene Nebenprofil betrachtet. Auch ein Stationsabstand von 2000m ist für ein MT Profil heutzutage noch ein relativ geringer Abstand. Eine eindeutige Zuordnung zu leitfähigen Strukturen ist aber schon bei diesem Stationsabstand nur noch schlecht möglich.

Bislang wurden Widerstandsellipsen jeweils für eine Frequenz gezeigt. Durch den Skineffekt hängen die Eindringtiefen von den vorliegenden Leitfähigkeiten und der Frequenz ab und deshalb handelt es sich bei den flächenhaften Darstellungen keinesfalls um das Abbild einer Leitfähigkeitsverteilung in einer bestimmten Tiefe. Erste Versuche in einer Sektion, die Widerstandsellipsen der Bosticktiefe zuzuordnen, ergeben ein recht komplexes Bild. Trotzdem wird deutlich, dass sich die Form der Ellipsen von der Oberfläche zu größeren Tiefen hin „durchpaust“. Unklar ist in diesem Zusammenhang, ob eine leitfähige Struktur tatsächlich eine solche Tiefener-

streckung besitzt, oder ob die untere Grenze dieser Struktur zu größeren Tiefen hin verwischt wird.

Im Messgebiet scheinen aufgrund der Widerstandsellipsen drei markante Leitfähigkeitsanomalien zu dominieren: Im Norden des Messgebiets zeigt sich, dass die ringförmige Struktur aus graphitisierten Marmoren die Widerstandsellipsen zu einer Art „Ringstrom“ anordnet. Dies ist ein starker Hinweis darauf, dass der Graphit leitend verbunden ist.

Der gesamte Bereich über und nördlich der WF/OL erscheint anomal; es herrscht eine Vorzugsrichtung von Strömen parallel zur Fault. Sowohl die Ringstruktur im Norden als auch die breite anomale Zone im Bereich der Fault sind in den Induktionspfeilen (siehe Kapitel 4.6) zu erkennen.