

**Scherwellendoppelbrechungsanalyse von
Registrierungen der Stationen des seismologischen
Netzwerkes an der Neumayer Station, Antarktis:
Seismische Anisotropie und die tektonische
Entwicklung des Kontinentalrandes Queen Maud Lands**

**Shear-wave splitting analysis on registrations of the
Neumayer Station seismological network, Antarctica:
Seismic anisotropy and the tectonic evolution of the
Queen Maud Land continental margin**

Christian Müller

Christian Müller

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
- Sektion Struktur und Dynamik der Lithosphäre und polarer Eisschilde -
Columbusstr.
D-27515 Bremerhaven

Die vorliegende Arbeit ist die überarbeitete Fassung einer Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades im Fachbereich 5 der Universität Bremen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IV
Summary	VI
1. Einleitung	1
2. Tektonische Entwicklung	4
2.1 Strukturelemente	4
2.2 Tektonische Entwicklung der Heimefrontfjella, Kirwanveggen und Vestfjella	7
2.3 Entwicklung des Kontinentalrandes	9
2.4 Rekonstruktion und Aufbruchmodelle Gondwanas	11
2.5 Fragestellungen und Zielsetzungen	13
3. Seismische Anisotropie, S-Wellensplitting und Deformationen im oberen Mantel	16
3.1 Ursachen seismischer Anisotropie und S-Wellensplitting	18
3.1.1 Zusammenhang Splitting / Anisotropie	18
3.1.2 Zusammenhang Anisotropie / Deformationsprozesse	24
3.1.3 Zusammenhang Deformationsprozesse / Tektonische Prozesse	25
3.1.4 Quellregionen seismischer Anisotropie	27
3.2 Zur Anisotropie-Inversion verwendete S-Phasen	28
4. Bestimmung der Splitting-Parameter	31

4.1	Methoden zur Inversion der Splitting-Parameter	31
4.1.1	Analyse der Teilchenbewegung	34
4.1.2	Minimierung der Energie der Transversalkomponenten	36
4.2	Test des Verfahrens an synthetischen Seismogrammen	38
4.2.1	Eigenschaften der Wellenformen und des Splitting Operators	38
4.2.2	Abweichungen von Idealbedingungen	43
5.	Das seismologische Netzwerk an der Neumayer Station	49
5.1	Geophysikalische Langzeitbeobachtungen an der Neumayer Station	49
5.2	Das seismologische Netzwerk	51
5.2.1	Die Stationen	53
5.2.2	Datenerfassung	57
5.2.3	Situationsbedingte Probleme	59
6.	Splitting-Analyse	61
6.1	Auswahl geeigneter Kernphasen und Bebengebiete	61
6.2	Kernphasen (SKS, SKKS, PKS)	63
6.2.1	Parameterbestimmung am Ereignis 951225	63
6.2.2	Ausgewählte Datensätze	70
6.2.3	Ergebnisse der Splitting-Analysen	77
6.3	S- und ScS-Phasen	84
6.3.1	Ableitung der initialen Polarisationsrichtungen	85
6.3.2	Bestimmung der Splitting-Parameter am Beispiel der S- und ScS-Phasen des Bebens 940510	86
6.3.3	Ergebnisse der S- und ScS-Analysen	91
7.	Scherwellensplitting an Palmer und South Pole Station	93

7.1	Palmer Station (PMSA)	93
7.2	South Pole Station (SPA)	95
8.	Diskussion	96
8.1	Neumayer Station (WAZ / OLY)	98
8.1.1	Absolute Plattenbewegung	103
8.1.2	Zweischichtfall azimuthaler Anisotropie	103
8.1.3	Vergleich mit Ergebnissen anderer Methoden	117
8.2	Palmer Station	119
8.3	South Pole Station	120
9.	Schlußfolgerungen und Ausblick	122
10.	Literaturverzeichnis	124
A.	Herdparameter der verwendeten teleseismischen Ereignisse	133
B.	Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)	135
B.1	Watzmann (WAZ)	135
B.2	Olymp (OLY)	163
B.3	Georg-von-Neumayer (GVN)	191
B.4	Observatorium (OBS)	193
B.5	Palmer Station (PMSA)	197
B.6	South Pole Station (SPA)	202
C.	Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)	205
C.1	Watzmann (WAZ)	205
C.2	Olymp (OLY)	215

Kurzfassung

Seismische Anisotropie im oberen Erdmantel ist ein weltweit beobachtbares Phänomen. Die Entstehung anisotroper Gesteinsgefüge beruht auf deformationsinduzierter bevorzugter Ausrichtung der Kristallstrukturen der intrinsisch anisotropen Mantelminerale (Olivin und Orthopyroxen). Aus der Abbildung dieser Anisotropie-Strukturen lassen sich Einblicke in sowohl rezente als auch fossile geodynamische Prozesse gewinnen, aus denen Rückschlüsse auf tektonische Entwicklungsprozesse gewonnen werden können.

Eine Methode zur Untersuchung seismischer Anisotropie ist die der Analyse von Scherwellendoppelbrechung teleseismischer Scherwellen. Scherwellendoppelbrechung (oder S-Wellensplitting) beruht auf der Tatsache, daß eine linear polarisierte S-Welle beim Durchlauf durch ein anisotropes Medium in zwei orthogonal zueinander polarisierte Teilwellen aufgespalten wird, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten das Medium durchlaufen. Aus den so veränderten Wellenformen kann durch bestimmte Inversionsverfahren auf die Anisotropie-Strukturen zurückgeschlossen werden. Aus diesen Analysen können für ein einfaches Modell azimuthaler Anisotropie die Splitting-Parameter ϕ (Richtung schneller Wellengeschwindigkeit) und δt (Laufzeitdifferenz zwischen beiden Teilwellen) abgeleitet werden.

Diese Analysen wurden auf Registrierungen des seismologischen Netzwerkes der Neumayer Station, Dronning Maud Land, Antarktis angewandt. Da sich fünf der sieben dort betriebenen Stationen auf der schwimmenden Platte des Ekström Schelfeises befinden, konnten nur registrierte S-Wellen der auf dem Festland liegenden Stationen Watzmann (WAZ) und Olymp (OLY) invertiert werden.

Insgesamt wurden an beiden Stationen 58 Kernphasen (SKS, SKKS, PKS) analysiert. Diese Wellen laufen als Kompressionswellen durch den äußeren, flüssigen Kern und werden beim aufsteigenden Durchgang durch die Kern-Mantel-Grenze zu S-Wellen konvertiert. Damit haben diese den Vorteil, daß keine quellseitige Anisotropie die Analysen kontaminiert, die lineare Polarisations-Richtung bekannt ist und die Wellen einen steilen Auftauchwinkel unterhalb der Station aufweisen. Zusätzlich wurden 17 ausgewählte S- und ScS-Phasen analysiert.

An beiden Stationen wurde mit 1.1 sec Laufzeitdifferenz ein signifikanter, dem globalen Mittel-

wert seismischer Anisotropie entsprechender, Wert gefunden. Eine leichte azimutale Abhängigkeit der Einzelanalysen deutete jedoch auf ein komplizierteres Modell seismischer Anisotropie hin. Die Ergebnisse der Analysen an WAZ und OLY sind untereinander sehr konsistent.

Die Ergebnisse wurden im Zusammenhang mit der tektonischen Entwicklungsgeschichte des Kontinentalrandes Dronning Maud Lands diskutiert. Diese Region ist eine der Schlüsselregionen zum Verständnis der Integration und des Aufbruchs des Superkontinents Gondwana. Obwohl in den Grundzügen geklärt, existieren noch kontroverse Vorstellungen über die Entwicklungsgeschichte des angrenzenden Weddell-Meeres und die der terranen Blöcke der Westantarktis. Insbesondere ungeklärt ist die Frage, ob das parallel zur Küstenlinie Dronning Maud Lands verlaufende Explora Escarpment (EE) eine nur von Rifting oder auch durch Scherdeformationen geprägte Struktur ist.

Die Splitting-Analysen haben gezeigt, daß die Anisotropie-Richtung annähernd orthogonal zu der rezenten absoluten Plattenbewegung (APM) verläuft, damit durch diese nicht erklärt werden kann und fossilen Ursprungs sein muß. Dieser hat seinen Ursprung in präkambrischen Strukturen als Teil des ursprünglichen Zimbabwe-Kaapvaal-Maudheim Kratons. Spätere tektonische Überprägungen (Kibarische Gebirgsbildung, Pan-Afrikanische Überprägung) haben keinen oder geringfügigen Einfluß. Auswirkungen des Riftings während des Gondwanaaufbruchs bzw. die den Aufbruch begleitende Aktivität eines Manteldiapirs lassen sich belegen. Dieser Einfluß manifestiert sich in der Abbildung fossiler, kleinräumiger Konvektionsströme. Eine Scherdeformation entlang des Explora Escarpment kann nicht ausgeschlossen werden, ist aber in den Anisotropie-Richtungen nicht nachweisbar. Die azimutale Abhängigkeit der Anisotropie-Parameter läßt sich durch einen Zweischichtfall modellieren, in dem die Strukturen präkambrischen Ursprungs als auch die später während des Gondwanazerfalls erzeugten Anisotropiemuster erklärt werden können.

Zusätzliche Analysen von Kernphasen der Stationen PMSA (Palmer Station, Antarktische Halbinsel) und SPA (Süd Pol Station) zeigen ebenfalls deutliche Hinweise auf seismische Anisotropie. Hier ist die Datenbasis jedoch zu gering (vier Kernphasen an PMSA, zwei an SPA) um diese umfassend in einem tektonisch/geodynamischen Rahmen diskutieren zu können. Jedoch ist an PMSA offensichtlich, daß aufgrund ungewöhnlich hoher Verzögerungszeiten ein offensichtlich rezenter, asthenosphärischer Mantelfluß einen Einfluß auf die Ausbildung dieser Strukturen haben muß.

Summary

Seismic anisotropy in the upper earth's mantle is a global observable phenomenon. Anisotropic fabrics originate from deformation induced lattice preferred orientation of crystal structures of intrinsic anisotropic mantle minerals (olivine and orthopyroxene). The formation of these anisotropic structures allows insights into recent as well as fossil geodynamical processes. Thus, from these structures information about tectonic evolutionary processes may be deduced.

A method for investigating seismic anisotropy is the analysis of shear-wave splitting from teleseismic events. Shear-wave splitting originates from linear polarized S-waves traversing an anisotropic medium. The linear polarized wave splits into two orthogonal polarized waves which travel with different velocities. From these modified wave forms simple anisotropic structures can be deduced. The splitting parameters ϕ (direction of fast velocity) and δt (traveltime delay) for a simple model of azimuthal anisotropy are retrieved via specific analysis methods.

These investigations were performed on recordings from seismographs of the Neumayer Station seismological network. Since five of these seven stations are situated on the floating plate of the Ekström Ice Shelf, only registrations from the on grounded ice deployed seismographs Watzmann (WAZ) and Olymp (OLY) could be used.

In total, 58 core phases (SKS, SKKS, PKS) could be analyzed. These waves pass the liquid, outer core as compressional waves and are converted to linear polarized S-Waves when entering the core mantle boundary to the ascending part of the ray path. These waves possess the advantage of not being contaminated by source side anisotropy, the initial polarization direction is known from the back azimuth of the ray, and a steep arrival angle beneath the station. Additionally, 17 carefully chosen S- and ScS-waves from deep focus hypocenters events were analyzed.

At both stations an average travel time delay of $\delta t = 1.1 \text{ sec}$ was found which is a significant anisotropy effect corresponding well to the global average of continental observations. A slight azimuthal variation of the single measurements results indicates a more complex anisotropic structure. The results of investigations from WAZ and OLY registrations are very consistent.

The results are discussed regarding the tectonic evolution of the continental margin of Dron-

ning Maud Land. This region has major importance for understanding details of integration and disintegration of the supercontinent Gondwana.

The S-wave splitting investigations reveal fast polarization directions nearly perpendicular to the absolute plate motion direction. Thus, anisotropy does not originate from recent dynamics and must have ancient origin. These fossile structures originated in Precambrian times as part of the former Zimbabwe-Kaapvaal-Grünhogna Craton. Later major tectonic events (Kibarian mountain building event, Pan-African overprint) show no or vanishing effects. Impacts of rifting processes during Gondwana break-up or accompanying activity of a mantle plume are documented. This influence is manifested in mapping small-scale, fossile convective currents. A transform deformation along the continental margin (Explora Escarpment) cannot be ruled out, but anisotropy directions can hardly be explained by this. From azimuthal variations of the anisotropy parameters, a two-layer model was constructed which explains anisotropy structures of Precambrian origin in the upper layer and a lower layer which originated from break-up mechanisms.

Additional investigations on core phases recorded at the stations PMSA (Palmer Station, Antarctic Peninsula) and SPA (South Pole Station) also indicate strong evidence of seismic anisotropy. Nevertheless, the used amount of data is too small to discuss the results in a comprehensive tectonic/geodynamic framework. However, delay times measured at PMSA are exceptional large which only can be explained by recent, asthenospheric mantle flow.

1. Einleitung

Die Antarktis bildete bis zum Beginn des Jura zusammen mit Südamerika, Afrika, Indien und Australien den Superkontinent Gondwana. Der initiale Prozess des Aufbrechens von Gondwana und die anschließende Driftgeschichte bis zur heutigen Lage der Kontinente ist noch nicht in allen Einzelheiten verstanden. Die Antarktis ist heute zu 98% von einem bis über 4000 m mächtigen Eispanzer bedeckt und damit für einen direkten Zugang zur Kartierung geologischer Strukturen relativ unzugänglich. Aufgrund der schwierigen Klima- und Eisbedingungen in den die Antarktis begrenzenden Meeren wurde bisher ein nur sehr begrenzter Datensatz gewonnen, der zur Klärung der offenen Fragen zur tektonischen Entwicklungsgeschichte beitragen konnte.

Das westliche Dronning Maud Land wurde als Rand des ostantarktischen Kratons durch verschiedene tektonische Ereignisse geprägt, so Gebirgsbildung während der Grenvilleschen Gebirgsbildungsepisode (1100 Ma), im Zusammenhang mit der Bildung Gondwanas der panafrikanischen Überprägung (500 Ma) und dem Gondwanazerfall (170 Ma) (z. B. Jacobs, 1991; Paech, 1997). Damit nimmt diese Region eine Schlüsselstellung im Verständnis großräumiger tektonischer Ereignisse ein, die diese Region prägten. Dazu gehören die Integration des Superkontinents Gondwana, dessen Rekonstruktion und korrespondierende tektonische Prozesse, sowie Prozesse, die dessen Aufbrechen begleiteten.

Die Theorie der Plattentektonik hat sich innerhalb der letzten drei Jahrzehnte zu einer Standardmethode entwickelt, mit der die geologischen Merkmale kontinentaler und ozeanischer Kruste erklärt werden. Nicht vollständig verstanden sind dabei die Ursachen der Kräfte, welche die Platten antreiben. Insbesondere nicht genügend beantwortet ist die Frage, inwieweit eine Kopplung zwischen den Konvektionsmustern im oberen Erdmantel und den darüberliegenden tektonischen Platten besteht. Damit verknüpft ist die Frage, ob eine Korrelation zwischen geologisch/tektonischen Merkmalen an der Oberfläche und geodynamischen Bewegungsmustern im oberen Mantel besteht. Eine Antwort auf diese Frage kann die Untersuchung seismischer Anisotropie in diesen Tiefenregionen geben (Silver, 1996). Als wirkungsvolle Methode zur Untersuchung und Kartierung seismischer Anisotropie hat sich in den letzten Jahren die Analyse des S-Wellensplittings (Scherwellendoppelbrechung) entwickelt (Silver & Chan, 1991). Der Effekt des S-Wellensplittings beruht auf der Tatsache, daß eine in einem isotropen Medium linear polari-

1. Einleitung

sierte S-Welle sich beim Durchlauf durch ein anisotropes Medium in zwei mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten laufende, orthogonal zueinander polarisierte Wellen aufspaltet. Anisotropie im oberen Mantel entsteht durch deformationsinduzierte bevorzugte Ausrichtung (Lattice preferred deformation) der den Mantel konstituierenden Minerale (Nicolas & Christensen, 1987). Die Beobachtung und Analyse der an einer seismologischen Station registrierten S-Wellen gestattet Rückschlüsse auf die im Laufweg der Welle lokalisierten anisotropen Strukturen. Die so erhaltenen Parameter seismischer Anisotropie, zusammen mit Annahmen über den Zusammenhang zwischen Anisotropie und den Deformationen der Mantelminerale, erlauben Rückschlüsse auf die Deformations- und Fließvorgänge in Lithosphäre und Asthenosphäre. Die Quellregionen seismischer Anisotropie und damit auch deren Entstehungsgeschichte werden zur Zeit kontrovers diskutiert (z. B. Mooney, 1995). Im wesentlichen konkurrieren die Vorstellungen von der "mobilen" und der "fossilen" Theorie. Erstere sieht die Quelle seismischer Anisotropie in der Asthenosphäre und damit im Zusammenhang mit rezenten Fließvorgängen, d.h. mit basalen Scherdeformationen an der Unterkante der Lithosphäre, hervorgerufen durch rezente absolute Plattenbewegungen (z.B. Vinnik *et al.*, 1992 und Vinnik *et al.*, 1995). Im Gegensatz dazu stehen die Vorstellungen von der "fossilen" Anisotropie. Diese hat ihre Quellen in der unterkrustalen Lithosphäre und wird im Zusammenhang mit vergangenen tektonischen Episoden diskutiert (z.B. Silver & Chan, 1988). Die Analyse von S-Wellensplitting ist eine der wenigen Methoden, mit deren Hilfe es gelingt, diese geodynamischen Deformationsprozesse sichtbar zu machen.

Seit 1992 werden auf den Höhenrücken Søråsen und Halvfarryggen an den Stationen Olymp und Watzmann des seismologischen Netzwerkes der Neumayer Station längerperiodische Seismometer (5 sec und 20 sec Eigenperiode) betrieben. Mit diesen beiden Stationen ist es möglich, Scherwellen in ausreichend guter Qualität aufzuzeichnen, um diese hinsichtlich möglichen Scherwellen-Splittings zu analysieren. Das Ziel dieser Arbeit ist, aus geeigneten Aufzeichnungen von Scherwellen teleseismischer Ereignisse eine mögliche Anisotropiestruktur im oberen Mantel unterhalb dieser Stationen abzuleiten und diese im Zusammenhang mit der tektonischen Entwicklungsgeschichte zu diskutieren. So kann die Miteinbeziehung der erhaltenen Deformationsmuster im oberen Mantel dazu beitragen, das Verständnis der frühen Aufbruchphase Gondwanas zu bereichern.

Zunächst wird in Kap. 1 ein Überblick über den heutigen Kenntnisstand der tektonischen Entwicklung des östlichen Weddell-Meeress und Dronning Maud Landes gegeben. In Kap. 3 werden die theoretischen Hintergründe seismischer Anisotropie und deren Zusammenhang mit Scherwellen-Splitting dargestellt. Zum Verständnis und der späteren Diskussion der Anisotropie im Zusammenhang mit tektonischen Deformationen im oberen Mantel werden hier die Grundlagen über die Entstehungsmechanismen, Lokationen und deren Einfluß auf die Ausbreitung von Scherwellen erarbeitet. In Kap. 4 werden die zwei verwendeten Verfahren zur Ableitung der Anisotropieparameter vorgestellt und an synthetischen Seismogrammen getestet. Diese Tests, in denen auch der Einfluß von natürlichem Rauschen abgeschätzt werden soll, dienen somit auch

der Fehlereingrenzung der später aus den realen Daten gewonnen Parameterbestimmungen. Kap. 5 gibt einen kurzen Überblick über die Konfiguration und Meßschwerpunkte des im Stidsommer 1992 im Zusammenhang mit dem Neubau der Neumayer Station ebenfalls neuerrichteten geophysikalischen Observatoriums. Die Bearbeitung geeigneter Scherwellen wird in Kap. 6 anhand von Beispielregistrierungen diskutiert, deren Eigenschaften herausgearbeitet und die Analyseergebnisse sämtlicher Datensätze zusammengestellt. Zusätzlich zu den Stationen Watzmann und Olymp wurden auch einige Scherwellen-Splitting-Analysen an den Stationen SPA (Amundsen-Scott-Station, Südpol) und PMSA (Palmer Station, Antarktische Halbinsel) durchgeführt, deren Ergebnisse in Kap. 7 zusammengestellt werden. Die erhaltenen Anisotropieparameter und deren Bedeutung unter geodynamischen und tektonischen Gesichtspunkten werden in Kap. 8 diskutiert.

2. Tektonische Entwicklung des Kontinentalrandes im östlichen Weddell-Meer/Dronning Maud Land

2.1 Strukturelemente des Kontinentalrandes in Dronning Maud Land und im östlichen Weddell-Meer

Die präkambrische Entwicklungsgeschichte Dronning Maud Lands ist charakterisiert durch einen stabilen archaischen Kraton im Westen flankiert durch einen mobilen Grenville Gürtel, der sich in EW-Richtung parallel zur Küste erstreckt. Im östlichen Dronning Maud Land manifestiert sich dieser Gürtel in den Gebirgszügen der Heimefrontfjella und Kirwanveggen (Abbildung 2.1), die sich hier in SW-NE-Richtung erstrecken. Die Auswirkungen eines thermotektonischen Ereignisses (Pan-Afrikanische Überprägung) nehmen von E nach W zunehmend ab und betrafen den Rand des archaischen Kratons nur noch geringfügig. Durch dieses Ereignis wurden die Grenvillestrukturen stark intrudiert. Der Aufbruch Gondwanas während des Jura wurde durch starkes Austreten von Flutbasalten begleitet. Für alle Strukturen - Archaischer Kraton, Grenville Gürtel, Auswirkungen der Pan-Afrikanischen Überprägung und jurassische Magmenaustritte - finden sich korrelierende Strukturen im südlichen Afrika (z.B. Paech, 1997).

Die Vorstellungen über das initiale Aufbrechen Gondwanas im südlichen bis südöstlichen Weddell-Meer beruhen auf der Kenntnis tektonischer Strukturelemente aus dieser Region. Besonders die Kenntnis des genauen Verlaufs der Kontinent-/Ozean-Grenze im östlichen und südlichen Weddell-Meer bzw. der Plattengrenzen während des initialen Aufbrechens liefern wichtige Randbedingungen zu den Modellvorstellungen über die frühe tektonische Entwicklungsgeschichte dieser Region. Die schwierigen Eisbedingungen des Weddell-Meers gestalten eine systematische geophysikalische Kartierung dieser Region außerordentlich schwierig. Trotzdem wurden seit 1976 durch deutsche, norwegische, russische und japanische Expeditionen auf insgesamt etwa 36000 Profilkilometern reflexions- und refraktionsseismische Daten gesammelt (Jokat *et*

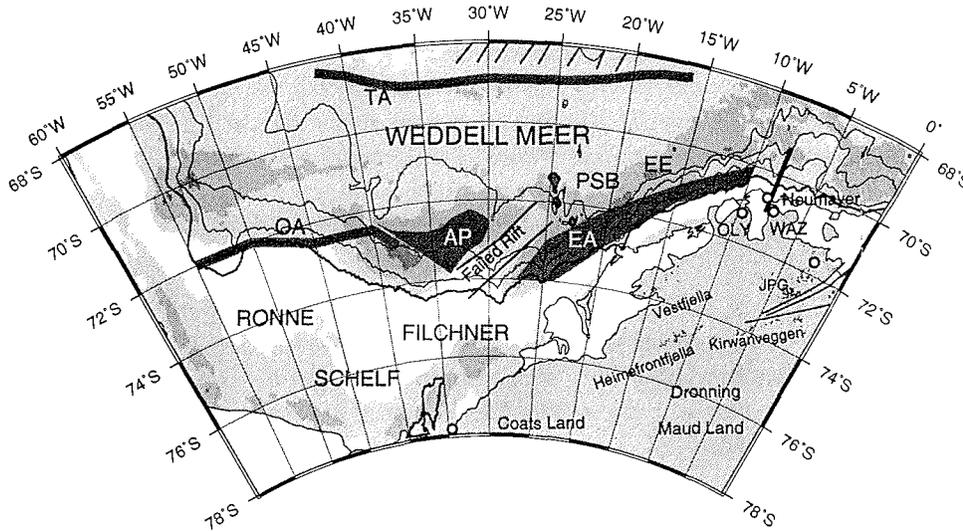


Abbildung 2.1 Tektonische Merkmale des Kontinentalrandes des östlichen Weddell-Meeres. Karte modifiziert nach Jokat *et al.* (1996). AP: Andenes Plateau, COB: Kontinent-Ozean-Grenze, EA: Explora Anomalie, EE: Explora Escarpment, OA: Orion Anomalie, PSP: Polarsternbank, JPG: Jutul-Penck-Graben.

al., 1996). Zur Rekonstruktion von Gondwana ist die genaue Kenntnis der Kontinent-Ozean-Grenze der Ostantarktis im Bereich des Weddell-Meeres entscheidend. Die wichtigsten tektonischen Merkmale im östlichen Weddell-See sind die Explora und Andenes Escarpments (Hinz & Krause, 1982; Kristofferson & Haugland, 1986; Hinz & Kristofferson, 1987). Das Explora Escarpment (EE, Abbildung 2.1) ist ein sich zwischen 10° – 17° W erstreckendes in etwa 60° streichendes Lineament mit einer seewärts gerichteten topographischen Stufe von etwa $0.3 - 2$ km Sprunghöhe (Miller *et al.*, 1991). Weiter westlich entdeckten Kristofferson & Haugland eine vollständig von Sedimenten bedeckte Erhöhung im kristallinen Grundgebirge (Andenes Escarpment, AE), welche sie als lineare Fortsetzung des EE und als Verlängerung des Kontinentalrandes in Richtung der Antarktischen Halbinsel interpretierten.

Ein dominierendes tektonisches Merkmal des Kontinentalrandes ist die Explora-Formation, eine Abfolge von leicht seewärts geneigten seismischen Reflektoren ("dipping reflectors") mit relativ hohen seismischen Geschwindigkeiten von 4.0 bis 5.5 $km \cdot s^{-1}$ (Hinz & Krause, 1982). Diese wer-

2. Tektonische Entwicklung

den als im mittleren Jura entstandene vulkanische Sequenz interpretiert, die unter subaerischen Bedingungen die durch das Rifting gedehnte kontinentale Kruste überlagerten.

Hinz & Kristofferson (1987) interpretierten eine etwa 50° streichende, zwischen EE und AE gelegene Grundgebirgsdepression als "failed rift"-Struktur, d.h. ein in der frühen Phase des Gondwana-Aufbruchs angelegtes Rift-System, das bei einer späteren Umorientierung des regionalen Spannungsfeldes wieder passiv wurde. Die Autoren begründen diese Interpretation mit den Ergebnissen der Modellierung reflexionsseismischer und gravimetrischer Daten, die im mittleren Jura angelegte ozeanische Kruste und geneigte Reflektoren an den Rift-Schultern vermuten lassen.

Ein weiteres markantes Merkmal der östlichen Weddellsee ist die Polarsternbank (PSB, Miller *et al.*, 1991). Es handelt sich dabei um eine Anhebung des Meeresbodens um etwa 400 m, die als eine NS-gerichtete und damit etwa senkrecht zum Kontinentalrand orientierte Kette von sedimentbedeckten Seamounts interpretiert wird. Vermutlich ist diese nach Anlage des EE in der unteren Kreide entstanden.

Die Ergebnisse neuer geophysikalischer Messungen im süd-östlichen Weddell-See widersprechen dem Modell einer strukturellen Einheit des EE und AE (Jokat *et al.*, 1996). Demnach lassen sich keine Anhaltspunkte dafür belegen, daß das AE eine Verlängerung des EE darstellt und aus kontinentaler Kruste aufgebaut ist. Die Autoren deuten die AE als eine Region, die stark von intensivem Vulkanismus in Folge des Rifting-Phase geprägt ist. Aufgrund dieser Vorstellungen schlagen sie den Namen "Andenes Plateau" (AP) vor (Abbildung 2.1). Damit ist auch die Interpretation der als "failed rift" vorgeschlagenen Struktur fraglich.

Von zentraler Bedeutung ist die Frage nach dem genetischen Ursprung des EE. Handelt es sich um einen Kontinentalrand, der durch reines Rifting entstanden ist oder um eine gescherte Plattengrenze? Viele Autoren (z.B. Lawver *et al.*, 1991) vertreten die Ansicht, daß es sich bei dem EE um einen zum konjugierten Mozambique Escarpment gescherten Kontinentalrand handelt. Sie begründen diese Vorstellung mit den steilen Flanken der Escarpments, die untypisch für passive geriftete Kontinentalränder sind.

Die Interpretation refraktionsseismischer Messungen, bei denen unter anderem auch die Stationen des seismologischen Netzwerkes der Neumayer Station eingesetzt wurden, lieferten im Bereich des Ekström-Schelfeises ein Modell der dortigen Krustenstruktur (Hübscher, 1994; Hübscher *et al.* 1996). Demnach beträgt die Krustenmächtigkeit im Bereich der Neumayer Station 40 km und dünnt in nördlicher Richtung auf 20 – 25 km aus (Abbildung 2.2). Die geneigten Reflektoren vulkanischen Ursprungs der Explora Formation weisen seismische Geschwindigkeiten von 4.0 bis 5.4 km s^{-1} auf (EW). In der unteren Kruste findet sich eine Schicht (EWC1), welche mit 7.2 bis 7.5 km s^{-1} relativ hohe Geschwindigkeiten zeigt. Diese sind typisch für passive Kontinentalränder vulkanischen Ursprungs und deuten auf vulkanische Intrusionen im Bereich der

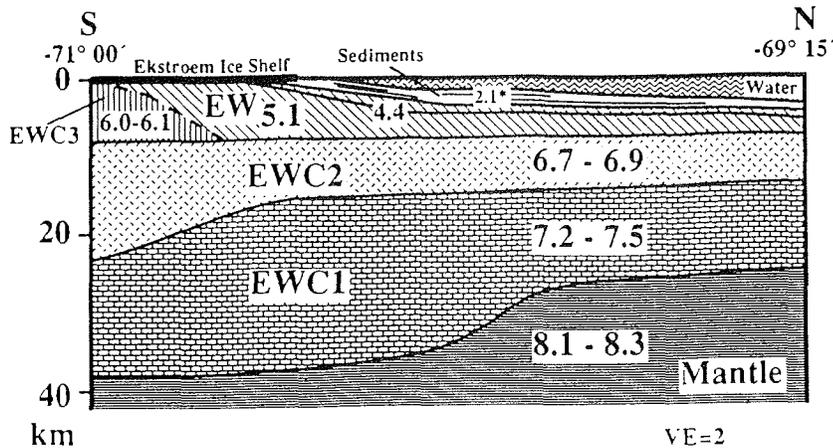


Abbildung 2.2 Krustensektion senkrecht zum Kontinentalrand im Bereich der Neumayer Station, östliches Weddell Meer. Die Lage des Profils bei $8^{\circ}W$ ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Aus Hübscher *et al.* (1996).

unteren Kruste hin. Ein ähnliches Modell lieferten Kudrayavtzev *et al.* (1991) aus einer Interpretation refraktionsseismischer und gravimetrischer Daten, deren Profil in das Hinterland der Neumayer Station verlängert war.

2.2 Tektonische Entwicklung der Heimefrontfjella, Kirwanveggen und Vestfjella

Die Heimefrontfjella ist ein etwa 150 km langer und bis zu 30 km breiter Gebirgszug, der sich ca. 450 km südlich der Neumayer Station in nord-ost bis süd-westlicher Richtung erstreckt. Sie ist vermutlich, ebenso wie die Gebirgszüge Kirwanveggen und Vestfjella (Abbildung 2.1), der östliche Teil eines mehrere 1000 km langen Orogens, das seine westliche Fortsetzung im Namaqua-Belt Südafrikas (Abbildung 2.3) findet (z.B. Groenewald *et al.*, 1988). Die Entwicklungsgeschichte der Heimefrontfjella ist ein durch verschiedene Deformationsereignisse geprägter Gebirgszug. Aus strukturgeologischen Untersuchungen und Altersbestimmungen an Gesteinsproben konnten verschiedene Deformationsepisoden unterschieden werden (Jacobs, 1991). Abbildung 2.4 zeigt die nach Jacobs vorgeschlagene Entwicklungsgeschichte der Heimefrontfjella. Die D_1 bis D_4 kennzeichnen die vier verschiedenen, die Gebirgsbildung prägenden, Deformati-

2. Tektonische Entwicklung

onsepisoden. Im Zuge der kibarischen Gebirgsbildung (ca. 1100 Ma) erfolgte eine EW-gerichtete Einengung mit der Folge der Anlage eines E-gerichteten Deckenbaus (D_1) und einer WSW-ENE orientierten steilen Scherzone (gestrichelte Linie in D_1).

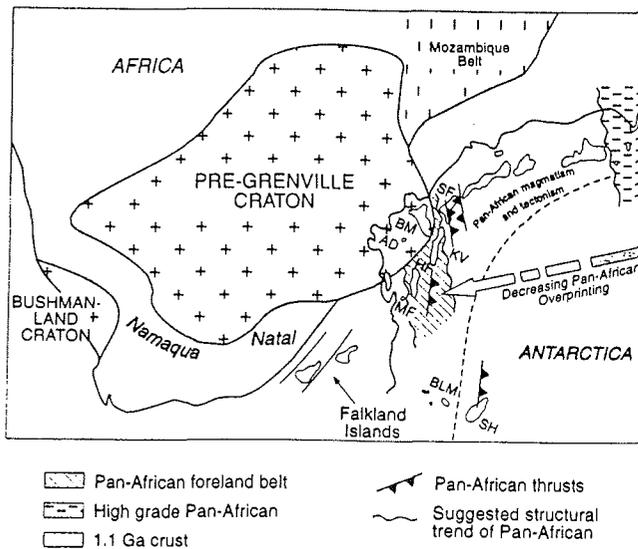


Abbildung 2.3 Rekonstruktion Ost-Gondwanas, Südafrikas und der Falkland Mikroplatte aus Jacobs & Thomas (1996). Zu sehen ist der Zimbabwe-Kaapvaal-Grunehogna-Kraton (Pre-Grenville Craton) und nach westen abnehmende Pan-Afrikanische Überprägung. AD: Annandagstoppane, BLM: Bertrab, Littlewood Moltke Nunataks, BM: Borgmassivet, HF: Heimefrontfjella, KV: Kirwanveggen, MF: mannefallknausane, SF: Sverdrupfjella, SH: Shackletonrange.

Im weiteren Verlauf der Einengung (D_2) kam es zur sinistralen Rotation der durch die Scherzone getrennten Krustenblöcke. Die nun SSW - NNE ausgerichtete Scherzone mit dextralem Schersinn ist über 90 km Länge aufgeschlossen. Das nordwestlich der Heimefrontfjella vorgelagerte, stabile Vorland bildet der Grunehogna-Kraton, der vermutlich ein Bruchstück des durch den Gondwanazerfall getrennten Teils des südafrikanischen Kaapvaal-Kratons darstellt (Moyes *et al.*, 1993; Abbildung 2.3).

In einem späteren tektonischen Ereignis, wahrscheinlich der Bildung des "panafrikanischen" Orogens (500 Ma, zeitlich parallel zur Ross-Orogenese), erfolgte eine NNW-gerichtete orientierte Überprägung (Abbildung 2.4, D_3).

Der im Zusammenhang mit dem Gondwana-Zerfall (D_4) stehende Vulkanismus führte neben den Extrusionen der Magmen der Explora Formation auch in der Heimefrontfjella und in der weiter nord-westlich gelegenen Vestfjella zu intensivem Austreten jurassischer Flutbasalte (Peters, 1989). In Folge des Gondwana-Aufbruchs fand eine intensive Blocktektonik mit vertikalen Heraushebungen bis zu 8 km statt (Jacobs, 1991).

Die Krustenmächtigkeiten in dieser Region betragen aus ersten Auswertungen eines refraktionsseismischen Profils, das senkrecht über die Heimefrontfjella vermessen wurde, 50 km im südlichen und 40 km im nördlichen Profilabschnitt (Eckstaller *et al.*, 1991).

2.3 Entwicklung des Kontinentalrandes des östlichen Weddell-Meeres

Wie schon erwähnt, begann der Aufbruch Gondanas zwischen Antarktika und Afrika im Bereich des Weddell-Meeres im frühen Jura (179 – 162 Ma). Begleitet war die Aufbruchphase von intensivem Vulkanismus in der Karoo Provinz Südafrikas und im westlichen Dronning Maud Land, der mit einem Mantel-"plume" in Verbindung stand. Unklar ist, ob der "plume" den Aufbruch initiiert oder als thermische Anomalie nur eine verstärkende Wirkung gehabt hat (Storey *et al.*, 1992). Als Folge dieses Vulkanismus wurden die geneigten Reflektoren der Explora Formation angelegt. In Begleitung des jurassischen Vulkanismus begann im östlichen Weddell-See der Rift-Prozess und damit die Entstehung ozeanischer Kruste.

Obwohl die damalige gegenseitige Lage der heutigen Kontinente generell geklärt ist, so bleiben noch einige Fragen zur Rekonstruktion und Driftgeschichte der terranen Blöcke der Westantarktis offen. Insbesondere die Driftgeschichte des EWM-Blocks ist nicht geklärt und wird kontrovers diskutiert (Curtis & Storey, 1996). Abbildung 2.6 zeigt zwei mögliche Vorstellungen zur Paläoposition der EWM.

In dem auf paläomagnetischen Messungen an Gesteinsproben verschiedener Mikroplatten beruhenden Modell von Grunow (Grunow, 1991; Grunow *et al.*, 1993) befand sich der EWM-Block zwischen dem Natal Embayment Südafrikas und dem Coats Land der Ostantarktis (Abbildung 2.5A). Einer früheren Rekonstruktion zufolge befand sich die Mikroplatte der EWM am Rand der Ostantarktis westlich der Pensacola Mountains (Schmidt & Rowley, 1986; Abbildung 2.5B) und erforderte eine Rotation im Uhrzeigersinn im Zusammenhang mit einer dextralen Blattverschiebung entlang des Transantarktischen Gebirges. Das Modell von Grunow (Abbildung 2.5 zeigt die

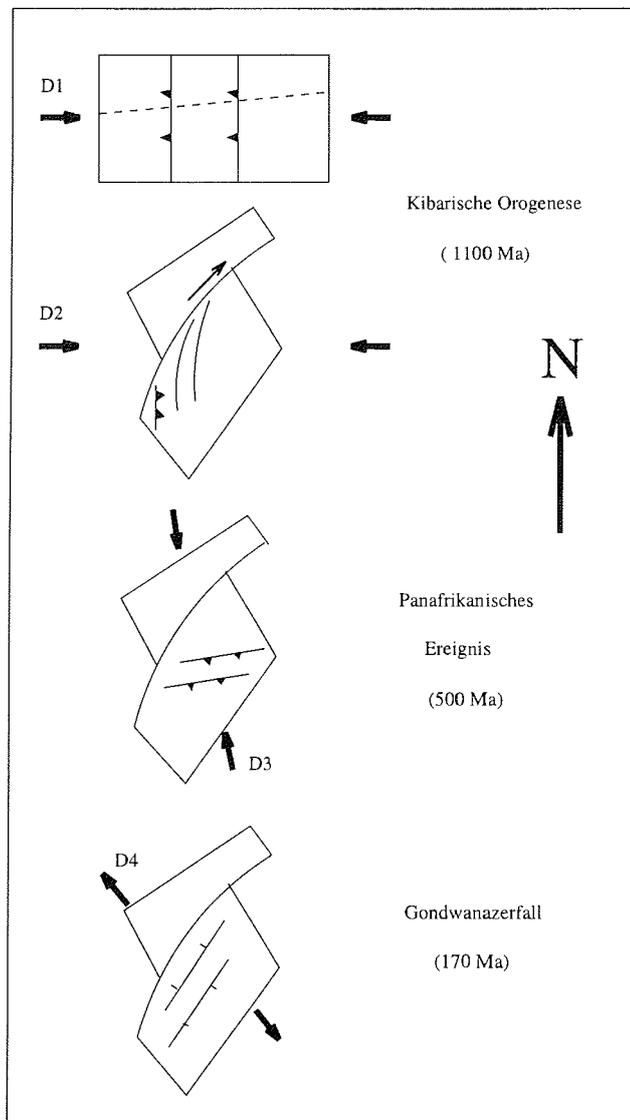


Abbildung 2.4 Strukturelle Entwicklung der Heimefrontfjella nach Jacobs (1991). Die Richtungen der Deformationsphasen (D_1 bis D_4) bezeichnen die Hauptspannungsrichtungen der verschiedenen tektonischen Episoden.

Plattenrekonstruktionen vor 150 Ma und vor 125 Ma) erfordert die Rotation der Antarktischen Halbinsel (30°) und der EWM (90°) im Uhrzeigersinn. Zusätzlich muß der EWM-Block eine sinistrale Blattverschiebung um 750 km entlang der Ostantarktis bis zu seiner heutigen Position erlebt haben. Das Modell erfordert erhebliche Transformversetzungen entlang des EE infolge der Verschiebung des EWM-Terrans (Abbildung 2.6 links).

Mit diesen Vorstellungen wird die Existenz kontinentaler Kruste im südlichen Weddell-See ausgeschlossen. Nach den neueren marin-geophysikalischen Daten dieser Region (Hübscher *et al.*, 1996; Jokat *et al.*, 1996) wurde jedoch die Existenz kontinentaler Kruste auf einem Profil entlang des Ronne-Schelfeises nachgewiesen.

Den weiteren Ergebnissen von Jokat *et al.* (1996) folgend, begann die Öffnung des Weddellmeeres in nord-südlicher Richtung (bezüglich der heutigen Antarktis) von West nach Ost fortschreitend. In diesen Zeitraum (175 - 155 Ma) fällt auch die Entstehung der PSB. Unterstützt wird dieses Modell durch die Identifikation von magnetischen Anomalien im Weddell-See nach LaBrecque & Barker (1981). Nach Jokat *et al.* (1991) existieren keine Anzeichen für große Scherbewegungen entlang des EE. Die Autoren vermuten eher ein schräg zum EE geneigtes Rifting.

Eine Umorientierung der Plattenbewegungen fand mit Beginn der Öffnung des Atlantiks (130 Ma) statt und führte aus dem einfachen Spreizungsrücken zu der Entstehung einer "triple junction" (Lawver *et al.*, 1991). Als Konsequenz für das EE wurde nach deren Modell aus dem anfänglich gerifteten, dann gescherten Kontinentalrand nunmehr wiederum eine riftbezogene Plattengrenze.

2.4 Rekonstruktion und Aufbruchmodelle Gondwanas

Der heutige Kontinentalrand des östlichen Weddell-Meeres hat eine besondere Bedeutung für die Vorstellungen über die Aufbruchsprozesse, die die Fragmentarisierung Gondwanas eingeleitet haben. Nach dem heutigen Erkenntnisstand erfolgte die Disintegration Gondwanas in drei hauptsächlichen Episoden (Lawver *et al.*, 1991). Der Aufbruch begann im frühen Jura (~ 180 Ma) zwischen der heutigen Ostantarktis im Bereich des Weddell-Meeres und dem heutigen Südafrika und führte zu einer Separierung in Ostgondwana (Antarktis, Indien, Australien, Neuseeland) und Westgondwana (Südamerika, Afrika). Die zweite Episode begann mit der Öffnung des südlichen Atlantik in der frühen Kreide (~ 130 Ma), in der sich das heutige Afrika von Südamerika trennte. Die dritte Episode ist durch die Aufspaltung Ostgondwanas in der späteren Kreide (90 - 100 Ma) gekennzeichnet, in der sich im Uhrzeigersinn Indien, Australien und Neuseeland von der heutigen Ostantarktis trennten. Der initiale Aufbruchsprozess war begleitet von Ausflüssen kontinentaler Flutbasalte im südlichen Afrika (Karoo Provinz, Cox, 1992), in der Antarktis (Dron-

2. Tektonische Entwicklung

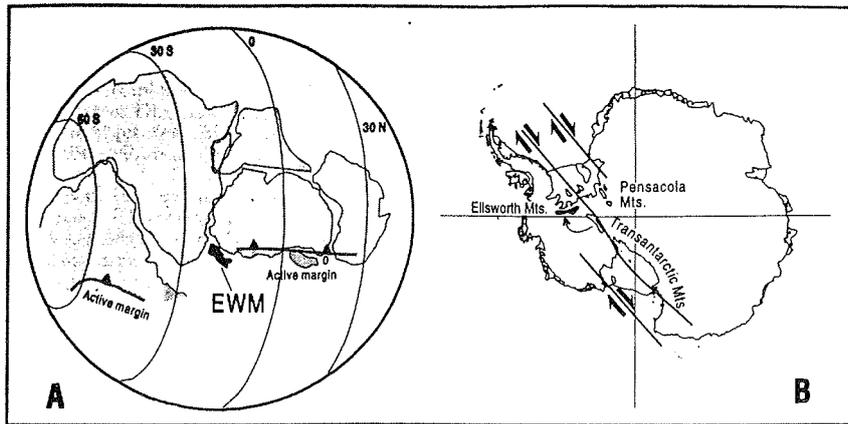


Abbildung 2.5 Modelle zur Paläolokation des EWM-Blocks. **A:** Zwischen Natal Embayment und Coats Land nach Dalziel *et al.* (1994). **B:** Am Rand der Ostantarktis westlich der Pensacola Mountains nach Schmidt & Rowley (1986). Aus Curtis & Storey (1996).

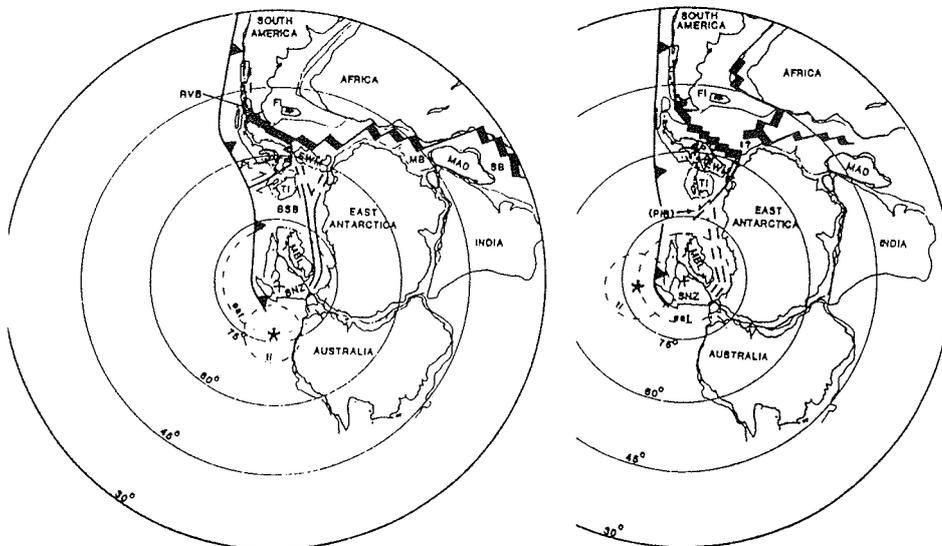


Abbildung 2.6 Rekonstruktionen der Plattenkonfigurationen vor 150 Ma (links) und vor 125 Ma (rechts) nach dem Modell von Grunow *et al.* (1993).

ning Maud Land und Ferrar Provinz, Elliott, 1992) und Australien (Tasman Provinz, Hergt *et al.*, 1989), die auf einen Mantel-“plume“ unterhalb Gondwanas zurückgeführt werden können (White & McKenzie, 1989) und damit auch eine entscheidende Bedeutung beim Aufbruch gehabt haben (Abbildung 2.7). Der proto-pazifische Kontinentalrand war ein aktiver, durch Subduktionstätigkeit charakterisierter magmatischer Gürtel, dessen Aktivität von West nach Ost bis zur wahrscheinlich heute noch aktiven Nordspitze der AP nachgelassen hat.

Obwohl in diesen groben Zügen der Verlauf des Auseinanderfallens Gondwanas bekannt ist, so bleiben noch einige spezielle Fragen zur tektonischen Entwicklungsgeschichte offen. Insbesondere die gegenseitige Lage der tektonischen Einheiten, die das heutige Weddell-Meer begrenzen sowie deren tektonische Entwicklungsgeschichte sind bisher nicht in allen Einzelheiten verstanden und werden noch kontrovers diskutiert (King *et al.*, 1996). Die in den Gondwana-Rekonstruktionen auftretenden Überlappungen zwischen der Antarktischen Halbinsel (AP) und der südamerikanischen Platte bzw. des Falklandplateaus (FP), sowie der heterogene geologische Aufbau der Westantarktis, veranlaßten Dalziel & Elliot (1982), die Westantarktis als ein Mosaik von Mikroplatten zu betrachten, die eine unterschiedliche Driftgeschichte erfahren haben (Abbildung 2.1). Diese Mikroplatten sind die Antarktische Halbinsel (AP), Haag Nanatak (HN), Thurston Island (TI), Marie Byrd Land (MBL) und der Ellsworth-Whitmore-Mountains-Block (EWM).

2.5 Fragestellungen und Zielsetzungen

Die in dieser Arbeit untersuchte seismische Anisotropie aus an den Stationen des seismologischen Netzwerkes der Neumayer Station (Abbildung 2.2) registrierten S-Wellenformen kann Hinweise auf rezente und fossile Deformationsmechanismen im oberen Mantel in der Nähe des Kontinentalrandes Dronning Maud Lands liefern. So können die durch bisherige geophysikalische Datensätze gewonnenen Vorstellungen zur tektonischen Entwicklungsgeschichte, die jedoch im wesentlichen Tiefenbereiche bis zur Moho erfassen, durch im oberen Mantel liegende deformationsinduzierte Merkmale ergänzt werden. Die damit verbundenen Fragestellungen sind:

- Welche bevorzugten Anisotropie-Richtungen lassen sich im oberen Mantel feststellen?
- Könnte möglicherweise eine Anisotropie in Zusammenhang mit frühen tektonischen Entwicklungsphasen (Prä-Gondwana-Zerfall) stehen?
 1. Gebirgsbildungsprozesse (Kibarische Gebirgsbildung) der Heimefrontfjella
 2. Panafrikanische Überprägung
 3. Noch ältere Strukturen des Grunehogna Kratons

2. Tektonische Entwicklung

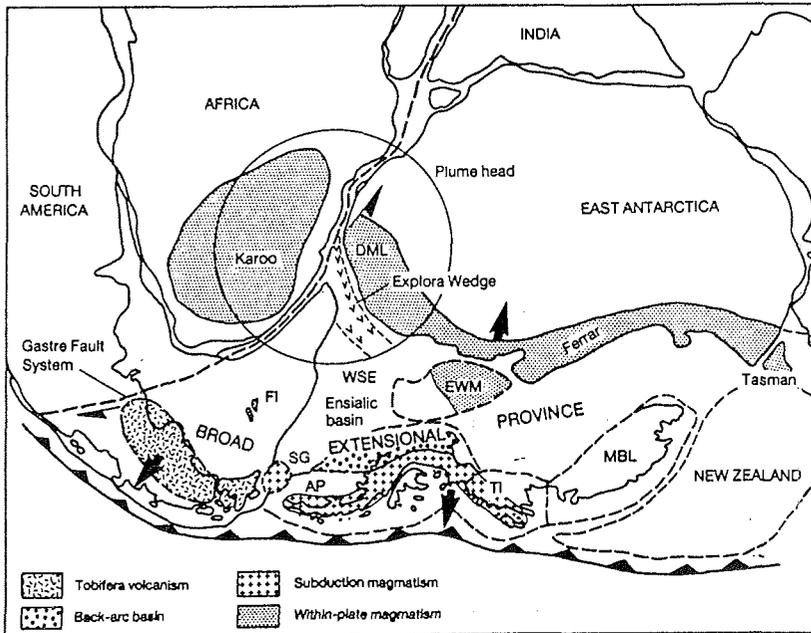


Abbildung 2.7 Mitt-jurassische Gondwana-Rekonstruktion nach Storey *et al.*, 1992. Dargestellt ist der Intra-Platten-Vulkanismus der Karoo-, Ferrar- und Tasman-Provinzen sowie die Regionen des subduktionsbezogenen magmatischen Gürtels des protopazifischen Kontinentalrandes. DML: Dronning Maud Land, EWM: Ellsworth-Whitmore Mountains, FI: Falkland Inseln, WSE: Weddell Sea Embayment, AP: Antarktische Halbinsel, TI: Thurston Island, MBL: Marie Byrd Land.

4. Falls ja, Korrelation mit Anisotropie-Strukturen des Kaapvaal Kratons, neuer Hinweis auf Gondwana-Rekonstruktionen.
- Erlauben die Anisotropie-Parameter eine Aussage über die Deformationsrichtungen während des fortschreitenden Aufbruchsprozesses Gondwanas und insbesondere
 1. läßt sich die Richtung des initialen Aufbruchs (Rifting) im oberen Mantel wiederfinden,
 2. in welcher Richtung erfolgte das initiale Rifting, senkrecht oder schräg zur ehemaligen Plattengrenze (EE) oder

2.5 Fragestellungen und Zielsetzungen

3. lassen sich aus den Anisotropie-Richtungen Hinweise auf große Scherbewegungen parallel zum EE finden?
 4. welchen Einfluß hatte der ehemalige Manteldiapir auf die seismische Anisotropie im oberen Mantel?
- Ist die Anisotropie eine Folge von rezenten Deformationen in der Asthenosphäre im Zusammenhang mit absoluter Plattenbewegung?
 - Ist die Anisotropie ein Effekt der Überlagerung zweier oder mehrerer Deformationsereignisse?

3. Seismische Anisotropie, S-Wellensplitting und Deformationen im oberen Mantel

Die Charakteristika seismischer Wellen sind Funktionen der elastischen Eigenschaften des Erdkörpers. Umgekehrt verschaffen seismische Wellen einen Einblick in die Elastizitätsstruktur und damit auch zu Eigenschaften wie Temperatur, Druck, Zusammensetzung und Mineralogie. Insbesondere erlaubt eine weltweit vorhandene Geschwindigkeitsanisotropie im oberen Mantel Einblicke in die Deformationsmechanismen in dieser Tiefenregion und trägt mit dazu bei, geodynamische Prozesse besser verstehen zu lernen. Seit Mitte der 80er Jahre hat sich in der Seismologie die Untersuchung seismischer Anisotropie zu einer effizienten Methode zur Analyse geodynamischer Prozesse in der Kruste und im oberen Mantel entwickelt. Der Einsatz neuer Methoden zur Bestimmung der Anisotropie-Struktur liefert damit die Möglichkeit, nicht nur strukturelle Merkmale des Erdaufbaus, sondern zusätzlich einen direkten Einblick in geodynamische Prozesse sowohl rezenter als auch historischer Natur zu verschaffen. Seismische Anisotropie steht in enger Beziehung zu dehnungsinduzierter bevorzugter Ausrichtung der Kristallgitter (englisch Lattice Preferred Orientation, LPO) hochgradig anisotroper Kristalle der den oberen Mantel konstituierenden Minerale wie Olivine und Orthopyroxene (Nicolas & Christensen, 1987; Ribe 1989a,b). Damit haben sich Untersuchungen seismischer Anisotropie zu einer wirkungsvollen Methode entwickelt, um im Zusammenhang mit der Plattentektonik stehende Bewegungen und Deformationen im oberen Mantel zu studieren.

Durch die Beobachtung richtungsabhängiger Variationen der P_n -Geschwindigkeiten aus refraktionsseismischen Studien (Hess, 1964; Raitt *et al.*, 1969; Bamford, 1977; Shearer & Orcutt, 1986) wurden erste Hinweise auf azimutale Anisotropie vornehmlich in der ozeanischen Kruste und der Sub-Moho gewonnen, die wahrscheinlich mit den ("fossilen") Ausflußrichtungen der mittelozeanischen Rücken in Zusammenhang stehen.

Auch verschiedene Untersuchungen langperiodischer Oberflächenwellen (z.B. Forsyth, 1975; Nataf, *et al.* 1984; Tanimoto & Anderson, 1985; Montagner & Tanimoto; 1990, insbesondere für

die Antarktis: Roult *et al.*, 1994) lieferten Hinweise auf weltweit existierende seismisch anisotrope Strukturen im oberen Mantel.

Insbesondere die Methode der Analyse des Scherwellensplitting (ein Analogon zur optischen Doppelbrechung an optisch anisotropen Medien wie dem Kalkspat) hat inzwischen einen weltweiten Datensatz von über 300 Lokationen, vornehmlich an kontinentalen Stationen geliefert (Vinnik *et al.*, 1984, 1992; Kind *et al.*, 1985; Silver & Chan, 1988, 1991; und jüngst in einem zusammenfassenden Übersichtsartikel Silver, 1996), wobei mit einer Ausnahme (Syowa Station, Kubo *et al.*, 1995) die Antarktis ausgespart blieb.

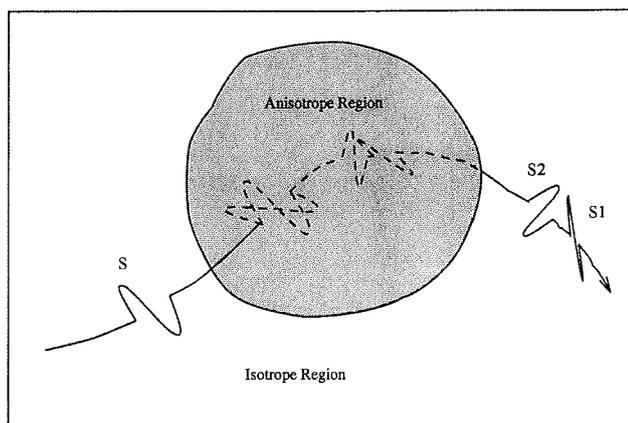


Abbildung 3.1 Schematische Darstellung des S-Wellensplittings beim Durchlauf einer linear polarisierten S-Welle durch ein anisotropes Medium, nach Crampin (1985).

Das Phänomen des S-Wellensplittings beruht auf der Tatsache, daß sich eine anfänglich linear polarisierte Scherwelle beim Durchgang durch ein schwach anisotropes Medium in zwei Wellen mit orthogonalen Polarisationsrichtungen und unterschiedlichen Wellengeschwindigkeiten aufspaltet (Abbildung 3.1). Aus der Aufzeichnung solcher aufgespaltener S-Wellenformen kann auf die Anisotropie-Struktur innerhalb des Laufweges der Welle zurückgeschlossen werden.

3.1 Ursachen seismischer Anisotropie und S-Wellensplitting

3.1.1 Zusammenhang Splitting / Anisotropie

Um den Einfluß seismisch anisotroper Medien auf den Durchgang einer elastischen Welle zu illustrieren, sollen zunächst die Wellengleichung abgeleitet und einfache Lösungen diskutiert werden. Die folgende Ableitung beruht auf der Monographie von Babuška & Cara (1991). Eine seismische Welle genügt in ihrer allgemeinsten Form (ohne Einfluß sekundärer äußerer Kräfte) der Bewegungsgleichung (Wellengleichung)

$$\rho(\vec{r})\partial_t^2 u_i(\vec{r}, t) = \partial_j \sigma_{ij}(\vec{r}, t) \quad . \quad (3.1)$$

Im allgemeinen werden hier und im folgenden kartesische Koordinaten verwendet, insbesondere durchlaufen freie Indizes die Werte 1, 2 und 3. Ebenso findet die Einsteinsche Summationskonvention Anwendung, d.h über doppelt auftretende Indizes wird von 1 bis 3 summiert. ∂_t bezeichnet die zeitliche Ableitung und ∂_j die räumliche Ableitung nach der j-ten Koordinate. Der Vektor $\vec{u}(\vec{r}, t)$ beschreibt den zeitlichen Ablauf der Bewegung eines Teilchens am Ort \vec{r} . $\rho(\vec{r})$ ist die Dichte und die $\sigma_{ij}(\vec{r}, t)$ die raum- und zeitabhängigen Koeffizienten des Spannungstensors σ . Dieser ist über das Hook'sche Gesetz

$$\sigma_{ij}(\vec{r}, t) = c_{ijkl}(\vec{r})\epsilon_{kl}(\vec{r}, t) \quad (3.2)$$

mit dem Deformationstensor

$$\epsilon_{kl}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2}(\partial_k u_l(\vec{r}, t) + \partial_l u_k(\vec{r}, t)) \quad (3.3)$$

verknüpft. Die Koeffizienten c_{ijkl} des Elastizitätstensors c definieren die Elastizitätsstruktur des Mediums. Unter der vereinfachenden Annahme eines (stückweise) homogenen Mediums werden die Materialparameter ρ und c ortsunabhängig und durch Einsetzen von (3.2) und (3.3) folgt für die Wellengleichung:

$$c_{ijkl}\partial_j\partial_k u_l = \rho\partial_t^2 u_i \quad . \quad (3.4)$$

Damit läßt sich der einfachste Fall der Ausbreitung seismischer Wellen in anisotropen Medien betrachten, der einer ebenen Welle in einem homogenen anisotropen Medium. Eine solche Welle ist in der Form

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = Af(t - \vec{n} \cdot \vec{r}/c)\vec{p} \quad (3.5)$$

darstellbar. A ist die Amplitude, $f(t - \vec{n} \cdot \vec{r}/c)$ liefert die Zeitabhängigkeit der Teilchenbewegung an einem festen Ort im Raum, c ist die Phasengeschwindigkeit, der Vektor \vec{p} beschreibt die Polarisationsrichtung der Welle und der Vektor \vec{n} die Ausbreitungsrichtung (nicht notwendigerweise senkrecht zur Wellenfront). Eingesetzt in die Wellengleichung ergibt sich die Gleichung

$$V_{il}p_l = c^2 p_i \quad (3.6)$$

Diese Gleichung ist eine Eigenwertgleichung mit den Elementen

$$V_{il} \equiv c_{ijkl}n_j n_k / \rho \quad (3.7)$$

der sogenannten Christoffelmatrix V . Die Christoffelmatrix beschreibt den Zusammenhang zwischen der Elastizitätsstruktur des Mediums und der Ausbreitungsrichtung der Welle. Die Eigenwertgleichung (3.6) liefert die Geschwindigkeiten und Ausbreitungsrichtungen von drei verschiedenen Wellen. Die Richtungen werden durch die Eigenvektoren gegeben und die (quadrierten) Geschwindigkeiten durch die entsprechenden Eigenwerte. Die Art der drei Typen von Wellen ist vollständig durch die Christoffelmatrix festgelegt, d.h. durch die Elemente des Elastizitätstensors und die Ausbreitungsrichtung der Welle.

Hier sollen noch einige allgemeine Anmerkungen zum Elastizitätstensor gemacht werden, da dieser die Elastizitätsstruktur (und damit die Anisotropie-Struktur) des Mediums beschreibt. Die Matrixelemente des Elastizitätstensors c bilden einen Tensor 4. Ordnung, d.h. im allgemeinsten Fall bei 3 unabhängigen Raumkoordinaten existieren 81 unabhängige Koeffizienten. Diese Anzahl läßt sich für ein beliebiges anisotropes Medium auf 21 reduzieren, wenn man die Symmetrie von Spannungs- und Dehnungstensor in Betracht zieht. Aus zusätzlichen energetischen Überlegungen folgen damit die vollständigen Symmetriebedingungen des Elastizitätstensors:

$$c_{ijkl} = c_{jikl} = c_{ijlk} = c_{klij} \quad (3.8)$$

Diese Symmetriebedingungen erlauben die übliche Darstellung der Elastizitätsparameter durch eine 6x6-Matrix, d.h. durch

3. Seismische Anisotropie, S-Wellensplitting und Deformationen im oberen Mantel

$$(C_{ij}) = \begin{pmatrix} c_{1111} & c_{1122} & c_{1133} & c_{1123} & c_{1113} & c_{1112} \\ c_{2211} & c_{2222} & c_{2233} & c_{2223} & c_{2213} & c_{2212} \\ c_{3311} & c_{3322} & c_{3333} & c_{3323} & c_{3313} & c_{3312} \\ c_{2311} & c_{2322} & c_{2333} & c_{2323} & c_{2313} & c_{2312} \\ c_{1311} & c_{1322} & c_{1333} & c_{1323} & c_{1313} & c_{1312} \\ c_{1211} & c_{1222} & c_{1233} & c_{1223} & c_{1213} & c_{1212} \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

Diese Darstellung der Elastizitätskoeffizienten hat jedoch keine direkte physikalische Bedeutung, da zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ein Tensor 4. Ordnung benötigt wird, hat sich aber aus Anschauungsgründen etabliert. So lauten die Koeffizienten des Elastizitätstensors für ein isotropes Medium

$$c_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (3.10)$$

(δ_{ij} ist das Kroneckersymbol, d.h. $\delta_{ij} = 1$ für $i = j$ und 0 für $i \neq j$) und in Matrixschreibweise

$$(C_{ij}) = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}. \quad (3.11)$$

In diesem Fall genügen zwei unabhängige Parameter (die Lamé'schen Parameter λ und μ) zur Beschreibung der Elastizitätseigenschaften, obwohl (bei entsprechender Wahl des Koordinatensystems) 12 Koeffizienten benötigt werden. Eine Symmetriestruktur des Mediums wird durch die Wahl der Koeffizienten beschrieben. Eine Übersicht über geeignete Symmetriesysteme zur Beschreibung mineralogisch relevanter Systeme geben z.B. Babuška & Cara (1991), auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Die Symmetrie der Elastizitätsstrukturen erhöht sich mit der Verminderung der Anzahl der unabhängigen Elastizitätskonstanten. So liegt die größte Symmetrie im elastischen Fall mit zwei unabhängigen Konstanten (λ und μ) vor. Im flüssigen Fall reduziert sich diese noch auf ein Konstante ($\mu = 0$). Elastizitätsstrukturen nächstgeringer Symmetrie sind hexagonale Systeme. Für diese erhöht sich die Anzahl der unabhängigen Konstanten auf 5. Da hexagonale Symmetriesysteme eine gewisse Bedeutung für seismologische Fragestellungen haben und auch die Grundlage für die in dieser Arbeit verwendeten Verfahren bilden, sollen diese Systeme hier eingehender diskutiert werden. Deren Bedeutung liegt darin, daß sie relativ einfach beschrieben werden können und dennoch eine gute Näherung zu komplexeren

Strukturen darstellen. Die Koeffizientenmatrix C ist für hexagonale Systeme folgendermaßen gegeben:

$$(C_{ij}) = \begin{pmatrix} A & A - 2F & F & 0 & 0 & 0 \\ A - 2F & A & F & 0 & 0 & 0 \\ F & F & C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N \end{pmatrix} . \quad (3.12)$$

Dabei ist die x_3 -Achse notwendigerweise die Symmetrieachse. Die Verwendung der unabhängigen Koeffizienten A , F , C , N und L wurden von Love (1927) eingeführt und sind in der Seismologie zur Konvention geworden.

Für dieses einfache System soll im folgenden die Ausbreitung seismischer Wellen diskutiert werden. Das verwendete Koordinatensystem sei durch die Anisotropie-Struktur und die Ausbreitungsrichtung festgelegt (Abbildung 3.2). Die Symmetrieachse sei dabei horizontal, d.h. die seismischen Geschwindigkeiten variieren in der Horizontalebene. Diese sei durch die Achsen (x_2, x_3) aufgespannt und beinhalte damit die Symmetrieachse. Derartige Medien werden auch Systeme von azimuthaler Anisotropie genannt. Die Vertikalrichtung ist damit durch die x_1 -Achse festgelegt. Die Ausbreitungsrichtung der Welle falle mit der x_1 -Richtung zusammen, und damit ist der Vektor der Ausbreitungsrichtung in diesem Koordinatensystem durch $\vec{n} = (1, 0, 0)$ gegeben. Mit diesen Vorgaben läßt sich die entsprechende Christoffelmatrix leicht angeben:

$$(V_{ij}) = \frac{1}{\rho} \begin{pmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & N & 0 \\ 0 & 0 & L \end{pmatrix} . \quad (3.13)$$

Sind die Koeffizienten A , N , L voneinander verschieden, ergeben sich aus der Eigenwertgleichung

$$\det|(V_{il} - \lambda\delta_{il})| = 0 \quad (3.14)$$

die drei Eigenwerte

$$\lambda_1 = A/\rho \quad \lambda_2 = N/\rho \quad \lambda_3 = L/\rho \quad (3.15)$$

mit den zugehörigen Eigenvektoren

$$\vec{A}_1 = Ap_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{A}_2 = Ap_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{A}_3 = Ap_3 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} . \quad (3.16)$$

Die drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ergeben sich aus den Eigenwerten zu

$$v_P = \sqrt{A/\rho} \quad v_{S1} = \sqrt{N/\rho} \quad v_{S2} = \sqrt{L/\rho} \quad (3.17)$$

Die Polarisationsrichtung von v_P liegt in der Ausbreitungsrichtung und entspricht damit der P-Welle. Die Wellengeschwindigkeiten v_{S1} und v_{S2} charakterisieren die, im Falle $N > L$, schnellere Welle S1 bzw. langsamere Welle S2. S1 ist parallel zur x_2 -Achse polarisiert und S2 parallel zur x_3 -Achse, d.h. zur Symmetrieachse. Im isotropen Fall ($N = L$) existiert nur eine Scherwelle. Einen wichtigen Einfluß auf die Amplituden der drei Wellen zueinander hat die initiale Polarisationsrichtung, die durch den Vektor \vec{p} gegeben ist. Liegt \vec{p} in der (x_1, x_3) -Ebene, so wird keine Energie in die x_1 -Richtung übertragen und es existiert keine P-Welle. Ist die anfängliche Polarisationsrichtung parallel oder senkrecht zur Symmetrieachse (x_3 oder x_2), so findet kein S-Wellen-Splitting statt und es existiert nur die langsame Welle S2 bzw. die schnelle S1. Obwohl scheinbar isotrop, maskiert dieser Fall doch nur vorhandene Anisotropie. Beobachtet man aus einem Seismogramm nur eine, nicht aufgesplante S-Welle, so läßt sich nicht entscheiden, ob das durchlaufene Medium isotrop ist, oder Polarisationsrichtung und x_3 bzw. x_2 zusammenfallen. Die Laufzeitdifferenz zwischen beiden Wellen ist abhängig von der Stärke der Anisotropie, gegeben durch den Geschwindigkeitskontrast beider S-Wellen und der Länge des Laufweges durch das anisotrope Medium:

$$\delta t = x_1(1/v_{S2} - 1/v_{S1}) . \quad (3.18)$$

Im allgemeinen inhomogenen Fall oder auch bei einem Laufweg durch verschiedene anisotrope Regionen ist die Laufzeitdifferenz δt ein integraler Wert, d.h. er beinhaltet die gesamte Anisotropie-Information entlang des Laufweges L:

$$\delta t = \int_0^L (1/v_{S2}(\vec{r}) - 1/v_{S1}(\vec{r})) d\vec{r} , \quad (3.19)$$

mit den Grenzen 0 (Quellregion) und L (Empfängerstation). Für eine einzige homogene anisotrope Schicht geht die Integration in eine einfache Multiplikation über:

$$\delta t = (1/v_{S2} - 1/v_{S1})L \simeq v_{S0}^{-2}(v_{S1} - v_{S2})L . \quad (3.20)$$

3.1 Ursachen seismischer Anisotropie und S-Wellensplitting

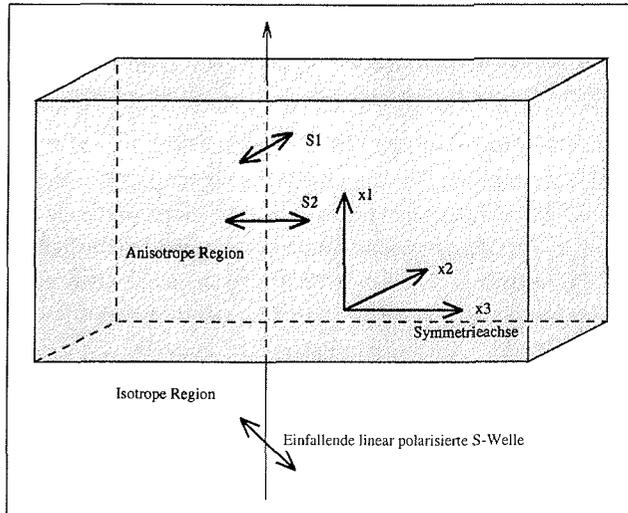


Abbildung 3.2 Durchlauf einer linear polarisierten S-Welle durch eine Schicht von hexagonaler Symmetrie mit horizontaler Symmetrieachse (x_3 -Ache).

Daraus ist auch der Koeffizient der Anisotropie k ableitbar (Birch, 1960), der sich aus L und δt durch

$$k = (v_{S1} - v_{S2})/v_{S0} = v_{S0}\delta t/L \quad (3.21)$$

darstellen läßt. Dabei ist v_{S0} die mittlere bzw. isotrope Scherwellengeschwindigkeit.

In isotropen Medien existieren zwei Typen von elastischen Wellen, die P- oder auch Kompressions- oder Longitudinalwellen sowie die S- oder auch Transversalwellen. Bei beiden Arten von Wellen ist die Teilchenbewegung streng an die Strahlgeometrie gebunden. In anisotropen Medien sind, abgesehen von bestimmten Strahl-/Anisotropie-Geometrien die Wellen weder rein longitudinal noch transversal polarisiert. Im oben diskutiertem Beispiel, in der Ausbreitungsrichtung der Welle und Symmetrieachse des Mediums orthogonal zueinander sind, sind die drei verschiedenen Wellen reine Longitudinal- bzw. Transversalwellen. Bei Abweichungen von dieser Geometrie, z.B. horizontaler Symmetrieachse, aber ein gewisse Neigung des einfallenden Strahls, entstehen keine reinen P- und S-Wellen, sondern die Polarisationsrichtungen weichen von der Ausbreitungsrichtung bzw. senkrecht dazu ab. Da in der Erde (Kruste, Mantel) jedoch nur "schwache" Anisotropie vorherrscht, d.h. nur geringfügig vom isotropen Fall abweichend,

spricht man von quasi-P- und quasi-S-Wellen, da die Polarisationsrichtungen angenähert denen von isotropen Verhältnissen entsprechen. Da in der vorliegenden Arbeit ausschließlich steil auftauchende S-Wellen verwendet werden und bei der Modellierung von einem System azimuthaler Anisotropie ausgegangen wird, ist die Voraussetzung der Entkopplung annähernd gegeben.

Der Effekt eines solchen Mediums auf eine durchlaufende Scherwelle läßt sich also charakterisieren durch die Polarisationsrichtungen der schnellen bzw. langsamen Welle und der Laufzeitdifferenz beider Wellen. Die Polarisationsrichtungen sind dabei durch das kristallographische Koordinatensystem (x_1, x_2, x_3) gegeben und werden gegenüber einem Referenzkoordinatensystem, z.B. (NS, EW, Z), festgelegt. Die beiden diese Systeme beschreibenden und meßbaren Parameter (Ausrichtung des Anisotropie-Systems und Laufzeitdifferenz) werden im folgenden kurz "Splitting-Parameter" oder "Anisotropie-Parameter" genannt.

3.1.2 Zusammenhang Anisotropie / Deformationsprozesse

Die Beantwortung der Frage nach der Ursache seismischer Anisotropie erfordert ein Verständnis der physikalischen Eigenschaften der gesteinsbildenden Minerale und deren Verhalten während Deformationsvorgängen. Die Interpretation von gemessenen Anisotropie-Parametern erfordert eine Vorstellung über den mineralogischen Aufbau der entsprechenden Mantelregion, die Elastizitätsstruktur der dominierenden Einzelminerale und deren Verhalten unter den entsprechenden Deformationsmechanismen im Gesteinsverbund, um dieses dann unter tektonischen Gesichtspunkten interpretieren zu können.

Die Kristallstrukturen gesteinsbildender Minerale der oberen 100km des Mantels sind aus Ophiolithen und Xenolithen relativ gut bekannt. Die den oberen Mantel konstituierenden Minerale (Olivin, Orthopyroxen) sind hochgradig anisotrop. Aus Laborversuchen (Kumazawa & Anderson, 1969) ergibt sich für einen Olivin-Einzelkristall ein Anisotropie-Koeffizient von $k_p \sim 0.24$ für P-Wellen und $k_s \sim 0.22$ für S-Wellen. Aus Einzelkristallversuchen ergaben sich für die kristallographische [100]- oder a-Achse die größten Kompressionsgeschwindigkeiten, die geringsten für die [010]-Achse (b-Achse) und mittlere für die [001]-Achse (c-Achse). Die Symmetriesysteme von Olivin und Orthopyroxen sind orthorhombisch und benötigen daher neun unabhängige Konstanten zu ihrer Beschreibung. Der obere Mantel ist jedoch nur zu 50-70% aus Olivinen aufgebaut, der restliche Anteil besteht hauptsächlich aus Orthopyroxenen, die eine geringere intrinsische Anisotropie aufweisen und zusätzlich einen, den gesamten Anisotropie-Effekt mindernden, Einfluß haben (Nicolas & Christensen, 1987). Im makroskopischen Bereich sollte diese Anisotropie sich bei einer beliebigen Anordnung der Minerale herausmitteln. Da aber weltweit ein signifikanter Anisotropie-Effekt nachgewiesen werden kann, muß es einen Mechanismus geben, der zu einer Ordnung bzw. Orientierung der Kristallstrukturen führt.

Das Problem besteht darin, eine Orientationsverteilung der anisotropen Minerale des Mantels als Funktion endlicher Dehnung (finite strain) zu finden. Für seismologische Belange ist es ausreichend, eine Beziehung zwischen einem makroskopisch gemittelten Elastizitätstensor $\langle C_{ijkl} \rangle$, einer Funktion der Orientierungsverteilung der Mantelminerale und finite strain zu finden. Das aus Elastizitätstheorie (z.B. McKenzie 1979; Ribe, 1989a, 1989b) und Laboruntersuchungen (z.B. Nicolas & Poirier, 1976; Mainprice & Silver, 1993) gefundene Ergebnis ist relativ einfach. Aus den Ergebnissen von Laboruntersuchungen an Gesteinskomplexen aus Proben des oberen Mantels ergibt sich eine ähnliche Elastizitätsstruktur wie an Kristallproben gemessenen. Nicolas & Christensen (1987) untersuchten die Ursachen der Mechanismen, die zu einer durch homogene Deformation bevorzugten Ausrichtung der Kristallstrukturen (Lattice Preferred Orientation oder LPO) führen. Eine Reorientierung der Kristallstrukturen findet in enger Anlehnung an die Deformationsgeometrie statt. So korrespondieren die dominierende Gleitebene und -richtung zu der entsprechenden Fließebene und -richtung. Insbesondere, und damit besonders einfach und interessant für seismologische Anwendungen, ist eine Ausrichtung der kristallographische a-Achse (schnellen Achse) mit der Foliations- und Lineationsrichtung der Deformationsgeometrie.

3.1.3 Zusammenhang Deformationsprozesse / Tektonische Prozesse

Im wesentlichen existieren zwei Theorien, unter denen Anisotropie im oberen Mantel eingeordnet werden kann (Silver, 1996):

- Einfaches Fließen in der Asthenosphäre, hervorgerufen durch differentielle Scherung der Asthenosphäre über einen stationären Mantel. Dieser Deformationsmechanismus steht im Zusammenhang mit (rezenter) absoluter Plattenbewegung (APM). Beobachtungen seismischer Anisotropie auf ozeanischen Inseln des Pazifik lassen vermuten, daß unterhalb ozeanischer Kruste dieser Mechanismus wirksam ist (Ansel & Nataf, 1989). Vinnik *et al.* (1992) und Vinnik *et al.* (1995) vermuten diesen Zusammenhang auch als Ursache für Anisotropie im kontinentalen Mantel.
- Vertikale kohärente Deformation (VCD) der Lithosphäre (Silver 1996). Die Beobachtung, daß die Parameter seismischer Anisotropie in vielen Fällen mit oberflächengeologischen Struktureinheiten korrelieren und über regionale Bereiche von 10er Kilometern variieren können, führten zu der Vorstellung, daß die die Oberfläche prägenden Deformationen bis in den oberen Mantel fortgesetzt werden (Helffrich *et al.*, 1994; Silver 1996).

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit ist eine Kombination aus beiden, nämlich rezenter Anisotropie in der Asthenosphäre und fossiler Anisotropie in der Lithosphäre (Savage & Silver, 1993; Silver & Savage, 1994).

3. Seismische Anisotropie, S-Wellensplitting und Deformationen im oberen Mantel

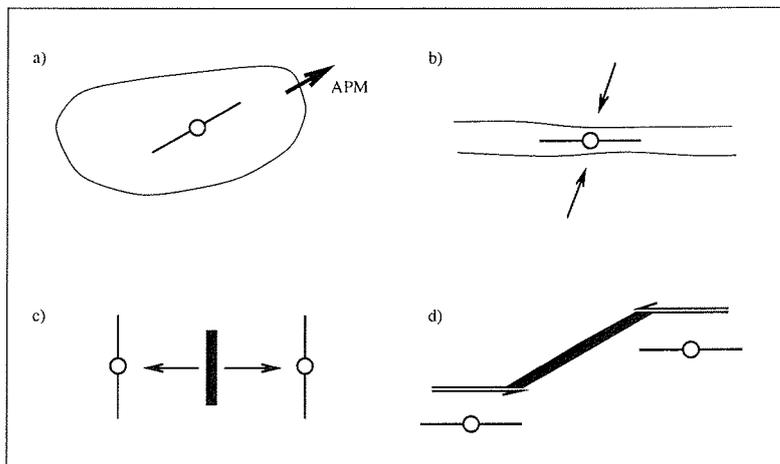


Abbildung 3.3 Zusammenhänge tektonischer Deformationsmechanismen mit den schnellen Richtungen seismischer Anisotropie. a) Absolute Plattenbewegung (APM). b) Kollisionsstrukturen, Orogenesen. c) Einfaches Rifting. d) Rifting in Zusammenhang mit Transformversetzungen. Die schnellen Anisotropierichtungen sind dargestellt.

Abbildung 3.3 zeigt die tektonischen Prozesse, unter denen LPO-induziertes Gesteinsgefüge und damit seismische Anisotropie entsteht. Die Richtungen der schnellen Anisotropie-Achsen sind gekennzeichnet.

zu Abbildung 3.3a)

APM-induzierte Anisotropie: Die Richtung der schnellen Achse stimmt mit der APM-Richtung überein.

zu Abbildung 3.3b)

In Kollisionsstrukturen entsteht durch die in den meisten Fällen nicht orthogonalen Kollisionsrichtungen eine transpressionale Deformation, die sich bis in den oberen Mantel erstreckt (Vauches & Nicolas, 1991; Nicolas, 1992). Schnelle Anisotropie-Richtungen in sowohl alten als auch rezent aktiven, orogenen Gebieten sind meist parallel zu deren Streichrichtungen orientiert und deuten damit auf VCD als Ursache hin. Die meisten, an kontinentalen Stationen erhalte-

nen Anisotropie-Richtungen weisen eine gute Korrelation mit geologischen Strukturen an der Oberfläche auf (Silver 1996).

zu Abbildung 3.3c)

In Extensions- oder Rift-Strukturen existieren bisher wenige Anisotropie-Bestimmungen. Gao *et al.* (1994) fanden aus SKS-Analysen eines temporären Arrays orthogonal über das Baikal Rift schnelle Richtungen senkrecht zur Rift-Achse. Sandvol *et al.* (1992) untersuchten Anisotropie im Rio Grande Rift. Sie nutzten direkt auf der Rift-Achse gelegene Stationen und fanden jedoch zum Rift subparallele Richtungen. Diese interpretierten sie als die Auswirkungen einer kleinräumigen Konvektionszelle unterhalb des Rifts. Nach Nicolas (1992) bilden sich schnelle Anisotropierichtungen parallel zum Streichen des Rifts aus. Der Autor begründet diese Tatsache mit Rift-parallem Fließen und Anlagerung des Mantelmaterials an den Riftflanken.

zu Abbildung 3.3d)

Transversal-Deformationen bilden ähnlich wie bei Transpressions-Mechanismen durch VCD eine LPO-induzierte, zur Verschiebungs-Richtung parallele, schnelle Anisotropie-Richtungen (Vauchez & Nicolas, 1991; Nicolas, 1992).

3.1.4 Quellregionen seismischer Anisotropie

Die Analyse von steil auftauchenden S-Wellen erlaubt keine Auflösung der Tiefenbereiche seismischer Anisotropie. Aus bestimmten Herd-/Stationsgeometrien und zusätzlichen Informationen lassen sich die Tiefenbereiche jedoch abschätzen. Die Größenordnungen der Beiträge aus Kruste und den Mantel-Regionen zu den Laufzeitdifferenzen ist in den Abbildung 3.4 dargestellt.

Kruste

Der Beitrag der Kruste zur Laufzeitdifferenz einer vom Kern auftauchenden Scherwelle ist mit 0.1 – 0.3 *sec* relativ gering und ist bekannt entweder aus Scherwellensplitting von Beben direkt unterhalb der Empfängerstation oder von an der Moho von P zu S konvertierten Wellen (Silver & Chan, 1991). Die Ursache seismischer Anisotropie in der Kruste sind (flüssigkeitsgefüllte) Mikrorisse oder auch die Schichtung von Sedimenten in den oberen 10 – 15 *km* (z.B. Babuška & Cara, 1991).

Oberer Mantel

Da der Betrag der Laufzeitdifferenzen des Scherwellensplittings einer vom Kern auftauchenden Scherwelle im weltweiten Mittel von etwa 1sec aufweist (Silver, 1996), muß der größte Beitrag aus dem Erdmantel stammen. Wie oben diskutiert, ist die Ursache von seismischer Anisotropie die deformationsinduzierte LPO der Mantelminerale. Der größte Beitrag kann dabei dem oberen Mantel (Lithosphäre und Asthenosphäre) zugeschrieben werden. Diese Folgerung ergibt sich zum einen aus der Tatsache, daß signifikante Variationen der Splitting-Parameter über Entfernungen von 50 – 100 km beobachtbar sind (Helffrich *et al.*, 1994). Diese Tatsache impliziert nach Alsina & Snieder (1995), daß die erste Fresnel-Zone, die die jeweiligen Wellen durchlaufen, voneinander unabhängig sind, was die Quelle der Anisotropie auf den oberen Mantel beschränkt. Zum anderen ist aus dem Vergleich der Laufzeitdifferenzen von SKS-Wellen (die den gesamten Mantel durchlaufen) und denen von S-Wellen von Tiefherdbeben direkt unterhalb der Empfängerstation bekannt, daß deren Ergebnisse der Splitting-Analysen miteinander kompatibel sind (z.B. McNamara *et al.*, 1994; Kaneshima & Silver, 1995, Fischer & Wiens, 1996). Diese Tatsache läßt ebenfalls darauf schließen, daß der größte Anteil der beobachteten Anisotropie im oberen Mantel lokalisiert ist.

Tiefere Regionen des Mantels

Die oben angeführten Überlegungen zeigen, daß der untere Mantel nahezu isotrop ist (Meade *et al.*, 1995). Eine mögliche Quelle seismischer Anisotropie ist jedoch die D''-Region oberhalb der Kern-Mantel-Grenze (Maupin, 1993; Vinnik *et al.*, 1996). Diese Untersuchungen beruhen auf der Messung von Splitting von am Kern diffraktierten S-Wellen, d.h. in diesem Fall der Laufzeitdifferenz zwischen SV- und SH-Komponenten.

3.2 Zur Anisotropie-Inversion verwendete S-Phasen

Die sogenannte SKS-Methode (stellvertretend auch für andere Kernphasen wie PKS und SKKS) hat sich zu der wirkungsvollsten Methode zur Untersuchung großräumiger anisotroper Strukturen im oberen Mantel entwickelt. Erstmals angewandt von Vinnik *et al.* (1984), Kind *et al.* (1985) und Silver & Chan (1988) hat sich durch Analyse dieser Phasen ein weltweiter Datensatz entwickelt, der weltweit zur Kartierung seismischer Anisotropie beiträgt. Zur Inversion empfängerseitiger Anisotropie am besten geeignet sind Wellenformen der Phasen SKS, PKS, SKKS (Kernphasen, Abbildung 3.4). Die entscheidenden Vorteile dieser Phasen gegenüber der direkten S-Welle und ScS sind:

3.2 Zur Anisotropie-Inversion verwendete S-Phasen

- Anisotropie-Effekte komplexer Quellregionen können ausgeschlossen werden, da die Kernphasen im flüssigen äußeren Kern als P-Wellen laufen und beim Übergang Kern / Mantel in linear polarisierte S-Wellen konvertiert werden. Der flüssige Kern wirkt als Filter für die Quelleinflüsse.
- Die initiale Polarisationsrichtung der auftauchenden Welle ist bekannt, da diese bei der Konvertierung in Ausbreitungsrichtung (Radialrichtung) der Welle polarisiert wird, d.h. die Polarisationsrichtung ist gleich dem an der Station gemessenen Rückazimut ($\phi_p = \text{BAZ}$, der Winkel der Peilung von der Station zum Epizentrum, gemessen im Uhrzeigersinn gegen geographisch Nord, BAZ für engl. Backazimuth).
- Die Phasen sind in einem weiten Entfernungsbereich, 86° (hier überholt SKS die S-Welle) $< \Delta < 110^\circ$ (bis hier ist die Welle energiereich genug) für SKS und $110^\circ < \Delta < 180^\circ$ für SKKS, klar von anderen Phasen getrennt, so daß Interferenzeffekte mit anderen Phasen ausgeschlossen werden können. Dies gilt nicht unbedingt für die PKS-Phase, da diese meist die PP und SKP als direkte Vorläufer hat.
- Die Wellen tauchen in einem relativ steilen Auftauchwinkel auf ($i_0 < 12^\circ$ für SKS), d.h. Mantel und Kruste auf der Empfängerseite werden fast vertikal erfaßt, damit sind auch Phasenverschiebungen durch Reflexion an der freien Oberfläche auszuschließen.
- Der dominierende Periodenbereich dieser Wellen von 2 – 15sec (das entspricht Wellen-

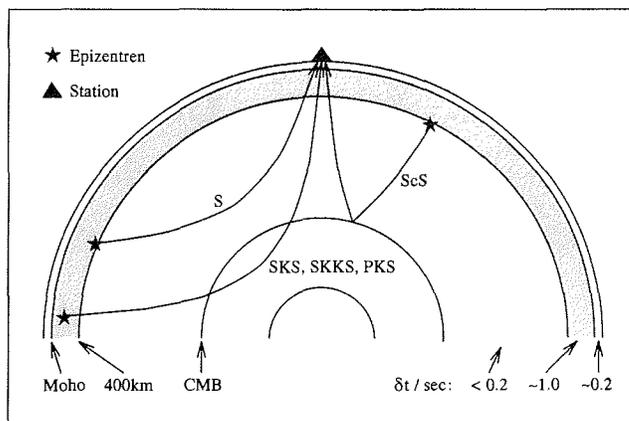


Abbildung 3.4 Schematische Darstellung der Strahlenverläufe der Wellen SKS bzw. PKS sowie direkte S und ScS. Die Beiträge der einzelnen Tiefenregionen zur Laufzeitdifferenz sind angegeben.

3. Seismische Anisotropie, S-Wellensplitting und Deformationen im oberen Mantel

längen im oberen Mantel von ca. 10–60 km) verhindert Kontaminierung durch Streueffekte an kleinräumigen Heterogenitäten. Abgesehen von großräumig ausgedehnten Heterogenitäten auf der Empfängerseite wie starken Schichtneigungen, können daher ausschließlich anisotrope Strukturen für von linearer Polarisation abweichender Teilchenbewegung verantwortlich sein können.

Die Wellen S und ScS können nur eingeschränkt verwendet werden. Um den Einfluß quellseitiger Anisotropie zu vermeiden, können nur Tiefherdbeben verwendet werden. Die initiale Polarisationsrichtung ist nicht so einfach ableitbar, da diese nicht durch den BAZ vorgegeben ist. Theoretisch kann diese jedoch aus den Herdmechanismen bzw. aus der Abstrahlcharakteristik oder aus den Wellenformen selbst abgeleitet werden. Die Abbildung 3.4 zeigt schematisch den Strahlenverlauf der zur Anisotropie-Analyse geeigneten S-Phasen. Außerdem sind die durchschnittlichen Beiträge der Regionen in Kruste und Mantel zur Laufzeitdifferenz einer senkrecht auftauchenden S-Welle angegeben.

4. Bestimmung der Splitting-Parameter

4.1 Methoden zur Inversion der Splitting-Parameter

Das Inversionsverfahren hat zum Ziel, den Effekt möglicher anisotroper Strukturen im Untergrund unterhalb der Empfängerstation aus den registrierten S-Wellenformen zu extrahieren. Im Falle einer einzigen Schicht azimuthaler Anisotropie können aus den Wellenformen die diese Schicht beschreibenden Parameter ϕ_{aniso} (Richtung der schnellen Anisotropie-Achse) bzw. $\phi_{aniso} + 90^\circ$ (Richtung der langsamen Achse) und Laufzeitdifferenz δt_{aniso} erhalten werden. Im wesentlichen beruht die Inversion darauf, den Einfluß des in Abschnitt 3.1 beschriebenen Effekts durch die Suche nach den am besten passenden Splitting-Parametern rückgängig zu machen und die durch Anisotropie erzeugte elliptische Teilchenbewegung in eine lineare zu überführen. Die Untersuchung teleseismischer S-Wellen hinsichtlich S-Wellensplittings hat im wesentlichen zu zwei verschiedenen Methoden geführt, mit deren Hilfe seismische Anisotropie untersucht werden kann. Die erstere (z.B. Vinnik *et al.*, 1984 und Vinnik *et al.*, 1989) beruht auf einer charakteristischen Eigenschaft der Beziehung der Transversal- zur Radialkomponente der durch Anisotropie beeinflussten S-Welle (Abschnitt 4.2). Die zweite Methode beruht auf der Minimierung der Energie der Transversalkomponenten ergänzt durch ein Verfahren zur Minimierung der Eigenwerte der Kovarianzmatrix der Horizontalkomponenten (Silver & Chan, 1991). In dieser Arbeit wurde das an zweiter Stelle genannte Verfahren angewendet.

Die nachfolgenden Überlegungen gehen von der vereinfachenden Annahme einer einzigen, homogenen Schicht azimuthaler Anisotropie (Abschnitt 3.1) aus. Der grundlegenden Arbeit von Silver & Chan (1991) folgend soll ein kurzer Überblick über den Einfluß einer solchen Schicht auf eine senkrecht dazu einfallende, linear polarisierte Scherwelle gegeben werden, um daraus die Inversionsprozedur abzuleiten.

Eine linear polarisierte Welle mit einem Laufweg durch ein homogenes, isotropes Medium kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$u_i^{iso}(\omega) = w(\omega) \exp(-i\omega t_0) p_i . \quad (4.1)$$

4. Bestimmung der Splitting-Parameter

Hierbei ist t_0 die Wellenlaufzeit entlang eines Strahles der Länge L , ω die Kreisfrequenz, \vec{p} ein Einheitsvektor, der die lineare Polarisationsrichtung beschreibt und $w(\omega)$ der Wellenzug, der sämtliche Amplitudeninformationen enthält. Bei den folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, daß Phasenverschiebungen in der Radialkomponente durch Reflexion an der freien Oberfläche ausgeschlossen werden. Dieses kann durch Verwendung von Phasen mit einem hinreichend steilen Auftauchwinkel verhindert werden. Nach Nuttli (1961, 1964) wird eine auftauchende S-Welle mit einem Auftauchwinkel größer als der kritische Winkel

$$i_c = \arcsin(v_p/v_s)$$

stark in ihrer ursprünglichen Polarisation gestört. Für eine Poissonzahl von 0.25 ist der kritische Winkel $i_c \simeq 35^\circ$. Im Falle teleseismischer Entfernungen ist diese Voraussetzung eines hinreichend steilen Auftauchwinkels erfüllt. Im speziellen Fall der folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, daß die Wellenfront einen annähernd senkrechten Einfallswinkel hat, d.h. es wird angenommen, daß der Strahl senkrecht zur Symmetrieachse der Anisotropie einfällt. Vor diesem Hintergrund genügt es, sich auf die Betrachtungen der beiden Horizontalkomponenten, hier die NS- und EW-Komponenten zu beschränken, wobei sich die Indices auch nur auf 1 und 2 beschränken.

Im Falle eines Laufweges durch ein anisotropes Medium erhält die Gleichung (4.1) die Form

$$u_i^{aniso}(\omega) = w(\omega) \exp(-i\omega t_0) \Gamma_{ij}(\phi, \delta t) p_j . \quad (4.2)$$

Dabei ist Γ ein Operator, der den Splitting-Vorgang beschreibt und dessen Komponenten sich durch

$$\Gamma_{ij} = \exp(i\omega\delta t/2) f_i f_j + \exp(-i\omega\delta t/2) s_i s_j \quad (4.3)$$

darstellen lassen. Die Vektoren \vec{f} und \vec{s} sind gerade die beiden quasi-S-Eigenvektoren der Polarisationsmatrix \mathbf{V} , die entsprechenden Eigenwerte sind die jeweiligen quadrierten S-Geschwindigkeiten v_{S1}^2 bzw. v_{S2}^2 . Der Winkel ϕ_{aniso} ist der im Uhrzeigersinn bezüglich der Nordrichtung gemessene Winkel der schnellen Achse \vec{f} . Geometrisch interpretiert beschreibt der Operator die Projektion der Polarisationsrichtung \vec{p} auf die schnellen und langsamen Anisotropierichtungen \vec{f} bzw. \vec{s} und Zeitverschiebung dieser Komponenten um $\delta t/2$ bzw. $-\delta t/2$. δt ist die Laufzeitdifferenz zwischen schneller (v_{S1}) und langsamer Welle (v_{S2}). Die Gleichung (4.3) ist der Ausgangspunkt zur Inversion der Anisotropie-Parameter ϕ_{aniso} und δt_{aniso} aus den registrierten S-Wellenformen. Diese lassen sich durch Invertierung von (4.2) gewinnen, d.h. es wird der inverse Operator Γ^{-1} gesucht, der die registrierte Wellenform \vec{u}_{aniso} in die theoretische (isotrope) Form \vec{u}_{iso} zurückführt. Aus Gleichung (4.3) läßt sich ersehen, daß der Operator Γ unitär ist, da

$$\Gamma^T = \Gamma^* \quad (4.4)$$

gilt, wobei (T) die Transposition und ($*$) die komplexe Konjugation bedeutet. Daraus folgt, daß der inverse Operator einfach der komplex konjugierte ist

$$\Gamma^{-1} = \Gamma^* , \quad (4.5)$$

der \vec{u}_{aniso} in \vec{u}_{iso} überführt:

$$u_i^{iso} = \Gamma_{ij}^* u_j^{aniso} , \quad (4.6)$$

mit

$$\Gamma_{ij}^* = \exp(-i\omega\delta t/2) f_i f_j + \exp(i\omega\delta t/2) s_i s_j . \quad (4.7)$$

Zur Veranschaulichung der Geometrie des Splitting-Prozesses dient die Abbildung 4.1. Als Referenzkoordinatensystem in der Horizontalebene dienen lokal die NS- bzw. EW-Koordinaten. Alle Winkel bezüglich dieses Koordinatensystems werden von Norden im Uhrzeigersinn gezählt. Die linear polarisiert einfallende Scherwelle S (ϕ_p , im Falle von Kernphasen ist dies gerade die SV- bzw. R-Komponente, wird als schnelle Welle S1 auf die Symmetrieachse (ϕ_{aniso}) bzw. die langsame Welle S2 auf $\phi_{aniso} + 90^\circ$ projiziert. Der Projektionswinkel von S auf S1 ist β .

Die Idee der Inversion beruht darauf, für verschiedene Versuchs-Parameterpaare ($\phi, \delta t$) den inversen Operator Γ^* auf die entsprechende Wellenform \vec{u}_{aniso} anzuwenden, bis die so veränderte Wellenform der Ausbreitung der Welle in seismisch isotropen Medien entspricht. Die Kriterien an die S-Wellenform in isotropen Medien sind:

- Die Teilchenbewegung ist linear.
- Es existiert keine Energie auf der SH-Komponente. Ein wichtiger Spezialfall sind die Kernphasen SmKS und PKS. Hier ist die SH- gleich der T-Komponente, d.h. die ursprüngliche Polarisationsrichtung ist durch den BAZ festgelegt. Bei der Verwendung dieses Verfahrens muß die initiale Polarisationsrichtung (bzw. BAZ) bekannt sein.

Zwei verschiedene, auf diese beiden Kriterien zurückgreifende Methoden wurden angewandt und sollen in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Die Verfahren beruhen darauf, die Horizontalkomponenten schrittweise um den Winkel ϕ zu rotieren (bzw. die Komponenten auf diese Versuchsrichtungen zu projizieren) und die so gewonnenen Komponenten um $\delta t/2$ bzw. $-\delta t/2$

4. Bestimmung der Splitting-Parameter

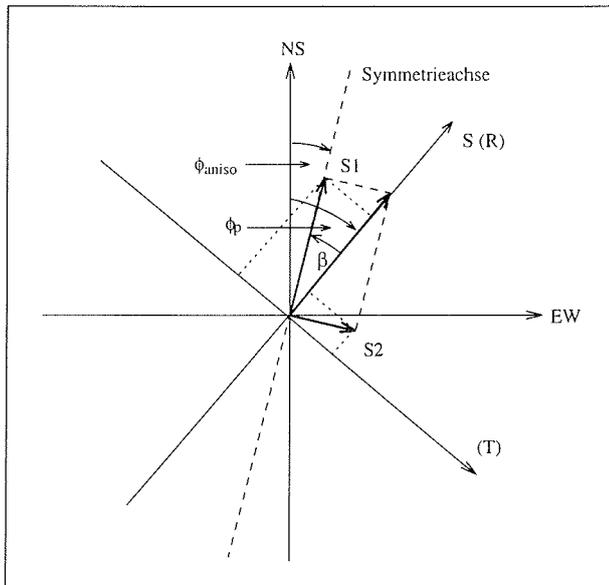


Abbildung 4.1 Geometrische Darstellung der Koordinatensysteme (Erläuterung im Text).

zu verschieben. Es handelt sich um ein Optimierungsverfahren, das über ein schrittweises Ab-suchen (Net Grid Search) des Parameterraumes $(\phi, \delta t)$ dasjenige Parameterpaar $(\phi_{aniso}, \delta t_{aniso})$ bestimmt, für das die oben aufgeführten Kriterien optimal zutreffen.

Zur Anwendung wurde ein Programm geschrieben, das beide Verfahren in einem Modul SPLITTING ANALYSIS zusammenfaßt, das in das Programmpaket PITSA (Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis, Scherbaum & Johnson, 1993) integriert wurde.

4.1.1 Analyse der Teilchenbewegung

Der Grad der Linearität der Teilchenbewegung in der Horizontalebene läßt sich durch die Eigenwerte der Kovarianzmatrix der beiden orthogonalen Horizontalkomponenten angeben (z.B. Kanasevich, 1973 und Vidale, 1986). Die Kovarianzmatrix c ist durch die Elemente

$$c_{ij}(\beta, \delta t_{aniso}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T u_i(t) u_j(t - \delta t_{aniso}) dt \quad i, j = 1, 2 \quad (4.8)$$

4.1 Methoden zur Inversion der Splitting-Parameter

gegeben. Allgemein (im anisotropen Fall) liefert die Kovarianzmatrix c zwei von 0 verschiedene Eigenwerte λ_1 und λ_2 . Folgende Rückschlüsse ergeben sich direkt aus der Untersuchung der Eigenwerte: Die Matrix c wird singulär, d.h. einer der beiden Eigenwerte verschwindet, in den Fällen

- das von der Welle durchlaufene Medium ist isotrop, d.h. $\delta t_{aniso} = 0$,
- die Welle fällt in Richtung der S1-Achse ein, d.h. $\beta = 0$ bzw. $\phi_p = \phi_{aniso}$, oder
- die Welle fällt in Richtung der S2-Achse ein, d.h. $\phi_p = \phi_{aniso} + 90^\circ$.

In allen drei Fällen ist die Teilchenbewegung in der Horizontalebene linear. Im isotropen Fall ist der Eigenwert gerade proportional zur Energie der Welle

$$\lambda_1 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T \left(u_1^2(t) + u_2^2(t) \right) dt \quad . \quad (4.9)$$

Durch schrittweise Rotation ϕ bezüglich des Referenzkoordinatensystems und Zeitverschiebung $\delta t/2$ bzw. $-\delta t/2$ der so erhaltenen Komponenten wird dasjenige Parameterpaar gesucht, das die so transformierte Matrix singulär macht, d.h. die Teilchenbewegung in eine lineare überführt. Im realen Fall sind die Daten mit Noise kontaminiert, d.h. das Verfahren beschränkt sich darauf, den kleineren der beiden Eigenwerte zu minimieren. Durch die schrittweise Projektion und Verschiebung der Horizontalachsen wird die auf das Referenzsystem bezogene Kovarianzmatrix c in

$$\begin{aligned} \tilde{c}_{ij}(\phi, \delta t) &= \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{u}_i(\phi, t + \delta t/2) \tilde{u}_j(\phi, t - \delta t/2) dt \\ &= R_{ik}(\phi) c_{kl}(\delta t) R_{jl}(\phi) \end{aligned} \quad (4.10)$$

transformiert, dabei ist $\mathbf{R}(\phi)$ die Rotationsmatrix, die Tilde (\sim) kennzeichnet die transformierten Elemente der Kovarianzmatrix bzw. des Verschiebungsvektors. Da es sich im realen Fall um endliche Zeitreihen handelt, sei das Integrationsintervall beschränkt auf $(0 < t < T)$. Das dem Minimum des Eigenwertes (dabei sei $\lambda_1 < \lambda_2$) entsprechende Parameterpaar ist gerade das gesuchte Paar der Anisotropie-Parameter:

$$\min_{\lambda_1} (\phi, \delta t) = (\phi_{aniso}, \delta t_{aniso}) \quad . \quad (4.11)$$

4. Bestimmung der Splitting-Parameter

Neben der Minimierung von λ_1 sind noch andere Optimierungsverfahren möglich und auch angewandt worden:

- Minimierung von $\lambda_1\lambda_2$ und
- Maximierung von λ_2 und $(\lambda_2/\lambda_1)^n$.

Im Grunde sind alle Verfahren äquivalent und liefern gleiche Ergebnisse. Hervorzuheben ist der Parameter $l = (\lambda_2/\lambda_1)^{1/2}$. Dieser beschreibt annähernd das Verhältnis der Halbachsen bei elliptischer Teilchenbewegung (Kanasevich, 1981). l variiert zwischen 1 (lineare Teilchenbewegung) und 0 (kreisförmige Teilchenbewegung).

Im Falle realer digitaler Daten sind $u_i(t)$ diskrete Zeitreihendaten. Die Integration geht in eine Summation über und Gleichung (4.10) wird zu

$$\tilde{c}_{ij}(\phi, \delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_{ik}(\phi) u_{k, n+\delta t/2}(\phi) u_{l, n-\delta t/2}(\phi) R_{jl}(\phi) \Delta t \quad . \quad (4.12)$$

Dabei ist T die Länge des analysierten Zeitfensters, Δt das Abtastintervall der Zeitreihe, N die Gesamtzahl der Datenpunkte, welche $N\Delta t = T$ genügt. In dieser Form wurde das Verfahren in dem Modul SPLITTING ANALYSIS programmiert. Wie bei PITSA üblich, wird interaktiv der Name der Ausgabedatei inklusive einer Rückversicherung, ob schon existierende Dateien überschrieben werden dürfen und die Schrittweiten für ϕ bzw. δt (unter Berücksichtigung der Nyquistfrequenz) abgefragt. Als Ausgabe werden die drei Möglichkeiten λ_1 , $\lambda_1\lambda_2$ und λ_2/λ_1 angeboten. Im dritten Fall ist zusätzlich die Angabe und Verwendung des Exponenten für $(\lambda_2/\lambda_1)^n$ möglich. Die Ausgabe der den Extremwerten entsprechenden Parameterpaaren $(\phi_{aniso}, \delta t_{aniso})$ erfolgt über ein Menüfenster bei erfolgreicher Beendigung des Programmdurchlaufs. Sämtliche Datentripel $(\phi, \delta t, \lambda_1\dots)$ werden in die Ausgabedatei geschrieben. Mit Beendigung des Durchlaufs des Programms erfolgt ein Systemaufruf, der ein Script der GMT (Generic Mapping Tools, Wessel & Smith, 1991) aus dem \$PITSAHOME-Verzeichnis in das aktuelle Arbeitsverzeichnis kopiert und dort ausführt. Dieses Script stellt die entsprechenden berechneten Werte als Isolinienplots im Parameterraum $(\phi, \delta t)$ dar. Im Falle der Berechnung von λ_1 werden die Isolinien automatisch auf λ_1^{min} normiert. Somit wird das Minimum 1 und Vielfache davon werden bis zum Wert von 20 dargestellt. Dieses Script ist natürlich nach Belieben veränderbar.

4.1.2 Minimierung der Energie der Transversalkomponenten

Ein Spezialfall ist dann gegeben, wenn die initiale Polarisationsrichtung ϕ_p bekannt ist. Insbesondere ist dies der Fall für die Kernphasen (SmKS, PKS). In diesem Fall sollte bei einer radial

symmetrisch geschichteten, isotropen Erde auf der Transversalkomponenten keine Energie zu erwarten sein. Somit ist für diese Wellen ein Kriterium für das mögliche Vorhandensein von Anisotropie die Beobachtung von Energie auf den Transversalkomponenten der Kernphasen an einer seismologischen Station. Für das Inversionsverfahren ist damit auch ein Optimierungskriterium gegeben. Das Prinzip ist das gleiche wie im vorher vorgestellten Verfahren. Durch schrittweise Projektion der Horizontalkomponenten (ausgehend von einem (R, T)-Koordinatensystem) wird eine Versuchs-T-Energie berechnet, die dann ebenfalls für geeignete Anisotropie-Parameter einen Minimalwert liefert. Die Berechnung der Versuchs-T-Energie erfolgt nach der Gleichung

$$\begin{aligned}\tilde{E}_t(\phi, \delta t) &= R_{2i}^{-1}(\phi) R_{ik}(\phi + \phi_p) c_{kl}(\delta t) R_{jl}(\phi + \phi_p) R_{2j}^{-1}(\phi) \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{u}_t^2(\phi, \delta t, t) dt \quad .\end{aligned}\quad (4.13)$$

Ausgehend vom (NS, EW)-Koordinatensystem wird zunächst in die Versuchsrichtung $\phi + \phi_p$ gedreht, dann erfolgt die Zeitverschiebung und die Rückprojektion auf die (R, T)-Koordinaten. Die Anisotropie-Parameter werden wiederum durch

$$\min_{E_t}(\phi, \delta t) = (\phi_{aniso}, \delta t_{aniso}) \quad (4.14)$$

geliefert. In der diskreten Form wird (4.13) zu

$$\tilde{E}_t(\phi, \delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_{2i}^{-1}(\phi) R_{ik}(\phi + \phi_p) u_{k, n+\delta t/2} u_{l, n-\delta t/2} R_{jl}(\phi + \phi_p) R_{2l}^{-1}(\phi) \Delta t \quad . \quad (4.15)$$

In dieser Form wurde das E_t -Verfahren ebenfalls in das Modul SPLITTING ANALYSIS integriert. Zusätzlich zu den schon genannten Abfragen muß hier noch ϕ_p (bzw. der BAZ) angegeben werden. Die Ausgabe der Anisotropie-Parameter ($\phi_{aniso}, \delta t_{aniso}$) erfolgt wiederum über ein Menüfenster und die Werte $E_t(\phi, \delta t)$ normiert zu E_t/E_t^{min} in die angegebene Ausgabedatei. Die Ergebnisse werden ebenfalls über GMT als Isolinenplot in Vielfachen von E_t/E_t^{min} von 1 bis 20 dargestellt.

4.2 Test des Verfahrens an synthetischen Seismogrammen

4.2.1 Eigenschaften der Wellenformen und des Splitting Operators

Hier sollen zunächst einige charakteristische Merkmale der gesplitteten S-Wellenformen dargestellt werden, die auch zur Diagnose seismischer Anisotropie aus den registrierten Seismogrammen herangezogen werden können. Abbildung (4.2) zeigt die Geometrie der Projektion der schnellen bzw. langsamen Anisotropie-Richtungen (S1, S2) auf die (R, T)-Komponenten. Die folgenden Überlegungen beziehen sich also auf die geometrischen Beziehungen zwischen der Polarisationsrichtung ϕ_p und der schnellen Anisotropie-Richtung ϕ_{aniso} , gegeben durch den Differenzwinkel β . Danach ergeben sich die Amplitudenverhältnisse einer harmonischen Welle der

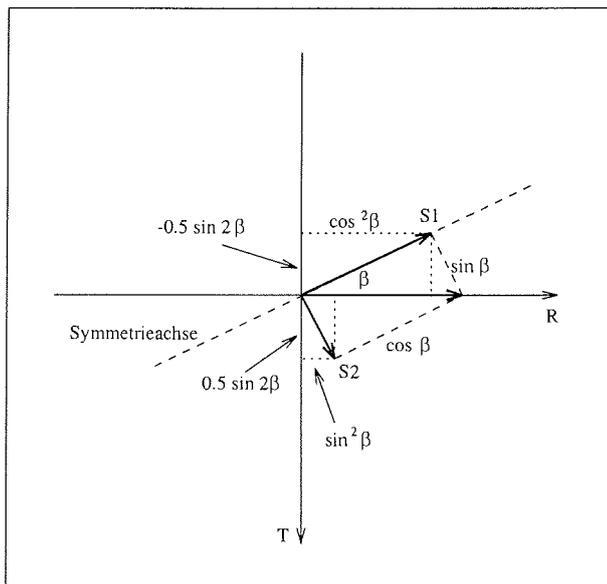


Abbildung 4.2 Geometrische Darstellung der Projektion vom (S1, S2)- auf das (R, T)-System. Nach Vinnik *et al.* (1992).

Radial- und Transversalkomponenten (im Falle der Kernphasen) zu

$$u_r(t) = \cos^2 \beta \exp(i\omega t) + \sin^2 \beta \exp(-i\omega(t - \delta t))$$

$$u_t(t) = -0.5 \sin 2\beta \left(\exp(i\omega t) - \exp(-i\omega(t - \delta t)) \right) \quad (4.16)$$

Diesen Zusammenhang nutzen Vinnik *et al.* (1992) für deren Inversionsverfahren. Aus dem Verhältnis der Radial- zur Transversalkomponenten im Frequenzbereich wird eine theoretische Transversalkomponente gewonnen, deren Differenz zu der real registrierten ebenfalls über Rotation und Zeitverschiebung minimiert wird.

Die Laufzeitdifferenz δt_{aniso} liegt im allgemeinen in der Größenordnung von etwa 1sec. Im Verhältnis zu den charakteristischen Perioden teleseismischer S-Wellen ist es interessant, den Fall $\omega \delta t_{aniso} \rightarrow 0$ zu diskutieren. Aus (4.16) wird dann angenähert

$$\begin{aligned} u_r(t) &\simeq \cos \omega t \\ u_t(t) &\simeq 0.5 \omega \delta t_{aniso} \sin 2\beta \sin \omega t \end{aligned} \quad (4.17)$$

Aus Gleichung (4.17) sind folgende Eigenschaften der Wellenformen direkt ablesbar:

- Die Transversalkomponente ist gegenüber der Radialkomponente um eine viertel Periode verschoben, insbesondere ist die T-Komponente proportional zur zeitlichen Ableitung der R-Komponenten. Diese Eigenschaft ist ein wichtiges Diagnosekriterium, um andere, Anisotropie vortäuschende Ursachen wie laterale Inhomogenitäten ausschließen zu können.
- Die Teilchenbewegung ist elliptisch. Diese Aussage ist äquivalent zu obiger, da die Elliptizität gerade als Konsequenz der Phasenverschiebung entsteht.
- Das Amplitudenverhältnis T/R ist proportional zu δt_{aniso} bzw. zur vorherrschenden Kreisfrequenz ω .
- Das Amplitudenverhältnis T/R ist proportional zu $\sin 2\beta$, d.h. es ist periodisch mit einer Periode von 180° .
- Über den Term $\sin 2\beta$ läßt sich zudem auch eine Aussage über den Richtungssinn der Teilchenbewegung machen. Dieser wechselt mit 90° Periode, da dort jeweils wegen $\sin 2\beta$ das Vorzeichen wechselt. So ist im ersten Quadranten ($0^\circ < \beta < 90^\circ$) die Umlaufrichtung gegen den Uhrzeigersinn und wechselt entsprechend in den folgenden Quadranten. So läßt sich schon aus dem Umlaufsinn der Teilchenbewegung die relative Lage der Symmetrieachse bezüglich der Polarisationsrichtung festlegen.

4. Bestimmung der Splitting-Parameter

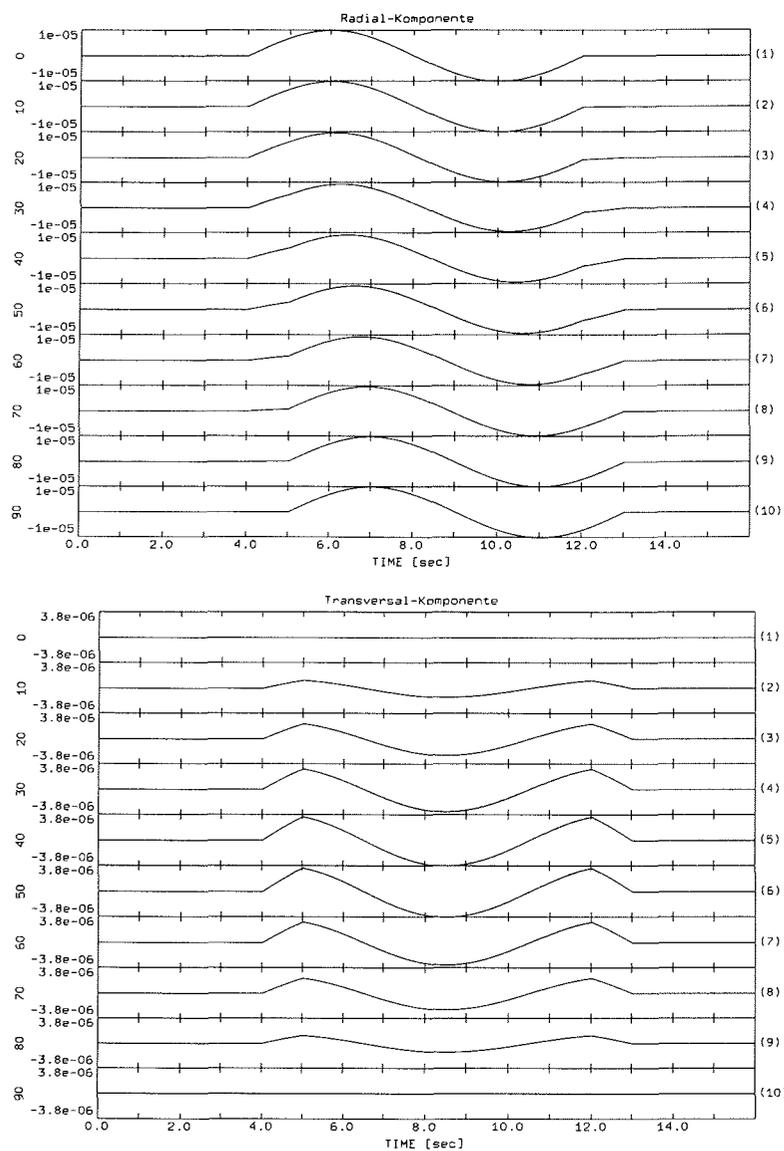


Abbildung 4.3 Azimutale Abhängigkeit der Wellenformen der Radial- (oben) und der Transversalkomponenten (unten). Das Signal ist eine einfache sinusförmige Welle, $\delta t_{aniso} = 1.0 \text{ sec}$ und ϕ_{aniso} variiert gegenüber $\phi_p = 0$.

4.2 Test des Verfahrens an synthetischen Seismogrammen

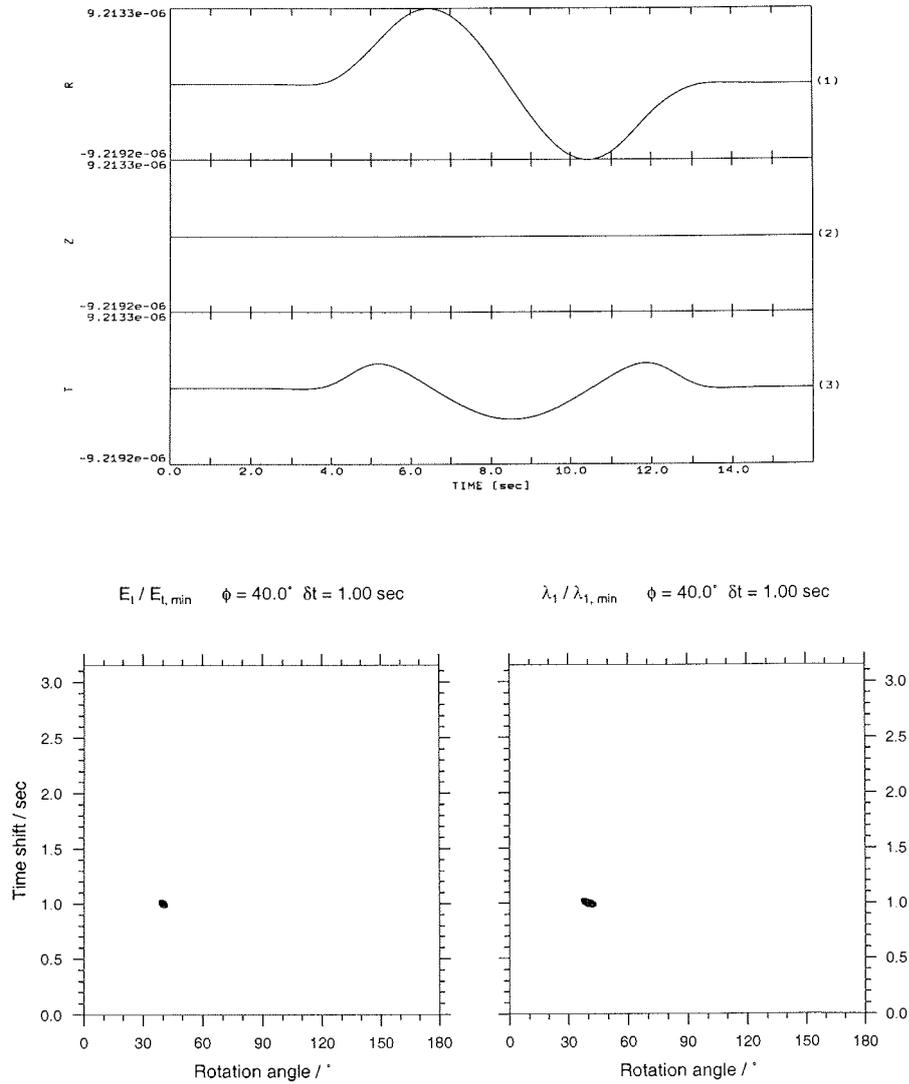


Abbildung 4.4 Ergebnisse der Analyseverfahren für synthetische Seismogramme. Richtung der Anisotropie-Achse $\phi_{aniso} = 40^\circ$, Laufzeitdifferenz $\delta t_{aniso} = 1.0 \text{ sec}$. Linke Abb.: Minimierung der Energie der Transversalkomponenten. Rechte Abb.: Polarisationsanalyse, Minimierung des kleineren Eigenwertes der Transversalkomponenten. Beide Verfahren liefern exakt die vorgegebenen Parameter.

4. Bestimmung der Splitting-Parameter

Abbildung 4.3 zeigt zur Veranschaulichung die azimutale Abhängigkeit (β) der Wellenformen für einen Satz von synthetischen Seismogrammen. Diese wurden aus einer einfachen sinusförmigen Welle mit einer Periode von 8sec (0.125 Hz) erzeugt, indem der Splittingprozeß durch Rotation und Zeitverschiebung ($\delta t_{aniso} = 1.0\text{ sec}$) der Komponenten aus der linear polarisierten S-Welle simuliert wurde. Dargestellt sind die so erzeugten Wellenformen für verschiedene Winkel β in 10° -Schritten von 0° bis 90° , oben die Radial-Komponenten, unten die Transversalkomponenten. Die Radialkomponente variiert nur geringfügig, sowohl in Form als auch Amplitude, verschiebt sich aber zeitlich um eine Sekunde von $0^\circ - 90^\circ$. Die Transversalkomponente ändert sich deutlicher. Natürlich ist für $\beta = 0^\circ$ bzw. $\beta = 90^\circ$ kein Signal vorhanden, wobei der größte Energieanteil bei 45° liegt. Im nächsten Quadranten ($90^\circ < \beta < 180^\circ$) kehrt sich das Vorzeichen der T-Komponenten um, woraus sich das Umkehren des Umlaufsinnns der Teilchenbewegung erklärt.

An einem synthetischen Beispielseismogramm soll die Anwendung des Inversionsverfahren erläutert werden. Abbildung 4.4 (oben) zeigt das entsprechende Seismogramm. Simuliert ist für eine Polarisationsrichtung $\phi_p = 0^\circ$ eine anisotrope Schicht mit $(\phi_{aniso}, \delta t_{aniso}) = (40.0^\circ, 1.0\text{ sec})$. Die Wellenform ist etwas geglättet, da das Seismogramm mit einem Butterworth Tiefpaß mit einer Eckfrequenz von 0.5 Hz (2 sec) gefiltert wurde. Unten sind die Ergebnisse der beiden Inversionsverfahren gezeigt, im Bild links das Ergebnis des E_t -Verfahrens, rechts das des Eigenwertverfahrens. Die Ergebnisse sind als Isolinien der Ergebniswerte der beiden Verfahren dargestellt. Für die Abstände der Isolinien wurde in diesem Fall der Wert von 20 gewählt. Wie Abbildung 4.4 (unten) zeigt, werden die vorgegebenen Parameter exakt reproduziert.

4.2.2 Abweichungen von Idealbedingungen

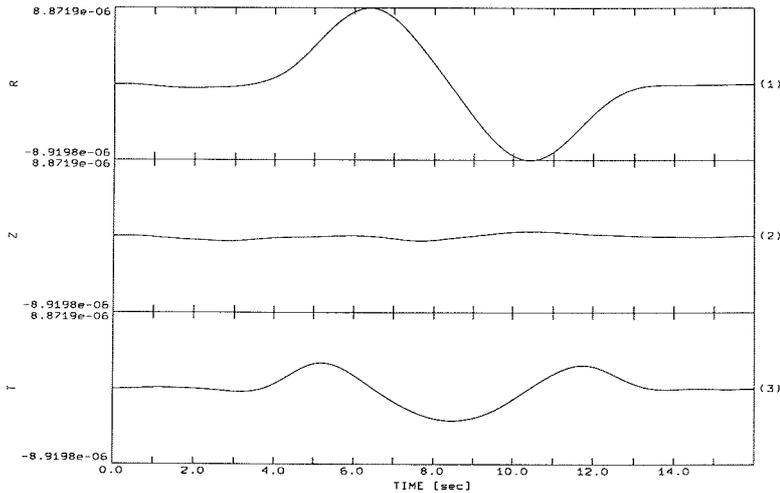
Weitere Tests der Inversionsverfahren an synthetischen Seismogrammen können einige Eigenarten des Splitting-Operators erhellen. Abweichungen von den Idealbedingungen sind

- der Einfluß von Rauschen,
- großräumige laterale Heterogenitäten,
- andere Formen seismischer Anisotropie, abweichend von hexagonaler Symmetrie mit horizontaler Symmetrieachse.

Einen wichtigen Einfluß auf die Güte der Reproduktion der Anisotropie-Parameter hat die Überlagerung durch natürliches Rauschen. Um den Einfluß des Rauschen abschätzen zu können, wurden die synthetischen Seismogramme mit Rauschen überlagert und die Splitting-Analyseverfahren angewandt. Die vorgegebenen Anisotropie-Parameter sind wie im vorherigen rauschfreien Fall wiederum $(\phi_{aniso}, \delta t_{aniso}) = (40.0^\circ, 1.0 \text{ sec})$. Die überlagerte Rauschsequenz wurde einem realen Seismogramm entnommen, und zwar aus einem Zeitfenster direkt vor einer einlaufenden SKS-Welle, so daß die Simulation möglichst realen Umständen entspricht und damit auch noch mögliche Anteile der Koda von davorliegenden Phasen enthält. Danach wurde das so erhaltene Seismogramm entsprechend den realen Daten mit einem Butterworth-Bandpaßfilter von $0.1 - 0.5 \text{ Hz}$ ($2 - 10 \text{ sec}$) gefiltert. Das Ergebnis des ersten Versuchs, Noise überlagert mit einem S/N-Verhältnis von etwa 10:1 bezüglich der T-Komponente, zeigt Abbildung 4.5. Der Gradient der Isolinien wird deutlich geringer als im rauschfreien Fall und es ist die typische ellipsen- bis "bohnen"-förmige Gestalt der Konturlinien zu sehen. Die beiden Verfahren liefern hier das gleiche Ergebnis, weichen aber um $(\Delta\phi, \Delta\delta t) = (4^\circ, -0.06 \text{ sec})$ von den vorgegebenen Parametern ab. Im zweiten Versuch, S/N-Verhältnis von 5:1, wird der Gradient der Konturlinien deutlich verringert, das Minimum verschmiert über einen weiten Parameterbereich, der erhaltene Wert weicht nunmehr $(\Delta\phi, \Delta\delta t) = (11^\circ, -0.12 \text{ sec})$ vom Erwartungswert ab (Abb. 4.6), wobei die Form der Isolinien jedoch erhalten bleibt. Beide Verfahren liefern bei diesem relativ geringen S/N-Verhältnis noch gute Ergebnisse.

In beiden Versuchen lag die Differenz zwischen ϕ_p und ϕ_{aniso} bei 40° , d.h. ϕ_p genau zwischen den beiden (schnelle und langsame) Anisotropie-Achsen. Die Inversionsverfahren sind hier relativ stabil. Ein anderes Bild ergibt sich in dem Fall, in dem ϕ_p und eine der beiden Anisotropie-Achsen dicht beieinanderliegen. Abbildung 4.7 zeigt die Ergebnisse der Inversion für den Fall, daß ϕ_p nur 10° von der Richtung der Symmetrieachse abweicht. Im rauschfreien Fall werden die Parameter wiederum exakt reproduziert, aber schon bei einer Überlagerung eines Rauschens mit einem hohen S/N-Verhältnis von 15:1 weichen die gemessenen Parameter stark von den vorgegebenen ab. Im Falle des E_t -Verfahrens beträgt die Abweichung $(\Delta\phi, \Delta\delta t) = (5^\circ, -0.33 \text{ sec})$

4. Bestimmung der Splitting-Parameter



$$E_1 / E_{1,\min} \quad \phi = 41.0^\circ \quad \delta t = 1.04 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1,\min} \quad \phi = 42.0^\circ \quad \delta t = 1.04 \text{ sec}$$

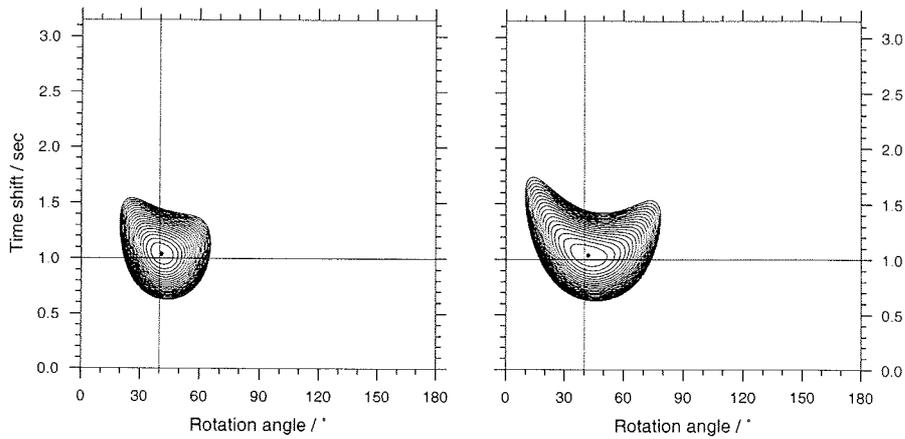
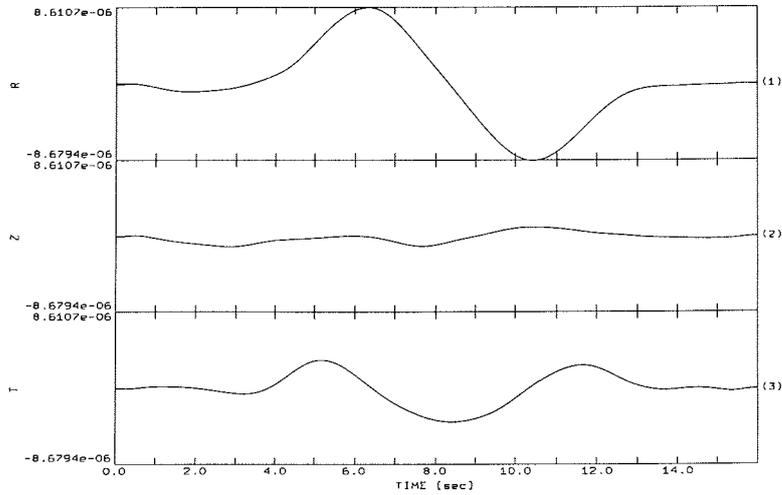


Abbildung 4.5 Wie Abbildung 4.4, nur ist natürliches Rauschen mit einem S/N-Verhältnis von 10:1 überlagert. Beide Verfahren liefern das gleiche Ergebnis, nur weicht es geringfügig vom Erwartungswert ab.

4.2 Test des Verfahrens an synthetischen Seismogrammen



$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 42.0^\circ \quad \delta t = 1.07 \text{ sec}$

$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 43.0^\circ \quad \delta t = 1.07 \text{ sec}$

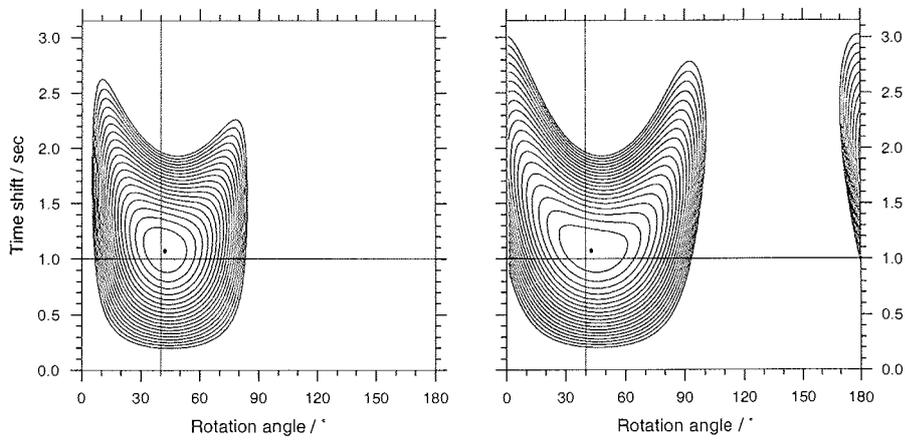
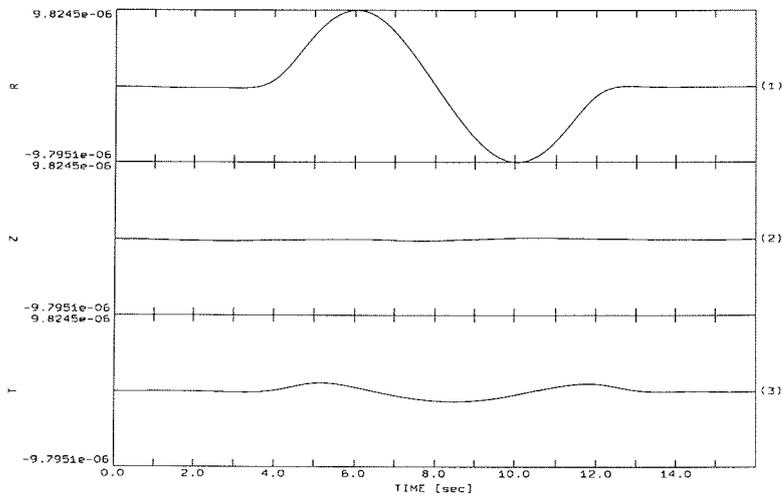


Abbildung 4.6 Wie Abbildung 4.4, nur mit einem schlechterem S/N-Verhältnis von 5:1.

4. Bestimmung der Splitting-Parameter



$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 7.0^\circ \quad \delta t = 1.30 \text{ sec}$

$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 8.0^\circ \quad \delta t = 1.18 \text{ sec}$

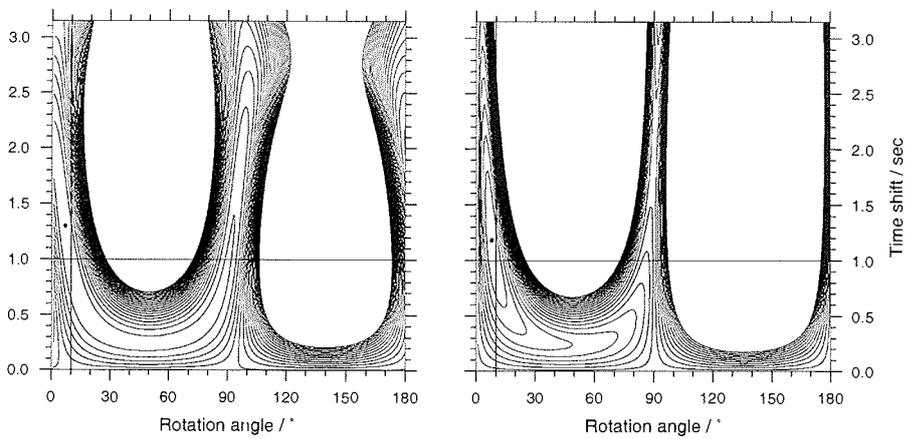


Abbildung 4.7 Die vorgegebenen Anisotropie-Parameter sind $(\phi_{aniso}, \delta t_{aniso}) = (10^\circ, 1.0 \text{ sec})$, d.h. der Winkel zwischen ϕ_p und ϕ_{aniso} fällt annähernd zusammen. Das S/N-Verhältnis beträgt 15:1. Die Analysen werden instabil.

4.2 Test des Verfahrens an synthetischen Seismogrammen

und für das Eigenwertverfahren handelt es sich um $(\Delta\phi, \Delta\delta t) = (9^\circ, 0.46 \text{ sec})$. Die Konturlinien nehmen jetzt U-förmige Figuren an, und die Minima verschmieren schon für deutlich höhere S/N-Verhältnisse; das Verfahren wird instabil. Insbesondere wachsen die Fehler für δt schneller als für ϕ . Es existieren keine Minima oder lassen sich auflösen in dem Fall, daß ϕ_p mit ϕ_{aniso} bzw. $\phi_{aniso} + 90^\circ$ annähernd zusammenfällt. In diesem Fall spricht man von "Null"-Messungen. Die Laufzeitinformation geht hier verloren, aber bei positiven Anisotropie-Bestimmungen aus anderen Polarisationsrichtungen kann hieraus die Anisotropie-Geometrie bestimmt werden.

Weitere Tests mit variierenden Differenzwinkeln, Rauschpegeln und auch anderen Rauschsequenzen lieferten ähnliche Ergebnisse. Um für die einzelnen Analysen eine Fehlergrenze angeben zu können, ergaben diese Tests, daß die "Halbwertsbreiten" (d.h. $E_t/E_{t \text{ min}} = 2$ und $\lambda_1/\lambda_{1 \text{ min}} = 2$) ein geeignetes Maß darstellen, um die durch Rauschen verursachten Ungenauigkeiten der Parameterbestimmung abschätzen zu können. Diese Fehlerbetrachtung liefert allerdings nur ein relatives Maß für die Fehler der Einzelanalysen, steht jedoch in keinem Zusammenhang mit den physikalischen Hintergründen des Entstehens der Rauschprozesse. Generell läßt sich sagen, daß die Ergebnisse des E_t -Verfahrens genauer sind als die des Eigenwertverfahrens. Zudem sind die Minima schärfer ausgeprägt.

Eine weitere Abweichung vom Idealfall liegt vor, wenn die Polarisationsrichtung ϕ_p von der vorhergesagten abweicht. Dieses kann der Fall sein, wenn das Seismometer nicht richtig horizontalisiert ist, aber auch dann, wenn auf der Empfängerseite großräumige laterale Inhomogenitäten zu einer starken Ablenkung der Polarisationsrichtung führen. Das Eigenwertverfahren ist unabhängig von ϕ_p , so daß diese Methode als Test für diese möglichen Abweichungen zusätzlich zu der genaueren E_t -Methode herangezogen wurde. Abbildung 4.8 zeigt die Analyseergebnisse für eine angenommene Abweichung von ϕ_p zur theoretischen von 5° (oben) und -5° (unten). Vorgegeben wurde das unverrauschte synthetische Seismogramm aus Abbildung 4.4. Die Eigenwertmethode liefert wie erwartet die korrekten Parameter, während die Anwendung des E_t -Verfahrens erhebliche Abweichungen ergibt. Zusätzlich verändert sich wiederum der Gradient der Konturlinien. Damit liefert der Vergleich der Ergebnisse beider Methoden einen wichtigen Beitrag, um mögliche Vortäuschungen durch kompliziertere heterogene Strukturen von den Anisotropie-Analysen zu unterscheiden.

Der Fall, in dem ein Seismometer nicht korrekt gegen geographisch Nord ausgerichtet wurde, läßt sich ebenfalls durch einen Vergleich der Ergebnisse beider Methoden testen. Diese Situation ist ebenfalls in Abbildung 4.8 dargestellt. Die durchgezogenen Linien zeigen die Werte der wahren Anisotropie-Parameter. In obiger Abbildung seien diese $(45^\circ, 1.0 \text{ sec})$ und das Seismometer um 5° nach Westen dejustiert. Die tatsächliche Symmetrieachse liegt zwischen den durch beide Methoden gewonnenen Richtungen. Die exakte Laufzeitdifferenz wird natürlich in jeder Ausrichtung durch das Eigenwertverfahren erhalten, nicht aber durch das E_t -Verfahren.

4. Bestimmung der Splitting-Parameter

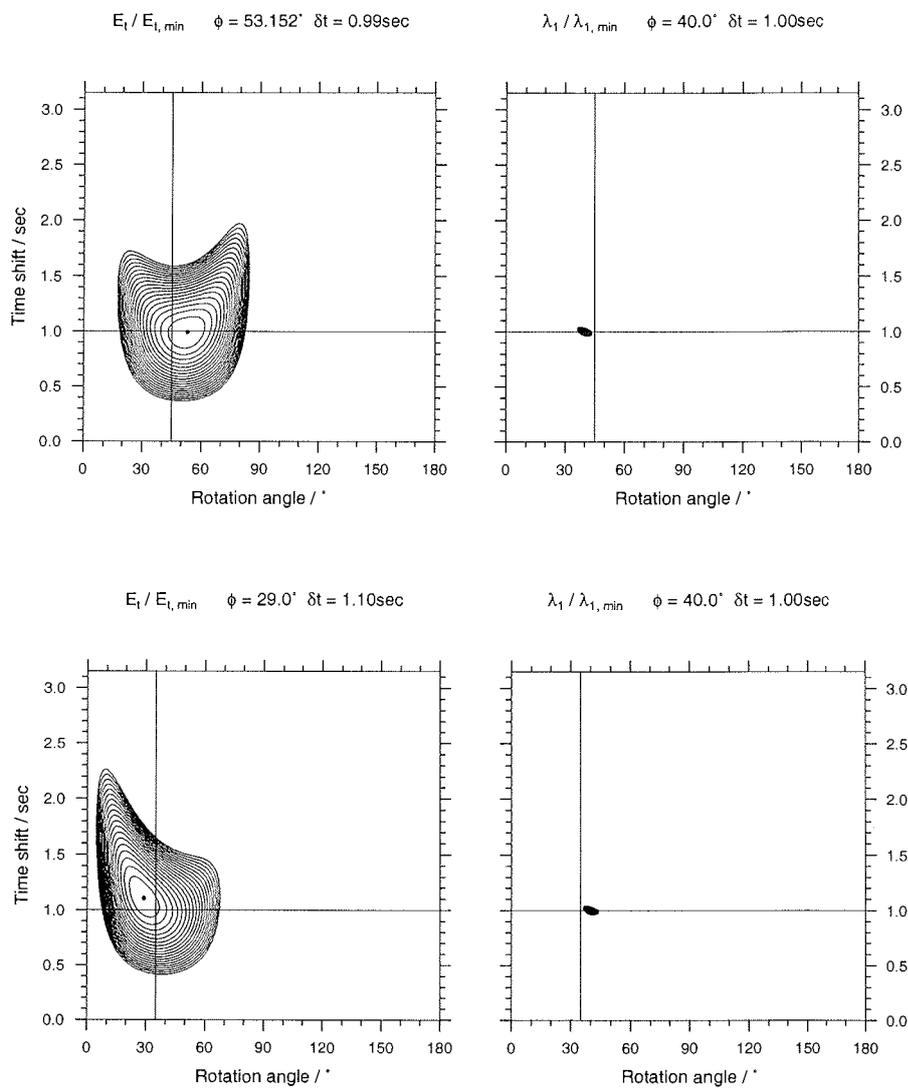


Abbildung 4.8 Wie Abbildung 4.4, für die initiale Polarisationsrichtung von 40° ist eine Mißweisung von 5° vorgegeben. Beide Verfahren liefern unterschiedliche Ergebnisse.

5. Das seismologische Netzwerk an der Neumayer Station

5.1 Geophysikalische Langzeitbeobachtungen an der Neumayer Station

Mit dem Neubau der Neumayer-Station im Südsommer 1992 als Ersatz für die im gleichen Jahr aufgegebene Georg-von-Neumayer-Station (GvN) wurde das geophysikalische Observatorium mit neu errichtet. Das Konzept wurde weitgehend von dem der alten Station übernommen. Das Observatorium selbst besteht wiederum aus zwei Teilobservatorien, dem "Seismik"- und dem "Magnetik"-Observatorium. Beide liegen etwa 850 m südlich der Station, sind ca. 100 m voneinander entfernt und bestehen aus je zwei Spezialcontainern, die (beim Bau) etwa 7 m tief unterhalb der Schneeoberfläche installiert wurden, um ein Minimum an durch Wind erzeugten Noise und eine weitgehende Temperaturstabilität zu garantieren. Das Meßprogramm des seit 1982 an GVN betriebenen Observatoriums wurde fast unverändert übernommen.

An dieser Stelle soll ein Überblick über das gesamte geophysikalische Observatoriumsprogramm an der Neumayer Station gegeben werden. Eine eingehendere Darstellung des seismologischen Netzwerks erfolgt im nächsten Abschnitt.

Der Schwerpunkt des Meßprogramms besteht aus folgenden Langzeitbeobachtungen:

- Seismologie: Registrierung lokaler und regionaler Seismizität sowie teleseismischer Ereignisse. (Das seismologische Netzwerk, dessen Konfiguration und Möglichkeiten werden weiter unten ausführlicher beschrieben.)
- Magnetik: Als klassisches Observatoriumsprogramm werden hier die zeitlichen Variationen der X-, Y- und Z-Komponenten des Erdmagnetfeldes mit Hilfe eines 3-Achs-Förstersondensensors registriert. Zusätzlich wird über zwei Protonen-Präzessions-Magnetometer die Totalintensität aufgenommen. Zusammen mit den in regelmäßigen Abständen manuell

5. Das seismologische Netzwerk an der Neumayer Station

gemessenen Deklinations-/Inklinations-Werten werden so die dem internationalen Standard (IAGA) entsprechenden Stundenmittel bestimmt und jährlich dem World Data Center A in Boulder, Colorado, übersandt.

- Gravimetrie: Wie im alten Observatorium werden kontinuierlich die gezeiteninduzierten Variationen des Schwerfeldes mit einem ASKANIA GS-15 Gravimeter gemessen.
- Messung der Abschmelzrate an der Unterseite des Schelfeises: Im Südsommer 1993 wurde nach einer Heißwasser-Durchbohrung des Schelfeises am Observatorium ein Echosounder unterhalb der Schelfeisunterkante installiert. Dieser mißt kontinuierlich die Veränderungen der Distanz Echosounder/Eisunterkante, um so Erkenntnisse über die Abschmelz- bzw. Anfrrierprozesse zu gewinnen. Zusätzlich liefern die gezeitenbedingten Auslenkungen des frei pendelnden Gerätes zusammen mit den Gravimeterregistrierungen Erkenntnisse über das Stromsystem unterhalb des Schelfeises.

Im Detail sind die einzelnen Meßschwerpunkte in Eckstaller *et al.* (im Druck) beschrieben. Obwohl vom Meßprogramm weitgehend unverändert, so ist die Datenerfassung des neuen Observatoriums grundlegend erneuert worden. Um die Einbindung der seismologischen Datenerfassung zu verdeutlichen, soll an dieser Stelle eine Zusammenfassung des Gesamtkonzepts der geophysikalischen Langzeitmessungen an der Neumayer-Station gegeben werden. Räumlich gesehen besteht das System der geophysikalischen Datenaufnahme an der Neumayer Station aus vier Einheiten:

- Seismologische Außenstationen: Insgesamt werden sieben Stationen betrieben, davon die Hauptstation OBS im Observatorium, vier Stationen auf dem Schelfeis und zwei weiter entfernt auf den angrenzenden Höhenrücken Søråsen und Halvfar.
- Magnetik-Observatorium: Das Observatorium besteht aus einem gänzlich aus unmagnetischen Materialien gefertigtem Container, in dem sich der 3-Achs-Förstersondensensor befindet sowie ein Theodolit, mit dem über eine I-achsige Förstersonde die Deklination/Inklination des Magnetfeldes bestimmt wird. Die beiden Protonenmagnetometer sind ca. 50 m entfernt im Schnee vergraben.
- Seismik-Observatorium: Hier erfolgt im wesentlichen die gesamte Datenerfassung der Magnetik-Sonden, des Gravimeters und des Echosounders. Das Gravimeter ist im Observatorium auf von diesem unabhängig im Eis gegründeten Pfählen plaziert. Die Datenerfassung erfolgt über einen A/D-Wandler direkt auf einer SUN-Workstation und aus Redundanzgründen separat über einen Datenlogger auf Diskette und einen Analogdrucker. Als Seismometer kommen im Observatorium drei Teledyne Geotech S13/1 Hz Sensoren zum Einsatz.

- Im Geophysik-Labor erfolgt die zentrale Erfassung der Datenströme der seismologischen Außenstationen. Die Workstation des Seismik-Observatoriums ist über ein Glasfaserkabel direkt in das Rechnernetz der Station eingebunden, so daß von hier direkt die Datenerfassung in den Observatorien überwacht werden kann. Als exakte Zeitbasis dient ein GPS-Zeitzeichenempfänger und synchronisiert die Uhren im Labor (Seismologie) und im Observatorium.

5.2 Das seismologische Netzwerk

Die Lage der Stationen des seismologischen Netzwerkes zeigt Abbildung 5.1. Neben der 3-Komponenten-Station im "Seismik"-Observatorium (Station OBS) werden vier weitere, allerdings nur 1-Komponenten-Seismometer (Stationen OST, WEST, SÜD und GVN) auf dem Schelfeis betrieben. Zwei weitere Stationen werden auf den das Ekström-Schelfeis begrenzenden Höhenrücken Halvfarryggen (Station Watzmann, im folgenden als WAZ bezeichnet) und Søråsen (Station Olymp, im folgenden als OLY bezeichnet) betrieben.

Zum einen aus historischen Gründen und zum anderen auch aufgrund der größten Ausfallsicherheit ist OBS die Hauptstation an Neumayer. Deren Phasenableesungen werden regelmäßig an internationale Zentren wie das NEIC (National Earthquake Information Center / Boulder, Colorado, USA) und an das ISC (International Seismological Centre, Newbury, UK) übermittelt. Die Station läuft unter der internationalen Stationskennung VNA1, als Nachfolgestation der alten an GvN, VNA. Seit Mitte 1995 werden auch die Phasen der Stationen WAZ (Stationskennung VNA2) und OLY (Stationskennung VNA3) gemeldet. Trotz dieser international zugewiesenen Stationskürzel soll in dieser Arbeit bei den eingängigeren Abkürzungen OBS, WAZ und OLY geblieben werden.

Die seit 1993 bestehende ftp-Anbindung der Neumayer-Station an das Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven ermöglicht es, die Daten direkt an die entsprechenden Zentren zu übermitteln. So werden die Phasendaten monatlich an das NEIC geschickt und sofort bei erkennbar schweren Beben als Alarmmeldungen. Die Anzahl der jährlich gemeldeten Beben schwankt zwischen 700 und 1200. So wurden im Jahr 1995 insgesamt 1117 klar als Erdbeben erkannte Ereignisse gemeldet, von denen 815 den PDE's (Preliminary Determinations of Epicentres) zugeordnet werden konnten. Die restlichen, nicht zugeordneten Beben haben ihre Epizentren hauptsächlich in dem Inselbogen der Süd Sandwich Inseln und erstrecken sich von der Bransfield Straße, über die Scotia See, Bouvet Insel bis zu den mittelozeanischen Rücken des Indischen Ozeans. Die Nähe der Neumayer Station zu diesen Bebengebieten und damit die große Anzahl der in diesen Regionen lokalisierten Beben unterstreicht die Bedeutung der Station im globalen Netzwerk. Die schwächsten, den PDE's zuordnungsbaeren Beben haben eine Magnitude von ca. 4.0 (mb).

5. Das seismologische Netzwerk an der Neumayer Station

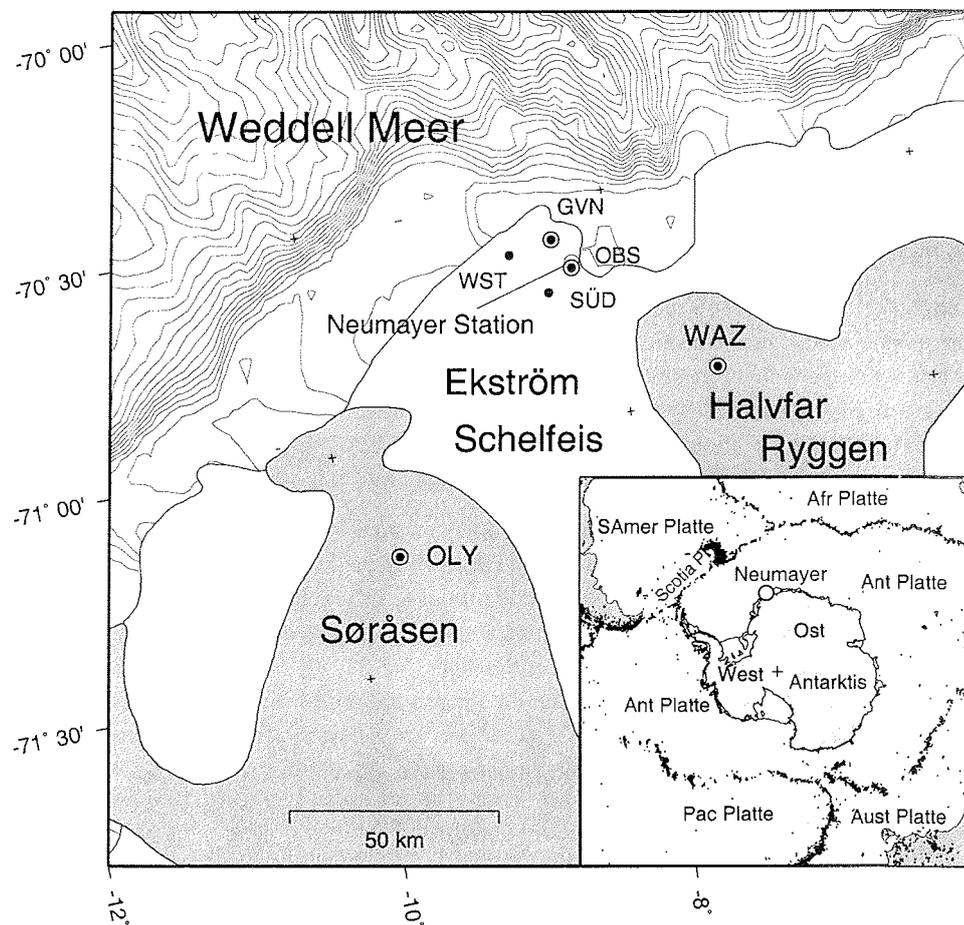


Abbildung 5.1 Karte des Ekström Schelfeises und den dieses begrenzenden Höhenrücken Halvfar und Søråsen. Dargestellt sind die Neumayer-Station und die seismologischen Außenstationen.

Da die meisten, nicht in den PDE's enthaltenen Ereignisse, ihr Epizentrum in den oben genannten Gebieten haben, dürfte die Detektionsschwelle für diesen Entfernungsbereich noch deutlich darunter liegen.

Zusätzliche Bedeutung haben die seismologischen Stationen an Neumayer zur Überwachung der Seismizität der Antarktis. Abgesehen von einigen Randgebieten seismischer Aktivität, Bransfield Straße, Balleny Inseln und vermutlich Mary Bird Land, ist die Antarktis bis auf einige Ausnahmen (z.B. Adams & Akoto, 1986 und Eckstaller, 1988) nahezu aseismisch. Mögliche Lokalisierungen von Erdbeben im kontinentalen Antarktika stehen daher weiterhin unter hohem wissenschaftlichen Interesse.

Aus der Sicht seismologischer Fragestellungen bietet die Neumayer Station auf dem Ekström Schelfeis eine eher schlechte Ausgangslage. Da Scherwellen nicht die unterhalb des Schelfeises befindliche Wasserschicht durchdringen können, reduziert sich deren Registrierung auf die S-zu P-Konversion an der Meeresboden/Ozean-Grenze sowie durch die Eisrücken eingekoppelten Anteile. Dazu kommen durch die Natur der schwimmenden Schelfeisplatte hervorgerufene Störungen wie Eisbeben, Eigenschwingungen der Platte sowie im Südsommer starke Störungen durch die Meeresbrandung und durch an die Schelfeiskante stoßende Eisschollen und Eisberge. Historisch gesehen lag seit dem Beginn seismologischer Forschungen an GvN das Interesse mehr auf der Untersuchung von lokalen Eisbeben, deren Überwachung und Untersuchungen im Zusammenhang mit der Schelfeisdynamik (Kobarg, 1988; Eckstaller, 1988 und Nixdorf, 1992). Für die Analyse teleseismischer Laufzeitresiduen (Eckstaller, 1988; Eckstaller & Miller, 1992) waren oben genannte Einschränkungen nicht zu gravierend. Um diese schelfeisbedingten Nachteile zu umgehen, wurden in den Jahren 1987 und 1988/89 zusätzlich die Stationen OLY und WAZ eingerichtet, welche insbesondere in der Lage sind, Scherwellen zu registrieren. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen an Registrierungen aus dem Neumayer Netzwerk beruhen fast ausschließlich auf diesen Stationen.

5.2.1 Die Stationen

Die Stationen WAZ und OLY sind mit Seismometern mittlerer Eigenperioden ausgerüstet. Gewöhnlich kommen hier Seismometer vom Typ Lennartz LE-3D/5s zum Einsatz. Zeitweise wurden diese durch längerperiodische 3-Komponenten Mark L-IV/20s Seismometer ersetzt. Beide Typen sind Geschwindigkeitsaufnehmer und elektronisch durch eine spezielle Feedback-Schaltung auf die entsprechenden Eigenperioden erweitert (Lippmann, 1982). Die Übertragungsfunktionen beider Seismometer zeigt Abbildung 5.2. Zum Vergleich beider Seismometer zeigt Abbildung 5.3 deren Amplitudenspektren, oben des Mark L-IV/20s (WAZ) und unten des LE-3D/5s (OLY). Dargestellt sind die Spektren eines 1min langen Zeitfensters der NS-Komponenten einer SKS-Wellenform des Ereignisses 940309 (Anhang A). Zum Vergleich überlagert ist ein

5. Das seismologische Netzwerk an der Neumayer Station

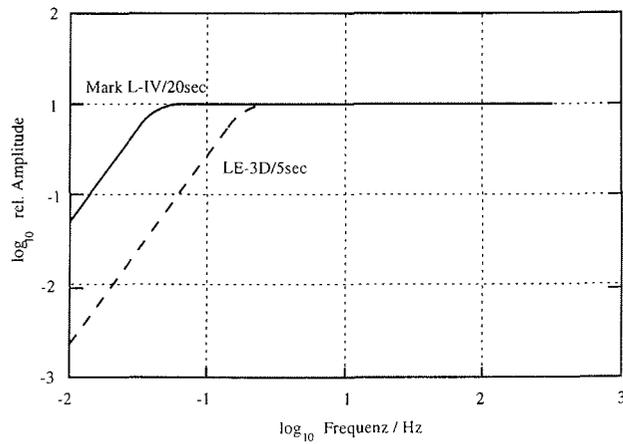


Abbildung 5.2 Die Übertragungsfunktion der eingesetzten Seismometer Mark L-IV/20sec und LE-3D/5sec.

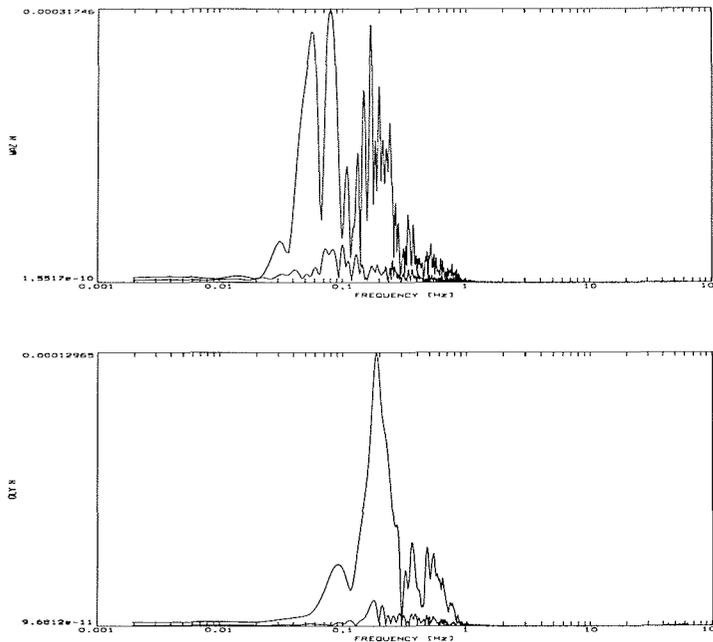


Abbildung 5.3 Amplitudenspektren der Seismometer Mark L-IV/20sec (oben, WAZ) und LE-3D/5s (unten, OLY) im Vergleich. Die Spektren beziehen sich auf ein 1min langes Zeitfenster der NS-Komponenten. Die größeren Spektralampplituden zeigen die Spektren einer SKS-Wellenform, die kleineren das normale Rauschspektrum.

normales Rauschspektrum eines ebenfalls 1min langen Zeitfensters. Im Signalspektrum zeigt das Mark L-IV/20s Spitzen bei 0.05, 0.08 und 0.2 Hz. Die beiden Spitzen der geringeren Frequenzen sind im Spektrum des LE-3D/5s stark gedämpft. Um bei der Splitting-Analyse einen vergleichbaren Spektralbereich zu erhalten, wurden die zur Analyse verwendeten Seismogramme in den meisten Fällen mit einem Butterworth-Bandpaßfilter mit den Eckfrequenzen 0.1 – 0.5 Hz gefiltert.

Watzmann

Die Station WAZ wurde Ende 1988 auf dem südöstlich von Neumayer gelegenen Höhenrücken Halvfarryggen errichtet (Abbildung 5.1). Als Seismometer kam zunächst ein Mark L-IV 3-Komponenten-Seismometer (1 Hz) zum Einsatz. Im Herbst 1992 wurde dieses durch ein LE-3D/5s Seismometer ersetzt und danach zeitweise durch ein Mark L-IV/20s Seismometer ausgetauscht. Die Station ist ca. 45 km Luftlinie von der Neumayer Station entfernt, jedoch aufgrund der Spaltensituation am Fuß des Halvfarryggen nur über eine 100 km lange Trasse erreichbar.

- Geographische Lage:

Geogr. Breite	Geogr. Länge	Höhe
70° 55' 32" S	7° 23' 35" W	390 m

- Seismometer:

Zeitraum	Seismometer
26/10/92 – 08/02/94	LE-3D/5s
08/02/94 – 22/10/94	Mark L-IV/20s
22/10/94 – 09/03/95	LE-3D/5s
09/03/95 – 04/01/96	Mark L-IV/20s
ab 04/01/96	LE-3D/5s

Olymp

Die Station OLY wurde Ende 1987 in Betrieb genommen und seit Mai 1992 ebenso wie WAZ mit LE-3D/5s und zeitweise mit Mark L-IV/20s Seismometern betrieben. OLY liegt knapp 90 km südöstlich auf dem Søråsen (Abbildung 5.1) und ist über eine ca. 130 km lange Trasse erreichbar.

5. Das seismologische Netzwerk an der Neumayer Station

- Geographische Lage:

Geogr. Breite	Geogr. Länge	Höhe
71° 14' 35" S	9° 40' 11" W	520 m

- Seismometer:

Zeitraum	Seismometer
15/05/92 – 12/10/95	LE-3D/5s
2/95 – 03/01/96	Mark L-IV/20s
ab 03/01/96	LE-3D/5s

Observatorium / GvN

Im Winter 1992 wurde in der verlassenen Stahlröhre der alten Überwinterungsstation GvN ein LE-3D/5s Seismometer aufgestellt und während einiger Monate betrieben. Eine spätere Sichtung dieser Registrierungen zeigte, daß im längerperiodischen Bereich auch für teleseismische Ereignisse durchaus Energie der S-Wellen in das Schelfeis übertragen wird. Aus dieser Erkenntnis heraus wurden Ende 1995 versuchsweise im Observatorium die S13 Seismometer durch LE-3D/5s ersetzt. Dieser Versuch wurde jedoch abgebrochen, da die schelfeisbedingten Störungen im längerperiodischen Bereich im Südsommer zu groß wurden und auch keine verlässlichen Ergebnisse hinsichtlich Splitting-Analyse erzielt werden konnten (Kap. 6). Auf GvN registriert bis heute weiterhin ein 1-Komponenten Mark L-IV/1Hz Seismometer.

- Geographische Lage:

Station	Geogr. Breite	Geogr. Länge	Höhe
GvN	70° 35' 38" S	8° 21' 35" W	40m
OBS	70° 39' 46" S	8° 15' 24" W	40m

- Seismometer:

Station	Zeitraum	Seismometer
GvN	29/06/92 – 18/10/92	LE-3D/5s
OBS	28/09/95 – 01/96	LE-3D/5s

Die Energieversorgung der Stationen wird durch gewöhnliche 120 Ah Akkumulatoren gewährleistet, die durch Solarpaneele aufgeladen werden. Problematisch ist die Gewährleistung der Energieversorgung in den dunklen Wintermonaten. Sämtliche Versuche, diese Zeit mit den verschiedensten Typen von Windgeneratoren zu überbrücken, sind aufgrund der sehr hohen Windgeschwindigkeiten fehlgeschlagen. Als erfolgreich hat sich erwiesen, zur Überbrückung der Wintermonate nichtwiederaufladbare Zink-Kohlenstoff-Elemente einzusetzen, die eine Einzelkapazität von 2200 Ah aufbringen. Diese Batterien werden seit 1995 an WAZ und OLY eingesetzt.

5.2.2 Datenerfassung

Die seismologische Datenerfassung (Abbildung 5.4) beruht auf dem PCM-5800-System der Firma LENNARTZ. Die Datenströme der einzelnen Stationen werden kontinuierlich per UHF-Telemetrie zur Neumayer Station übertragen. Von den Schelfeisstationen erfolgt die Übertragung FM-moduliert und ist damit in der Dynamik auf 60 dB beschränkt. Diese Datenströme laufen im Labor in einem PCM-Encoder zusammen, der hier einen digitalen PCM-Kode erzeugt. Im Gegensatz dazu sind die Stationen WAZ und OLY jeweils mit eigenen Encodern ausgestattet. Diese arbeiten im "gain ranging mode" und erzeugen einen PCM-kodierten digitalen Datenstrom, der eine Dynamik von fast 120 dB zulässt und ebenfalls per Telemetrie zur Station übertragen wird. Über eine PCM-"Mixer"-Einheit im Geophysik-Labor werden die drei digitalen PCM-Kodes zusammengeführt und dort zentral der Triggerstatus der einzelnen Kanäle überprüft. Die Bandaufzeichnungen erfolgen getriggert über einen mehrkanaligen STA/LTA-Ereignisdetektor und werden bei positivem Triggerstatus als PCM-Kode auf Magnetband geschrieben. Die Abtastfrequenz beträgt 125 Hz und die Anti-Aliasing-Filter haben eine Eckfrequenz von 25 Hz. Ein PCM-Decoder ermöglicht über eine IEEE-Schnittstelle die Übertragung der Bandaufzeichnungen von einem zweiten Bandgerät auf eine SUN-Workstation. Die Daten liegen hier im ESSTF-Format (European Standard Seismic Tape Format) vor und können weiter konvertiert, bearbeitet und auf entsprechende Speichermedien (Exabyte Tape, MO-Disk) übertragen werden.

Zusätzlich stehen im Labor als kontinuierliche Aufzeichnungsgeräte zwei Analog-Papiersreiber zur Verfügung. Als Standard ist einer für OBS reserviert, während der zweite für WAZ oder OLY zur Verfügung steht. Als Online-Monitor zur direkten Überwachung des Funktionszustands aller Stationen dient ein getriggert betriebener 8-Kanal-Thermoschreiber.

5. Das seismologische Netzwerk an der Neumayer Station

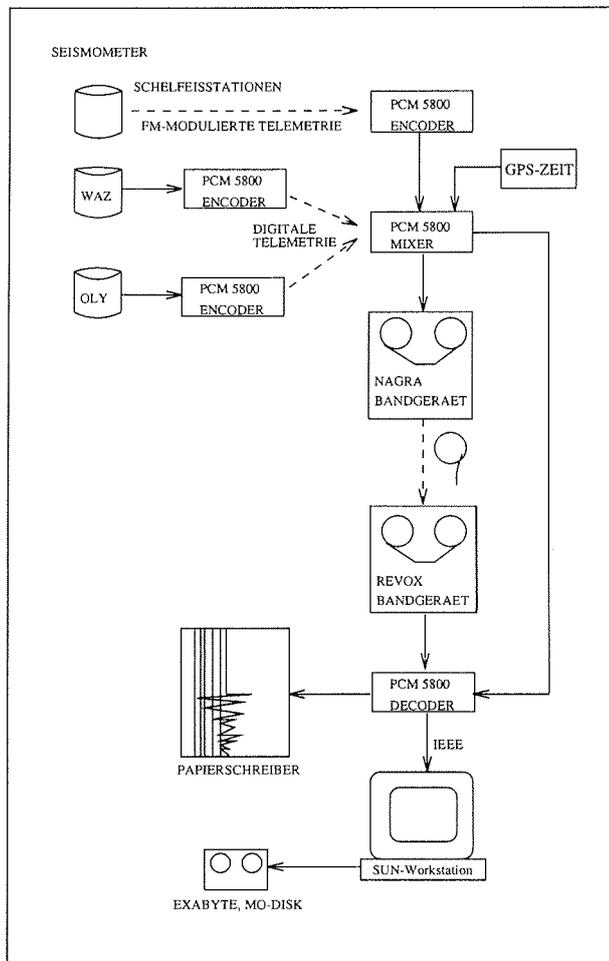


Abbildung 5.4 Blockdiagramm zur Konfiguration und Datenerfassung der seismologischen Außenstationen an der Neumayer Station.

5.2.3 Situationsbedingte Probleme

Versorgung

Aufgrund der lage- und klimabedingten Situation, besonders der Stationen WAZ und OLY, ergeben sich Probleme, die ein Seismographenbetrieb unter "normalen" Bedingungen nicht hat. Die Stationen müssen in der Lage sein, über lange Zeit autark zu arbeiten, da eine regelmäßige Versorgung aufgrund der schweren Zugänglichkeit und der Klimabedingungen jeweils mit einem großen logistischen Aufwand verbunden ist. Während der Wintermonate (Juni – September) ist ein Besuch nicht möglich. Die Ausfallzeiten können sich daher über mehrere Wochen bis Monate erstrecken.

Kontinuität

Aufgrund des hohen Schneezutrags (ca. 0.5 m/Jahr an WAZ und 2 m/Jahr an OLY) ist es notwendig, die Stationen mindestens einmal im Jahr auszugraben und wieder neu aufzubauen. Das größte Problem dabei bedeutet die korrekte Ausrichtung der Seismometer. Die Ausrichtung erfolgt nach Kompass und GPS. Normalerweise erreicht man so eine Genauigkeit von $\pm 5^\circ$, es kommt jedoch vor, daß aufgrund der sich beim Aufbau der Station verschlechternden Witterungsbedingungen (schlechte oder keine Sicht) eine sorgfältige Ausrichtung unmöglich wird, so daß auch größere Abweichungen auftreten können. Diese Richtungsfehler können jedoch später, wenn sie bekannt sind, in den Seismogrammen korrigiert werden. Zur Kontrolle der korrekten Ausrichtung wurden in dieser Arbeit die Hodographen ausgewählter P-Phasen mit den entsprechenden theoretischen Azimuten verglichen. Diese Methode ist jedoch auch kritisch zu bewerten, da Abweichungen der beobachteten und theoretischen Richtungen auch auf Azimutanomalien zurückführbar sein können. Auf diese Weise wurde jedoch eine Mißweisung der Station OLY für den Zeitraum 10/95 – 12/95 festgestellt. In diese Spanne fallen drei verwendete Ereignisse (951029, 951105, 951210, s. Anhang A) mit immerhin 18° Mißweisung, die entsprechend korrigiert wurden.

Technische Probleme

Neben den schon diskutierten Problemen der Stromversorgung sei noch zu erwähnen, daß auch andere, situationsbedingte Ausfälle den Stationsbetrieb beeinträchtigen. Dazu gehören Störungen der Daten durch Elektrostatik bei großen Windstärken und Anfälligkeit der Feedback-Elektronik der Seismometer bei tiefen Temperaturen. Diese Beeinträchtigungen können zeitweise auch zu erheblichen Datenverlusten führen. Zudem führen die extremen Windbedingungen und die Meeresbrandung in den Sommermonaten zu einem zum Teil extremen Rauschpegel.

Datenerfassung

Eine weitere Quelle für Datenverluste, die insbesondere die Aufzeichnung von S-Wellen betrifft, ist die ereignisgetriggerte Datenerfassung. Bis Anfang 1993 wurde die Triggernachlaufzeit standardmäßig auf drei Minuten gesetzt. Für teleseismische Entfernungen wurden dadurch die mehrere Minuten später einlaufenden S-Wellen gekappt. Daraufhin wurde die Triggernachlaufzeit auf 12min erhöht, um insbesondere SKS-Phasen, die ca. 10 *min* nach P einlaufen, ebenfalls erfassen zu können. Um ein zu schnelles Vollaufen der Bänder bei häufigen Fehltriggerungen zu vermeiden, wurden bei ungünstigen Witterungsbedingungen im Ermessen der Überwinterer die Nachlaufzeiten wieder zurückgenommen. Eine kontinuierliche Datenerfassung direkt über einen Rechner auf Festplatte konnte leider noch nicht realisiert werden.

Eine weitere Einschränkung infolge der ereignisgetriggerten Datenerfassung beruht darauf, daß Beben aus der Schattenzone für P nicht oder selten registriert werden, obwohl in diesem Bereich gerade deutliche SKS-Phasen auftreten. Der Versuch, den Trigger zusätzlich für die Horizontal-komponenten beider Stationen (WAZ und OLY) empfindlich zu machen, wurde abgebrochen, da zu viele Fehltriggerungen auftraten und damit der Bandverbrauch zu groß wurde.

6. Splitting-Analyse

6.1 Auswahl geeigneter Kernphasen und Bebengebiete

Die Datenauswahl geeigneter Kernphasen erfolgte nach Bebenkatalogen je nach Aktualität aus den Bulletins des International Seismological Centre (ISC), den Preliminary Determinations of Epicentres (PDE) bzw. den Harvard Quick Centroid Moment Tensor Solutions (CMT). Berücksichtigt wurden dabei Beben aus den besprochenen Entfernungsbereichen (Abschnitt 3.2) mit Magnituden (m_b) ≥ 5.5 , da diese ausreichend Energie freisetzen, um SKS-Wellen mit genügend gutem S/N-Verhältnis anzuregen. Eine Ausnahme bilden die Tiefherdbeben der Fiji-Tonga-Subduktionszone, bei denen SKS-Phasen mit gutem S/N-Verhältnis bis hinunter zu $m_b = 5.1$ beobachtet wurden. Die Ursache hierfür liegt in der großen Herdtiefe zusammen mit einer für die Herd-/Stationsgeometrie günstigen Abstrahlcharakteristik.

Die theoretischen Ankunftszeiten der zur Analyse relevanten Phasen wurden aus dem 'IASPEI91' Geschwindigkeitsmodell (Kennett, 1991) für gegebene Herdentfernung und -tiefe ermittelt. Dazu wurde das Programm 'TTIMES' von Buland & Chapman (1983) verwendet, das aus den IASPEI91 Laufzeittabellen die Phasenlaufzeiten interpoliert.

Insgesamt wurden 40 geeignete Ereignisse in dem Zeitraum 92/07 – 96/08 mit SKS-, SKKS- und PKS-Phasen genügender Qualität gefunden. Die für Neumayer durch geeignete Herdentfernungen gegebenen Hauptbebengebiete sind Fiji/Tonga/Vanuatu (17 Ereignisse, $186^\circ < BAZ < 195^\circ$), Indonesien (9 Ereignisse, $111^\circ < 147^\circ$), Marianen Graben, Japan, Japanisches Meer (10 Ereignisse, $125^\circ < BAZ < 150^\circ$) und vereinzelte Beben aus anderen Regionen (Hindu Kush, $BAZ = 66^\circ$; Loyalty Inseln, $BAZ = 178^\circ$; nördlicher mittelatlantischer Rücken, $BAZ = 328^\circ$, Andreanof Inseln (Aleuten), $BAZ = 201^\circ$ und dem panamesisch-kolumbianischem Grenzgebiet, $BAZ = 291^\circ$) gefunden. Die Herdparameter der verwendeten Erdbeben sind in Anhang A zusammengestellt.

Abbildung 6.1 zeigt die geographische Verteilung der Epizentren der verwendeten Kernphasen und die Projektion der Laufwege auf die Erdoberfläche. Aus der oberen Abbildung, azimutal äquidistante Projektion bezüglich der Neumayer Station, läßt sich gut die azimutale Verteilung

6. Splitting-Analyse

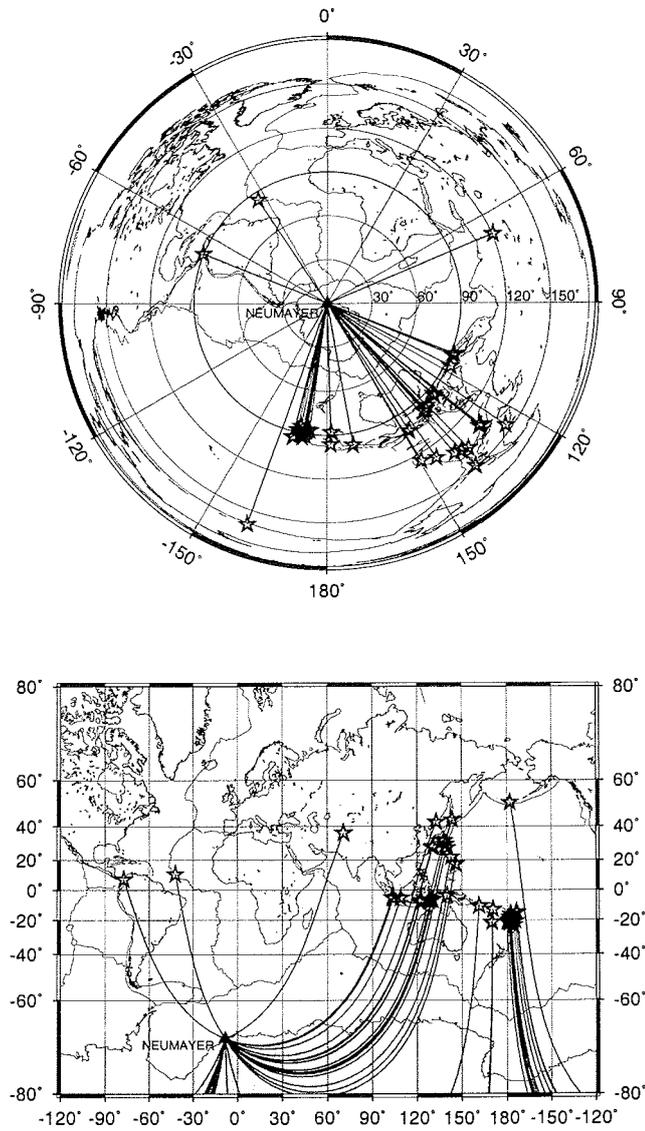


Abbildung 6.1 Epizentrumlokalationen der verwendeten Erdbeben und Projektion der Strahlenverläufe auf die Erdoberfläche. Oben: Azimutal äquidistante Projektion. Unten: Mercatorprojektion.

der Rückazimute und damit der Polarisationsrichtungen erkennen. Bis auf drei Ausnahmen ist die Verteilung der Azimute auf ein Winkelsegment von 90° verteilt. Um noch weitere Polarisationsrichtungen miteinzubeziehen, wurden jedoch auch noch einige ausgewählte S- und ScS-Phasen in die Analysen miteinbezogen.

6.2 Kernphasen (SKS, SKKS, PKS)

6.2.1 Parameterbestimmung am Ereignis 951225

Stellvertretend für alle Stations-/Bebenpaare soll in diesem Abschnitt die Inversion der Anisotropie-Parameter ϕ_{aniso} und δt_{aniso} aus den verwendeten Kernphasen (SKS, SKKS, PKS) anhand der gut registrierten SKS-Welle des Ereignisses 951225 / Banda See veranschaulicht werden. Hinweise auf individuelle Abweichungen von der hier vorgestellten Vorgehensweise werden gegeben. Abbildung 6.2 zeigt die an der Station WAZ digital aufgezeichnete Bebenregistrierung des Ereignisses in voller Aufzeichnungslänge. Das Beben hatte eine Magnitude (mb) von 6.2 bei einer Herdtiefe von 154.0 km (PDE, Appendix A für weitere Herdparameter). Die auf WAZ bezogene Herdentfernung (Δ) und der Rückazimut (BAZ) für dieses Ereignis betragen 97.7° bzw. 137.0° . Die SKS-Welle fällt $10 \text{ min } 22 \text{ sec}$ nach P ein und ist bei dieser Herdentfernung deutlich

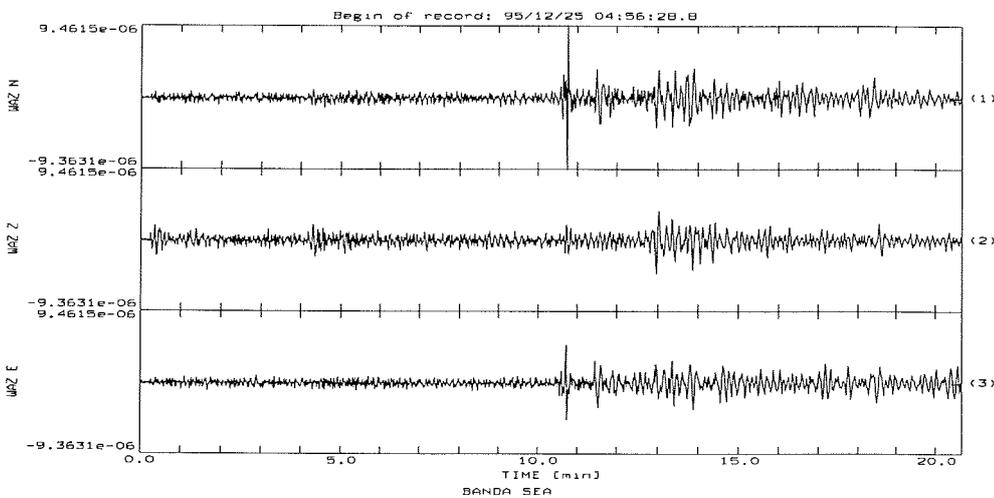


Abbildung 6.2 Registrierung des Bebens 951225 / Banda See an der Station WAZ.

6. Splitting-Analyse

von den nachfolgenden S-Phasen getrennt (S fällt 49 sec später ein). Der Auftauchwinkel der SKS-Welle (i_0) beträgt 8.9° . An dieser Beispielregistrierung sollen die Diagnosekriterien für das Vorhandensein seismischer Anisotropie auf der Empfängerseite des Laufweges einer SKS-Welle dargestellt und die anschließende Inversion der Splitting-Parameter erläutert werden.

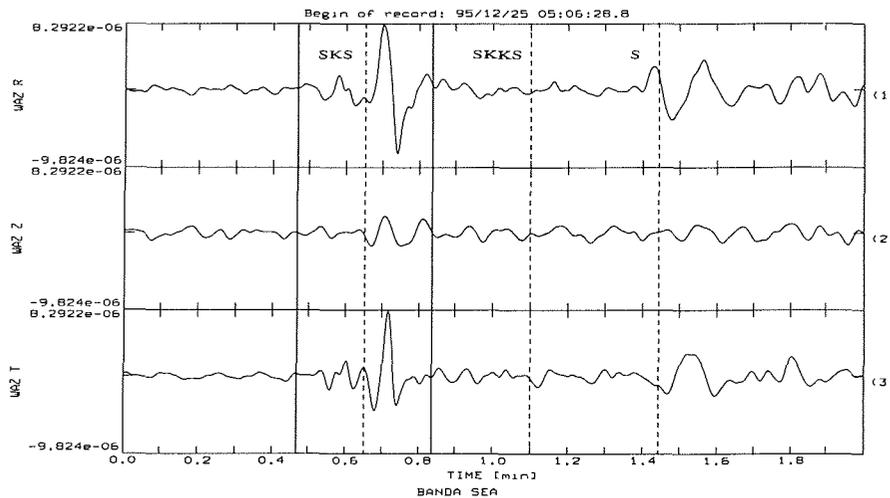


Abbildung 6.3 Radial-, Vertikal- und Transversalkomponente. Tiefpaßgefiltert mit einer Eckfrequenz von 0.5 Hz (2 sec). Durch gestrichelte Linien sind die nach IASPEI91 erwarteten Einsatzzeiten der S-Phasen markiert. Die durchgezogenen Linien kennzeichnen das zur Inversion der Splitting-Parameter aus der SKS-Welle verwendete Zeitfenster.

Abbildung 6.3 zeigt ein 2min langes Zeitfenster der Registrierung, das gerade die SKS- und S-Phase enthält. Die Darstellung der Horizontalenkomponenten bezieht sich hier auf die Radial- und Transversalkomponenten. Die gestrichelten Linien markieren die nach dem IASPEI91 Geschwindigkeitsmodell erwarteten Phasen-Einsätze. Die durchgezeichneten Linien kennzeichnen das später zur Inversion der Splitting-Parameter aus der SKS-Welle verwendete Zeitfenster.

Die Registrierung ist zur Verbesserung des S/N-Verhältnisses mit einem Butterworth-Bandpaßfilter von $0.1 - 0.5 \text{ Hz}$ ($2 - 10 \text{ sec}$) gefiltert. Da die meiste Energie teleseismischer S-Wellen in diesem Frequenzbereich liegt, geht nur wenig vom Nutzsignal verloren (Abschnitt 5.2.1). Die meisten Seismogramme wurden in diesem Bereich gefiltert. Bei einigen wurden jedoch Aus-

6.2 Kernphasen (SKS, SKKS, PKS)

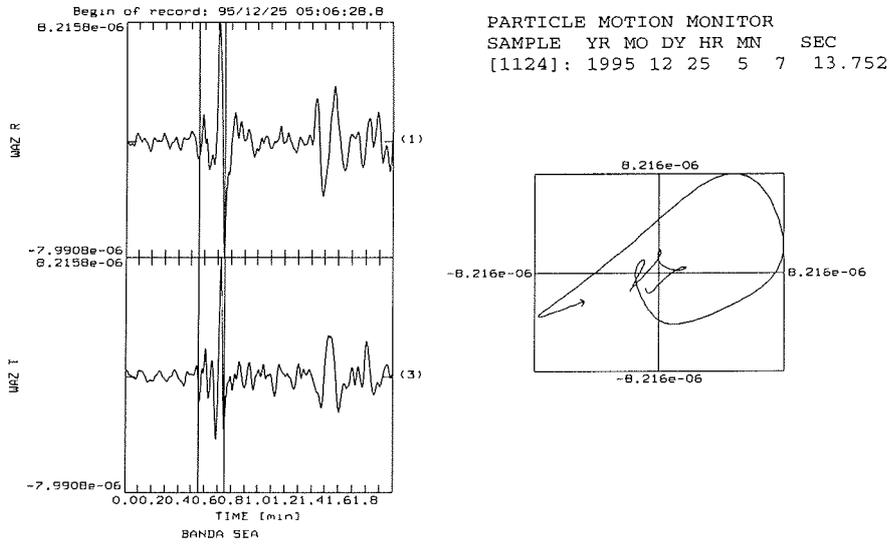


Abbildung 6.4 Teilchenbewegung der SKS-Welle in Radial- und Transversalkoordinaten. Energie auf der Transversalkomponente bzw. elliptische Teilchenbewegung deutet auf Anisotropie hin.

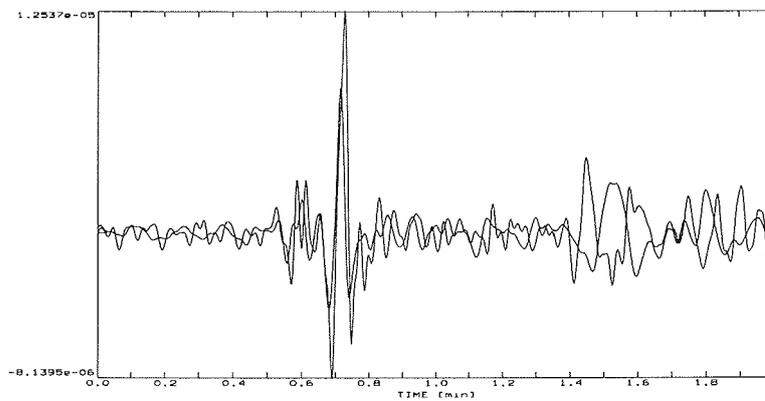


Abbildung 6.5 Überlagerung von Transversalkomponente und zeitlicher Ableitung der Radialkomponenten. Deutlich zu sehen ist die Proportionalität im Bereich der SKS-Welle als Hinweis für seismische Anisotropie im Laufweg unterhalb der Station.

6. Splitting-Analyse

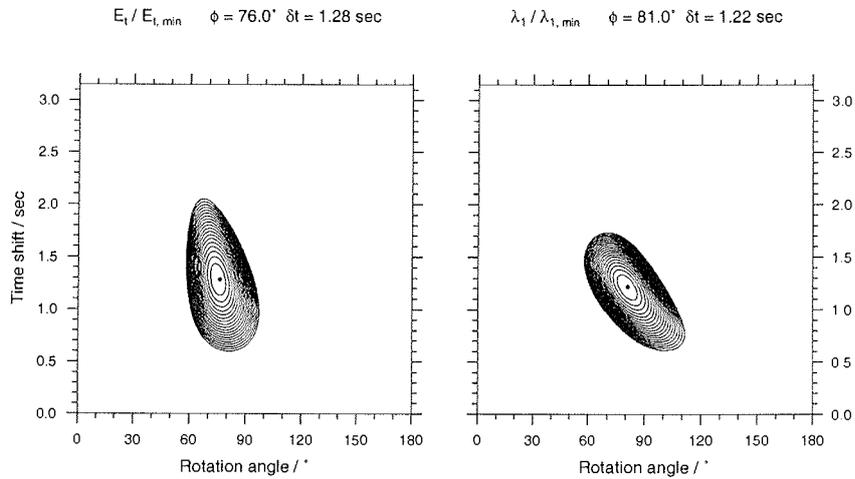


Abbildung 6.6 Ergebnisse der Analyseverfahren. Linke Abb.: Minimierung der Energie der Transversalkomponente. Rechte Abb.: Polarisationsanalyse, Minimierung des kleineren Eigenwertes der Kovarianzmatrix.

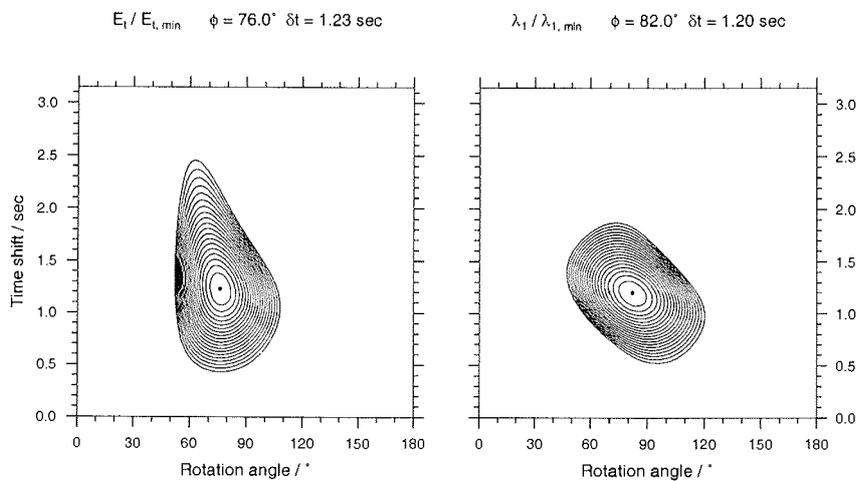


Abbildung 6.7 Wie oben, nur für die ungefilterte Registrierung.

nahmen gemacht, um bei speziellen Frequenzen auftretendes Rauschen (z.B. durch Wind oder Meeresbrandung) zu unterdrücken. Als Filter wurde ein Vorwärts-Rückwärts-Filter verwendet, d.h. es handelt sich um ein Null-Phasen-Filter, wobei die Spuren einmal von links und einmal von rechts gefiltert werden. Die Filterflanke wird dabei doppelt so steil wie bei einer einfachen Vorwärts-Filterung.

Folgendes läßt sich zu den einzelnen Diagnosekriterien aufführen:

- Auf der T-Komponente ist ein deutlicher Energieanteil zu sehen, der auf ein Vorhandensein anisotroper Strukturen hinweist.
- Die Teilchenbewegung ist annähernd elliptisch (Abbildung 6.4). Aus der gegen den Uhrzeigersinn gerichteten Teilchenbewegung läßt sich schon die relative Lage der schnellen Polarisationsrichtung abschätzen. Nach Abschnitt 4.2.1 muß diese im Bereich $0^\circ < \beta < 90^\circ$ liegen, d.h. für den vorgegebenen Rückazimut in diesem Fall $137^\circ < \phi_{aniso} < 227^\circ$.
- Die Überlagerung von zeitlicher Ableitung der Radialkomponente (dR/dt) und Transversalkomponente sind annähernd proportional (Abbildung 6.5). Die Proportionalität gilt theoretisch nur für Perioden $\rightarrow \infty$, so daß hier nur ein Tiefpaßfilter mit einer Eckfrequenz von 0.5 Hz verwendet wurde. dR/dt und T sind umgekehrt proportional. Zur besseren Veranschaulichung ist T mit -1 multipliziert. Eine Proportionalität für die nachfolgende S-Welle ist nicht erkennbar.

Im folgenden werden die Ergebnisse der beiden verwendeten Inversionsverfahren dargestellt. Dazu wird zunächst aus der Registrierung ein Zeitfenster herausgeschnitten, welches den Hauptsignalanteil der SKS-Welle enthält. Im Falle einer vorhandenen Koda oder der direkt nach der SKS-Welle einlaufenden S-Welle werden diese abgeschnitten und nach Möglichkeit nur die Hauptschwingungsperiode verwendet. Im allgemeinen hatten die so verwendeten Zeitfenster eine Länge von $10 - 20 \text{ sec}$. Die so erhaltenen Seismogrammausschnitte wurden mit einem Kosinus-Fenster getapered, um bei der gegenseitigen Zeitverschiebung an deren Enden Amplitudensprünge zu vermeiden. Für beide angewendeten Inversionsverfahren beträgt die Schrittweite für den Drehwinkel 1.0° und für die zeitliche Verschiebung der Horizontalkomponenten 0.016 sec . Der zweite Wert ergibt sich aus der Samplefrequenz von 125 Hz zu einer Schrittweite von zwei Datenpunkten.

In Abbildung 6.6 sind als Konturlinienplots die Ergebnisse der Inversionen durch die Net-Grid-Search-Verfahren dargestellt, links die der E_t -Minimierung, rechts die des Eigenwertverfahrens. Die Darstellungen sind wiederum auf den jeweiligen Minimalwert ($E_t/E_{t,min}$ bzw. $\lambda_1/\lambda_{t,min}$) normiert und die Konturlinien für die Werte von 1 bis 20 dargestellt. Die Ergebnisse beider Methoden liefern $(\phi_{aniso}, \delta t_{aniso}) = (76.0^\circ, 1.28 \text{ sec})$ für das E_t -Verfahren und $(81.0^\circ, 1.22 \text{ sec})$ für das Eigenwertverfahren. Die Fehler aus den Halbwertsbreiten lassen sich mit

6. Splitting-Analyse

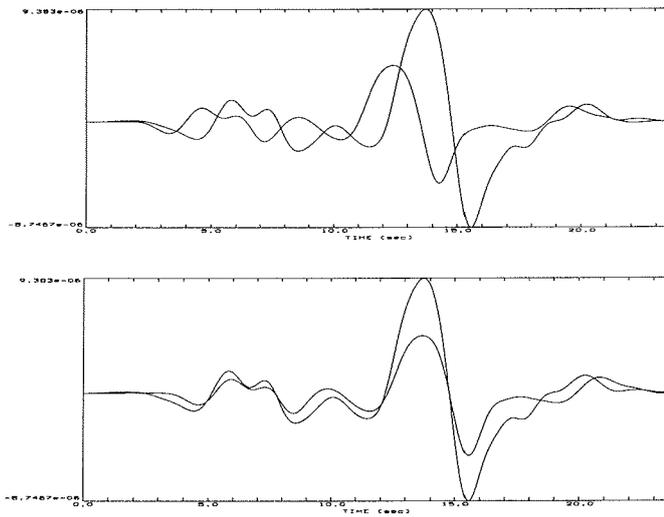


Abbildung 6.8 Oben: Überlagerung der Komponenten nach Projektion auf die schnelle bzw. langsame Anisotropie-Achse. Unten: Überlagerung der um die Laufzeitdifferenz korrigierten Wellenzüge.

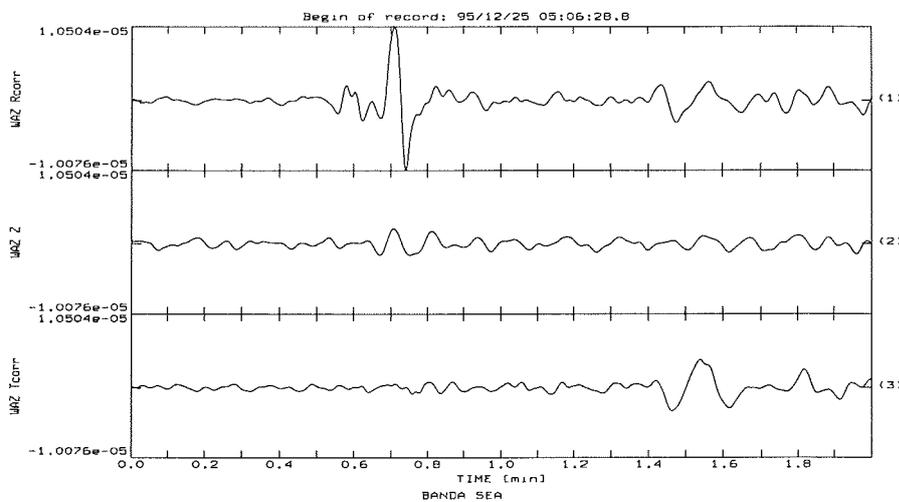


Abbildung 6.9 Korrigierte Radial-, Vertikal- und Transversalkomponente. Für die SKS-Welle ist auf der Transversalkomponente keine Energie mehr vorhanden.

6.2 Kernphasen (SKS, SKKS, PKS)

$(\Delta\phi_{aniso}, \Delta\delta t_{aniso}) = (5^\circ, 0.17 \text{ sec})$ bzw. $(6^\circ, 0.15 \text{ sec})$ angeben. Innerhalb dieser Fehlergrenzen liefern beide Inversionsmethoden kompatible Ergebnisse.

Zum Vergleich wurden die Inversionsverfahren auch auf die ungefilterten Seismogramme angewandt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Die Minima weichen nur geringfügig von denen des gefilterten Seismogramms ab. Jedoch ist der Gradient der Konturlinien geringer und führt damit zu einem größeren Fehlerbereich der Einzelmessung.

Abbildung 6.8 (oben) zeigt die Überlagerung der Projektionen der Horizontalkomponenten auf die schnelle (ϕ) bzw. langsame ($\phi + 90^\circ$) Anisotropie-Richtungen. Deutlich zu erkennen ist der Zeitversatz zwischen beiden Wellen. Der untere Teil zeigt die Überlagerung der um die Laufzeitdifferenz korrigierten Komponenten. Bezeichnend und ein guter Indikator für eine erfolgreiche Inversion ist die Ähnlichkeit der Wellenformen.

Die Projektion (Rotation) der so korrigierten Wellenformen in das ursprüngliche Koordinatensystem (R, Z, T) zurück, zeigt das Seismogramm, wie es ohne Anwesenheit von Anisotropie aussehen würde. Das Seismogramm ist um den Anisotropie-Effekt korrigiert, und wie Abbildung 6.9 zeigt, ist keine Energie mehr auf der Transversalkomponente vorhanden. Der Grad, bis zu dem die Transversalenergie beseitigt werden kann, ist ebenso ein Maß für den Erfolg der Inversion.

6.2.2 Ausgewählte Datensätze

Es können hier nicht alle Einzelanalysen diskutiert werden, dennoch sollen einige ausgewählte Einzelanalysen und deren spezifische Besonderheiten in diesem Abschnitt vorgestellt werden.

Sämtliche Analyseergebnisse für die Gesamtheit der Stations- / Bebenpaare sind im Anhang B aufgeführt. Aus Platzgründen sind dort nur die gefilterten Seismogramme in (R, Z, T)-Koordinaten, die Konturlinienplots als Ergebnisse beider Inversionsmethoden und die korrigierten Radial- und Transversalkomponenten dargestellt.

921220 / Banda See

Das im vorhergehenden Abschnitt ausführlich diskutierte Beispiel (951225) ist insofern ideal, als hier das S/N-Verhältnis außerordentlich gut ist. Der Vergleich von Analyseergebnissen aus gleichen Epizentralregionen mit auch schlechten S/N-Verhältnissen liefert aber überraschenderweise sehr gut übereinstimmende Ergebnisse. Zum Vergleich mit obigem Beispiel sei hier der Isolinenplot des Ereignisses 921220 / Banda See gezeigt (Abbildung 6.10, das zugehörige Seismogramm ist in Anhang B.3 dargestellt). Die hier gefundenen Splitting-Parameter stimmen sehr gut mit denen des rauscharmen Ereignisses 951225 überein. Der Gradient der Konturlinien ist

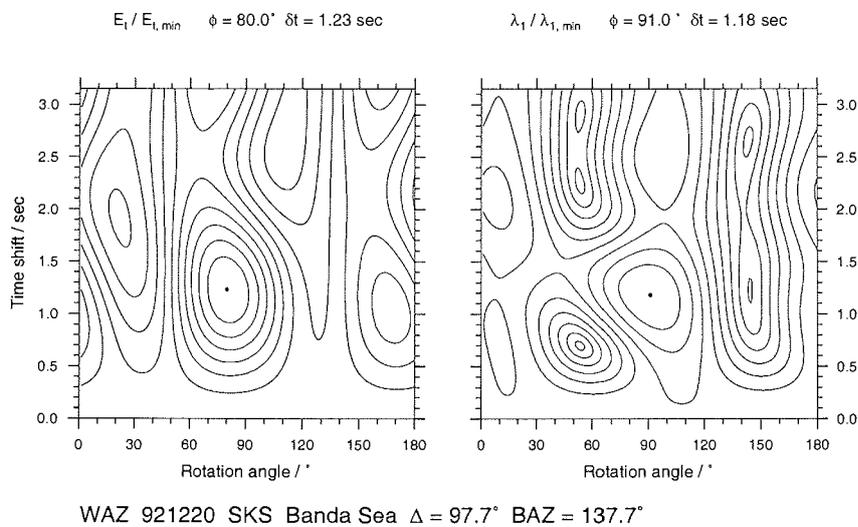
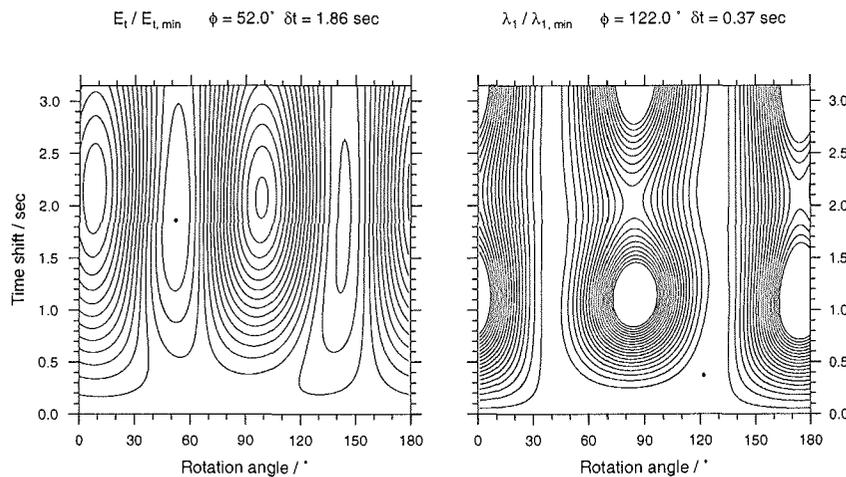


Abbildung 6.10 Seismogramm in Anhang B.3

jedoch deutlich geringer.

930809 / Hindu Kush Region, Afghanistan

Dieses Beispiel verdeutlicht einen Fall, in dem die initiale Polarisationsrichtung (annähernd) mit einer der Anisotropie-Achsen zusammenfällt. Der Rückazimut beträgt 66.2° . Diese Richtung weicht ca. 100° von der für das Ereignis 951225 ab. Die Polarisationsrichtung fällt also in etwa mit der aus dieser Analyse bestimmten langsamen Anisotropie-Richtung zusammen und die Bestimmung der Minimalwerte wird instabil. Die Form der Konturlinien ist nicht mehr elliptisch, sondern nimmt eine für diese Fälle typische U-förmige Gestalt an (Abbildung 6.11).



WAZ 930809 SKS Hindu Kush Region, Afghanistan $\Delta = 120.2^\circ$ BAZ = 66.2°
 Bem.: Z-Komponente war defekt

Abbildung 6.11 Seismogramm in Anhang B.5

Die erhaltenen Laufzeitdifferenzen werden in diesem Fall sinnlos und deren Fehlerbereiche werden unendlich, die Richtungen sollten jedoch ungefähr ϕ_p oder $\phi_p + 90^\circ$, entsprechend der schnellen oder langsamen Anisotropie-Richtung, reproduzieren und sind zwischen diesen beiden Richtungen instabil (beide Methoden liefern auch etwa um 90° differierende Ergebnisse). Die Differenz beträgt jedoch ca. 10° und die T-Komponente (Anhang B.3) weist einen deutlichen Signalanteil auf. Dieser scheinbare Widerspruch ist auf eine kompliziertere Elastizitätsstruktur als die einer einzigen Schicht azimuthaler Anisotropie auf der Empfängerseite zurückzuführen.

940702 / Fiji Islands Region

Es ist erstaunlich, wie gut die Splitting-Ergebnisse für verschiedene Ereignisse aus den gleichen Herdregionen reproduzierbar sind. Als Beispiel seien hier die Ergebnisse zweier Beben aus der Region der Fiji Inseln gezeigt. Beide fanden am gleichen Tag (940702) statt und hatten relativ schwache Magnituden (m_b) von 5.3 und 5.1. Abbildungen 6.12 und 6.13 zeigen die entsprechenden Ergebnisse der Net-Grid-Search-Verfahren für beide Ereignisse. Es werden nicht nur die Splitting-Parameter exakt reproduziert, auch ist die Form der Konturmuster auffällig ähnlich.

960617 / Flores See

Besondere Aufmerksamkeit benötigen die Analysen von SKKS-Phasen. Nach James & Assumpção (1996) können die Splitting-Analysen dieser Phasen inkonsistente oder fehlerhafte Ergebnisse liefern. Die mögliche Ursache liegt darin, daß die SKKS am Reflexionspunkt der Kern-Mantel-Grenze zurück in den äußeren Kern eine breite Fresnelzone aufweist, die zu Interferenzen im aufsteigenden Ast der Welle führen kann. Die Analysen dieser Phasen wurden auf Konsistenz mit anderen SKS-Ergebnissen aus den gleichen Azimuten verglichen. Als ein Beispiel seien die Ergebnisse der Splitting-Ergebnisse für das Beben 960617 / Flores See gezeigt. Hier wurden SKS und SKKS registriert und getrennt analysiert. Abbildung 6.15 zeigt als Ergebnis die Konturlinienplots, oben für SKS, unten für SKKS. Die Splitting-Parameter für beide Phasen stimmen exakt überein, die Konturmuster sind sehr ähnlich und der Gradient der Konturlinien ist bei SKKS sogar steiler als SKS (Anhang B.44 und B.45). Insgesamt wurden neun SKKS analysiert, von denen fünf direkt mit SKS desselben Ereignisses verglichen werden konnten. Bis auf eines (960805, OLY, Anhang B.51) sind die SKKS hier mit den SKS-Ergebnissen kompatibel.

6.2 Kernphasen (SKS, SKKS, PKS)

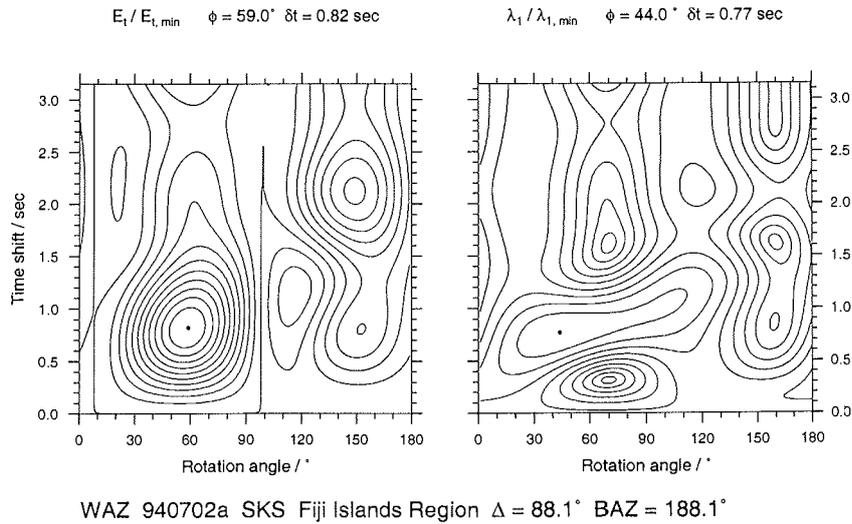


Abbildung 6.12 Seismogramm in Anhang B.7

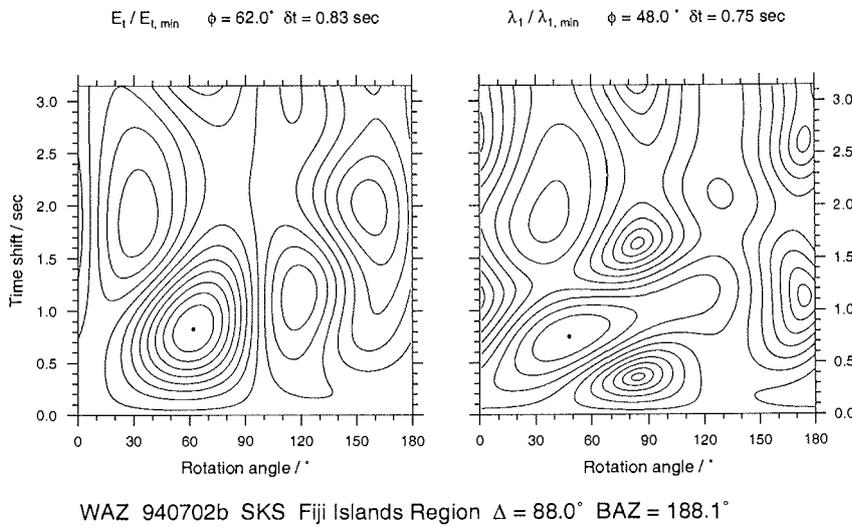
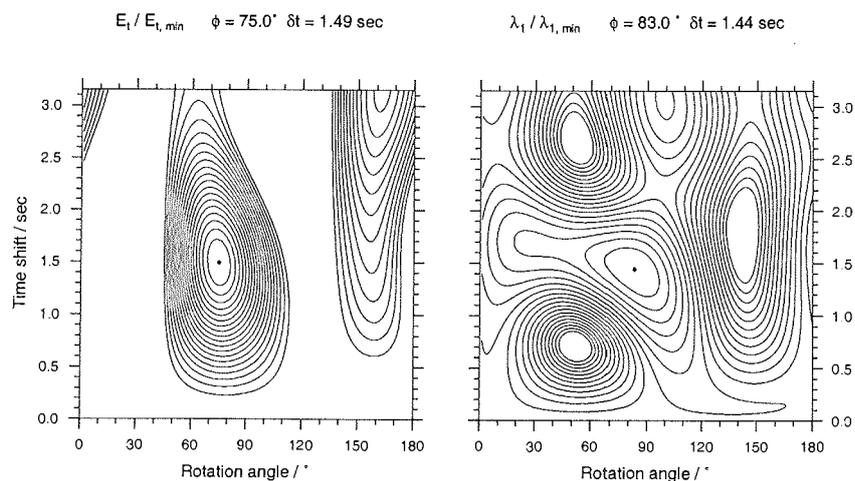


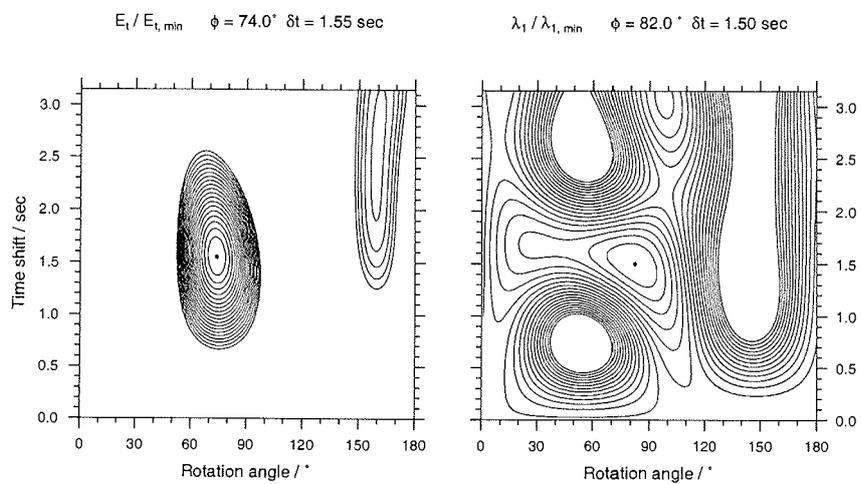
Abbildung 6.13 Seismogramm in Anhang B.8

6. Splitting-Analyse



OLY 960617 SKS Flores Sea $\Delta = 95.8^\circ$ BAZ = 132.4°

Abbildung 6.14 Seismogramm in Anhang B.43



OLY 960617 SKKS Flores Sea $\Delta = 95.8^\circ$ BAZ = 132.4°

Abbildung 6.15 Seismogramm in Anhang B.44

Die Beben der Tonga Islands Region

Einen wahrscheinlich quellseitigen Einfluß der an Neumayer registrierten Kernphasen weisen die flachen Beben der Tonga-Fiji-Subduktionszone auf. Die Splitting-Analysen für diese Ereignisse (940719, 950417, 951113, 951226, 960805) ergeben inkonsistente Ergebnisse (ein Beispiel für die Kontinuitätsplots der Analysen zeigt Abbildung 6.16). Die Fehlergrenzen für die Einzelmessungen sind relativ groß und die Analyseergebnisse beider angewendeten Methoden weichen stark voneinander ab. Zunächst scheint diese Tatsache erstaunlich zu sein, da die Tiefherdbeben aus dieser Region sehr konsistente und mit geringen Fehlern behaftete Ergebnisse liefern, im BAZ aber nur wenige Grad abweichen.

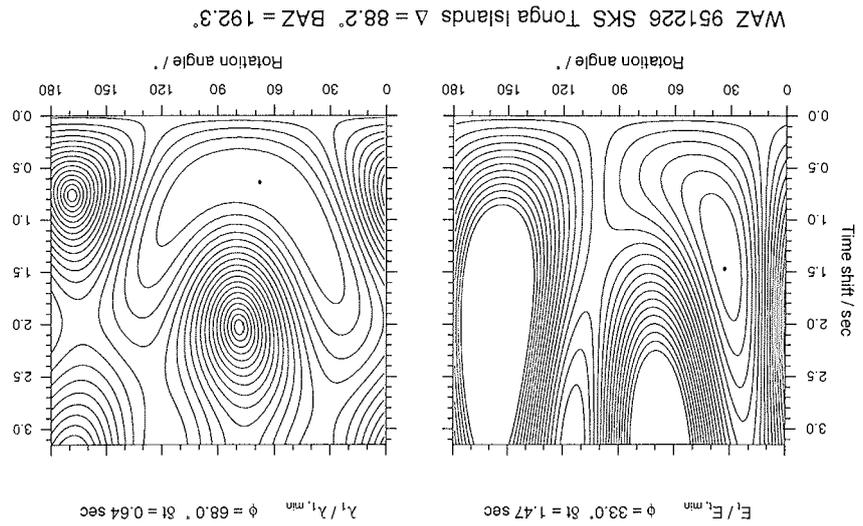


Abbildung 6.16 Seismogramm in Anhang B.26

Eine mögliche Erklärung für diese unterschiedlichen Ergebnisse liegt in der speziellen Geometrie der Strahlenverläufe zwischen Quellregion in der abknickenden Subduktionsplatte und der Registrierstationen. Das Streichen der Platte hat ungefähr die Richtung des Azimuts zur Neumayer Station (Abbildung 6.17), so daß die Wellen in der gegenüber dem Mantel kalten und dichten abtauchenden Platte refraktiert werden, die Teilwellen interferieren und die Wellenzüge „verschmieren“ über einen größeren Azimutbereich. Die Morphologie der abtauchenden Platte ist relativ kompliziert (Van der Hilst, 1995), so daß vermutlich zusätzlich auch Streueffekte das Verschmieren der Wellenzüge beeinflussen. Die Splitting-Ergebnisse für die Beben aus diesen Herdregionen werden im folgenden nicht weiter berücksichtigt.

6. Splitting-Analyse

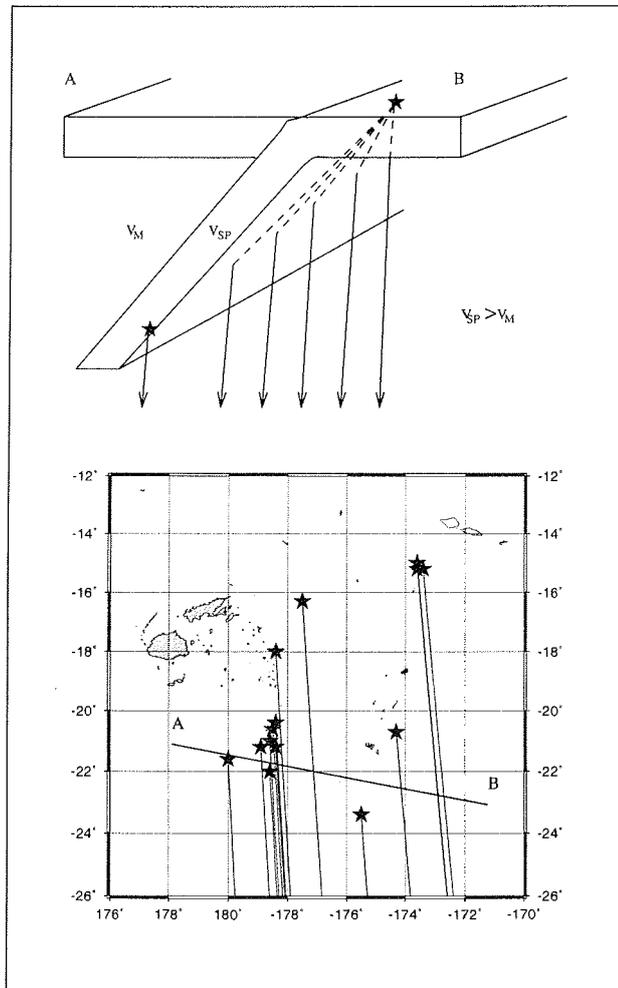


Abbildung 6.17 Schematische Darstellung der Strahlenverläufe für Beben der Tonga-Fiji-Subduktionszone bezüglich der Neumayer Station.

6.2.3 Ergebnisse der Splitting-Analysen

Insgesamt wurden 58 Kernphasen an den Stationen WAZ, OLY, GVN und OBS analysiert. Davon entfallen 27 auf WAZ, ebenfalls 27 auf OLY, eine auf GVN und drei auf OBS. Im folgenden werden die Ergebnisse der vier Stationen zusammenfassend vorgestellt.

Die Ergebnisse der Einzelanalysen sind in den Tabellen 6.1 (WAZ), 6.2 (OLY) und 6.3 (GVN/OBS) zusammengestellt. Dabei bezieht sich die laufende Nummer auf die in Anhang A.1 in zeitlicher Reihenfolge zusammengestellten Ereignisse, die in dieser Arbeit untersucht wurden. Zusätzlich angegeben sind das Datum des Bebens, die analysierte Phase, Epizentralentfernung (Δ), Rückazimut (BAZ) sowie die Splitting-Parameter aus beiden Analysemethoden inklusive der aus den Halbwertsbreiten ermittelten relativen Fehler. Die Bemerkungen weisen auf Eigenarten des jeweiligen Beben-/Stationspaares hin, wie nicht detektierbares Splitting (\dagger), schlecht aufgelöstes Splitting, d.h. Polarisations- und Anisotropie-Achse liegen dicht beieinander, liefern aber noch einigermaßen zuverlässige Ergebnisse (\ddagger , marginales Splitting) und den Einfluß quellseitiger Effekte (\S), wie bei den Beben im Bereich der Tonga-Fiji-Subduktionszone.

Die Seismogramme der einzelnen untersuchten Beben-/Stationspaare, die Analyseergebnisse der beiden Net-Grid-Search-Methoden sowie die korrigierten Seismogramme sind in Anhang B.1 (WAZ), B.2 (OLY), B.3 (OBS) und B.4 (GVN) zusammengestellt.

Station WAZ

Das aus den Einzelmessungen für WAZ einfach gemittelte Parameterpaar beträgt

- $(\phi, \delta t) = (65^\circ, 1.20 \text{ sec})$ aus dem E_t -Verfahren und
- $(\phi, \delta t) = (66^\circ, 1.17 \text{ sec})$ aus dem Eigenwertverfahren.

Bei der Mittelung wurden die Beben ausgeschlossen, die keine eindeutigen und vertrauenswürdigen Analyseergebnisse liefern. So wurden die Ergebnisse ohne detektierbares Splitting, marginales Splitting sowie Ereignisse mit quellseitigen Einflüssen der Tonga-Fiji-Region nicht berücksichtigt. Insgesamt blieben so 22 Datenpaare zur Mittelung übrig. Das mit den relativen Fehlern der Einzelmessungen gewichtete Mittel der Splitting-Parameter weicht geringfügig von dem ungewichteten Parameterpaar ab:

- $(\phi, \delta t) = (64^\circ, 1.14 \text{ sec})$ aus dem E_t -Verfahren und
- $(\phi, \delta t) = (66^\circ, 1.15 \text{ sec})$ aus dem Eigenwertverfahren.

6. Splitting-Analyse

#	Datum (yymmdd)	Phase	Δ (Grad)	BAZ (Grad)	$\phi_{E_t} \pm$ (Grad)	$\delta t_{E_t} \pm$ (Sec)	$\phi_{\lambda_1} \pm$ (Grad)	$\delta t_{\lambda_1} \pm$ (Sec)	Bemerkung
2	921030	PKS	134.9	137.1	73.0 ± 6.0	1.06 ± 0.25	80.0 ± 15.0	0.99 ± 0.40	–
3	921212	SKS	93.9	129.9	78.0 ± 8.0	1.71 ± 0.32	79.0 ± 23.0	1.70 ± 0.40	–
4	921220	SKS	97.7	137.7	80.0 ± 9.0	1.25 ± 0.25	87.0 ± 19.0	1.23 ± 0.30	–
5	930115	SKKS	148.8	137.0	78.0 ± 12.0	2.08 ± 0.73	86.0 ± 36.0	1.94 ± 1.00	–
9	930809	SKS	120.2	66.2	52.0 ± 7.0	1.86	122.0 ± 13.0	0.37	‡
13	940309	SKS	91.1	188.5	49.0 ± 14.0	0.93 ± 0.25	62.0 ± 28.0	0.90 ± 0.21	–
18	940702a	SKS	88.1	188.1	59.0 ± 9.0	0.82 ± 0.21	44.0 ± 47.0	0.77 ± 0.35	–
19	940702b	SKS	88.0	188.1	62.0 ± 11.0	0.83 ± 0.21	48.0 ± 22.0	0.75 ± 0.25	–
20	940705	SKS	92.7	189.5	60.0 ± 13.0	0.88 ± 0.24	64.0 ± 27.0	0.90 ± 0.30	–
		SKKS			62.0 ± 8.0	1.00 ± 0.19	65.0 ± 16.0	1.02 ± 0.18	–
21	940713	SKS	96.2	135.3	78.0 ± 4.0	1.47 ± 0.15	85.0 ± 6.0	1.42 ± 0.11	–
23	940721	SKKS	145.7	124.7	81.0 ± 9.0	1.36 ± 0.27	76.0 ± 27.0	1.34 ± 0.28	–
27	950407	SKS	93.6	193.4	41.0	0.93	91.0	1.23	§
28	950413	SKS	96.1	177.7	68.0 ± 7.0	1.12 ± 0.27	71.0 ± 8.0	1.18 ± 0.27	–
29	950513	SKS	93.3	116.5	80.0 ± 8.0	1.41 ± 0.26	90.0 ± 29.0	1.42 ± 0.25	–
30	950923	SKS	91.3	111.9	82.0 ± 6.0	1.14 ± 0.20	85.0 ± 10.0	1.17 ± 0.21	–
31	951009	SKS	87.9	177.6	61.0 ± 6.0	1.54 ± 0.22	60.0 ± 12.0	1.54 ± 0.36	–
32	951018	PKS	131.2	128.0	76.0 ± 14.0	0.94 ± 0.31	86.0 ± 22.0	0.91 ± 0.26	–
33	951019	PKS	131.5	128.1	74.0 ± 12.0	1.04 ± 0.31	88.0 ± 20.0	0.98 ± 0.31	–
34	951029	SKS	87.9	188.4	59.0 ± 12.0	0.94 ± 0.27	71.0 ± 24.0	0.98 ± 0.23	–
35	951105	SKS	92.0	111.2	75.0 ± 9.0	1.20 ± 0.22	86.0 ± 6.0	1.30 ± 0.10	–
36	951113	SKS	93.8	193.4	26.0 ± 7.0	1.52	113.0 ± 13.0	1.71	§
37	951210	SKS	87.9	188.4	62.0 ± 5.0	0.91 ± 0.10	66.0 ± 9.0	0.94 ± 0.10	–
38	951219	SKKS	102.7	146.8	70.0 ± 10.0	0.93 ± 0.37	72.0 ± 16.0	0.86	‡
39	951225	SKS	97.7	137.3	76.0 ± 5.0	1.28 ± 0.16	81.0 ± 7.0	1.22 ± 0.12	–
40	951226	SKS	88.2	192.3	33.0	1.47	68.0	0.64	§
52	961104	SKS	90.4	291.1	74.0 ± 9.0	0.96 ± 0.24	80.0 ± 42.0	1.01 ± 0.30	–

Tabelle 6.1 Ergebnisse der Splitting-Analyse der Kernphasen für Station WAZ. Bemerkungen:
‡ - Kein detektierbares Splitting, † - Marginales Splitting, § - Einfluß quellseitiger Effekte.

Abbildung 6.18 veranschaulicht die Abhängigkeit der Splitting-Parameter vom Rückazimut. Die Azimute sind als $\phi_p \text{ modulo } 180^\circ$ aufgetragen. Die grauen Symbole ohne Fehlerbalken markieren die Werte für kein detektierbares oder marginales Splitting. Die gewichteten Mittel sind als durchgezogene Linien markiert, ebenso die aus dem Mittel erwarteten “Null“-Richtungen, d.h. die schnelle $\phi_{aniso} = 64^\circ$ und langsame Richtung $\phi_{aniso} + 90^\circ = 154^\circ$. Deutlich erkennbar ist eine azimutale Abhängigkeit der Parameterwerte, die sich im wesentlichen in zwei azimutalen Häufungsbereichen mit voneinander verschiedenen Parametern manifestiert. So liegen im Azimutintervall $180^\circ - 200^\circ$ bzw. $0^\circ - 20^\circ$ (Fiji/Tonga/Vanuatu) die gewichteten Mittel bei fast

6.2 Kernphasen (SKS, SKKS, PKS)

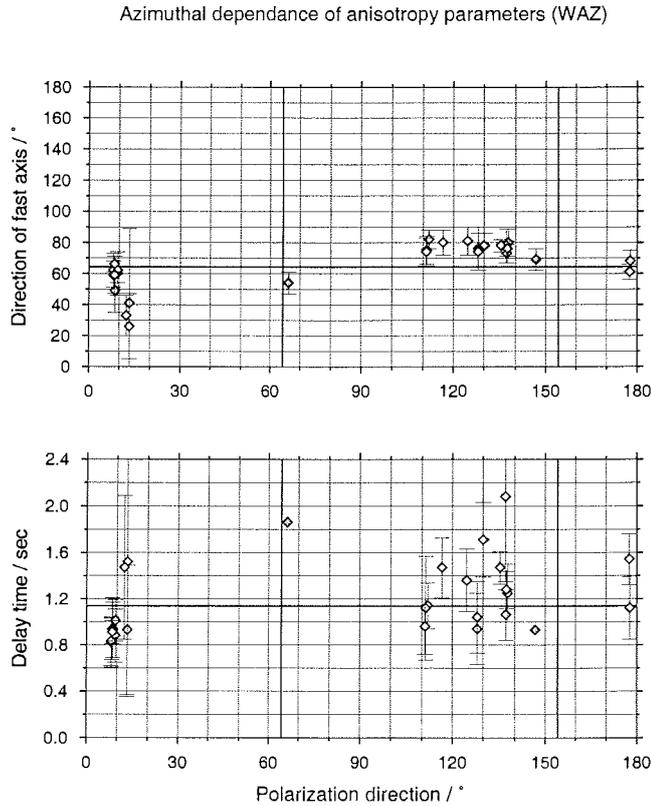


Abbildung 6.18 Ergebnisse der Splitting-Analyse für WAZ in Abhängigkeit der Polarisationsrichtung (BAZ). Die durchgezogenen Linien markieren die mit den relativen Fehlern gewichteten Mittelwerte. Nähere Erläuterungen folgen im Text.

nordwestlichen Richtungen (schnelle Anisotropie-Achse) und einer Laufzeitdifferenz deutlich unterhalb einer Sekunde ($(\phi, \delta t) = (59^\circ, 0.89 \text{ sec})$) und davon abweichend für den Azimutbereich $120^\circ - 140^\circ$ (Indonesien, Japan) mit einer mehr nördlichen Richtung und deutlich größerer Laufzeitdifferenz bei $(\phi, \delta t) = (77^\circ, 1.27 \text{ sec})$ (Abbildung 6.20 links). Zwei Parameterpaare liegen im Bereich der “Null“-Richtungen bei jeweils 156° und 57° . Direkt westlich der Häufung der Werte der Fiji-Tiefherdbeben ($\phi_p \sim 9^\circ$) mit kleinen Fehlerbereichen liegen drei Wertepaare der flachen Tonga-Beben mit deutlich abweichenden Parametern und großen Fehlern.

6. Splitting-Analyse

Station OLY

Die ungewichteten Parametermittel für OLY betragen

- $(\phi, \delta t) = (62^\circ, 1.11 \text{ sec})$ aus dem E_t -Verfahren und
- $(\phi, \delta t) = (66^\circ, 1.17 \text{ sec})$ aus dem Eigenwertverfahren.

#	Datum (yyymmdd)	Phase	Δ (Grad)	BAZ (Grad)	$\phi_{E_t} \pm$ (Grad)	$\delta t_{E_t} \pm$ (Sec)	$\phi_{\lambda_1} \pm$ (Grad)	$\delta t_{\lambda_1} \pm$ (Sec)	Bemerkung
1	920711	SKS	86.7	190.2	61.0 ± 11.0	1.06 ± 0.28	50.0 ± 16.0	1.01 ± 0.27	–
3	921212	SKS	94.2	132.1	68.0 ± 8.0	1.47 ± 0.39	79.0 ± 22.0	1.22 ± 0.47	–
4	921220	SKS	98.0	139.9	67.0 ± 7.0	1.38 ± 0.26	67.0 ± 17.0	1.38 ± 0.36	–
10	931011	PKS	137.0	138.1	58.0 ± 9.0	0.94 ± 0.53	49.0 ± 38.0	1.15 ± 0.99	–
13	940309	SKS	90.6	190.7	60.0 ± 8.0	0.93 ± 0.15	56.0 ± 17.0	0.91 ± 0.16	–
27	950407	SKS	93.1	195.6	57.0	0.91	46.0	0.96	§
28	950413	SKS	95.8	180.0	61.0 ± 6.0	1.30 ± 0.16	53.0 ± 9.0	1.26 ± 0.14	–
29	950513	SKS	93.9	118.7	65.0 ± 8.0	1.33 ± 0.13	51.0 ± 30.0	1.33 ± 0.16	–
34	951029	SKS	87.2	189.3	60.0 ± 9.0	0.94 ± 0.21	60.0 ± 24.0	0.94 ± 0.24	–
35	951105	SKS	92.5	113.4	63.0 ± 14.0	0.96 ± 0.27	57.0 ± 23.0	0.99 ± 0.28	–
37	951210	SKS	87.5	190.5	55.0 ± 11.0	0.85 ± 0.21	58.0 ± 22.0	0.85 ± 0.20	–
41	960602	SKS	84.6	327.8	164.0 ± 7.0	1.97	89.0 ± 9.0	2.61	‡
42	960609	SKS	124.3	151.3	161.3 ± 7.0	0.72 ± 0.47	160.0 ± 7.0	0.78	‡
		SKKS			71.0 ± 6.0	0.94 ± 0.36	70.0 ± 20.0	0.99 ± 0.68	‡
43	960610	SKKS	159.4	201.4	65.0 ± 16.0	1.01 ± 0.37	64.0 ± 25.0	1.01 ± 0.38	–
44	960613	SKS	88.3	190.6	57.0 ± 9.0	0.91 ± 0.21	70.0 ± 37.0	0.88 ± 0.28	–
45	960617	SKS	95.8	132.4	75.0 ± 6.0	1.49 ± 0.21	83.0 ± 15.0	1.44 ± 0.25	–
		SKKS			74.0 ± 5.0	1.55 ± 0.18	82.0 ± 13.0	1.50 ± 0.24	–
46	960626	PKS	133.2	141.6	70.0 ± 13.0	1.30 ± 0.63	61.0 ± 24.0	1.38 ± 0.50	–
47	960706	SKS	128.3	146.9	159.0 ± 7.0	1.44 ± 0.38	172.0 ± 13.0	0.74	‡
		SKKS			65.0 ± 18.0	1.22	63.0 ± 14.0	3.14	‡
48	960720	SKS	88.9	191.2	55.0 ± 9.0	0.64 ± 0.13	39.0 ± 25.0	0.62 ± 0.16	–
49	960802	SKS	98.0	171.2	65.0 ± 2.0	1.39 ± 0.16	65.0 ± 6.0	1.41 ± 0.22	–
		SKKS			59.0 ± 19.0	0.93 ± 0.42	68.0 ± 25.0	1.15 ± 0.54	–
50	960805a	SKS	93.0	195.7	43.0	0.80	74.0	0.58	§
51	960805b	SKS	88.1	190.4	57.0 ± 10.0	0.82 ± 0.22	65.0 ± 13.0	0.82 ± 0.16	–
52	961104	SKS	89.9	293.4	66.0 ± 7.0	1.17 ± 0.17	64.0 ± 23.0	1.17 ± 0.17	–

Tabelle 6.2 Ergebnisse der Splitting-Analyse der Kernphasen für Station OLY. Bemerkungen:

‡ - Kein detektierbares Splitting, † - Marginales Splitting, § - Einfluß quellseitiger Effekte.

Ebenso wie bei WAZ wurden hier die Ergebnisse mit keinem oder marginal detektierbaren Splitting ausgeschlossen. Die Anzahl der so in die Mittelung einfließenden Parameterpaare beträgt somit 19. Die mit den Relativfehlern gewichteten Mittel der Parameterpaare beider Analysemethoden betragen

- $(\phi, \delta t) = (64^\circ, 1.12 \text{ sec})$ aus dem E_t -Verfahren und
- $(\phi, \delta t) = (63^\circ, 1.09 \text{ sec})$ aus dem Eigenwertverfahren.

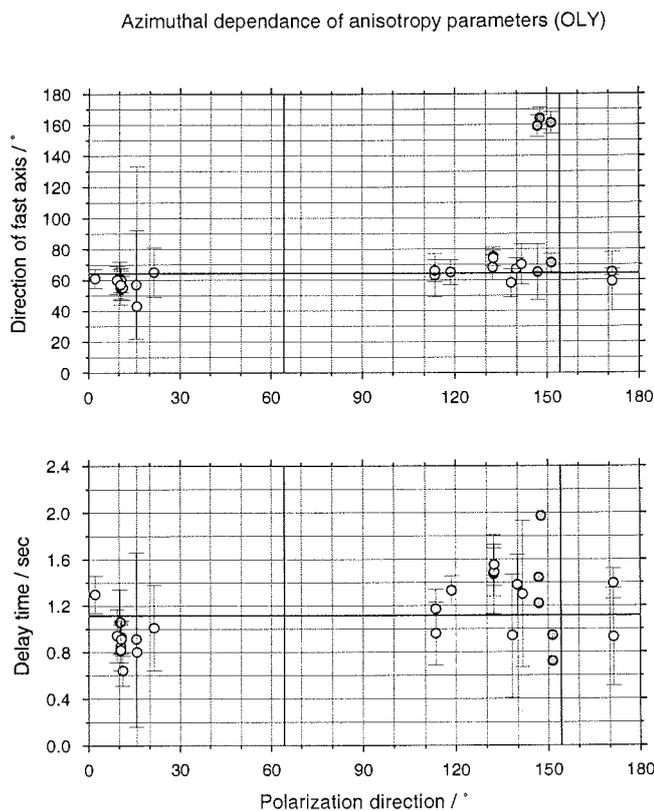


Abbildung 6.19 Ergebnisse der Splitting-Analyse für OLY in Abhängigkeit der Polarisationsrichtung (BAZ). Nähere Erläuterungen folgen im Text.

Ebenso wie bei WAZ lassen sich wiederum Variationen der Parameter für die beiden vorherrschenden Azimutbereiche feststellen. So liegen die gewichteten Mittel der Splitting-Parameter

6. Splitting-Analyse

im Azimutbereich $180^\circ - 200^\circ$ bzw. $0^\circ - 20^\circ$ (Fiji/Tonga/Vanuatu) bei $(\phi, \delta t) = (58^\circ, 0.93 \text{ sec})$ und im Bereich $120^\circ - 140^\circ$ (Indonesien, Japan) bei $(\phi, \delta t) = (69^\circ, 1.34 \text{ sec})$. Insgesamt fünf Parameterpaare mit keinem oder marginalem Splitting finden sich im Azimutbereich $147^\circ - 152^\circ$, also knapp neben der aus der Mittelung vermuteten "Null"-Richtung. Wie zu erwarten, springen hier die Richtungsergebnisse um 90° , da die Analysen zwischen schneller und langsamer Richtung instabil sind. Die entsprechenden Laufzeitdifferenzen sind mit $\rightarrow \infty$ gehenden Fehlern behaftet und damit ohne Aussagekraft.

Station OBS / GVN

Für GVN liegt nur ein verwertbares Ereignis vor und für OBS drei. Die Ergebnisse sollen hier gemeinsam diskutiert werden, da beide Stationen nur 8 km voneinander entfernt liegen. Abbildung 6.20 zeigt die azimutale Abhängigkeit der ermittelten Parameter. Obwohl die Fehlerspannen relativ klein sind, sind die Messungen völlig inkonsistent. Trotz der guten Qualität der Seismogramme (Anhang B.4) liefern selbst die drei etwa gleichen Azimute ($\phi_p \sim 9^\circ$) völlig

#	Datum (yyymmdd)	Phase	Δ (Grad)	BAZ (Grad)	$\phi_{E_t} \pm$ (Grad)	$\delta t_{E_t} \pm$ (Sec)	$\phi_{\lambda_1} \pm$ (Grad)	$\delta t_{\lambda_1} \pm$ (Sec)	Bemerkung
1	920711	SKS	87.4	189.0	137.0 ± 15.0	1.36 ± 0.30	120.0 ± 31.0	1.49 ± 0.33	GVN
34	951029	SKS	87.8	188.0	135.0 ± 9.0	1.04 ± 0.26	89.0 ± 29.0	0.93 ± 0.37	OBS
37	951210	SKS	88.2	189.2	63.0 ± 8.0	2.18 ± 0.34	88.0 ± 25.0	2.22 ± 0.28	OBS
39	951225	SKS	98.1	137.3	102.0 ± 16.0	2.99 ± 0.42	82.0 ± 16.0	1.31 ± 0.20	OBS

Tabelle 6.3 Ergebnisse der Splitting-Analyse der Kernphasen für Station GVN / OBS.

voneinander abweichende Ergebnisse. Ebenso liefert die Anwendung der beiden verschiedenen Methoden für die Einzelanalysen nicht konsistente Werte. An den Seismogrammen selbst ist auffällig, daß die Z-Komponente jeweils einen relativ großen Energieanteil aufweist. Es ist nicht ganz klar, wie die Übertragung von steil auftauchenden Scherwellen durch das System Kruste-Wasser-Schelfeis funktioniert. Die großen Wellenlängen der S-Wellen lassen eine Einkopplung über das auf den nahegelegenen Eis-Rücken (Abbildung 5.1) aufliegende Schelfeis vermuten. Dieses System bewirkt jedoch eine Veränderung der Wellenformen, die deren Analyse bezüglich seismischer Anisotropie unmöglich macht.

6.2 Kernphasen (SKS, SKKS, PKS)

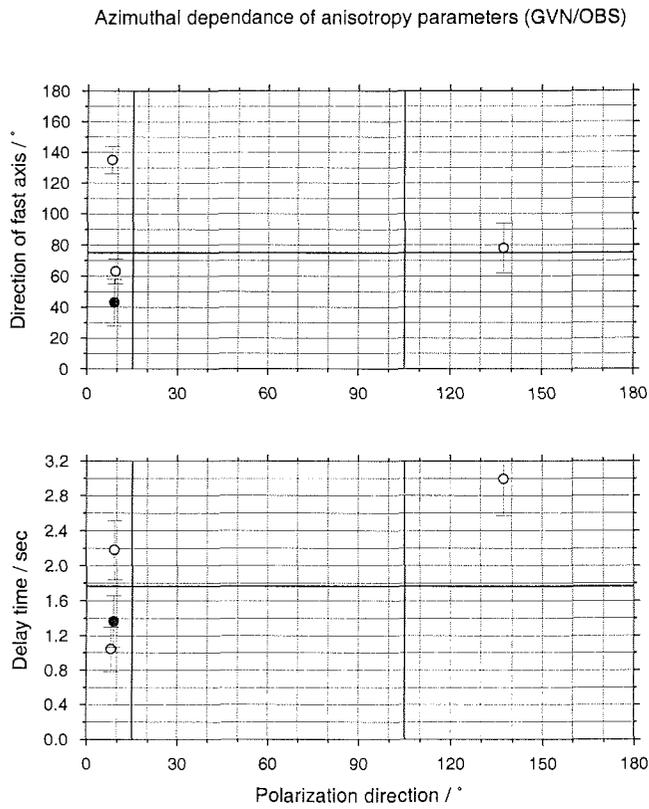


Abbildung 6.20 Ergebnisse der Splitting-Analyse der Kernphasen für die Stationen GVN und OBS. Das von GVN analysierte Parameterpaar ist schwarz hervorgehoben.

6.3 S- und ScS-Phasen

Um die azimutale Überdeckung der Polarisationsrichtungen zu verbessern, wurden zusätzlich einige ausgewählte S- und ScS-Phasen in die Analysen mit einbezogen. Wie bereits erwähnt, weisen diese den Nachteil auf, daß quellseitige Anisotropie die Analyseergebnisse verfälschen kann. Um diesen Nachteil zu vermeiden, wurden nur ausgewählte Phasen von Erdbeben mit mittleren bis tiefen Epizentren und hohem S/N-Verhältnis ausgewählt (Kaneshima & Silver, 1992; Fisher & Yang, 1994; Russo & Silver, 1994). Ein weiterer Nachteil dieser Phasen gegenüber SKS- und anderen Kernphasen ist, daß die initiale Polarisationsrichtung nicht a priori bekannt ist. Die Kenntnis der Polarisationsrichtung ist jedoch ein wesentlicher Punkt bei der Analyse der Phasen, da gerade eine mögliche azimutale Abhängigkeit der Splitting-Parameter untersucht

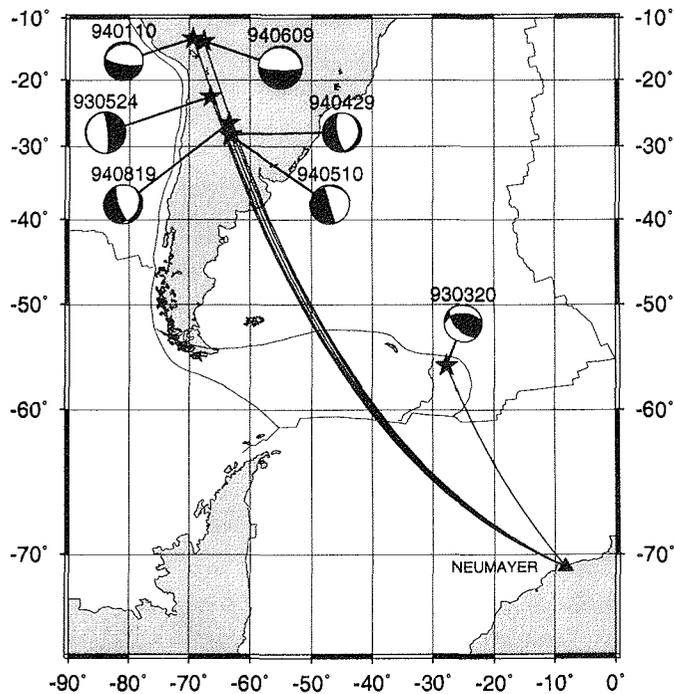


Abbildung 6.21 Epizentren und Herdflächenlösungen (Harvard Centroid Moment Tensor Solutions) der Beben, deren S- bzw. ScS-Phasen zur Splitting-Analyse verwendet wurden.

werden soll. Mit Einschränkungen lassen sich die Polarisationsrichtungen jedoch aus den Herdflächenlösungen bzw. den Wellenformen selbst ableiten. Ein Vorteil der Verwendung dieser Phasen ist, daß die Polarisationsrichtung vom BAZ und damit von der vorgegebenen Verteilung der Hauptbebengebiete unabhängig ist. Die Vorgehensweise wird im folgenden Abschnitt dargestellt und daran anschließend zwei Analysebeispiele für jeweils eine S- und ScS-Registrierung der Station OLY des Ereignisses 940510 dargestellt. Es wurden sieben Ereignisse verwendet, wobei insgesamt 17 Phasen analysiert wurden, davon neun für WAZ und acht für OLY. Die Epizentren liegen mit einer Ausnahme eines Bebens der Süd Sandwich Inseln in Südamerika (Abbildung 6.21). Besonders interessant war hier eine Folge von Tiefherdbeben in der Santiago del Estero Provinz, Argentinien (940429, 940510 und 940819, Tabelle 6.4) mit jeweils ähnlichen Herdmechanismen. An allen drei Ereignissen wurden deutliche S- und ScS-Phasen registriert und analysiert, bei ersteren beiden Ereignissen an beiden Stationen (WAZ und OLY). Die analysierten Seismogramme sind zusammen mit den Analyseergebnissen in Anhang C.1 (WAZ) und C.2 (OLY) zusammengestellt.

6.3.1 Ableitung der initialen Polarisationsrichtungen

Die Polarisationsrichtungen der an den Stationen auftauchenden S- und ScS-Wellen wurden aus den Wellenformen selbst sowie zur Kontrolle aus den verfügbaren Herdflächenlösungen bestimmt. Bei ersterem Verfahren wurden die Splitting-Parameter durch Anwendung der Eigenwertmethode bestimmt, die Wellenformen korrigiert und die Richtung der nunmehr linearen Polarisation (entsprechend vor dem Durchlauf der Welle durch die stationsseitig anisotrope Region) im NS/EW-Koordinatensystem bestimmt.

Die Herdflächenlösungen wurden den Harvard Centroid Moment Tensor Solutions (Bulletins of the International Seismological Centre, 1993, 1994) entnommen. Aus den Herdflächenparametern (Streichrichtung ϕ_s , Neigung δ der Bruchfläche und der Verschiebungsrichtung λ) läßt sich für eine vorgegebene Epizentrum-/Stationsgeometrie und ein vorgegebenes Erdmodell die theoretischen Amplituden der SV- und SH-Komponenten auf der Stationsseite bestimmen. Hierzu wurde das Programm SPHERAY 6v0 (Nataf, 1991) verwendet. Das Programm berechnet basierend auf der geometrischen Strahlentheorie für ein isotropes, sphärisches Erdmodell (hier: IAS-PEI91) Laufzeiten und Amplituden für verschiedene Phasen. Aufgrund der Doppeldeutigkeit der Herdparameterbestimmungen (Aki & Richards, 1980) erfolgten die Amplitudenbestimmungen für beide mögliche Herdflächen (NP1 und NP2). Die Polarisationsrichtung ergibt sich aus dem Verhältnis der Amplituden der SH- und SV-Komponenten zusammen mit dem Rückazimut des Bebens. In Tabelle 6.4 sind die Herdparameter der verwendeten Erdbeben aufgelistet.

6. Splitting-Analyse

#	Datum	Lat/°	Long/°	NP1			NP2			Tiefe / km
				$\phi_s/^\circ$	$\delta/^\circ$	$\lambda/^\circ$	$\phi_s/^\circ$	$\delta/^\circ$	$\lambda/^\circ$	
6	930320	-56.084	-27.803	268.0	46.0	53.0	134.0	55.0	122.0	116.0
7	930524	-22.630	-66.540	355.0	82.0	-90.0	175.0	8.0	-90.0	221.0
11	940110	-13.310	-69.387	253.0	15.0	-116.0	99.0	77.0	-83.0	589.0
14	940429	-28.299	-63.252	18.0	21.0	-63.0	170.0	72.0	-100.0	562.0
15	940510	-28.501	-63.096	256.0	10.0	-177.0	164.0	90.0	-80.0	601.0
17	940609	-13.840	-67.550	302.0	10.0	-60.0	92.0	81.0	-95.0	631.0
24	940819	-26.642	-63.421	26.0	24.0	-46.0	159.0	73.0	-107.0	564.0

Tabelle 6.4 Herdparameter der für die Analyse von S und ScS verwendeten Beben.

6.3.2 Bestimmung der Splitting-Parameter am Beispiel der S- und ScS-Phasen des Bebens 940510

Anhand der an OLY registrierten S- und ScS-Phasen des Bebens 940510 / Santiago del Estero Prov., Argentinien sollen die Splitting-Analysen und die Bestimmung der Polarisationsrichtungen veranschaulicht werden. Abbildung 6.22 zeigt die entsprechende Registrierung mit den nach IASPEI91 markierten S- und ScS-Phasen und die zur Analyse gekennzeichneten Zeitfenster.

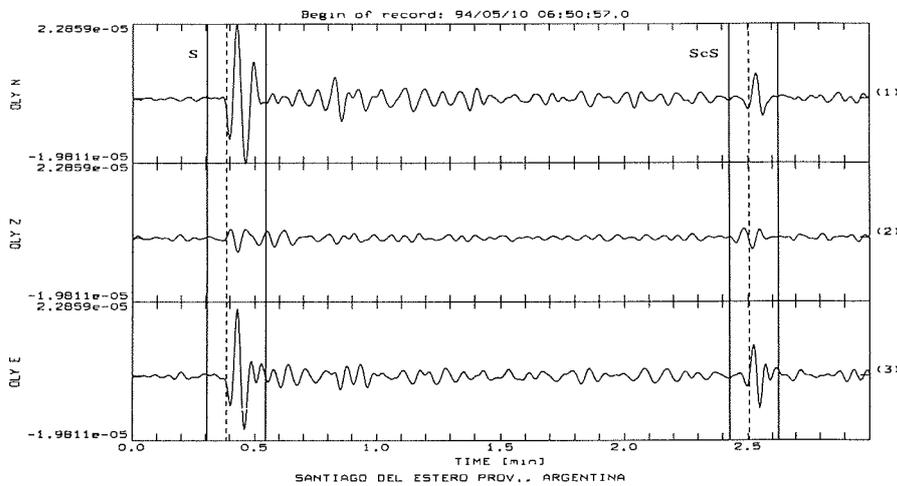


Abbildung 6.22 NS-, Vertikal- und EW-Komponente des Ereignisses 940510 / Santiago del Estero Provinz, Argentinien, registriert an OLY. Dargestellt sind die S- und ScS-Wellen enthaltenden Zeitfenster.

S-Phase

Die Analyse der direkten S-Welle nach der Eigenwertmethode liefert eine "Null"-Messung mit den Anisotropie-Parametern (133° , 2.46 sec). Den zugehörigen Konturlinienplot zeigt Abbildung 6.24 (oben links). Aus der Teilchenbewegung des mit diesen Parametern korrigierten Seismogramms läßt sich die initiale Polarisationsrichtung im NS/EW-Koordinatensystem ablesen (Abbildung 6.23) und liefert damit die Richtung von 55° (ϕ_{obs}). Diese weicht von den aus den beiden möglichen Herdflächenlösungen NP1 und NP2 bestimmten Polarisationsrichtungen mit 27° und 31° relativ stark ab. Die Kenntnis der so bestimmten Polarisationsrichtungen ermöglicht die Anwendung des zweiten Verfahrens (im Gegensatz zur bisher minimierten T-Komponente wird jetzt die SH-Komponente verwendet). Abbildung 6.24 (oben rechts und unten) zeigt die Ergebnisse dieses Verfahrens für die drei vorgegebenen Richtungen. Alle drei Analysen liefern qualitativ das gleiche Ergebnis ("Null"-Messungen), sind aber unsicher in der vorgegebenen Polarisationsrichtung. Im allgemeinen wurden die aus ϕ_{obs} erhaltenen Richtungen akzeptiert, da diese die aus der Eigenwertmethode erhaltenen Ergebnisse gut reproduzieren und über die Güte der Herdparameterbestimmungen Unklarheit herrscht.

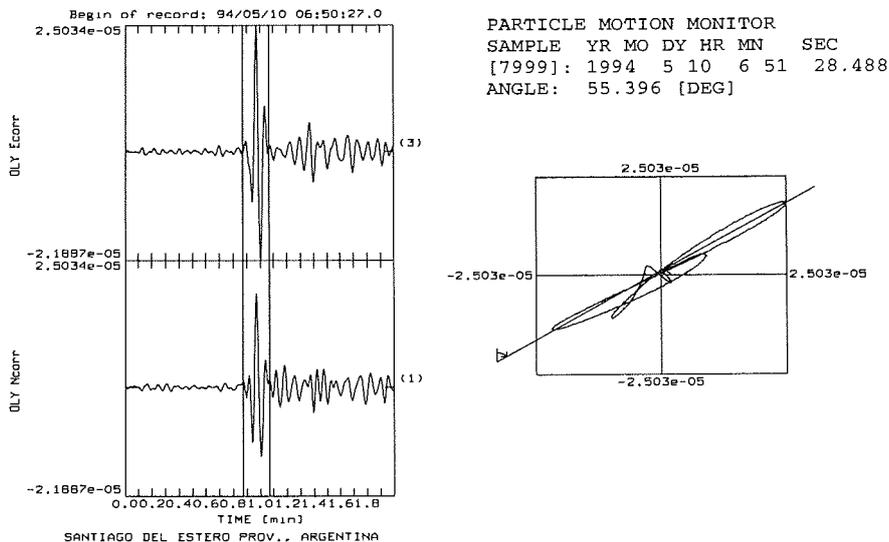


Abbildung 6.23 Teilchenbewegung der S-Welle in korrigierten NS- und EW-Koordinaten.

6. Splitting-Analyse

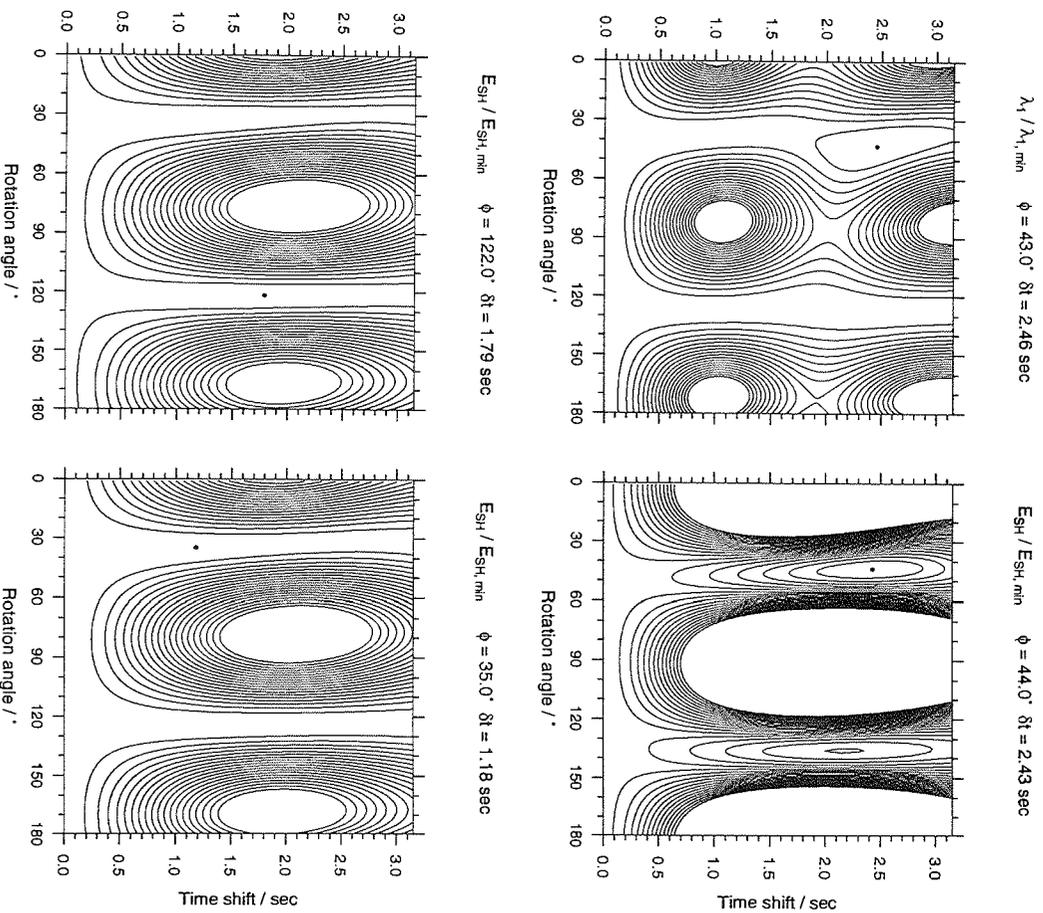


Abbildung 6.24 Ergebnisse der Analyseverfahren für verschiedene Polarisationsrichtungen. Oben links: Splitting-Analyse nach dem Eigenwertverfahren. Oben rechts: Bestimmung von E_{SH} nach der aus der Korrektur der Seismogramme erhaltenen Polarisationsrichtung $\phi_{\text{obs}} = 55^\circ$. Unten links: E_{SH} für $\phi_{NP1} = 27^\circ$. Unten rechts: E_{SH} für $\phi_{NP2} = 31^\circ$.

ScS-Phase

Die entsprechende Analyse der ScS-Phase desselben Ereignisses führt zu eindeutigeren Ergebnissen. Die Anwendung der Eigenwertmethode liefert die Splitting-Parameter (146° , 1.01 sec) (Abbildung 6.26, oben links) und aus den damit korrigierten Seismogrammen eine Polarisationsrichtung von 19° (Abbildung 6.25). In diesem Fall ist der Vergleich mit den aus den Herdflächenlösungen bestimmten Richtungen eindeutig und ist $\phi_{NP1} = 24^\circ$ und $\phi_{NP2} = 23^\circ$ akzeptabel. Die Minimierung der entsprechenden SH-Komponenten (Abbildung 6.26, oben rechts und unten) führt auf jeweils fast äquivalente Ergebnisse.

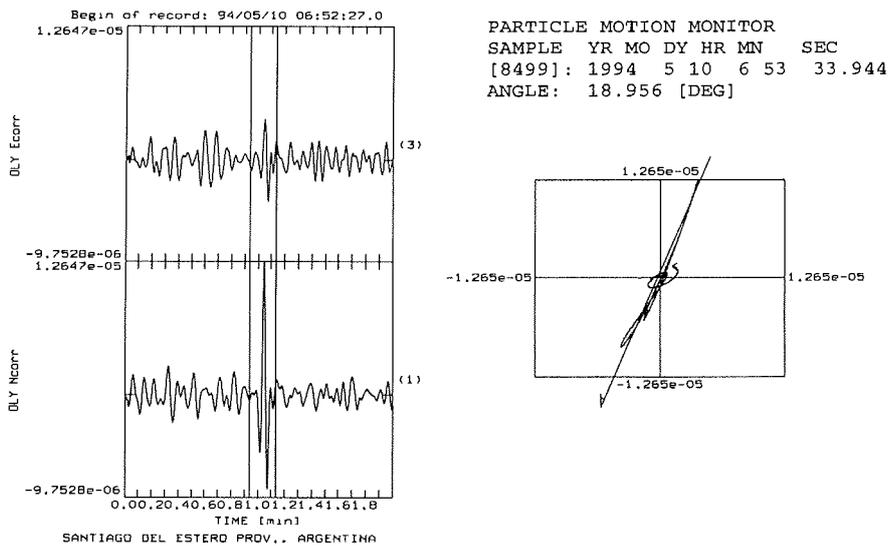
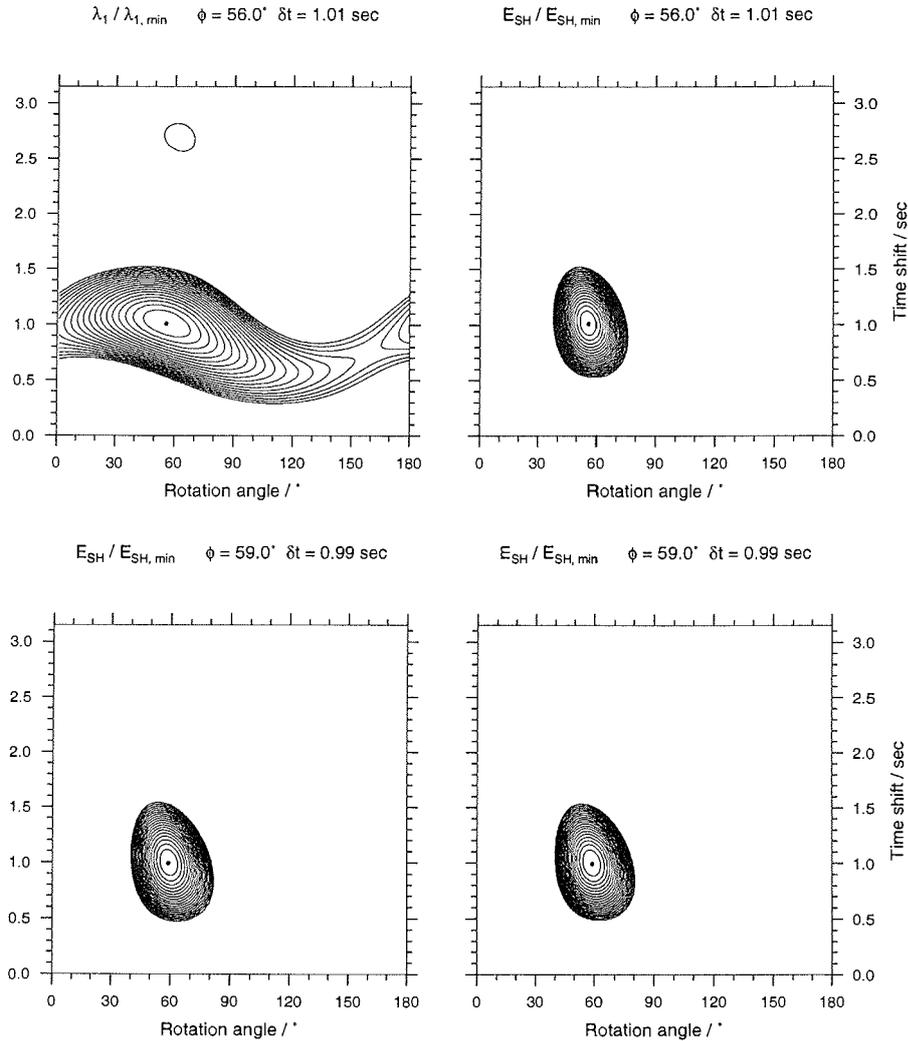


Abbildung 6.25 Teilchenbewegung der ScS-Welle in korrigierten NS- und EW-Koordinaten.

6. Splitting-Analyse



OLY 940510 ScS Santiago del Estero Prov., Argentina

$\phi_{obs} = 19^\circ \quad \phi_{NP1} = 24^\circ \quad \phi_{NP2} = 23^\circ \quad i_0 = 12^\circ \quad \text{Herdtiefe} = 601 \text{ km}$

Abbildung 6.26 Ergebnisse der Analyseverfahren für verschiedene Polarisationsrichtungen. Oben links: Splitting-Analyse nach dem Eigenwertverfahren. Oben rechts: Bestimmung von E_{SH} nach der aus der Korrektur der Seismogramme erhaltenen Polarisationsrichtung $\phi_{obs} = 19^\circ$. Unten links: E_{SH} für $\phi_{NP1} = 24^\circ$. Unten rechts: E_{SH} für $\phi_{NP2} = 23^\circ$.

6.3.3 Ergebnisse der S- und ScS-Analysen

Die Tabellen 6.5 und 6.6 stellen die Ergebnisse der Einzelanalysen für die Stationen WAZ und OLY zusammen. Aufgeführt sind die laufenden Nummern und das Datum der verwendeten Ereignisse nach Anhang A, der Typ der untersuchten Phase, die drei aus der Wellenform und den Herdflächenlösungen abgeleiteten Polarisationsrichtungen, Auftauchwinkel sowie die Ergebnisse der Splitting-Analysen. Zur Anwendung der SH-Minimierung wurde ausschließlich ϕ_{obs} verwendet.

Der Vergleich der Einzelmessungen der Kernphasen an OLY und WAZ lieferte durchgehend konsistente Ergebnisse. Ein anderes Bild ergibt sich im Falle der direkten S-Welle. Fünf der sieben

#	Datum (yymmdd)	Phase	ϕ_{obs} (Grad)	ϕ_{NP1} (Grad)	ϕ_{NP2} (Grad)	i_o (Grad)	$\phi_{\lambda_1} \pm$ (Grad)	$\delta t_{\lambda_1} \pm$ (Sec)	$\phi_{ESH} \pm$ (Grad)	$\delta t_{ESH} \pm$ (Sec)
6	930320	ScS	24.0	32.0	0.0	5.1	146.0 ± 18.0	0.74 ± 0.18	146.0 ± 9.0	0.74 ± 0.12
7	930524	S	140.0	4.0	130.0	23.0	143.0 ± 9.0	3.15	54.0 ± 5.0	1.63
14	940429	S	53.0	43.0	38.0	23.7	3.0 ± 21.0	0.72 ± 0.20	2.0 ± 11.0	0.72 ± 0.20
		ScS	40.0	45.0	169.0	12.4	159.0 ± 16.0	1.52 ± 0.19	160.0 ± 5.0	1.52 ± 0.15
15	940510	S	61.0	24.0	29.0	23.6	137.0 ± 9.0	2.06 ± 0.34	137.0 ± 3.0	2.06 ± 0.30
		ScS	14.0	20.0	19.0	12.4	139.0 ± 20.0	1.20 ± 0.34	142.0 ± 12.0	1.17 ± 0.31
17	940609	S	63.0	48.0	64.0	20.5	159.0 ± 7.0	2.10	157.0 ± 4.0	2.24
24	940819	S	47.0	46.0	23.0	23.3	26.0 ± 16.0	0.78 ± 0.39	30.0 ± 6.0	0.86 ± 0.20
		ScS	66.0	41.0	6.0	12.4	172.0 ± 12.0	1.55 ± 0.32	171.0 ± 4.0	1.54 ± 0.17

Tabelle 6.5 Ergebnisse der Analysen von S und ScS für WAZ.

#	Datum (yymmdd)	Phase	ϕ_{obs} (Grad)	ϕ_{NP1} (Grad)	ϕ_{NP2} (Grad)	i_o (Grad)	$\phi_{\lambda_1} \pm$ (Grad)	$\delta t_{\lambda_1} \pm$ (Sec)	$\phi_{ESH} \pm$ (Grad)	$\delta t_{ESH} \pm$ (Sec)
6	930320	ScS	17.0	39.0	8.0	5.1	131.0 ± 20.0	1.42 ± 0.23	135.0 ± 6.0	1.41 ± 0.22
7	930524	S	142.0	0.0	131.0	23.0	110.0 ± 19.0	0.61 ± 0.13	110.0 ± 6.0	0.61 ± 0.08
11	940110	S	73.0	25.0	48.0	20.4	127.0 ± 30.0	0.43 ± 0.20	126.0 ± 18.0	0.43 ± 0.15
14	940429	S	75.0	47.0	40.0	23.8	162.0 ± 3.0	2.00	162.0 ± 2.0	2.00
		ScS	60.0	48.0	174.0	12.3	172.0 ± 41.0	0.77	169.0 ± 8.0	0.83 ± 0.22
15	940510	S	55.0	27.0	31.0	23.8	133.0 ± 14.0	2.46 ± 0.79	134.0 ± 5.0	2.43 ± 0.53
		ScS	19.0	24.0	23.0	12.3	146.0 ± 13.0	1.01 ± 0.11	146.0 ± 4.0	1.01 ± 0.11
17	940609	S	60.0	50.0	64.0	20.6	109.0 ± 28.0	0.54 ± 0.17	101.0 ± 14.0	0.54 ± 0.14

Tabelle 6.6 Ergebnisse der Analysen von S und ScS für OLY.

untersuchten Ereignisse sind an beiden Stationen gleichzeitig registriert worden. Die Analysen der ScS-Phasen führen an beiden Stationen ebenfalls auf vergleichbare Ergebnisse, jedoch treten bei der direkten S-Phase zum Teil erhebliche Abweichungen auf. Drei der Ereignisse (930524, 940429, 940609) lieferten für jeweils eine Station klar identifizierbares Splitting und für die andere jeweils ein "Null"-Ergebnis (Anhang C.1 und C.2). Eine mögliche Erklärung für diese Diskrepanzen wäre der zu flache Auftauchwinkel ($i_0 > 20^\circ$) der Wellen, da damit die Voraussetzung des senkrechten Durchlaufs einer Schicht azimuthaler Anisotropie nicht mehr erfüllt ist. Unverständlich bleibt trotzdem, warum die Analysen dieser gut registrierten Wellen zu solchen gravierenden Unterschieden an beiden Stationen führen, da Auftauchwinkel und Azimute bei den gegebenen Herdentfernungen nur geringfügig voneinander abweichen. Eine technische Ursache auf der Stationsseite kann ausgeschlossen werden, da aus diesem Zeitraum gleichzeitig an beiden Stationen auch SKS-Phasen registriert wurden (z.B. 940309), deren Analysen zu gut übereinstimmenden Ergebnissen führten. Eine mögliche Erklärung bietet eine kompliziertere, lokal unterschiedliche Anisotropie-Struktur, die bei der Verwendung steiler Phasen versteckt bleibt. Ursachen quellseitiger Anisotropie können ausgeschlossen werden, da diese an beiden Stationen den gleichen Effekt aufweisen würden.

Ein Vergleich der Analyseergebnisse der ScS-Phasen beider Stationen liefert eine bessere Konsistenz, ist aber wie im Fall des Ereignisses 940429 nicht sehr überzeugend. Ein weiteres Beispiel ist die Analyse der ScS-Phasen des Süd-Sandwich-Bebens (930320). In der der Anisotropie-Richtung stimmen die Ergebnisse mit einer Differenz von 10° etwa überein. Die Laufzeitdifferenzen mit $\delta t = 0.74 \text{ sec}$ für WAZ (Anhang C.1) und $\delta t = 1.41 \text{ sec}$ für OLY (Anhang C.10) weichen jedoch erheblich voneinander ab. Auch die Muster der Konturlinienplots weisen deutlich voneinander unterschiedliche Formen auf. Diese Tatsache widerspricht wiederum einem möglichen Zusammenhang mit dem Auftauchwinkel der Phase als alleiniger Ursache. Vermutet werden kann nur ein Zusammenhang mit den Auftauchwinkeln und Polarisationsrichtungen, die eine komplizierte Struktur widerspiegeln, die bei der Analyse der Kernphasen in den beschränkten Azimutbereichen maskiert blieben. Eine schlechte Qualität der Daten sollte hier nicht in Frage kommen, da ausschließlich Registrierungen unter besten Bedingungen verwendet wurden.

Phasen mit inkonsistenten Splitting-Ergebnissen wurden in der im nächsten Kapitel weiterführenden Untersuchung nicht mit berücksichtigt.

7. Scherwellensplitting an Palmer und South Pole Station

Zusätzlich zu den Splitting-Analysen an den Stationen des Neumayer Netzwerkes wurden auch Wellenformen der Stationen Palmer (PMSA) und Südpol bzw. Amundsen-Scott (SPA) auf Scherwellen-Splitting untersucht. Beide Stationen gehören zum GSN (Global Seismograph Network). In die Auswahl gezogen wurden Beben mit einer Herdentfernung $> 85^\circ$ und Magnitude $mb > 6.0$. Die entsprechenden Registrierungen wurden über ftp vom IRIS-DMC (Incorporated Research Institutions for Seismology-Data Management Center) als FARM-Produkte (Fast Archive Recovery Method, Ahern, 1994) bezogen. Die Datensätze als 20 – Hz–Datenstrom liegen im SEED-Format (Standard for the Exchange of Earthquake Data) vor, das auch von PITSA gelesen werden kann. Leider konnten für beide Stationen nicht viele für die Splitting-Analyse geeignete Wellenformen gefunden werden. Dieses Problem lag einerseits an häufigen Stationsausfällen und einem schlechten S/N-Verhältnis an beiden Stationen (IRIS-DMC Data Problem Reports) und andererseits an Problemen mit dem "seed2pitsa"- Konvertierungsprogramm zur Umwandlung der SEED-Datensätze in das PITSA-lesbare ISAM-Format. So konnten etwa nur 60% der erhaltenen Datensätze erfolgreich konvertiert werden. Nach verwertbaren Daten wurden Registrierungen der Jahre 1993 und 1994 untersucht. Insgesamt wurden so aufgrund der erwähnten Einschränkungen für PMSA nur vier zur Analyse einigermaßen brauchbare SKS- und für SPA je eine SKS- und SKKS-Phasen gefunden. Die Datenaufbereitung und Analyse der gefundenen SKS- bzw. SKKS-Wellenformen erfolgte in gleicher Weise wie an den Registrierungen der Stationen des Neumayer Netzwerkes. Aufgrund der S/N-Verhältnisse wurden hier jedoch die Seismogramme mit einem Bandpass-Filter mit unterer Filterflanke bei 15 sec Periode gefiltert.

7.1 Palmer Station (PMSA)

Palmer ist eine vom United States Antarctic Program ganzjährig betriebene Station auf Anvers Island an der Westküste der Antarktischen Halbinsel. Die Seismometerstation mit der interna-

7. Scherwellensplitting an Palmer und South Pole Station

tionalen Kennung PMSA wird seit März 1993 vom Albuquerque Seismic Laboratory an der Palmer Station betrieben (Sandoval & Holcomb, 1993). Die folgenden Informationen zu PMSA entstammen der WWW-Seite <http://www.iris.washington.edu/FDSN/IU/PMSA/pmsa.html>. Die geographische Lage der Station ist

$$64^{\circ} 46' 29'' S \quad 64^{\circ} 2' 53'' W$$

auf einer Höhe von 10 m. Das Seismometer ist ein Streckseisen STS-1/VBB 3-Komponenten-System, und die Datenerfassung erfolgt über eine Quanterra Q-680 Apparatur. Die Seismometer-Hütte steht auf Fels (Tonalit). Aufgrund der Wind- und Brandungsbedingungen sind die S/N-Verhältnisse ungünstig.

Die Tabelle 7.1 zeigt die Ergebnisse der Splitting-Analyse der vier verwendeten Ereignisse. Die untersuchten Seismogramme sowie die Ergebnisse der Splitting-Analysen finden sich in Anhang B.5, die Herdparameter in Anhang A.

#	Datum (yyymmdd)	Phase	Δ (Grad)	BAZ (Grad)	$\phi_{E_t} \pm$ (Grad)	$\delta t_{E_t} \pm$ (Grad)	$\phi_{\lambda_1} \pm$ (Sec)	$\delta t_{\lambda_1} \pm$ (Sec)	Bemerkung
8	930808	SKS	124.6	214.8	85.0 ± 13.0	2.14 ± 0.55	73.0 ± 20.0	2.06 ± 0.42	-
12	940117	SKS	107.4	315.0	102.0 ± 13.0	2.11 ± 0.67	89.0 ± 20.0	1.86 ± 0.58	-
21	940713	SKS	107.4	192.3	76.0 ± 12.0	1.73 ± 0.53	63.0 ± 12.0	1.47 ± 0.53	-
26	941210	SKS	87.5	324.8	77.0 ± 15.0	1.42 ± 0.70	81.0 ± 35.0	1.25 ± 0.85	-

Tabelle 7.1 Ergebnisse der Splitting-Analyse der Kernphasen für Station PMSA.

Die Splitting-Parameter der Einzelmessungen streuen erheblich, sowohl in den Richtungen als auch in den Laufzeitdifferenzen. Ebenso weichen die Ergebnisse der beiden Verfahren deutlich voneinander ab. Die Ursache kann an dem relativ hohen Rauschpegel als auch an komplizierteren Strukturen im oberen Mantel liegen. Die gewichteten Mittel aus den vier Messungen liegen bei

- $(\phi, \delta t) = (85^{\circ}, 1.86 \text{ sec})$ aus dem E_t -Verfahren und
- $(\phi, \delta t) = (74^{\circ}, 1.66 \text{ sec})$ aus dem Eigenwertverfahren.

Mit einem mittleren Wert von 1.76 sec ist die Stärke der Anisotropie an PMSA relativ groß.

7.2 South Pole Station (SPA)

Seit 1977 wird an der Südpol-Station Amundsen-Scott die GSN-Station SPA ebenfalls durch das Albuquerque Seismic Laboratory betrieben. Folgende Angaben über SPA sind der WWW-Seite <http://www.iris.washington.edu/FDSN/IU/SPA/spa.html> entnommen. Die geographische Lage der Station ist

$$89^{\circ} 58' 56'' S \quad 0^{\circ} 0' 0'' W$$

auf einer Höhe von 2927 m auf dem ostantarktischen Eisschild. Bei dem Seismometer handelt es sich ebenfalls um ein Streckseisen STS-1/VBB 3-Komponenten-System und die Datenerfassung erfolgt über das System Martin Marietta EDME. Die Seismometerhütte ist ein sich im Eis befindliches Holzgebäude. Die Seismometer sind über Holzbalken von der Hütte getrennt im Eis gegründet. Aufgrund der Eisbewegungen müssen die Seismometer wöchentlich neu ausgerichtet werden. Als Folge hat SPA einen hohen Rauschpegel. In dieser Konfiguration wird SPA seit November 1991 betrieben.

In dem untersuchten Zeitraum wurden nur zwei zur Splitting-Analyse verwertbare Wellenformen (eine SKS- und eine SKKS-Phase) gefunden. Die Ergebnisse zeigt die Tabelle 7.2 und die Seismogramme und zugehörigen Analyse-Ergebnisse finden sich im Anhang B.6. Die SKS-Phase des Ereignisses 940606 liefert deutliche Anzeichen für Anisotropie, während es sich bei dem zweiten Ereignis um eine "Null"-Messung handelt. Die Anisotropie-Richtung des ersten Events liegt bei 69° bzw. 87° für beide Analyse-Methoden. Beide Ergebnisse weichen deutlich voneinander ab. Das Ergebnis des Eigenwertverfahrens ist jedoch auch mit einem großen Fehler behaftet. Die Polarisationsrichtung der die "Null"-Messung liefernden Welle sollte die gleiche Richtung bzw. senkrecht zu der aus der ersten Analyse erhaltenen haben. Mit einem BAZ von 118.7° existiert zu dieser Richtung jedoch eine deutliche Abweichung.

#	Datum (yyymmdd)	Phase	Δ (Grad)	BAZ (Grad)	$\phi_{E_i} \pm$ (Grad)	$\delta t_{E_i} \pm$ (Grad)	$\phi_{\lambda_1} \pm$ (Sec)	$\delta t_{\lambda_1} \pm$ (Sec)	Bemerkung
16	940606	SKS	93.0	283.9	69.0 ± 25.0	1.02 ± 0.53	87.0	1.33	-
25	940916	SKKS	112.5	118.7	125.0 ± 5.0	3.01	127.0 ± 8.0	2.72	‡

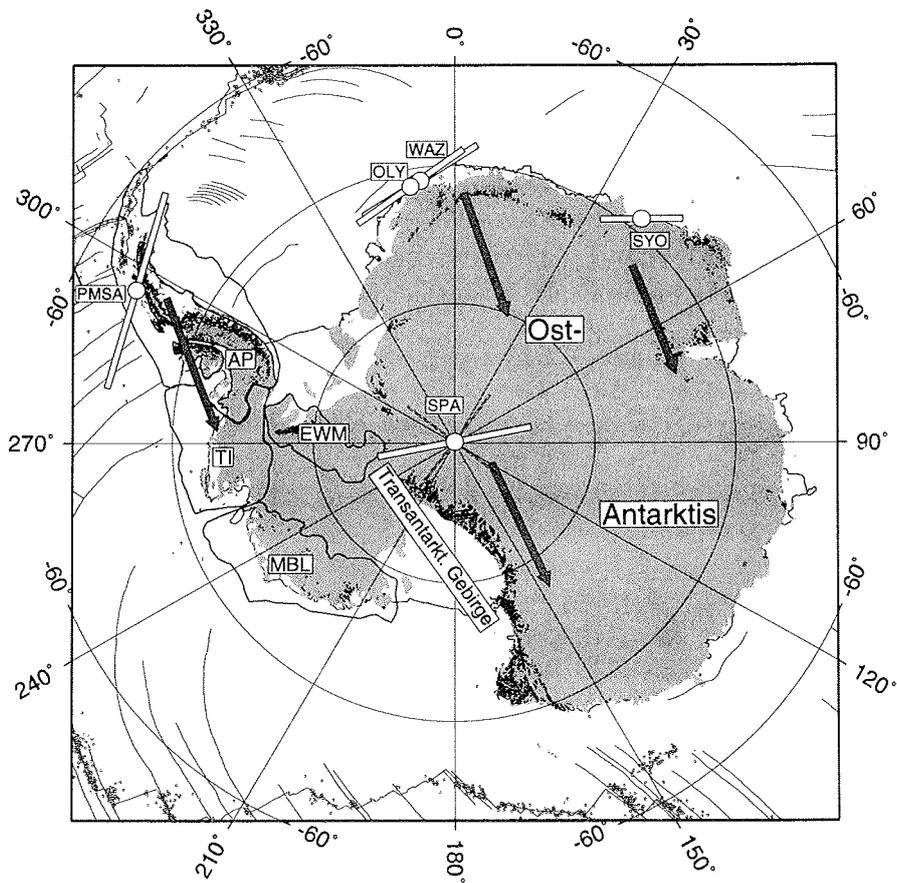
Tabelle 7.2 Ergebnisse der Splitting-Analyse der Kernphasen für Station SPA. Bemerkungen: ‡
- Kein detektierbares Splitting.

8. Diskussion

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Splitting-Analysen für die jeweiligen Stationen diskutiert werden. Dabei wird versucht, diese unter tektonisch-geodynamischen Gesichtspunkten in die Gegebenheiten der einzelnen Regionen einzuordnen. Den größten Anteil nimmt dabei die Diskussion der Parameter der Stationen WAZ und OLY ein, da hier der vorliegende Datensatz am größten und damit auch am zuverlässigsten ist. Die Ergebnisse an diesen Stationen sind auch insofern von besonderem Interesse, als sie Einblicke in die Sub-Moho-Bereiche dieser Region liefern, die als Ergänzung zu den bisher existierenden geophysikalischen Datensätzen einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der tektonischen Entwicklung dieser Region liefern sollen.

An allen untersuchten Stationen sind deutliche Anzeichen für das Vorhandensein seismischer Anisotropie aus den Splitting-Analysen ableitbar. Abbildung 8.1 zeigt im Überblick die gemittelten Ergebnisse für die Richtungen der schnellen Anisotropie-Achsen und Laufzeitdifferenzen für die Stationen Neumayer (OLY und WAZ), Palmer Station (PMSA) und South Pole Station (SPA). Mit aufgenommen sind die Parameter für die japanische Syowa Station (SYO) nach der Arbeit von Kubo *et al.* (1995). Alle fünf Stationen weisen eine Magnitude der Anisotropie (δt) auf, die im Bereich der im weltweiten Mittel für kontinentale Anisotropie nachgewiesenen Werte liegt (Silver, 1996). Diese reichen von 0.7 *sec* für SYO bis zu einem relativ hohen Wert von 1.86 *sec* für PMSA. Zum Vergleich sind die Richtungen und Geschwindigkeiten rezenter absoluter Plattenbewegungen (APM) nach dem Modell HS2-NUVEL1 von Gripp & Gordon (1991) dargestellt. Dieses Modell liefert die Plattenbewegungen relativ zu den Hot Spots und damit die Bewegungen der Lithosphärenplatten relativ zum stationären Mantel. Zusätzlich zeigt die Karte die wichtigsten tektonischen Einheiten des antarktischen Kontinents wie den stabilen ostantarktischen Schild, das Transantarktische Gebirge sowie die terranen Blöcke der Westantarktis: antarktische Halbinsel (AP), Thurston Island (TI), die Haag Nunataks (HN), der Ellsworth-Whitmore-Mountains-Block (EWM) und Mary-Byrd-Land (MBL).

Die an SYO gefundene Anisotropie läßt sich weder durch APM noch durch Zusammenhänge mit dem Gondwana-Aufbruch deuten (Kubo *et al.*, 1995). Die Autoren vermuten den Zusammenhang mit einem auch in der Oberflächengeologie belegbaren tektonischen Ereignis vor ca. 500 Ma (Pan-Afrikanische Überprägung).



 1 sec Laufzeitdifferenz
 1 cm/a absolute Plattenbewegung (Modell HS2-NUVEL1)

Anzahl der verwendeten Phasen (SKS, SKKS, PKS):

VNA2: 27 VNA3: 27 PMSA: 4 SPA: 2

SYO: 10 (Kubo et al., 1995)

Abbildung 8.1 Vergleich der Splitting-Parameter mit den Richtungen absoluter Plattenbewegung nach dem Modell HS2-NUVEL1 von Gripp & Gordon (1990). Splitting-Ergebnisse der Syowa Station (SYO) nach Kubo *et al.* (1995).

8.1 Neumayer Station (WAZ / OLY)

Die Einzelmessungen an den Stationen WAZ und OLY aus den Kernphasen liefern einen deutlichen Effekt seismischer Anisotropie. Sie sind weitgehend, auch unterhalb beider Stationen, konsistent und können bis zu einem gewissen Grad mit einem Modell azimuthaler Anisotropie erklärt werden. Leichte azimuthale Abhängigkeiten werden später diskutiert und sollen dort durch ein verfeinertes Modell erklärt werden. Für die Stationen WAZ und OLY betragen die mit den relativen Fehlern der Einzelmessungen aus den Kernphasen gewichteten Mittel (64° , 1.14 sec) bzw. (64° , 1.12 sec). Die Messungen für beide Stationen stimmen damit exakt überein (Abbildung 8.2). Ebenso bieten die azimuthalen Abhängigkeiten der Splitting-Parameter an beiden Stationen ein sehr einheitliches Bild, so daß angenommen werden kann, daß die Anisotropie-Strukturen unterhalb beider Stationen auf dieselben Quellen zurückgeführt werden können und keine verschiedenen großräumigen Deformationsprozesse die regionalen Einheiten geprägt haben. Anmerkend sei erwähnt, daß diese Tatsache nicht notwendigerweise trivial ist, da Variationen der Splitting-Parameter über kleinräumige Entfernungen im Bereich von 100 km durchaus beobachtbar sind (Helffrich *et al.*, 1994). Der obere Mantel unterhalb Søråsen und Halvfarryggen kann damit als tektonische Einheit betrachtet werden, die eine einheitliche Deformationsgeschichte erlebt hat. Aus dieser Erkenntnis heraus sollen in den folgenden Betrachtungen WAZ und OLY zusammenfassend als Einheit diskutiert werden.

Die Ergebnisse von GVN/OBS sind nach Abschnitt (6.2.3) zu stark von den Auswirkungen des Kruste-/Wasser-/Schelfeisystems beeinflusst, liefern keine konsistenten und glaubwürdigen Ergebnisse und werden daher in der folgenden Diskussion nicht miteinbezogen.

Die Stärke der ermittelten Anisotropie ist mit $\delta t = 1.1 \text{ sec}$ signifikant und entspricht dem weltweiten Mittel des an kontinentalen Stationen ermittelten Wertes (Abbildung 8.3, Silver, 1996; Vinnik *et al.*, 1992). Eine nur auf die Kruste beschränkte Ursache ($0.1 \text{ sec} < \delta t < 0.3 \text{ sec}$) ist damit auszuschließen. Die Dicke der anisotropen Schicht L läßt sich nach Gleichung (3.21) abschätzen:

$$L = \frac{\delta t v_{s0}}{k} \quad (8.1)$$

Als mittlere Scherwellengeschwindigkeit für den oberen Mantel wird hier $v_{s0} = 4.6 \text{ km/sec}$ (IASPEI91) angenommen. Mit einem Anisotropie-Koeffizienten $k = 4\%$, der den Labormessungen an Mantelproben (Mainprice & Silver, 1993) entspricht, ergibt sich eine ungefähre Schichtdicke von $L \sim 130 \text{ km}$. Es stellt sich die Frage, welche Deformationsprozesse in welchen Tiefenregionen als Quellen bzw. Ursachen für eine Anisotropie in dieser Stärke verantwortlich sein können.

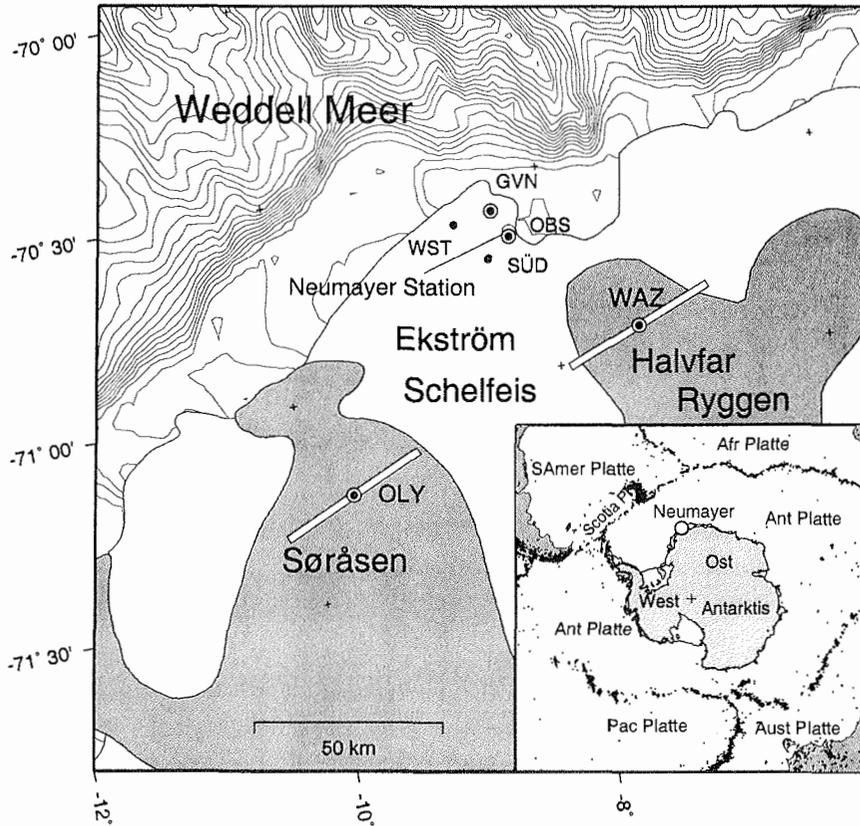


Abbildung 8.2 Darstellung der Splitting-Parameter für die Stationen WAZ (64° , 1.14 sec) und OLY (64° , 1.12 sec).

Um gemäß den in Kapitel 3 diskutierten Ursachen seismischer Anisotropie und Scherwellensplittings die für WAZ / OLY erhaltenen Ergebnisse in die global erhaltenen Splitting-Messungen einordnen zu können, sollen diese mit Ergebnissen entsprechender tektonischer Regionen verglichen werden. Interessant ist hier, die Ergebnisse für Stationen, insbesondere die Magnituden δt und die Orientierung der schnellen Anisotropie-Richtung bezüglich des Kontinentalrandes, an passiven Kontinentalrändern zu vergleichen. Bisher wurden weltweit nur wenige Splitting-Analysen in solchen Regionen durchgeführt. Zum Vergleich seien in der Tabelle 8.1 und in der Abbildung 8.4 bekannte Splitting-Ergebnisse von Stationen an passiven Kontinentalrändern aufgeführt. Es fällt auf, daß die δt hier keine einheitlichen Werte aufweisen. Die δt erreichen relativ

8. Diskussion

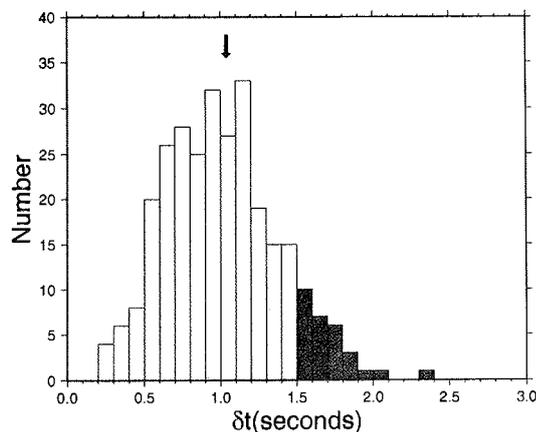


Abbildung 8.3 Histogramm der statistischen Verteilung weltweiter Laufzeitdifferenzen an kontinentalen Stationen (Silver, 1996). Die an Neumayer ermittelten Laufzeitdifferenzen entsprechen genau dem globalen Mittel.

Station	$\delta t/sec$	tekt. Platte	Referenz
NWAO	1.5	Indo-Austr.	Vinnik <i>et al.</i> , 1992
CTAO	1.0	Indo-Austr.	Vinnik <i>et al.</i> , 1992
TAU	0.6	Indo-Austr.	Vinnik <i>et al.</i> , 1992
MBO	0.7	Afr.	Russo & Silver, 1994
PARB	1.3	Südamer.	James & Assumpção, 1996
CEH	NULL	Nordamer.	Barruol <i>et al.</i> , 1997
DTMR	NULL	Nordamer.	Barruol <i>et al.</i> , 1997
HRV	1.0	Nordamer.	Barruol <i>et al.</i> , 1997

Tabelle 8.1 Splitting-Verzögerungszeiten anderer Stationen an passiven Kontinentalrändern.

hohe Werte von 1.5 sec für NWAO bis zu "Null"-Ergebnissen der Stationen CEH und DTMR.

Die "Null"-Ergebnisse von CEH und DTMR in den östlichen Appalachen erklären Barruol *et al.* (1997) mit der Zerstörung des ehemals vorhandenen anisotropen Gefüges durch einen thermalen Event im Zusammenhang mit dem Aufbrechen des Nordatlantiks, d.h. eine als Folge des "rift"-induzierten Magmatismus hervorgerufenen Schwächung der effektiven Anisotropie. Hier sei an-

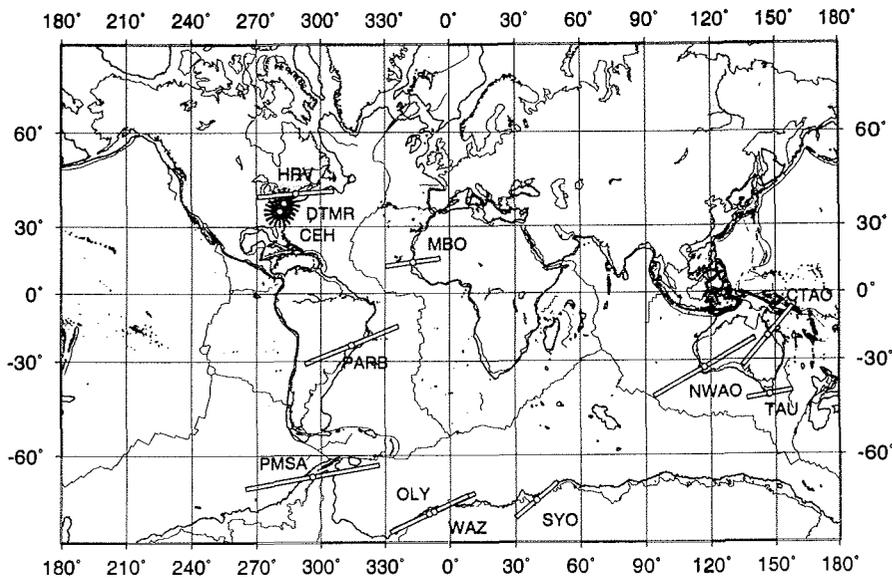


Abbildung 8.4 Splitting-Messungen an passiven Kontinentalrändern (Referenzen in Tabelle 8.1). Die Sterne bei DTMR und CEH bedeuten "Null"-Messungen, d.h. keine meßbare Anisotropie an diesen Stationen.

gemerkt, daß in dem globalen Datensatz von ca. 300 kontinentalen Splitting-Messungen nur etwa 10% ein "Null"-Ergebnis liefern (Silver, 1996). Damit ist die Anwesenheit seismischer Anisotropie ein typisches Merkmal kontinentaler Strukturen und deren Abwesenheit eher eine Besonderheit. Als mögliche Ursachen der Abwesenheit seismischer Anisotropie wären anzufügen, daß entweder tatsächlich kein anisotropes Gefüge ausgebildet wurde oder eine so komplizierte Struktur, daß sich die in den Einzelregionen erzeugten Effekte insgesamt wieder aufheben. Ein einfaches Beispiel für den zweiten Fall wären zwei Schichten hexagonaler Anisotropie mit gegeneinander orthogonalen Symmetrie-Achsen. Es stellt sich damit auch die Frage, welchen Einfluß die Abfolge verschiedener tektonischer Episoden auf die Ausbildung seismisch anisotroper Gefüge hat, und insbesondere, ob dadurch eher eine Abschwächung oder Verstärkung der Magnitude der Anisotropie erfolgt. Ein Vergleich der Ergebnisse der Stationen CEH und DTMR mit WAZ und OLY ist insofern interessant, als beide Regionen von wechselnden tektonischen Ereignissen geprägt sind, im westlichen Dronning Maud Land diese jedoch keinen verminderten Effekt auf die Ausprägung anisotroper Strukturen gehabt haben.

8. Diskussion

Die Station PARB am östlichen Kontinentalrand Südamerikas liefert eine schnelle Anisotropie-Richtung annähernd parallel zum Kontinentalrand (James & Assumpção, 1996). Diese Ausrichtung ist jedoch gut korrelierbar mit der Streichrichtung lokaler Störungszonen eines transpressionalen Gebirgszuges im Bereich der Station.

NWAO, CTAO und TAU liegen am Kontinentalrand Australiens und liefern alle drei schnelle Anisotropie-Richtungen annähernd senkrecht zum Kontinentalrand (Vinnik *et al.*, 1992). Ähnliches gilt für MBO am Kontinentalrand Westafrikas (Russo & Silver, 1994).

An allen, hier zum Vergleich herangezogenen Stationen liegen jedoch nur relativ begrenzte Datensätze (< maximal 10 (MBO) Ereignisse) vor. Damit sind mit den Ergebnissen dieser Stationen keine detaillierteren Untersuchungen komplizierter Anisotropie-Modelle wie im Falle der Datensätze von OLY und WAZ möglich.

Es existiert kein genereller Zusammenhang zwischen der Größe von δt und der Art tektonischer Mechanismen, ebensowenig zwischen tektonisch aktiven und passiven Regionen. Mit dieser Tatsache verbunden ist die in Kapitel 3 diskutierte Frage, in welchen Tiefenregionen die Quellen der Anisotropie liegen und in dem Zusammenhang, welches die Anisotropie verursachenden Mechanismen sind. Die hier von OLY und WAZ vorgestellten Ergebnisse können einen Beitrag zu der Frage liefern, ob die Quellen seismischer Anisotropie in der Asthenosphäre, Lithosphäre oder beiden liegen.

Als Hypothesen für die Quellen und tektonisch-geodynamischen Ursachen der Anisotropie bzw. diese modifizierenden Prozesse kommen folgende in Frage und sollen in den späteren Abschnitten eingehender diskutiert werden:

1. Asthenosphärisches Fließen im Zusammenhang mit rezenter absoluter Plattenbewegung (APM).
2. Ursache der Ausbildung anisotroper Strukturen in frühen Deformationsereignissen wie Gebirgsbildungen im westlichen Dronning Maud Land (Kibarische Gebirgsbildung oder Pan-Afrikanische Überprägung).
3. Im Archaikum angelegte Strukturen als Teil des Zimbabwe-Kaapvaal-Grunehogna Kratons
4. Deformationen im Zusammenhang mit dem initialen Aufbruch Gondwanas.
 - Bewegungsrichtung des initialen Rifting.
 - Mögliche Transversaldeformationen in süd-westlichen Richtungen parallel zum EE, d.h. große Strike-Slip-Bewegungen im Zusammenhang mit einer möglichen Transversalversetzung des EWM-Blocks.

- Einfluß der Magmenausflüsse des Mantel-“plumes“.
5. Überlagerung rezent und fossil erzeugter Anisotropie in Asthenosphäre bzw. Lithosphäre bzw. in verschiedenen tektonischen Epochen angelegten komplizierteren Strukturen.

8.1.1 Absolute Plattenbewegung

Nach dem Modell HS2-NUVEL1 (Gripp & Gordon, 1990) beträgt die Geschwindigkeit der APM der antarktischen Platte im Bereich Dronning Maud Lands 1.15 cm/a mit einer Richtung von 170° .

Diese Richtung stimmt nicht mit den ermittelten schnellen Polarisationsrichtungen überein, sondern steht nahezu senkrecht zu diesen.

Zudem wäre die Magnitude δt von über 1 sec für diese relativ geringe Plattengeschwindigkeit zu groß, um durch APM als einzige Ursache erklärt zu werden. Einen guten Aufschluß über den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeiten der APM und Anisotropie-Laufzeitdifferenzen liefert ein gerade abgeschlossenes Experiment aus Nordamerika (MOMA-Array, Wysession *et al.*, 1996). Auf einer Profillinie vom Inneren des nordamerikanischen Kratons über die Appalachen hinweg bis an die Küste Neuenglands wurden über einen Zeitraum von einem Jahr 20 Stationen (Profillänge 1740 km) betrieben und deren Registrierungen unter anderem auf den Einfluß seismischer Anisotropie untersucht. Im westlichen Teil des Profils stimmen die Anisotropie-Richtungen gut mit der APM-Richtung überein, liefern aber keine Laufzeitdifferenzen $> 1.0 \text{ sec}$, wobei die APM-Geschwindigkeit mit 2.7 cm/a deutlich größer ist als die der antarktischen Platte. In der Appalachen-Region ergibt sich ein komplexeres Bild, die Richtungen stimmen nicht mit APM überein und die Laufzeitdifferenzen erreichen Werte bis zu 1.5 sec . Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß ein gewisser Anteil APM-generierter Anisotropie-Anteil existiert, jedoch in geringer Ausprägung nicht ins Gewicht fällt. Daraus kann geschlossen werden, daß die vorhandene seismische Anisotropie eine Ursache haben muß, die zumindest einen gewissen Anteil in vergangenen tektonischen Ereignissen hat.

8.1.2 Zweischichtfall azimuthaler Anisotropie

Wie die Ergebnisse in Abschnitt 6.2.3 gezeigt haben, existiert an den Stationen OLY und WAZ eine deutliche Abhängigkeit der Splitting-Parameter vom Rückazimut bzw. der initialen Polarisationsrichtung. Die bisherige Grundlage der Parameterinversion, die Annahme einer einzigen Schicht azimuthaler Anisotropie, ist damit mit den Registrierungen inkonsistent. Die Diagramme in Abbildung 8.5 zeigen die Richtungen und Laufzeitdifferenzen für WAZ und OLY. In dieser

8. Diskussion

Darstellung zeigt sich, daß an beiden Stationen die mehr nord-südlichen Richtungen größere Laufzeitdifferenzen als die ost-westlichen aufweisen. Es existiert also eine Korrelation zwischen Anisotropie-Richtung und Laufzeitdifferenz in azimuthaler Abhängigkeit.

Als mögliche Modelle, die zu einer Erklärung der Variation der Splitting-Parameter mit ϕ_p führen könnten, kommen in Frage:

- Es existieren zwei oder mehr Schichten azimuthaler Anisotropie mit unterschiedlichen Symmetrie-Richtungen, die Splitting-Parameter variieren mit $\phi = 90^\circ$.
- Die Symmetrie-Achse ist nicht horizontal, d.h. geneigte Schichtungen erzeugen eine azimuthale Abhängigkeit mit einer Periode von $\phi = 180^\circ$,
- Die Annahme eines hexagonalen Symmetriesystems ist zu einfach. Anisotropie-Systeme von geringerer Symmetrie, z.B. orthorhombische, können große Variationen der Splitting-Parameter in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung und vom Einfallswinkel erzeugen (Plomerova *et al.*, in Druck).

Ein einfaches Modell, das von einer Schicht azimuthaler Anisotropie abweicht, soll hier näher diskutiert und auf die Daten angewandt werden: Ein Zweischichtmodell mit zwei verschiedenen Symmetrie-Achsen azimuthaler Anisotropie (Savage & Silver, 1993 und Silver & Savage, 1994). Dieses Modell hat insofern eine gewisse Bedeutung, als es fossile Anisotropie in der Lithosphäre und zugleich rezent erzeugte Anisotropie im Zusammenhang mit asthenosphärischem Fließen erklären könnte.

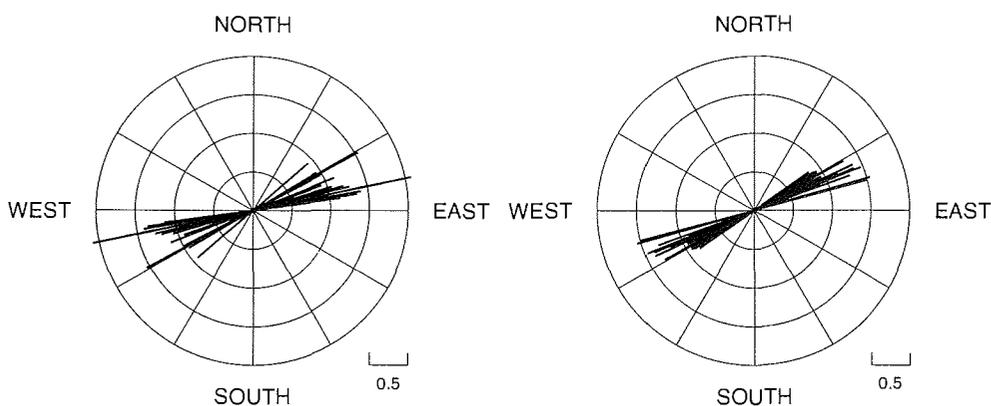


Abbildung 8.5 Splitting-Parameter für WAZ (links) und OLY (rechts).

Eine linear polarisierte S-Welle wird beim Durchlauf durch die erste Schicht in zwei Wellen aufgespalten, aus der wiederum in der zweiten Schicht vier Teilwellen entstehen. Damit entsteht eine insgesamt kompliziertere Wellenform als im Einschichtfall. Silver & Savage (1994) zeigen, daß in diesem Fall die Inversion der Splitting-Parameter unter der Annahme einer einzelnen Schicht trotzdem eine gerechtfertigte Bedeutung hat. Die aus dem Einschichtmodell erhaltenen Splitting-Parameter sind nunmehr scheinbare Parameter, die sich an ein Zweischichtmodell mit vier unabhängigen Splitting-Parametern anpassen lassen. Statt eines auf die Scherwelle wirkenden Splitting-Operators (Gleichung 4.2) kommen nun zwei verschiedene zur Wirkung:

$$\vec{u}_{aniso}(\phi_1, \delta t_1, \phi_2, \delta t_2) = w(\omega) \Gamma_1(\phi_1, \delta t_1) \Gamma_2(\phi_2, \delta t_2) \vec{p} \quad . \quad (8.2)$$

Die Autoren zeigen, daß die scheinbaren Parameter $(\phi_a, \delta t_a)$ durch die Wirkung eines Operators Γ_a repräsentierbar sind, der die Wirkung zweier nacheinander wirkenden Operatoren (Γ_1 für die erste und Γ_2 für die zweite durchlaufene Schicht) repräsentiert:

$$\Gamma_1(\phi_1, \delta t_1) \Gamma_2(\phi_2, \delta t_2) \vec{p} = K \Gamma_a(\phi_a, \delta t_a) \vec{p} \quad . \quad (8.3)$$

Aus dieser Gleichung und der Annahme, daß ϕ_p bekannt ist, läßt sich eine Beziehung zwischen den gemessenen (scheinbaren) Parametern und den wahren $(\phi_1, \delta t_1)$ und $(\phi_2, \delta t_2)$ der beiden Schichten ableiten. Seien $\alpha_{a,1,2} = 2\phi_{a,1,2}$ und $\theta_{a,1,2} = \omega\delta t_{a,1,2}/2$ und die Konstanten a_p, a_{pp}, C_c und C_{cc} seien durch

$$\begin{aligned} a_p &= \cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \\ a_{pp} &= -\sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1) \\ C_c &= \cos\theta_1 \sin\theta_2 \cos\alpha_2 + \cos\theta_2 \sin\theta_1 \cos\alpha_1 \\ C_s &= \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\alpha_2 + \cos\theta_2 \sin\theta_1 \sin\alpha_1 \end{aligned}$$

definiert. Dann lassen sich die scheinbaren Splitting-Parameter α_a und θ_a durch die Gleichungen

$$\tan \alpha_a = \frac{a_{pp}^2 + C_s^2}{a_{pp} a_p + C_s C_c} \quad (8.4)$$

$$\tan \theta_a = \frac{a_{pp}}{C_s \cos\alpha_a - C_c \sin\alpha_a} \quad (8.5)$$

in Abhängigkeit der vier Parameter beider Schichten ausdrücken. Diese Beziehung erlaubt, die scheinbaren Parameter $\phi_a = \phi_a(\phi_p)$ und $\delta t_a = \delta t_a(\phi_p)$ für die jeweils vier festgehaltenen

8. Diskussion

Schichtparameter zu berechnen. Aus den Gleichungen (8.3) können einige grundlegende Eigenschaften der Splitting-Parameter in Abhängigkeit der Polarisationsrichtung abgeleitet werden:

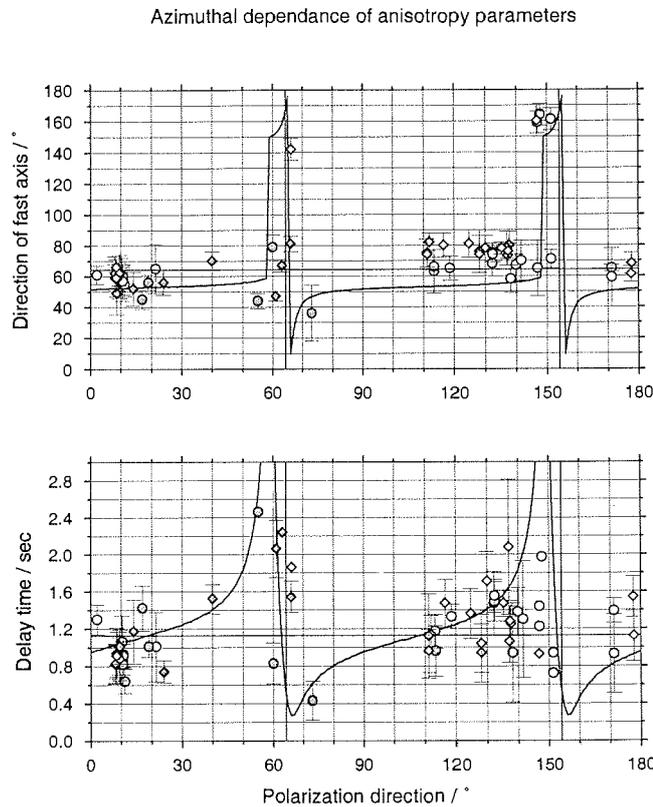


Abbildung 8.6 Modellierung eines Zweischichtfalles azimuthaler Anisotropie. Die scheinbaren Splitting-Parameter ϕ_a und δt_a werden am besten durch eine untere Schicht mit den Parametern $(\phi_1, \delta t_1) = (80^\circ, 0.4 \text{ sec})$ und eine obere Schicht $(\phi_2, \delta t_2) = (50^\circ, 0.7 \text{ sec})$ angepaßt. Quadrate: WAZ, Kreise: OLY, graue Symbole: Ergebnisse der S- und ScS-Analysen.

- ϕ_a durchläuft einen Sprung von -90° , wenn der Nenner von Gleichung (8.4) verschwindet. Hier vertauschen sich die beiden Wellen, die vormals schnelle Welle wird zur langsamen und umgekehrt.

Azimuthal dependence of anisotropy parameters

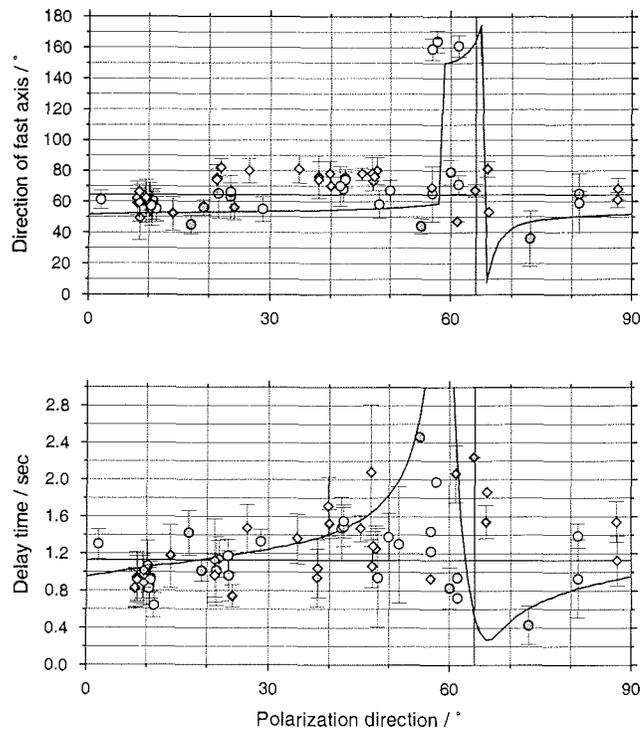


Abbildung 8.7 Darstellung der azimuthalen Abhängigkeit der Splitting-Parameter. Wie Abbildung 8.6, nur sind die Splitting-Parameter in Abhängigkeit der Polarisationsrichtung *modulo* 90° aufgetragen.

- Abgesehen von dem Sprung ist ϕ_a eine mit ϕ_p monoton steigende Funktion.
- δt_a durchläuft ein Maximum in der Nähe der Diskontinuität von ϕ_a .
- Es existieren "Null"-Richtungen, d.h. die Teilchenbewegung wird wie im Einschichtfall annähernd linear. Im Fall gleicher Laufzeitdifferenzen für beide Schichten liegen die "Null"-Richtungen genau zwischen den beiden schnellen Richtungen.
- Die Parameter haben eine 90° -Periodizität mit ϕ_p .
- Schwache Variationen von ϕ_a treten auf, wenn ϕ_1 und ϕ_2 annähernd parallel bzw. orthogonal zueinander sind: δt_1 und δt_2 addieren bzw. subtrahieren sich.

8. Diskussion

- Die größten Variationen der scheinbaren Parameter treten in dem Fall auf, wenn a_{pp} relativ groß wird, d.h. wenn $\delta t_1 \sim \delta t_2$ und $30^\circ < \phi_2 - \phi_1 < 60^\circ$.

Es wurde versucht, die beobachtete azimutale Abhängigkeit der an WAZ und OLY ermittelten (scheinbaren) Splitting-Parameter an das oben vorgestellte Modell anzupassen. Für die azimutale Abhängigkeit der Parameter von WAZ und OLY (Abbildung 8.6, Parameter für WAZ sind als Rechtecke, des OLY als Kreise und die Parameter der verwendeten S- und ScS-Phasen in grau dargestellt, "Null"-Messungen sind durch fehlende Fehlerbalken der δt -Werte erkennbar) gesamt gesehen, lassen sich die oben aufgeführten Kriterien wie folgt verifizieren:

- Ein Sprung von ϕ_a existiert bei bzw. $\sim 65^\circ$ bzw. $\sim 155^\circ$.
- ϕ_a ist mit ϕ_p leicht monoton steigend.
- Ein Maximum für δt_a existiert in der Nähe der Diskontinuität von ϕ_a .
- Die "Null"-Richtungen existieren bei $65^\circ \text{ modulo } 90^\circ$.
- Die 90° -Periodizität von ϕ_a ist aufgrund der schlechten azimutalen Abdeckung nur schwer belegbar. Die Abbildung 8.7 zeigt die Splitting-Parameter *modulo* 90° über ϕ_p aufgetragen. Die erläuterten Eigenschaften bleiben erhalten, was zumindest nicht gegen das Vorhandensein dieser Periodizität spricht. Durch fehlende Messungen in den Azimutbereichen $25^\circ < \phi_p < 55^\circ$ und $70^\circ < \phi_p < 100^\circ$ läßt sich diese Abhängigkeit leider nicht eindeutig belegen. Eine Aussage läßt sich jedoch durch die Lage der "Null"-Richtungen machen. Diese liegen etwa 90° auseinander, wobei die im Bereich von 60° fast nur aus S- und ScS-Analysen stammen und diese damit auch mögliche Fehler in ϕ_p aufweisen.
- Die Variation von ϕ_a ist erkennbar, aber relativ schwach, die von δt_a ist deutlich stärker. Damit sollten die gegenseitigen Abweichungen von ϕ_1 und ϕ_2 nicht sehr groß und subparallel sein.

Mit diesen Vorüberlegungen können die Wertebereiche der vier anzupassenden Parameter schon weitgehend eingeschränkt werden. Die schnellen Richtungen liegen nicht weit auseinander ($|\phi_1 - \phi_2| > 30^\circ$) und schließen eine der beiden "Null"-Richtungen ein (hier 155° , da der Mittelwert der schnellen Richtung erhalten bleiben muß).

Die durchgezogenen Linien in Abbildungen 8.6 und 8.7 zeigen die nach Gleichungen (8.4) und (8.5) errechneten scheinbaren Parameter, die die beste Anpassung der Daten gewährleisten. Als Referenzfrequenz wurde 0.125 Hz (8 sec Periode) gewählt. Die zugehörigen Zweischicht-Parameter sind:

- Untere Schicht: $(\phi_1, \delta t_1) = (80^\circ, 0.4 \text{ sec})$

- Obere Schicht: $(\phi_2, \delta t_2) = (50^\circ, 0.7 \text{sec})$

Die Anpassung der Daten durch beide Parameter $(\phi_a, \delta t_a)$ wird dadurch kompliziert, daß beide nur simultan angepasst werden können, d.h. ϕ_a und δt_a sind miteinander gekoppelt. So gibt es einen "trade-off" zwischen dem Datenfit von ϕ_a , dem von δ_a und der Anpassung an die Sprungstellen. Die Anpassung der ϕ_a durch die gewählten Zweischicht-Parameter liegt etwas unterhalb der gemessenen Werte, jedoch wird der Trend gut wiedergegeben. Die δt_a -Werte streuen stärker, werden durch die Modellkurve aber gut wiedergegeben. Die Lage der Sprungstellen reagiert relativ empfindlich auf die Variation der Zweischicht-Parameter, insbesondere auf die Anisotropie-Richtungen, diese sind durch die Splitting-Messungen jedoch gut belegt, so daß an diesen Werten festgehalten wurde.

Die Messungen aus dem Azimutbereich $170^\circ < \phi_p < 180^\circ$, $0^\circ < \phi_p < 5^\circ$ fallen aus der Anpassung heraus, leider gibt es hier keine Parameter aus dem um 90° verschobenen Bereich. Vermutlich sind diese Diskrepanzen auf eine noch kompliziertere Anisotropie-Struktur zurückführbar.

Schichtneigungen

Der mögliche Einfluß geneigter Schichten oder anderer großräumiger lateraler Heterogenitäten kann durch den Vergleich der Ergebnisse der E_t - und der Eigenwertmethode überprüft werden (Abschnitt 4.2.2). Abbildung 8.8 zeigt die Differenzen der Ergebnisse der Einzelmessungen aus beiden Verfahren. Berücksichtigt wurden nur die Kernphasen mit Ausnahme der "Null"-Messungen und der flachen Tonga-Beben. Obwohl die Werte, insbesondere der ϕ -Werte stark streuen, ist keine Systematik bzw. azimuthale Abhängigkeit erkennbar. Es kann daher davon ausgegangen werden, daß ein solcher Einfluß ausgeschlossen werden kann.

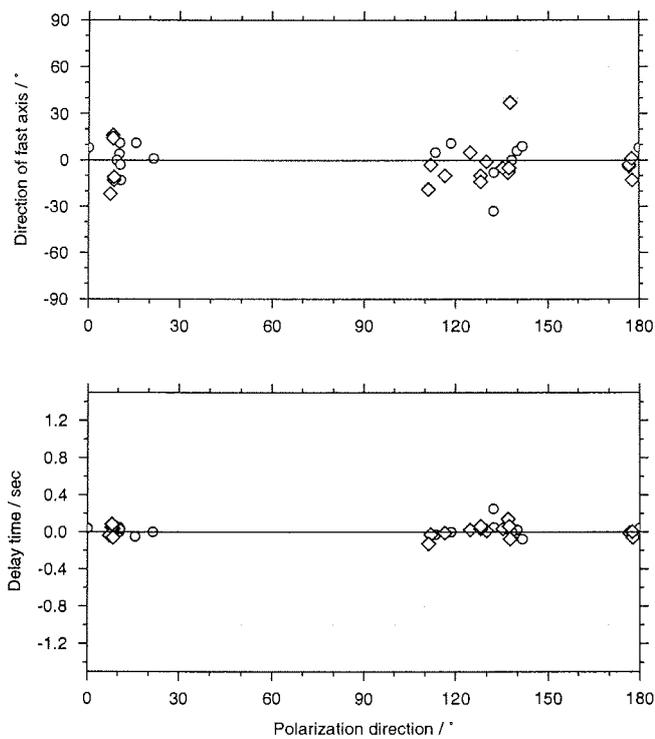


Abbildung 8.8 Differenz der Ergebnisse der beiden Inversionsmethoden. Es ist keine klare Abhängigkeit der Differenzen von der Polarisationsrichtung feststellbar.

Interpretation

Die Richtungen der oberen Schicht sind parallel zu den Strukturelementen des westlichen Dronning Maud Landes, d.h. zum Kontinentalrand und des Explora Escarpments, aber auch zum Streichen der Gebirgszüge von Kirwanveggen, Heimefrontfjella und Vestfjella (Abbildung 8.9). Einen Zusammenhang der gemessenen Anisotropierichtungen und deren möglicher Ausrichtung durch

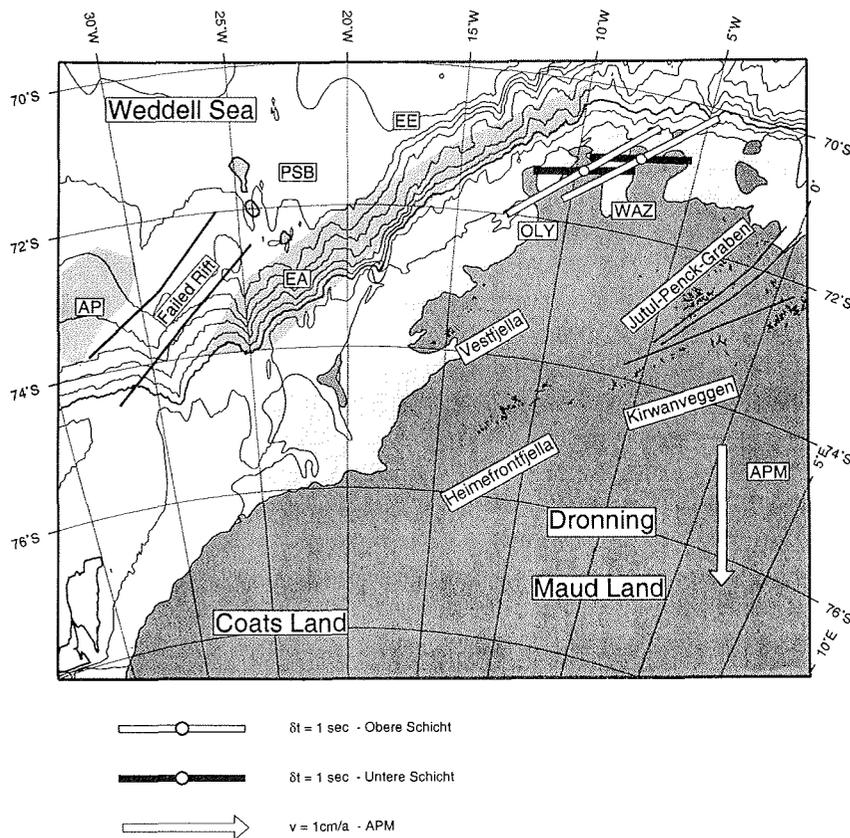


Abbildung 8.9 Vergleich der an Neumayer gewonnenen Anisotropie-Richtungen mit tektonischen Merkmalen des östlichen Kontinentalrandes des Weddell-Meeres und Dronning Maud Lands. Die Richtung und Geschwindigkeit der absoluten Plattenbewegung (APM) beruht auf dem Modell HS2-NUVEL 1 von Gripp & Gordon (1990).

8. Diskussion

vertikal kohärente Deformationen (VCD) während der Kibarischen Gebirgsbildung (1100 Ma) oder die Pan-Afrikanische Überprägung (Abschnitt 2.2) könnte durch die Übereinstimmung der korrespondierenden Richtungen bestehen. Im Zuge von Gebirgsbildungsepisoden richteten sich die schnellen Polarisationsrichtungen durch Transpressionsmechanismen parallel zum Streichen der Gebirge aus (Nicolas, 1993; Silver, 1996) als Folge vertikal kohärenter Deformationen des Erdmantels. Die Deformationsrichtungen des Ereignisses sind SSW-NNE ausgerichtet. Eine damit im Zusammenhang stehende transpressionale Deformation des oberen Mantels könnte eine bevorzugte Ausrichtung der Mantelminerale parallel zur Heimefront-Scherzone erzeugt haben. Diese Erklärung ist unwahrscheinlich, da die von diesem Ereignis betroffenen Gebirgszüge Heimefrontfjella und Kirwanveggen zu weit von den Registrierstationen entfernt liegen (ca. 400 km) und der Grunehogna Kraton vermutlich nicht betroffen war. Abbildung 8.10 zeigt eine Gondwana-Rekonstruktion nach Martin & Hartnady (1986) zusammen mit den Anisotropieparametern dieser Studie (Mittelwerte und Parameter der oberen Schichten) und Anisotropiemessungen im Bereich des Kaapvaal Kratons nach Vinnik *et al.* (1995). Es zeigt sich, daß diese Richtungen mit denen von WAZ und OLY i.A. gut korrelieren. Damit wird die Vermutung unterstützt, daß es sich hier um einen Teil des Zimbabwe-Kaapvaal-Grunehogna Kratons handelt, der nach dem Zerfall Gondwanas von Afrika getrennt wurde (Moyes *et al.*, 1993). In diesem Fall handelt es sich bei der in diesem Tiefenbereich beobachteten Anisotropie um Strukturen präkambrischen Ursprungs. Es wurden an Stationen auf archaischen Schilden Anisotropie mit relativ hohen Magnituden gefunden, z.B. auf dem stabilen kanadischen Schild Laufzeitdifferenzen von $\delta t > 1.5 \text{ sec}$ (Silver & Chan, 1988). Die Autoren vermuten hier als Ursache fossile Anisotropie, deren Entstehung bis ins Archaikum zurückreicht und über diese langen zeitlichen Perioden erhalten bleibt. Eine solche starke Anisotropie wurde nur in stabilen Regionen gefunden, die nicht von späteren tektonischen Ereignissen überprägt wurden. Dieses ist jedoch nicht der Fall im nord-westlichen Teil des Zimbabwe-Kaapvaal-Grunehogna-Kratons, da dessen Wurzel und der darunterliegende Mantel von dem Manteldiapir und dem beginnendem Rifting beeinflusst wurden, was sich an der Oberfläche durch Austreten extensiver Flutbasalte manifestierte. Wie erwähnt, können durch verschiedene tektonisch aktive Episoden erzeugte anisotrope Strukturen einen minimierenden Effekt auf die Gesamtanisotropie (δt) haben. S-Wellensplitting-Untersuchungen eines laufenden temporären Experimentes mit 55 Stationen über den Kaapvaal Kraton verteilt, zeigen, daß an den meisten dieser Stationen kein Splitting detektiert wird (Silver & Gao, AGU Spring Meeting, 1998). Die Autoren erklären dieses Ergebnis mit starker extensiver vulkanischer Tätigkeit während des Aufbruchs von Gondwana. Diese vulkanische Aktivität ist auch in Dronning Maud Land dokumentiert (z. B. Paech, 1997). Die stark ausgebildete Anisotropie an WAZ und OLY deutet jedoch darauf hin, daß der Bereich des Grunehogna Kratons nicht in dem Maße von dieser Aktivität betroffen war. Hiermit wird auch die Hypothese unterstützt, daß es sich bei der Anisotropierichtungen der oberen Schicht um im Archaikum angelegte Strukturen handelt, die nicht oder geringfügig durch spätere Ereignisse modifiziert wurden. Eine ähnliche Beobachtung machen Barruol *et al.* (1997), die seismische Anisotropie beiderseits des Nordat-

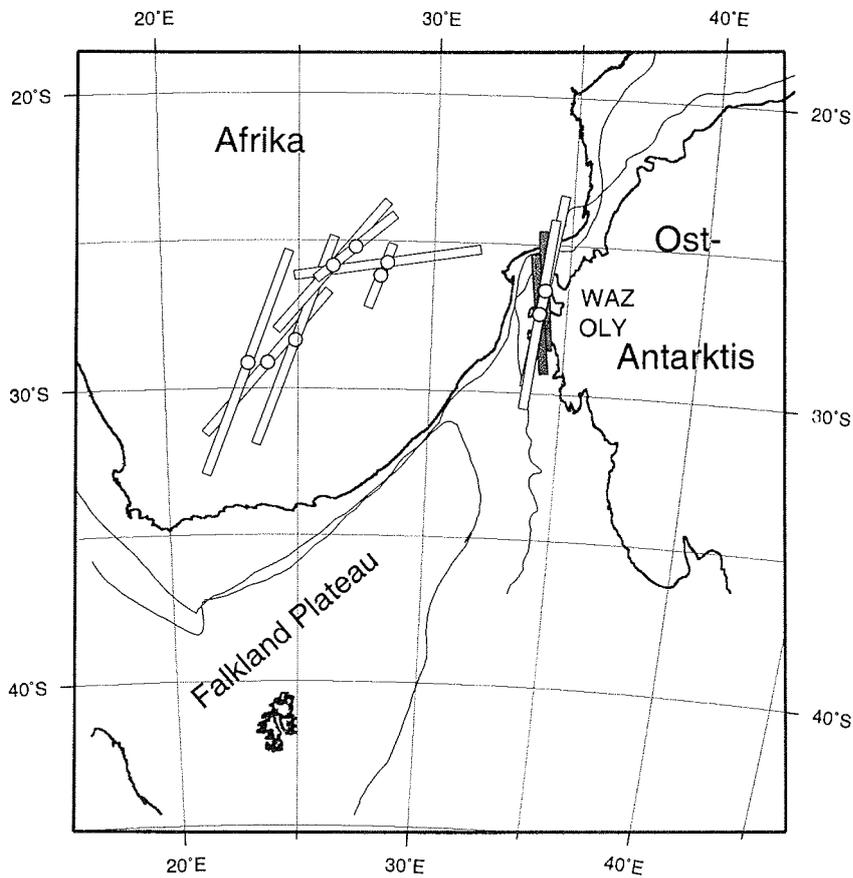


Abbildung 8.10 Vergleich der an WAZ und OLY gemessenen Anisotropieparameter mit denen des Kaapvaal Kratons im südlichen Afrika. Die Karte zeigt Südafrika, die Ost-antarktis und das Falkland Plateau in einer Gondwana-Rekonstruktion nach Martin & Hartnady (1986). Weiße Balken bedeuten die Stationsmittel, graue Balken für WAZ und OLY die Parameter der modellierten oberen Schichten. Die Anisotropieparameter im südlichen Afrika sind der Arbeit von Vinnik *et al.* (1995) entnommen.

lantiks vergleichen und mit den archaischen Wurzeln Pangeas in Verbindung bringen.

Die Anisotropie der unteren Schicht wurde zu einem späteren Zeitpunkt, vermutlich dem Aufbrechen Gondanas, angelegt. Die schnelle Polarisationsrichtung ist hier subparallel zum Streichen des Kontinentalrandes und des Explora Escarpments (EE). Hier bieten sich verschiedene Deutungsmöglichkeiten an. Wurde die Anisotropiestruktur durch eine mögliche frühe Scherbewegung entlang des EE direkt nach einem initialen Rifting erzeugt, durch das Rifting direkt angelegte Strukturen, oder hatte der Mantelplume selbst Einwirkungen auf diese Strukturen?

Scherdeformationsbezogene Strukturen sind hier unwahrscheinlich, da daß EE etwa 100 km nordöstlich von WAZ und OLY verläuft und damit zu weit entfernt, um mögliche Effekte als gescherte Plattengrenze in der Lithosphäre noch abzubilden. Schnelle Polarisationsrichtungen an WAZ und OLY ($\phi = 80^\circ$) sind gegenüber der Streichrichtung und möglichen Scherrichtung entlang des EE (60°) um 20° geneigt. Nach Vauchez & Nicolas (1991) und Nicolas (1992) weiten sich die von Scherdeformationen betroffenen Regionen jedoch in der Tiefe bis auf mehrere 10er Kilometer aus und erzeugen ein seismisch anisotropes Gefüge, welches eine Auswirkung auf die Anisotropie-Struktur unterhalb des Halvfarryggen und Søråsen haben könnte.

Durch das initiale Rifting angelegte Strukturen können ebenso nicht ausgeschlossen werden. Riftgeprägte Anisotropie ist meistens subparallel zum Streichen des Rifts und wird erklärt durch Einfrieren aufsteigender Asthenosphäre entlang der Riftschultern während der Riftepisoden (Nicolas, 1993; Gao *et al.*, 1997). Die Streichrichtung des frühen Rifts und schnelle Polarisationsrichtungen an WAZ und OLY ($\phi = 80^\circ$) sind ebenfalls um 20° zueinander geneigt.

Eine andere Erklärungsmöglichkeit wäre das Abbild kleinräumiger Konvektion (Makeyeva *et al.*, 1992) im Kopf des Manteldiapirs, dessen Konvektionsströme ebenfalls durch die Abkühlung eingefroren sind und durch die LPO-Richtung (Lattice Preferred Orientation) als Anisotropie-Muster abgebildet werden). Nach Makeyeva *et al.* (1992) könnte Konvektion im kleinen Masstab die Ursache seismischer Anisotropie sein. Die Autoren erklärten kleinräumige Variationen der Splitting-Parameter im Tien Shan in Zentralasien mit (aktiver) Konvektion im oberen Mantel. Im vorliegenden Fall wären die Fließgefüge der ehemaligen Konvektionsströme nach Verlagerung des "plumes" mit zunehmender Abkühlung eingefroren. Nach diesen Vorstellungen einer thermisch bedingten Verdickung der Lithosphäre mit fortschreitender Abkühlung wäre die Stärke und Richtung der Anisotropie eine Funktion der Abkühlungs- und Konvektionsgeschichte. Kritisch ist dabei der Einfluß der thermischen Entwicklung. Nach Silver & Chan (1991) ist eine Absenkung der Temperatur auf unterhalb von ca. $900^\circ C$ erforderlich. Unterhalb derer das anisotrope Gesteinsgefüge "einfriert" und stabil bleibt. Ein gewisser Einfluß des Mantelplumes in der subkrustalen Lithosphäre ist zu erwarten, da vulkanische Einflüsse sich in den geneigten Reflektoren unterhalb des EE als auch in den Gebirgszügen der Heimefrontfjella, Kirwanveggen und Vestfjella manifestieren, im Bereich des Grunehogna Kratons nicht zum Durchbruch kamen, jedoch unterlagert haben.

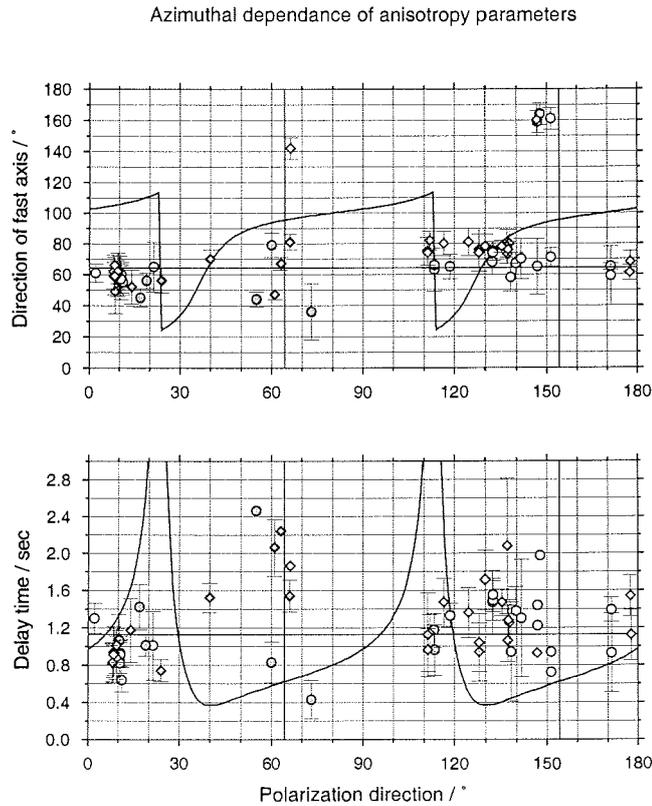


Abbildung 8.11 Versuch der Modellierung eines Zweischichtfalles azimuthaler Anisotropie mit unterer Schicht parallel zur Richtung rezenter, absoluter Plattenbewegung. Die vorgegebenen Parameter sind hier $(\phi_1, \delta t_1) = (170^\circ, 0.3 \text{ sec})$ und $(\phi_2, \delta t_2) = (50^\circ, 0.8 \text{ sec})$.

Um einen möglichen Einfluß von rezenter, absoluter Plattenbewegung in einem Zweischichtfall zu modellieren, wurde versucht, eine untere Schicht mit entsprechender Richtung einzubauen. Jedoch führten der Einbau von Schichten mit selbst kleinen Anisotropie-Magnituden (δt) zu keinen überzeugenden Ergebnissen. Zu diesem Zweck wurde die Richtung von 170° (APM) als untere Schicht vorgegeben. Die Variierung der restlichen Parameter in verschiedenen Kombinationen erlauben so jedoch keine zufriedenstellende Modellierung der Daten. Ein Beispiel dieser Modellierungen zeigt Abbildung 8.11. Die Ergebnisse zeigen, daß insbesondere die Laufzeitdifferenzen den Trend der Daten überhaupt nicht wiedergeben.

Kompliziertere Modelle seismischer Anisotropie

Die Unzulänglichkeiten in der Modellierung der azimuthalen Abhängigkeit der Splitting-Parameter durch das Zweischichtmodell könnte in einer komplizierteren Anisotropie-Struktur begründet sein. Ebenso unterstützen die Inkonsistenzen der bei bestimmten Auftauchwinkeln und Polarisationsrichtungen untersuchten S- und ScS-Phasen diese Vermutung (Abschnitt 6.3.3). Um verfeinerte Modelle zu entwickeln, sollten jedoch mehr Daten mit einer besseren azimuthalen Abdeckung vorhanden sein.

Trotz dieser Inkonsistenzen stellt das oben entwickelte Zweischichtmodell schon eine gute Näherung zur Erklärung der beobachteten Splitting-Parameter dar.

8.1.3 Vergleich mit Ergebnissen anderer Methoden

Laufzeitresiduenanalyse

Im Falle azimuthaler Anisotropie sollte sich eine azimuthale Abhängigkeit der Laufzeitresiduen teleseismischer P-Wellen mit einer Periode von 180° ergeben. Die Richtung der schnellen P-Wellen sollte mit der schnellen Richtung der Polarisationsanisotropie übereinstimmen. Tatsächlich wurde an den Stationen GVN, SNA (Sanae), NVL (Novolazarewskaja) und SYO durch die Analyse absoluter und relativer (auf SPA bezogen) Laufzeitresiduen eine solche Abhängigkeit gefunden (Eckstaller, 1988; Eckstaller & Miller, 1992). An allen drei Stationen weist der $\cos(2\phi)$ -Term eine nahezu küstenparallele Ausrichtung auf (Abbildung 8.12). Dieser Term der harmonischen Residuenapproximation mit der Periode von 180° wird im allgemeinen durch eine Ausbreitungsanisotropie erklärt. Für die Station GVN liegt die "langsame" Richtung annähernd in EW-Richtung (100°). Damit beträgt die Abweichung zu der in dieser Arbeit ermittelten "langsamen" Richtung (154°) über 50° . Noch schlechter ist die Übereinstimmung der Anisotropie-Richtungen aus beiden Methoden an der Station SYO mit einer Differenz von 80° . Allerdings ist die nach Eckstaller (1988) aus der Residuenapproximation erhaltene Richtung mit großen Fehlern behaftet.

Vinnik *et al.* (1992) verglichen Richtungen von SKS-Anisotropie an Stationen der eurasischen und nordamerikanischen Kontinente mit den Richtungen der aus der Residuenapproximation vermuteten Anisotropie (Dziewonski & Anderson, 1983), konnten jedoch keine signifikante

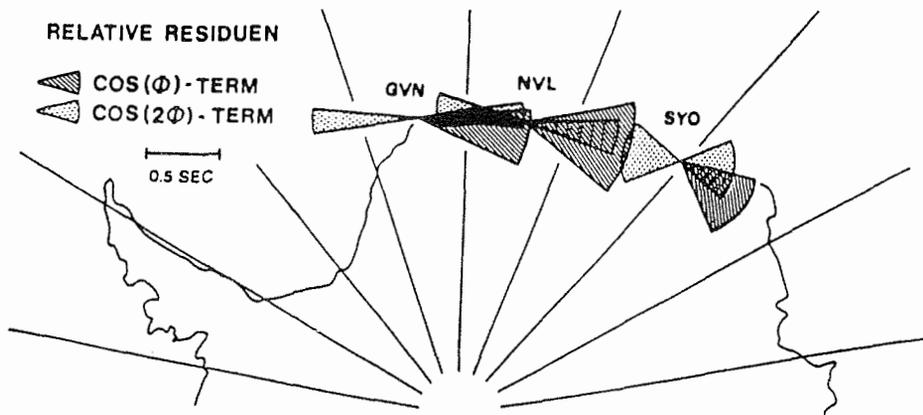


Abbildung 8.12 Die "langsamen" Terme der Residuenapproximation der Stationen GVN, NVL und SYO. Aus Eckstaller (1988).

8. Diskussion

Korrelation nachweisen. Es scheint demnach ein weltweit auftretendes Phänomen zu sein, daß die Anisotropie-Ergebnisse aus der Polarisationsanalyse von S-Wellen und der Laufzeituntersuchung von P-Wellen kein konsistentes Bild liefern. Da die Polarisationsmethode weitaus unempfindlicher gegenüber dem Vorhandensein von lateralen Heterogenitäten ist und einen relativ engen Bereich unterhalb der Station abbilden, können diese Differenzen in den zu einfachen Annahmen der Residuenmethode zu suchen sein.

Azimutale Variation der Phasengeschwindigkeiten von Rayleigh-Wellen

Eine Methode, um globale azimutale Anisotropie abzubilden, bietet die Untersuchung azimutaler Phasengeschwindigkeitsvariationen langperiodischer Rayleigh- und Lovewellen. Diese Wellen erfassen im Periodenbereich von 100 – 250 sec einen Tiefenbereich von 400 km (Tanimoto & Anderson, 1984) und damit gerade den interessanten Bereich des oberen Mantels. Die Autoren invertierten in einem globalen Modell simultan laterale Heterogenitäten und azimutale Anisotropie aus den Laufwegen von 560 Rayleigh- und 380 Love-Wellen. Abbildung 8.13 zeigt die Ergebnisse der Anisotropie-Inversion.

Für die Küstenbereiche von Dronning Maud Land stimmt die Richtung der schnellen Phasengeschwindigkeiten mit $\sim 130^\circ$ nicht mit der in dieser Arbeit ermittelten überein. Untersuchungen

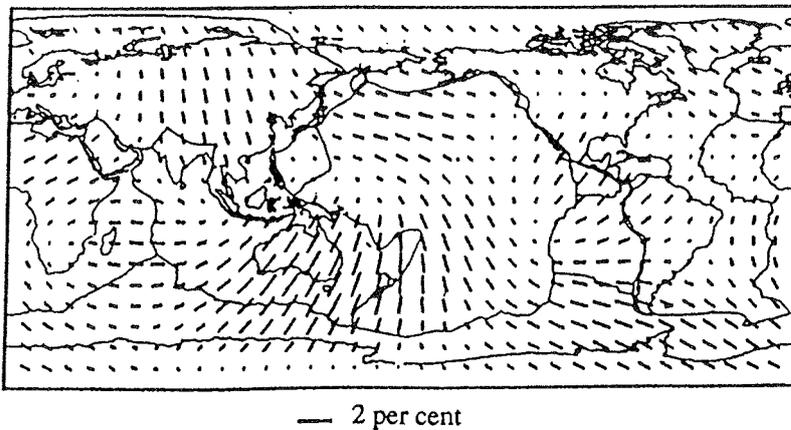


Abbildung 8.13 Karte globaler azimutaler Anisotropie aus Tanimoto & Anderson (1984). Die Richtungen der Linien repräsentieren die schnellen Phasengeschwindigkeiten der Rayleigh-Wellen bei einer Periode von 200sec und deren Länge die Stärke der Anisotropie.

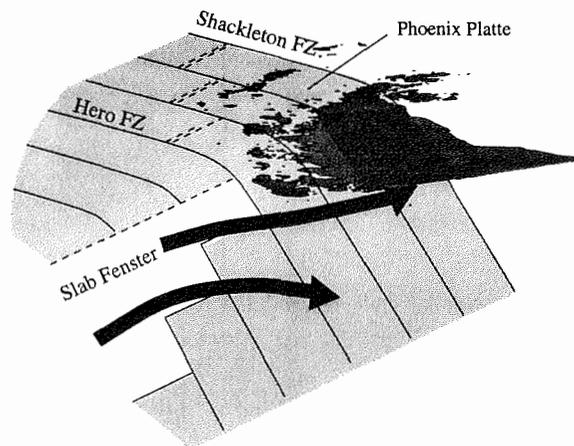
mit derselben Methode speziell für Antarktika (Roult *et al.*, 1994) führten für die Küstenbereiche Dronning Maud Lands zu dem gleichen Ergebnis. Jedoch ist die laterale Auflösung dieser Methode aufgrund der Verwendung der großen Wellenlängen sehr gering. Die von regionalen tektonischen Prozessen verursachte Anisotropie ist damit nicht auflösbar. Es werden nur großskalige Konvektionsmuster des oberen Mantels aufgelöst.

8.2 Palmer Station

Die Anisotropie-Analysen der vier verwendeten Phasen weisen allesamt eine relativ starke Anisotropie von im Mittel $\delta t = 1.86 \text{ sec}$ auf (Abschnitt 7.1 und Abbildung 8.1). Mit einem Anisotropie-Koeffizienten von $k = 4 \%$ ergibt das eine Mächtigkeit der anisotropen Region von 200 km . Diese erstreckt sich damit deutlich bis in die Asthenosphäre. Die schnelle Richtung der Anisotropie liegt bei 80° und weicht von der APM-Richtung mit 220° erheblich ab. Die im Bereich der Station ehemals aktive Subduktionszone der Phönix-Platte hatte eine Bewegungsrichtung senkrecht zum heutigen westlichen Kontinentalrand der Antarktischen Halbinsel (z.B. Barker 1982; Larter & Barker, 1991). Mit diesem Azimut von ca. 130° findet sich die schnelle Anisotropie-Richtung genau zwischen heutiger APM- und der damaligen Subduktionsrichtung.

Die großen Abweichungen der Splitting-Parameter der Einzelmessungen für verschiedene Polarisationsrichtungen als auch die unterschiedlichen Ergebnisse aus beiden Inversionsverfahren lassen komplizierte anisotrope Strukturen im Mantel unterhalb PMSA vermuten. Vermutlich sind diese auf den Einfluß der ehemaligen, geneigten Subduktionsplatte unterhalb der Antarktischen Halbinsel (Larter & Barker, 1991) zurückzuführen.

Möglicherweise sind diese großen Differenzen auf eine insgesamt komplizierte Anisotropie-Struktur zurückzuführen, die auf einer Interaktion zwischen der Wirkung der subduzierten Platte und dem asthenosphärischen Fließen beruhen. Die subduzierte Platte selbst könnte auch eine den Asthenosphärenfluß selbst modifizierende Wirkung haben, was wiederum zu noch komplizierteren Anisotropie-Strukturen führt. Ähnliche Beobachtungen in der östlichen Karibik haben an der Subduktionszone des Antillen Bogens gezeigt, daß die dort abtauchende Platte eine modifizierende Wirkung auf den Fluß in der Asthenosphäre hat, der sich in den SKS-Analysen mit ebenfalls großen Laufzeitdifferenzen abzeichnet (Russo *et al.*, 1996). In ähnlicher Weise zeigt sich ein Einfluß der abtauchenden Nazca-Platte unter den südamerikanischen Kontinent auf den Mantelfluß unterhalb der abtauchenden Platte (Russo & Silver, 1994; Russo & Silver, 1996). Dieser zeigt sich in einem Graben-parallelen Mantelfluß in nord-südlicher Richtung um die abtauchende Platte herum und beeinflusst damit die tektonischen Mechanismen in der Scotia- und karibischen Platte (Alvarez, 1982; Russo & Silver, 1994). In ähnlicher Weise könnte ein Deformationsmuster um die ehemalige Subduktionsplatte herum die beobachtete Anisotropie-Richtung erklären



Modifiziert nach Barker & Austin, 1998

Abbildung 8.14 Ein mögliches Modell, daß die ungewöhnlich hohen δt -Werte an PMSA erklären würde. Hohe δt -Werte und die Richtung können durch einen rezenten Asthenosphärenfluß durch ein Slab-Fenster der subduzierenden Phönixplatte im Bereich der zum Stillstand gekommenen Subduktion erklärt werden.

(Abbildung 8.14). Unterstützt wird mit dieser Beobachtung die Theorie von Barker & Austin (1998), daß es einen Mantelfluß südwestlich um die abtauchende Phoenixplatte herum in die Weddell See geben muß.

Aus diesen wenigen Messungen läßt sich noch keine klare Aussage über die Ursachen dieser starken Anisotropie ziehen. Zusammenfassend läßt sich jedoch sagen, daß die Subduktionsplatte zusammen mit Deformationen in der Asthenosphäre für die gemessene Anisotropie verantwortlich sein muß.

8.3 South Pole Station

Von den beiden an SPA untersuchten Kernphasen zeigt die eine deutliches Anzeichen für Splitting mit einer Laufzeitdifferenz von über einer Sekunde, während die zweite Messung ein "Null"-Ergebnis liefert (Abschnitt 7.2). Die "Null"-Richtungen fallen nicht mit der aus der schnellen Richtung der ersten Messung erhaltenen überein und bilden zu dieser Winkel von 35° bzw. 125° .

Aus dem ersten Ereignis läßt sich die schnelle Richtung der Anisotropie mit 160° gut mit der APM-Richtung korrelieren. SPA liegt auf dem Ostantarktischen Kraton und ist etwa 250 km von den aufgeschlossenen Teilen des Transantarktischen Gebirges (TAM) entfernt. Die Anisotropie-Richtung ist annähernd senkrecht zur Streichrichtung des TAM (Abbildung 8.1) und damit nicht im Zusammenhang mit VCD früherer orogener Ereignisse, z.B. der Ross-Orogenese (ca. 530 Ma) zu sehen. Vermutlich sind auch hier im Archaikum angelegte Strukturen des ostantarktischen Kratons für die beobachtete Anisotropie verantwortlich.

Aus diesen beiden, zudem nicht konsistenten, Anisotropie-Messungen läßt sich leider keine qualitative Aussage über die Ursachen der Anisotropie gewinnen. Erwiesen ist jedoch aus der Messung mit positivem Ergebnis, daß anisotrope Strukturen im Mantel unterhalb des Südpols vorhanden sind.

9. Schlußfolgerungen und Ausblick

Die Analysen des Scherwellensplittings an den Stationen WAZ und OLY haben gezeigt, daß eine ausgeprägte seismische Anisotropie im oberen Mantel Dronning Maud Lands vorhanden ist. Die Analysen sind sehr konsistent und ermöglichen ein Modell zur Erklärung der gemessenen Splitting-Parameter, nach dem die Anisotropie-Richtungen mit dem initialen Rifting Gondwanas und im Archaikum angelegten Strukturen in Verbindung gebracht werden können. Die wichtigsten Ergebnisse im einzelnen sind:

- Mit $\delta t = 1.14 \text{ sec}$ liegt die Stärke der Anisotropie im Bereich der weltweit gefundenen Werte für kontinentale Stationen.
- Die schnelle Richtung der Anisotropie ist annähernd orthogonal zur rezenten APM-Richtung (absolute Plattenbewegung), und kann daher mit APM nicht erklärt werden.
- Mindestens zwei Schichten seismischer Anisotropie mit verschiedenen Anisotropieparametern können nachgewiesen werden.
- Die obere Schicht korreliert gut mit Strukturen des Kaapvaal Kratons im südlichen Afrika und unterstützt die Vermutung, daß es sich bei dem Grunehogna Kraton um ein Bruchstück des Kaapvaal Kratons handelt, das mit dem Aufbrechen Gondwanas von diesem getrennt wurde.
- Die untere Schicht deutet auf Rift-bezogene (fossile) oder durch den ehemaligen Mantel-“plume“ angelegte Ursachen hin.
- Ein Einfluß früherer Gebirgsbildungs-Episoden als Ursache für die Anisotropie kann nicht ausgeschlossen werden.
- Durch die Zweischichtmodellierung gelingt es, im Präkambrium angelegte und während des Gondwana-Aufbruchs überprägte Strukturen gemeinsam zu erklären.
- Eine mögliche Blattverschiebung entlang des Explora Escarpment, wie von vielen Autoren vermutet (z.B. Grunow, 1993; Lawver *et al.*, 1992), kann nicht ausgeschlossen werden.

-
- Kompliziertere Modelle seismischer Anisotropie sind nicht auszuschließen, jedoch werden die vorliegenden Analyse-Ergebnisse durch einfache Modelle azimuthaler Anisotropie (Einschichtfall und Zweischichtfall) hinreichend gut wiedergegeben.

Die Ergebnisse der Stationen PMSA und SPA sind durch weitaus weniger Analysen belegt, geben aber dennoch deutliche Hinweise auf das Vorhandensein seismischer Anisotropie. Insbesondere für PMSA sind rezente Fließmechanismen in der Asthenosphäre belegt, die von der abtauchenden Phönixplatte modifiziert werden.

Die weitere Sammlung und Analyse geeigneter Scherwellen an WAZ und OLY könnte eine Verbesserung der Modellvorstellungen ermöglichen. Insbesondere wären dabei die bisher nicht berücksichtigten Polarisations-Richtungen von besonderem Interesse. Zusätzlich sollte Scherwellensplitting an der geplanten Breitbandstation (SNAA) der neuen südafrikanischen Überwinterungsstation SANAE IV untersucht werden. Diese Station auf dem Nunatak Vesleskarvet etwa 250 km südwestlich der Neumayer Station wäre eine gute räumliche Ergänzung zu den an WAZ und OLY erzielten Analyse-Ergebnissen und könnte helfen, die hier entwickelten Vorstellungen zu den seismische Anisotropie erzeugenden Mechanismen zu verbessern.

Die systematische Untersuchung seismischer Anisotropie an anderen Stationen Antarktikas könnten dazu beitragen, die tektonische Entwicklung des Kontinents besser verstehen zu lernen. Mit einbezogen werden sollten auch die beiden 1996 in Betrieb genommenen Breitbandstationen EFI (Falkland Inseln) und HOPE (Süd Georgien). Anisotropie-Untersuchungen an Registrierungen dieser Stationen könnten weitere Informationen zur Entwicklungsgeschichte des Weddell-Meeres liefern. Insbesondere die Verwendung temporärer Arrays könnte dazu beitragen, die tektonische Entwicklungsgeschichte in Regionen besser zu verstehen, in denen die Vorstellungen dazu noch ungenau sind. Die Verwendung temporärer Arrays im Hinblick auf Analyse von Scherwellen-Splitting in tektonisch interessanten Gebieten kann wichtige Aufschlüsse über die Mantelstruktur in diesen Regionen liefern (z.B. Gao *et al.*, 1994; Savage *et al.* 1996 oder Wysesession *et al.*, 1996). Dieses wäre insbesondere im Bereich der Mikroplatten der Westantarktis interessant. Aufgrund der weltweit beobachteten guten Korrelation der Symmetrie-Richtungen seismischer Anisotropie mit der Oberflächengeologie könnte die infolge der Eisbedeckung der Antarktis bisher unbekannt geologischen Strukturen durch die Kartierung seismischer Anisotropie "sichtbar" gemacht werden. Temporäre Arrays haben den Vorteil, daß sie mit relativ geringem logistischen Aufwand (der in der Antarktis natürlicherweise größer ist als in anderen Regionen) betrieben werden können und Aussagen über lokal variierende Deformationsmuster des oberen Mantels liefern können.

10. Literaturverzeichnis

- Adams RD & Akoto AM 1987. *Earthquakes in continental Antarctica*, Journal of Geodynamics, **6**: 263 – 270.
- Ahern T 1994. *Data Management System*, The IRIS Consortium, 1994 Annual Report: 4 – 7.
- Alvarez W 1982. *Geological evidence for the geographical pattern of mantle return flow and the driving mechanism of plate tectonics*, J. Geophys. Res., **87**(B8): 6697 – 6710.
- Aki K & Richards PG 1980. *Quantitative Seismology – Theory and Methods*, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Alsina D & Snieder RK 1995. *Small-scale sublithospheric continental deformation: constraints from SKS splitting observations*, Geophys. J. Int., **123**: 431 – 448.
- Ansel V & Nataf HC 1989. *Anisotropy beneath 9 stations of the Geoscope broadband network as deduced from shear-wave splitting*, Geophys. Res. Lett., **88**: 5850 – 5864.
- Babuška V & Cara M 1991. *Seismic anisotropy in the Earth*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 217 pp.
- Bamford D 1977. *P_n -velocities in a continental upper mantle*, Geophys. J. R. Astr. Soc., **49**: 29 – 48.
- Barker PF 1982. *The cenozoic history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: ridge-crest interactions*, Jour. Geol. Soc. Lond., **139**: 787 – 781.
- Barker HN & Austin AA 1998. *Rift propagation, detachment faulting, and associated magmatism in Bransfield Strait, Antarctic Peninsula*, J. Geophys. Res., **103**(B10), 24017 – 24043.
- Barruol G, Silver PG & Vauchez A 1997. *Seismic anisotropy in the eastern United States: Deep structure of a complex continental plate*, J. Geophys. Res., **102**(B4): 8329 – 8348.

-
- Birch F 1960. *The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars*, J. Geophys. Res., **66**: 1083 – 1102.
- Buland R & Chapman CH 1983. *The computation of seismic travel times*, Bull. Seismol. Soc. Am., **73**: 1271 – 1302.
- Bulletin of the International Seismological Centre 1993, 1994. International Seismological Centre, Newbury, U.K.
- Cox KG 1992. *Karoo igneous activity, and the early stages of the break-up of Gondwanaland*, in Storey BC, Alabaster T & Pankhurst RJ (Hrsgb.), *Magmatism and Causes of Continental Break-up*, Geological Society Special Publication, **68**: 137 – 148.
- Crampin S 1985. *Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting*, Geophysics, **50**(1): 142 – 152.
- Curtis ML & Storey BC 1996. *A review of geological constraints on the pre-break-up position of the Ellsworth Mountains within Gondwana: implications for Weddell Sea evolution*, in Storey BC, King EC & Livermore RA (Hrsgb.), *Weddell Sea tectonics and Gondwana break-up*, Geological Society Special Publications **108**: 11 – 30.
- Dalziel IWD & Elliot DH 1982. *West Antarctica: problem child of Gondwanaland*, Tectonics, **1**: 3 – 19.
- Dalziel IWD, Dalla Salda LH & Gahagan LM 1994. *Paleozoic Laurentia-Gondwana interaction and the origin of the Appalachian-Andean mountain system*, Geol. Soc. Am., Bulletin, **106**: 243 – 252.
- Dziewonski AM & Anderson DL 1983. *Travel times and station corrections for P waves at tele-seismic distances*, J. geophys. Res., **88**: 3295 – 3314.
- Eckstaller A 1988. *Seismologische Untersuchungen mit Daten der Georg-von-Neumayer Station, Antarktis, 1982 – 1984*, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- Eckstaller A, Brodscholl A, Mandler H, Miller G, Nixdorf U, Patzelt M & Rott H 1991. *Refraktions-seismik*, in: Miller H & Oerter H (Hrsgb.), *Die Expedition ANTARKTIS -VII mit FS "Polarstern" 1989/90.*, Bd. 86 von *Berichte zur Polarforschung*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven: 108 – 123.
- Eckstaller A & Miller H 1992. *Seismological research at Georg-von-Neumayer base, Antarctica, Part II: The analysis of travel time residuals*, Polarforschung, **6**(1): 39 – 50.
- Eckstaller A, Müller C, Nixdorf I & Rogenhagen J 1997. *The geophysical observatory at Neumayer Station, Antarctica*, in Ricci CA (Hrsg): *The Antarctic region: Geological Evolution and Processes*, Proceedings of the VII International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Siena, 1995. Terra Antarctica Publication, Siena: 1039 – 1048.

10. Literaturverzeichnis

- Elliot DH 1992. *Jurassic magmatism and tectonism associated with Gondwanaland break-up: an Antarctic perspective*, in Storey BC, Alabaster T & Pankhurst RJ (Hrsgb.), *Magmatism and Causes of Continental Break-up*, Geological Society Special Publication, **63**: 165 – 184.
- Fischer MF & Wiens DA 1996. *The depth distribution of mantle anisotropy beneath the Tonga subduction zone*, Earth Planet. Sci. Lett., **142**: 253 – 260.
- Fischer KM & Yang X 1994. *Anisotropy in Kuril-Kamchatka subduction zone structure*, Geophys. Res. Lett., **21**(1): 5 – 8.
- Forsyth DW 1975. *The early structural evolution and anisotropy of the oceanic upper-mantle*, Geophys. J. R. Astron. Soc., **43**: 103 – 162.
- Gao S, Davis PM, Liu H, Slack PD, Zorin YuA, Mordvinova VV, Kozhevnikov VM & Meyer RP 1994. *Seismic anisotropy and mantle flow beneath the Baikal rift zone*, Nature, **371**: 149 – 151.
- Gripp AE & Gordon RG 1991. *Current plate velocities relative to the hotspots incorporating the Nuvel-1 global plate motion model*, Geophys. Res. Lett., **17**: 1109 – 1112.
- Groenewald PB, Grantham GA & Watkeys MK 1991. *Geological evidence for a proterozoic to mesozoic link between southeastern Africa and Dronning Maud Land, Antarctica*, J. Geol. Soc. Lond., **148**: 1115 – 1123.
- Grunow AM 1991. *New paleomagnetic data from the Antarctic Peninsula and their tectonic implications*, J. Geophys. Res., **98**(B11): 13815 – 13833.
- Grunow AM, Kent DV & Dalziel IWD 1991. *New paleomagnetic data from Thurston Island: implications for the tectonics of West Antarctica and the Weddell Sea*, J. Geophys. Res., **96**(B11): 17935 – 17954.
- Helfrich G, Silver PG & Given H 1994. *Shear-wave splitting variation over short spatial scales on continents*, Geophys. J. Int., **119**: 561 – 573.
- Hess HH 1964. *Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans*, Nature, **203**: 629 – 631.
- Hergt JM, Chappell BW, McCullock MT, McDougall I & Chivas AR 1989. *Geochemical and isotopic constraints on the origin of jurassic dolerites of Tasmania*, J. Petr., **30**: 298 – 305.
- Hinz K & Krause W 1981. *The continental margin of Queen Maud Land, Antarctica: Seismic sequences, structural elements and geological development*, Geol. Jahrb., **E22**: 3 – 28.
- Hübscher C 1994. *Krustenstrukturen und Verlauf des Kontinentalrandes im Weddell-See/Antarktis*, Bd. 147 von *Berichte zur Polarforschung*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.
- Hübscher C, Jokat W & Miller H 1996. *Crustal structure of the Antarctic continental margin in the*

-
- eastern Weddell Sea, in Storey BC, King EC & Livermore RA (Hrsgb.), *Weddell Sea tectonics and Gondwana break-up*, Geological Society Special Publications **108**: 201 – 211.
- Hübscher C, Jokat W & Miller H 1996. *Structure and origin of southern Weddell Sea crust: results and implications*, in Storey BC, King EC & Livermore RA (Hrsgb.), *Weddell Sea tectonics and Gondwana break-up*, Geological Society Special Publications **108**: 165 – 166.
- Jacobs J 1991. *Strukturelle Entwicklung und Abkühlungsgeschichte der Heimefrontfjella (Westliches Dronning Maud Land / Antarktika*, Bd. 97 von *Berichte zur Polarforschung*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.
- Jacobs J & Thomas RJ 1996. *Pan-African rejuvenation of the c. 1.1 Ga Natal Metamorphic Province (South Africa): K-Ar muscovite and titanite fission track evidence*, Jour. Geol. Soc. Lond., **153**: 971 – 978.
- James DE & Assumpção M 1996. *Tectonic implications of S-wave anisotropy beneath SE Brazil*, Geophys. J. Int., **126**: 1 – 10.
- Jokat W, Hübscher C, Meyer U, Oszko L, Schöne T, Versteeg W & Miller H 1996. *The continental margin off East Antarctica between 10°W and 30°W*, in Storey BC, King EC & Livermore RA (Hrsgb.), *Weddell Sea tectonics and Gondwana break-up*, Geological Society Special Publications **108**: 129 – 141.
- Kanasevich ER 1981. *Time sequence analysis in geophysics*, The University of Alberta Press, Edmonton.
- Kaneshima S & Silver PG 1995. *Anisotropic loci in the mantle beneath central Peru*, Phys. Earth Planet. Int., **88**: 257 – 272.
- Kennett BLN 1991. *IASPEI 1991 seismological tables*, Research School of Earth Sciences, Australian National University, 167 pp.
- Kind R, Kosarev GL, Makeyeva LI & Vinnik LP 1985. *Observations of laterally inhomogeneous anisotropy in the continental lithosphere*, Nature, **318**: 358 – 361.
- King EC, Livermore RA & Storey BC 1996. *Weddell Sea tectonics and Gondwana break-up: an introduction*, in Storey BC, King EC & Livermore RA (Hrsgb.), *Weddell Sea tectonics and Gondwana break-up*, Geological Society Special Publications **108**: 1 – 10.
- Kobarg W 1988. *Die gezeitenbedingte Dynamik des Ekström-Schelfeises, Antarktis*, Bd. 50 von *Berichte zur Polarforschung*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.
- Kristofferson Y & Haugland K 1986. *Geophysical evidence for the East Antarctic boundary in the Weddell Sea*, Nature, **322**: 538 – 541.

10. Literaturverzeichnis

- Kubo A, Hiramatsu Y, Kanao M, Ando M & Terashima T 1995. *An analysis of SKS splitting at Syowa Station in Antarctica*, in *Proceedings of the NIRP Symposium on Antarctic Geosciences*, National Institute of Polar Research, Tokyo, **8**: 25 – 34.
- Kudryavtzev GA, Butzenko VV & Kadmina IN 1991. *Crustal sections across the western Dronning Maud Land continental margin from geophysical data*, in: Abstracts, Sixth international symposium on Antarctic Earth sciences, National Institute for Polar Research, Tokyo: 330 – 335.
- Kumazawa M & Anderson OL 1969. *Elastic moduli, pressure derivatives and temperatures derivatives of single-crystal olivine and single-crystal forsterite*, J. Geophys. Res., **74**: 5961 – 5972.
- LaBrecque JL & Barker PF 1981. *The age of the Weddell Basin*, Nature, **290**: 489 – 492.
- Larker RD & Barker PF 1991. *Effects of ridge crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading: forces on a young subducting plate*, Jour. geophys. res. **96**(12): 19583 – 19607.
- Lawver LA, Royer J-Y, Sandwell DT & Scotese CR 1991. *Evolution of the Antarctic continental margins*, in Thomson MRA, Crame JA & Thomson JW (Hrsgb.), *Geological evolution of Antarctica*, Cambridge University Press, 533 – 539.
- Lippmann E 1982. *Umwandlung eines elektrodynamischen Seismometers in einen Beschleunigungsaufnehmer und Entwicklung eines Filters zur Simulation eines niederfrequenten Seismometers*, Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- Love AEH 1927. *A treatise on the mathematical theory of elasticity*, Dover Publ., New York, 1944, 643 pp.
- McNamara DE, Owens TJ, & Silver PG 1994. *Shear wave anisotropy beneath the Tibetan Plateau*, J. Geophys. Res., **99**: 13655 – 13665.
- Mainprice D & Silver PG 1993. *An evaluation of the factors affecting shear wave splitting in the mantle from petrofabric measurements of mantle xenoliths*, Phys. Earth Planet. Int., **8**: 257 – 280.
- Makeyeva LI, Vinnik LP & Roecker SW 1992. *Shear-wave splitting and small-scale convection in the continental upper mantle*, Nature, **358**: 144 – 147.
- Maupin V 1994. *On the possibility of anisotropy in the D'' layer as inferred from polarizations of diffracted S-waves*, Phys. Earth Planet. Int., **87**: 1 – 32.
- McKenzie D 1979. *Finite deformation during fluid flow*, Geophys. J. R. astron. Soc., **58**: 689 – 751.
- Meade C, Silver PG & Kaneshima S 1995. *Laboratory and seismological observations of lower mantle isotropy*, Geophys. Res. Lett., **22**: 1293 – 1296.
- Miller H, DeBatist M, Jokat W, Kaul N, Steinmetz S, Uenzelmann-Neben G & Versteeg W 1990. *Revised interpretation of tectonic features in the southern Weddell Sea, Antarctica*, Polarfor-

-
- schung, **60**(1): 33 – 38.
- Montagner J-P & Tanimoto T 1990. *Global upper mantle tomography of seismic velocities and anisotropies*, J. Geophys. Res., **96**(B20): 20337 – 20351.
- Mooney WD 1995. *Continental roots go with the flow*, Nature, **375**: 15.
- Moyes AB, Barton JM & Groenewald PB 1993. *Late proterozoic to early paleozoic tectonism in Dronning Maud Land, Antarctica: supercontinent fragmentation and amalgamation*, J. Geol. Soc., **150**: 833 – 842.
- Nataf H-C 1991. *SPHERAY 6V0*, Tribune de Libre-Exchange de Logiciel de Sismologie, Institut de Physique du Globe de Paris, Frankreich.
- Nataf H-C, Nakanishi I & Anderson DL 1984. *Measurements of mantle wave velocities and inversion for lateral heterogeneities and anisotropy 3. Inversion*, J. Geophys. Res., **91**: 7261 – 7307.
- Nicolas A 1992. *Why fast polarization directions of SKS seismic waves are parallel to mountain belts*, Phys. Earth Planet. Inter., **78**: 337 – 342.
- Nicolas A & Christensen NI 1987. *Formation of anisotropy in upper mantle peridotites*, in Fuchs K & Froidevaux C (Hrsgb.) *Composition, Structure and Dynamics of the Lithosphere-Asthenosphere System*, Am. Geophys. Union, Washington D.C., **16**: 111 – 123.
- Nicolas A & Poirier JP 1976. *Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks*, Wiley, New York, 444 pp.
- Nixdorf U 1992. *Dehnungsbeben an einer Störungszone im Ekström-Schelfeis nördlich der Georg-von-Neumayer Station, Antarktis. – Eine Untersuchung mit seismologischen und geodätischen Methoden*, Bd. 108 von *Berichte zur Polarforschung*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.
- Nuttli O 1961. *The effect of the Earth's surface on the S-wave particle motion*, Bull. Seismol. Soc. Am., **51**: 237 – 246.
- Nuttli O 1964. *The determination of S-wave polarization angles for an Earth model with crustal layering*, Bull. Seismol. Soc. Am., **54**: 1429 – 246.
- Paech H-J 1997. *Central Dronning Maud Land: Its History from Amalgamation to Fragmentation of Gondwana*, Terra Antarctica, **4**(1): 41 – 49.
- Peters M 1989. *Die Vulkanite im westlichen und mittleren Neuschwabenland, Vestfjella und Ahlmannryggen, Antarktika. Petrographie, Geochemie, Geochronologie, Paläomagnetismus, geotektonische Implikationen*, Bd. 61 von *Berichte zur Polarforschung*, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.

10. Literaturverzeichnis

- Plomerova J, Síleny J & Babuška V 1996. *Joint interpretation of upper mantle anisotropy based on teleseismic P-travel time delays and 3-D inversion of shear-wave polarizations*, Phys. Earth Planet. Int., **95**: 293 – 310.
- Raitt RW, Shor GG, Francis TJG & Morris GB 1969. *Anisotropy of the Pacific upper mantle*, J. Geophys. Res., **74**: 3094 – 3109.
- Ribe NM 1989a. *A continuum theory for lattice preferred orientation*, Geophys. J. Int., **97**: 199 – 207.
- Ribe NM 1989b. *Seismic anisotropy and mantle flow*, J. Geophys. Res., **96**: 4213 – 4223.
- Roult G, Rouland D & Montagner J-P 1994. *Antarctica II: Upper-mantle structure from velocities and anisotropy*, Phys. Earth Planet. Int., **84**: 33 – 57.
- Russo RM & Silver PG 1994. *Trench-parallel flow beneath the Nazca Plate from seismic anisotropy*, Science, **263**: 1105 – 1111.
- Russo RM & Silver PG 1996. *Cordillera formation, mantle dynamics, and the Wilson cycle*, Geology, **24**(6): 511 – 514.
- Russo RM, Silver PG, Franke M, Ambeh WB & James DE 1996. *Shear wave splitting in northeast Venezuela, Trinidad, and the eastern Caribbean*, Phys. Earth Planet. Int., **95**: 251 – 275.
- Sandoval L & Holcomb G 1993. *IRIS/ASL GSN station installation at Palmer Station, Antarctica*, IRIS Newsletter, **8**(3): 12 – 13.
- Sandvol E, Ni JF, Ozalaybey S & Schue J 1992. *Shear-wave splitting in the Rio Grande Rift*, Geophys. Res. Lett., **21**: 2337 – 2340.
- Savage MK & Silver PG 1993. *Mantle deformation and tectonics: constraints from seismic anisotropy in western United States*, Phys. Earth Planet. Int., **78**: 207 – 227.
- Savage MK, Sheehan AF & Lerner-Lam A 1996. *Shear wave splitting across the Rocky Mountain front*, Geophys. Res. Lett., **23**(17): 2267 – 2270.
- Scherbaum F & Johnson J 1993. *Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis, Version 4.0*, Benutzer-Handbuch.
- Schmidt DL & Rowley PD 1986. *Continental rifting and transform faulting along the jurassic transantarctic rift, Antarctica*, Tectonics, **5**: 279 – 291.
- Shearer PM & Orcutt JA 1986. *Compressional and shear wave anisotropy in the oceanic lithosphere – the Ngendei seismic refraction experiment*, Geophys. J. R. Astro. Soc., **87**: 967 – 1003.
- Silver PG 1996. *Seismic anisotropy beneath the continents: Probing the depths of geology*, Annu.

-
- Rev. Earth Planet. Sci., **24**: 385 – 432.
- Silver PG & Chan WW 1988. *Implications for continental structure and evolution from seismic anisotropy*, Nature, **335**: 34 – 39.
- Silver PG & Chan WW 1991. *Shear-wave splitting and subcontinental mantle deformation*, J. Geophys. Res., **96**(B16): 16429 – 16454.
- Silver PG & Savage MK 1994. *The interpretation of shear-wave splitting in the presence of two anisotropic layers*, Geophys. J. Int., **119**, 949 – 963.
- Storey BC, Alabaster T, Hole MJ, Pankhurst RJ & Wever HE 1992. *Role of subduction-plate boundary forces during the initial stages of Gondwana break-up: evidence from the proto-Pacific margin of Antarctica*, in Storey BC, Alabaster T & Pankhurst RJ (Hrsgb.), *Magmatism and Causes of Continental Break-up*, Geological Society Special Publication, **68**: 149 – 163.
- Tanimoto T & Anderson DL 1985. *Lateral heterogeneity and anisotropy of the upper mantle: Love and Rayleigh waves 100-200 s*, J. Geophys. Res., **90**: 1842 – 1858.
- Van der Hilst R 1995. *Complex morphology of subducted lithosphere in the mantle beneath the Tonga trench*, Nature, **374**: 154 – 157.
- Vauchez A & Nicolas A 1991. *Mountain building: strike-parallel motion and mantle anisotropy*, Tectonophysics, **186**: 183 – 201.
- Vidale JE 1986. *Complex polarization analysis of particle motion*, Bull. Seismol. Soc. Am., **76**: 1393 – 1405.
- Vinnik LP, Farra V & Romanowicz B 1989. *Azimuthal anisotropy in the Earth from observations of SKS at GEOSCOPE and NARS broadband stations*, Bull. Seismol. Soc. Am., **79**: 1542 – 1558.
- Vinnik LP, Green RWE & Nicolaysen LO 1995a. *Recent deformations of the deep continental roots in southern Africa*, Nature, **375**: 50 – 52.
- Vinnik LP, Kosarev GL & Makeyeva, LI 1984. *Anisotropy in the lithosphere from the observations of SKS and SKKS*, Dokl. Akad. Nauk USSR, **278**: 1335 – 1339 (in Russisch).
- Vinnik LP, Makeyeva LI, Milev A & Usenko Y 1992. *Global patterns of azimuthal anisotropy and deformation in the continental mantle*, Geophys. J. Int., **111**: 433 – 447.
- Wessel P & Smith WHF 1991. *Free software helps map and display data*, EOS Trans. Amer. Geophys. U., **72**: 445 – 446.
- White RS & McKenzie D 1989. *Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts*, J. Geophys. Res., **94**(B6): 7685 – 7729.

10. Literaturverzeichnis

Wysession ME, Fischer KM, Clarke TJ, Ghassan IA, Fouch MJ, Shore PJ, Valenzuela RW, Aibing L & Zaslou JL 1996. *Slicing into the Earth*, EOS Trans. Amer. Geophys. U., **77**(48): 477 – 482.

A. Herdparameter der verwendeten teleseismischen Ereignisse

Hier sind sämtliche in dieser Arbeit verwendeten teleseismischen Ereignisse zusammengestellt. Die angegebenen Herdparameter sind bis 09/1994 den Bulletins des International Seismological Centre (ISC) entnommen, für den folgenden Zeitraum bis 12/1995 den monatlichen Preliminary Determinations of Epicentres (PDE) des National Earthquake Information Centres (NEIC) des United States Geological Survey (USGS) sowie die Bebenparameter für das Jahr 1996 den wöchentlichen PDE's.

#	Herdzeit (yyyy/mm/dd hh:mm:ss.s)	Geogr. Breite (Grad)	Geogr. Länge (Grad)	Herdtiefe (km)	mb	ms	Region
1	1992/07/11 10:44:21.5	-22.040	-178.639	381.0	6.1		South of Fiji Islands
2	1992/10/30 02:29:49.0	29.937	138.912	402.0	5.9		South of Honshu, Japan
3	1992/12/12 05:29:26.3	-8.480	121.896	28.0	6.5	7.5	Flores Region, Indonesia
4	1992/12/20 20:52:47.2	-6.582	130.393	78.0	6.6	7.0	Banda Sea
5	1993/01/15 11:06:05.9	43.300	143.691	102.0	6.1		Hokkaido, Japan
6	1993/03/20 09:20:32.6	-56.084	-27.803	116.0	6.0		South Sandwich Islands Region
7	1993/05/24 23:51:30.2	-22.630	-66.540	238.0	6.6		Jujuy Province, Argentina
8	1993/08/08 08:34:24.9	12.982	144.801	59.0	7.1	8.0	South of Mariana Islands
9	1993/08/09 12:42:48.1	36.379	70.868	215.0	6.2		Hindu Kush Region, Afghanistan
10	1993/10/11 15:54:22.3	31.987	137.890	365.0	6.3		South of Honshu, Japan
11	1994/01/10 15:53:49.6	-13.310	-69.387	589.0	6.4		Peru-Bolivian Border Region
12	1994/01/17 12:30:55.3	34.213	-118.537	18.0	6.4	6.8	Southern California
13	1994/03/09 23:28:06.8	-18.039	-178.413	562.0	6.6		Fiji Islands Region
14	1994/04/29 07:11:29.7	-28.299	-63.252	562.0	6.3		Santiago del Estero Prov., Arg.
15	1994/05/10 06:36:28.4	-28.501	-63.096	601.0	6.4		Santiago del Estero Prov., Arg.
16	1994/06/06 20:47:43.9	2.990	-76.030	33.0	6.3	6.7	Colombia
17	1994/06/09 00:33:16.2	-13.840	-67.550	631.0	7.0		Northern Bolivia
18	1994/07/02 05:46:54.1	-21.071	-178.695	566.0	5.3		Fiji Islands Region

A. Herdparameter der verwendeten teleseismischen Ereignisse

#	Herdzeit (yyyy/mm/dd hh:mm:ss.s)	Geogr. Breite (Grad)	Geogr. Länge (Grad)	Herdtiefe (km)	mb	ms	Region
19	1994/07/02 06:43:15.9	-21.115	-178.729	576.0	5.1		Fiji Islands Region
20	1994/07/05 02:59:42.4	-16.301	-177.472	413.0	5.4		Fiji Islands Region
21	1994/07/13 11:45:23.4	-7.532	127.770	158.0	6.5		Banda Sea
22	1994/07/19 11:59:44.5	-23.438	-175.470	50.0	5.3		Tonga Islands
23	1994/07/21 18:36:31.7	42.340	132.865	471.0	6.5		Near East Coast of Russia
24	1994/08/19 10:02:51.3	-26.642	-63.421	564.0	6.4		Santiago del Estero Prov., Arg.
25	1994/09/16 06:20:18.7	22.528	118.711	13.0	6.5	6.7	Taiwan Region
26	1994/12/10 16:17:38.5	18.136	-101.384	48.0	6.6	6.2	Guerrero, Mexico
27	1995/04/07 22:06:58.2	-15.163	-173.559	38.0	6.8	8.0	Tonga Islands
28	1995/04/13 02:43:38.0	-13.126	170.285	637.0	5.6		Vanuatu Islands Region
29	1995/05/13 21:00:53.9	-5.286	108.838	581.0	5.9		Java Sea
30	1995/09/23 16:05:47.9	-5.674	104.029	51.0	5.7	5.7	Southern Sumatera, Indonesia
31	1995/10/09 13:43:42.1	-21.380	169.861	108.0	5.3	5.6	Loyalty Islands Region
32	1995/10/18 10:37:24.1	28.142	130.375	14.0	6.5	6.9	Ryukyu Islands
33	1995/10/19 02:41:36.7	28.406	130.638	36.0	6.1	6.9	Ryukyu Islands
34	1995/10/29 19:40:56.4	-21.567	-179.672	600.0	5.5		Fiji Islands Region
35	1995/11/05 16:30:00.3	-4.995	103.308	40.0	6.3	6.2	Southern Sumatera, Indonesia
36	1995/11/13 07:38:45.9	-14.958	-173.601	14.0	5.6	5.9	Samoa Islands Region
37	1995/12/10 23:47:00.5	-21.175	-178.415	412.0	5.8		Fiji Islands Region
38	1995/12/19 23:28:13.6	-3.525	140.223	70.0	6.1	6.3	Irian Jaya, Indonesia
39	1995/12/25 04:43:26.9	-6.356	129.227	154.0	6.2	6.7	Banda Sea
40	1995/12/26 16:55:23.4	-20.680	-174.276	17.0	5.4	5.8	Tonga Islands
41	1996/06/02 02:52:09.2	10.640	-42.293	27.0	5.9	6.8	Northern Mid-Atlantic Ridge
42	1996/06/09 01:12:17.5	17.503	145.737	150.0	6.0		Mariana Islands
43	1996/06/10 04:03:34.3	51.391	-177.820	9.0	6.8	7.7	Andreanof Is., Aleutian Is..
44	1996/06/13 06:57:58.4	-20.399	-178.358	535.0	5.2		Fiji Islands Region
45	1996/06/17 11:22:18.5	-7.075	122.610	585.0	7.5	7.2	Flores Sea
46	1996/06/26 03:22:03.4	27.739	139.831	483.0	5.4		Bonin Islands Region
47	1996/07/06 21:36:28.8	22.064	142.802	241.0	5.7		Volcano Islands Region
48	1996/07/20 07:41:15.4	-19.770	-177.772	356.0	5.7		Fiji Islands Region
49	1996/08/02 12:55:29.3	-10.769	161.445	33.0	6.2		Solomon Islands
50	1996/08/05 02:09:02.8	-15.210	-173.367	43.0	5.9	6.7	Tonga Islands
51	1996/08/05 22:38:22.1	-20.614	-178.541	530.0	6.5		Fiji Islands Region
52	1996/11/04 17:24:57.4	7.306	-77.393	14.0	6.0		Panama-Colombia Border Region

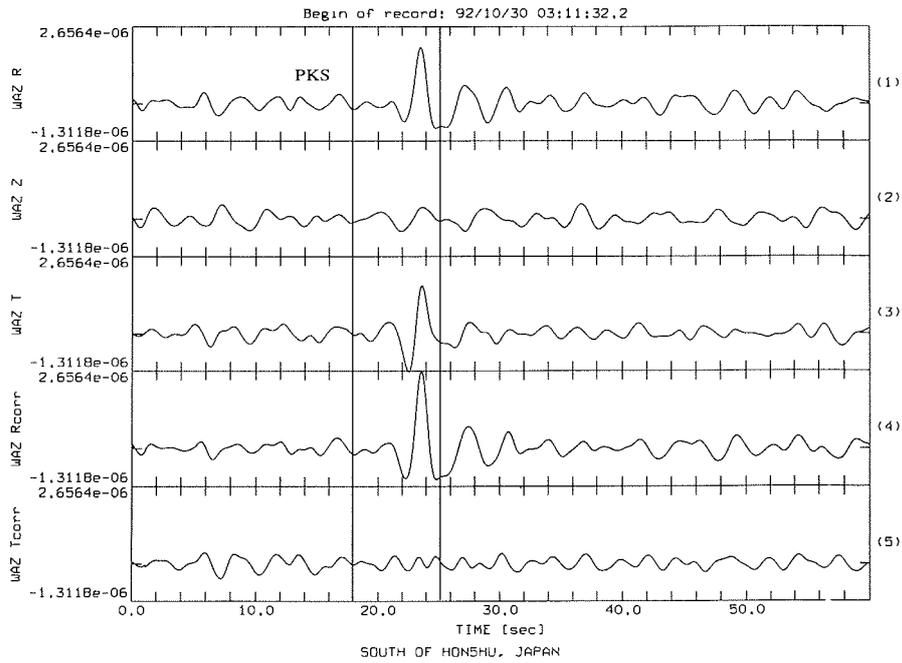
B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)

Dieser Anhang enthält die Ergebnisse der einzelnen untersuchten Kernphasen SKS, SKKS und PKS. In den Abschnitten B.1 bis B.6 sind die Ergebnisse für die Stationen Watzmann (WAZ), Olymp (OLY), Georg-von-Neumayer (GVN), Observatorium (OBS), Palmer Station/Antarktische Halbinsel (PMSA) und South Pole Station (SPA) in dieser Reihenfolge dargestellt.

Im folgenden sind die einzelnen untersuchten Phasen in R-, Z- und T-Koordinaten zusammen mit den aus den ermittelten Anisotropieparametern korrigierten R- und T-Komponenten dargestellt. Das zur Analyse verwendete Zeitfenster ist durch horizontale Balken markiert und die jeweilig verwendete Phase gekennzeichnet. Zusätzlich sind die Isoliniendarstellungen der Net-Grid-Search-Analyse angefügt, die linke Abbildung zeigt die Ergebnisse des E_t -Verfahrens, die rechte die des Eigenwertverfahrens.

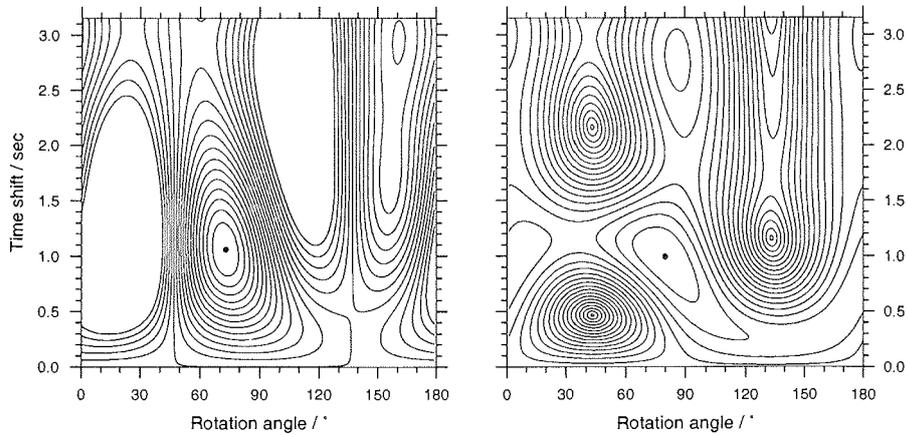
B.1 Watzmann (WAZ)

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



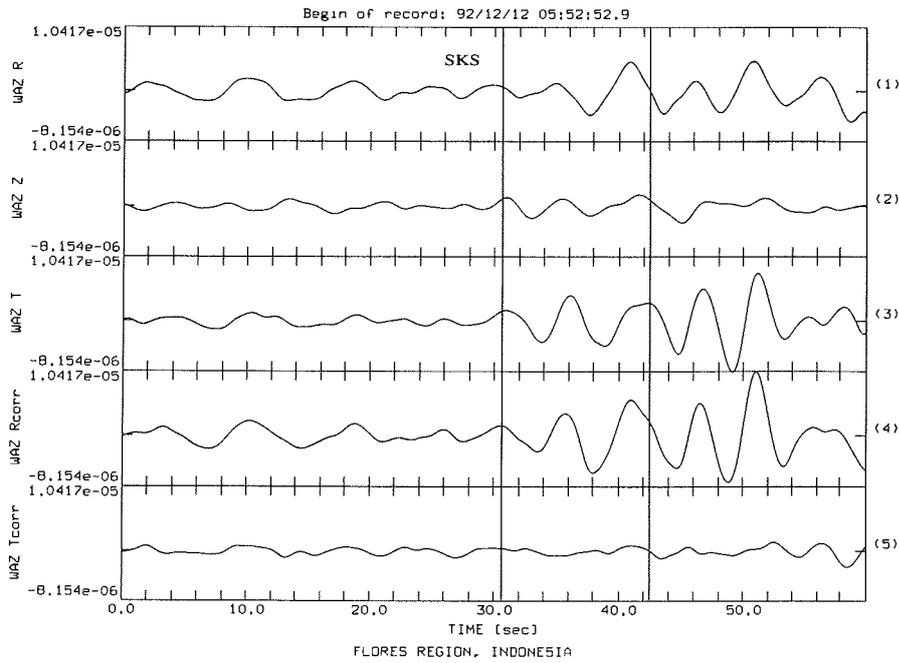
$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 73.0^\circ \quad \delta t = 1.06 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 80.0^\circ \quad \delta t = 0.99 \text{ sec}$$



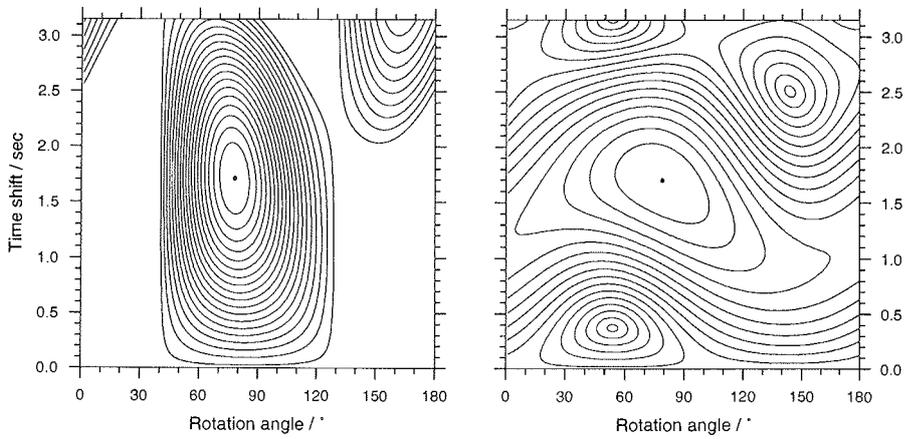
WAZ 921030 PKS South of Honshu, Japan $\Delta = 134.9^\circ$ BAZ = 137.1°

Abbildung B.1



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 78.0^\circ \quad \delta t = 1.71 \text{ sec}$$

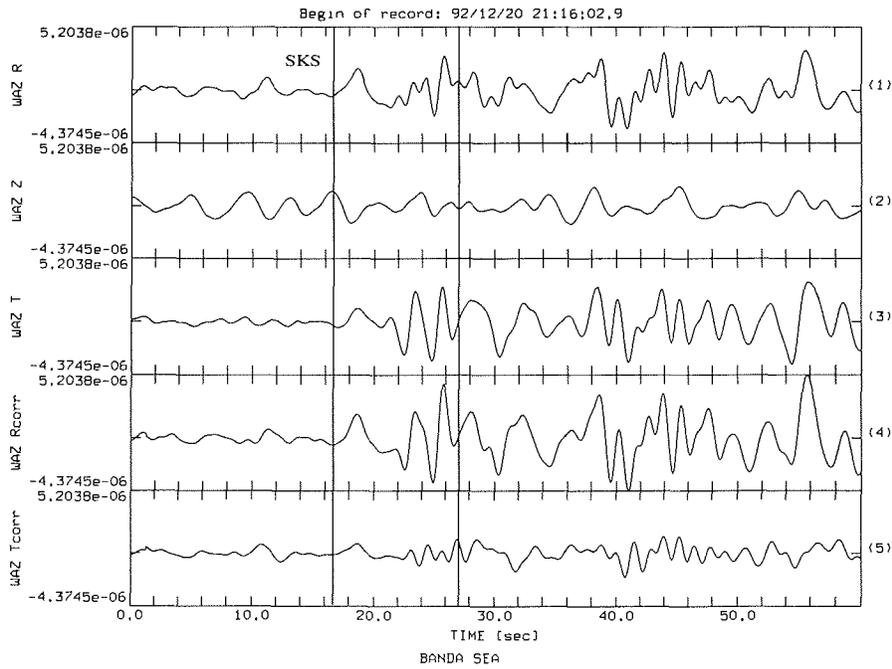
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 79.0^\circ \quad \delta t = 1.70 \text{ sec}$$



WAZ 921212 SKS Flores Region, Indonesia $\Delta = 93.9^\circ$ BAZ = 129.9°

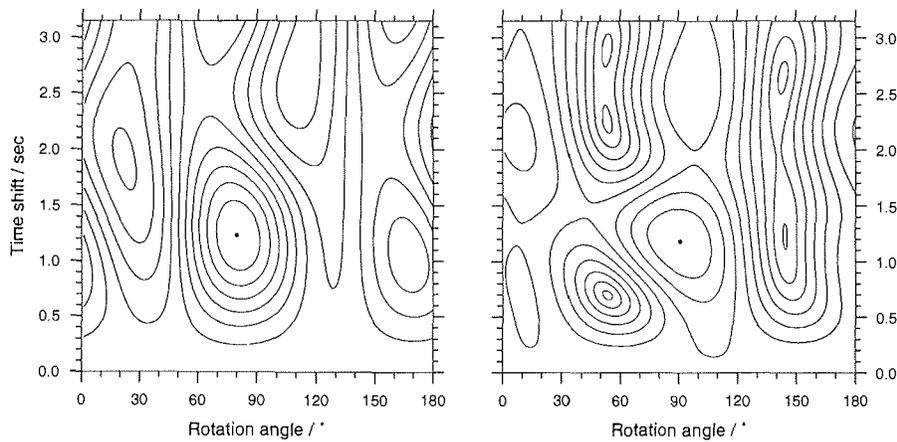
Abbildung B.2

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



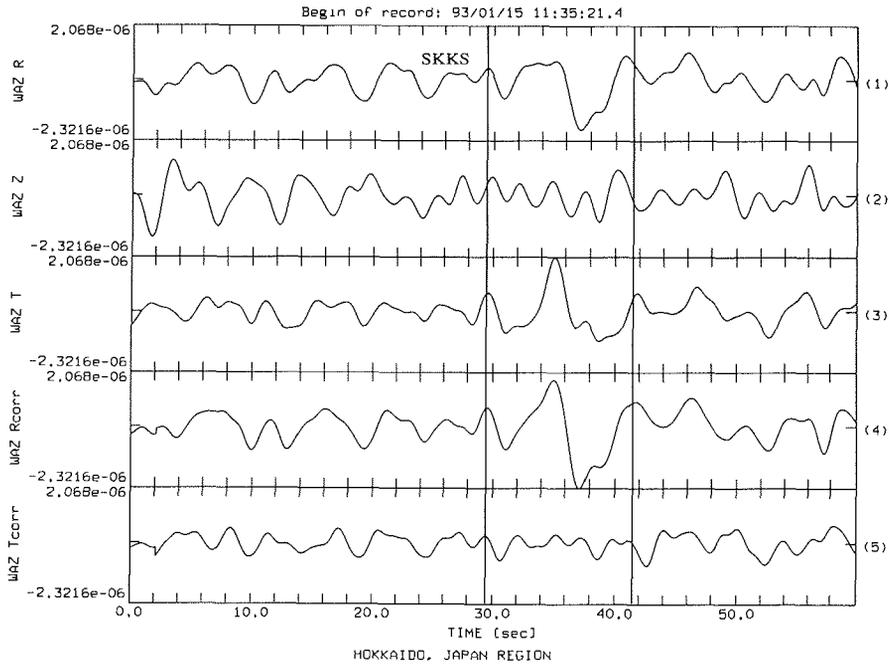
$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 80.0^\circ \quad \delta t = 1.23 \text{ sec}$

$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 91.0^\circ \quad \delta t = 1.18 \text{ sec}$



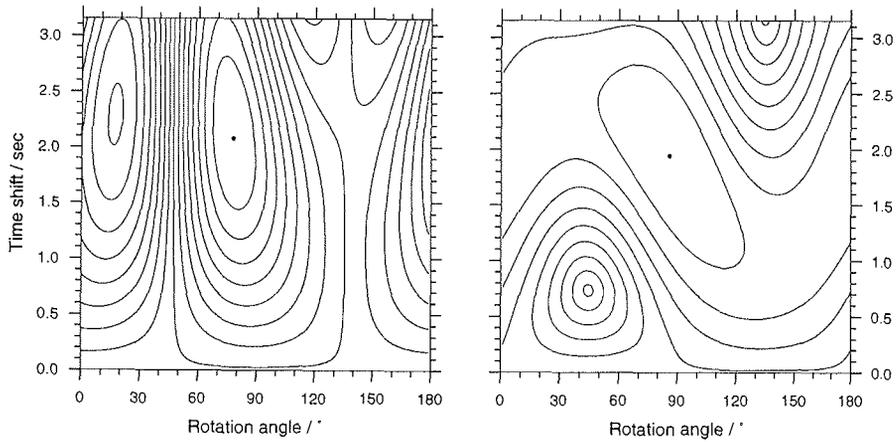
WAZ 921220 SKS Banda Sea $\Delta = 97.7^\circ$ BAZ = 137.7°

Abbildung B.3



$$E_i / E_{i, \min} \quad \phi = 78.0^\circ \quad \delta t = 2.08 \text{ sec}$$

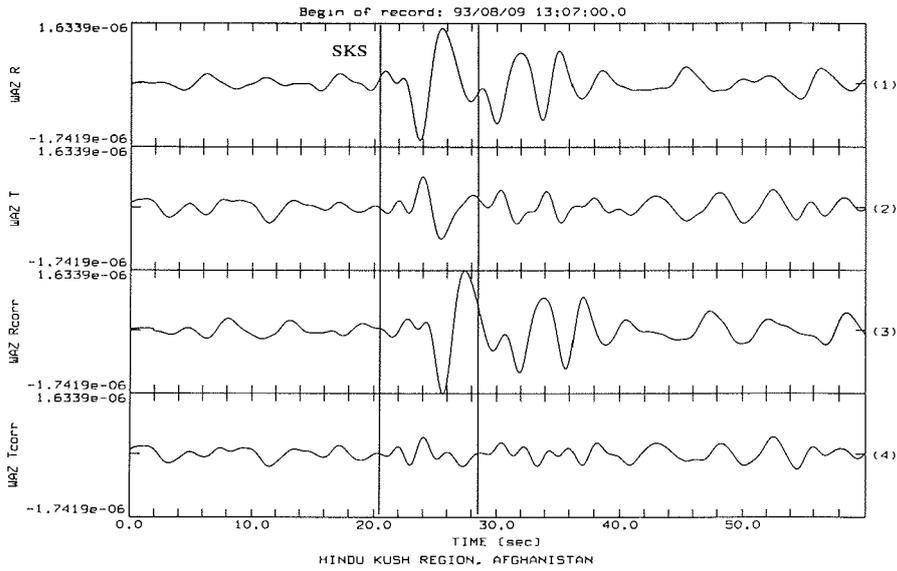
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 86.0^\circ \quad \delta t = 1.94 \text{ sec}$$



WAZ 930115 SKKS Hokkaido, Japan $\Delta = 148.0^\circ$ BAZ = 137.0°

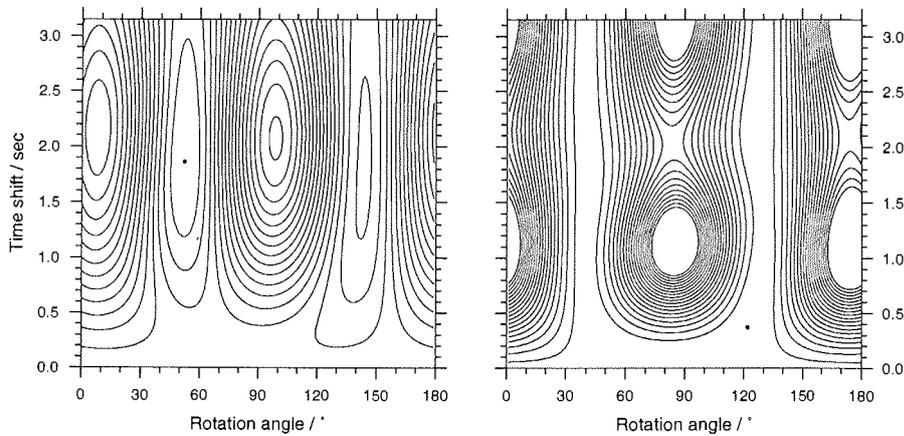
Abbildung B.4

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



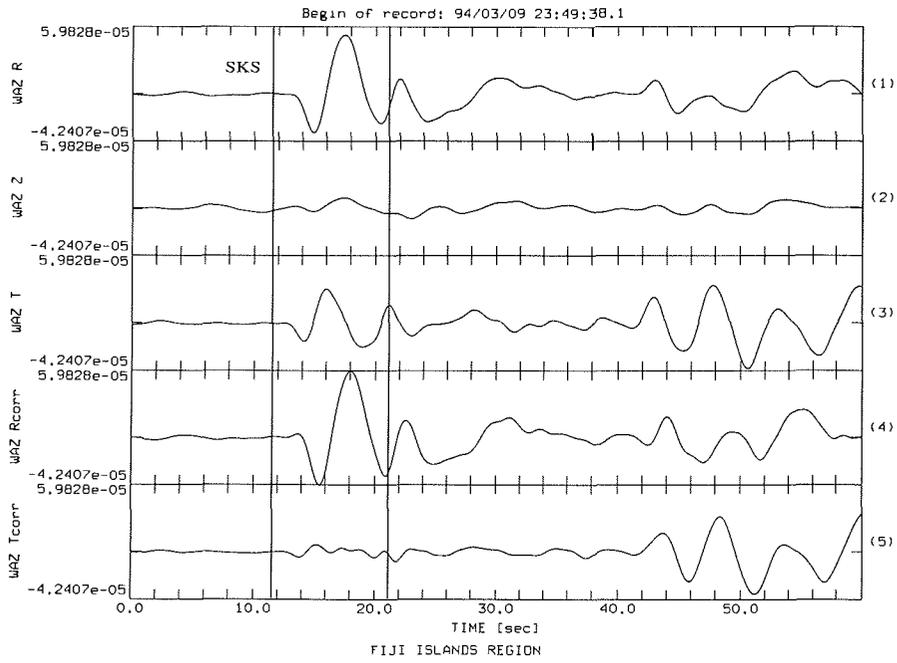
$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 52.0^\circ \quad \delta t = 1.86 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 122.0^\circ \quad \delta t = 0.37 \text{ sec}$$



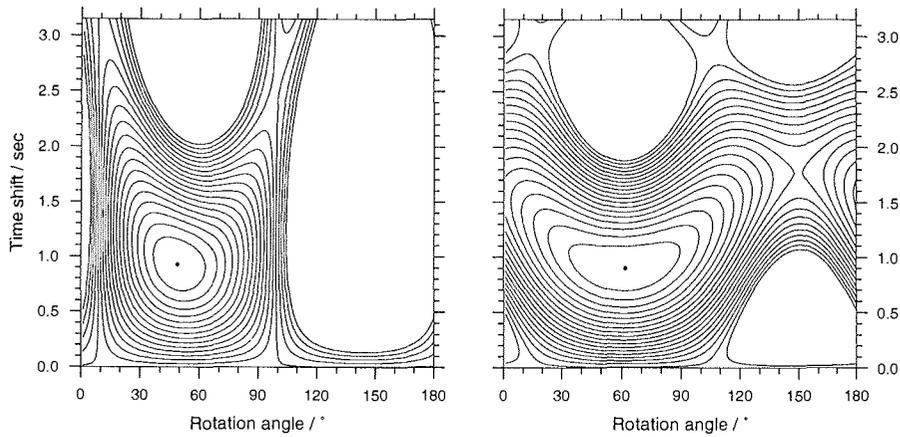
WAZ 930809 SKS Hindu Kush Region, Afghanistan $\Delta = 120.2^\circ$ BAZ = 66.2°
Bem.: Z-Komponente war defekt

Abbildung B.5



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 49.0^\circ \quad \delta t = 0.93 \text{ sec}$$

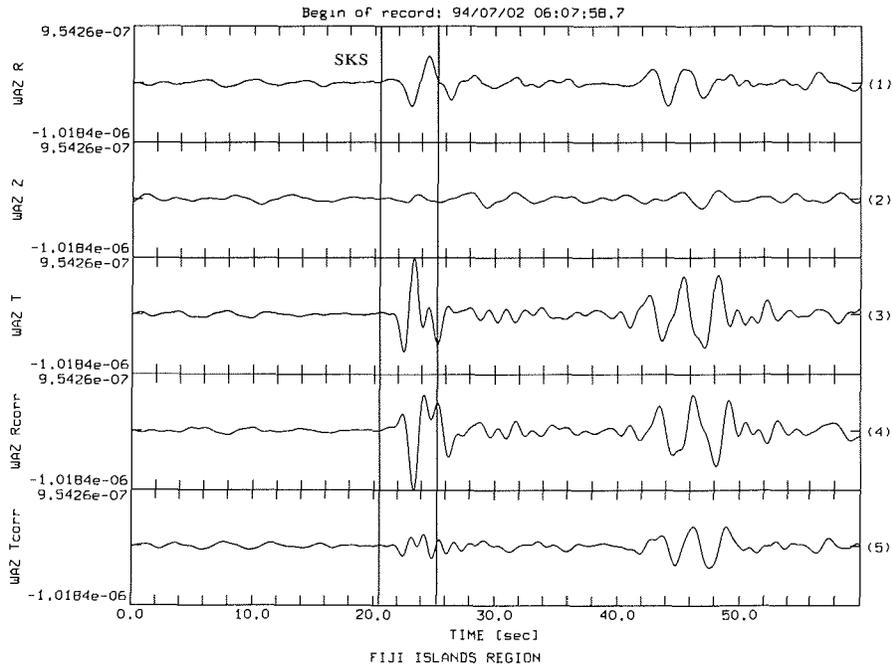
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 62.0^\circ \quad \delta t = 0.90 \text{ sec}$$



WAZ 940309 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 91.1^\circ$ BAZ = 188.4°

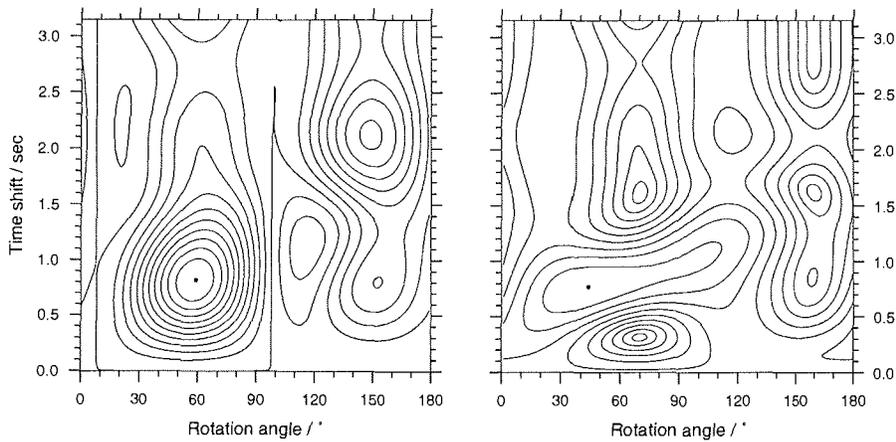
Abbildung B.6

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



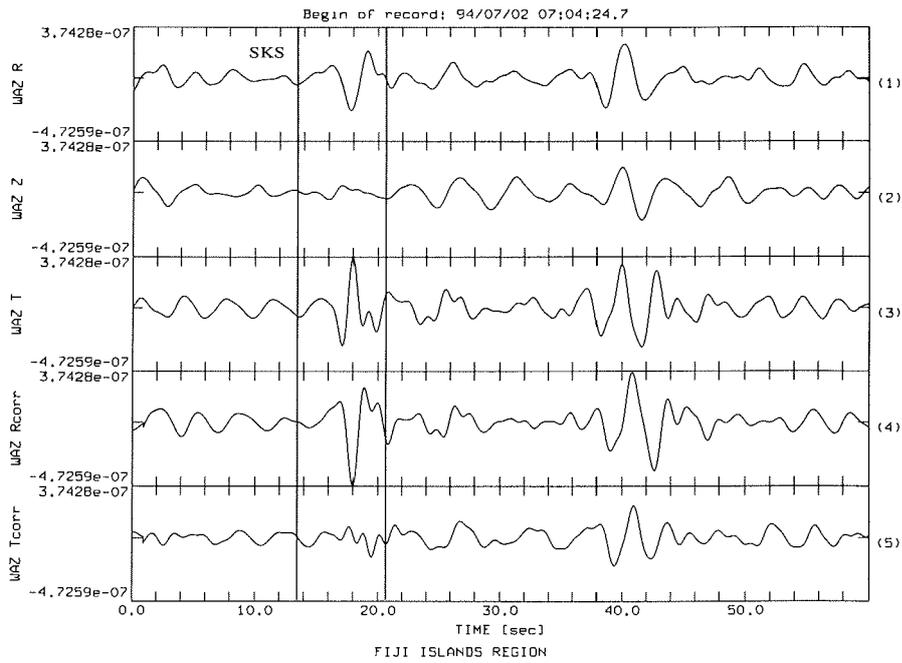
$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 59.0^\circ \quad \delta t = 0.82 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 44.0^\circ \quad \delta t = 0.77 \text{ sec}$$



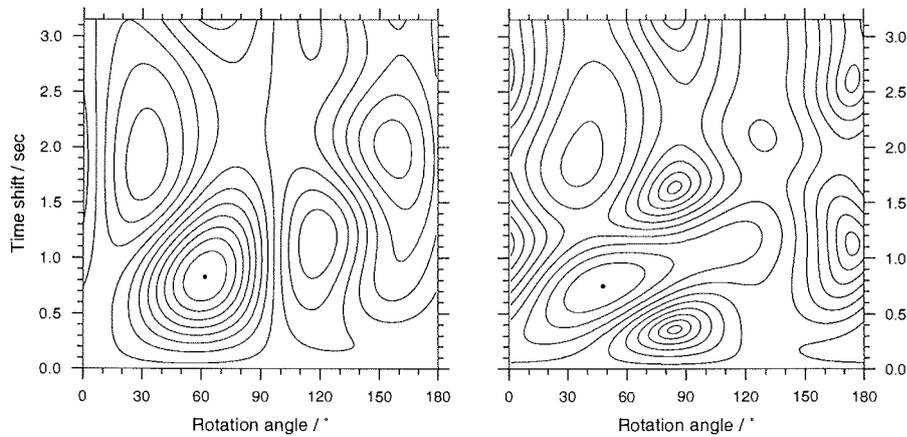
WAZ 940702a SKS Fiji Islands Region $\Delta = 88.1^\circ$ BAZ = 188.1°

Abbildung B.7



$$E_i / E_{i, \min} \quad \phi = 62.0^\circ \quad \delta t = 0.83 \text{ sec}$$

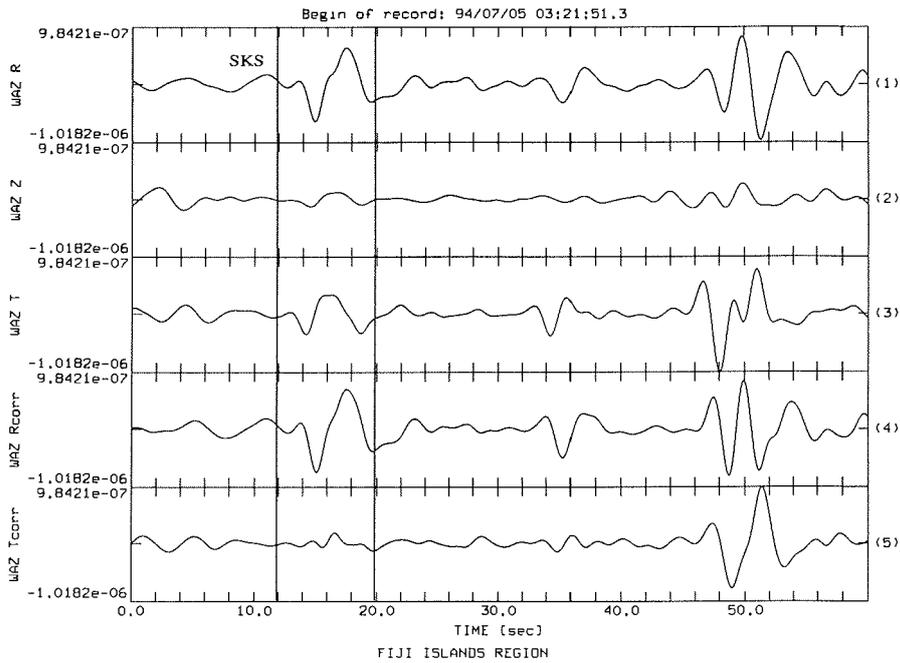
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 48.0^\circ \quad \delta t = 0.75 \text{ sec}$$



WAZ 940702b SKS Fiji Islands Region $\Delta = 88.0^\circ$ BAZ = 188.1°

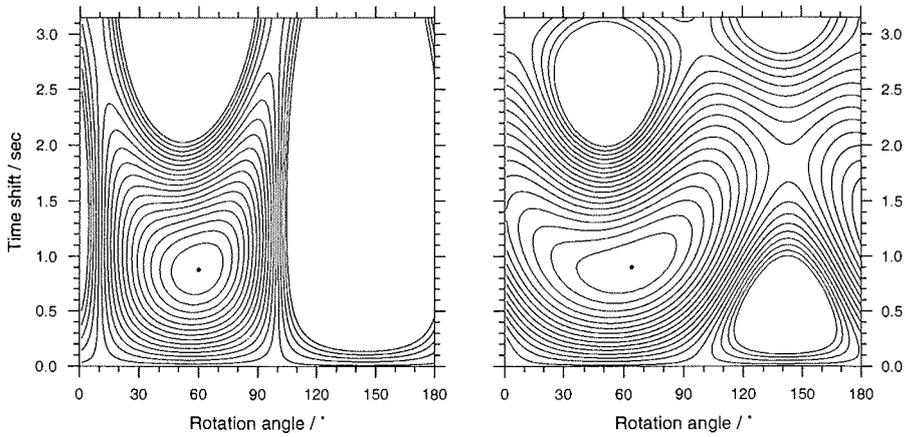
Abbildung B.8

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



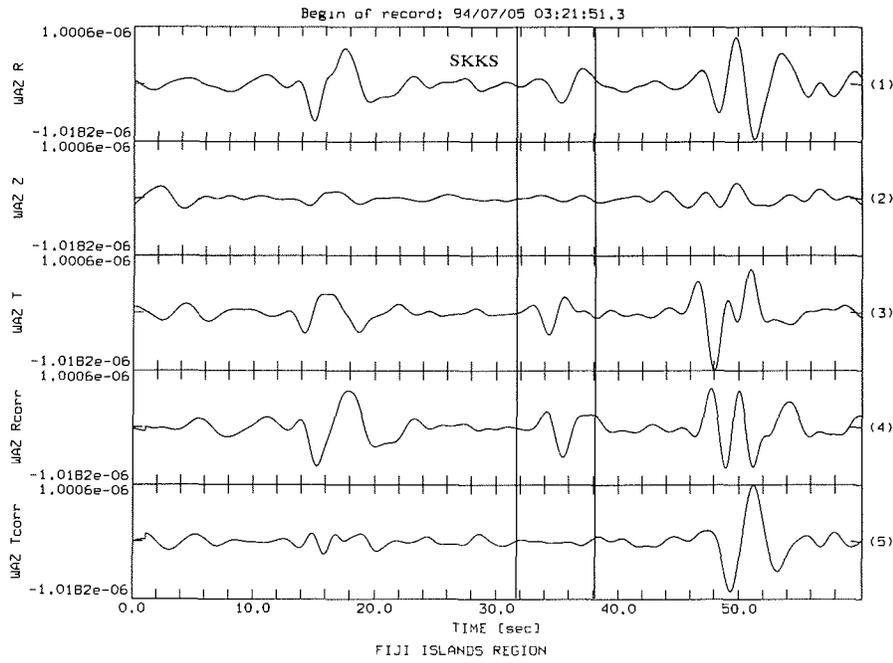
$$E_1 / E_{1,\min} \quad \phi = 60.0^\circ \quad \delta t = 0.88 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1,\min} \quad \phi = 64.0^\circ \quad \delta t = 0.90 \text{ sec}$$



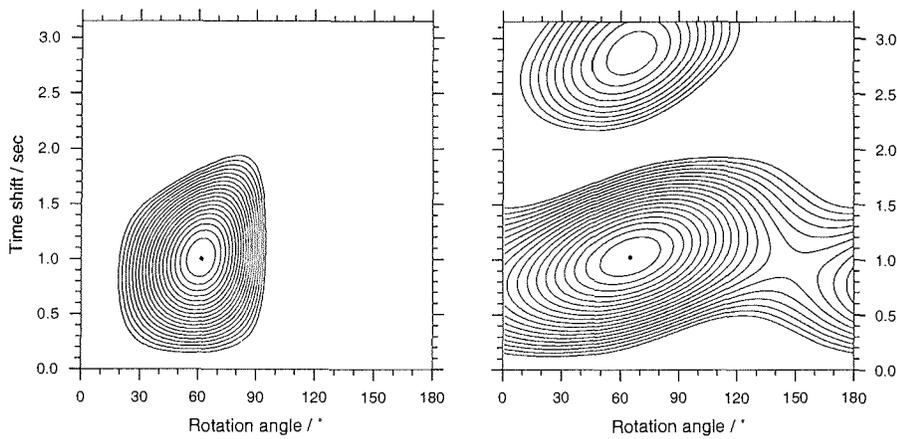
WAZ 940705 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 92.7^\circ$ BAZ = 189.5°

Abbildung B.9



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 62.0^\circ \quad \delta t = 1.00 \text{ sec}$$

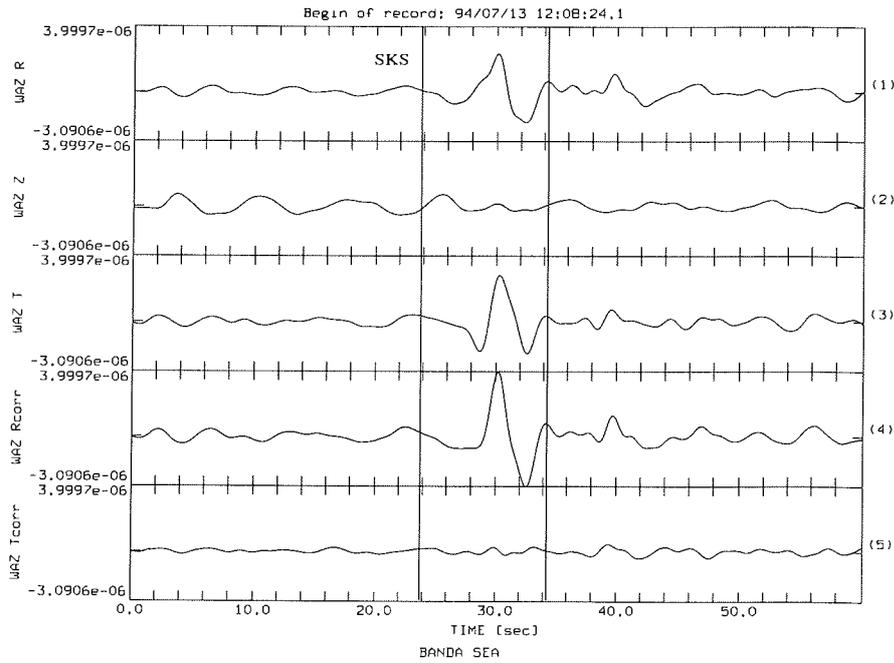
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 65.0^\circ \quad \delta t = 1.02 \text{ sec}$$



WAZ 940705 SKKS Fiji Islands Region $\Delta = 92.7^\circ$ BAZ = 189.5°

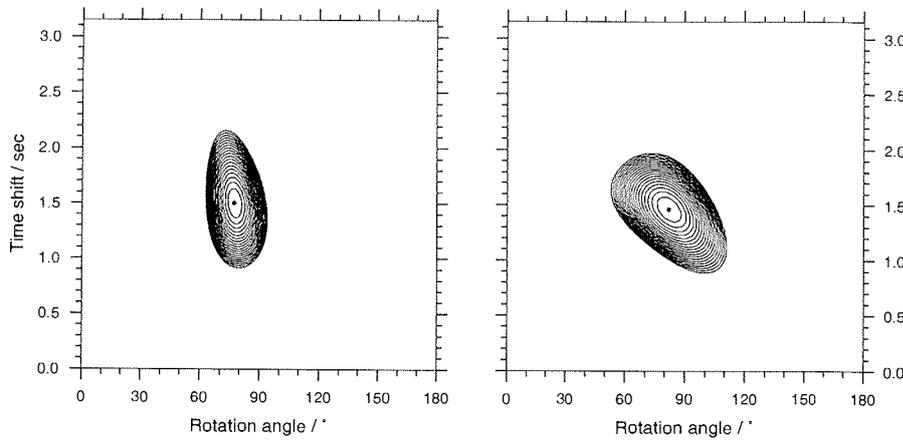
Abbildung B.10

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



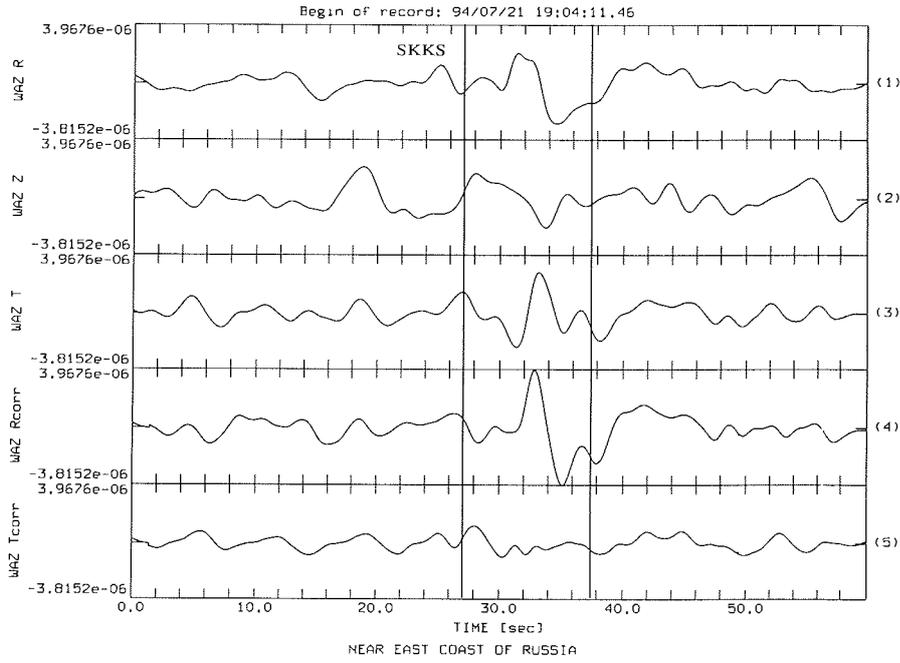
$$E_1 / E_{1,\min} \quad \phi = 77.0^\circ \quad \delta t = 1.50 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1,\min} \quad \phi = 82.0^\circ \quad \delta t = 1.46 \text{ sec}$$



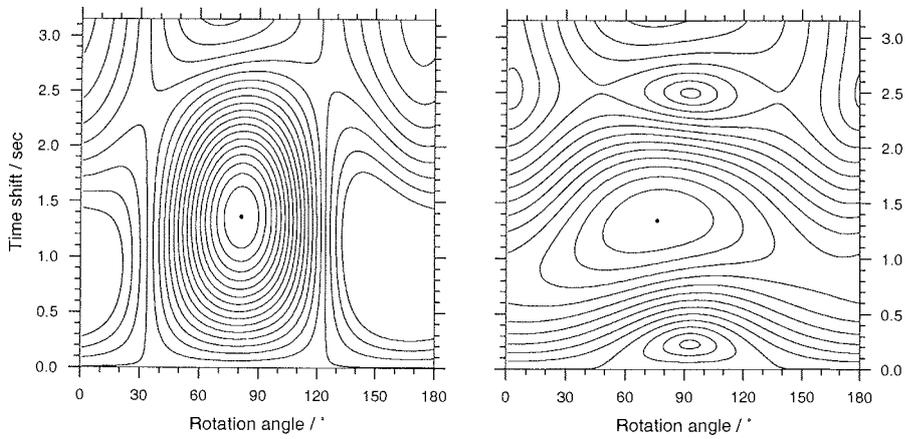
WAZ 940713 SKS Banda Sea $\Delta = 96.2^\circ$ BAZ = 135.3°

Abbildung B.11



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 81.0^\circ \quad \delta t = 1.36 \text{ sec}$$

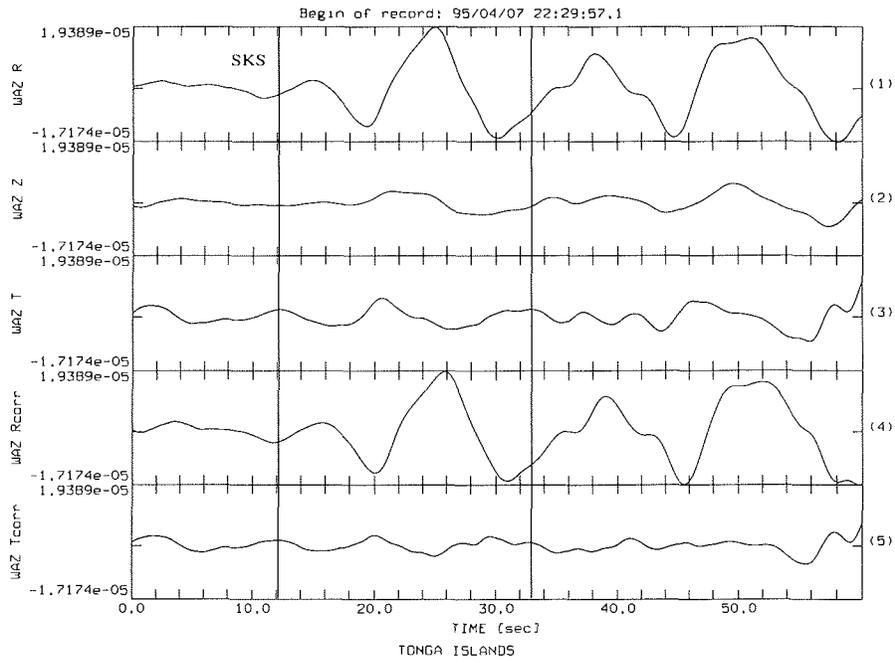
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 76.0^\circ \quad \delta t = 1.34 \text{ sec}$$



WAZ 940721 SKKS Near East Coast of Russia $\Delta = 145.7^\circ$ BAZ = 124.7°

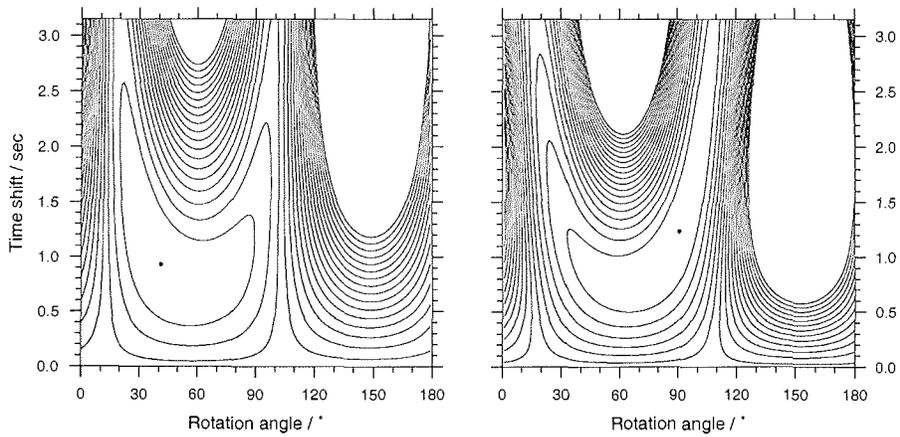
Abbildung B.12

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



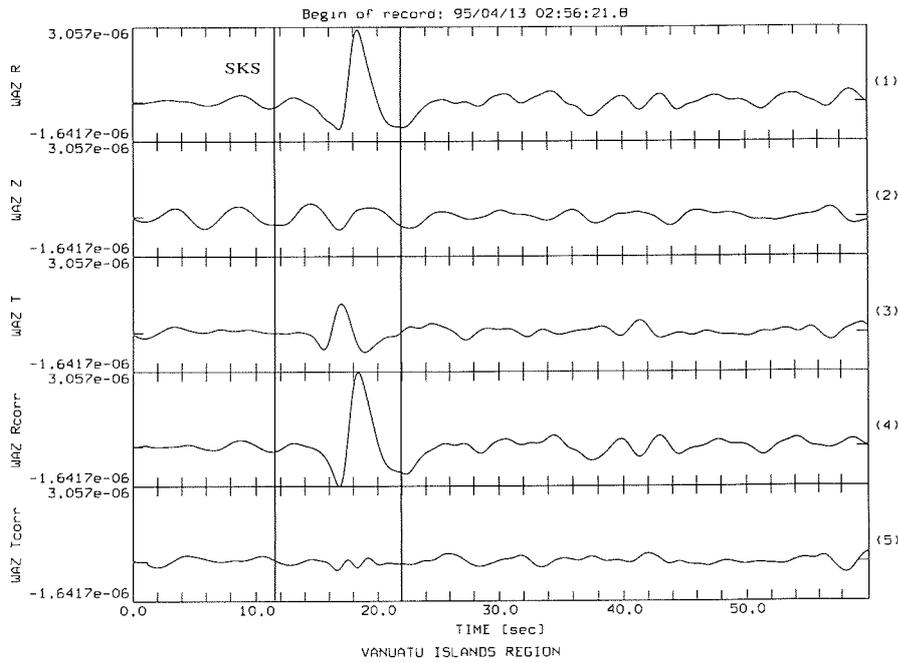
$$E_1 / E_{1,\min} \quad \phi \approx 41.0^\circ \quad \delta t = 0.93 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1,\min} \quad \phi = 91.0^\circ \quad \delta t = 1.23 \text{ sec}$$



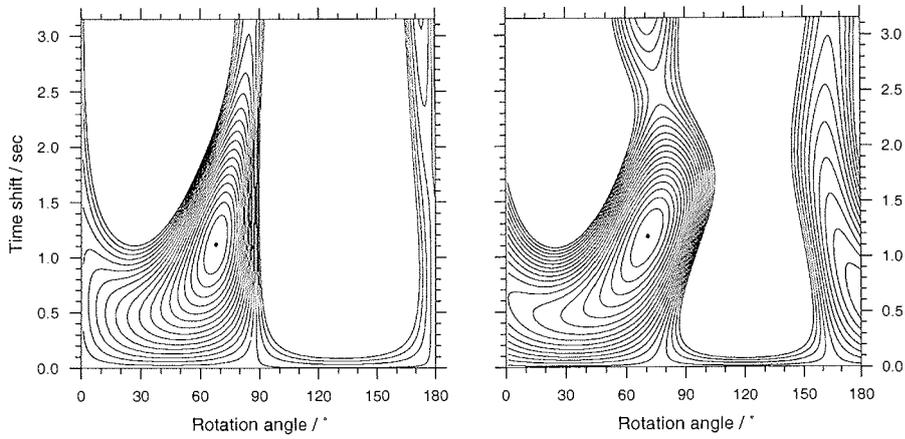
WAZ 950407 SKS Tonga Islands $\Delta = 93.6^\circ$ BAZ = 193.4°

Abbildung B.13



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 68.0^\circ \quad \delta t = 1.12 \text{ sec}$$

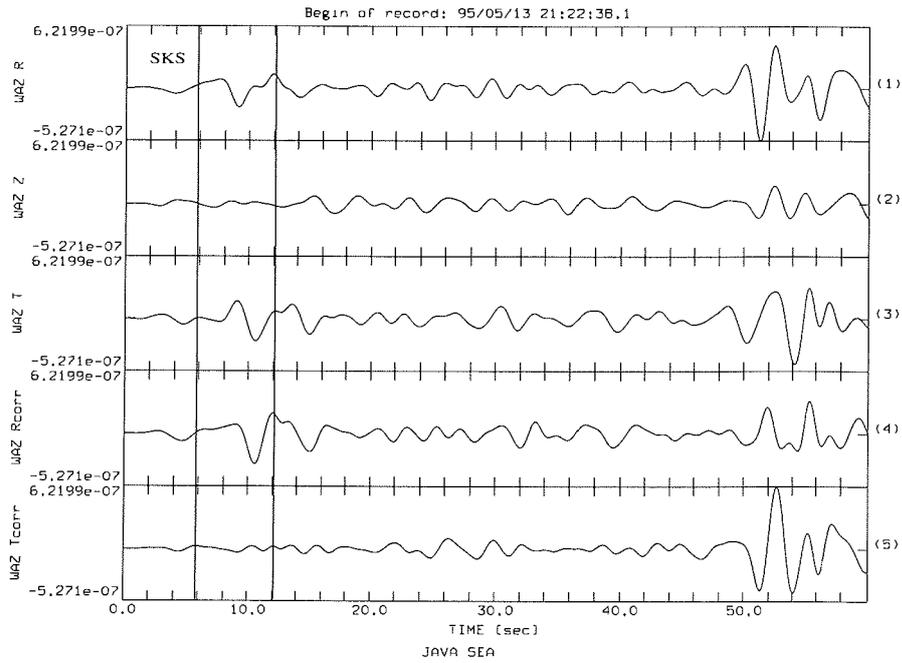
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 71.0^\circ \quad \delta t = 1.18 \text{ sec}$$



WAZ 950413 SKS Vanuatu Islands Region $\Delta = 96.1^\circ$ BAZ = 177.7°

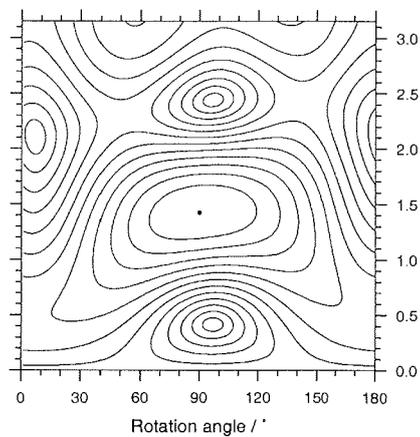
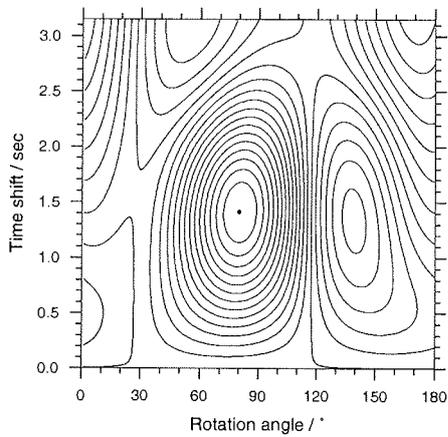
Abbildung B.14

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



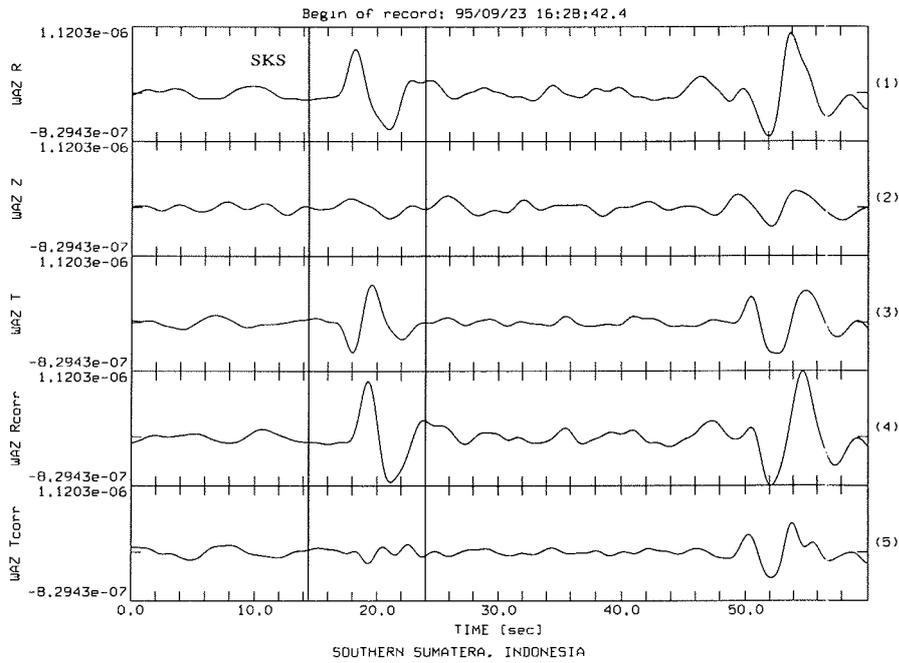
$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 80.0^\circ \quad \delta t = 1.41 \text{ sec}$

$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 90.0^\circ \quad \delta t = 1.42 \text{ sec}$



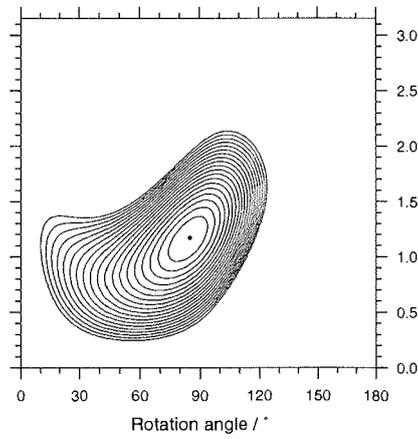
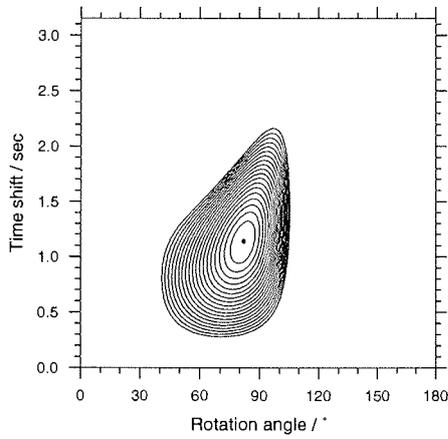
WAZ 950513 SKS Java Sea $\Delta = 93.3^\circ$ BAZ = 116.5°

Abbildung B.15



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 82.0^\circ \quad \delta t = 1.14 \text{ sec}$$

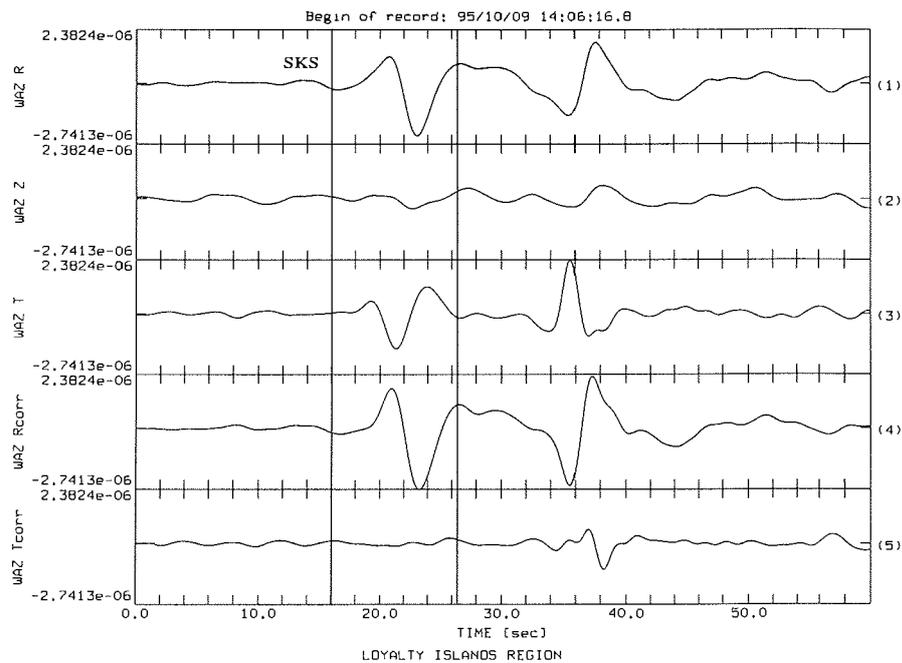
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 85.0^\circ \quad \delta t = 1.17 \text{ sec}$$



WAZ 950923 SKS Southern Sumatera, Indonesia $\Delta = 91.3^\circ$ BAZ = 111.9°

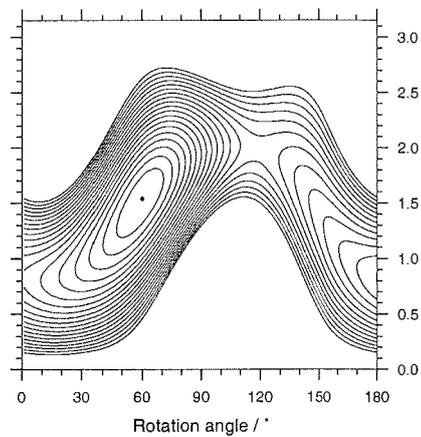
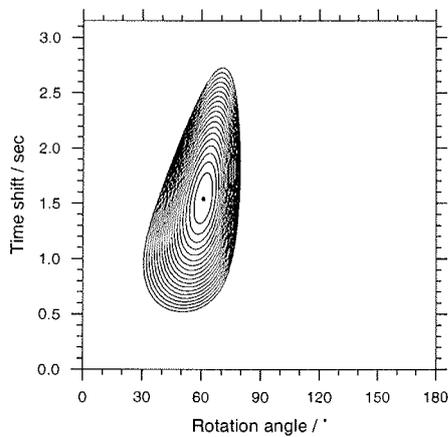
Abbildung B.16

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



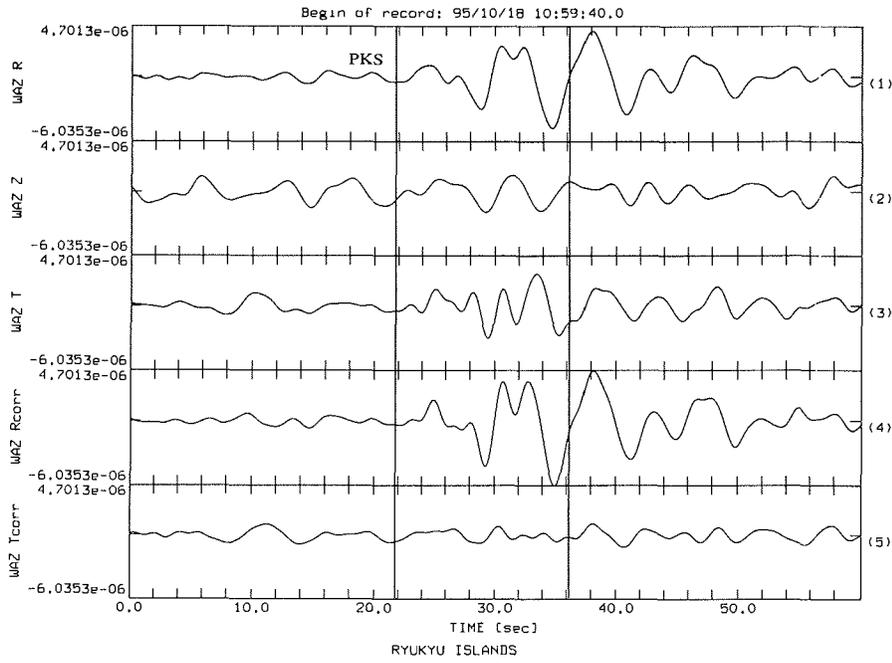
$$E_1 / E_{t, \min} \quad \phi = 61.0^\circ \quad \delta t = 1.54 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 60.0^\circ \quad \delta t = 1.54 \text{ sec}$$



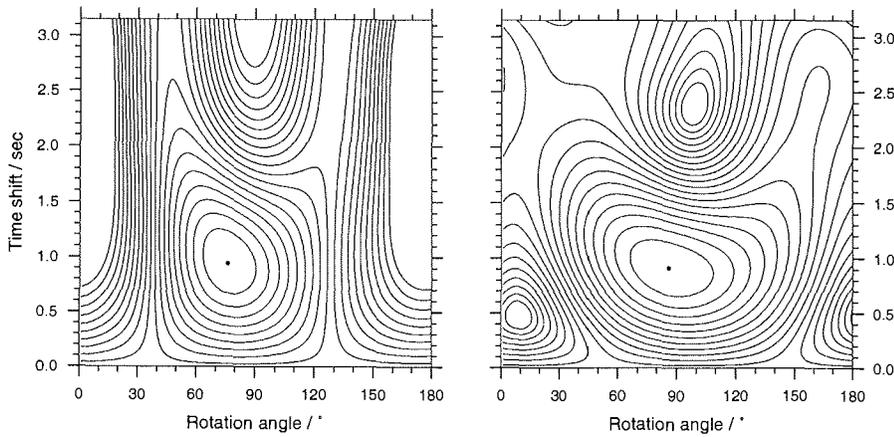
WAZ 951009 SKS Loyalty Islands Region $\Delta = 87.9^\circ$ BAZ = 177.6°

Abbildung B.17



$$E_1 / E_{1,\min} \quad \phi = 76.0^\circ \quad \delta t = 0.94 \text{ sec}$$

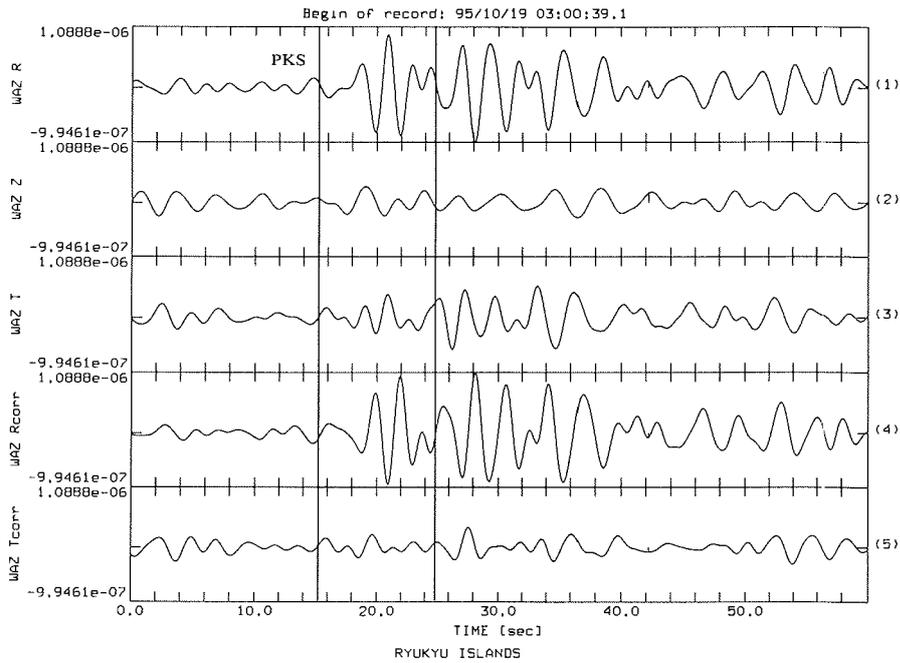
$$\lambda_1 / \lambda_{1,\min} \quad \phi = 86.0^\circ \quad \delta t = 0.91 \text{ sec}$$



WAZ 951018 PKS Ryukyu Islands $\Delta = 131.2^\circ$ BAZ = 128.0°

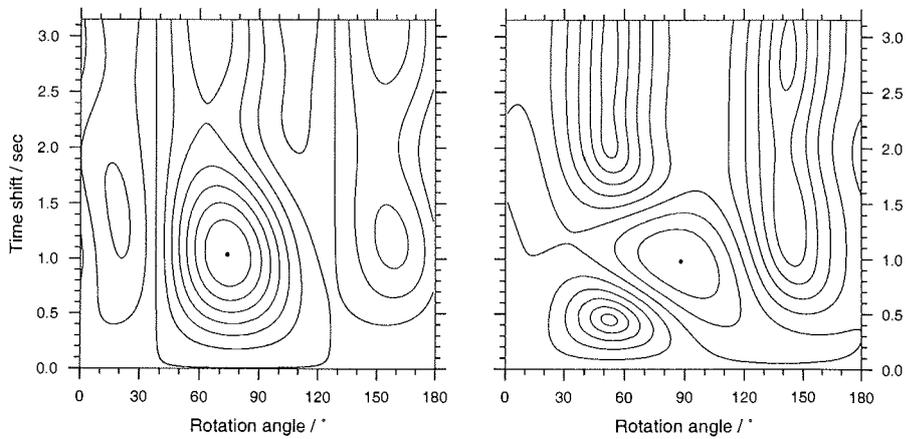
Abbildung B.18

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



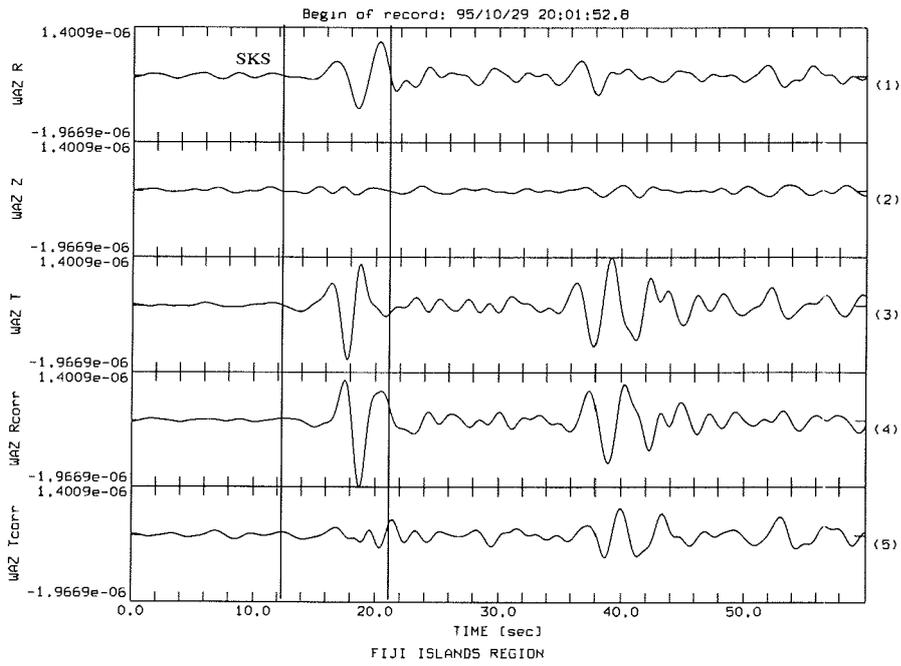
$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 74.0^\circ \quad \delta t = 1.04 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 88.0^\circ \quad \delta t = 0.98 \text{ sec}$$



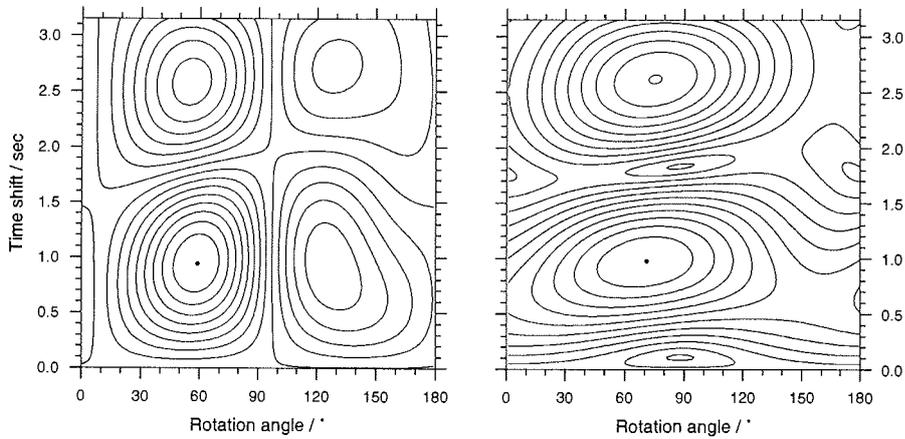
WAZ 951019 PKS Ryukyu Islands $\Delta = 131.5^\circ$ BAZ = 128.1°

Abbildung B.19



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 59.0^\circ \quad \delta t = 0.94 \text{ sec}$$

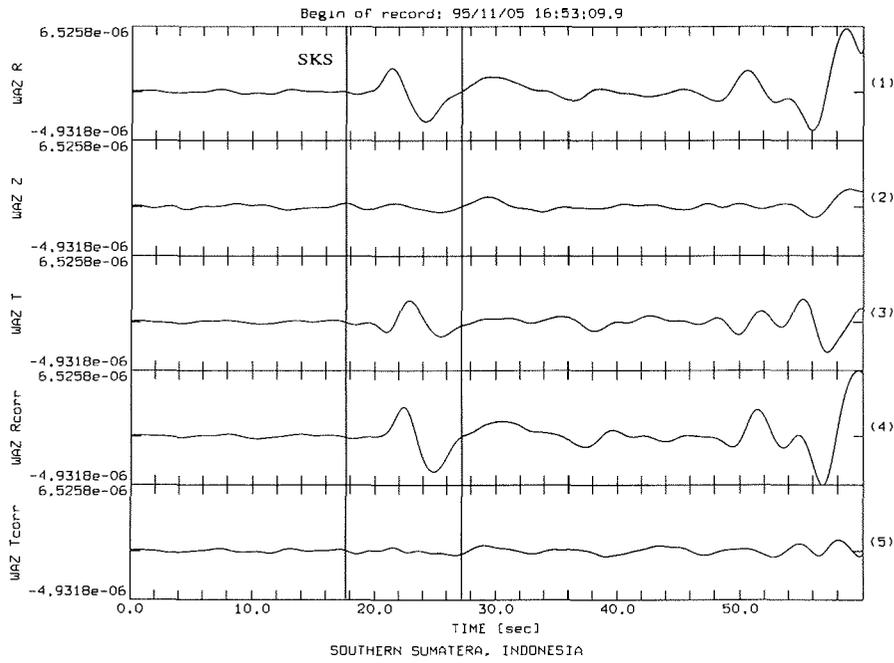
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 71.0^\circ \quad \delta t = 0.98 \text{ sec}$$



WAZ 951029 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 87.9^\circ$ BAZ = 188.4°

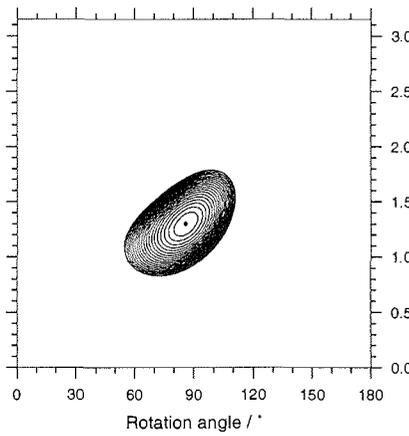
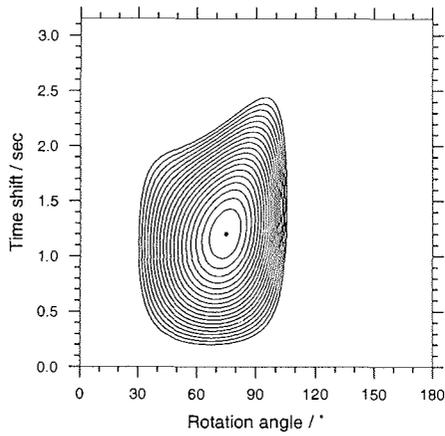
Abbildung B.20

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



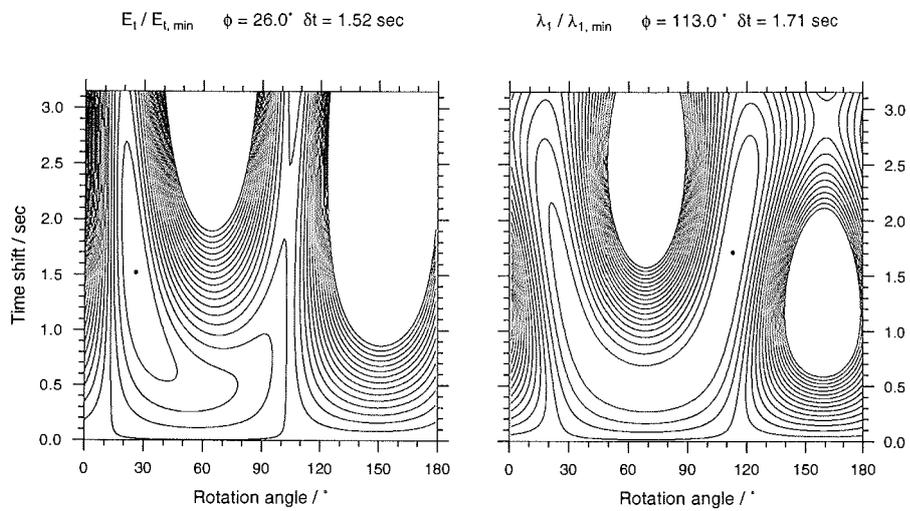
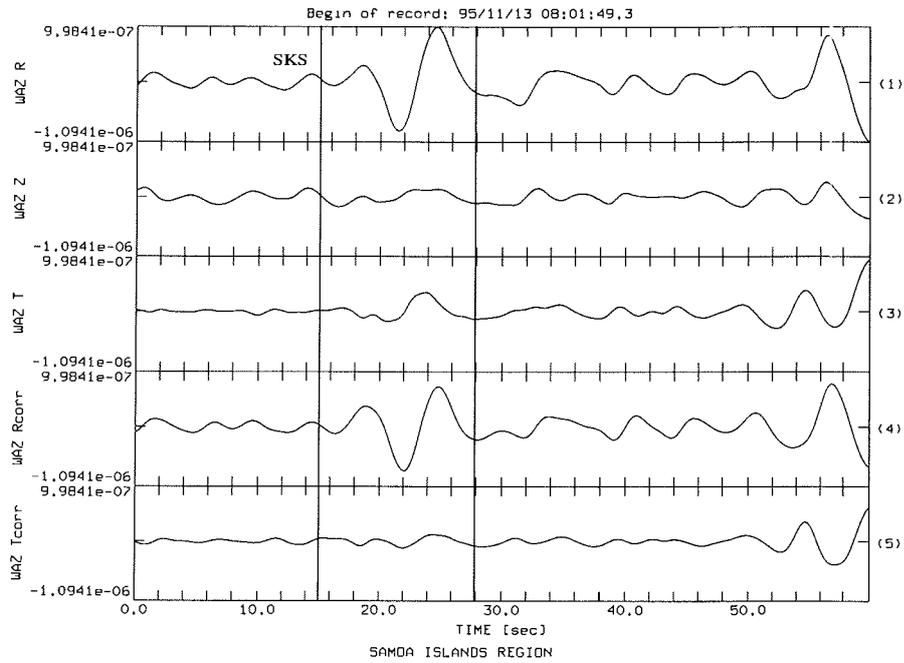
$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 75.0^\circ \quad \delta t = 1.20 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 86.0^\circ \quad \delta t = 1.30 \text{ sec}$$



WAZ 951105 Southern Sumatera, Indonesia $\Delta = 92.0^\circ$ BAZ = 111.2°

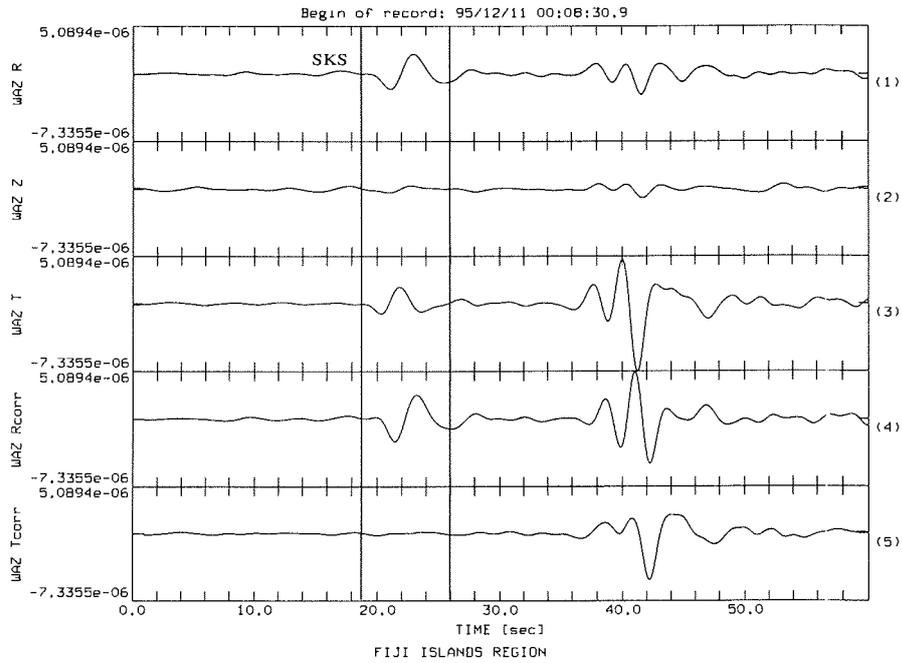
Abbildung B.21



WAZ 951113 SKS Samoa Islands Region $\Delta = 93.8^\circ$ BAZ = 193.4°

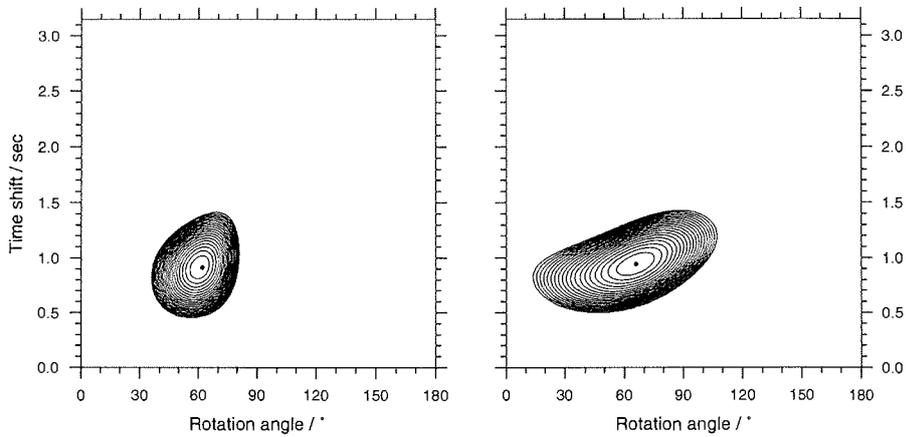
Abbildung B.22

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



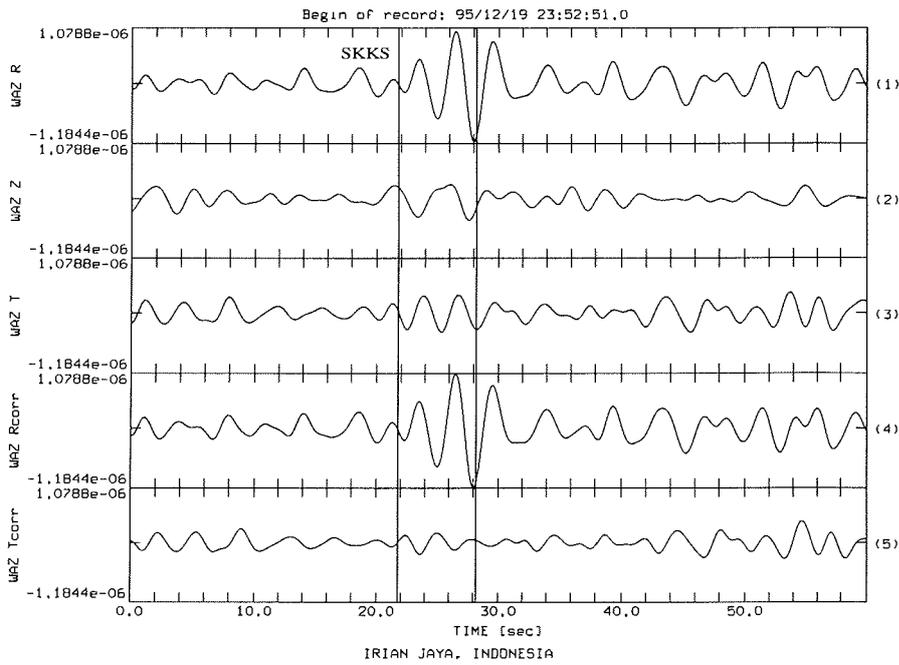
$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 62.0^\circ \quad \delta t = 0.91 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 66.0^\circ \quad \delta t = 0.94 \text{ sec}$$



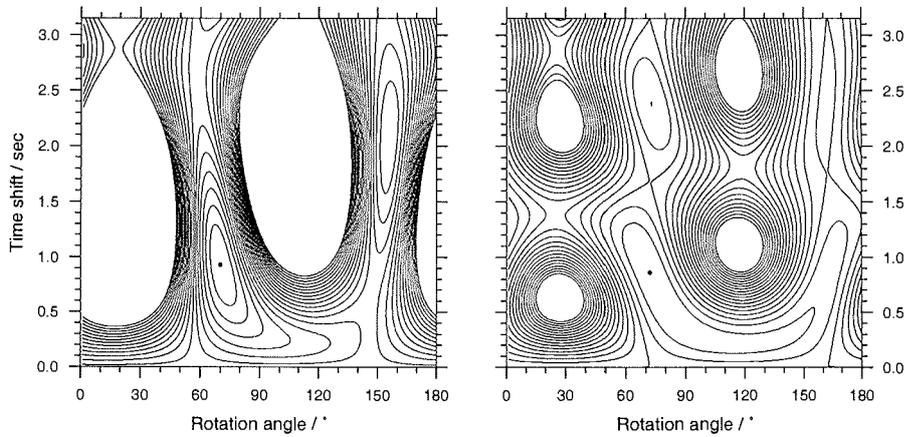
WAZ 951210 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 87.9^\circ$ BAZ = 188.4°

Abbildung B.23



$$E_1 / E_{1,\min} \quad \phi = 70.0^\circ \quad \delta t = 0.93 \text{ sec}$$

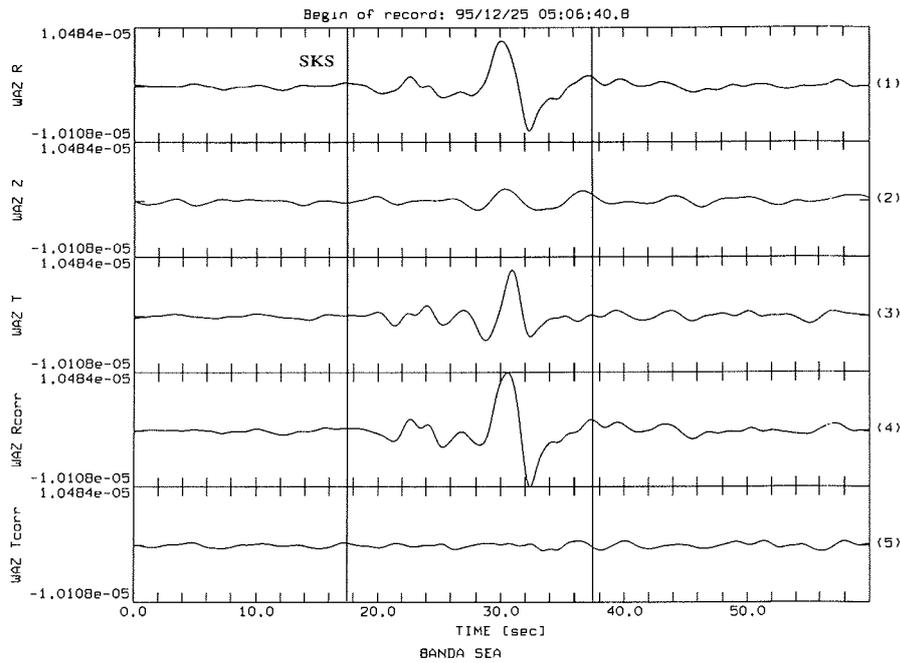
$$\lambda_1 / \lambda_{1,\min} \quad \phi = 72.0^\circ \quad \delta t = 0.86 \text{ sec}$$



WAZ 951219 SKKS Irian Jaya, Indonesia $\Delta = 102.7^\circ$ BAZ = 146.8°

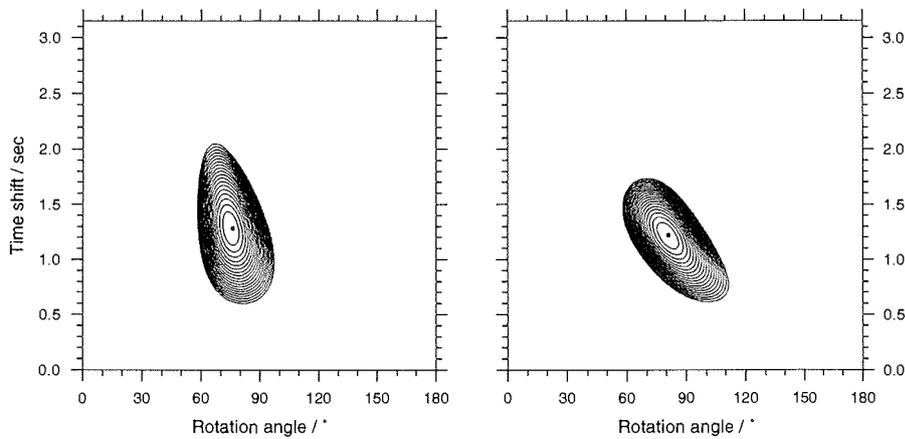
Abbildung B.24

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



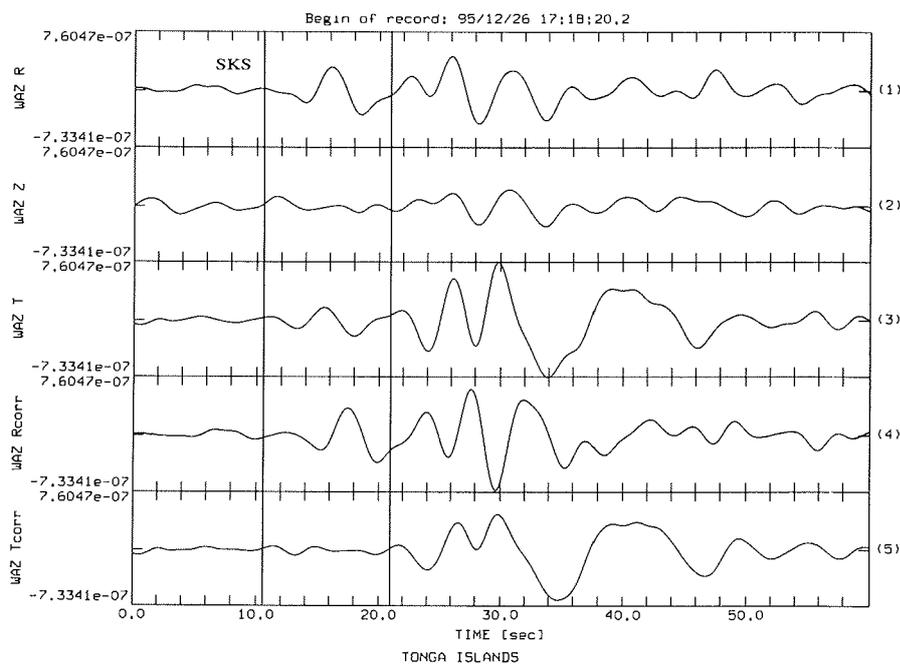
$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 76.0^\circ \quad \delta t = 1.28 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 81.0^\circ \quad \delta t = 1.22 \text{ sec}$$



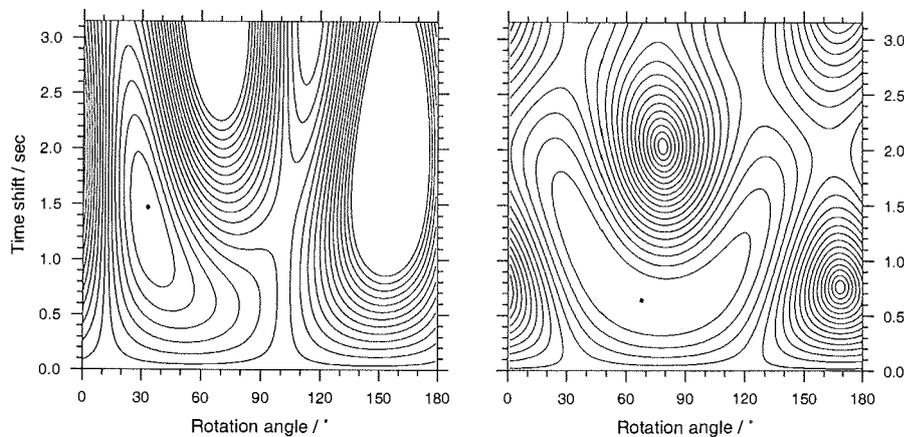
WAZ 951225 SKS Banda Sea $\Delta = 97.7^\circ$ BAZ = 137.3°

Abbildung B.25



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 33.0^\circ \quad \delta t = 1.47 \text{ sec}$$

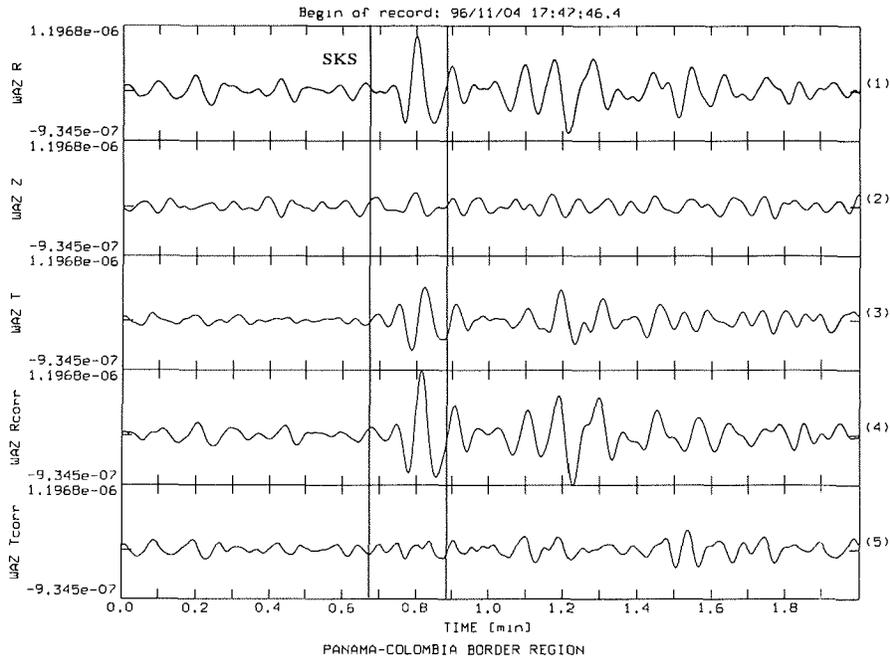
$$\lambda_t / \lambda_{t, \min} \quad \phi = 68.0^\circ \quad \delta t = 0.64 \text{ sec}$$



WAZ 951226 SKS Tonga Islands $\Delta = 88.2^\circ$ BAZ = 192.3°

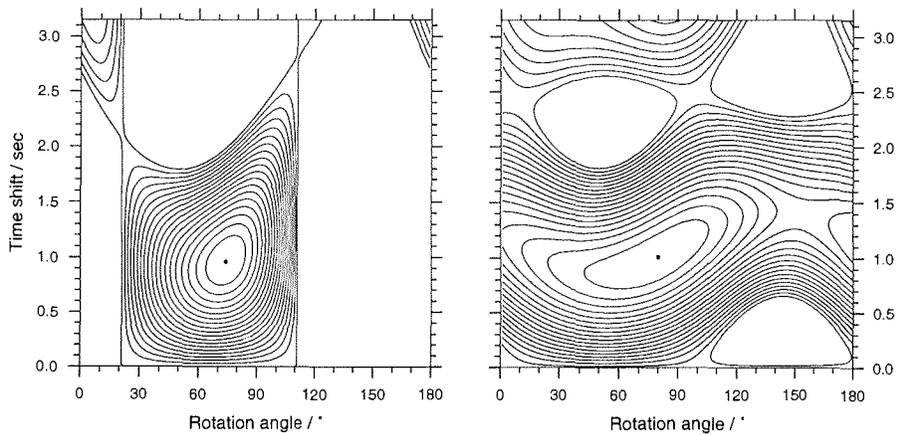
Abbildung B.26

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_i / E_{i, \min} \quad \phi = 74.0^\circ \quad \delta t = 0.96 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 80.0^\circ \quad \delta t = 1.01 \text{ sec}$$

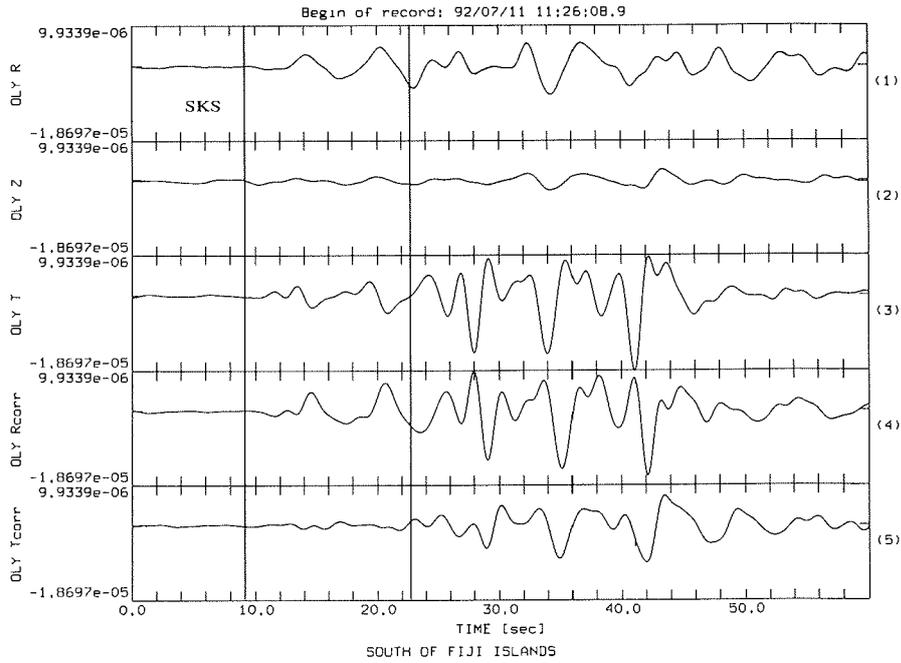


WAZ 961104 SKS Panama-Columbia Border Region $\Delta = 90.4^\circ$ BAZ = 291.2°

Abbildung B.27

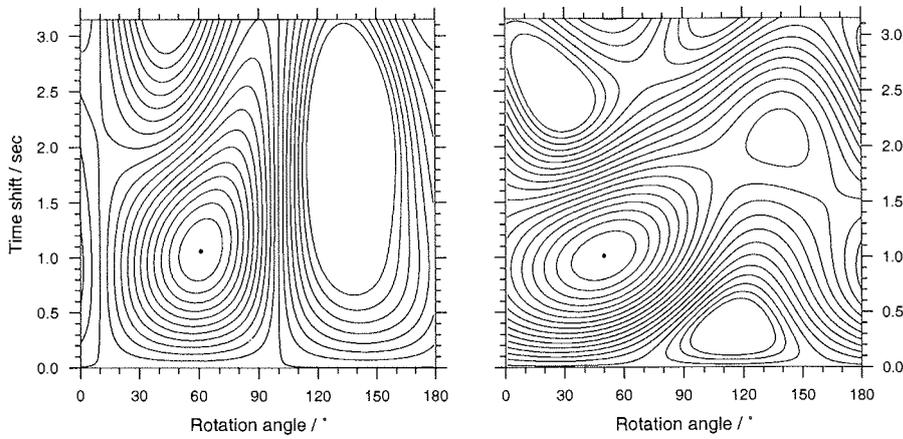
B.2 Olymp (OLY)

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 61.0^\circ \quad \delta t = 1.06 \text{ sec}$

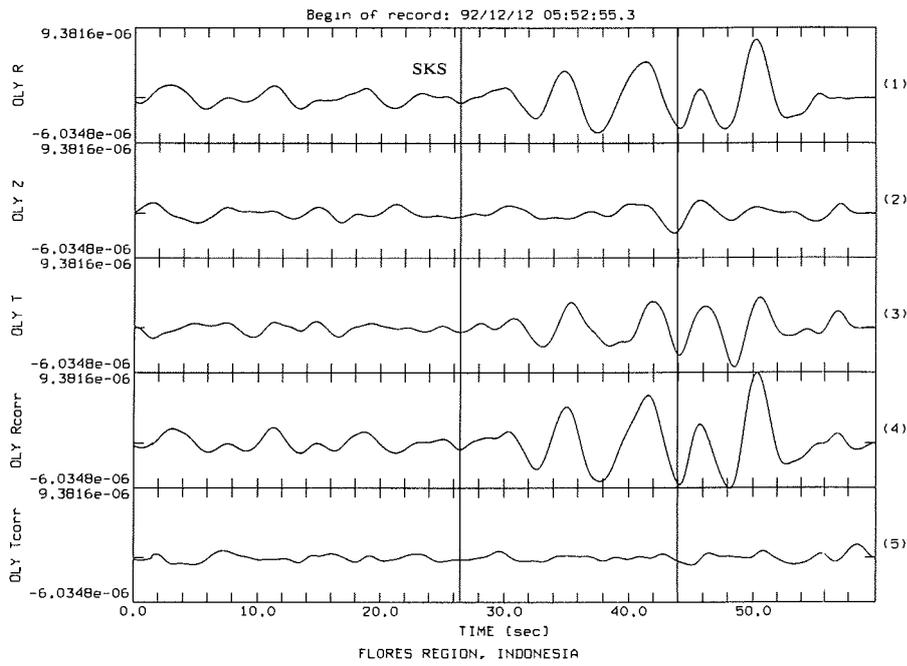
$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 50.0^\circ \quad \delta t = 1.01 \text{ sec}$



OLY 920711 SKS South of Fiji Islands $\Delta = 86.7^\circ$ BAZ = 190.2°

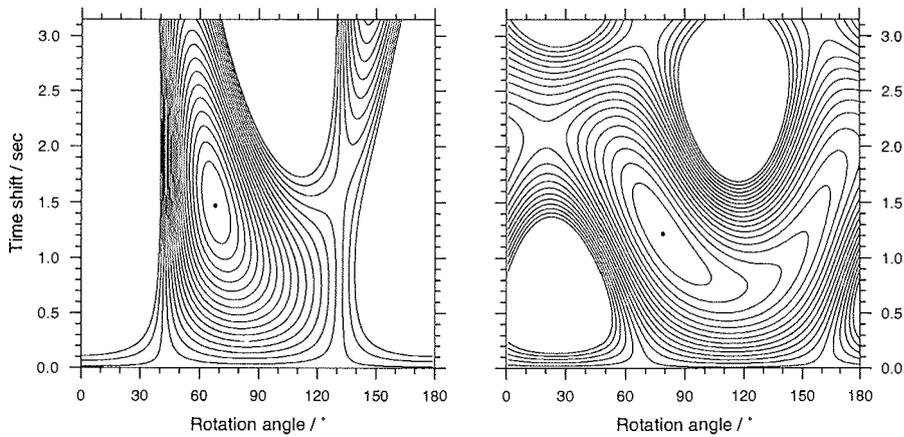
Abbildung B.28

B.2 Olymp (OLY)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 68.0^\circ \quad \delta t = 1.47 \text{ sec}$$

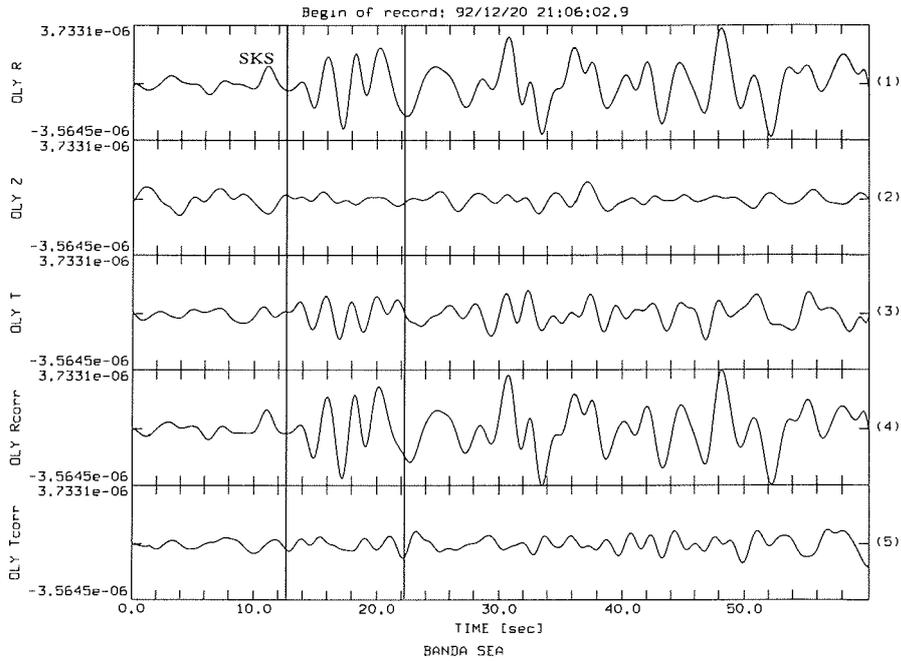
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 79.0^\circ \quad \delta t = 1.22 \text{ sec}$$



OLY 921212 SKS Flores Region, Indonesia $\Delta = 94.2^\circ$ BAZ = 132.1°

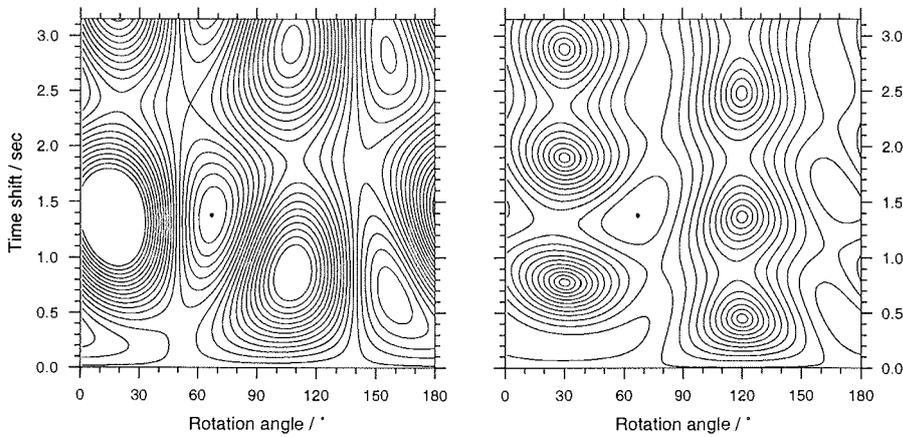
Abbildung B.29

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 67.0^\circ \quad \delta t = 1.38 \text{ sec}$$

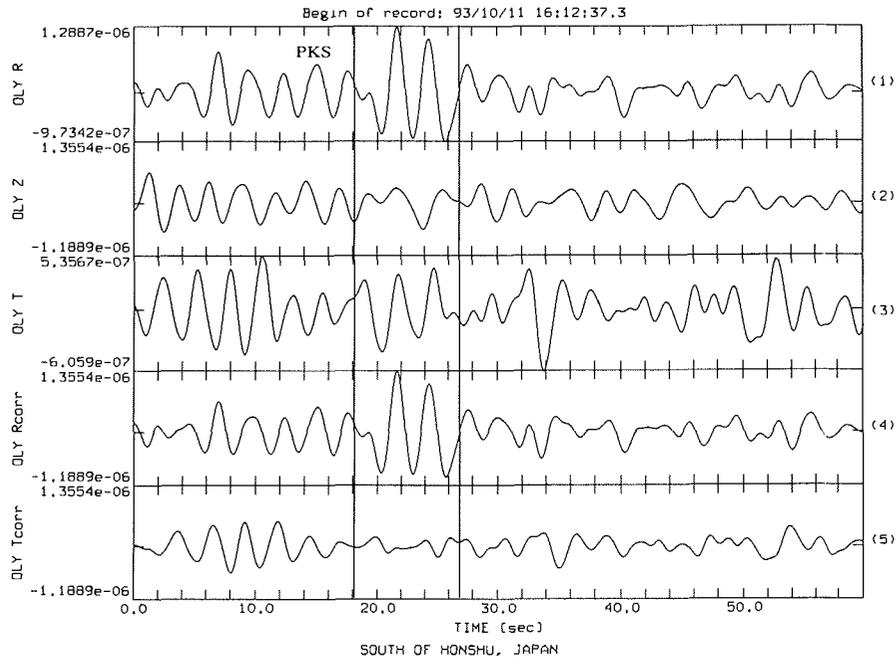
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 67.0^\circ \quad \delta t = 1.38 \text{ sec}$$



OLY 921220 SKS Banda Sea $\Delta = 98.0^\circ$ BAZ = 139.9°

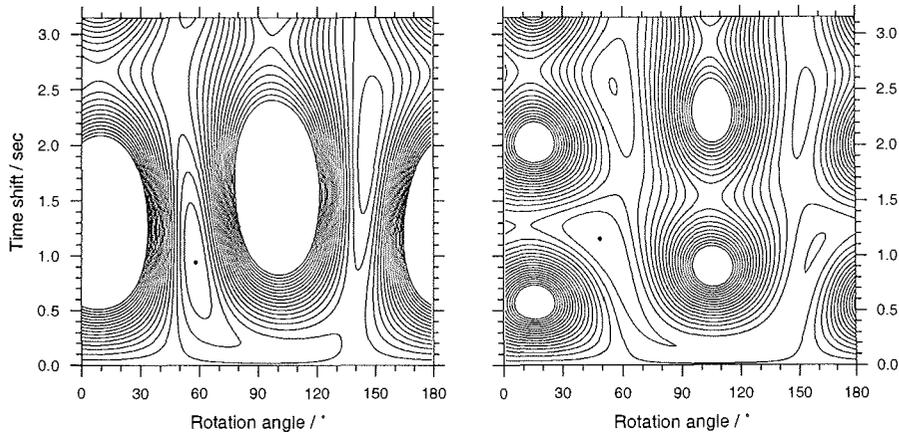
Abbildung B.30

B.2 Olymp (OLY)



$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 58.0^\circ \quad \delta t = 0.94 \text{ sec}$

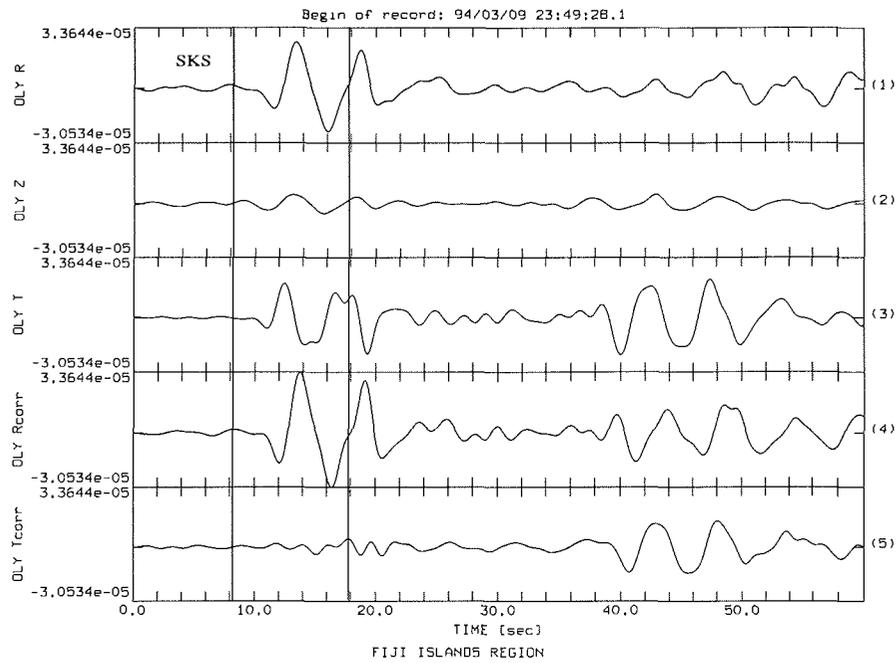
$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 49.0^\circ \quad \delta t = 1.15 \text{ sec}$



OLY 931011 PKS South of Honshu, Japan $\Delta = 137.0^\circ$ BAZ = 138.1°

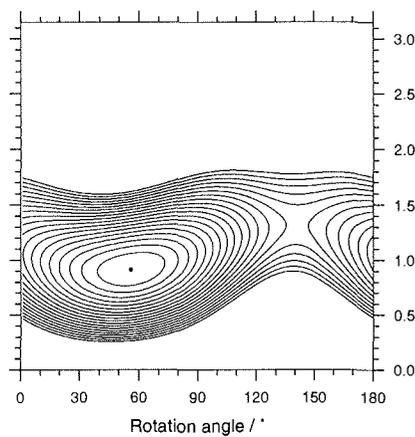
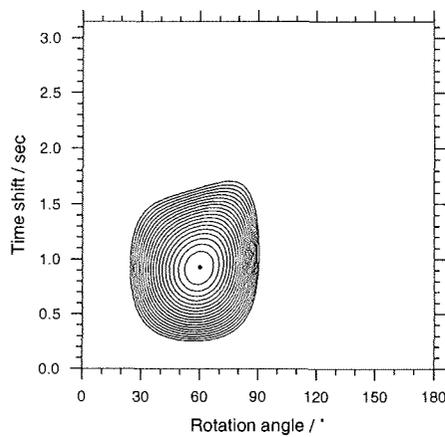
Abbildung B.31

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 60.0^\circ \quad \delta t = 0.93 \text{ sec}$$

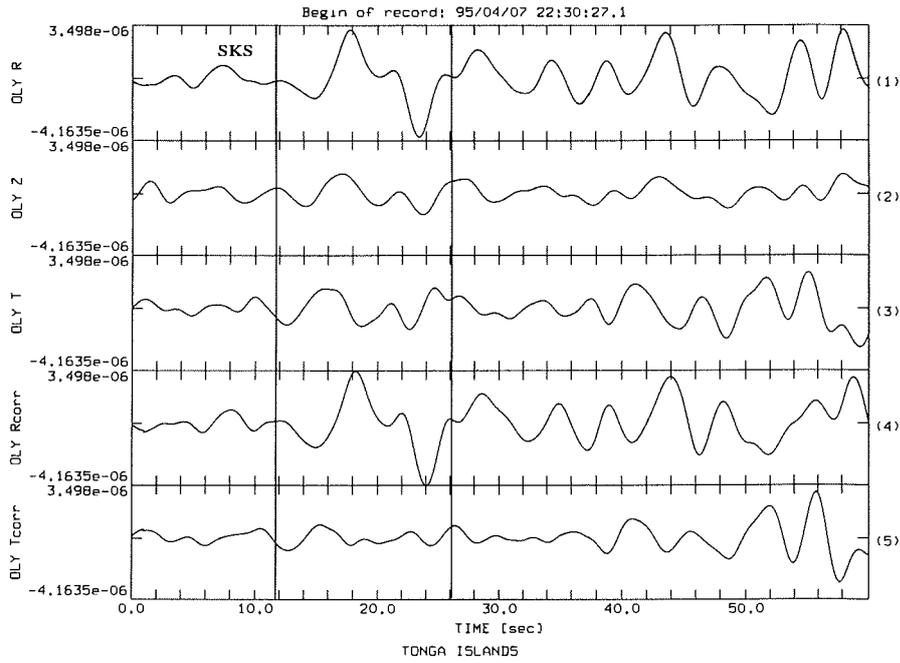
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 56.0^\circ \quad \delta t = 0.91 \text{ sec}$$



OLY 940309 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 90.6^\circ$ BAZ = 190.1°

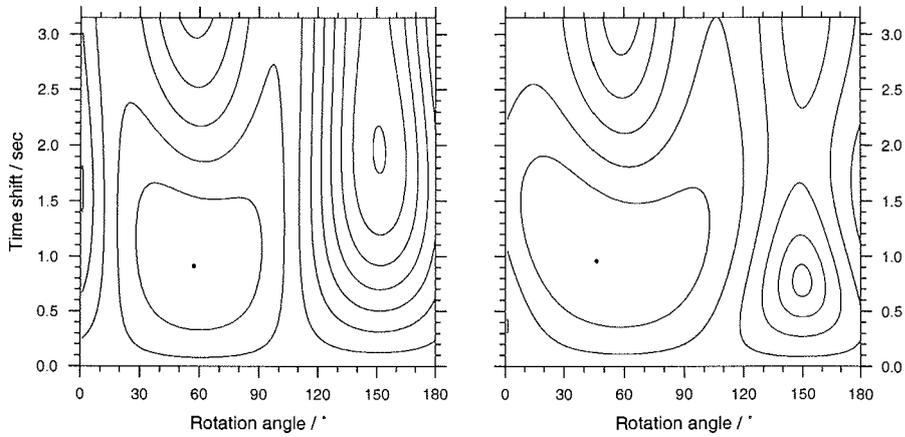
Abbildung B.32

B.2 Olymp (OLY)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 57.0^\circ \quad \delta t = 0.91 \text{ sec}$$

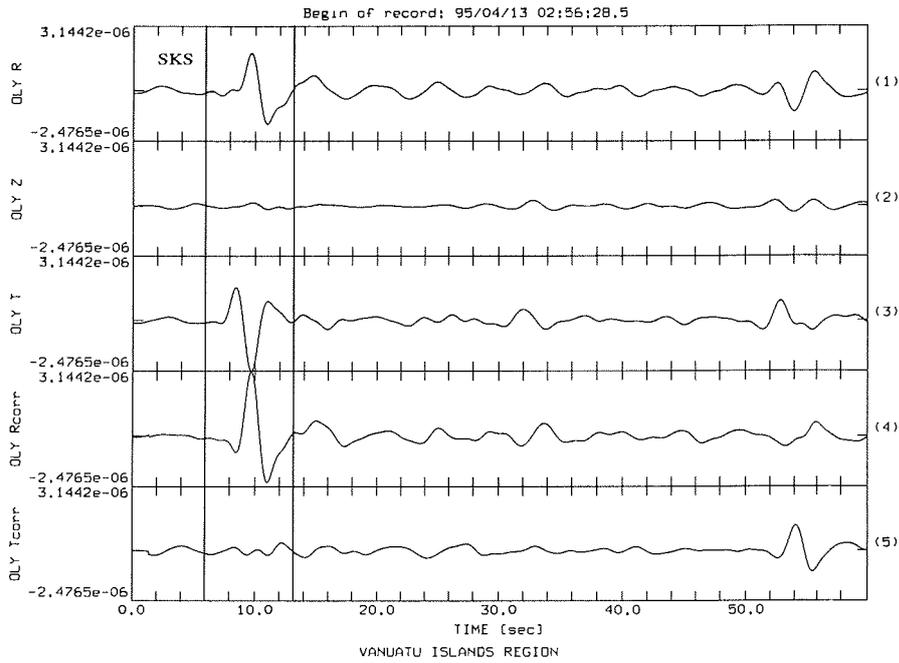
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 46.0^\circ \quad \delta t = 0.96 \text{ sec}$$



OLY 950407 SKS Tonga Islands Region $\Delta = 93.1^\circ$ BAZ = 195.6°

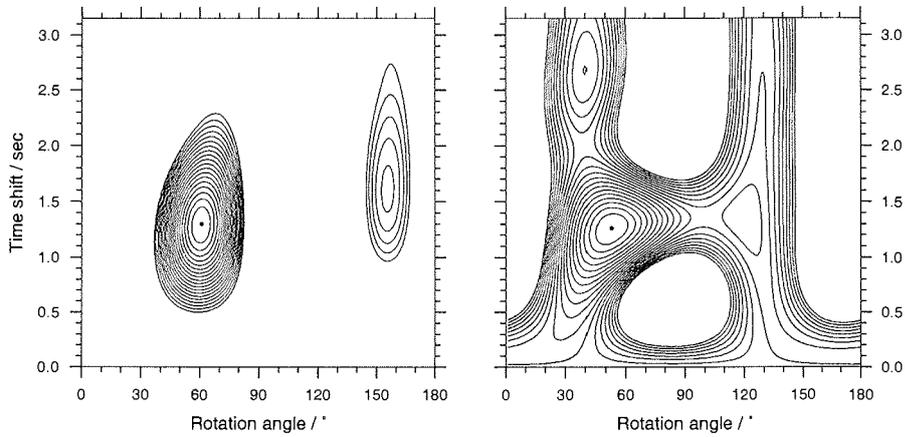
Abbildung B.33

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 61.0^\circ \quad \delta t = 1.30 \text{ sec}$$

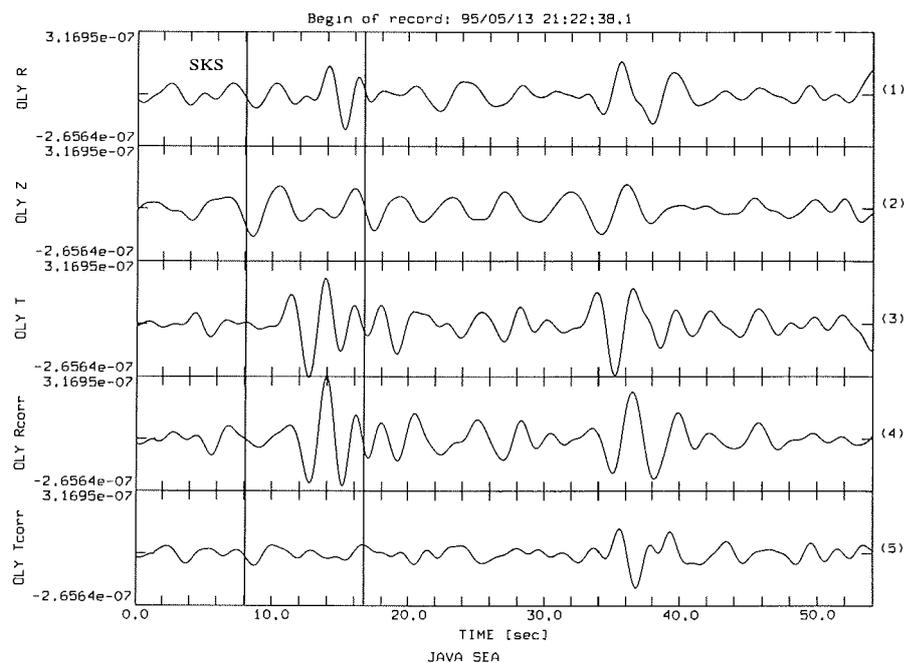
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 53.0^\circ \quad \delta t = 1.26 \text{ sec}$$



OLY 950413 SKS Vanuatu Islands Region $\Delta = 95.8^\circ$ BAZ = 180.0°

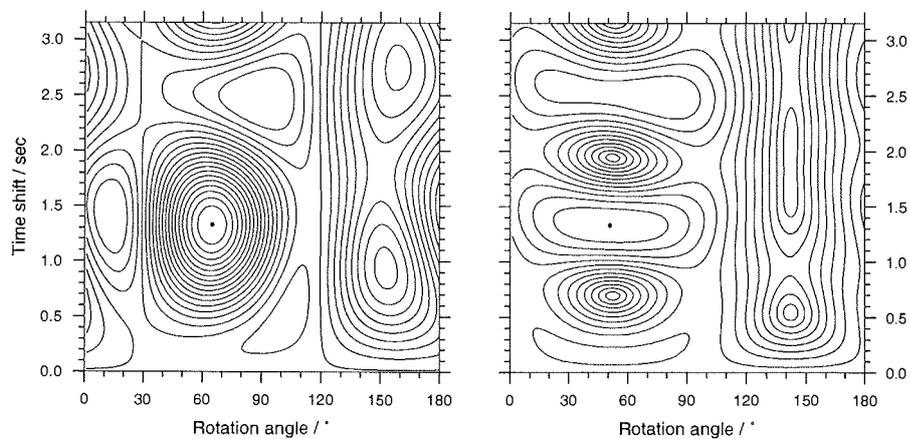
Abbildung B.34

B.2 Olymp (OLY)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 65.0^\circ \quad \delta t = 1.33 \text{ sec}$$

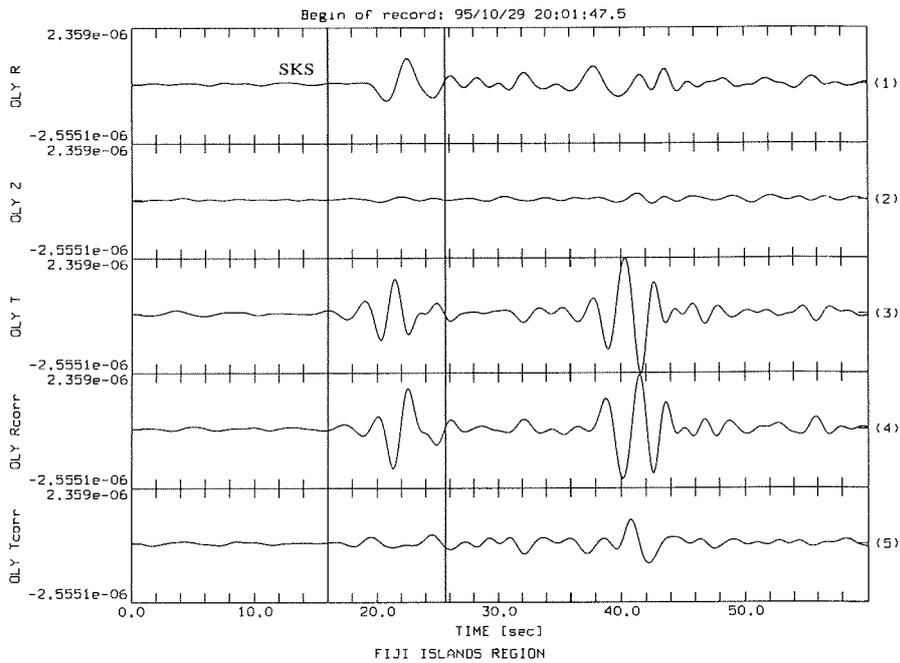
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 51.0^\circ \quad \delta t = 1.33 \text{ sec}$$



OLY 950513 SKS Java Sea $\Delta = 93.9^\circ$ BAZ = 118.7°

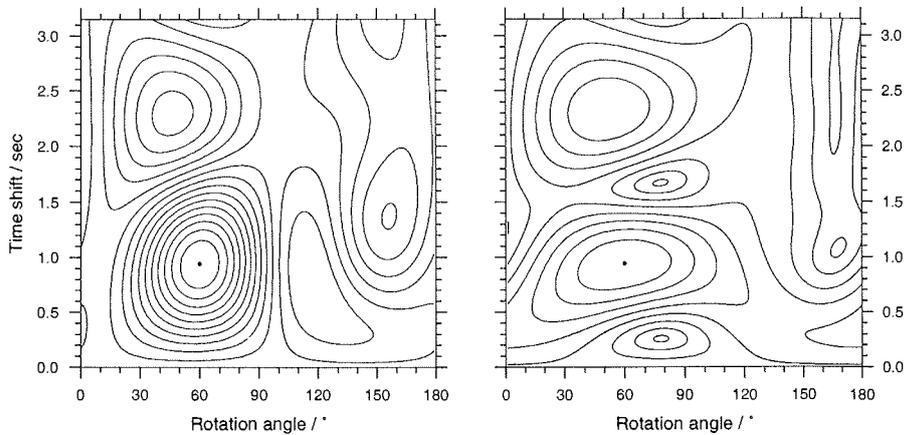
Abbildung B.35

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 60.0^\circ \quad \delta t = 0.94 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 60.0^\circ \quad \delta t = 0.94 \text{ sec}$$

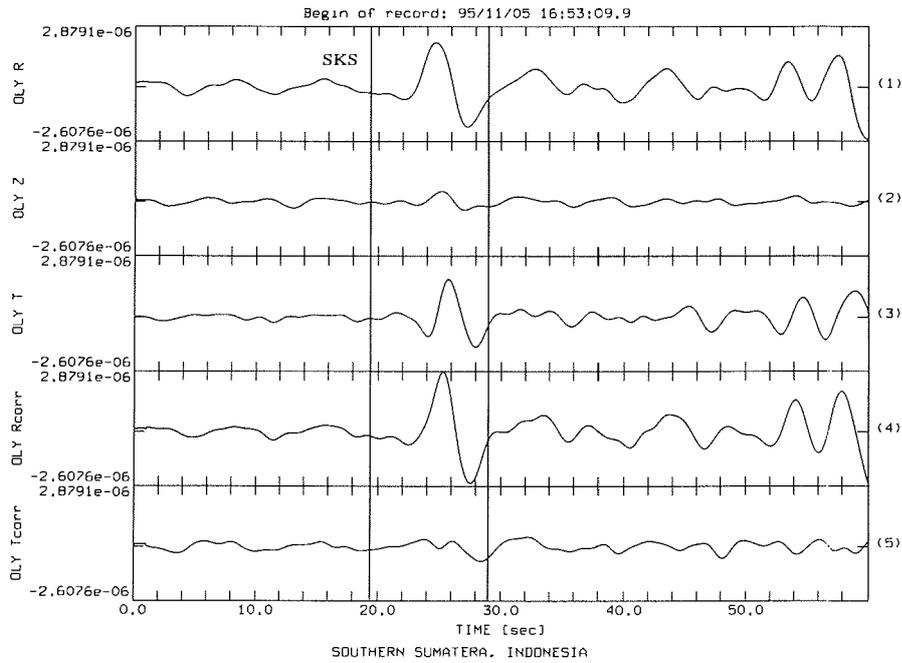


OLY 951029 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 87.2^\circ$ BAZ = 189.3°

Bem.: Das Seismometer war um ca. 18° dejustiert und wurde um diesen Betrag korrigiert.

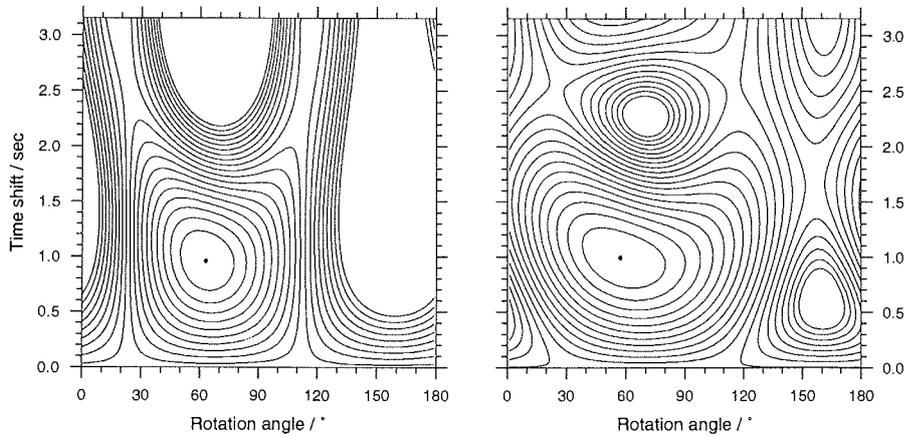
Abbildung B.36

B.2 Olymp (OLY)



$$E_1 / E_{1,\min} \quad \phi = 63.0^\circ \quad \delta t = 0.96 \text{ sec}$$

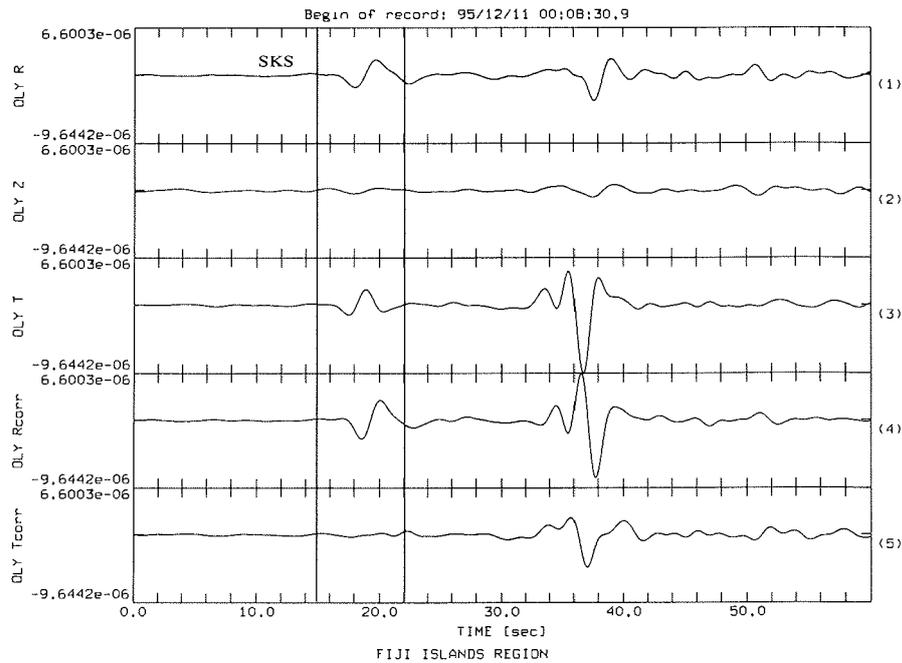
$$\lambda_1 / \lambda_{1,\min} \quad \phi = 57.0^\circ \quad \delta t = 0.99 \text{ sec}$$



OLY 951105 SKS Southern Sumatera, Indonesia $\Delta = 92.5^\circ$ BAZ = 113.4°
 Bem.: Das Seismometer war um ca. 18° dejustiert und wurde um diesen Betrag korrigiert.

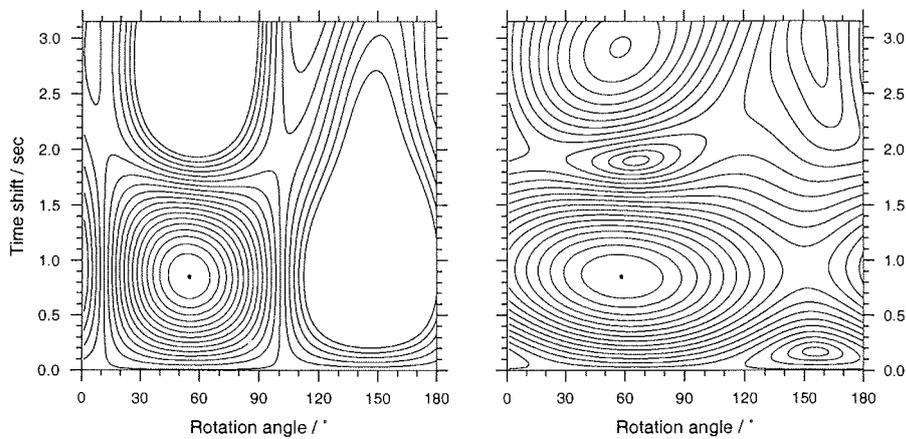
Abbildung B.37

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 55.0^\circ \quad \delta t = 0.85 \text{ sec}$$

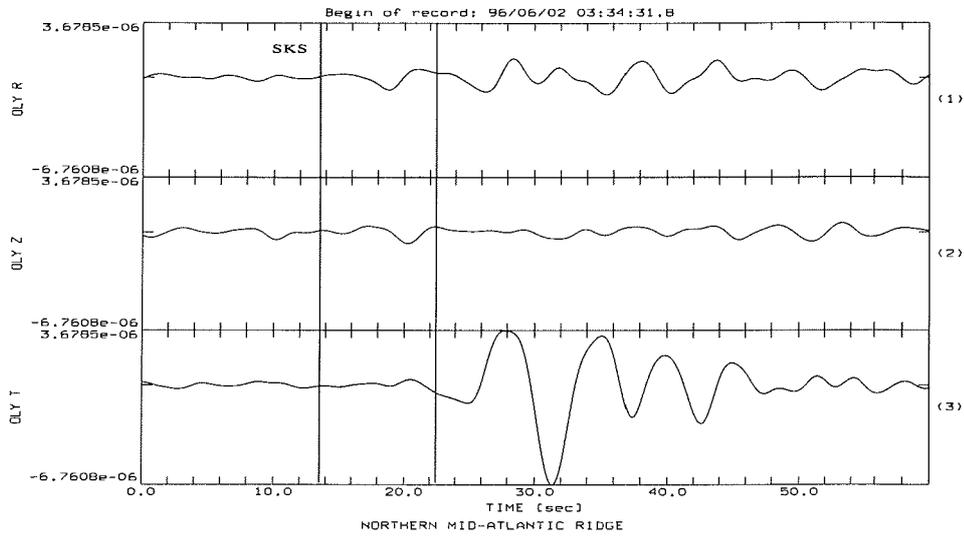
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 58.0^\circ \quad \delta t = 0.85 \text{ sec}$$



OLY 951210 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 87.5^\circ$ BAZ = 190.5°

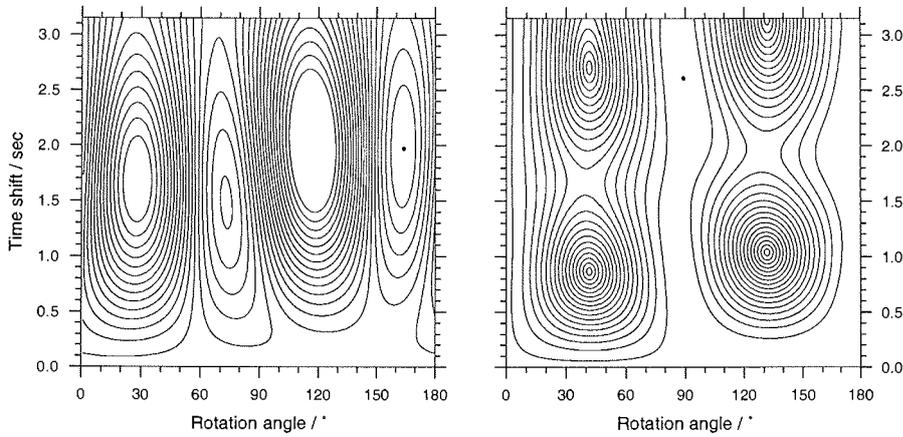
Bem.: Das Seismometer war um ca. 18° dejustiert und wurde um diesen Betrag korrigiert.

Abbildung B.38



$E_1 / E_{1, \min}$ $\phi = 164.0^\circ$ $\delta t = 1.97$ sec

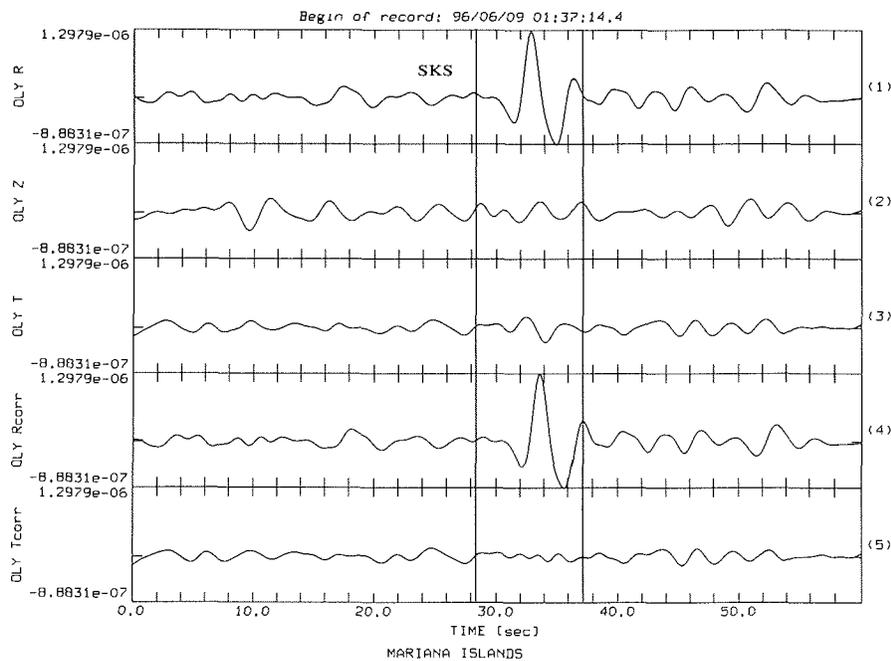
$\lambda_1 / \lambda_{1, \min}$ $\phi = 89.0^\circ$ $\delta t = 2.61$ sec



OLY 960602 SKS Northern Mid-Atlantic Ridge $\Delta = 84.6^\circ$ BAZ = 327.8°

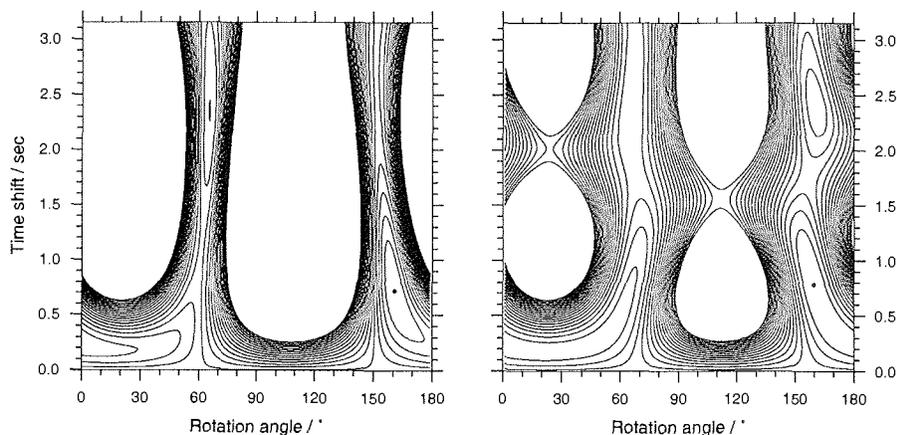
Abbildung B.39

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_i / E_{t, \min} \quad \phi = 161.0^\circ \quad \delta t = 0.72 \text{ sec}$$

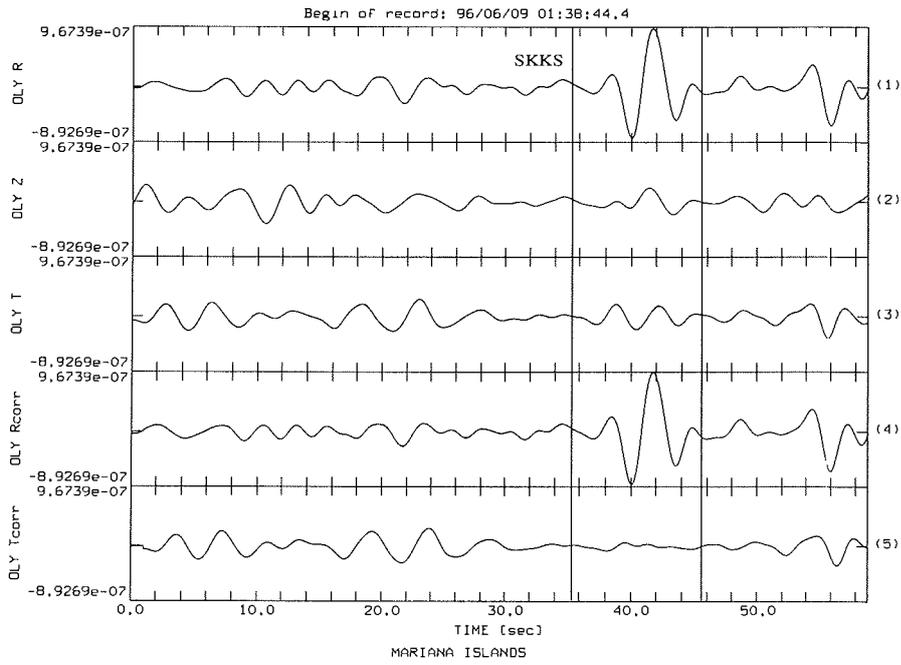
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 160.0^\circ \quad \delta t = 0.78 \text{ sec}$$



OLY 960606 SKS Mariana Islands $\Delta = 124.3^\circ$ BAZ = 151.3°

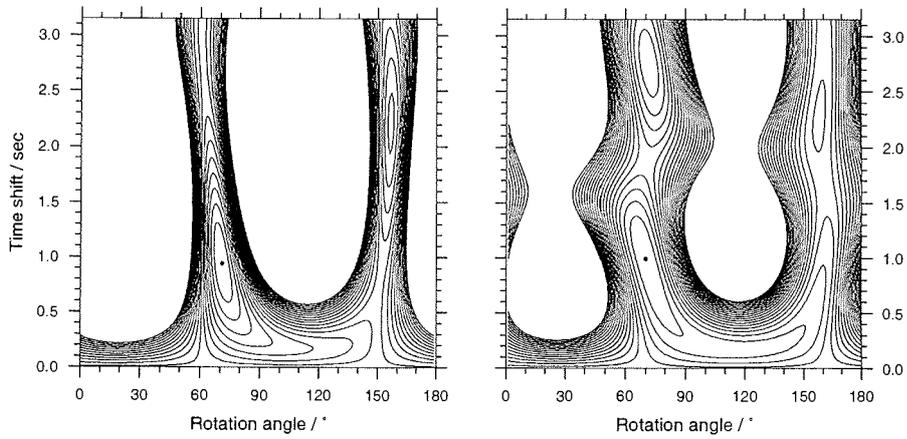
Abbildung B.40

B.2 Olymp (OLY)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 71.0^\circ \quad \delta t = 0.94 \text{ sec}$$

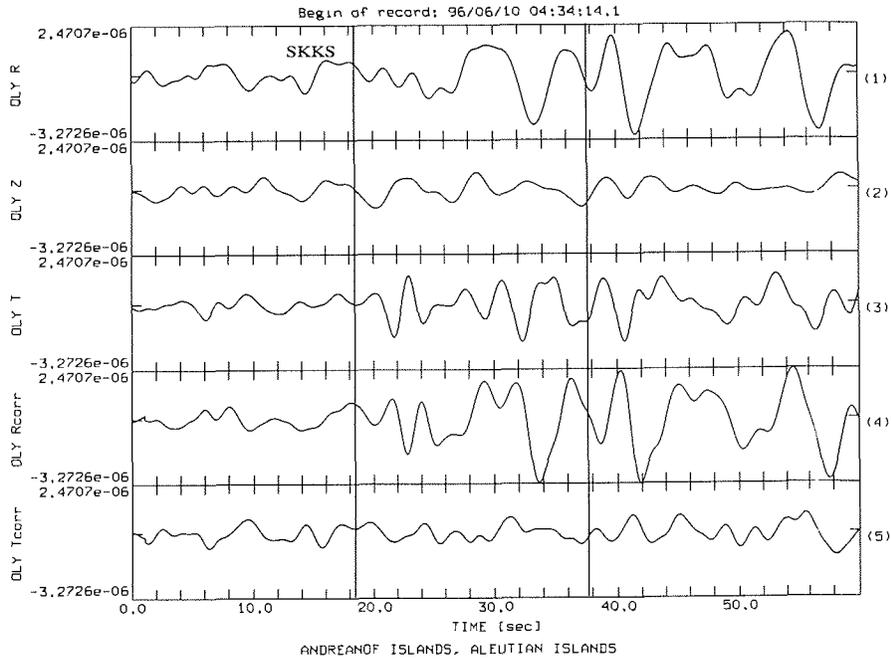
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 70.0^\circ \quad \delta t = 0.99 \text{ sec}$$



OLY 960606 SKKS Mariana Islands $\Delta = 124.3^\circ$ BAZ = 151.3°

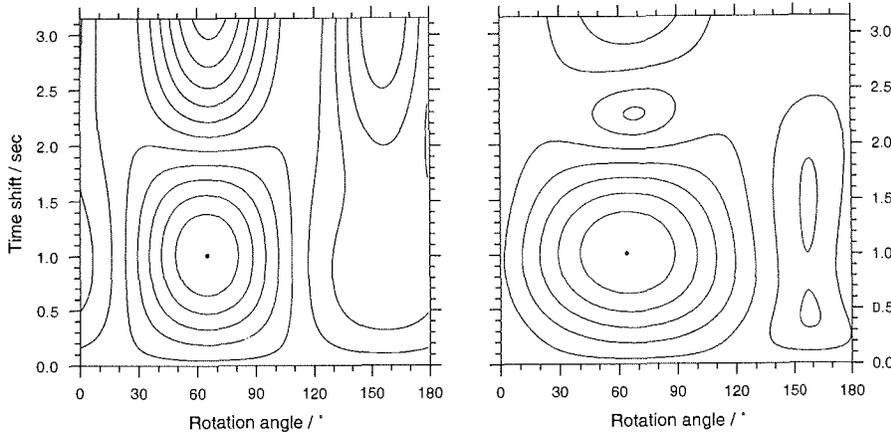
Abbildung B.41

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 65.0^\circ \quad \delta t = 1.01 \text{ sec}$$

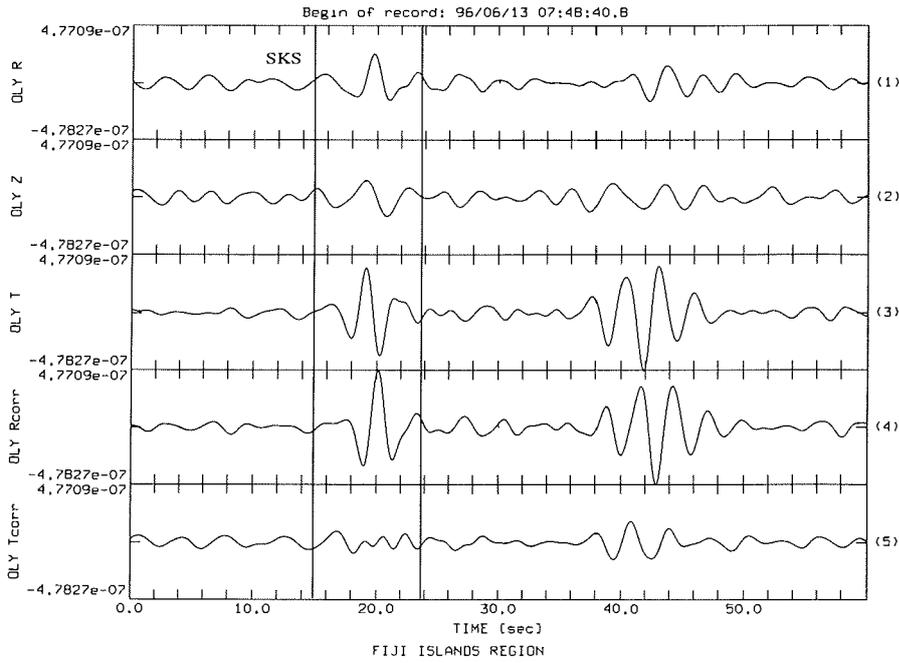
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 64.0^\circ \quad \delta t = 1.01 \text{ sec}$$



OLY 960610 SKKS Andreanof Is., Aleutian Is. $\Delta = 159.4^\circ$ BAZ = 201.4°

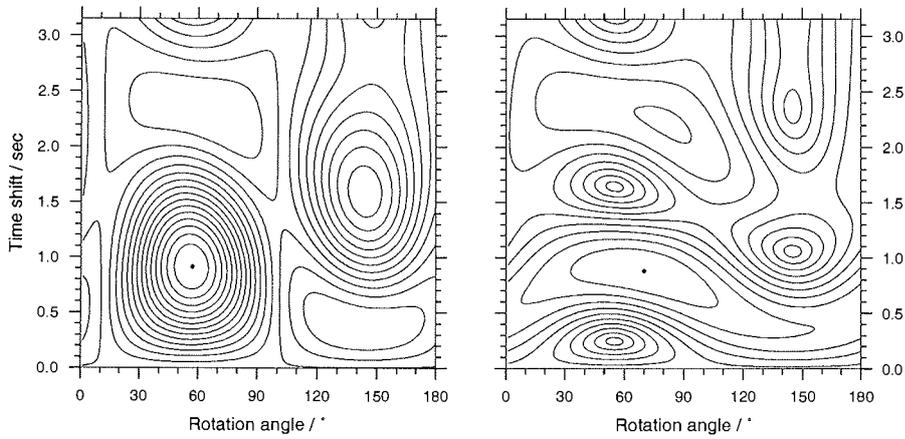
Abbildung B.42

B.2 Olymp (OLY)



$$E_1 / E_{1,\min} \quad \phi = 57.0^\circ \quad \delta t = 0.91 \text{ sec}$$

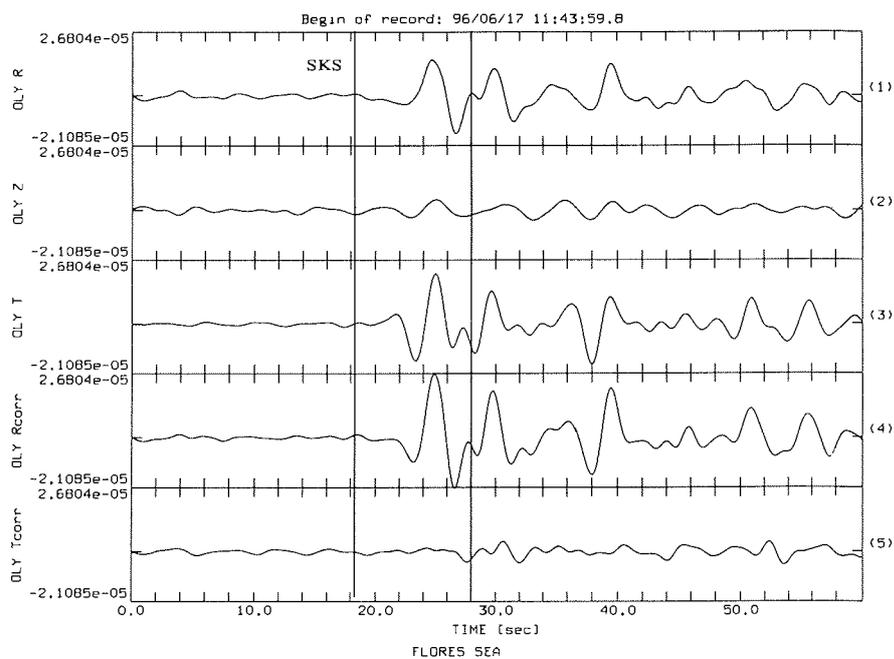
$$\lambda_1 / \lambda_{1,\min} \quad \phi = 70.0^\circ \quad \delta t = 0.88 \text{ sec}$$



OLY 960613 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 88.3^\circ$ BAZ = 190.6°

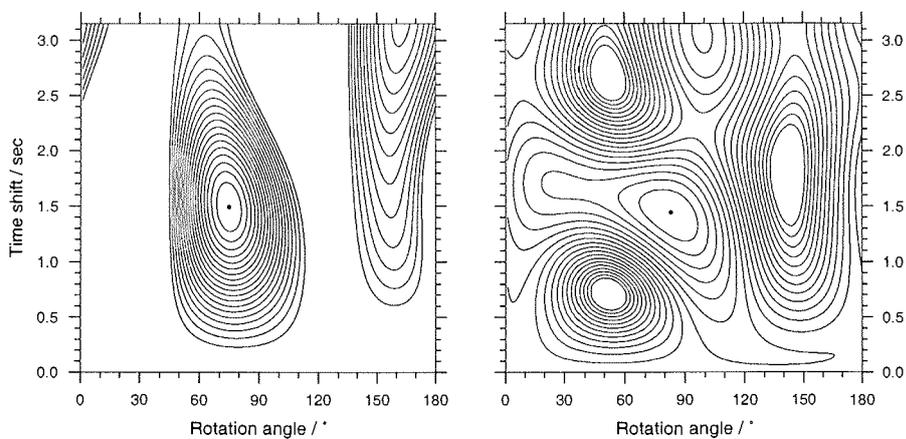
Abbildung B.43

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 75.0^\circ \quad \delta t = 1.49 \text{ sec}$$

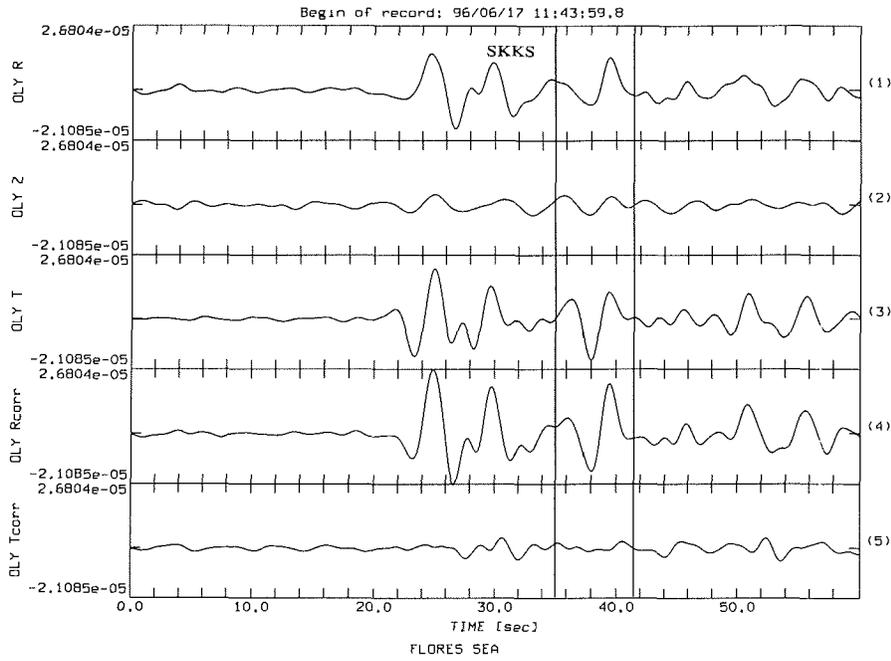
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 83.0^\circ \quad \delta t = 1.44 \text{ sec}$$



OLY 960617 SKS Flores Sea $\Delta = 95.8^\circ$ BAZ = 132.4°

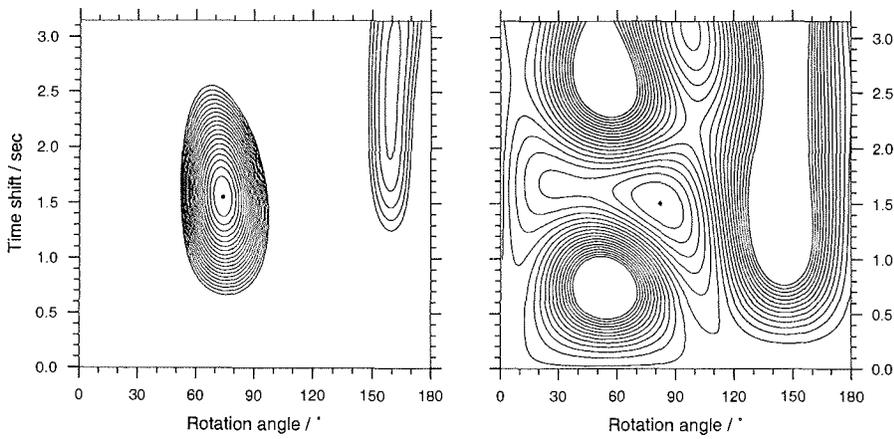
Abbildung B.44

B.2 Olymp (OLY)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 74.0^\circ \quad \delta t = 1.55 \text{ sec}$$

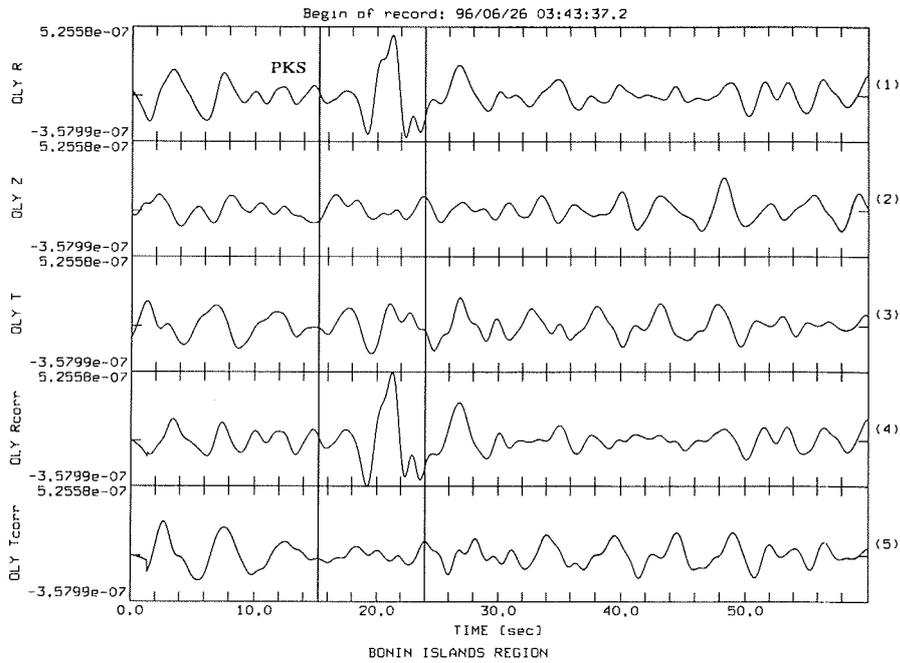
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 82.0^\circ \quad \delta t = 1.50 \text{ sec}$$



OLY 960617 SKKS Flores Sea $\Delta = 95.8^\circ$ BAZ = 132.4°

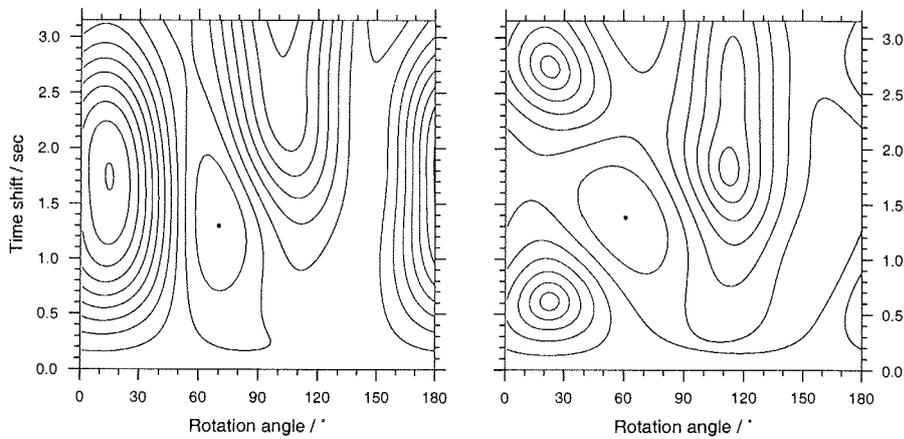
Abbildung B.45

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$E_1 / E_{t, \min} \quad \phi = 70.0^\circ \quad \delta t = 1.30 \text{ sec}$

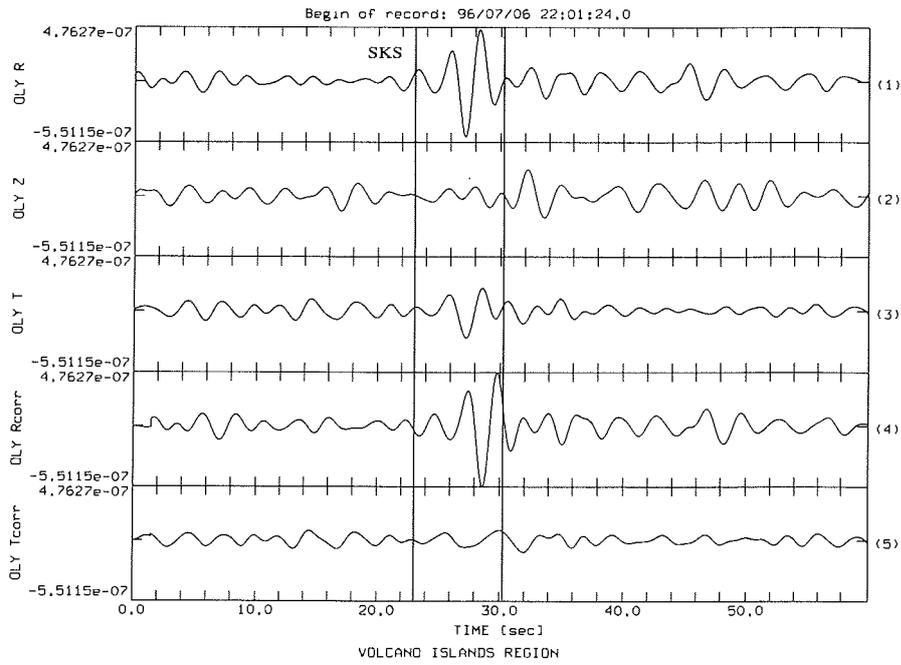
$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 61.0^\circ \quad \delta t = 1.38 \text{ sec}$



OLY 960626 PKS Bonin Islands Region $\Delta = 133.2^\circ$ BAZ = 141.6°

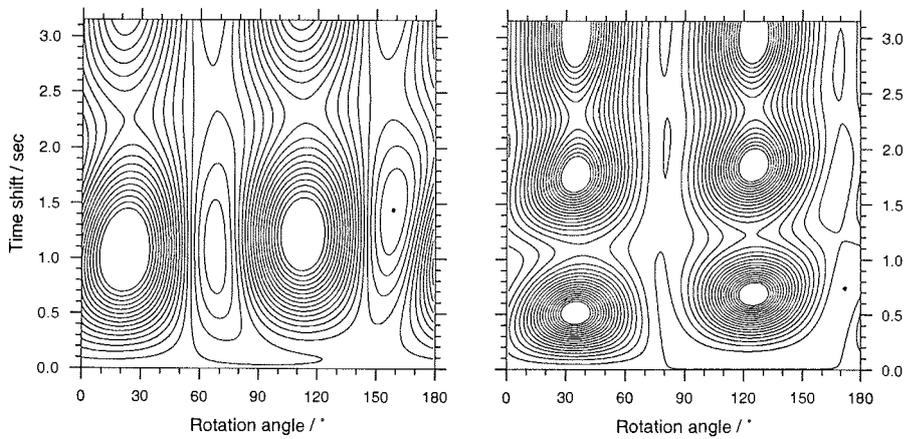
Abbildung B.46

B.2 Olymp (OLY)



$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 159.0^\circ \quad \delta t = 1.44 \text{ sec}$

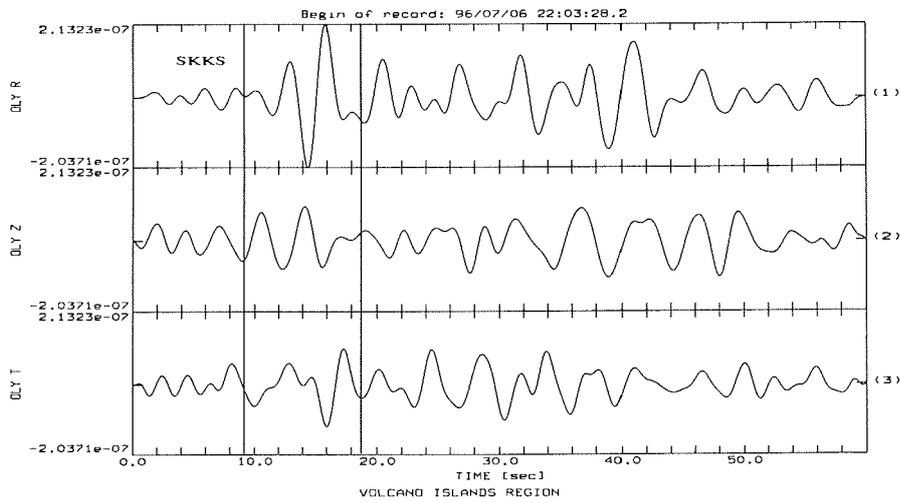
$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 172.0^\circ \quad \delta t = 0.74 \text{ sec}$



OLY 960706 SKS Volcano Islands Region $\Delta = 128.3^\circ$ BAZ = 146.9°

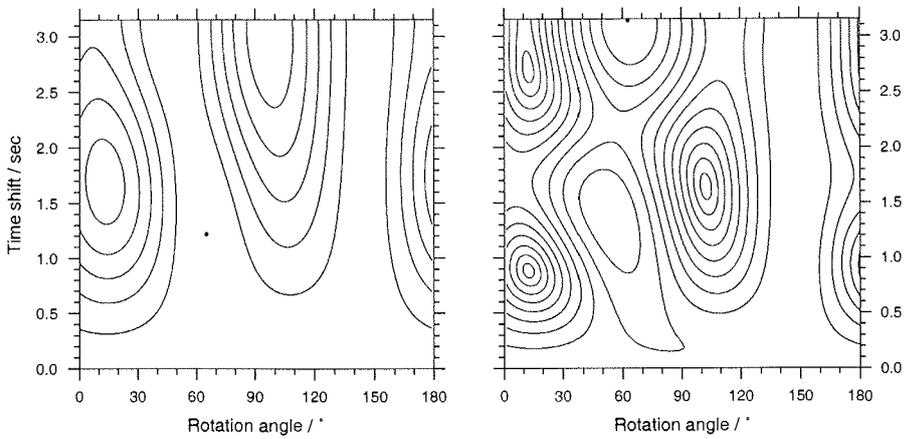
Abbildung B.47

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



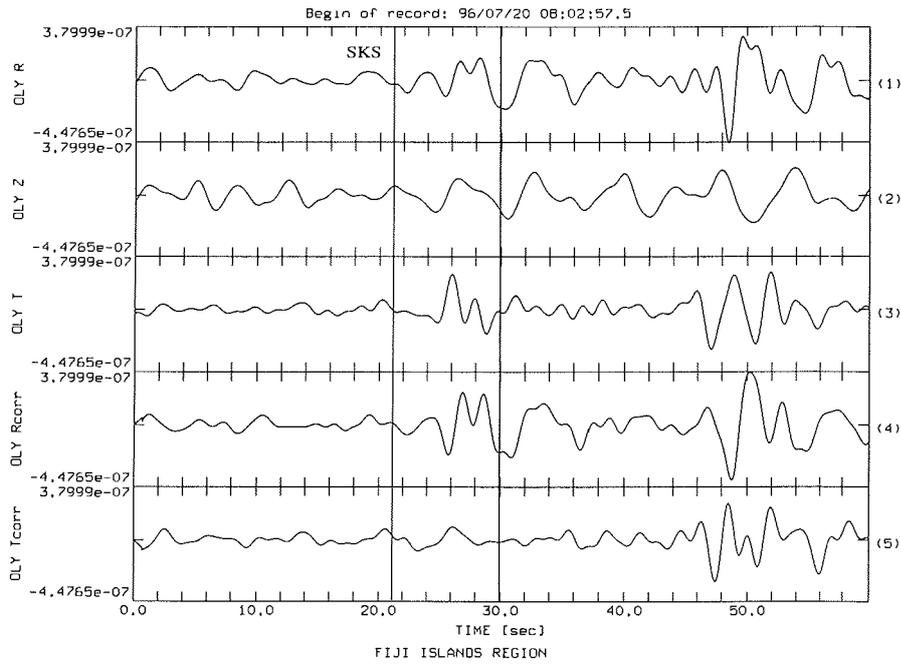
$E_1 / E_{t,min} \quad \phi = 65.0^\circ \quad \delta t = 1.22 \text{ sec}$

$\lambda_1 / \lambda_{1,min} \quad \phi = 63.0^\circ \quad \delta t = 3.14 \text{ sec}$



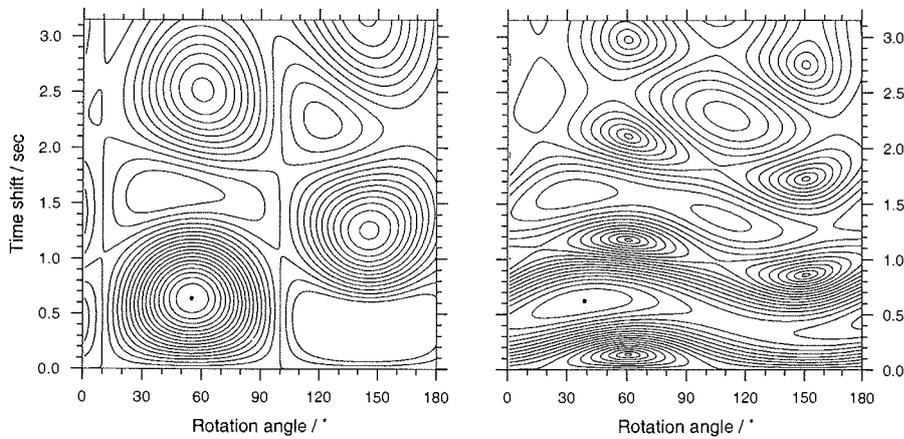
OLY 960706 SKKS Volcano Islands Region $\Delta = 128.3^\circ$ BAZ = 146.9°

Abbildung B.48



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 55.0^\circ \quad \delta t = 0.64 \text{ sec}$$

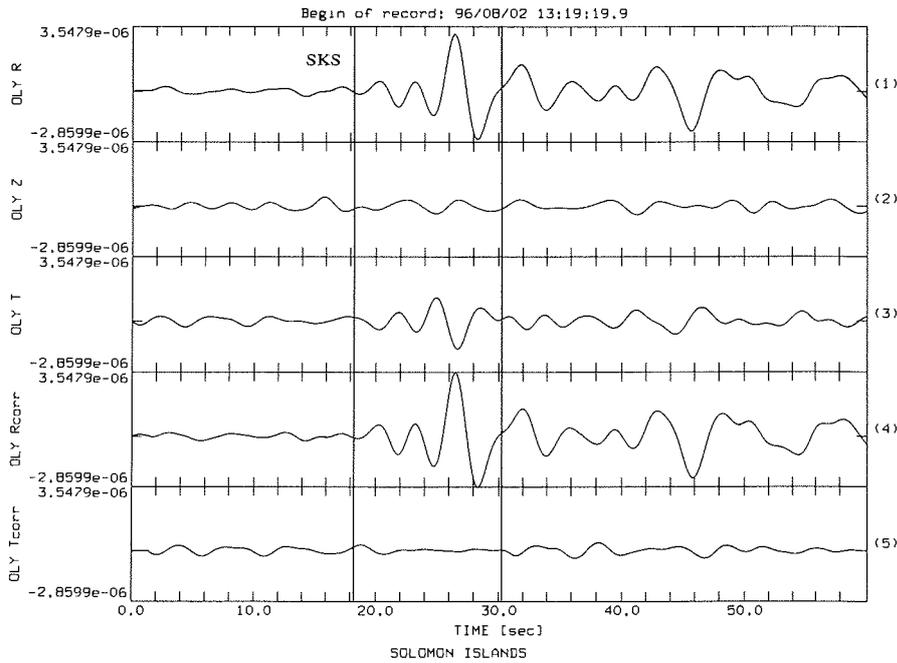
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 39.0^\circ \quad \delta t = 0.62 \text{ sec}$$



OLY 960720 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 88.9^\circ$ BAZ = 191.2°

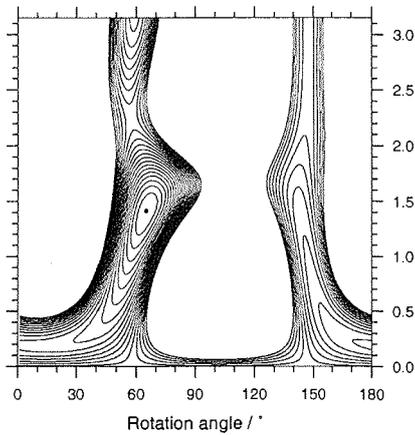
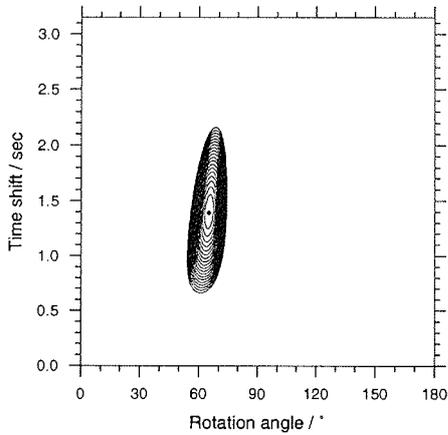
Abbildung B.49

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 65.0^\circ \quad \delta t = 1.39 \text{ sec}$

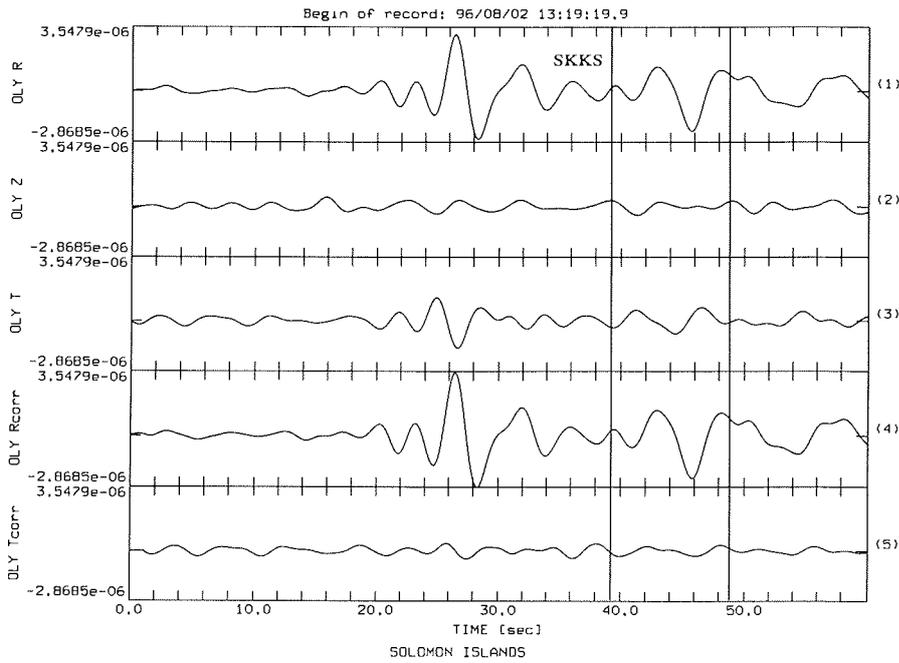
$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 65.0^\circ \quad \delta t = 1.41 \text{ sec}$



OLY 960802 SKS Solomon Islands $\Delta = 98.0^\circ$ BAZ = 171.2°

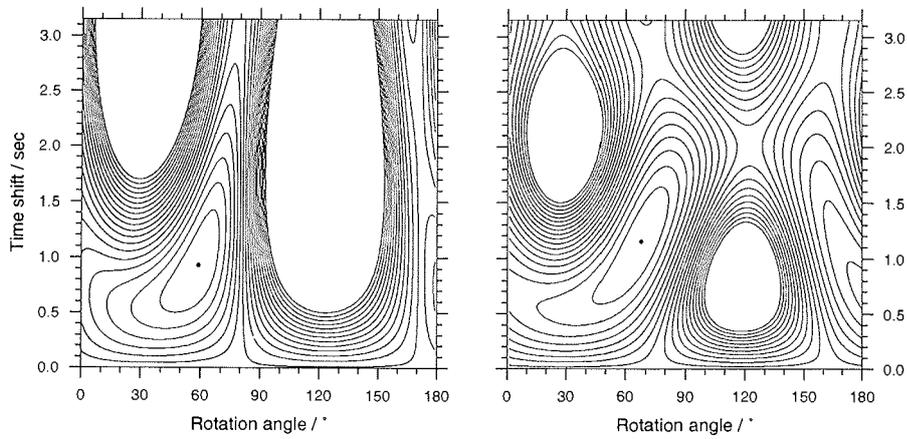
Abbildung B.50

B.2 Olymp (OLY)



$$E_1 / E_{1,\min} \quad \phi = 59.0^\circ \quad \delta t = 0.93 \text{ sec}$$

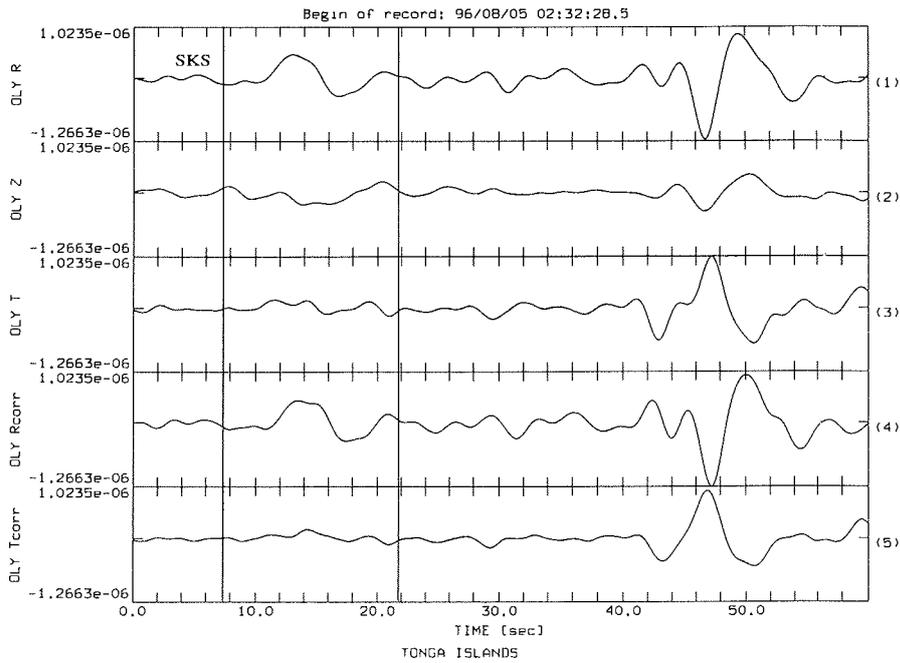
$$\lambda_1 / \lambda_{1,\min} \quad \phi = 68.0^\circ \quad \delta t = 1.15 \text{ sec}$$



OLY 960802 SKKS Solomon Islands $\Delta = 98.0^\circ$ BAZ = 171.2°

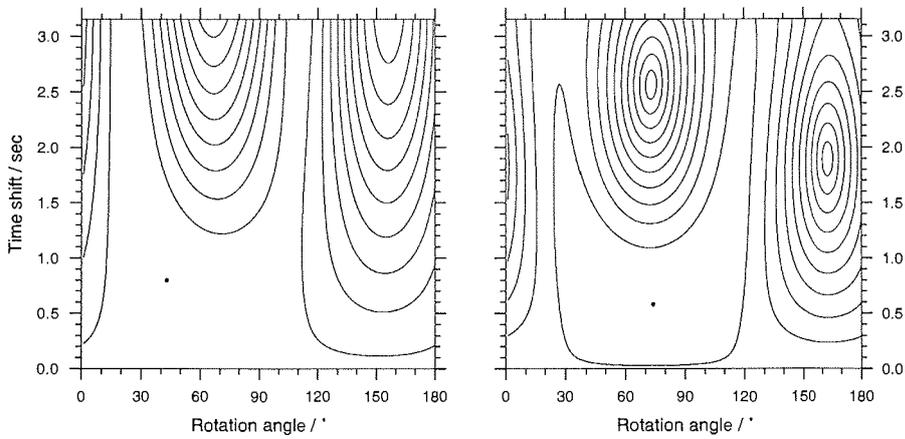
Abbildung B.51

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 43.0^\circ \quad \delta t = 0.80 \text{ sec}$$

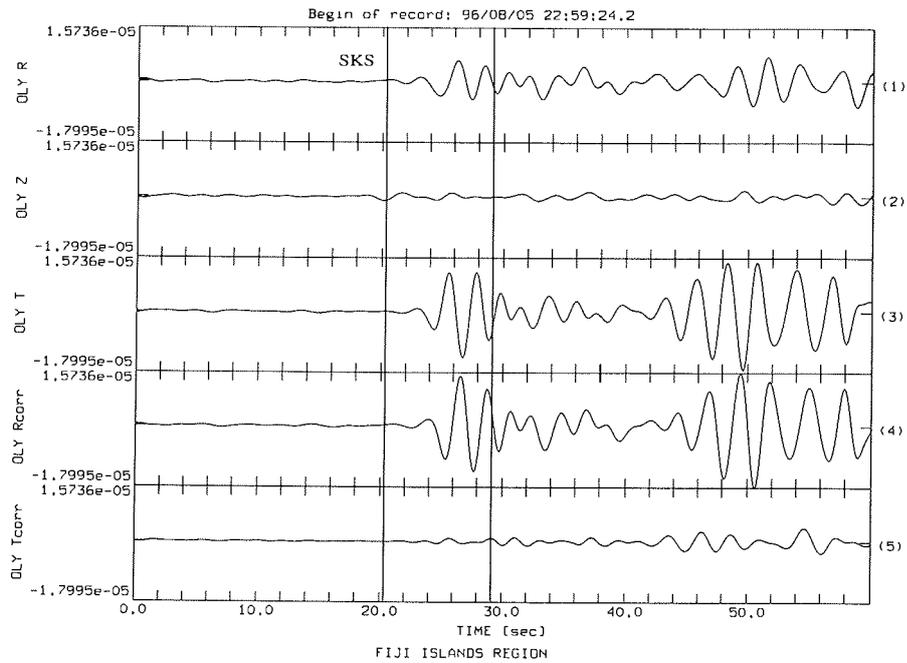
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 74.0^\circ \quad \delta t = 0.58 \text{ sec}$$



OLY 960805a SKS Tonga Islands $\Delta = 93.0^\circ$ BAZ = 195.7°

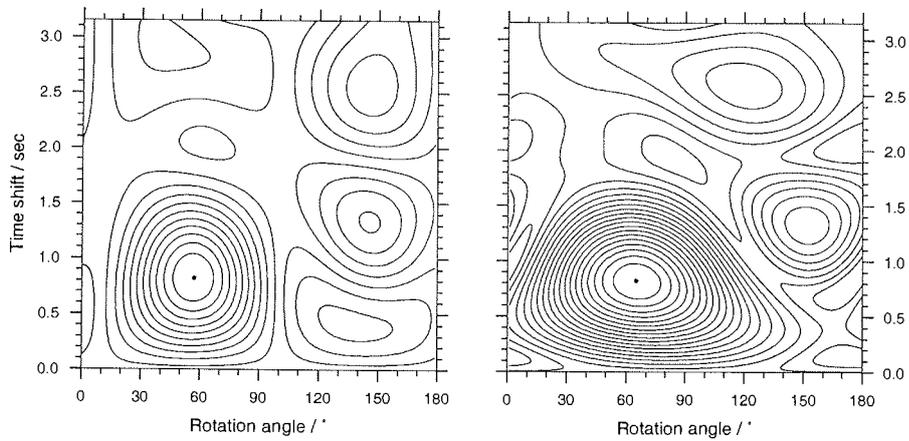
Abbildung B.52

B.2 Olymp (OLY)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 57.0^\circ \quad \delta t = 0.82 \text{ sec}$$

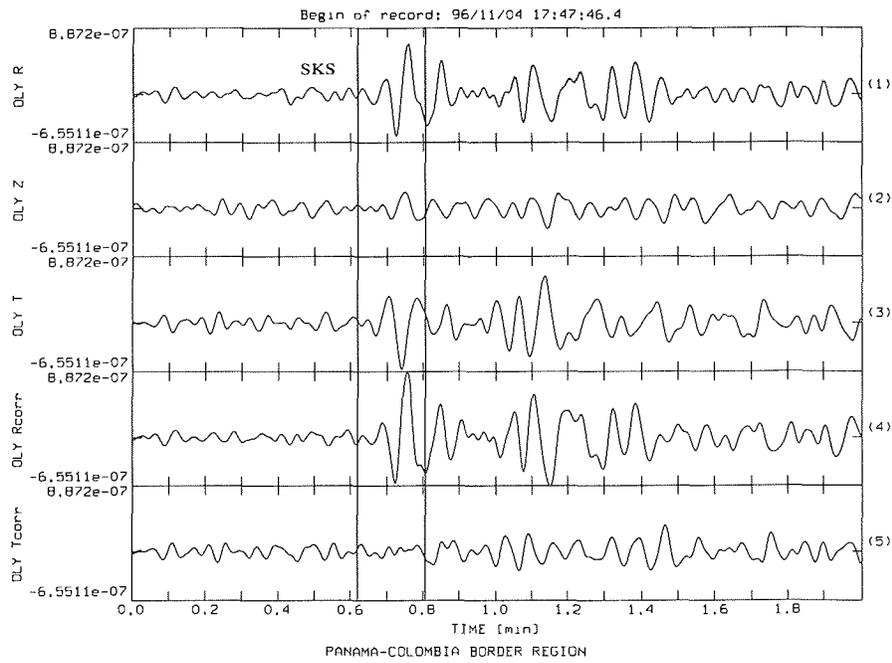
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 65.0^\circ \quad \delta t = 0.82 \text{ sec}$$



OLY 960805b SKS Fiji Islands Region $\Delta = 88.1^\circ$ BAZ = 190.4°

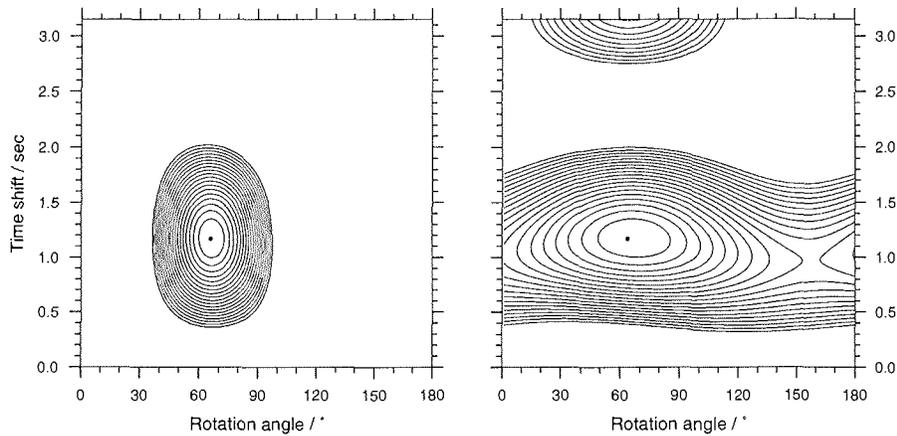
Abbildung B.53

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_1 / E_{t, \min} \quad \phi = 66.0^\circ \quad \delta t = 1.17 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 64.0^\circ \quad \delta t = 1.17 \text{ sec}$$

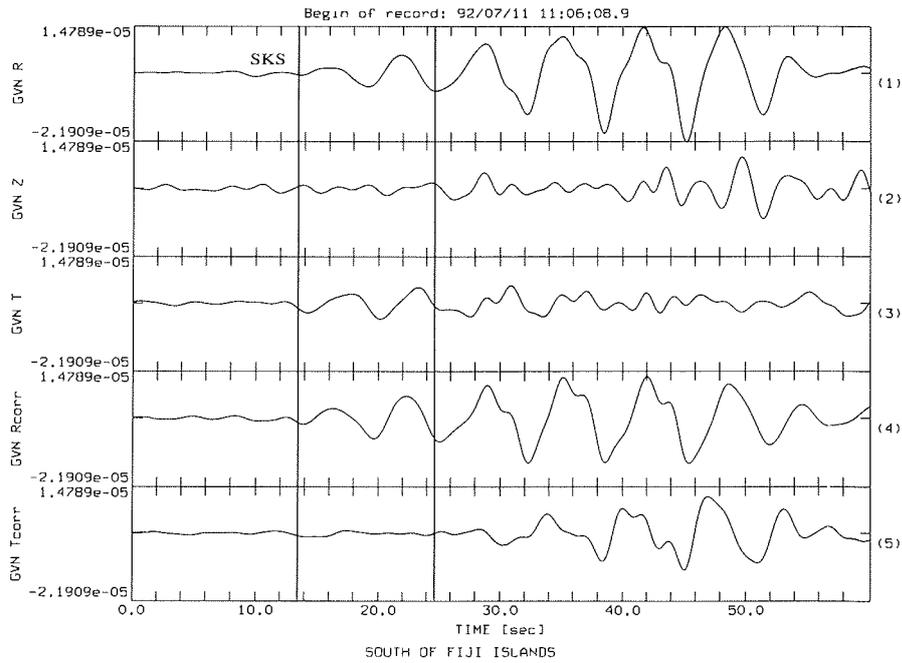


OLY 961104 SKS Panama-Columbia Border Region $\Delta = 89.9^\circ$ BAZ = 293.4°

Abbildung B.54

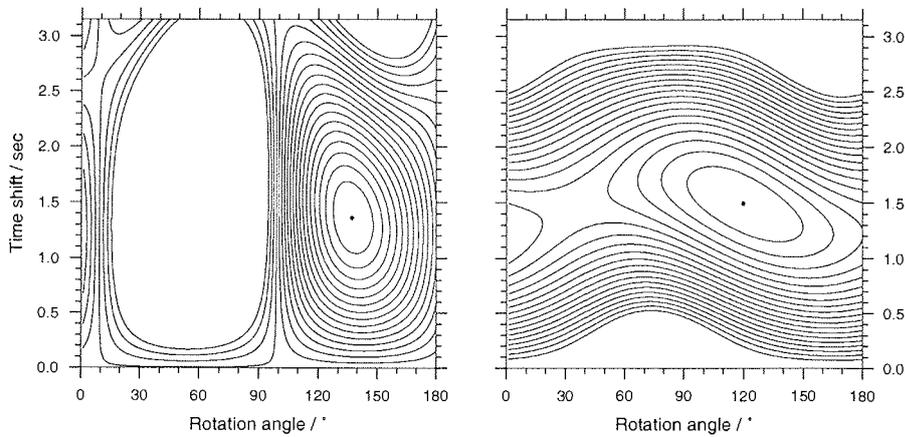
B.3 Georg-von-Neumayer (GVN)

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 137.0^\circ \quad \delta t = 1.36 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 120.0^\circ \quad \delta t = 1.49 \text{ sec}$$

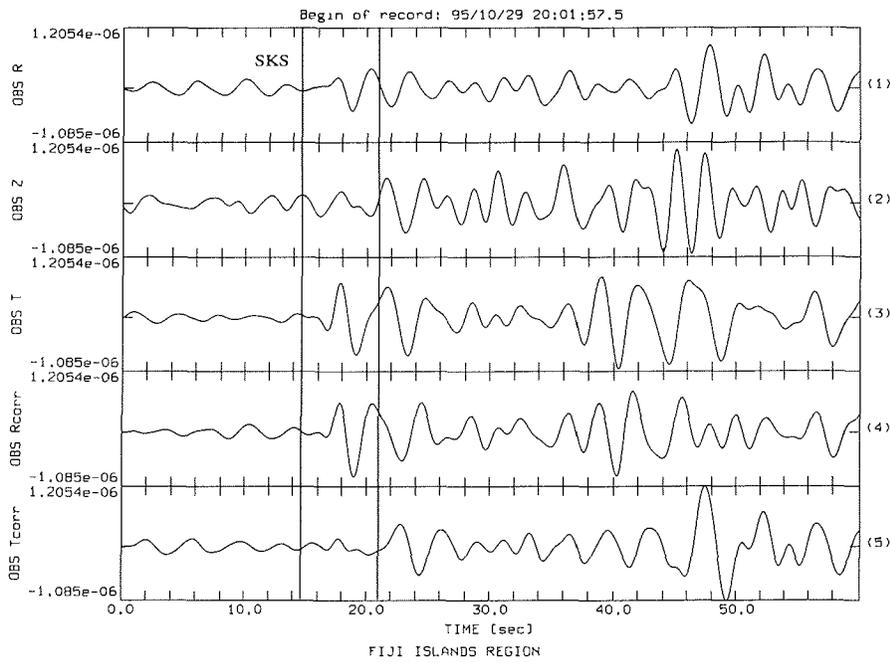


GVN 920711 SKS South of Fiji Islands $\Delta = 87.4^\circ$ BAZ = 189.0°

Abbildung B.55

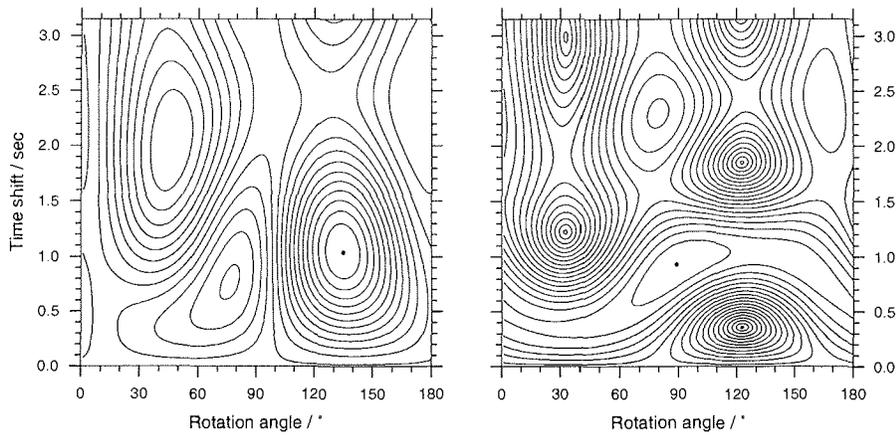
B.4 Observatorium (OBS)

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 135.0^\circ \quad \delta t = 1.04 \text{ sec}$$

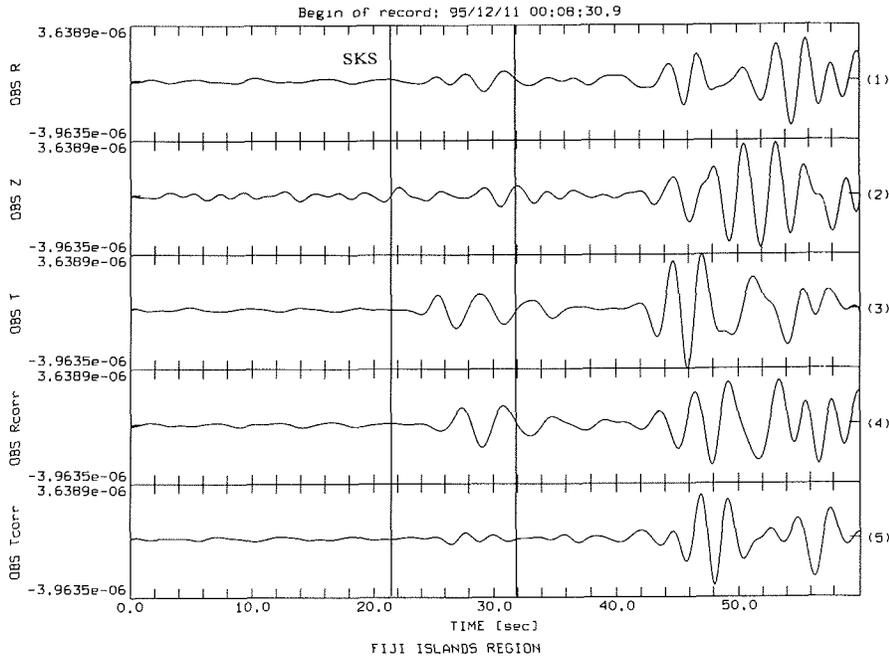
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 89.0^\circ \quad \delta t = 0.93 \text{ sec}$$



OBS 951029 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 87.8^\circ$ BAZ = 188.0°

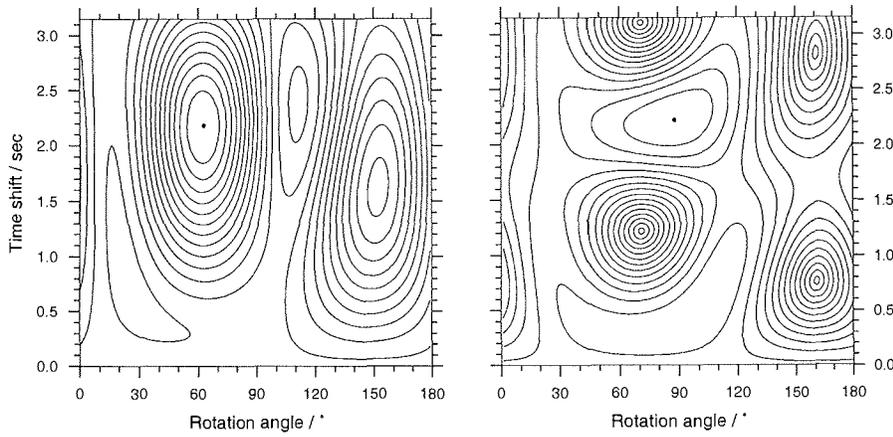
Abbildung B.56

B.4 Observatorium (OBS)



$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 63.0^\circ \quad \delta t = 2.18 \text{ sec}$

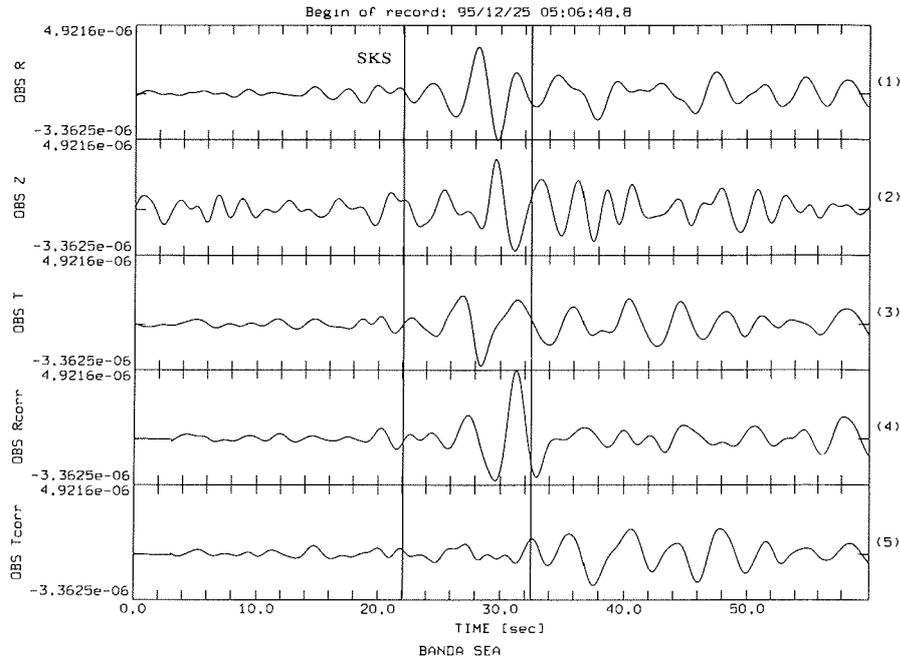
$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 88.0^\circ \quad \delta t = 2.22 \text{ sec}$



OBS 951210 SKS Fiji Islands Region $\Delta = 88.2^\circ$ BAZ = 189.2°

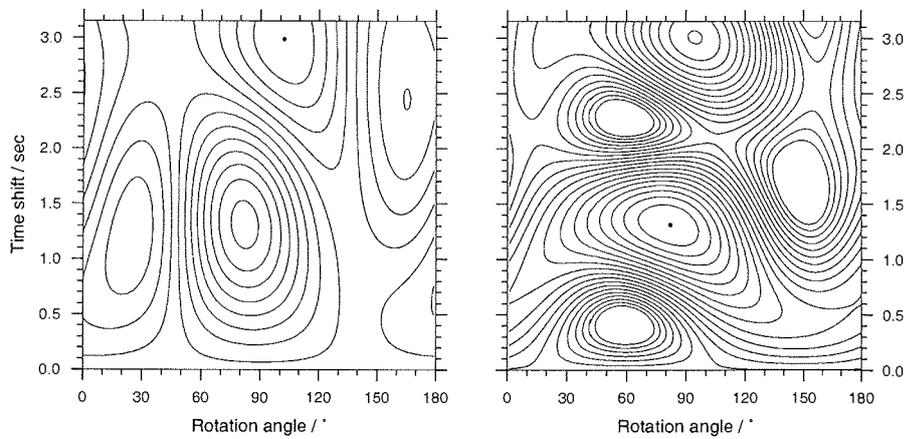
Abbildung B.57

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 102.0^\circ \quad \delta t = 2.99 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 82.0^\circ \quad \delta t = 1.31 \text{ sec}$$

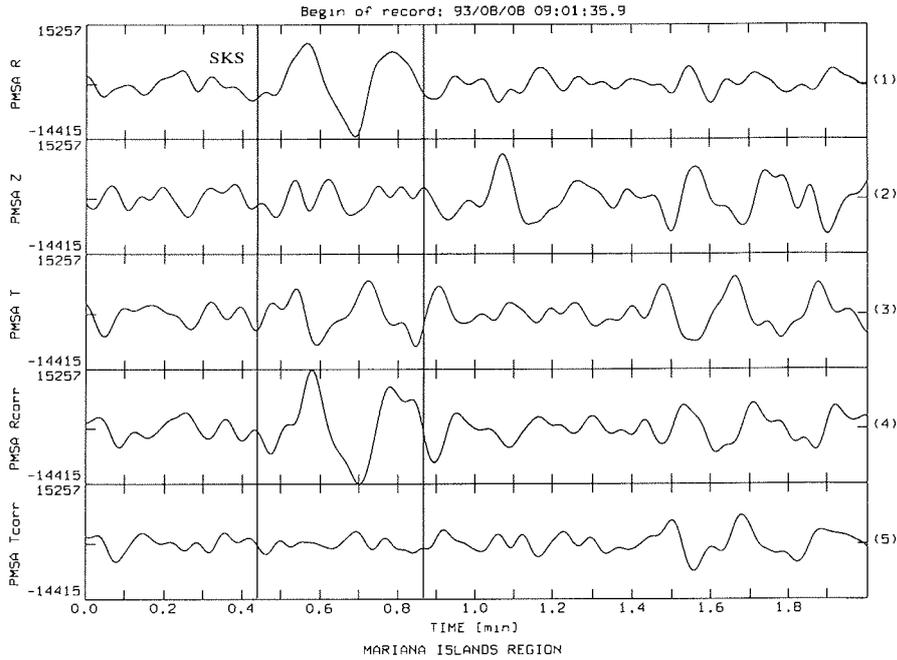


OBS 951225 SKS Banda Sea $\Delta = 98.1^\circ$ BAZ = 137.3°

Abbildung B.58

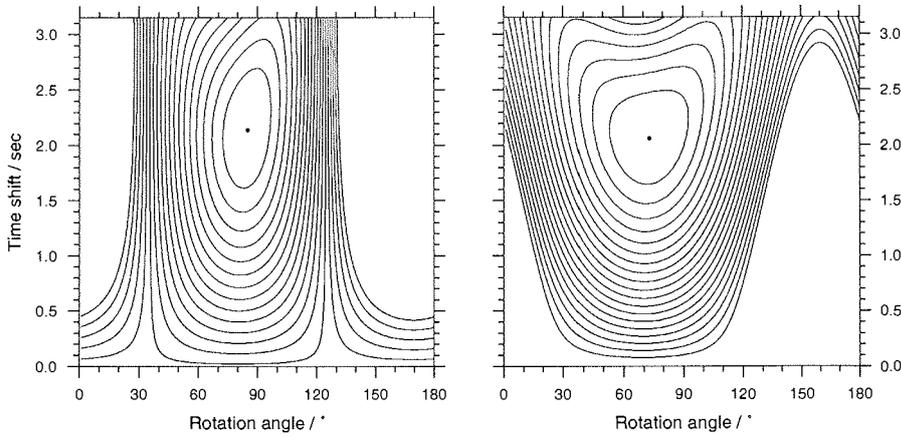
B.5 Palmer Station (PMSA)

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 85.0^\circ \quad \delta t = 2.14 \text{ sec}$$

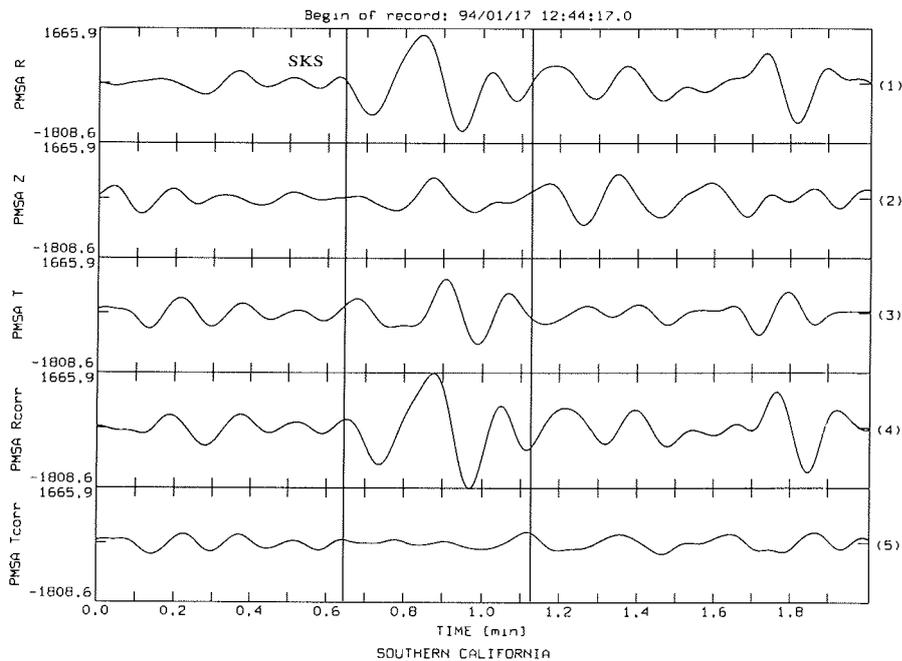
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 73.0^\circ \quad \delta t = 2.06 \text{ sec}$$



PMSA 930808 SKS Mariana Islands Region $\Delta = 124.6^\circ$ BAZ = 214.8°

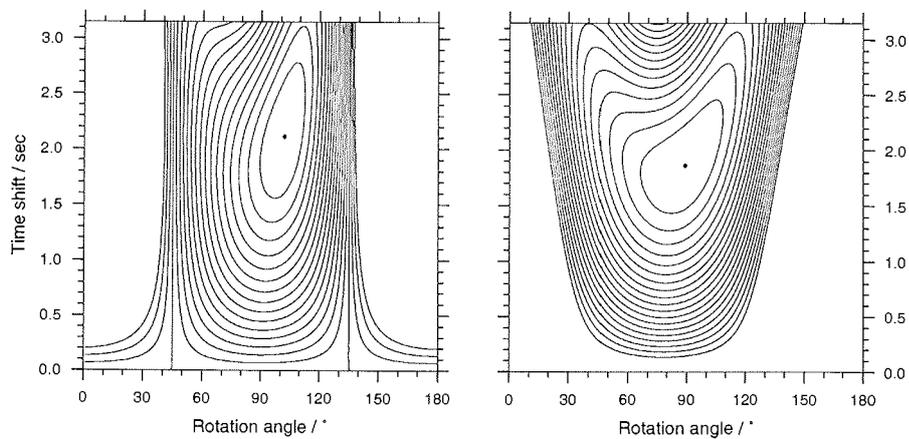
Abbildung B.59

B.5 Palmer Station (PMSA)



$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 102.0^\circ \quad \delta t = 2.11 \text{ sec}$

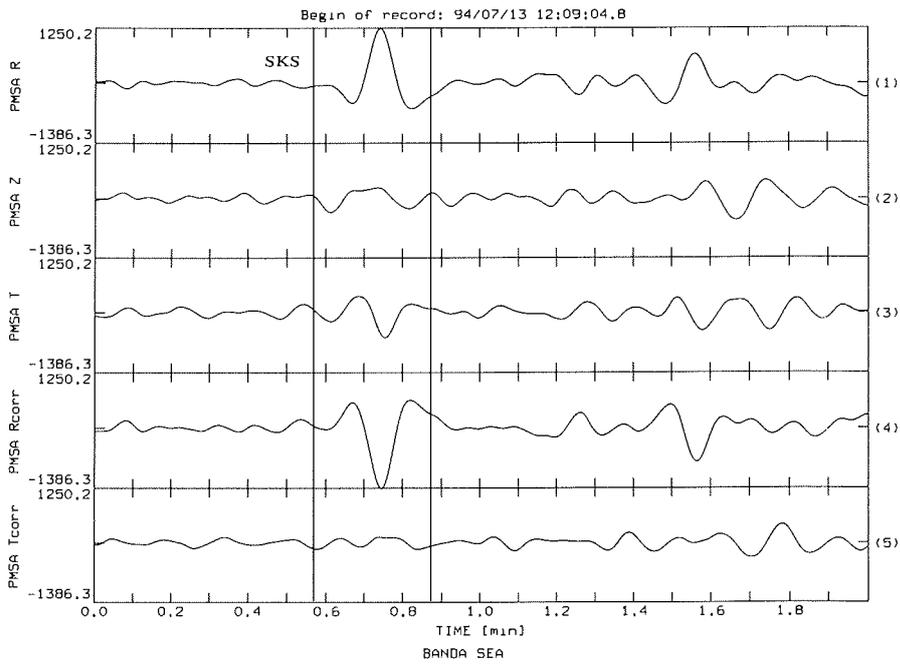
$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 89.0^\circ \quad \delta t = 1.86 \text{ sec}$



PMSA 940117 SKS Southern California $\Delta = 107.4^\circ$ BAZ = 315.0°

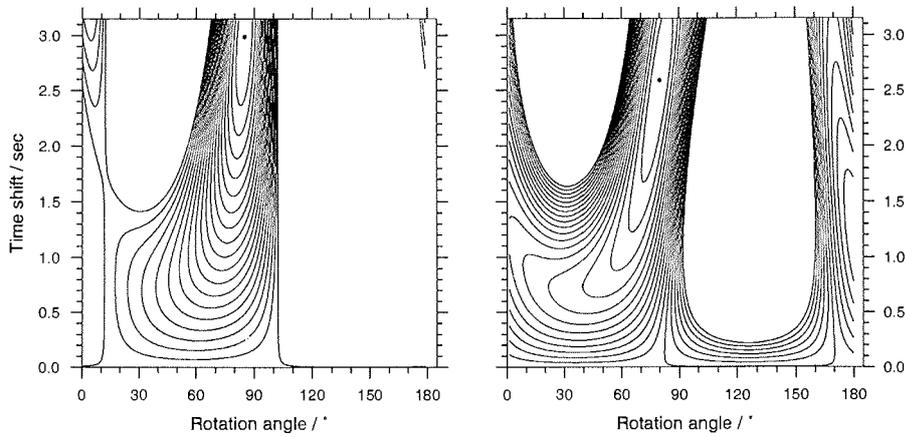
Abbildung B.60

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 85.0^\circ \quad \delta t = 2.99 \text{ sec}$$

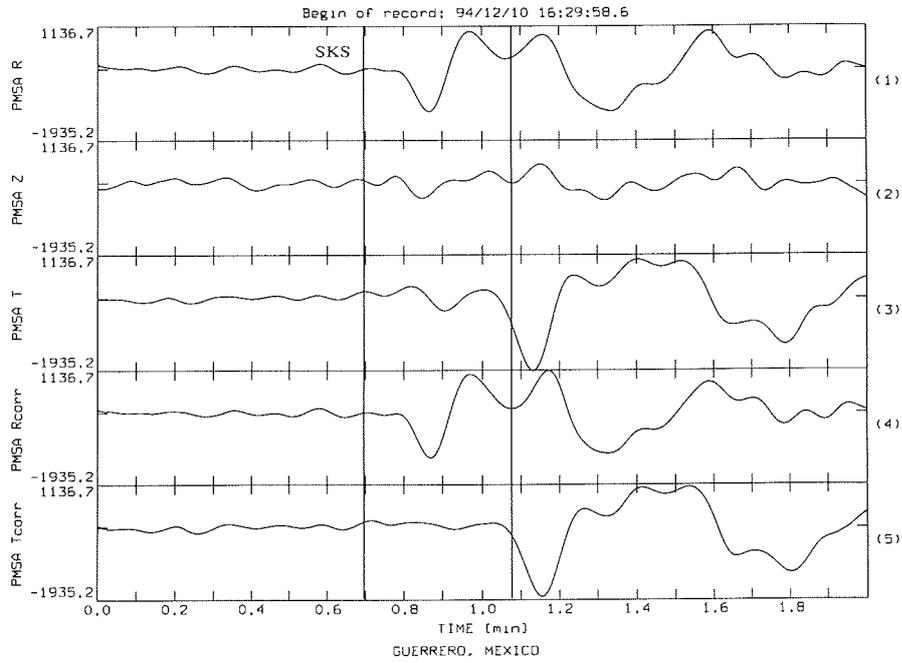
$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 80.0^\circ \quad \delta t = 2.59 \text{ sec}$$



PMSA 940713 SKS Banda Sea $\Delta = 107.4^\circ$ BAZ = 192.3°

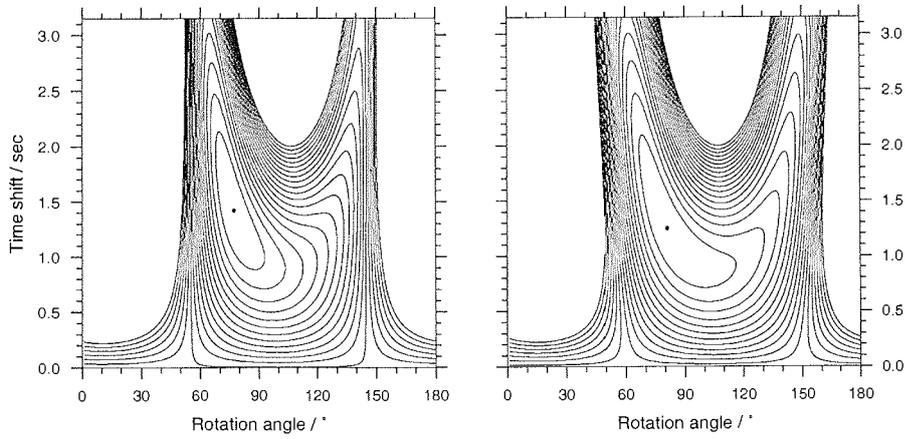
Abbildung B.61

B.5 Palmer Station (PMSA)



$$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 77.0^\circ \quad \delta t = 1.42 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 81.0^\circ \quad \delta t = 1.25 \text{ sec}$$

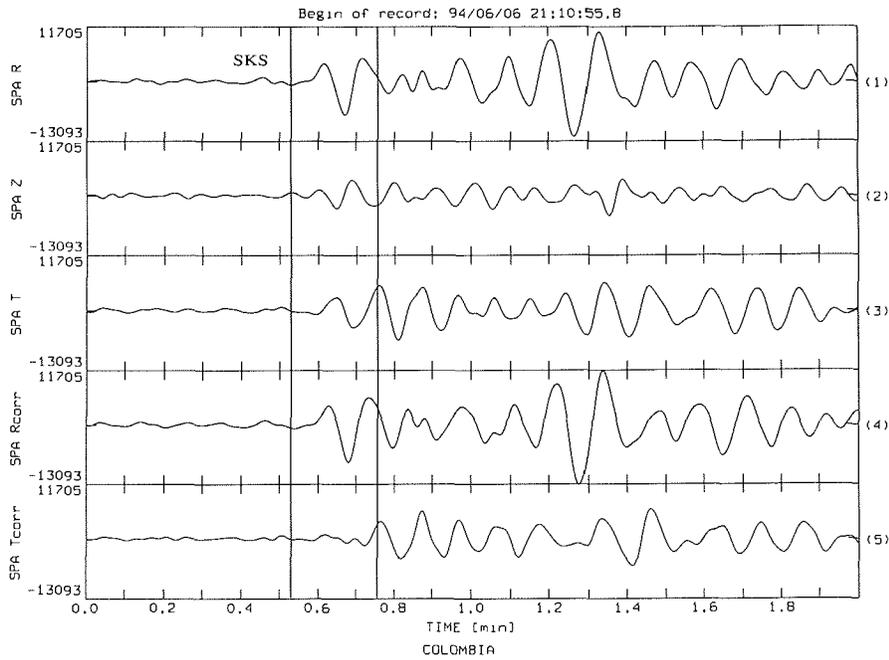


PMSA 941210 SKS Guerrero, Mexico $\Delta = 87.5^\circ$ BAZ = 324.8°

Abbildung B.62

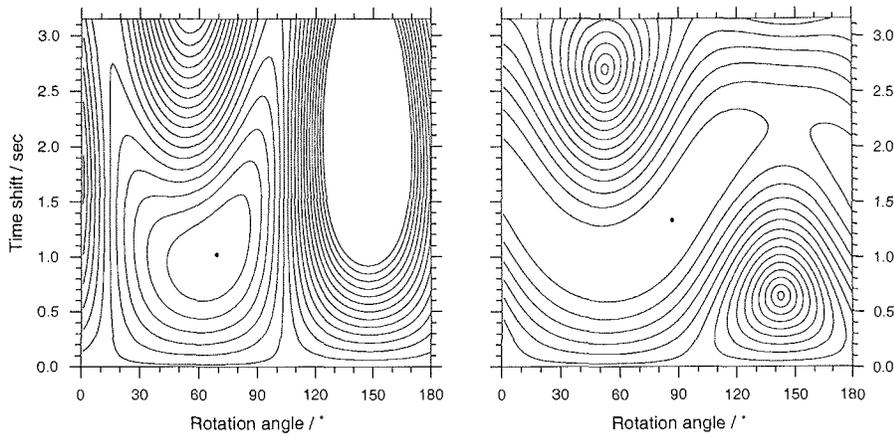
B.6 South Pole Station (SPA)

B.6 South Pole Station (SPA)



$E_1 / E_{1, \min} \quad \phi = 69.0^\circ \quad \delta t = 1.02 \text{ sec}$

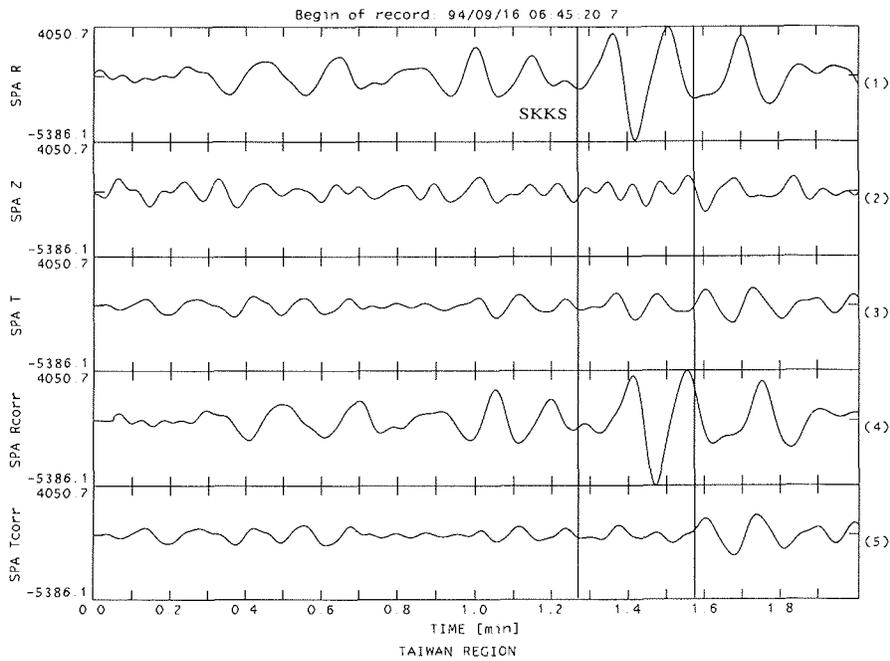
$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 87.0^\circ \quad \delta t = 1.33 \text{ sec}$



SPA 940606 SKS Colombia $\Delta = 93.0^\circ$ BAZ = 283.9°

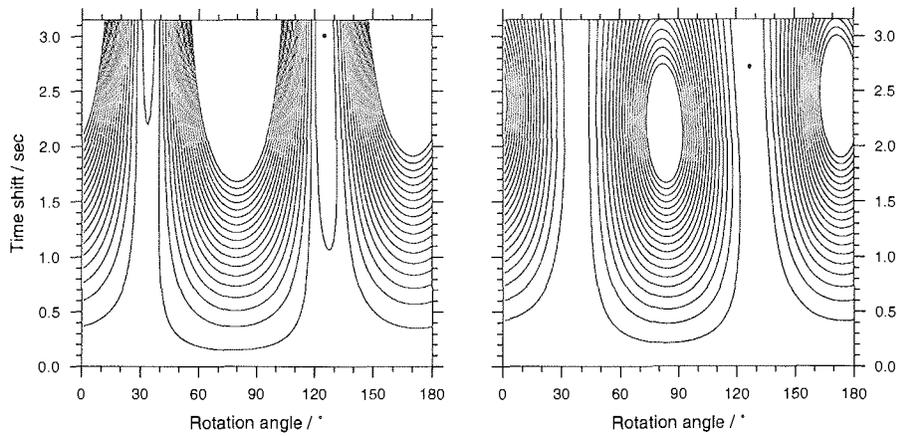
Abbildung B.63

B. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (SKS, SKKS, PKS)



$$E_t / E_{t, \min} \quad \phi = 125.0^\circ \quad \delta t = 3.01 \text{ sec}$$

$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 127.0^\circ \quad \delta t = 2.72 \text{ sec}$$



SPA 940916 SKKS Taiwan Region $\Delta = 112.5^\circ$ BAZ = 118.7°

Abbildung B.64

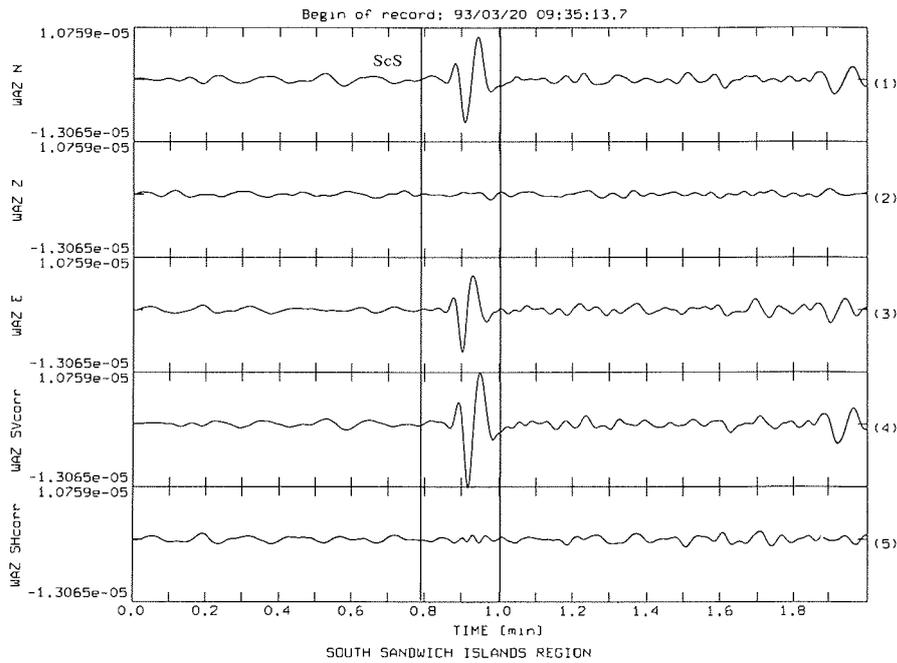
C. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)

Dieser Anhang enthält die Ergebnisse der einzelnen untersuchten S- und ScS-Phasen an WAZ und OLY.

Als Seismogramme dargestellt sind die NS-, Z- und OW-Komponenten sowie die korrigierten SV- und SH-Komponenten. Als Isolinienplots sind die Ergebnisse der Net-Grid-Search-Analysen angefügt. Das linke Bild zeigt die Ergebnisse des Eigenwertverfahrens, rechts die Ergebnisse der Minimierung der Energie der SH-Komponenten. In allen Fällen wurde die mit dem ersten Verfahren bestimmte Polarisationsrichtung verwendet. Diese und die aus den Herdflächenlösungen NP1 und NP2 bestimmten Polarisationsrichtungen sind angegeben.

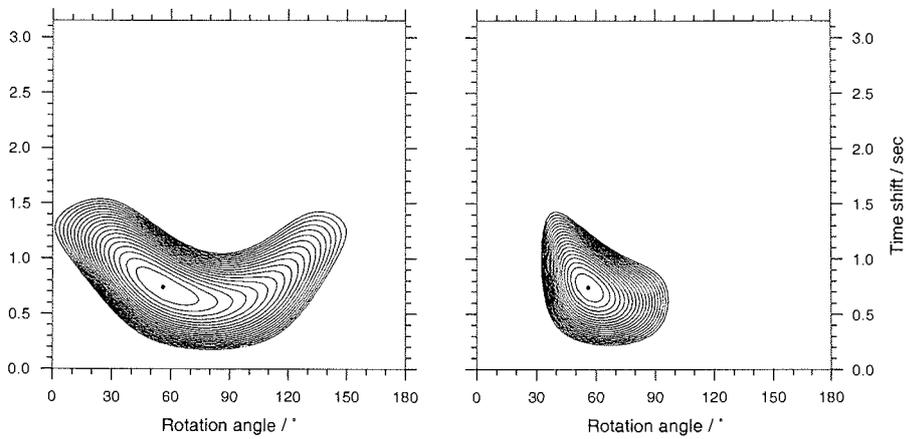
C.1 Watzmann (WAZ)

C. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 56.0^\circ \quad \delta t = 0.74 \text{ sec}$$

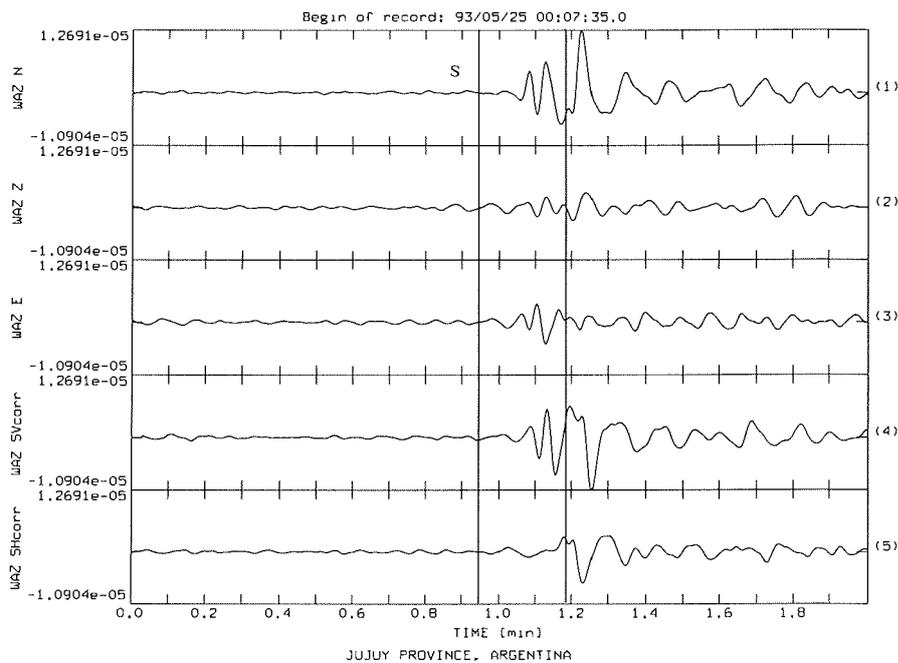
$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 56.0^\circ \quad \delta t = 0.74 \text{ sec}$$



WAZ 930320 ScS South Sandwich Islands Region

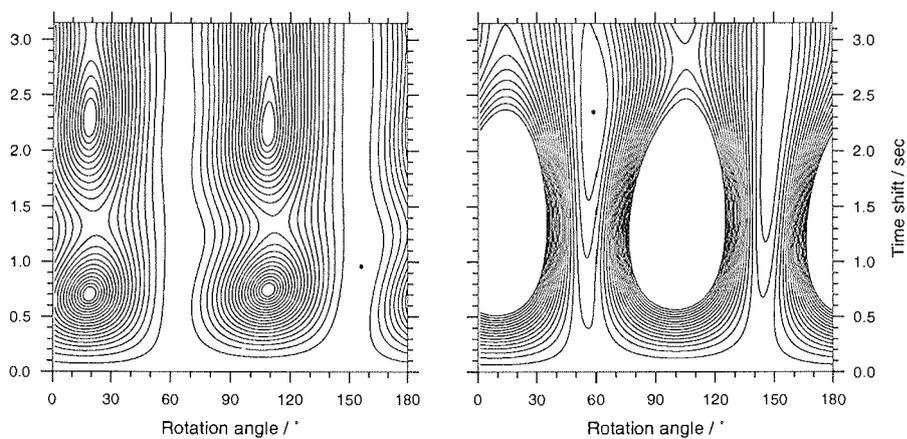
$\phi_{\text{obs}} = 24^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 32^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 0^\circ$ $i_0 = 5^\circ$ Herdtiefe = 116km

Abbildung C.1



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 156.0' \quad \delta t = 0.96 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 59.0' \quad \delta t = 2.35 \text{ sec}$$

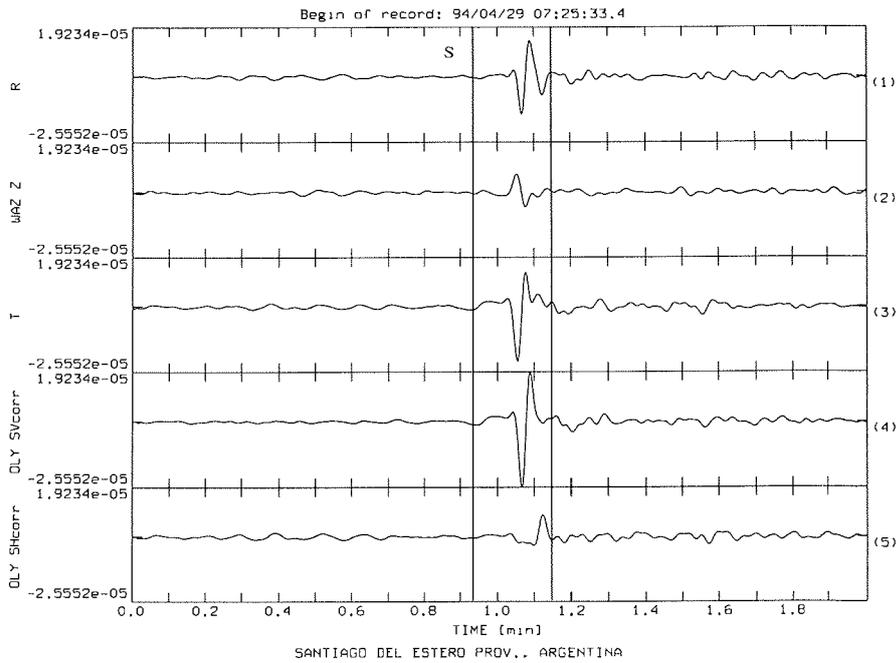


WAZ 930524 S Jujuy Province, Argentina

$\phi_{\text{obs}} = 140^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 4^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 130^\circ$ $i_0 = 23^\circ$ Herdtiefe = 238km

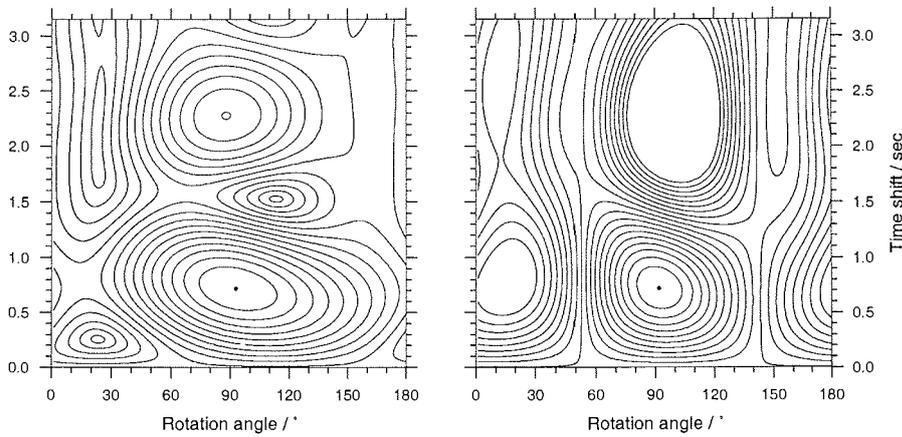
Abbildung C.2

C. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)



$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 93.0^\circ \quad \delta t = 0.72 \text{ sec}$

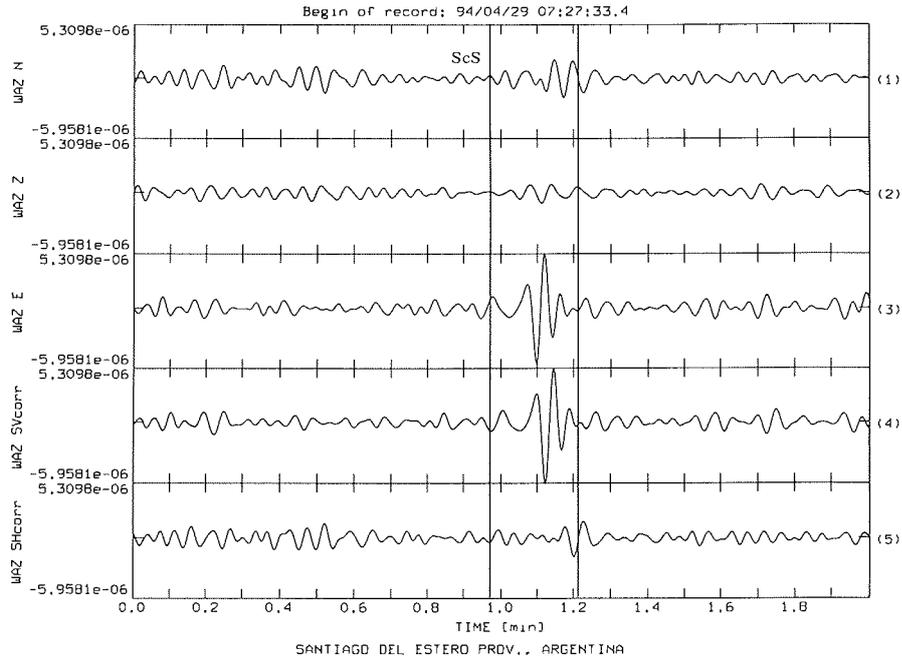
$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 92.0^\circ \quad \delta t = 0.72 \text{ sec}$



WAZ 940429 S Santiago del Estero Prov., Argentina

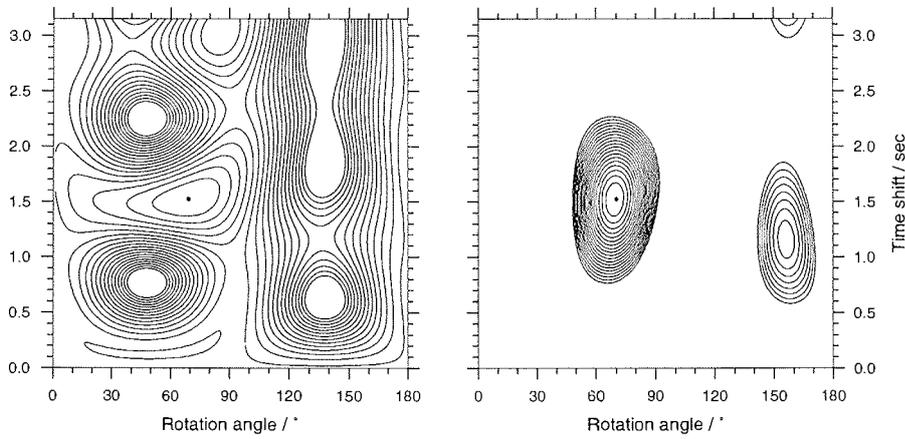
$\phi_{\text{obs}} = 53^\circ \quad \phi_{\text{NP1}} = 43^\circ \quad \phi_{\text{NP2}} = 38^\circ \quad i_0 = 24^\circ \quad \text{Herdtiefe} = 562 \text{ km}$

Abbildung C.3



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 69.0^\circ \quad \delta t = 1.52 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 70.0^\circ \quad \delta t = 1.52 \text{ sec}$$

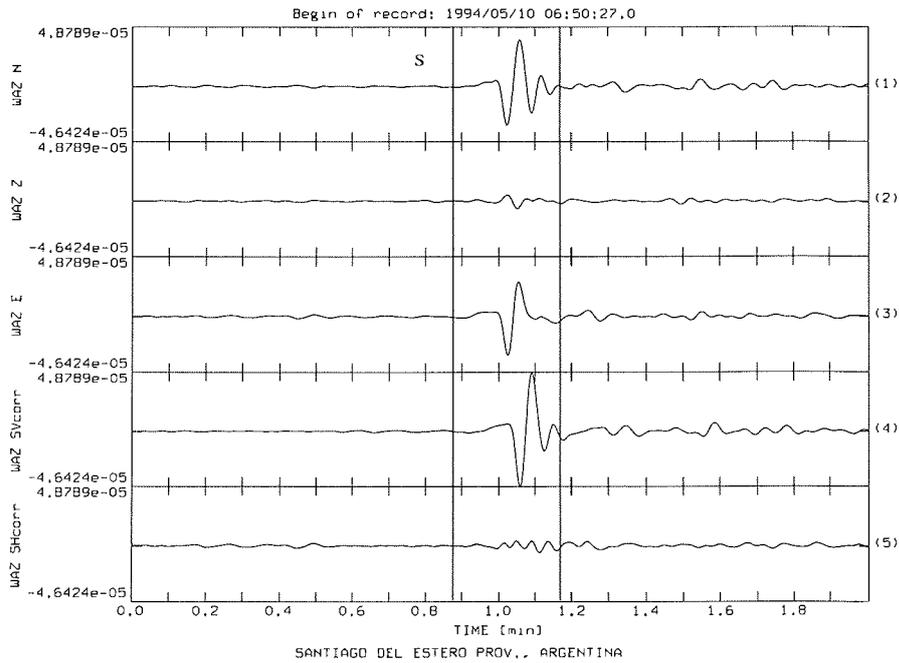


WAZ 940429 ScS Santiago del Estero Prov., Argentina

$\phi_{\text{obs}} = 40^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 45^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 169^\circ$ $i_0 = 12^\circ$ Herdtiefe = 562km

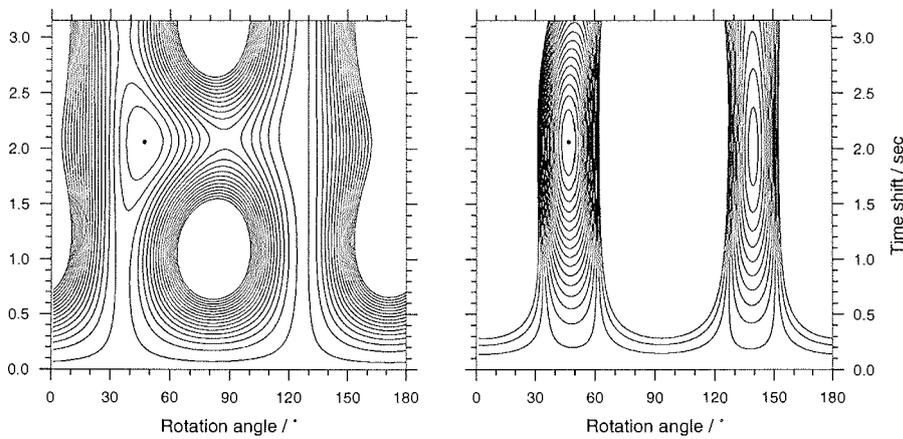
Abbildung C.4

C. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 47.0^\circ \quad \delta t = 2.06 \text{ sec}$$

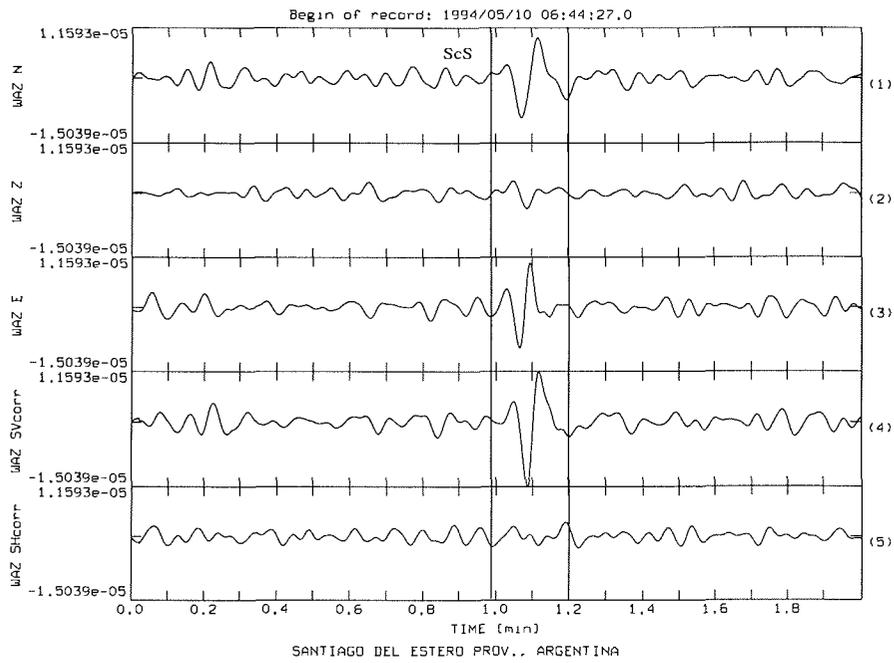
$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 47.0^\circ \quad \delta t = 2.06 \text{ sec}$$



WAZ 940510 S Santaigo del Estero Prov., Argentina

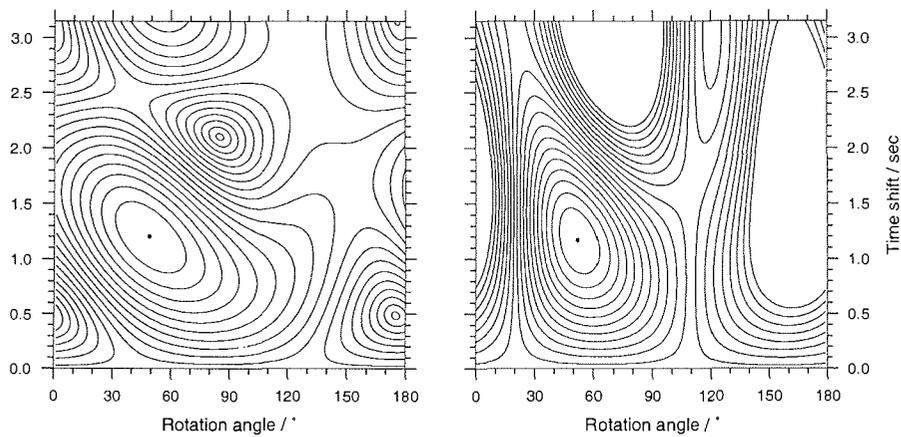
$\phi_{\text{obs}} = 61^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 24^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 29^\circ$ $i_0 = 24^\circ$ Herdtiefe = 601km

Abbildung C.5



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 49.0^\circ \quad \delta t = 1.20 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 52.0^\circ \quad \delta t = 1.17 \text{ sec}$$

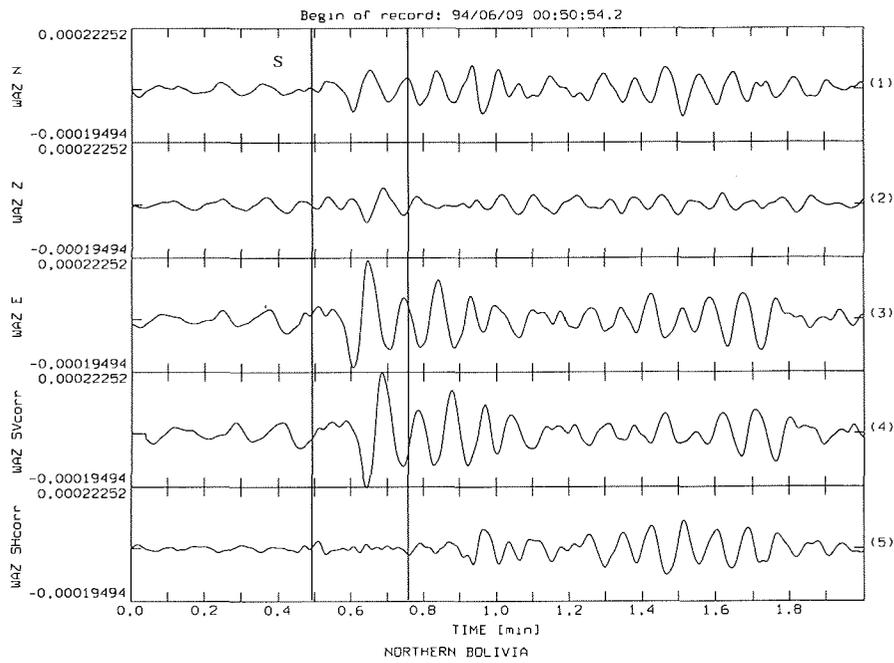


WAZ 940510 ScS Santaigo del Estero Prov., Argentina

$\phi_{\text{obs}} = 14^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 20^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 19^\circ$ $i_0 = 12^\circ$ Herdtiefe = 601km

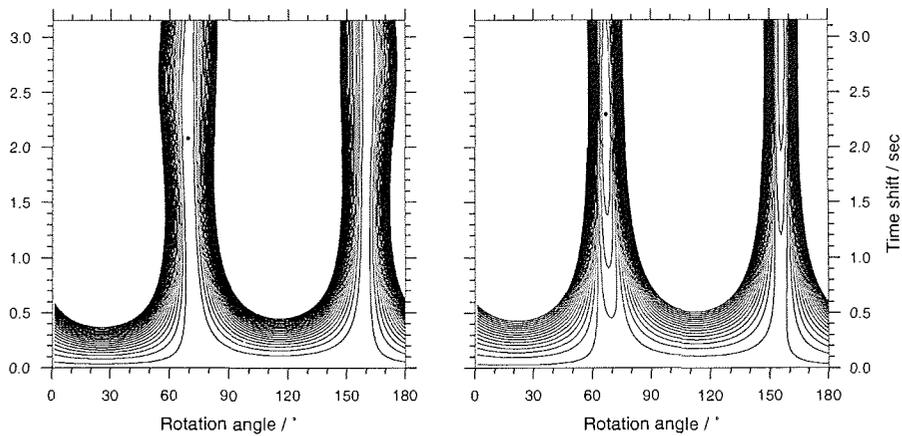
Abbildung C.6

C. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 69.0^\circ \quad \delta t = 2.08 \text{ sec}$$

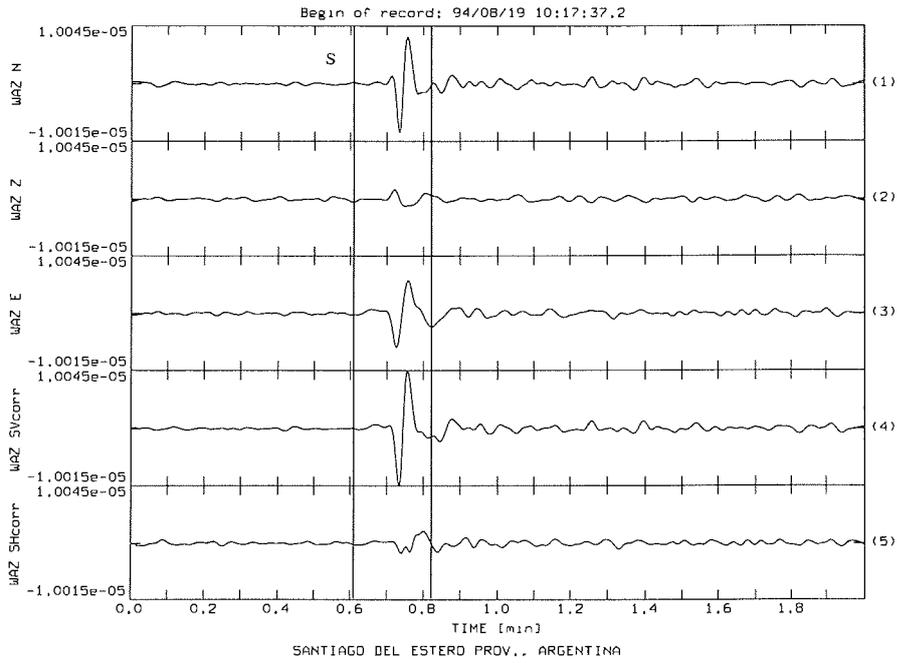
$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 67.0^\circ \quad \delta t = 2.30 \text{ sec}$$



WAZ 940609 S Northern Bolivia

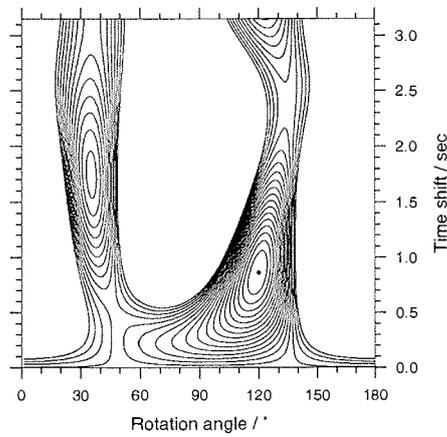
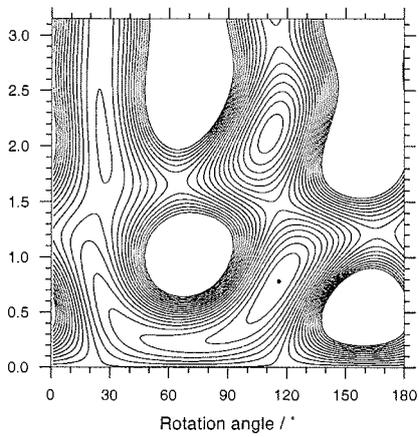
$\phi_{\text{obs}} = 63^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 48^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 64^\circ$ $i_0 = 21^\circ$ Herdtiefe = 631 km

Abbildung C.7



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 116.0^\circ \quad \delta t = 0.78 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 120.0^\circ \quad \delta t = 0.86 \text{ sec}$$

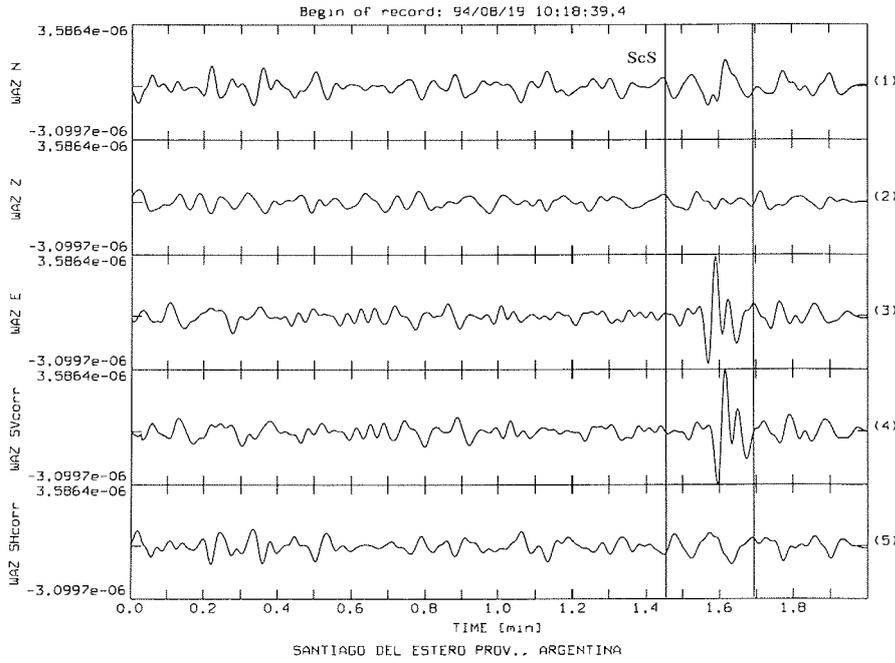


WAZ 940819 S Santiago del Estero Prov., Argentina

$\phi_{\text{obs}} = 47^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 23^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 23^\circ$ $i_0 = 23^\circ$ Herdtiefe = 564km

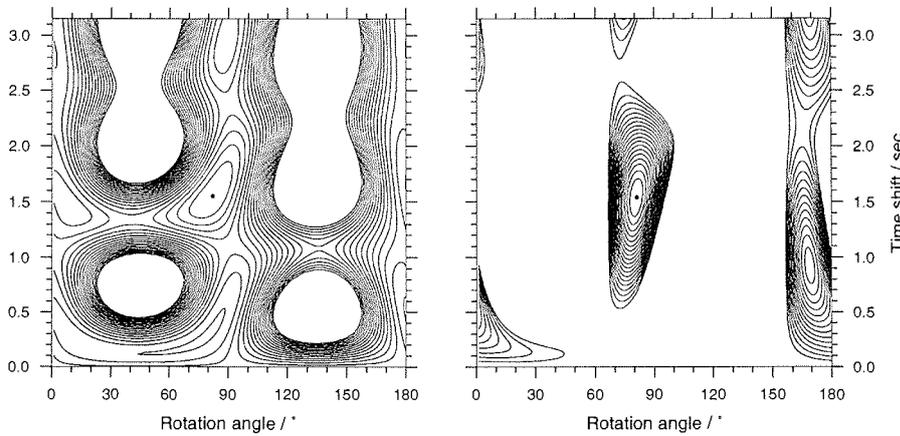
Abbildung C.8

C. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 82.0^\circ \quad \delta t = 1.55 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 81.0^\circ \quad \delta t = 1.54 \text{ sec}$$



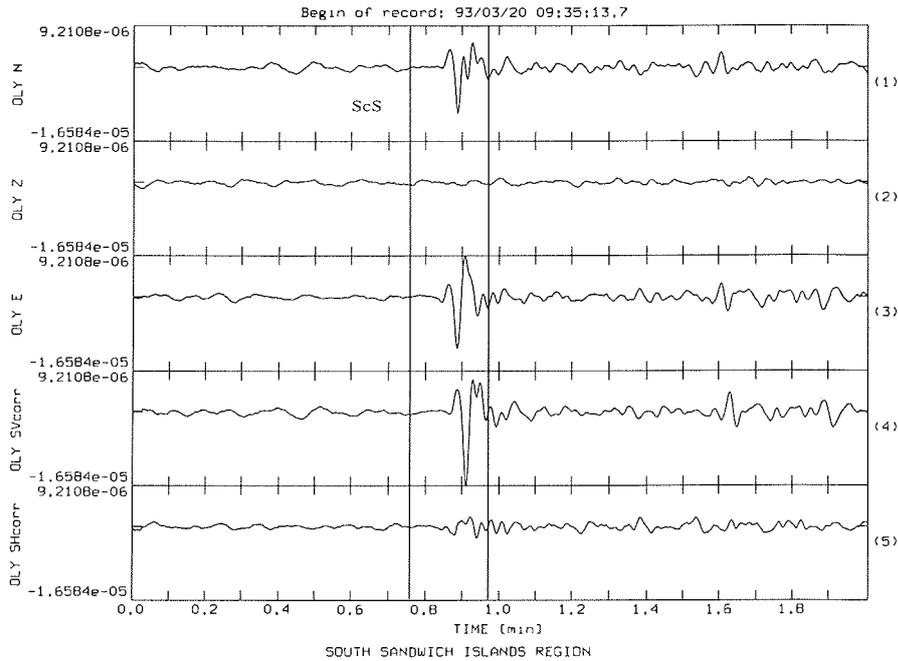
WAZ 940819 ScS Santiago del Estero Prov., Argentina

$\phi_{\text{obs}} = 66^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 41^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 6^\circ$ $i_0 = 12^\circ$ Herdtiefe = 564km

Abbildung C.9

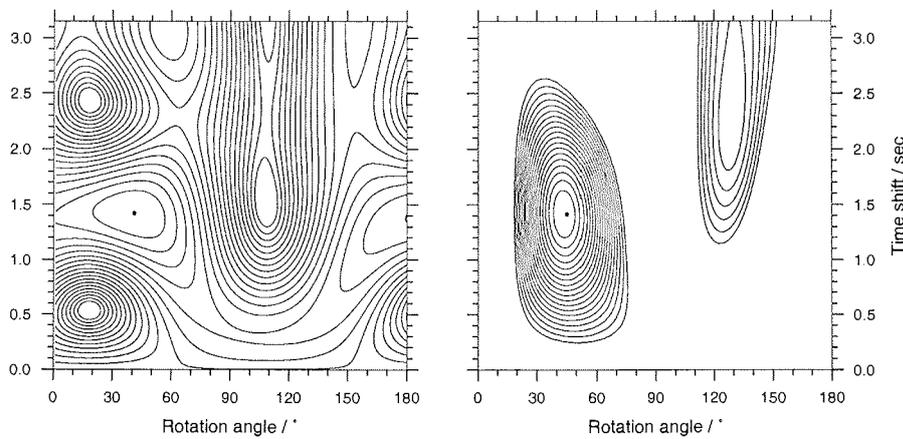
C.2 Olymp (OLY)

C. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 41.0^\circ \quad \delta t = 1.42 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 45.0^\circ \quad \delta t = 1.41 \text{ sec}$$

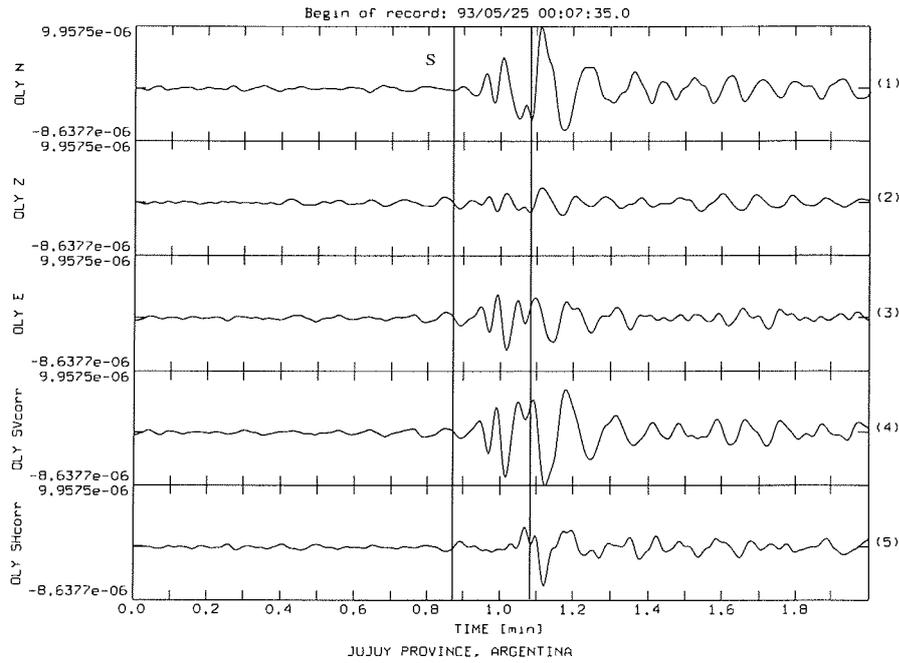


OLY 930320 ScS South Sandwich Islands Region

$\phi_{\text{obs}} = 17^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 39^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 8^\circ$ $i_0 = 5^\circ$ Herdtiefe = 119km

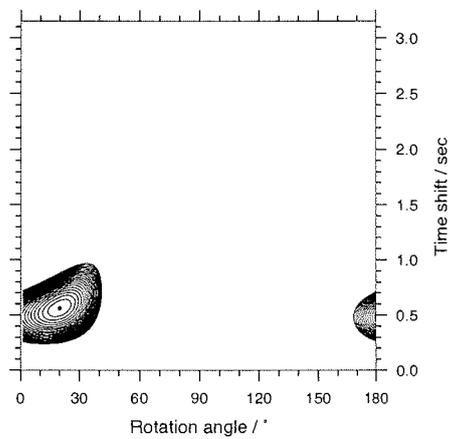
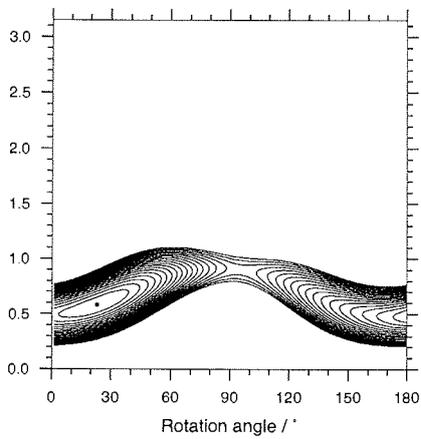
Abbildung C.10

C.2 Olymp (OLY)



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 23.0^\circ \quad \delta t = 0.58 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 20.0^\circ \quad \delta t = 0.56 \text{ sec}$$

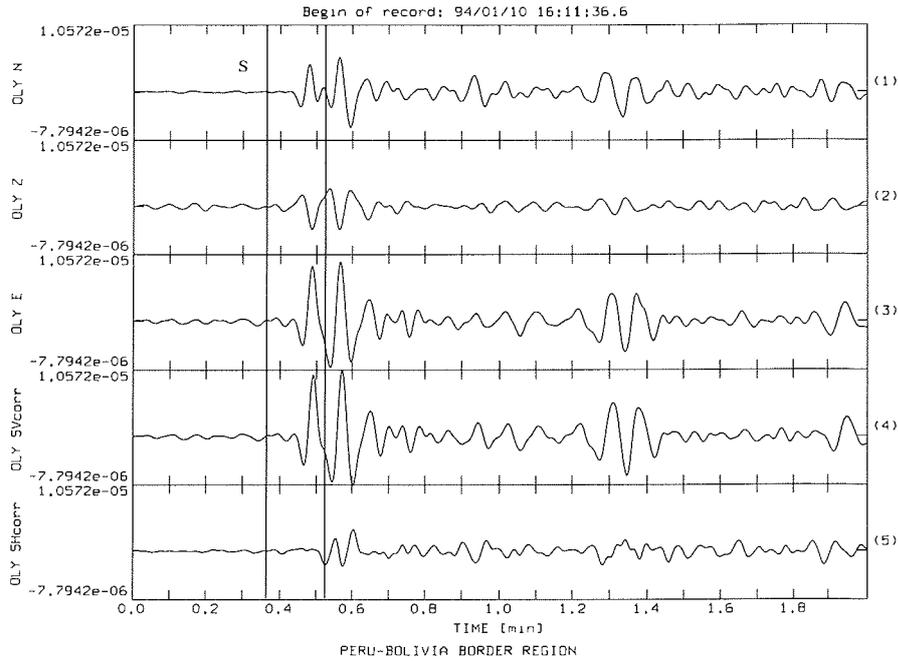


WAZ 930525 S Jujuy Province, Argentina

$\phi_{\text{obs}} = 144^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 0^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 131^\circ$ $i_0 = 23^\circ$ Herdtiefe = 238km

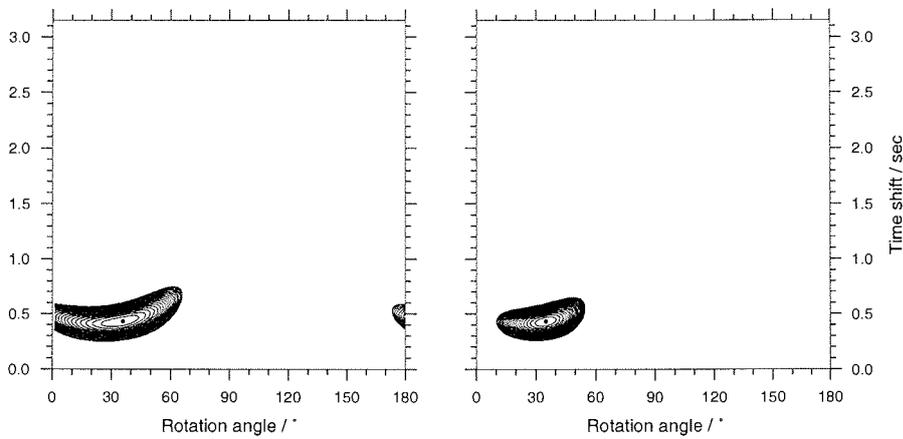
Abbildung C.11

C. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 36.0^\circ \quad \delta t = 0.43 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 35.0^\circ \quad \delta t = 0.43 \text{ sec}$$

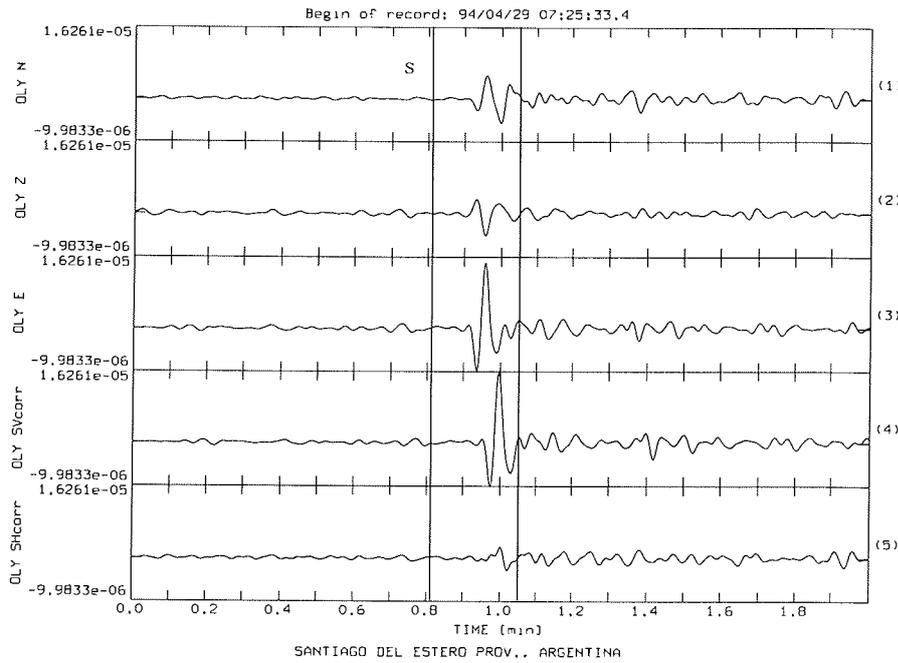


OLY 940110 S Peru-Bolivia Border Region

$\phi_{\text{obs}} = 73^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 25^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 84^\circ$ $i_0 = 20^\circ$ Herdtiefe = 589km

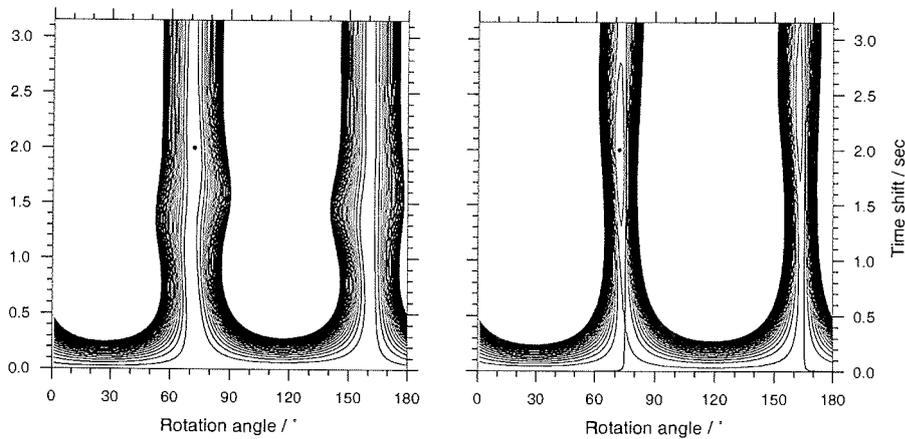
Abbildung C.12

C.2 Olymp (OLY)



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 72.0^\circ \quad \delta t = 2.00 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 72.0^\circ \quad \delta t = 2.00 \text{ sec}$$

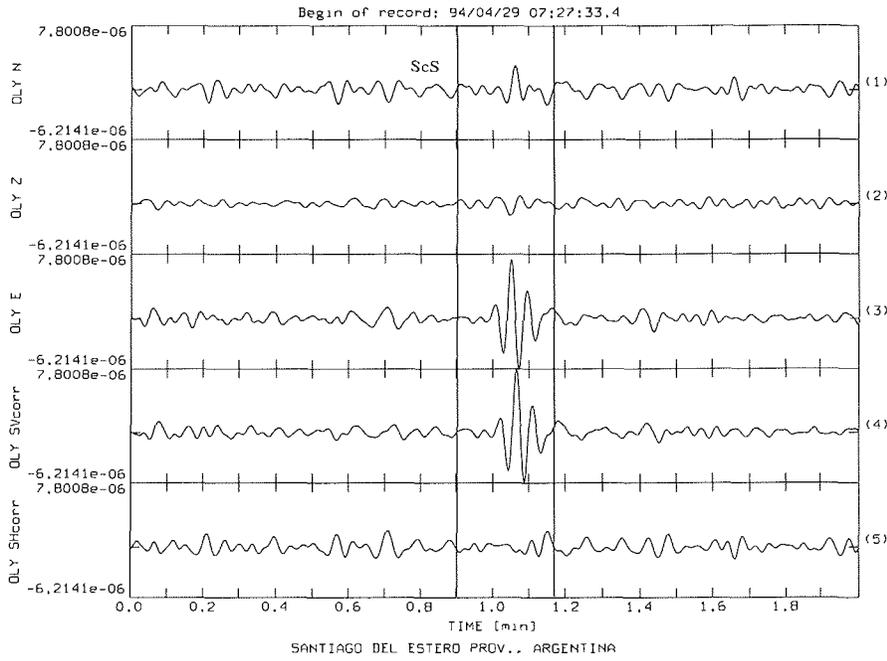


OLY 940429 S Santiago del Estero Prov., Argentina

$\phi_{\text{obs}} = 75^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 47^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 40^\circ$ $i_0 = 24^\circ$ Herdtiefe = 562km

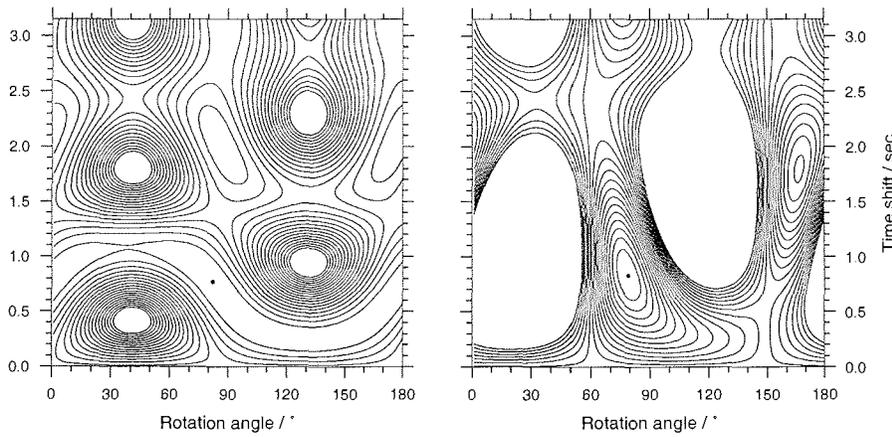
Abbildung C.13

C. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 82.0^\circ \quad \delta t = 0.77 \text{ sec}$$

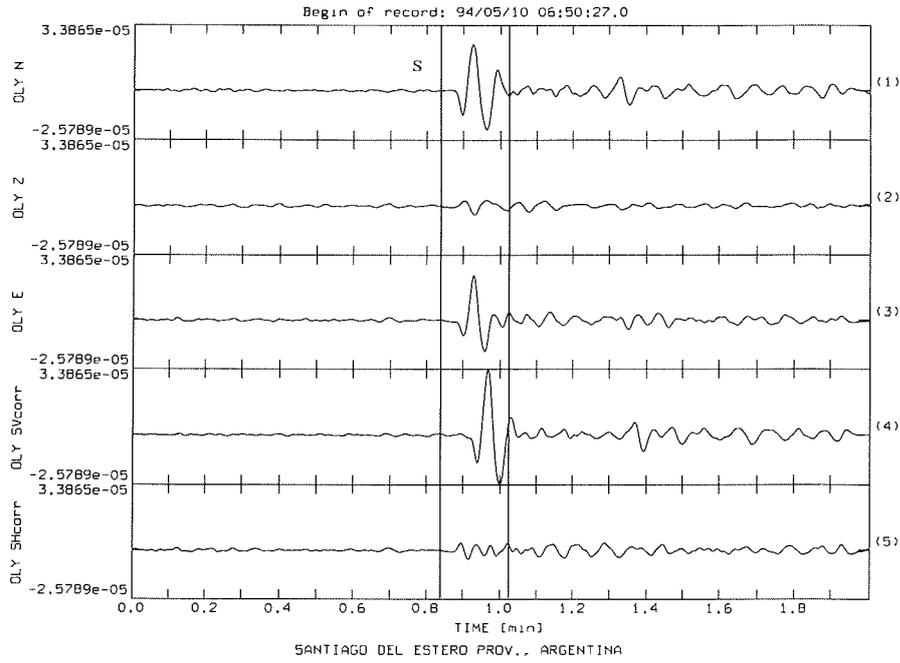
$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 79.0^\circ \quad \delta t = 0.83 \text{ sec}$$



OLY 940429 ScS Santiago del Estero Prov., Argentina

$\phi_{\text{obs}} = 60^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 48^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 174^\circ$ $i_0 = 12^\circ$ Herdtiefe = 562km

Abbildung C.14



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 43.0^\circ \quad \delta t = 2.46 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 44.0^\circ \quad \delta t = 2.43 \text{ sec}$$

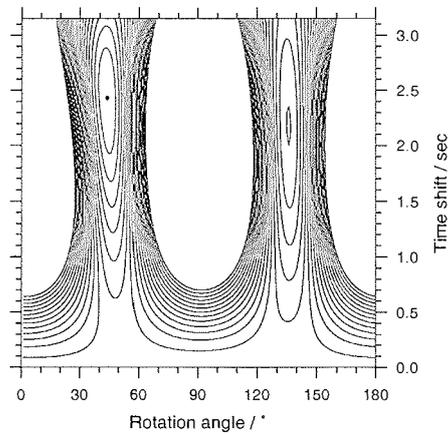
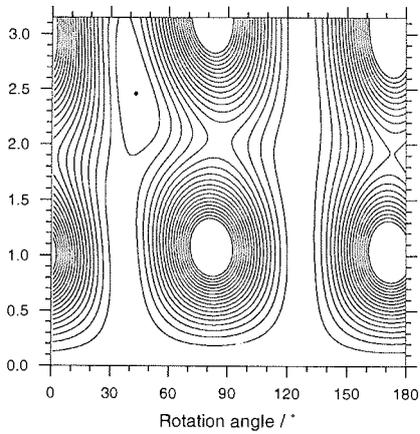
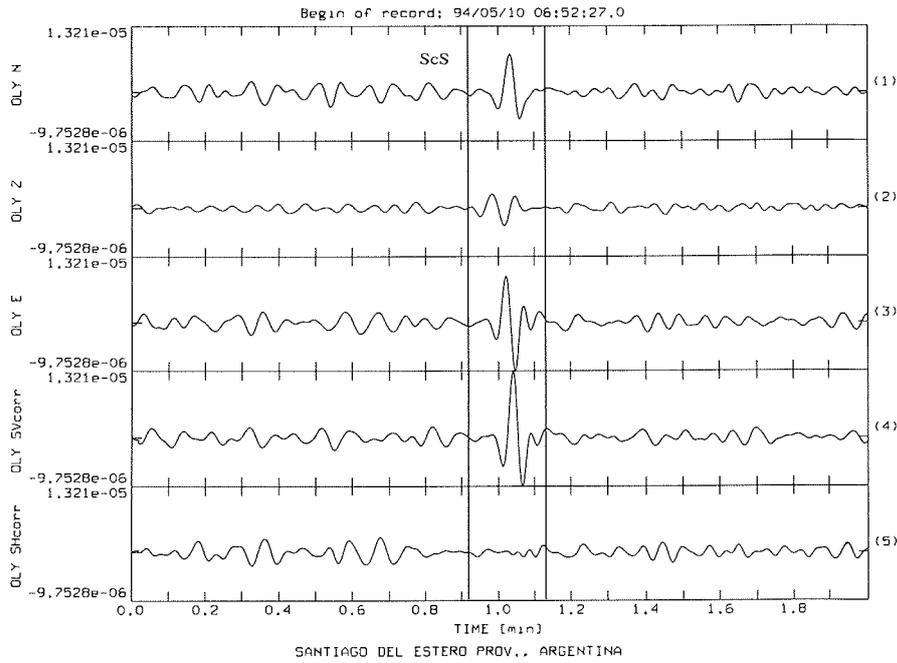


Abbildung C.15

C. Analyseergebnisse der einzelnen Phasen- / Stationspaare (S, ScS)



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 56.0^\circ \quad \delta t = 1.01 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 56.0^\circ \quad \delta t = 1.01 \text{ sec}$$

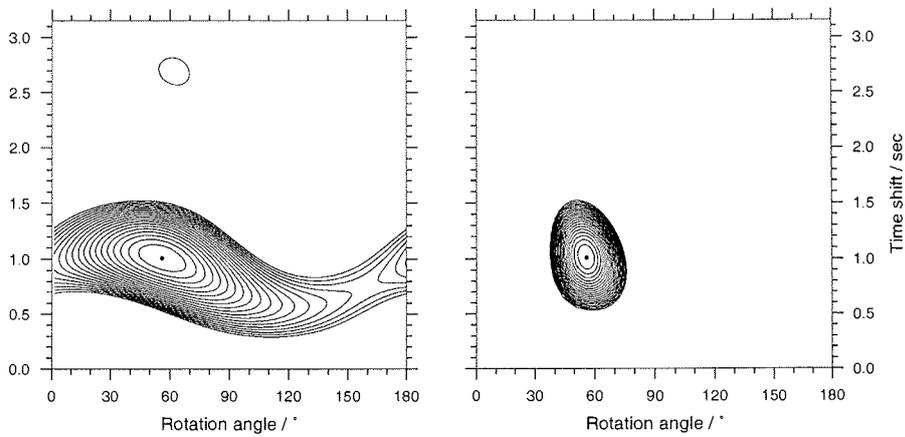
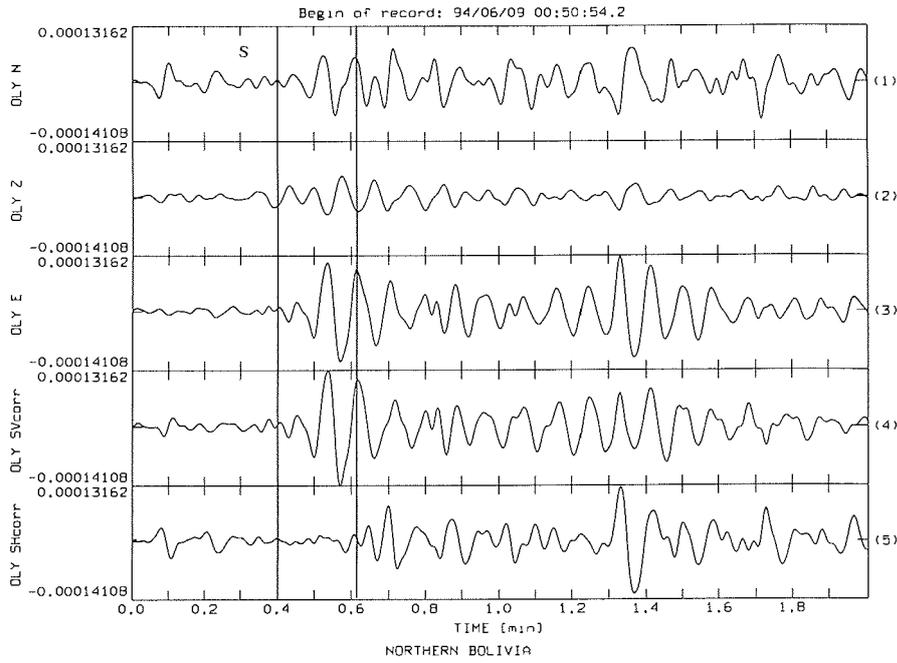
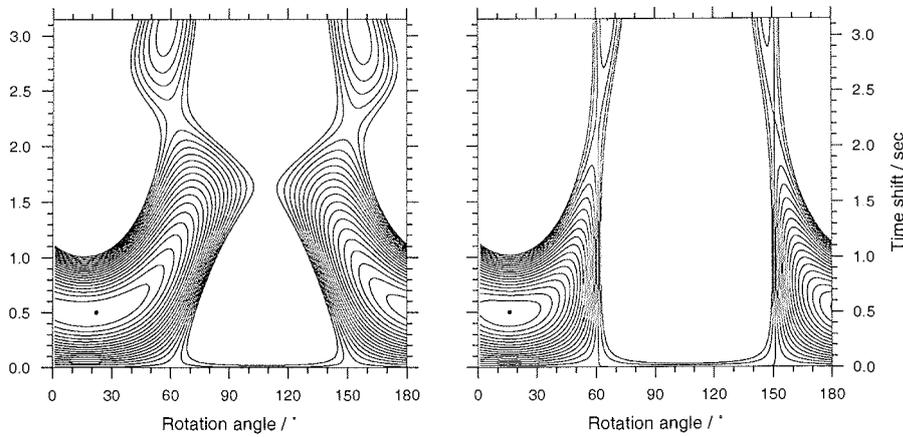


Abbildung C.16



$$\lambda_1 / \lambda_{1, \min} \quad \phi = 22.0^\circ \quad \delta t = 0.50 \text{ sec}$$

$$E_{SH} / E_{SH, \min} \quad \phi = 16.0^\circ \quad \delta t = 0.50 \text{ sec}$$



OLY 940609 S Northern Bolivia

$\phi_{\text{obs}} = 60^\circ$ $\phi_{\text{NP1}} = 50^\circ$ $\phi_{\text{NP2}} = 64^\circ$ $i_0 = 21^\circ$ Herdtiefe = 631km

Abbildung C.17

Danksagung

Herrn Prof. Dr. H. Miller danke ich für die Vergabe dieser Arbeit und die Möglichkeit, diese am Alfred-Wegener-Institut anfertigen zu können.

Für die Übernahme des Co-Referats bin ich Herrn Prof. Dr. U. Bleil außerordentlich dankbar.

Bei Dr. Alfons Eckstaller möchte ich mich ganz besonders für die Anregung zu dieser Arbeit bedanken, ebenso für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit. Sein unermüdlicher Einsatz beim Bau und der Unterhaltung der geophysikalischen Observatorien und des seismologischen Netzwerkes der Neumayer Station haben diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht.

Allen Überwinterern der Neumayer Station, die ich hier nicht alle mit Namen nennen kann, sei besonders für deren Einsatz gedankt. Insbesondere den für die Geophysik an Neumayer verantwortlichen Überwinterern Dipl. Geophys. Viola Gaw, Dipl. Geophys. Mario Gruhne, Dipl. Geophys. Martin Lang, Dipl. Geol. Alois Reiter, Dipl. Geophys. Johannes Rogenhagen, Dr. Thomas Schmidt, Dipl. Geophys. Jürgen Stock und Dipl. Geophys. Detlef Stockhaus möchte ich für ihre Mühen, gewissenhafte Betreuung des seismologischen Meßprogramms und nicht zuletzt für die gute Zusammenarbeit danken.

Dr. Wilfried Jokat möchte ich für seine Diskussionsbereitschaft und Anregungen meinen besonderen Dank aussprechen.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts und die vielen nützlichen Anregungen und Verbesserungsvorschläge geht mein besonderer Dank an Dipl. Geol. Bettina Boucsein, Dipl. Ing. Andreas Frenzel, Dr. Sönke Neben, Dr. Gabriele Uenzelmann-Neben und Dr. Ulrike Windhövel.

Allen hier nicht genannten Kolleginnen und Kollegen des Alfred-Wegener-Instituts, insbesondere denen der Sektion Geophysik/Glaziologie, sei für das gute und angenehme Arbeitsklima gedankt.

Folgende Hefte der Reihe „Berichte zur Polarforschung“ sind bisher erschienen:

- * **Sonderheft Nr. 1/1981** – „Die Antarktis und ihr Lebensraum“
Eine Einführung für Besucher – Herausgegeben im Auftrag von SCAR
- * **Heft Nr. 1/1982** – „Die Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“
zusammengestellt von Heinz Kohnen
- * **Heft Nr. 2/1982** – „Deutsche Antarktis-Expedition 1980/81 mit FS ‚Meteor‘“
First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Liste der Zooplankton- und Mikronektonnetzfüge
zusammengestellt von Norbert Klages
- * **Heft Nr. 3/1982** – „Digitale und analoge Krill-Echolot-Rohdatenerfassung an Bord des Forschungsschiffes ‚Meteor‘“ (im Rahmen von FIBEX 1980/81, Fahrtabschnitt ANT III), von Bodo Morgenstern
- * **Heft Nr. 4/1982** – „Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“
Liste der Planktonfänge und Lichtstärkemessungen
zusammengestellt von Gerd Hubold und H. Eberhard Drescher
- * **Heft Nr. 5/1982** – „Joint Biological Expedition on RRS ‚John Biscoe‘, February 1982“
by G. Hempel and R. B. Heywood
- * **Heft Nr. 6/1982** – „Antarktis-Expedition 1981/82 (Unternehmen ‚Eiswarte‘)“
zusammengestellt von Gode Gravenhorst
- * **Heft Nr. 7/1982** – „Marin-Biologisches Begleitprogramm zur Standorterkundung 1979/80 mit MS ‚Polarstern‘ (Pre-Site Survey)“ – Stationslisten der Mikronekton- und Zooplanktonfänge sowie der Bodenfischerei
zusammengestellt von R. Schneppenheim
- * **Heft Nr. 8/1983** – „The Post-Fibex Data Interpretation Workshop“
by D. L. Cram and J.-C. Freytag with the collaboration of J. W. Schmidt, M. Mall, R. Kresse, T. Schwinghammer
- * **Heft Nr. 9/1983** – „Distribution of some groups of zooplankton in the inner Weddell Sea in summer 1979/80“
by I. Hempel, G. Hubold, B. Kaczmaruk, R. Keller, R. Weigmann-Haass
- * **Heft Nr. 10/1983** – „Fluor im antarktischen Ökosystem“ – DFG-Symposium November 1982
zusammengestellt von Dieter Adelung
- * **Heft Nr. 11/1983** – „Joint Biological Expedition on RRS ‚John Biscoe‘, February 1982 (II)“
Data of micronekton and zooplankton hauls, by Uwe Piatkowski
- * **Heft Nr. 12/1983** – „Das biologische Programm der ANTARKTIS-I-Expedition 1983 mit FS ‚Polarstern‘“
Stationslisten der Plankton-, Benthos- und Grundschieppnetzfüge und Liste der Probennahme an Robben und Vögeln, von H. E. Drescher, G. Hubold, U. Piatkowski, J. Plötz und J. Voß
- * **Heft Nr. 13/1983** – „Die Antarktis-Expedition von MS ‚Polarbjörn‘ 1982/83“ (Sommerkampagne zur Atka-Bucht und zu den Kraul-Bergen), zusammengestellt von Heinz Kohnen
- * **Sonderheft Nr. 2/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition von FS ‚Polarstern‘ (Kapstadt, 20. Januar 1983 – Rio de Janeiro, 25. März 1983)“, Bericht des Fahrtleiters Prof. Dr. Gotthilf Hempel
- * **Sonderheft Nr. 3/1983** – „Sicherheit und Überleben bei Polarexpeditionen“
zusammengestellt von Heinz Kohnen
- * **Heft Nr. 14/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition (ANTARKTIS I) von FS ‚Polarstern‘ 1982/83“
herausgegeben von Gotthilf Hempel
- * **Sonderheft Nr. 4/1983** – „On the Biology of Krill *Euphausia superba*“ – Proceedings of the Seminar and Report of the Krill Ecology Group, Bremerhaven 12. - 16. May 1983, edited by S. B. Schnack
- * **Heft Nr. 15/1983** – „German Antarctic Expedition 1980/81 with FRV ‚Walther Herwig‘ and RV ‚Meteor‘“ – First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Data of micronekton and zooplankton hauls
by Uwe Piatkowski and Norbert Klages
- * **Sonderheft Nr. 5/1984** – „The observatories of the Georg von Neumayer Station“, by Ernst Augstein
- * **Heft Nr. 16/1984** – „FIBEX cruise zooplankton data“
by U. Piatkowski, I. Hempel and S. Rakusa-Suszczewski
- * **Heft Nr. 17/1984** – Fahrtbericht (cruise report) der ‚Polarstern‘-Reise ARKTIS I, 1983“
von E. Augstein, G. Hempel und J. Thiede
- * **Heft Nr. 18/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS ‚Polarstern‘ 1983/84“,
Bericht von den Fahrtabschnitten 1, 2 und 3, herausgegeben von D. Fütterer
- * **Heft Nr. 19/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS ‚Polarstern‘ 1983/84“,
Bericht vom Fahrtabschnitt 4, Punta Arenas-Kapstadt (Ant-II/4), herausgegeben von H. Kohnen
- * **Heft Nr. 20/1984** – „Die Expedition ARKTIS II des FS ‚Polarstern‘ 1984, mit Beiträgen des FS ‚Valdivia‘ und des Forschungsflugzeuges ‚Falcon 20‘ zum Marginal Ice Zone Experiment 1984 (MIZEX)“
von E. Augstein, G. Hempel, J. Schwarz, J. Thiede und W. Weigel
- * **Heft Nr. 21/1985** – „Euphausiid larvae in plankton from the vicinity of the Antarctic Peninsula, February 1982“ by Sigrd Marschall and Elke Mizdalski
- * **Heft Nr. 22/1985** – „Maps of the geographical distribution of macrozooplankton in the Atlantic sector of the Southern Ocean“ by Uwe Piatkowski
- * **Heft Nr. 23/1985** – „Untersuchungen zur Funktionsmorphologie und Nahrungsaufnahme der Larven des Antarktischen Krills *Euphausia superba* Dana“ von Hans-Peter Marschall

- Heft Nr. 24/1985** – „Untersuchungen zum Periglazial auf der König-Georg-Insel Südshetlandinseln/ Antarktika. Deutsche physiogeographische Forschungen in der Antarktis. – Bericht über die Kampagne 1983/84“ von Dietrich Barsch, Wolf-Dieter Blümel, Wolfgang Flügel, Roland Mäusbacher, Gerhard Stäblein, Wolfgang Zick
- **Heft Nr. 25/1985** – „Die Expedition ANTARKTIS III mit FS ‚Polarstern‘ 1984/1985“ herausgegeben von Gotthilf Hempel.
 - **Heft Nr. 26/1985** – „The Southern Ocean“; A survey of oceanographic and marine meteorological research work by Hellmer et al.
 - **Heft Nr. 27/1986** – „Spätpleistozäne Sedimentationsprozesse am antarktischen Kontinentalhang vor Kapp Norvegia, östliche Weddell-See“ von Hannes Grobe
 - Heft Nr. 28/1986** – „Die Expedition ARKTIS III mit ‚Polarstern‘ 1985 mit Beiträgen der Fahrtteilnehmer, herausgegeben von Rainer Gersonde
 - **Heft Nr. 29/1986** – „5 Jahre Schwerpunktprogramm ‚Antarktisforschung‘ der Deutschen Forschungsgemeinschaft.“ Rückblick und Ausblick. Zusammenge stellt von Gotthilf Hempel, Sprecher des Schwerpunktprogramms
 - Heft Nr. 30/1986** – „The Meteorological Data of the Georg-von-Neumayer-Station for 1981 and 1982“ by Marianne Gube and Friedrich Obleitner
 - **Heft Nr. 31/1986** – „Zur Biologie der Jugendstadien der Notothenioidei (Pisces) an der Antarktischen Halbinsel!“ von A. Kellermann
 - **Heft Nr. 32/1986** – „Die Expedition ANTARKTIS IV mit FS ‚Polarstern‘ 1985/86“ mit Beiträgen der Fahrtteilnehmer, herausgegeben von Dieter Fütterer
 - Heft Nr. 33/1987** – „Die Expedition ANTARKTIS-IV mit FS ‚Polarstern‘ 1985/86 – Bericht zu den Fahrtabschnitten ANT-IV/3-4“ von Dieter Karl Fütterer
 - Heft Nr. 34/1987** – „Zoogeographische Untersuchungen und Gemeinschaftsanalysen an antarktischen Makroplankton“ von U. Piatkowski
 - Heft Nr. 35/1987** – „Zur Verbreitung des Meso- und Makrozooplanktons in Oberflächenwasser der Weddell See (Antarktis)“ von E. Boysen-Ennen
 - Heft Nr. 36/1987** – „Zur Nahrungs- und Bewegungsphysiologie von *Salpa thompsoni* und *Salpa fusiformis*“ von M. Reinke
 - Heft Nr. 37/1987** – „The Eastern Weddell Sea Drifting Buoy Data Set of the Winter Weddell Sea Project (WWSP)“ 1986 by Heinrich Hoerber und Marianne Gube-Lehnhardt
 - Heft Nr. 38/1987** – „The Meteorological Data of the Georg von Neumayer Station for 1983 and 1984“ by M. Gube-Lehnhardt
 - Heft Nr. 39/1987** – „Die Winter-Expedition mit FS ‚Polarstern‘ in die Antarktis (ANT V/1-3)“ herausgegeben von Sigrid Schnack-Schiel
 - Heft Nr. 40/1987** – „Weather and Synoptic Situation during Winter Weddell Sea Project 1986 (ANT V/2) July 16 - September 10, 1986“ by Werner Rabe
 - Heft Nr. 41/1988** – „Zur Verbreitung und Ökologie der Seegurken im Weddellmeer (Antarktis)“ von Julian Gutt
 - Heft Nr. 42/1988** – „The zooplankton community in the deep bathyal and abyssal zones of the eastern North Atlantic“ by Werner Beckmann
 - **Heft Nr. 43/1988** – „Scientific cruise report of Arctic Expedition ARK IV/3“ Wissenschaftlicher Fahrtbericht der Arktis-Expedition ARK IV/3, compiled by Jörn Thiede
 - **Heft Nr. 44/1988** – „Data Report for FV ‚Polarstern‘ Cruise ARK IV/1, 1987 to the Arctic and Polar Fronts“ by Hans-Jürgen Hirche
 - Heft Nr. 45/1988** – „Zoogeographie und Gemeinschaftsanalyse des Makrozoobenthos des Weddellmeeres (Antarktis)“ von Joachim Voß
 - Heft Nr. 46/1988** – „Meteorological and Oceanographic Data of the Winter-Weddell-Sea Project 1986 (ANT V/3)“ by Eberhard Fahrbach
 - Heft Nr. 47/1988** – „Verteilung und Herkunft glazial-mariner Gerölle am Antarktischen Kontinentalrand des östlichen Weddellmeeres“ von Wolfgang Oskierski
 - Heft Nr. 48/1988** – „Variationen des Erdmagnetfeldes an der GvN-Station“ von Arnold Brodscholl
 - **Heft Nr. 49/1988** – „Zur Bedeutung der Lipide im antarktischen Zooplankton“ von Wilhelm Hagen
 - **Heft Nr. 50/1988** – „Die gezeitenbedingte Dynamik des Ekström-Schelfeises, Antarktis“ von Wolfgang Kobarg
 - Heft Nr. 51/1988** – „Ökomorphologie nototheniider Fische aus dem Weddellmeer, Antarktis“ von Werner Ekau
 - Heft Nr. 52/1988** – „Zusammensetzung der Bodenfauna in der westlichen Fram-Straße“ von Dieter Piepenburg
 - **Heft Nr. 53/1988** – „Untersuchungen zur Ökologie des Phytoplanktons im südöstlichen Weddellmeer (Antarktis) im Jan./Febr. 1985“ von Eva-Maria Nöthig
 - Heft Nr. 54/1988** – „Die Fischfauna des östlichen und südlichen Weddellmeeres: geographische Verbreitung, Nahrung und trophische Stellung der Fischarten“ von Wiebke Schwarzbach
 - Heft Nr. 55/1988** – „Weight and length data of zooplankton in the Weddell Sea in austral spring 1986 (Ant. V/3)“ by Elke Mizdalski
 - Heft Nr. 56/1989** – „Scientific cruise report of Arctic expeditions ARK IV/1, 2 & 3“ by G. Krause, J. Meinke und J. Thiede

- Heft Nr. 57/1989** – „Die Expedition ANTARKTIS V mit FS ‚Polarstern‘ 1986/87“
Bericht von den Fahrtabschnitten ANT V/4-5 von H. Miller und H. Oerter
- * **Heft Nr. 58/1989** – „Die Expedition ANTARKTIS VI mit FS ‚Polarstern‘ 1987/88“
von D. K. Fütterer
 - Heft Nr. 59/1989** – „Die Expedition ARKTIS V/1a, 1b und 2 mit FS ‚Polarstern‘ 1988“
von M. Spindler
 - Heft Nr. 60/1989** – „Ein zweidimensionales Modell zur thermohalinen Zirkulation unter dem Schelfeis“
von H. H. Hellmer
 - Heft Nr. 61/1989** – „Die Vulkanite im westlichen und mittleren Neuschwabenland,
Vestfjella und Ahlmannryggen, Antarktika“ von M. Peters
 - * **Heft Nr. 62/1989** – „The Expedition ANTARKTIS VII/1 and 2 (EPOS I) of RV ‚Polarstern‘
in 1988/89“, by I. Hempel
 - Heft Nr. 63/1989** – „Die Eisalgenflora des Weddellmeeres (Antarktis): Artenzusammensetzung und Biomasse
sowie Ökophysiologie ausgewählter Arten“ von Annette Bartsch
 - Heft Nr. 64/1989** – „Meteorological Data of the G.-v.-Neumayer-Station (Antarctica)“ by L. Helmes
 - Heft Nr. 65/1989** – „Expedition Antarktis VII/3 in 1988/89“ by I. Hempel, P. H. Schalk, V. Smetacek
 - Heft Nr. 66/1989** – „Geomorphologisch-glaziologische Detailkartierung
des arid-hochpolaren Borgmassivet, Neuschwabenland, Antarktika“ von Karsten Brunk
 - Heft Nr. 67/1990** – „Identification key and catalogue of larval Antarctic fishes“,
edited by Adolf Kellermann
 - Heft Nr. 68/1990** – „The Expedition Antarktis VII/4 (Epos leg 3) and VII/5 of RV ‚Polarstern‘ in 1989“,
edited by W. Arntz, W. Ernst, I. Hempel
 - Heft Nr. 69/1990** – „Abhängigkeiten elastischer und rheologischer Eigenschaften des Meereises vom
Eisgefüge“, von Harald Hellmann
 - * **Heft Nr. 70/1990** – „Die beschalten benthischen Mollusken (Gastropoda und Bivalvia) des
Weddellmeeres, Antarktis“, von Stefan Hain
 - Heft Nr. 71/1990** – „Sedimentologie und Paläomagnetik an Sedimenten der Maudkuppe (Nordöstliches
Weddellmeer)“, von Dieter Cordes
 - Heft Nr. 72/1990** – „Distribution and abundance of planktonic copepods (Crustacea) in the Weddell Sea
in summer 1980/81“, by F. Kurbjeweit and S. Ali-Khan
 - Heft Nr. 73/1990** – „Zur Frühdiagenese von organischem Kohlenstoff und Opal in Sedimenten des südlichen
und östlichen Weddellmeeres“, von M. Schlüter
 - Heft Nr. 74/1990** – „Expeditionen ANTARKTIS-VIII/3 und VIII/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1989“
von Rainer Gersonde und Gotthilf Hempel
 - Heft Nr. 75/1991** – „Quartäre Sedimentationsprozesse am Kontinentalhang des Süd-Orkey-Plateaus im
nordwestlichen Weddellmeer (Antarktis)“, von Sigrun Grünig
 - Heft Nr. 76/1990** – „Ergebnisse der faunistischen Arbeiten im Benthal von King George Island
(Südshetlandinseln, Antarktis)“, von Martin Rauschert
 - Heft Nr. 77/1990** – „Verteilung von Mikroplankton-Organismen nordwestlich der Antarktischen Halbinsel
unter dem Einfluß sich ändernder Umweltbedingungen im Herbst“, von Heinz Klöser
 - Heft Nr. 78/1991** – „Hochauflösende Magnetostratigraphie spätquartärer Sedimente arktischer
Meeresgebiete“, von Norbert R. Nowaczyk
 - Heft Nr. 79/1991** – „Ökophysiologische Untersuchungen zur Salinitäts- und Temperaturtoleranz
antarktischer Grünalgen unter besonderer Berücksichtigung des β -Dimethylsulfoniumpropionat
(DMSP) - Stoffwechsels“, von Ulf Karsten
 - Heft Nr. 80/1991** – „Die Expedition ARKTIS VII/1 mit FS ‚Polarstern‘ 1990“,
herausgegeben von Jörn Thiede und Gotthilf Hempel
 - Heft Nr. 81/1991** – „Paläoglazialogie und Paläozeanographie im Spätquartär am Kontinentalrand des
südlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Martin Melles
 - Heft Nr. 82/1991** – „Quantifizierung von Meeresseigenschaften: Automatische Bildanalyse von
Dünnschnitten und Parametrisierung von Chlorophyll- und Salzgehaltsverteilungen“, von Hajo Eicken
 - Heft Nr. 83/1991** – „Das Fließen von Schelfeisen - numerische Simulationen
mit der Methode der finiten Differenzen“, von Jürgen Determann
 - Heft Nr. 84/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII/1-2, 1989 mit der Winter Weddell Gyre Study
der Forschungsschiffe ‚Polarstern‘ und ‚Akademik Fedorov‘“, von Ernst Augstein,
Nikolai Bagriantsev und Hans Werner Schenke
 - Heft Nr. 85/1991** – „Zur Entstehung von Unterwassereis und das Wachstum und die Energiebilanz
des Meereises in der Alka Bucht, Antarktis“, von Josef Kipfstuhl
 - * **Heft Nr. 86/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht vom
Fahrtabschnitt ANT-VIII/5“, von Heinz Miller und Hans Oerter
 - Heft Nr. 87/1991** – „Scientific cruise reports of Arctic expeditions ARK VII/1-4 of RV ‚Polarstern‘
in 1989“, edited by G. Krause, J. Meincke & H. J. Schwarz
 - Heft Nr. 88/1991** – „Zur Lebensgeschichte dominanter Copepodenarten (*Calanus finmarchicus*,
C. glacialis, *C. hyperboreus*, *Metridia longa*) in der Framstraße“, von Sabine Diel

- Heft Nr. 89/1991** – „Detaillierte seismische Untersuchungen am östlichen Kontinentalrand des Weddell-Meeres vor Kapp Norvegia, Antarktis“, von Norbert E. Kaul
- Heft Nr. 90/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht von den Fahrtabschnitten ANT-VIII/6-7“, herausgegeben von Dieter Karl Fütterer und Otto Schrems
- Heft Nr. 91/1991** – „Blood physiology and ecological consequences in Weddell Sea fishes (Antarctica)“, by Andreas Kunzmann
- Heft Nr. 92/1991** – „Zur sommerlichen Verteilung des Mesozooplanktons im Nansen-Becken, Nordpolarmeer“, von Nicolai Mumm
- Heft Nr. 93/1991** – „Die Expedition ARKTIS VII mit FS ‚Polarstern‘, 1990. Bericht vom Fahrtabschnitt ARK VII/2“, herausgegeben von Gunther Krause
- Heft Nr. 94/1991** – „Die Entwicklung des Phytoplanktons im östlichen Weddellmeer (Antarktis) beim Übergang vom Spätwinter zum Frühjahr“, von Renate Scharek
- Heft Nr. 95/1991** – „Radioisotopenstratigraphie, Sedimentologie und Geochemie jungquartärer Sedimente des östlichen Arktischen Ozeans“, von Horst Bohrmann
- Heft Nr. 96/1991** – „Holozäne Sedimentationsentwicklung im Scoresby Sund, Ost-Grönland“, von Peter Marienfeld
- Heft Nr. 97/1991** – „Strukturelle Entwicklung und Abkühlungsgeschichte von Heimfrontfjella (Westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Joachim Jacobs
- Heft Nr. 98/1991** – „Zur Besiedlungsgeschichte des antarktischen Schelfes am Beispiel der Isopoda (Crustacea, Malacostraca)“, von Angelika Brandt
- **Heft Nr. 99/1992** – „The Antarctic ice sheet and environmental change: a three-dimensional modelling study“, by Philippe Huybrechts
 - **Heft Nr. 100/1992** – „Die Expeditionen ANTARKTIS IX/1-4 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1990/91“ herausgegeben von Ulrich Bathmann, Meinhard Schulz-Baldes, Eberhard Fahrbach, Victor Smetacek und Hans-Wolfgang Hubberten
 - Heft Nr. 101/1992** – „Wechselbeziehungen zwischen Schwermetallkonzentrationen (Cd, Cu, Pb, Zn) im Meerwasser und in Zooplanktonorganismen (Copepoda) der Arktis und des Atlantiks“, von Christa Pohl
 - Heft Nr. 102/1992** – „Physiologie und Ultrastruktur der antarktischen Grünalge *Prasiola crispa* ssp. *antarctica* unter osmotischem Stress und Austrocknung“, von Andreas Jacob
 - **Heft Nr. 103/1992** – „Zur Ökologie der Fische im Weddellmeer“, von Gerd Hubold
 - Heft Nr. 104/1992** – „Mehrkanafige adaptive Filter für die Unterdrückung von multiplen Reflexionen in Verbindung mit der freien Oberfläche in marinen Seismogrammen“, von Andreas Rosenberger
 - Heft Nr. 105/1992** – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1991 (REFLEX II)“, von Jörg Hartmann, Christoph Kottmeier und Christian Wamser
 - Heft Nr. 106/1992** – „Ostracoden im Epipelagial vor der Antarktischen Halbinsel - ein Beitrag zur Systematik sowie zur Verbreitung und Populationsstruktur unter Berücksichtigung der Saisonalität“, von Rüdiger Kock
 - **Heft Nr. 107/1992** – „ARCTIC '91: Die Expedition ARK-VIII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1991“, von Dieter K. Fütterer
 - Heft Nr. 108/1992** – „Dehnungsbeben an einer Störungszone im Ekström-Schelfeis nördlich der Georg-von-Neumayer-Station, Antarktis. – Eine Untersuchung mit seismologischen und geodätischen Methoden“, von Uwe Nixdorf.
 - **Heft Nr. 109/1992** – „Spätquartäre Sedimentation am Kontinentalrand des südöstlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Michael Weber.
 - **Heft Nr. 110/1992** – „Sedimentfazies und Bodenwasserstrom am Kontinentalhang des norwestlichen Weddellmeeres“, von Isa Brehme.
 - Heft Nr. 111/1992** – „Die Lebensbedingungen in den Solekanälchen des antarktischen Meereises“, von Jürgen Weissenberger.
 - Heft Nr. 112/1992** – „Zur Taxonomie von rezenten benthischen Foraminiferen aus dem Nansen Becken, Arktischer Ozean“, von Julita Wollenburg.
 - Heft Nr. 113/1992** – „Die Expedition ARKTIS VIII/1 mit FS ‚Polarstern‘ 1991“, herausgegeben von Gerhard Kattner.
 - **Heft Nr. 114/1992** – „Die Gründungsphase deutscher Polarforschung, 1865 - 1875“, von Reinhard A. Krause.
 - Heft Nr. 115/1992** – „Scientific Cruise Report of the 1991 Arctic Expedition ARK VIII/2 of RV ‚Polarstern‘ (EPOS II)“, by Eike Rachor.
 - Heft Nr. 116/1992** – „The Meteorological Data of the Georg-von-Neumayer-Station (Antarctica) for 1988, 1989, 1990 and 1991“, by Gert König-Langlo.
 - Heft Nr. 117/1992** – „Petrogenese des metamorphen Grundgebirges der zentralen Heimfrontfjella (westliches Dronning Maud Land / Antarktis)“, von Peter Schulze.
 - Heft Nr. 118/1993** – „Die mafischen Gänge der Shackleton Range / Antarktika: Petrographie, Geochemie, Isotopengeochemie und Paläomagnetik“, von Rüdiger Hotten.
 - **Heft Nr. 119/1993** – „Gefrierschutz bei Fischen der Polarmeere“, von Andreas P. A. Wöhrmann.
 - **Heft Nr. 120/1993** – „East Siberian Arctic Region Expedition '92: The Laptev Sea - its Significance for Arctic Sea-Ice Formation and Transpolar Sediment Flux“, by D. Dethleff, D. Nürnberg, E. Reimnitz, M. Saarso and Y. P. Sacchenko. – „Expedition to Novaja Zemlja and Franz Josef Land with RV ‚Dalnje Zelentsy‘“, by D. Nürnberg and E. Groth.

- * **Heft Nr. 121/1993** – „Die Expedition ANTARKTIS X/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Michael Spindler, Gerhard Dieckmann und David Thomas
- Heft Nr. 122/1993** – „Die Beschreibung der Korngestalt mit Hilfe der Fourier-Analyse: Parametrisierung der morphologischen Eigenschaften von Sedimentpartikeln“, von Michael Diepenbroek.
- * **Heft Nr. 123/1993** – „Zerstörungsfreie hochauflösende Dichteuntersuchungen mariner Sedimente“, von Sebastian Gerland.
- Heft Nr. 124/1993** – „Umsatz und Verteilung von Lipiden in arktischen marinen Organismen unter besonderer Berücksichtigung unterer tropischer Stufen“, von Martin Graeve.
- Heft Nr. 125/1993** – „Ökologie und Respiration ausgewählter arktischer Bodenfischarten“, von Christian F. von Dorrien.
- Heft Nr. 126/1993** – „Quantitative Bestimmung von Paläoumweltparametern des Antarktischen Oberflächenwassers im Spätquartier anhand von Transferfunktionen mit Diatomeen“, von Ulrich Zielinski
- * **Heft Nr. 127/1993** – „Sedimenttransport durch das arktische Meereis: Die rezente lithogene und biogene Materialfracht“, von Ingo Wollenburg.
- Heft Nr. 128/1993** – „Cruise ANTARKTIS X/3 of RV ‚Polarstern‘: CTD-Report“, von Marek Zwierz.
- Heft Nr. 129/1993** – „Reproduktion und Lebenszyklen dominanter Copepodenarten aus dem Weddellmeer, Antarktis“, von Frank Kurbjewit
- Heft Nr. 130/1993** – „Untersuchungen zu Temperaturregime und Massenhaushalt des Filchner-Ronne-Schelfeises, Antarktis, unter besonderer Berücksichtigung von Anfrier- und Abschmelzprozessen“, von Klaus Grosfeld
- Heft Nr. 131/1993** – „Die Expedition ANTARKTIS X/5 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Rainer Gersonde
- Heft Nr. 132/1993** – „Bildung und Abgabe kurzketziger halogener Kohlenwasserstoffe durch Makroalgen der Polarregionen“, von Frank Laturnus
- Heft Nr. 133/1994** – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1993 (REFLEX II)“, by Christoph Kottmeier, Jörg Hartmann, Christian Wamsler, Axel Bocher, Christof Lüpkes, Dietmar Freese and Wolfgang Cohrs
- * **Heft Nr. 134/1994** – „The Expedition ARKTIS-IX/1“, edited by Hajo Eicken and Jens Meincke
- Heft Nr. 135/1994** – „Die Expeditionen ANTARKTIS X/6-8“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Victor Smetacek, Hein de Baar, Eberhard Fahrbach und Gunter Krause
- Heft Nr. 136/1994** – „Untersuchungen zur Ernährungsökologie von Kaiserpinguinen (*Aptenodytes forsteri*) und Königspinguinen (*Aptenodytes patagonicus*)“, von Klemens Pütz
- * **Heft Nr. 137/1994** – „Die kanozoische Vereisungsgeschichte der Antarktis“, von Werner U. Ehrmann
- Heft Nr. 138/1994** – „Untersuchungen stratosphärischer Aerosole vulkanischen Ursprungs und polarer stratosphärischer Wolken mit einem Mehrwellenlängen-Lidar auf Spitzbergen (79° N, 12° E)“, von Georg Beyerle
- Heft Nr. 139/1994** – „Charakterisierung der Isopodenfauna (Crustacea, Malacostraca) des Scotia-Bogens aus biogeographischer Sicht: Ein multivariater Ansatz“, von Holger Winkler.
- Heft Nr. 140/1994** – „Die Expedition ANTARKTIS X/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Peter Lemke
- Heft Nr. 141/1994** – „Satellitenaltimetrie über Eis – Anwendung des GEOSAT-Altimeters über dem Ekströmisen, Antarktis“, von Clemens Heidland
- Heft Nr. 142/1994** – „The 1993 Northeast Water Expedition. Scientific cruise report of RV ‚Polarstern‘ Arctic cruises ARK IX/2 and 3, USCG ‚Polar Bear‘ cruise NEWP and the NEWLand expedition“, edited by Hans-Jürgen Hirche and Gerhard Kattner
- Heft Nr. 143/1994** – „Detaillierte refraktionsseismische Untersuchungen im inneren Scoresby Sund Ost-Grönland“, von Notker Fechner
- Heft Nr. 144/1994** – „Russian-German Cooperation in the Siberian Shelf Seas: Geo-System Laptev Sea“, edited by Heidemarie Kassens, Hans-Wolfgang Hubberten, Sergey M. Pryamikov and Rüdiger Stein
- * **Heft Nr. 145/1994** – „The 1993 Northeast Water Expedition. Data Report of RV ‚Polarstern‘ Arctic Cruises IX/2 and 3“, edited by Gerhard Kattner and Hans-Jürgen Hirche.
- Heft Nr. 146/1994** – „Radiation Measurements at the German Antarctic Station Neumayer 1982 - 1992“, by Torsten Schmidt and Gerd König-Langlo.
- Heft Nr. 147/1994** – „Krustenstrukturen und Verlauf des Kontinentalrandes im Weddell-See / Antarktis“, von Christian Hübscher.
- * **Heft Nr. 148/1994** – „The expeditions NORILSK/TAYMYR 1993 and BUNGER OASIS 1993/94 of the AWI Research Unit Potsdam“, edited by Martin Melles.
- ** **Heft Nr. 149/1994** – „Die Expedition ARCTIC '93. Der Fahrtabschnitt ARK-IX/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1993“, herausgegeben von Dieter K. Fütterer.
- Heft Nr. 150/1994** – „Der Energiebedarf der Pygoscelis-Pinguine: eine Synopse“, von Boris M. Culik.
- Heft Nr. 151/1994** – „Russian-German Cooperation: The Transdrift I Expedition to the Laptev Sea“, edited by Heidemarie Kassens and Valeriy Y. Karpiy.
- Heft Nr. 152/1994** – „Die Expedition ANTARKTIS-X mit FS ‚Polarstern‘ 1992. Bericht von den Fahrtabschnitten / ANT-X / 1a und 2“, herausgegeben von Heinz Miller.
- Heft Nr. 153/1994** – „Aminosäuren und Huminstoffe im Stickstoffkreislauf polarer Meere“, von Ulrike Hubberten.
- Heft Nr. 154/1994** – „Regional and seasonal variability in the vertical distribution of mesozooplankton in the Greenland Sea“, by Claudio Richter.

- Heft Nr. 155/1995** – „Benthos in polaren Gewässern“, herausgegeben von Christian Wiencke und Wolf Arntz.
- Heft Nr. 156/1995** – „An adjoint model for the determination of the mean oceanic circulation, air-sea fluxes and mixing coefficients“, by Reiner Schlitzer.
- Heft Nr. 157/1995** – „Biochemische Untersuchungen zum Lipidstoffwechsel antarktischer Copepoden“, von Kirsten Fahl.
- ** **Heft Nr. 158/1995** – „Die Deutsche Polarforschung seit der Jahrhundertwende und der Einfluß Erich von Drygalskis“, von Cornelia Lüdecke.
- * **Heft Nr. 159/1995** – „The distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in the Arctic Ocean: Implications for the freshwater balance of the halocline and the sources of deep and bottom waters“, by Dorothea Bauch.
- * **Heft Nr. 160/1995** – „Rekonstruktion der spätquartären Tiefenwasserzirkulation und Produktivität im östlichen Südatlantik anhand von benthischen Foraminiferenvergesellschaftungen“, von Gerhard Schmiedl.
- Heft Nr. 161/1995** – „Der Einfluß von Salinität und Lichtintensität auf die Osmolytkonzentrationen, die Zellvolumina und die Wachstumsraten der antarktischen Eisdiatomeen *Chaetoceros sp.* und *Navicula sp.* unter besonderer Berücksichtigung der Aminosäure Prolin“, von Jürgen Nothnagel.
- Heft Nr. 162/1995** – „Meerestransportiertes lithogenes Feinmaterial in spätquartären Tiefseesedimenten des zentralen östlichen Arktischen Ozeans und der Framstraße“, von Thomas Letzig.
- Heft Nr. 163/1995** – „Die Expedition ANTARKTIS-XI/2 mit FS ‚Polarstern‘ 1993/94“, herausgegeben von Rainer Gersonde.
- Heft Nr. 164/1995** – „Regionale und altersabhängige Variation gesteinsmagnetischer Parameter in marinen Sedimenten der Arktis“, von Thomas Frederichs.
- Heft Nr. 165/1995** – „Vorkommen, Verteilung und Umsatz biogener organischer Spurenstoffe: Sterole in antarktischen Gewässern“, von Georg Hanke.
- Heft Nr. 166/1995** – „Vergleichende Untersuchungen eines optimierten dynamisch-thermodynamischen Meereismodells mit Beobachtungen im Weddellmeer“, von Holger Fischer.
- * **Heft Nr. 167/1995** – „Rekonstruktionen von Paläo-Umweltparametern anhand von stabilen Isotopen und Faunen-Vergesellschaftungen planktischer Foraminiferen im Südatlantik“, von Hans-Stefan Niebler
- Heft Nr. 168/1995** – „Die Expedition ANTARKTIS XII mit FS ‚Polarstern‘ 1993/94. Bericht von den Fahrtabschnitten ANT XII/1 und 2“, herausgegeben von Gerhard Kattner und Dieter Karl Fütterer
- Heft Nr. 169/1995** – „Medizinische Untersuchung zur Circadianrhythmik und zum Verhalten bei Überwinterern auf einer antarktischen Forschungsstation“, von Hans Wortmann
- Heft-Nr. 170/1995** – DFG-Kolloquium: Terrestrische Geowissenschaften – Geologie und Geophysik der Antarktis.
- Heft Nr. 171/1995** – „Strukturentwicklung und Petrogenese des metamorphen Grundgebirges der nördlichen Heimfrontjella (westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Wilfried Bauer.
- Heft Nr. 172/1995** – „Die Struktur der Erdkruste im Bereich des Scoresby Sund, Ostgrönland: Ergebnisse refraktionsseismischer und gravimetrischer Untersuchungen“, von Holger Mandler.
- Heft Nr. 173/1995** – „Paläozoische Akkretion am paläopazifischen Kontinentalrand der Antarktis in Nordvictorialand – P-T-D-Geschichte und Deformationsmechanismen im Bowers Terrane“, von Stefan Matzer.
- Heft Nr. 174/1995** – „The Expedition ARKTIS-X/2 of RV ‚Polarstern‘ in 1994“, edited by Hans-W. Hubberten
- Heft Nr. 175/1995** – „Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR 1994“, edited by Christine Siegert and Gmityr Bolshiyarov.
- * **Heft Nr. 176/1995** – „Russian-German Cooperation: Laptev Sea System“, edited by Heidemarie Kassens, Dieter Piepenburg, Jörn Thiede, Leonid Timokhov, Hans-Wolfgang Hubberten and Sergey M. Priamikov.
- Heft Nr. 177/1995** – „Organischer Kohlenstoff in spätquartären Sedimenten des Arktischen Ozeans: Terrigener Eintrag und marine Produktivität“, von Carsten J. Schubert
- Heft Nr. 178/1995** – „Cruise ANTARKTIS XII/4 of RV ‚Polarstern‘ in 1995: CTD-Report“, by Jüri Sildam.
- Heft Nr. 179/1995** – „Benthische Foraminiferenfaunen als Wassermassen-, Produktions- und Eisdriftanzeiger im Arktischen Ozean“, von Jutta Wollenburg.
- Heft Nr. 180/1995** – „Biogenopal und biogenes Barium als Indikatoren für spätquartäre Produktivitätsänderungen am antarktischen Kontinentalhang, atlantischer Sektor“, von Wolfgang J. Bonn.
- Heft Nr. 181/1995** – „Die Expedition ARKTIS X/1 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1994“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach.
- Heft Nr. 182/1995** – „Laptev Sea System: Expeditions in 1994“, edited by Heidemarie Kassens.
- Heft Nr. 183/1995** – „Interpretation digitaler Parasound Echolotaufzeichnungen im östlichen Arktischen Ozean auf der Grundlage physikalischer Sedimenteigenschaften“, von Uwe Bergmann.
- Heft Nr. 184/1995** – „Distribution and dynamics of inorganic nitrogen compounds in the troposphere of continental, coastal, marine and Arctic areas“, by María Dolores Andrés Hernández.
- Heft Nr. 185/1995** – „Verbreitung und Lebensweise der Aphroditen und Polynoiden (Polychaeta) im östlichen Weddellmeer und im Lazarevmeer (Antarktis)“, von Michael Stiller.
- Heft Nr. 186/1995** – „Reconstruction of Late Quaternary environmental conditions applying the natural radionuclides ^{230}Th , ^{10}Be , ^{233}Pa and ^{238}U : A study of deep-sea sediments from the eastern sector of the Antarctic Circumpolar Current System“, by Martin Frank.
- Heft Nr. 187/1995** – „The Meteorological Data of the Neumayer Station (Antarctica) for 1992, 1993 and 1994“, by Gert König-Langlo and Andreas Herber.
- Heft Nr. 188/1995** – „Die Expedition ANTARKTIS-XI/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1994“, herausgegeben von Heinz Miller und Hannes Grobe.
- Heft Nr. 189/1995** – „Die Expedition ARKTIS-VII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1990“, herausgegeben von Heinz Miller und Hannes Grobe

- Heft Nr. 190/1996** – "Cruise report of the Joint Chilean-German-Italian Magellan 'Victor Hensen' Campaign in 1994", edited by Wolf Arntz and Matthias Gorny.
- Heft Nr. 191/1996** – „Leitfähigkeits- und Dichtemessung an Eisbohrkernen“, von Frank Wilhelms.
- Heft Nr. 192/1996** – „Photosynthese-Charakteristika und Lebensstrategie antarktischer Makroalgen“, von Gabriele Weykam.
- Heft Nr. 193/1996** – „Heterogene Reaktionen von N_2O_5 und Hbr und ihr Einfluß auf den Ozonabbau in der polaren Stratosphäre“, von Sabine Seisel.
- Heft Nr. 194/1996** – „Ökologie und Populationsdynamik antarktischer Ophiuroiden (Echinodermata)“, von Corinna Dahm.
- Heft Nr. 195/1996** – „Die planktische Foraminifere *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg) im Weddellmeer, Antarktis“, von Doris Berberich.
- Heft Nr. 196/1996** – „Untersuchungen zum Beitrag chemischer und dynamischer Prozesse zur Variabilität des stratosphärischen Ozons über der Arktis“, von Birgit Heese.
- Heft Nr. 197/1996** – "The Expedition ARKTIS-XI/2 of 'Polarstern' in 1995", edited by Gunther Krause.
- Heft Nr. 198/1996** – „Geodynamik des Westantarktischen Riftsystems basierend auf Apatit-Spaltspuranalysen“, von Frank Lisker.
- Heft Nr. 199/1996** – "The 1993 Northeast Water Expedition. Data Report on CTD Measurements of RV 'Polarstern' Cruises ARKTIS IX/2 and 3", by Gerion Budéus and Wolfgang Schneider.
- Heft Nr. 200/1996** – "Stability of the Thermohaline Circulation in analytical and numerical models", by Gerrit Lohmann.
- Heft Nr. 201/1996** – „Trophische Beziehungen zwischen Makroalgen und Herbivoren in der Potter Cove (King George-Insel, Antarktis)“, von Katrin Iken.
- Heft Nr. 202/1996** – „Zur Verbreitung und Respiration ökologisch wichtiger Bodentiere in den Gewässern um Svalbard (Arktis)“, von Michael K. Schmid.
- Heft Nr. 203/1996** – „Dynamik, Rauigkeit und Alter des Meereises in der Arktis – Numerische Untersuchungen mit einem großskaligen Modell“, von Markus Harder.
- Heft Nr. 204/1996** – „Zur Parametrisierung der stabilen atmosphärischen Grenzschicht über einem antarktischen Schelfeis“, von Dörthe Handorf.
- Heft Nr. 205/1996** – "Textures and fabrics in the GRIP ice core, in relation to climate history and ice deformation", by Thorsteinn Thorsteinsson.
- Heft Nr. 206/1996** – „Der Ozean als Teil des gekoppelten Klimasystems: Versuch der Rekonstruktion der glazialen Zirkulation mit verschiedenen komplexen Atmosphärenkomponenten“, von Kerstin Fieg.
- Heft Nr. 207/1996** – „Lebensstrategien dominanter antarktischer Oithonidae (Cyclopoida, Copepoda) und Oncaeidae (Poecilostomatoida, Copepoda) im Bellingshausenmeer“, von Cornelia Metz.
- Heft Nr. 208/1996** – „Atmosphären einfluß bei der Fernerkundung von Meereis mit passiven Mikrowellenradiometern“, von Christoph Oelke.
- Heft Nr. 209/1996** – „Klassifikation von Radarsatellitendaten zur Meereiserkennung mit Hilfe von Line-Scanner-Messungen“, von Axel Bochert.
- Heft Nr. 210/1996** – „Die mit ausgewählten Schwämmen (Hexactinellida und Demospongiae) aus dem Weddellmeer, Antarktis, vergesellschaftete Fauna“, von Kathrin Kunzmann.
- Heft Nr. 211/1996** – "Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR 1995 and the Expedition KOLYMA 1995", by Dima Yu. Bolshiyarov and Hans-W. Hubberten.
- Heft Nr. 212/1996** – "Surface-sediment composition and sedimentary processes in the central Arctic Ocean and along the Eurasian Continental Margin", by Ruediger Stein, Gennadij I. Ivanov, Michael A. Levitan, and Kirsten Fahl.
- Heft Nr. 213/1996** – „Gonadenentwicklung und Eiproduktion dreier *Calanus*-Arten (Copepoda): Freilandbeobachtungen, Histologie und Experimente“, von Barbara Niehoff.
- Heft Nr. 214/1996** – „Numerische Modellierung der Übergangszone zwischen Eisschild und Eisschelf“, von Christoph Mayer.
- Heft Nr. 215/1996** – „Arbeiten der AWI-Forschungsstelle Potsdam in Antarktika, 1994/95“, herausgegeben von Ulrich Wand.
- Heft Nr. 216/1996** – „Rekonstruktion quartärer Klimaänderungen im atlantischen Sektor des Südpolarmeeres anhand von Radiolarien“, von Uta Brathauer.
- Heft Nr. 217/1996** – „Adaptive Semi-Lagrange-Finite-Elemente-Methode zur Lösung der Flachwassergleichungen: Implementierung und Parallelisierung“, von Jörn Behrens.
- Heft Nr. 218/1997** – "Radiation and Eddy Flux Experiment 1995 (REFLEX III)", by Jörg Hartmann, Axel Bochert, Dietmar Freese, Christoph Kottmeier, Dagmar Nagel and Andreas Reuter.
- Heft Nr. 219/1997** – „Die Expedition ANTARKTIS-XII mit FS 'Polarstern' 1995. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XII/3, herausgegeben von Wilfried Jokat und Hans Oerter.
- Heft Nr. 220/1997** – „Ein Beitrag zum Schwerfeld im Bereich des Weddellmeeres, Antarktis. Nutzung von Altimetermessungen des GEOSAT und ERS-1“, von Tilo Schöne.
- Heft Nr. 221/1997** – „Die Expeditionen ANTARKTIS-XIII/1-2 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1995/96“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Mike Lukas und Victor Smetacek.
- Heft Nr. 222/1997** – "Tectonic Structures and Glaciomarine Sedimentation in the South-Eastern Weddell Sea from Seismic Reflection Data", by László Oszkó.

- Heft Nr. 223/1997** – „Bestimmung der Meereisdicke mit seismischen und elektromagnetisch-induktiven Verfahren“, von Christian Haas.
- Heft Nr. 224/1997** – „Troposphärische Ozonvariationen in Polarregionen“, von Silke Wessel.
- Heft Nr. 225/1997** – „Biologische und ökologische Untersuchungen zur kryptopelagischen Amphipodenfauna des arktischen Meereises“, von Michael Pottermann.
- Heft Nr. 226/1997** – „Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XI/1 of RV 'Polarstern' in 1995“, edited by Eike Rachor.
- Heft Nr. 227/1997** – „Der Einfluß kompatibler Substanzen und Kryoprotektoren auf die Enzyme Malatdehydrogenase (MDH) und Glucose-6-phosphat-Dehydrogenase (G6P-DH) aus *Acrosiphonia arcta* (Chlorophyta) der Arktis“, von Katharina Kück.
- Heft Nr. 228/1997** – „Die Verbreitung epibenthischer Mollusken im chilenischen Beagle-Kanal“, von Katrin Linse.
- Heft Nr. 229/1997** – „Das Mesozooplankton im Laptevmeer und östlichen Nansen-Becken - Verteilung und Gemeinschaftsstrukturen im Spätsommer“, von Hinrich Hanssen.
- Heft Nr. 230/1997** – „Modell eines adaptierbaren, rechnergestützten, wissenschaftlichen Arbeitsplatzes am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung“, von Lutz-Peter Kurdelski.
- Heft Nr. 231/1997** – „Zur Ökologie arktischer und antarktischer Fische: Aktivität, Sinnesleistungen und Verhalten“, von Christopher Zimmermann.
- Heft Nr. 232/1997** – „Persistente chlororganische Verbindungen in hochantarktischen Fischen“, von Stephan Zimmermann.
- Heft Nr. 233/1997** – „Zur Ökologie des Dimethylsulfoniumpropionat (DMSP)-Gehaltes temperierter und polarer Phytoplanktongemeinschaften im Vergleich mit Laborkulturen der Coccolithophoride *Emiliania huxleyi* und der antarktischen Diatomee *Nitzschia lecontei*“, von Doris Meyerdieters.
- Heft Nr. 234/1997** – „Die Expedition ARCTIC '96 des FS 'Polarstern' (ARK XIII) mit der Arctic Climate System Study (ACSYS)“, von Ernst Augstein und den Fahrtteilnehmern.
- Heft Nr. 235/1997** – „Polonium-210 und Blei-210 im Südpolarmeer: Natürliche Tracer für biologische und hydrographische Prozesse im Oberflächenwasser des Antarktischen Zirkumpolarstroms und des Weddellmeeres“, von Jana Friedrich.
- Heft Nr. 236/1997** – „Determination of atmospheric trace gas amounts and corresponding natural isotopic ratios by means of ground-based FTIR spectroscopy in the high Arctic“, by Arndt Meier.
- Heft Nr. 237/1997** – „Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR/SEVERNAYA ZEMLYA 1996“, edited by Martin Melles, Birgit Hagedorn and Dmitri Yu. Bolshiyarov.
- Heft Nr. 238/1997** – „Life strategy and ecophysiology of Antarctic macroalgae“, by Iván M. Gómez.
- Heft Nr. 239/1997** – „Die Expedition ANTARKTIS XIII/4-5 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1996“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach und Dieter Gerdes.
- Heft Nr. 240/1997** – „Untersuchungen zur Chrom-Speziation in Meerwasser, Meereis und Schnee aus ausgewählten Gebieten der Arktis“, von Heide Giese.
- Heft Nr. 241/1997** – „Late Quaternary glacial history and paleoceanographic reconstructions along the East Greenland continental margin: Evidence from high-resolution records of stable isotopes and ice-rafted debris“, by Seung-Il Nam.
- Heft Nr. 242/1997** – „Thermal, hydrological and geochemical dynamics of the active layer at a continuous permafrost site, Taymyr Peninsula, Siberia“, by Julia Boike.
- Heft Nr. 243/1997** – „Zur Paläoceanographie hoher Breiten: Stellvertreterdaten aus Foraminiferen“, von Andreas Mackensen.
- Heft Nr. 244/1997** – „The Geophysical Observatory at Neumayer Station, Antarctica, Geomagnetic and seismological observations in 1995 and 1996“, by Alfons Eckstaller, Thomas Schmidt, Viola Graw, Christian Müller and Johannes Rogenhagen.
- Heft Nr. 245/1997** – „Temperaturbedarf und Biogeographie mariner Makroalgen - Anpassung mariner Makroalgen an tiefe Temperaturen“, von Bettina Bischoff-Bäsmann.
- Heft Nr. 246/1997** – „Ökologische Untersuchungen zur Fauna des arktischen Meereises“, von Christine Friedrich.
- Heft Nr. 247/1997** – „Entstehung und Modifizierung von marinen gelösten organischen Substanzen“, von Berit Kirchhoff.
- Heft Nr. 248/1997** – „Laptev Sea System: Expeditions in 1995“, edited by Heidemarie Kassens.
- Heft Nr. 249/1997** – „The Expedition ANTARKTIS XIII/3 (EASIZ I) of RV 'Polarstern' to the eastern Weddell Sea in 1996“, edited by Wolf Arntz and Julian Gutt.
- Heft Nr. 250/1997** – „Vergleichende Untersuchungen zur Ökologie und Biodiversität des Mega-Epibenthos der Arktis und Antarktis“, von Andreas Starmans.
- Heft Nr. 251/1997** – „Zeitliche und räumliche Verteilung von Mineralvergesellschaftungen in spätquartären Sedimenten des Arktischen Ozeans und ihre Nützlichkeit als Klimaindikatoren während der Glazial/Interglazial-Wechsel“, von Christoph Vogt.
- Heft Nr. 252/1997** – „Solitäre Ascidien in der Potter Cove (King George Island, Antarktis). Ihre ökologische Bedeutung und Populationsdynamik“, von Stephan Kühne.
- Heft Nr. 253/1997** – „Distribution and role of microprotozoa in the Southern Ocean“, by Christine Klaas.
- Heft Nr. 254/1997** – „Die spätquartäre Klima- und Umweltgeschichte der Bungee-Oase, Ostantarktis“, von Thomas Kulbe.

- Heft Nr. 255/1997** – "Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XIII/2 of RV 'Polarstern' in 1997", edited by Ruediger Stein and Kirsten Fahl.
- Heft Nr. 256/1998** – „Das Radionuklid Tritium im Ozean: Meßverfahren und Verteilung von Tritium im Südatlantik und im Weddellmeer“, von Jürgen Sültenfuß.
- Heft Nr. 257/1998** – „Untersuchungen der Saisonalität von atmosphärischem Dimethylsulfid in der Arktis und Antarktis“, von Christoph Kleefeld.
- Heft Nr. 258/1998** – „Bellingshausen- und Amundsenmeer: Entwicklung eines Sedimentationsmodells“, von Frank-Oliver Nitsche.
- Heft Nr. 259/1998** – "The Expedition ANTARKTIS-XIV/4 of RV 'Polarstern' in 1997", by Dieter K. Fütterer.
- Heft Nr. 260/1998** – „Die Diatomeen der Laptevsee (Arktischer Ozean): Taxonomie und biogeographische Verbreitung“, von Holger Cremer
- Heft Nr. 261/1998** – „Die Krustenstruktur und Sedimentdecke des Eurasischen Beckens, Arktischer Ozean: Resultate aus seismischen und gravimetrischen Untersuchungen“, von Estella Weigelt.
- Heft Nr. 262/1998** – "The Expedition ARKTIS-XIII/3 of RV 'Polarstern' in 1997", by Gunther Krause.
- Heft Nr. 263/1998** – „Thermo-tektonische Entwicklung von Oates Land und der Shackleton Range (Antarktis) basierend auf Spaltspuranalysen“, von Thorsten Schäfer.
- Heft Nr. 264/1998** – „Messungen der stratosphärischen Spurengase ClO, HCl, O₃, N₂O, H₂O und OH mittels flugzeuggetragener Submillimeterwellen-Radiometrie“, von Joachim Urban.
- Heft Nr. 265/1998** – „Untersuchungen zu Massenhaushalt und Dynamik des Ronne Ice Shelves, Antarktis“, von Astrid Lambrecht.
- Heft Nr. 266/1998** – "Scientific Cruise Report of the Kara Sea Expedition of RV 'Akademic Boris Petrov' in 1997", edited by Jens Matthiessen and Oleg Stepanets.
- Heft Nr. 267/1998** – „Die Expedition ANTARKTIS-XIV mit FS ‚Polarstern‘ 1997. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XIV/3“, herausgegeben von Wilfried Jokat und Hans Oerter.
- Heft Nr. 268/1998** – „Numerische Modellierung der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Meereis in der arktischen Eisrandzone“, von Gerit Birnbaum.
- Heft Nr. 269/1998** – "Katabatic wind and Boundary Layer Front Experiment around Greenland (KABEG '97)", by Günther Heinemann.
- Heft Nr. 270/1998** – "Architecture and evolution of the continental crust of East Greenland from integrated geophysical studies", by Vera Schilindwein.
- Heft Nr. 271/1998** – "Winter Expedition to the Southwestern Kara Sea - Investigations on Formation and Transport of Turbid Sea-Ice", by Dirk Dethleff, Per Loewe, Dominik Weiel, Hartmut Nies, Gesa Kuhlmann, Christian Bahe and Gennady Tarasov.
- Heft Nr. 272/1998** – „FTIR-Emissionsspektroskopische Untersuchungen der arktischen Atmosphäre“, von Edo Becker.
- Heft Nr. 273/1998** – „Sedimentation und Tektonik im Gebiet des Agulhas Rückens und des Agulhas Plateaus („SETA-RAP“)“, von Gabriele Uenzelmann-Neben.
- Heft Nr. 274/1998** – "The Expedition ANTARKTIS XIV/2", by Gerhard Kattner.
- Heft Nr. 275/1998** – „Die Auswirkung der 'NorthEastWater'-Polynya auf die Sedimentation von NO-Grönland und Untersuchungen zur Paläo-Ozeanographie seit dem Mittelweichsel“, von Hanne Notholt.
- Heft Nr. 276/1998** – „Interpretation und Analyse von Potentialfelddaten im Weddellmeer, Antarktis: der Zerfall des Superkontinents Gondwana“, von Michael Studinger.
- Heft Nr. 277/1998** – „Koordiniertes Programm Antarktisforschung“. Berichtskolloquium im Rahmen des Koordinierten Programms „Antarktisforschung mit vergleichenden Untersuchungen in arktischen Eisgebieten“, herausgegeben von Hubert Miller.
- Heft Nr. 278/1998** – „Messung stratosphärischer Spurengase über Ny-Ålesund, Spitzbergen, mit Hilfe eines bodengebundenen Mikrowellen-Radiometers“, von Uwe Raffalski.
- Heft Nr. 279/1998** – "Arctic Paleo-River Discharge (APARD). A New Research Programme of the Arctic Ocean Science Board (AOSB)", edited by Ruediger Stein.
- Heft Nr. 280/1998** – „Fernerkundungs- und GIS-Studien in Nordostgrönland“ von Friedrich Jung-Rothenhäusler.
- Heft Nr. 281/1998** – „Rekonstruktion der Oberflächenwassermassen der östlichen Laptevsee im Holozän anhand von aquatischen Palynomorphen“, von Martina Kunz-Pirrung.
- Heft Nr. 282/1998** – "Scavenging of ²³¹Pa and ²³⁰Th in the South Atlantic: Implications for the use of the ²³¹Pa/²³⁰Th ratio as a paleoproductivity proxy", by Hans-Jürgen Walter.
- Heft Nr. 283/1998** – „Sedimente im arktischen Meereis - Eintrag, Charakterisierung und Quantifizierung“, von Frank Lindemann.
- Heft Nr. 284/1998** – „Langzeitanalyse der antarktischen Meereisbedeckung aus passiven Mikrowellendaten“, von Christian H. Thomas.
- Heft Nr. 285/1998** – „Mechanismen und Grenzen der Temperaturanpassung beim Pierwurm *Arenicola marina* (L.)“, von Angela Sommer.
- Heft Nr. 286/1998** – „Energieumsätze benthischer Filtrierer der Potter Cove (King George Island, Antarktis)“, von Jens Kowalke.
- Heft Nr. 287/1998** – "Scientific Cooperation in the Russian Arctic: Research from the Barents Sea up to the Laptev Sea", edited by Eike Rachor.

- Heft Nr. 288/1998** – „Alfred Wegener. Kommentiertes Verzeichnis der schriftlichen Dokumente seines Lebens und Wirkens“, von Ulrich Wutzke.
- Heft Nr. 289/1998** – „Retrieval of Atmospheric Water Vapor Content in Polar Regions Using Spaceborne Microwave Radiometry“, by Jungang Miao.
- Heft Nr. 290/1998** – „Strukturelle Entwicklung und Petrogenese des nördlichen Kristallingürtels der Shackleton Range, Antarktis: Proterozoische und Ross-orogene Krustendynamik am Rand des Ostantarktischen Kratons“, von Axel Brommer.
- Heft Nr. 291/1998** – „Dynamik des arktischen Meereises - Validierung verschiedener Rheologieansätze für die Anwendung in Klimamodellen“, von Martin Kreyscher.
- Heft Nr. 292/1998** – „Anthropogene organische Spurenstoffe im Arktischen Ozean, Untersuchungen chlorierter Biphenyle und Pestizide in der Laptevsee, technische und methodische Entwicklungen zur Probenahme in der Arktis und zur Spurenstoffanalyse“, von Sven Utschakowski.
- Heft Nr. 293/1998** – „Rekonstruktion der spätquartären Klima- und Umweltgeschichte der Schirmacher Oase und des Wohlthat Massivs (Ostantarktika)“, von Markus Julius Schwab.
- Heft Nr. 294/1998** – „Besiedlungsmuster der benthischen Makrofauna auf dem ostgrönländischen Kontinentalhang“, von Klaus Schnack.
- Heft Nr. 295/1998** – „Gehäuseuntersuchungen an planktischen Foraminiferen hoher Breiten: Hinweise auf Umweltveränderungen während der letzten 140.000 Jahre“, von Harald Hommers.
- Heft Nr. 296/1998** – „Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XIII/1 of RV 'Polarstern' in 1997“, edited by Michael Spindler, Wilhelm Hagen and Dorothea Stübing.
- Heft Nr. 297/1998** – „Radiometrische Messungen im arktischen Ozean - Vergleich von Theorie und Experiment“, von Klaus-Peter Johnsen.
- Heft Nr. 298/1998** – „Patterns and Controls of CO₂ Fluxes in Wet Tundra Types of the Taimyr Peninsula, Siberia - the Contribution of Soils and Mosses“, by Martin Sommerkorn.
- Heft Nr. 299/1998** – „The Potter Cove coastal ecosystem, Antarctica. Synopsis of research performed within the frame of the Argentinian-German Cooperation at the Dallmann Laboratory and Jubany Station (Kind George Island, Antarctica, 1991 - 1997)“, by Christian Wiencke, Gustavo Ferreyra, Wolf Arntz & Carlos Rinaldi.
- Heft Nr. 300/1999** – „The Kara Sea Expedition of RV 'Akademik Boris Petrov' 1997: First Results of a Joint Russian-German Pilot Study“, edited by Jens Matthiessen, Oleg V. Stepanets, Ruediger Stein, Dieter K. Fütterer, and Eric M. Galimov.
- Heft Nr. 301/1999** – „The Expedition ANTARKTIS XV/3 (EASIZ II)“, edited by Wolf E. Arntz and Julian Gutt.
- Heft Nr. 302/1999** – „Sterole im herbstlichen Weddellmeer (Antarktis): Großräumige Verteilung, Vorkommen und Umsatz“, von Anneke Mühlebach.
- Heft Nr. 303/1999** – „Polare stratosphärische Wolken: Lidar-Beobachtungen, Charakterisierung von Entstehung und Entwicklung“, von Jens Biele.
- Heft Nr. 304/1999** – „Spätquartäre Paläoumweltbedingungen am nördlichen Kontinentalrand der Barents- und Kara-See. Eine Multi-Parameter-Analyse“, von Jochen Knies.
- Heft Nr. 305/1999** – „Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study (ARTIST)“, by Jörg Hartmann, Frank Albers, Stefania Argenti, Axel Bocher, Ubaldo Bonafé, Wolfgang Cohrs, Alessandro Conidi, Dietmar Freese, Teodoro Georgiadis, Alessandro Ippoliti, Lars Kaleschke, Christof Lüpkes, Uwe Maixner, Gianluigi Mastrantonio, Fabrizio Ravegnani, Andreas Reuter, Giuliano Trivellone and Angelo Viola.
- Heft Nr. 306/1999** – „German-Russian Cooperation: Biogeographic and biostratigraphic investigations on selected sediment cores from the Eurasian continental margin and marginal seas to analyze the Late Quaternary climatic variability“, edited by Robert R. Spielhagen, Max S. Barash, Gennady I. Ivanov, and Jörn Thiede.
- Heft Nr. 307/1999** – „Struktur und Kohlenstoffbedarf des Makrobenthos am Kontinentalhang Ostgrönlands“, von Dan Sæller.
- Heft Nr. 308/1999** – „ARCTIC '98: The Expedition ARK-XIV/1a of RV 'Polarstern' in 1998“, edited by Wilfried Jokat.
- Heft Nr. 309/1999** – „Variabilität der arktischen Ozonschicht: Analyse und Interpretation bodengebundener Millimeterwellenmessungen“, von Björn-Martin Sinnhuber.
- Heft Nr. 310/1999** – „Rekonstruktion von Meereisdrift und terrigenem Sedimenteintrag im Spätquartär: Schwermineralassoziationen in Sedimenten des Laptev-See-Kontinentalrandes und des zentralen Arktischen Ozeans“, von Marion Behrends.
- Heft Nr. 311/1999** – „Parameterisierung atmosphärischer Grenzschichtprozesse in einem regionalen Klimamodell der Arktis“, von Christoph Abegg.
- Heft Nr. 312/1999** – „Solare und terrestrische Strahlungswechselwirkung zwischen arktischen Eisflächen und Wolken“, von Dietmar Freese.
- Heft Nr. 313/1999** – „Snow accumulation on Ekströmsen, Antarctica“, by Elisabeth Schlosser, Hans Oerter and Wolfgang Graf.
- Heft Nr. 314/1999** – „Die Expedition ANTARKTIS XVI/4 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1998“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach.
- Heft Nr. 315/1999** – „Expeditions in Siberia in 1998“, edited by Volker Rachold.
- Heft Nr. 316/1999** – „Die postglaziale Sedimentationsgeschichte der Laptevsee: schwermineralogische und sedimentpetrographische Untersuchungen“, von Bernhard Peregovich.
- Heft-Nr. 317/1999** – „Adaption an niedrige Temperaturen: Lipide in Eisdiatomeen“, von Heidi Lehmal.
- Heft-Nr. 318/1999** – „Effiziente parallele Lösungsverfahren für elliptische partielle Differentialgleichungen in der numerischen Ozeanmodellierung“, von Natalja Rakowsky.

- Heft-Nr. 319/1999** – „The Ecology of Arctic Deep-Sea Copepods (Euchaetidae and Aetideidae). Aspects of their Distribution, Trophodynamics and Effect on the Carbon Flux“, by Holger Auel.
- Heft-Nr. 320/1999** – „Modellstudien zur arktischen stratosphärischen Chemie im Vergleich mit Meßdaten“, von Veronika Eyring.
- Heft-Nr. 321/1999** – „Analyse der optischen Eigenschaften des arktischen Aerosols“, von Dagmar Nagel.
- Heft-Nr. 322/1999** – „Messungen des arktischen stratosphärischen Ozons: Vergleich der Ozonmessungen in Ny-Ålesund, Spitzbergen, 1997 und 1998“, von Jens Langer
- Heft-Nr. 323/1999** – „Untersuchung struktureller Elemente des südöstlichen Weddellmeeres / Antarktis auf der Basis mariner Potentialfelddaten“, von Uwe F. Meyer.
- Heft-Nr. 324/1999** – „Geochemische Verwitterungstrends eines basaltischen Ausgangsgesteins nach dem spätpleistozänen Gletscherrückzug auf der Taimyrhalbinsel (Zentralsibirien) - Rekonstruktion an einer sedimentären Abfolge des Lama Sees“, von Stefanie K. Harwart.
- Heft-Nr. 325/1999** – „Untersuchungen zur Hydrologie des arktischen Meereises - Konsequenzen für den kleinskaligen Stofftransport“, von Johannes Freitag.
- Heft-Nr. 326/1999** – „Die Expedition ANTARKTIS XIV/2 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1998“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach.
- Heft-Nr. 327/1999** – „Gemeinschaftsanalytische Untersuchungen der Harpacticoidenfauna der Magellanregion, sowie erste similaritätsanalytische Vergleiche mit Assoziationen aus der Antarktis“, von Kai Horst George.
- Heft-Nr. 328/1999** – „Rekonstruktion der Paläo-Umweltbedingungen am Laptev-See-Kontinentalrand während der beiden letzten Glazial/Interglazial-Zyklen anhand sedimentologischer und mineralogischer Untersuchungen“, von Claudia Müller.
- Heft-Nr. 329/1999** – „Räumliche und zeitliche Variationen atmosphärischer Spurengase aus bodengebundenen Messungen mit Hilfe eines Michelson Interferometers“, von Justus Notholt.
- Heft-Nr. 330/1999** – „The 1998 Danish-German Excursion to Disko Island, West Greenland“, edited by Angelika Brandt, Helge A. Thomsen, Henning Heide-Jørgensen, Reinhardt M. Kristensen and Hilke Ruhberg.
- Heft-Nr. 331/1999** – „Poseidon“ Cruise No. 243 (Reykjavik - Greenland - Reykjavik, 24 August - 11 September 1998): Climate change and the Viking-age fjord environment of the Eastern Settlement, sw Greenland“, by Gerd Hoffmann, Antoon Kuijpers, and Jörn Thiede.
- Heft-Nr. 332/1999** – „Modeling of marine biogeochemical cycles with an emphasis on vertical particle fluxes“, by Regina Usbeck.
- Heft-Nr. 333/1999** – „Die Tanaidaceenfauna des Beagle-Kanals und ihre Beziehungen zur Fauna des antarktischen Festlandssockels“, von Anja Schmidt.
- Heft-Nr. 334/1999** – „D-Aminosäuren als Tracer für biogeochemische Prozesse im Fluß-Scheff-Ozean-System der Arktis“, von Hans Peter Filzner.
- Heft-Nr. 335/1999** – „Ökophysiologische Ursachen der limitierten Verbreitung repanter decapoder Krebse in der Antarktis“, von Markus Frederich.
- Heft-Nr. 336/1999** – „Ergebnisse der Untersuchung des grönländischen Inlandeises mit dem elektromagnetischen Reflexionsverfahren in der Umgebung von NGRIP“, von Fidan Göktas.
- Heft-Nr. 337/1999** – „Paleozoic and mesozoic tectono-thermal history of central Dronning Maud Land, East Antarctica, – evidence from fission-track thermochronology“, by Stefanie Meier.
- Heft-Nr. 338/1999** – „Probleme hoher Stoffwechselraten bei Cephalopoden aus verschiedenen geographischen Breiten“, von Susanne Zielinski.
- Heft-Nr. 339/1999** – „The Expedition ARKTIS XV/1“, edited by Gunther Krause.
- Heft-Nr. 340/1999** – „Microbial Properties and Habitats of Permafrost Soils on Taimyr Peninsula, Central Siberia“, by Nicolé Schmidt.
- Heft-Nr. 341/1999** – „Photoacclimation of phytoplankton in different biogeochemical provinces of the Southern Ocean and its significance for estimating primary production“, by Astrid Bracher.
- Heft-Nr. 342/1999** – „Modern and Late Quaternary Depositional Environment of the St. Anna Trough Area, Northern Kara Sea“, edited by Ruediger Stein, Kirsten Fahl, Gennadij I. Ivanov, Michael A. Levitan, and Gennady Tarasov.
- Heft-Nr. 343/1999** – „ESF-IMPACT Workshop/Oceanic impacts: mechanisms and environmental perturbations, 15 - 17 April 1999 in Bremerhaven“, edited by Rainer Gersonde and Alexander Deutsch.
- Heft-Nr. 344/1999** – „Die Klimageschichte der hohen nördlichen Breiten seit dem mittleren Miozän: Hinweise aus sedimentologischen-tonmineralogischen Analysen (OPD Leg 151, zentrale Framstraße)“, von Amelie Winkler.
- Heft-Nr. 345/1999** – „Kurzfristige Klimaschwankungen im Scotiameer und Ergebnisse zur Kalbungsgeschichte der Antarktis während der letzten 200 000 Jahre“, von Annette Hofmann.
- Heft-Nr. 346/2000** – „Glazialmarine Sedimentationsentwicklung am westantarktischen Kontinentalrand im Amundsen- und Bellingshausenmeer - Hinweise auf Paläumweltveränderungen während der quartären Klimazyklen“, von Claus-Dieter Hillenbrand
- Heft-Nr. 347/2000** – „Zur Ökologie des Phytoplanktons im arktischen Laptevmeer - ein jahreszeitlicher Vergleich“, von Kirsten Tuschling.
- Heft-Nr. 348/2000** – „Untersuchungen zum Fettstoffwechsel des Südlichen See-Elefanten (*Mirounga leonina* L.) in der Antarktis“, von Sven Ramdohr.
- Heft-Nr. 349/2000** – „Licht- und Temperatureinfluß auf den enzymatischen Oxidationsschutz der antarktischen Eisdiatomee *Entomoneis kufferathii* Manguin“, von Raimund Schriek.

- Heft-Nr. 350/2000** – „Die Expedition ARKTIS XV/3 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1999“
herausgegeben von Ursula Schauer.
- Heft-Nr. 351/2000** – „Dissolution kinetics of biogenic silica in marine environments“, by Dirk Rickert.
- Heft-Nr. 352/2000** – „Geometrie und Kinematik des tertiären Deckenbaus im West Spitzbergen Falten- und Überschiebungsgürtel, Brøggerhalvøya, Svalbard“, von Kerstin Saalman.
- Heft-Nr. 353/2000** – „Zur Ökologie der Benthos-Foraminiferen der Potter Cove (King George Island, Antarktis)“,
von Michaela Mayer.
- Heft-Nr. 354/2000** – „Expeditions in Siberia in 1999“, edited by Volker Rachold.
- Heft-Nr. 355/2000** – „Temperaturrekonstruktion im Tropischen Atlantik für das Letzte Glaziale Maximum:
CLIMAP neu betrachtet.“, von Carsten Porthun.
- Heft-Nr. 356/2000** – „Niederfrequente Variabilität großräumiger atmosphärischer Zirkulationsstrukturen in spektralen
Modellen niedriger Ordnung“, von Antje Weisheimer.
- Heft-Nr. 357/2000** – „Late Quaternary paleoclimatic reconstructions along the Eurasian continental margin“,
by Hans Peter Kleiber.
- Heft-Nr. 358/2000** – „Holocene environmental history of East Greenland - evidence from lake sediments“,
by Bernd Wagner.
- Heft-Nr. 359/2000** – „Scientific Cooperation in the Russian Arctic: Ecology of the White Sea with Emphasis on its
Deep Basin“, edited by Eike Rachor.
- Heft-Nr. 360/2000** – „Scientific Cruise Report of the Joint Russian-German Kara-Sea Expedition of RV 'Akademik Boris Petrov'
in 1999“, edited by Ruediger Stein and Oleg Stepanets.
- Heft-Nr. 361/2000** – „Planktic foraminifer ecology and stable isotope geochemistry in the Arctic Ocean: implications from
water column and sediment surface studies for quantitative reconstructions of oceanic parameters“ by Renate Volkman.
- Heft-Nr. 362/2000** – „Eisbohrkernuntersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität von Temperatur und
Niederschlagsrate im Spätholozän in Nordgrönland“, von Matthias Schwager.
- Heft-Nr. 363/2000** – „Benthische Peracarida (Crustacea, Malacostraca) des arktischen Mellemfjordes, West-Grönland“,
von Anne-Nina Lörz.
- Heft-Nr. 364/2000** – Die Expeditionen ANTARKTIS XVI / 3-4 des Forschungsschiffes „POLARSTERN“ 1999,
herausgegeben von Ulrich Bathmann, Victor Smetacek und Manfred Reinke.
- Heft-Nr. 365/2000** – „Organic carbon in Late Quaternary sediments: Responses to paleoenvironmental changes in the
Laptev and Kara seas (Arctic Ocean)“, by Bettina Boucsein.
- Heft-Nr. 366/2000** – „Flugzeuggestützte Topographie- und Schweremessung: Meßsystem und Anwendung auf die Region
Framstraße, Spitzbergen und Nordostgrönland“, von Tobias Boebel.
- Heft-Nr. 367/2000** – „Messung dielektrischer Eigenschaften polarer Eiskerne“, von Frank Wilhelms.
- Heft-Nr. 368/2000** – „The Expedition ARKTIS-XV/2 of RV 'Polarstern' in 1999“, edited by Wilfried Jokat.
- Heft-Nr. 369/2000** – „Interpretation seismischer und gravimetrischer Daten des Weddellmeeres, Antarktis“,
von Johannes Rogenhagen.
- Heft-Nr. 370/2000** – „Struktureigenschaften und Nahrungsbedarf der Zoobenthosgemeinschaften im Bereich des
Lomonossowrückens im Arktischen Ozean“, von Hendrik Deubel.
- Heft-Nr. 371/2000** – „Die Rolle der Schneebedeckung für die Kryptogamen-Vegetation in der maritimen Antarktis
(Potter-Halbinsel, King George Island)“, von Jana Barbro Winkler.
- Heft-Nr. 372/2000** – „Biodiversity of the Weddell Sea: macrozoobenthic species (demersal fish included) sampled during the
expedition ANT XIII/3 (EASIZ I) with RV 'Polarstern“, edited by Julian Gutt, Boris I. Sirenko, Wolf E. Arntz, Igor S. Smirnov,
and Claude De Broyer.
- Heft-Nr. 373/2000** – „Benthische Foraminiferen im Boreas-Becken, Grönlandsee: Verbreitung und paläo-ozeanographische
Rekonstruktionen für die letzten 450.000 Jahre“, von Sabine Magnus.
- Heft-Nr. 374/2000** – „Scherwellendoppelbrechungsanalyse von Registrierungen der Stationen des seismologischen
Netzwerkes an der Neumayer Station, Antarktis: Seismische Anisotropie und die tektonische Entwicklung des
Kontinentalrandes Queen Maud Lands“, von Christian Müller.

* vergiffen/out of print.

** nur noch beim Autor/only from the author.