

Kapitel 6

Ergebnisse der *SKS*-Polarisationsanalyse

Während *Receiver Funktionen* insbesondere geeignet sind, um Tiefenlagen und Geschwindigkeitskontraste von Grenzflächen zu bestimmen, lassen sich durch Untersuchung der Polarisationsseigenschaften von *SKS*- und *SKKS*- Phasen anisotrope Volumina auffinden und charakterisieren. Ich belege zunächst kurz die Qualität der Daten und die großräumige Existenz von Anisotropie unterhalb der TRANSALP- Linie und konzentriere mich dann auf die Auswertung mithilfe des sogenannten *Multichannelverfahrens* (Chevrot [2000]) und die Interpretation der Resultate.

Im Vergleich zu den in die *RF*- Analyse eingehenden *P*- Wellen sind die *SKS*- Signale im allgemeinen langperiodisch mit dominanten Perioden von mehreren Sekunden. Da im TRANSALP- Netz neben wenigen mit Breitbandseismometer besetzten Stationen vorrangig kurzperiodische Sensoren (Eigenfrequenz 1 Hz) eingesetzt wurden, ist die nachträgliche Restitution der tiefen Frequenzen für die *SKS*- Analyse von noch größerer Bedeutung. Abb. 6.2 verdeutlicht an einem Beispiel, daß die restituierten kurzperiodischen und anschließend bei 12 s hochpaßgefilterten Seismogramme mit den breitbandigen *STS2*- Registrierungen gut übereinstimmen. Abhängig von Signalform und Qualität ist z.T. auch eine korrekte Rekonstruktion bis 20 s möglich, noch längere Perioden sind aber problematisch. Es ist also legitim anzunehmen, daß die im folgenden beschriebene Verwendung der kurzperiodischen Daten bis 12 s keinen nachteiligen Einfluß auf die Ergebnisse hat.

Einen deutlichen Hinweis auf Anisotropie im Untersuchungsgebiet liefert die Seismogrammontage eines *SKS*- Ereignisses, das an über 60 TRANSALP- Stationen aufgezeich-

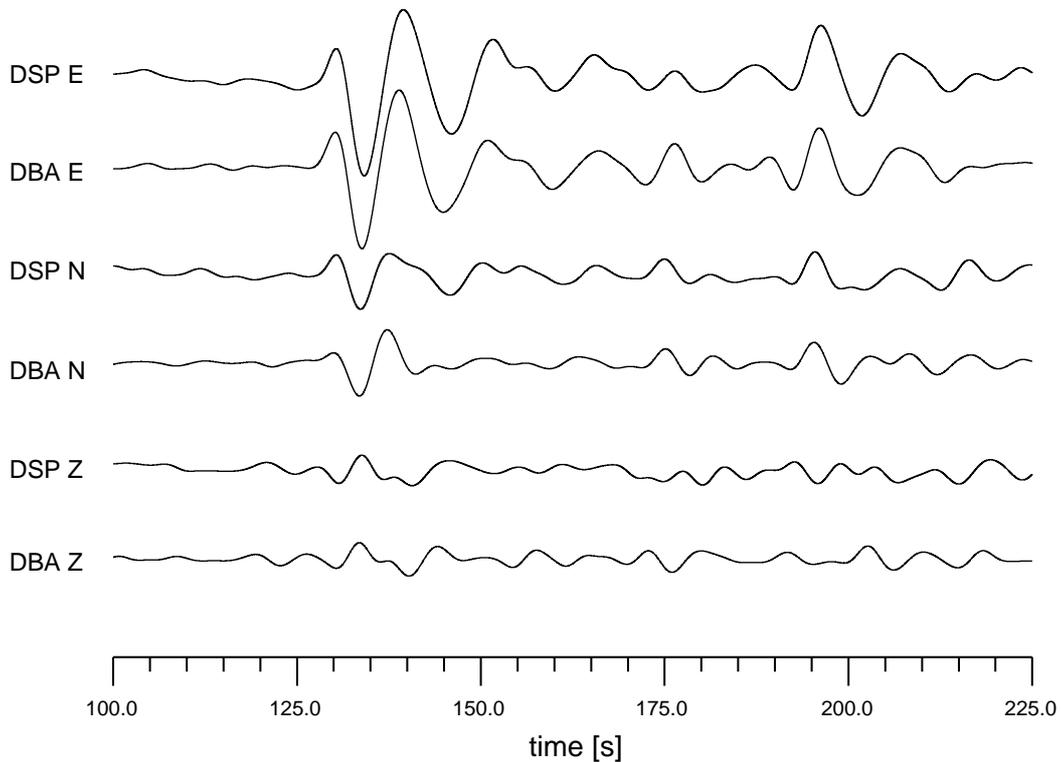


Abbildung 6.1: Vergleich der drei Komponenten einer Breitbandregistrierung (*DBA*) und eines restituierten kurzperiodischen Seismogrammes (*DSP*) im Periodenbereich 5 – 12 s. Die beiden Empfänger liegen in einer N-S- Entfernung von unter 2 km, der E-W Abstand beträgt nur ca. 12 km, so daß Unterschiede der Signalform aufgrund der Untergrundstruktur vernachlässigbar sein sollten. Die Wellenformen der *SKS*- Phase stimmen tatsächlich gut überein und belegen damit die Restituierbarkeit der kurzperiodischen Daten.

net wurde (Abb. 6.2, gezeigt sind nur die Komponenten *R* und *T*, die in der Horizontalebene liegen). Die hohe Anzahl von > 60 Spuren resultiert aus dem glücklichen Umstand, daß das Ereignis in die Registrierphase der aktiven seismischen Experimente fiel und daher zusätzliche Daten aus den Teilprojekten *TP4* und *TP5* zur Verfügung stehen. Die Amplitude auf den transversalen Komponenten ist signifikant von null verschieden. Die Summenspur entspricht, bis auf einen Skalierungsfaktor, nahezu der zeitlichen Ableitung der mittleren radialen Spur. Genau diese Beziehung wurde in Gl. 4.8 für eine anisotrope Schicht mit horizontaler Symmetrieachse hergeleitet. Die Wellenform ist auf der gesamten Länge des Profils sehr konsistent (im dargestellten Periodenbereich 5 – 12 s), die Amplitude auf *T* nimmt nach Süden hin zu.

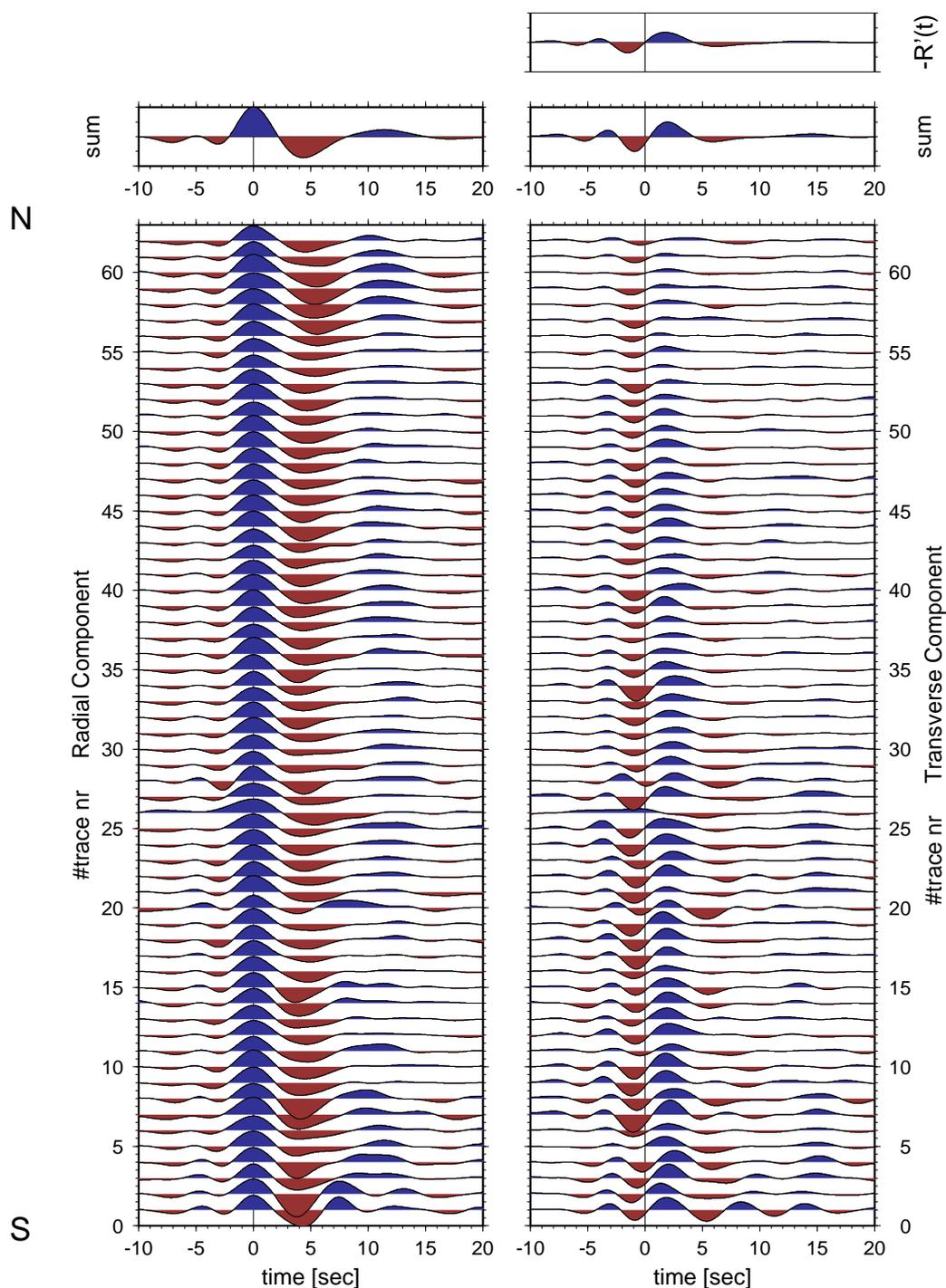


Abbildung 6.2: Radiale (R) und transversale (T) Komponenten im SKS - Zeitfenster für ein Ereignis vom 28. September 1998 (Backazimuth 88° , Entfernung 104°) nach Alinierung auf das erste positive Maximum und Bandpaßfiltern zwischen 5 und 12 Sekunden. Die Energie auf den T - Komponenten ist deutlich zu erkennen und in guter Näherung proportional zur zeitlichen Ableitung der R - Komponenten, im Einklang mit der theoretischen Vorhersage für einfache anisotrope Modelle und kleine $delay\ times\ \delta t$ im Vergleich zur dominanten Periode der SKS - Phase.

6.1 Einzelereignisanalyse

Ein Beispiel für die Bestimmung der *Splitting Parameter* aus der Einzelregistrierung einer *SKS*- Phase an einer TRANSALP- Station zeigt Abb. 6.3. Die horizontalen Komponenten *N* und *E* werden in das ebenfalls orthogonale *RT*- System rotiert. Die Rotation erfolgt hier wie auch später bei der Auswertung aller Ereignisse entsprechend dem theoretisch aus den Koordinaten berechneten Backazimuth zwischen Station und Beben. Wegen des Backazimuths von $\Delta \approx 88^\circ$, der nahezu östlicher Richtung entspricht, sind *R*- und *E*-Komponente in diesem Fall beinahe identisch. *T* ist gemäß der Richtungskonvention des Koordinatensystems ungefähr die gespiegelte *N*- Spur. Das Ereignis ist dasselbe wie in Abb. 6.2. Der Methode von Vinnik et al. [1992] folgend, werden für Paare $(\delta t, \phi)$ und die beobachteten radialen Komponenten die *T*- Wellenformen berechnet. Die Inkremente betragen hier 0.1 s für δt und 1° für ϕ im realistischen Parameterraum 0 – 3 s und 0 – 180° . Die beste Anpassung an das beobachtete *SKS*- Signal auf der *T*- Komponente ist hier für $\delta t = 1.4$ s und $\phi = 63^\circ$ gegeben. Das aus der radialen Wellenform berechnete *T*- Signal und das beobachtete stimmen gut überein (Abb. 6.3, oben). Die Fehlerabschätzung wird

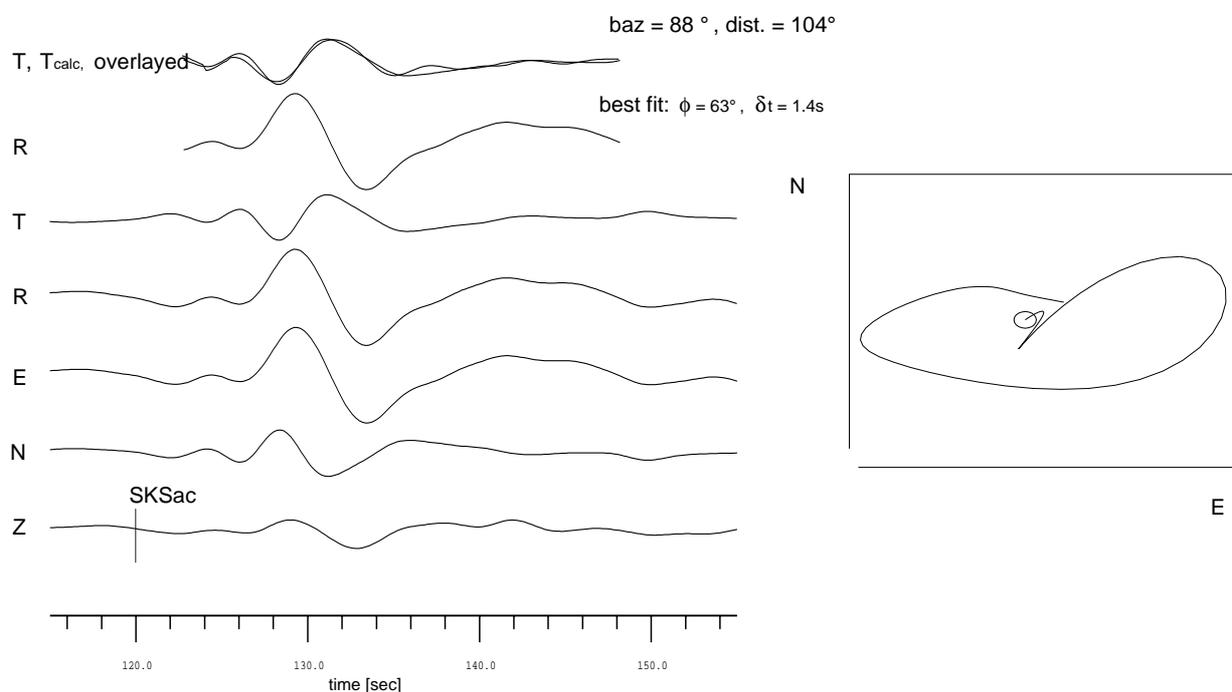


Abbildung 6.3: Veranschaulichung der *SKS*- Analyse für *ein* Ereignis und *eine* Station. Links: Gefiltertes Originalseismogramm (unten, mit den drei Komponenten *Z*, *N* und *E*), rotierte Horizontalkomponenten *R* und *T* (Mitte) und Überlagerung von gemessener und berechneter *T*- Komponente (oben). Rechts: Teilchenbewegung in der Horizontalebene für das *SKS*- Signal. Die theoretische Ankunftszeit der *SKS*- Phase ist markiert.

anhand des sogenannten *Konfidenzintervalles* vorgenommen. Der Fehler wird wie allgemein üblich bei 95% des Maximumwertes definiert. Hier ergeben sich als Fehler 0.3 s und 15° .

Die Teilchenbewegung in der Horizontalebene für das *SKS*- Fenster zwischen 120 und 140 s ist nahezu elliptisch, wobei die Hauptpolarisationsachse in etwa mit der E-W Richtung zusammenfällt (Abb. 6.3). Die Elliptizität ist ein weiteres gutes Indiz dafür, daß Anisotropie tatsächlich die Ursache der transversalen Energie ist (s. Seite 39).

6.2 *Multichannel Analysis*

Um mit der Einzelereignisanalyse verlässliche Werte für die *Splitting Parameter* zu erhalten, ist im allgemeinen eine hohe Signalqualität notwendig (Signalstörverhältnis > 8 , Restivo & Helffrich [1999]). Dies ist aber nur bei wenigen aufgezeichneten Ereignissen der Fall. Die Robustheit des *Multichannelverfahrens* erlaubt jedoch, zusätzliche Registrierungen mit schlechterem Signalstörverhältnis miteinzubeziehen (bis $S/N \approx 1$, Chevrot [2000]) und dadurch vor allem eine verbesserte azimuthale Abdeckung zu erzielen.

6.2.1 Datenbeispiel

Die Funktionsweise der *Multichannel Analysis* wird im folgenden am Beispiel der Station *AGW* erläutert (Abb. 6.4). Die 13 Originalseismogramme sind einheitlich im *SKS*- bzw. *SKKS*- Zeitfenster bandpaßgefiltert (Periodenbereich 5 – 12 s). Die radialen Komponenten sind durch Dekonvolution in Form eines breiten Pulses weitestgehend standardisiert und auf das Maximum aliniert. Die Fensterlänge wird dabei je nach Signallänge variabel gewählt. Sind sowohl *SKS*-, als auch *SKKS*- Phase deutlich sichtbar, umfaßt das Fenster beide Signale. Die transversalen Komponenten weisen eine systematische Änderung mit dem Backazimuth des *SKS Events* auf (Abb. 6.4, unten). Für einen großen Teil der Beben ist die Energie auf der *T*- Komponente minimal (Spuren 3 – 7 und 10 – 12). Die Ereignisse 1 und 2 haben große Amplituden und einen negativen Nulldurchgang auf *T*, während er bei den Spuren 8 und 9 positiv ist. Diese Beobachtungen werden im Diagramm in Abb. 6.4a, quantifiziert, wo die Amplitude von *T* als Funktion des Backazimuths entsprechend Gl. 4.8 aufgetragen ist. Die Datenpunkte entsprechen den Elementen des *Splitting Vectors* (s. Seite 40ff.). Die Daten lassen sich sehr gut durch eine Sinusfunktion der Periode π (d.h. die 2. Harmonische) anpassen. Aus Maximalamplitude und Phase des Sinusoids können δt und ϕ abgelesen werden, unter der Annahme einer anisotropen Schicht mit horizontaler Symmetrieachse (hier $\delta t = 1.3 \pm 0.1$ s, $\phi = 68 \pm 2^\circ$). Die Varianz der einzelnen Datenpunkte wird entsprechend Gl. 4.13 bestimmt, die mit den *Splitting Parameters* as-

soziierten Fehler werden durch das Konfidenzkriterium definiert (10 % Abweichung vom optimalen Wertepaar).

In die Bestimmung des Sinusoids geht der Datenpunkt bei 190° Backazimuth nicht ein. Er gehört zu einem Beben, das nach Abbau der Station *AGW* von einer benachbarten Station aufgezeichnet wurde. Der Punkt liegt in der azimuthalen Lücke zwischen 90° und 240° und ist mit der Sinusfunktion gut vereinbar.

Die Daten sind konsistent mit einem horizontalen 1-Schichtmodell. Eine Unterscheidung

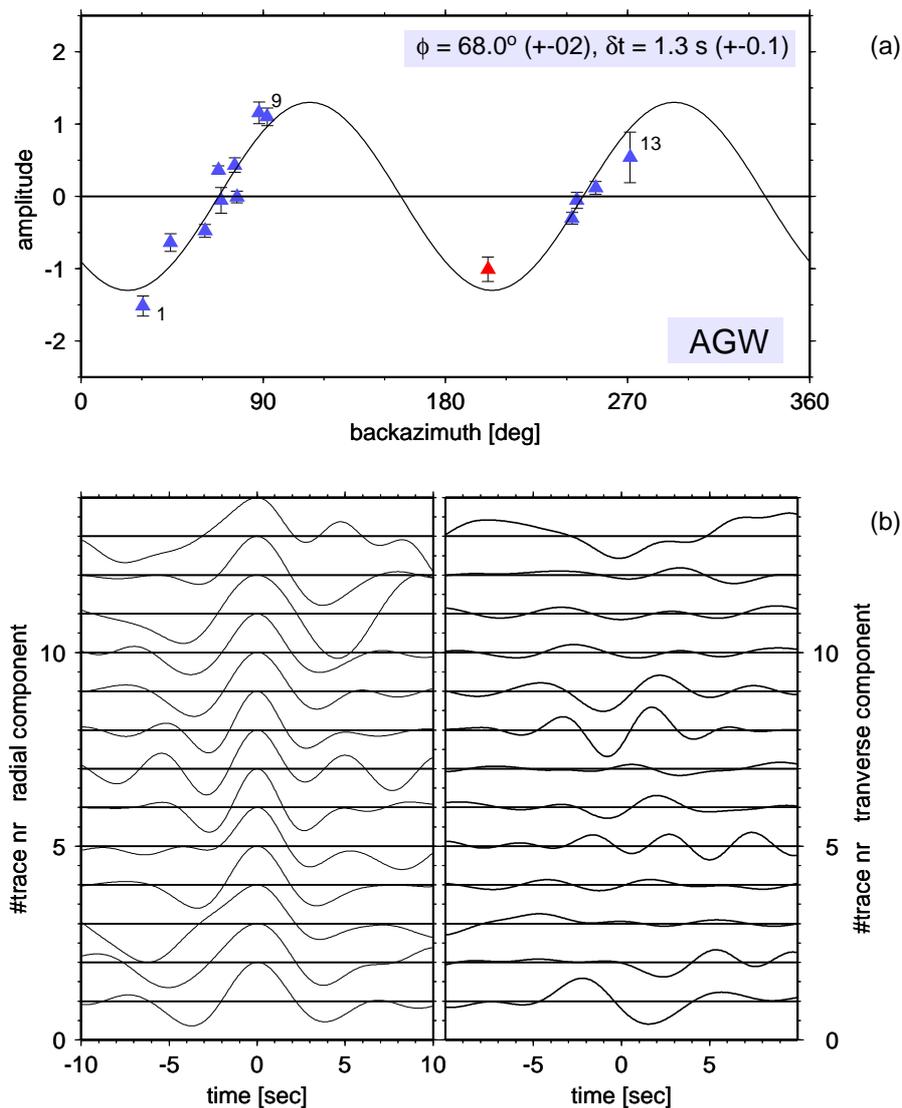


Abbildung 6.4: Ergebnisse des *Multichannelverfahrens* für die Station *AGW*. Bandpaßgefilterte (5 – 12 s) und normierte radiale Komponenten (links unten) und zugehörige transversale Spuren (rechts unten), sortiert nach dem Backazimuth. Die relative Amplitude des transversalen Signals als Funktion des Backazimuths und das *Best fit Sinusoid* (oben). Das rot markierte Ereignis bei 200° wurde nicht von der Station *AGW* aufgezeichnet, sondern von benachbarten Stationen im Tauernfenster (s. Text). Die Zahlen entsprechen den Spurnummern in der unteren Graphik.

von komplexeren Modellen (d.h. die Berücksichtigung weiterer azimuthaler Harmonischer in Abb. 6.4a), die die Meßdaten ebenso gut anpassen, wäre nur bei zusätzlichen Ereignissen aus den Azimuthbereichen $90^\circ - 240^\circ$ und $280^\circ - 30^\circ$ möglich.

Sehr gut ist der Nulldurchgang bei ca. 68° belegt, inklusive des Vorzeichenwechsels von negativer zu positiver Amplitude. Eine geringere Zahl von Ereignissen grenzt Nulldurchgang und Steigung der Sinusfunktion 180° versetzt bei ca. 250° ein.

6.2.2 Anwendung auf *alle* TRANSALP- Stationen

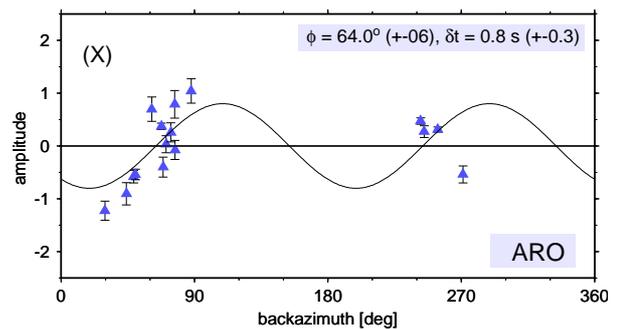
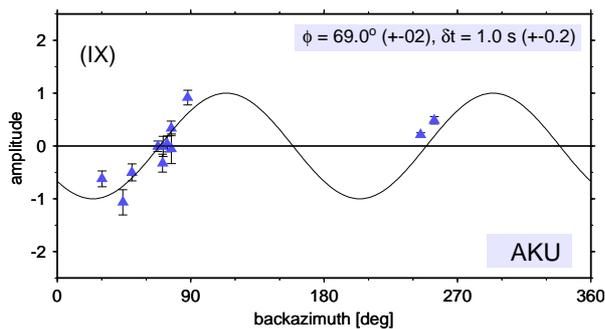
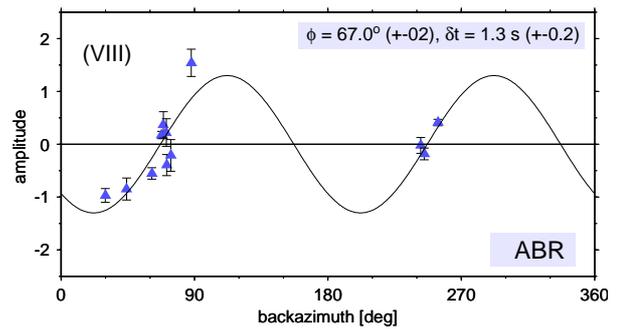
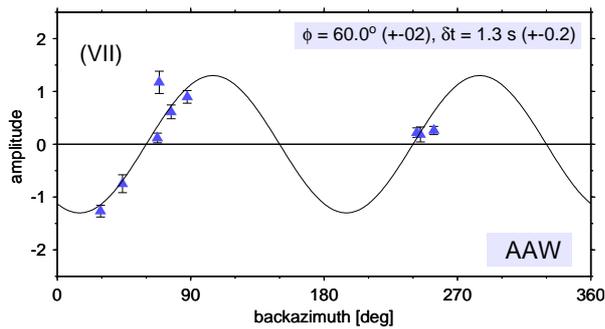
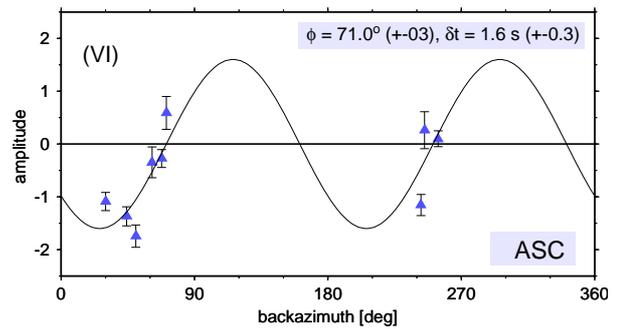
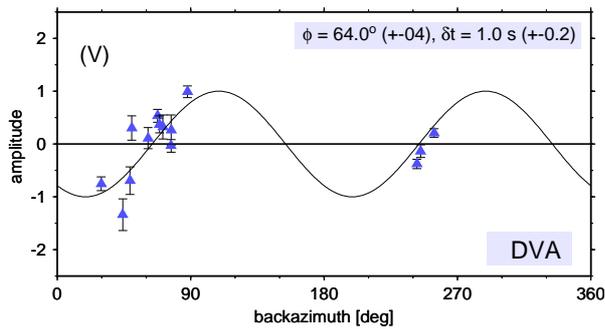
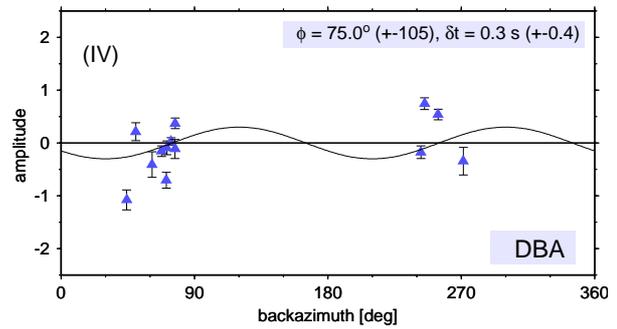
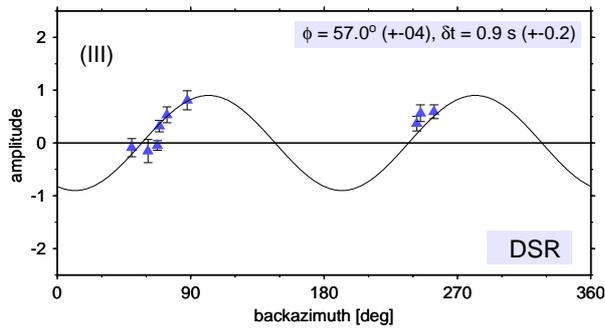
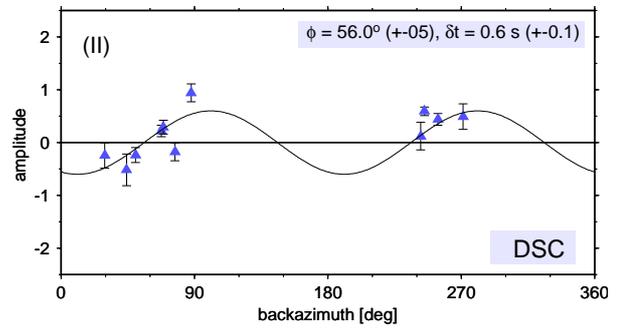
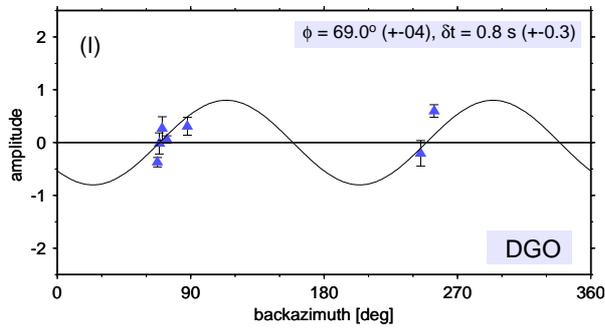
Die Methode führt zu umso stabileren Resultaten, je mehr Ereignisse simultan benutzt werden können. Die Abbildungen auf den folgenden Seiten berücksichtigen daher nur Stationen mit mehr als 4 aufgezeichneten und verwendbaren *SKS*- oder *SKKS*- Phasen. Eine Übersicht der Parameter aller verwendeten Ereignisse befindet sich auf Seite 122 im Anhang. Die Elemente des *Splitting Vectors* sind in Abb. 6.5 dargestellt, die Station sind dabei von Nord nach Süd angeordnet. Jeweils in der rechten oberen Ecke sind die ermittelten *Splitting Parameter* zusammen mit ihren Fehlern angegeben. Das Prozessieren erfolgt genau so wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, so daß u.a. das Periodenband für alle Ereignisse und Stationen dasselbe ist ($5 - 12$ s). Aus den in Kapitel 3 genannten Gründen ist die Anzahl der registrierten *SKS*- Phasen pro Station im südlichen Teil des Netzes geringer. Abb. 6.6 dokumentiert die räumliche Verteilung von δt und ϕ .

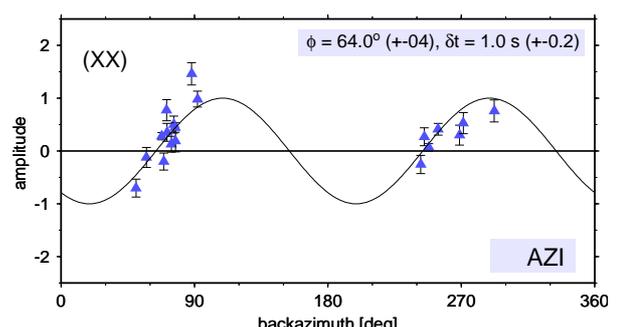
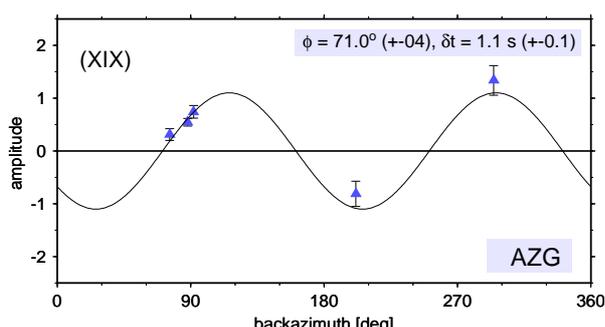
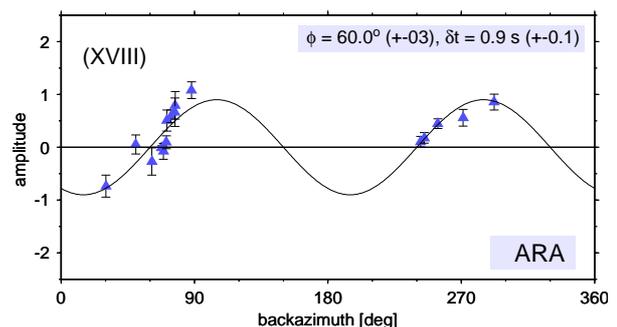
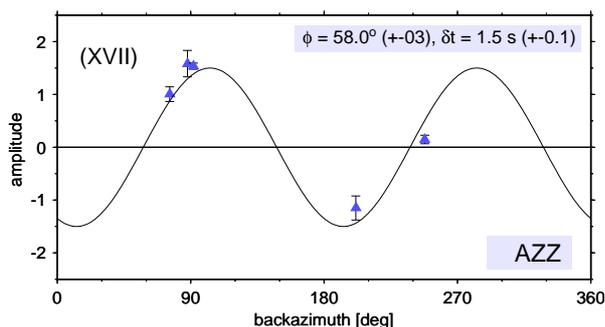
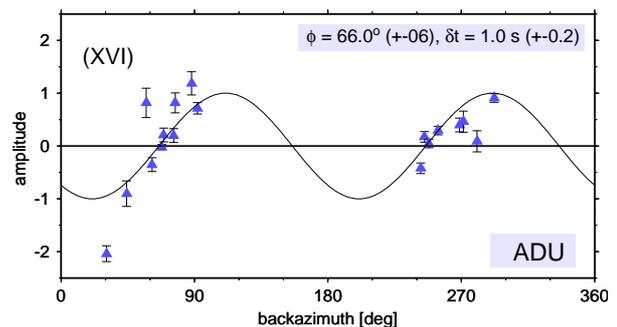
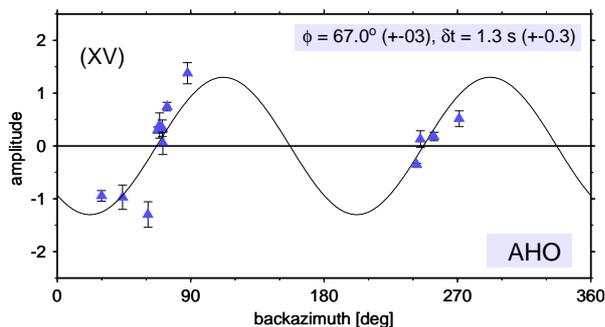
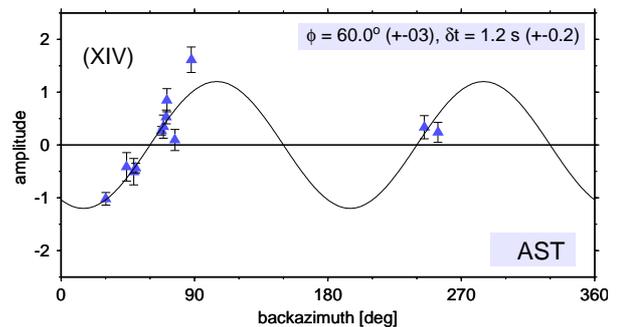
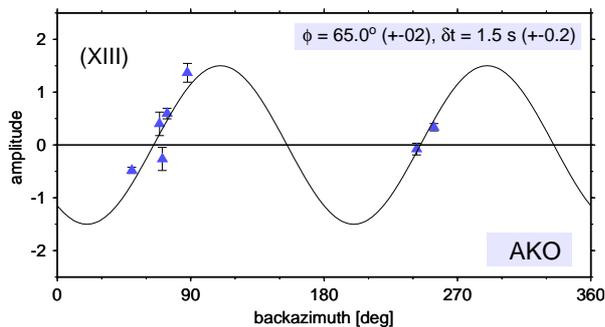
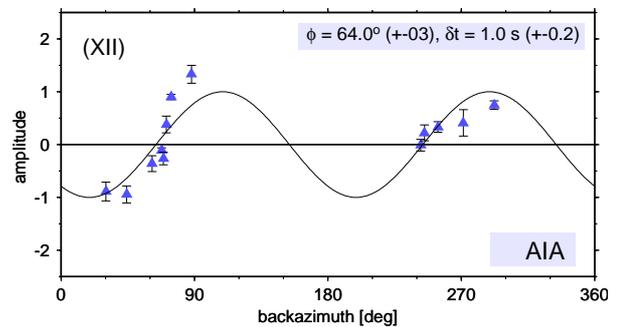
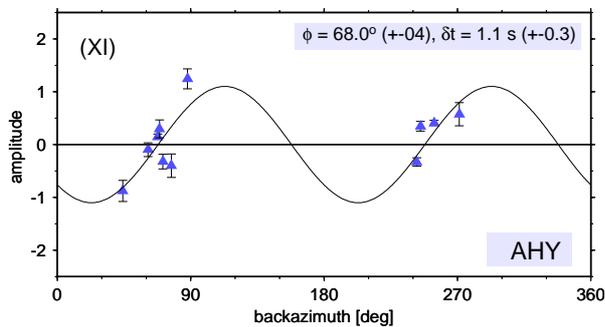
Die beiden wichtigsten Erkenntnisse aus den Abbildungen 6.5 bis 6.6 lassen sich so zusammenfassen:

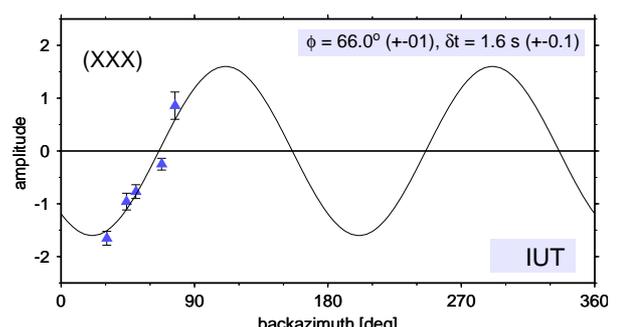
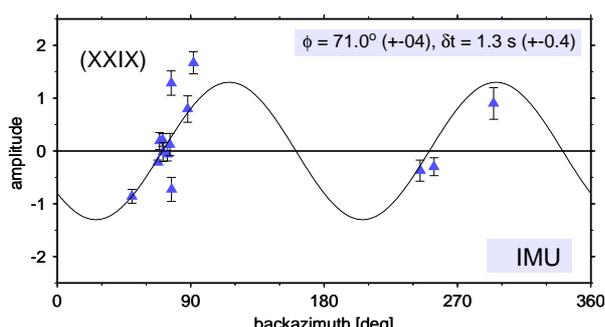
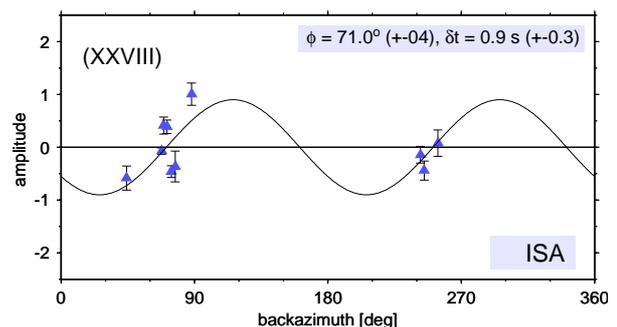
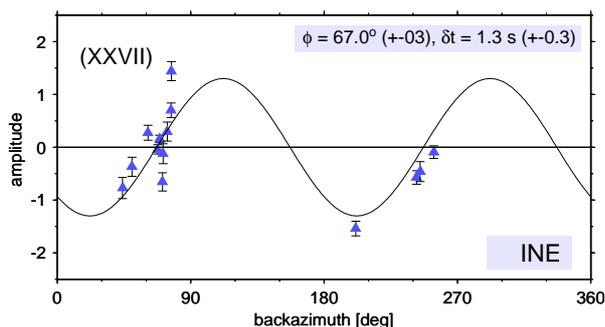
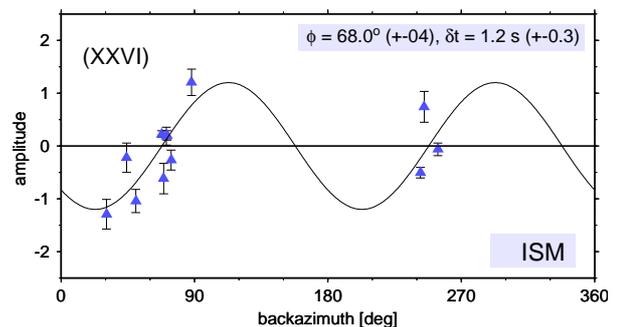
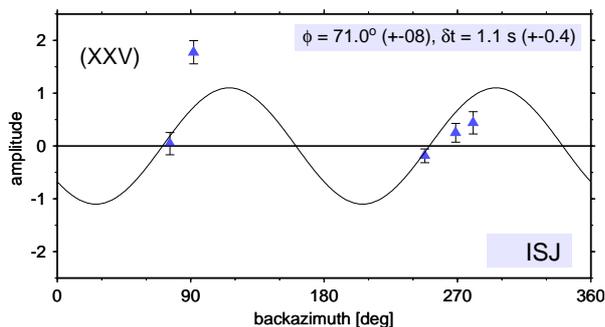
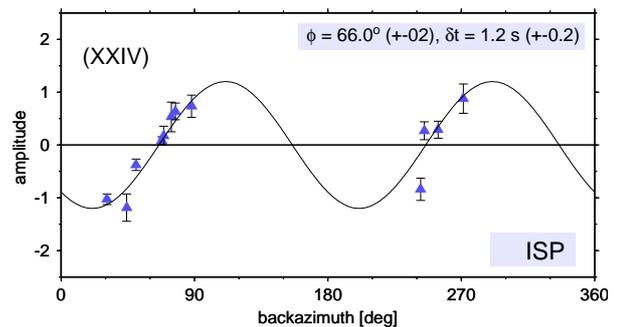
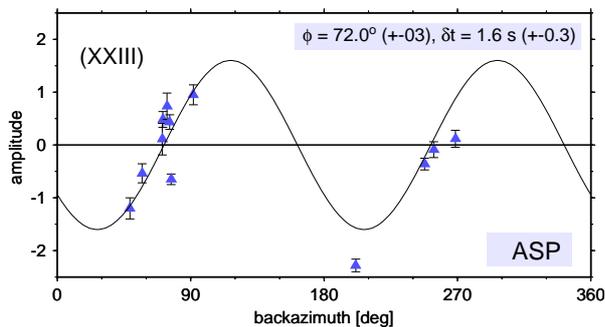
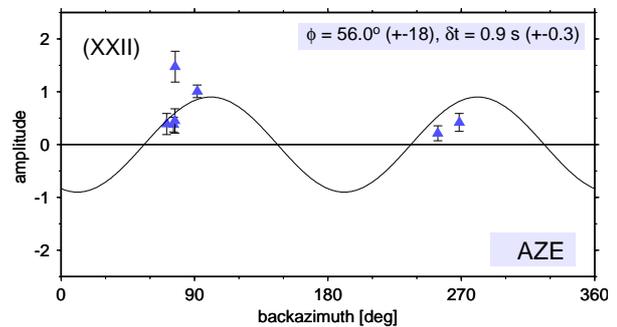
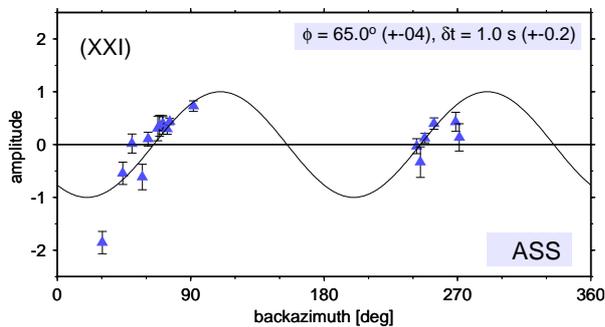
- Die Richtung der *schnellen Achse*, ϕ , variiert entlang des TRANSALP- Profils kaum (Abb. 6.5, 6.6c). Der Wertebereich beträgt $\phi \approx 60^\circ - 70^\circ N$, die Werte sind im allgemeinen mit einem geringen Fehler behaftet ($< 5^\circ$).
- Die Verzögerungszeit, δt , unterliegt größeren Variationen ($\delta t \approx 0.6$ s – 2.4 s, Abb. 6.5, 6.6b). Der rechnerische Fehler beträgt ungefähr 0.3 s an jeder Station.

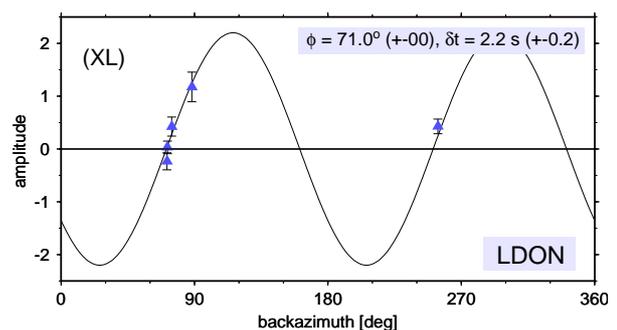
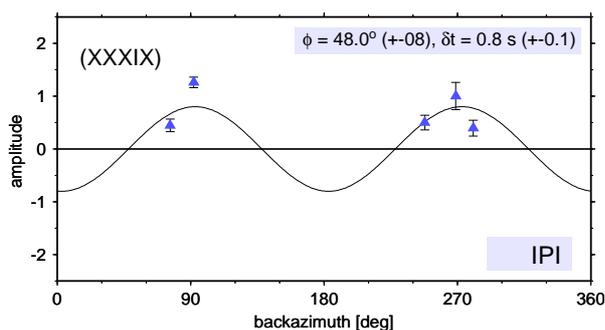
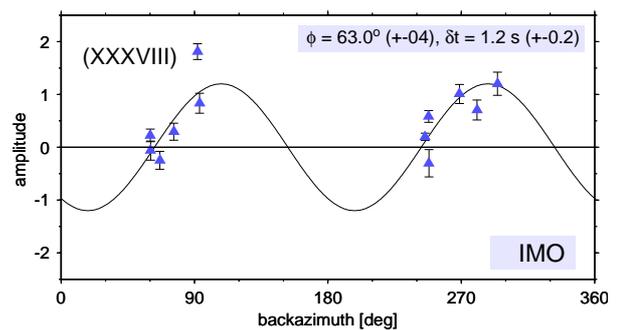
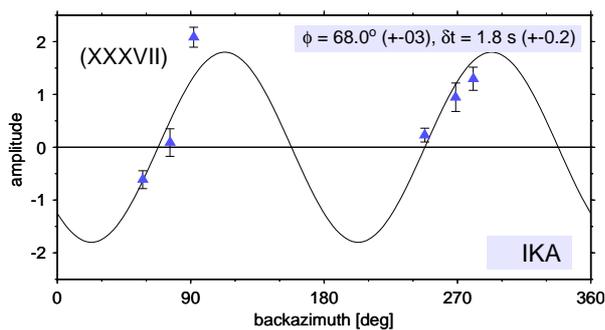
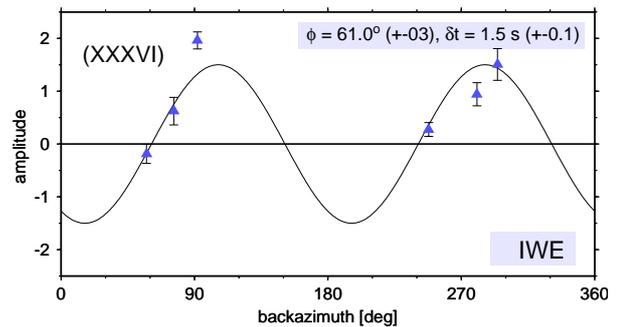
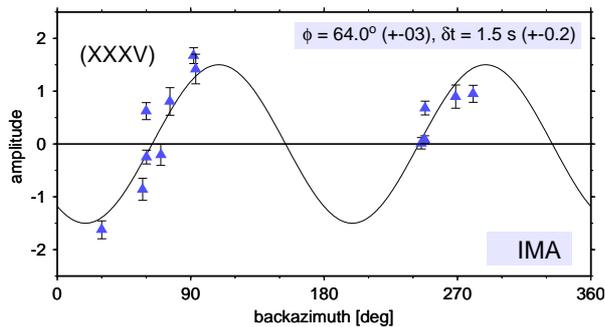
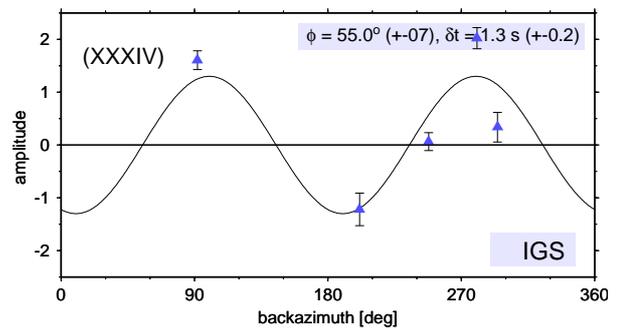
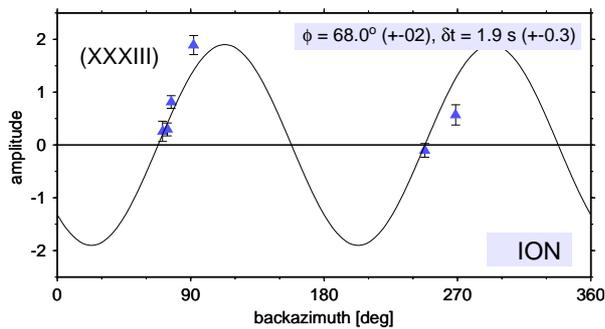
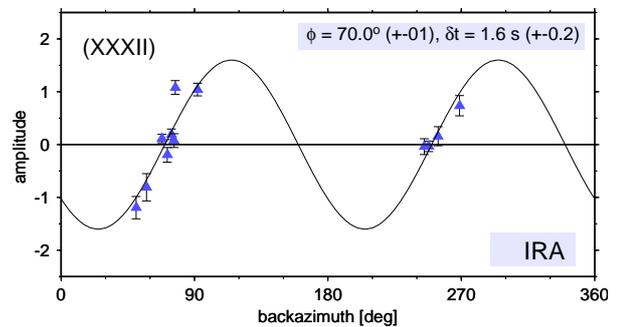
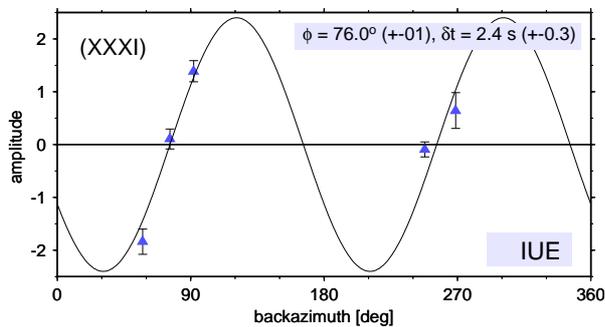
Fast alle Ereignisse fallen in die Azimuthbereiche bei $30^\circ - 90^\circ$ und $240^\circ - 280^\circ$. Wie bei der Station *AGW* (Abb. 6.4), ist auch an den meisten anderen Empfängern die *schnelle Achse* dabei vor allem durch Beben aus Richtungen von $45^\circ - 90^\circ$ definiert. Die größere Streuung der *delay times* ist u.a. darauf zurückzuführen, daß in der Nähe der Amplitudenminima (25° und 205°) und Maxima (115° und 295°) keine bzw. nur wenige Daten liegen. Insgesamt zeichnet sich als schwacher Trend ab, daß δt von Nord nach Süd zunimmt (Abb. 6.6b). Unterstützt wird dies durch die Beobachtungen an den zusätzlichen Empfängern aus *TP4*

für das Ereignis vom 28. September 1998 (mit nach Süden zunehmender Amplitude auf der T -Komponente in Abb. 6.2). Am nördlichen Ende bis ca. $47.5^\circ N$ ist δt kleiner als $1 s$. Ein vergleichbarer Wert ergibt sich auch für die Verzögerungszeit an der Permanentstation Fürstfeldbruck (FUR) im Nordwesten des TRANSALP- Experimentes, für welche seit dem Jahr 1993 registrierte SKS - Phasen mit derselben Methode prozessiert wurden ($\delta t = 0.8 \pm 0.2 s$ und $\phi = 60 \pm 6^\circ$, Abb. 6.7). Die *schnelle Richtung* ist identisch mit der zuvor von Vinnik et al. [1994] publizierten, die Verzögerungszeit etwas geringer ($\delta t = 1.2 s$ und $\phi = 60^\circ$). Brechner et al. [1998] finden für FUR eine beträchtliche Variation der *delay times* mit dem Backazimuth und schlagen ein Mehrschichtmodell mit mindestens einer geneigten Symmetrieachse vor. Die von ihnen ermittelten hohen Werte für δt zwischen 27° und 87° ($1.6 - 2.25 s$) liegen aber deutlich über den in der vorliegenden Studie berechneten Parametern (Abb. 6.7).









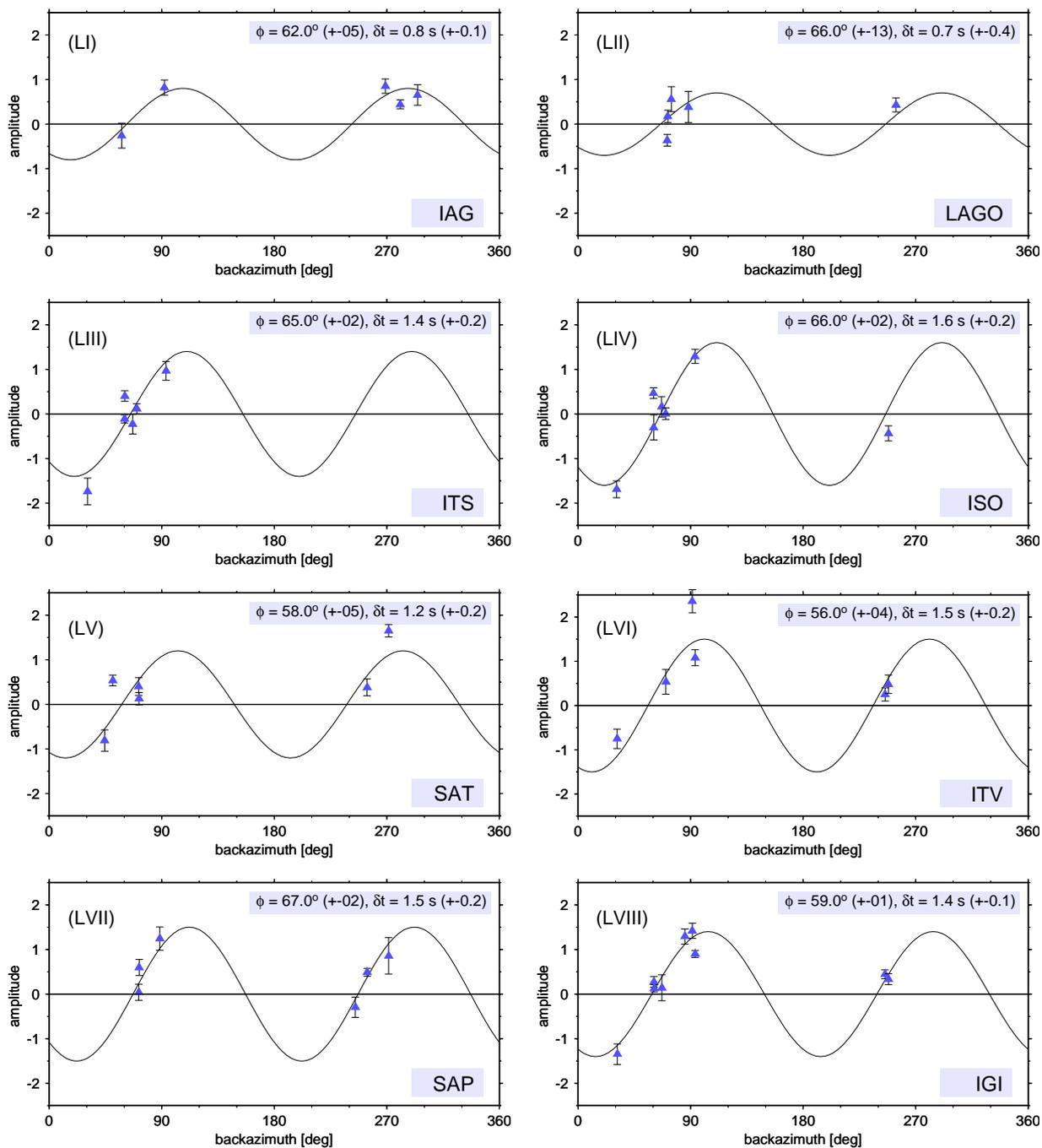


Abbildung 6.5: Ergebnisse des *Multichannelverfahrens* für 58 TRANSALP- Stationen mit jeweils mehr als 4 *SKS/SKKS*- Ereignissen (Stationskoordinaten s. Anhang).

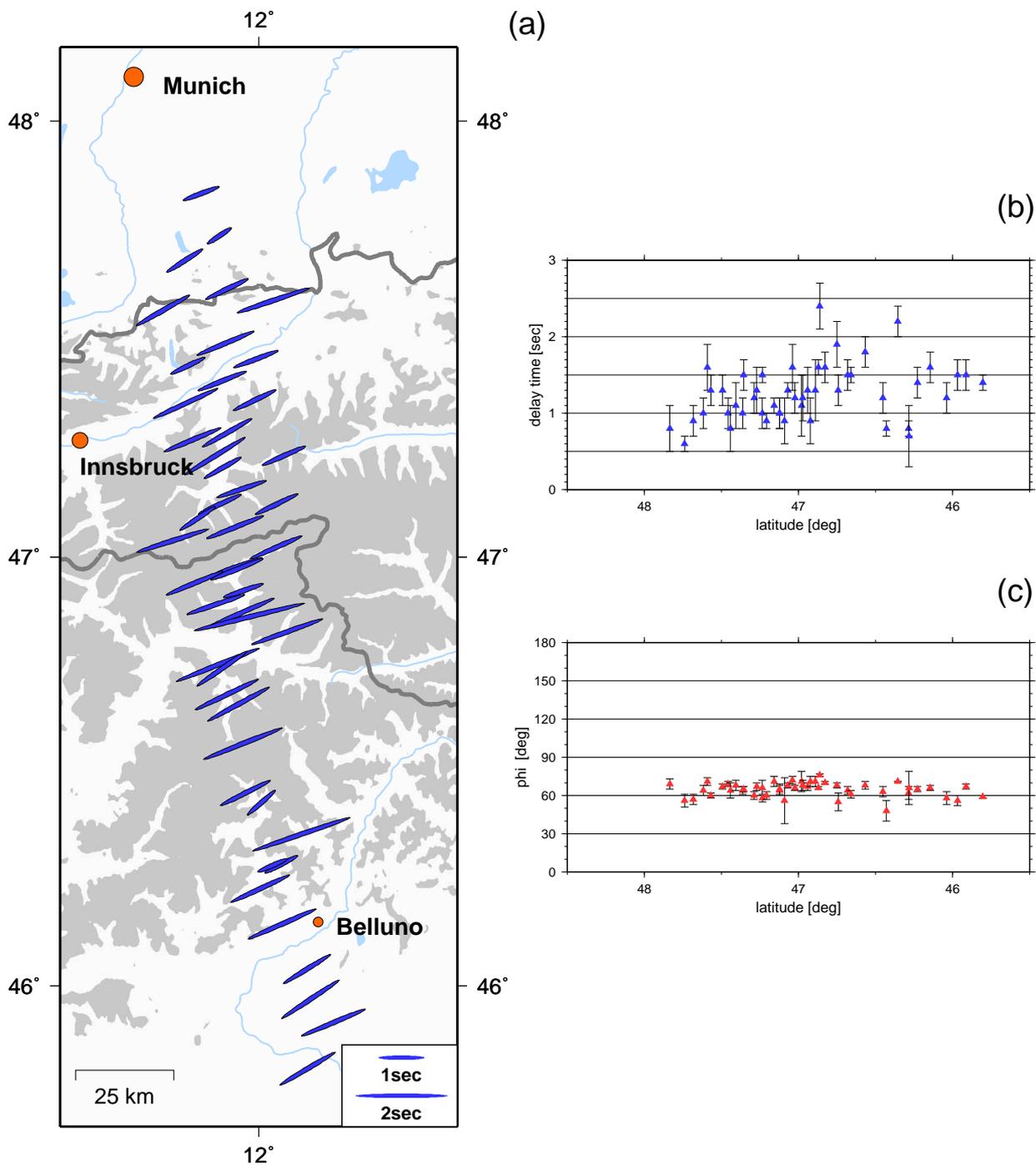


Abbildung 6.6: Die *Splitting Parameter*, bestimmt für die TRANSALP- Stationen. (a): Richtung der *schnellen Achse*, ϕ ; die Symbollänge ist proportional zur Verzögerungszeit, δt . (b): δt als Funktion der Stationsbreite, (c): ϕ als Funktion der Stationsbreite. Während die Richtung der *schnellen Achse* sehr homogen ist, variiert die *delay time* entlang der TRANSALP- Linie. Die Datendichte am südlichen Ende des Profils ist geringer (s. Text).

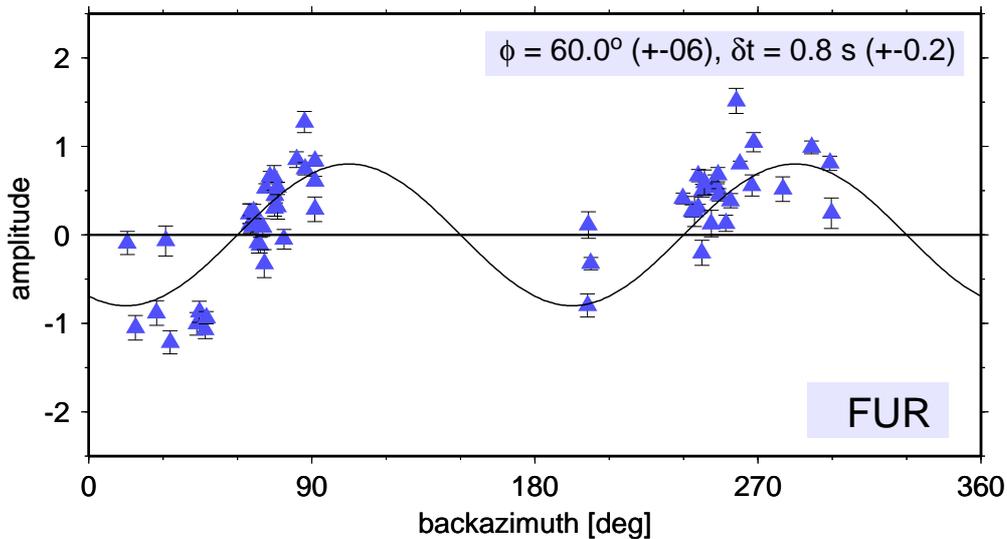


Abbildung 6.7: Anwendung des *Multichannelverfahrens* auf Daten der Permantstation *FUR*. Der Datensatz umfaßt nicht nur die *TRANSALP*- Ereignisse, sondern auch *SKS*- und *SKKS*-Signale ab dem Jahr 1993.

Einen Überblick über die registrierten *SKS*- und *SKK*- Signale aus verschiedenen Azimuthen gewährt abschließend Abb. 6.8. Die vorgenommene Auswahl erlaubt eine direkte und qualitative Kontrolle der Ergebnisse anhand von sieben Seismogrammsektionen, die verschiedene Backazimuthbereiche repräsentieren. Es ist aber beim Vergleich der Seismogrammontagen zu beachten, daß sich die Stationsverteilung zeitlich änderte und damit nicht für jedes Ereignis das N-S- Profil auf seiner gesamten Länge gleichmäßig besetzt war. Für die gezeigten Ereignisse ist die Beziehung 4.8 zwischen *R*- und *T*- Wellenformen für die meisten Einzelspuren und alle Summenspuren erfüllt. Als theoretische *T*- Komponente wird dabei die Ableitung der radialen Signalform bezeichnet. Der Amplitudenfaktor ergibt sich durch Annahme von ϕ (67°) und δt (1.3 s). Die Signalqualität des Bebens (d) aus südlicher Richtung ist an vielen Stationen schlecht, und im Vergleich zu den Ereignissen (a), (c), (f) und (g) sind die einzelnen transversalen Spuren nur schwach kohärent. Bei den Ereignissen (b) und (e), deren Richtungen entgegengesetzt und fast genau parallel zur ermittelten Orientierung der *schnellen Achse* (67°) liegen, ist auf *T* beinahe keine Energie sichtbar. Das ist zu erklären, da genau wie bei Einfall parallel zur *langsamen Achse* keine Aufspaltung der *SKS*- und *SKKS*- Phasen in der anisotropen Region auftritt. Es ist ein weiteres überzeugendes Indiz dafür, daß ϕ sehr konsistent und genau bestimmt ist. Darüberhinaus liegt die Vermutung nahe, daß die N-S- Erstreckung des diese Anisotropie verursachenden Bereiches mindestens die Länge des *TRANSALP*- Profils besitzt. In E-W- Richtung ist keine Variation zu erkennen, da die *schnelle Achse* für beide Orientierungen, d.h. ca. 67° und 248° , gut definiert ist. Die Mindestausdehnung der anisotropen Zone ist abhängig von der Tiefe.

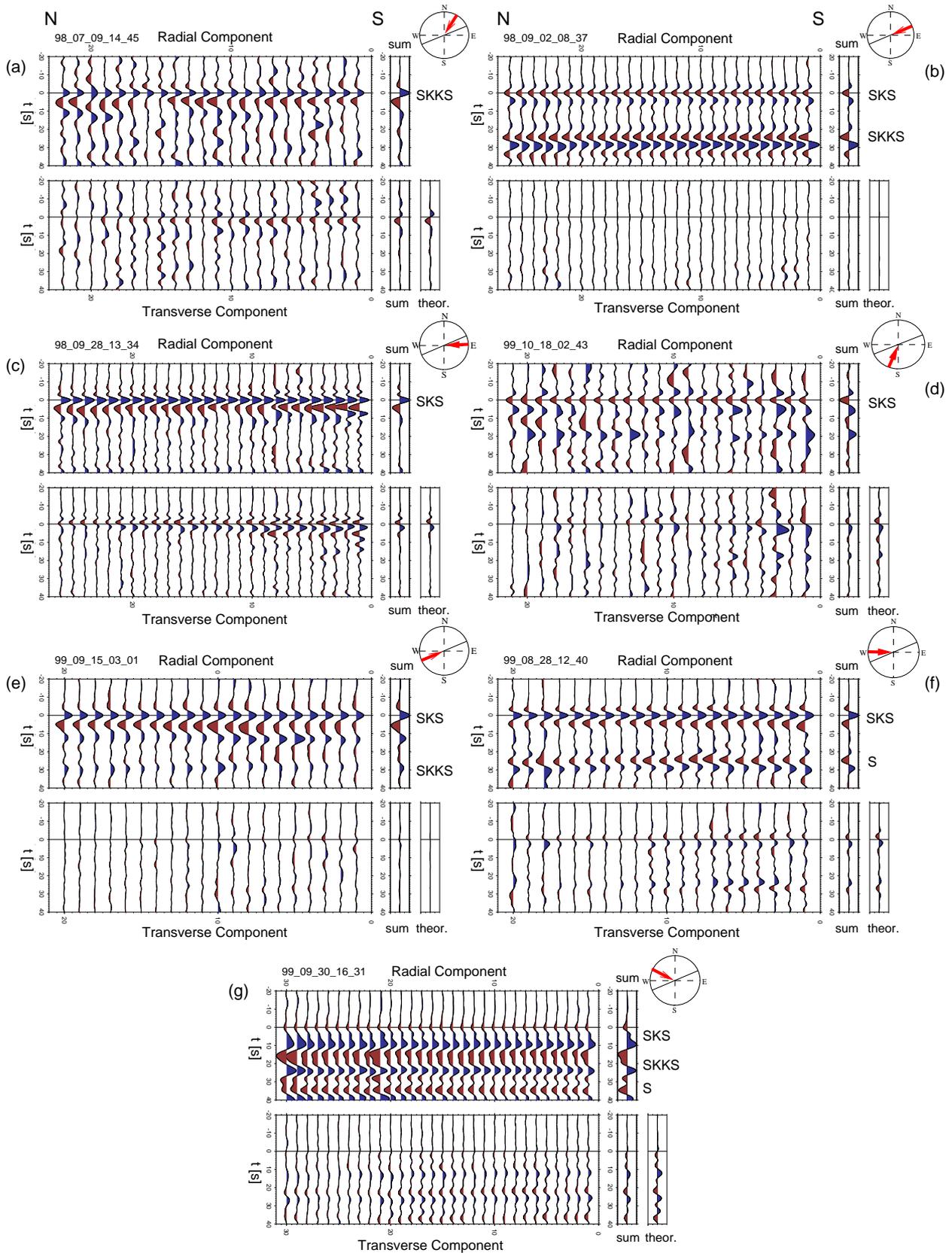


Abbildung 6.8: Sieben gefilterte Seismogramme von registrierten SKS- und SKKS-Phasen (Bandpaß 5 – 12 s). Der Pfeil im Kreisdiagramm gibt den Backazimuth des Bebens an, die durchgezogene Linie markiert die mittlere schnelle Achse (67°). Die Ereignisse (b) und (e) haben einen Backazimuth, der jeweils nahezu der Richtung der schnellen Achse entspricht (67° bzw. 248°). Die Energie auf den transversalen Komponenten ist in beiden Fällen sehr klein. In allen gezeigten Sektionen ist die T-Signalforn in guter Näherung proportional zur Ableitung der R-Komponente (zumindest auf den Summenspuren).