

## 6) Bestimmung von Herdflächenlösungen

### 6.1) Bebenmechanismen

Aus der Seismizität eines Gebietes und den Herdmechanismen der Erdbeben kann auf das vorliegende Spannungsregime geschlossen werden. Die Menge und Genauigkeit der Daten, aber auch die Stärke der Erdbeben sind entscheidend, um entweder ein lokales oder regionales Spannungsfeld interpretieren zu können. In erste Linie hängt die Interpretation von Herdflächenlösungen von der Datenart, teleseismische ( $m_b > 5,0$ ) oder mikroseismische ( $m_b < 5,0$ ) Ereignisse, sowie von dem tektonischen Rahmen ab. Eine Reihe von Ergebnissen im Untersuchungsgebiet, sowie entlang Chile sind in der Literatur zu finden. Ein Überblick auf diese Resultate wird in diesem Abschnitt dargestellt.

Mittels Herdflächenlösungen aus teleseismischen Daten zeigen *Isacks und Molnar (1971)*, *Malgrange und Madariaga (1983)*, *Astiz und Kanamori (1986)*, *Tichelaar und Ruff (1991)*, *Comte und Suárez (1995)* und *Belmonte und Comte (1997)*, dass entlang der Subduktion ( $18^\circ$ - $38^\circ$ S) die Extensionsachsen in intermediären Tiefenzonen (70-350 km Tiefe) meistens parallel zur Subduktionsrichtung ( $\sim$ N-S) gerichtet sind. Entlang der seismogenen Zone orientieren sich die P-Achsen der Art, sodass auf Aufschiebungsmechanismen (*reverse faulting = Kompression*) geschlossen werden kann. Diese Ergebnisse stimmen gut mit dem sog. „*slab pull*“, „*ridge push*“ und mit dem Kopplungsprozess überein.

Aus mikroseismischen Daten (*lokales Netz*) zeigen *Comte und Suárez (1994)* im Bereich von Iquique ( $21^\circ$ S) und Antofagasta ( $23^\circ$ S) und *Comte et al. (1999)* für den Bereich von Arica ( $\sim 19^\circ$ S), dass eine doppelte seismische Zone ca. 20 bis 25 km unterhalb des oberen Teils der subduzierenden Platte in einer Tiefe von etwas 90 km in der Benioff-Zone zu sehen ist. Kompressions- und Extensionsmechanismen dominieren die Polarität dieser Beobachtung, obwohl die Daten eine starke Abweichung aus dem Haupttrend zeigen und umgekehrten Polaritäten in gleichen Zonen zu sehen sind. Die doppelte seismische Zone wird interpretiert (*Comte und Suárez, 1995*) als Folge einer Phasenumwandlung (*Basalt*  $\Rightarrow$  *Eklogite*) oder als eine Zone aufgeschmolzener Gesteine, die am Mittel ozeanischen Rücken erzeugt worden sein könnte und in der ozeanischen Kruste kristallisiert wird. Diese Zone bleibt unterhalb des oberen Teiles der subduzierten Platte.

Mit dem PISCO-Datensatz zeigt *Rudloff (1998)* im Arbeitsgebiet eine gute Übereinstimmung der Extensionsachsen mit der Subduktionsrichtung im intermediären Tiefen (s. *Abb. 6.8, 6.9, 6.10*), aber keine doppelte seismische Zone. *Herlitz (1998)* diskutiert aus den ANCORP-Daten ähnliche Schlussfolgerungen wie *Rudloff (1998)* im Bezug auf die Extensionsachsen, findet aber außerdem eine Änderung der Extensions- und Kompressionsachsen um  $21.25^\circ$ S, welche als möglicher Bruch in der Nazca-Platte interpretiert werden kann.

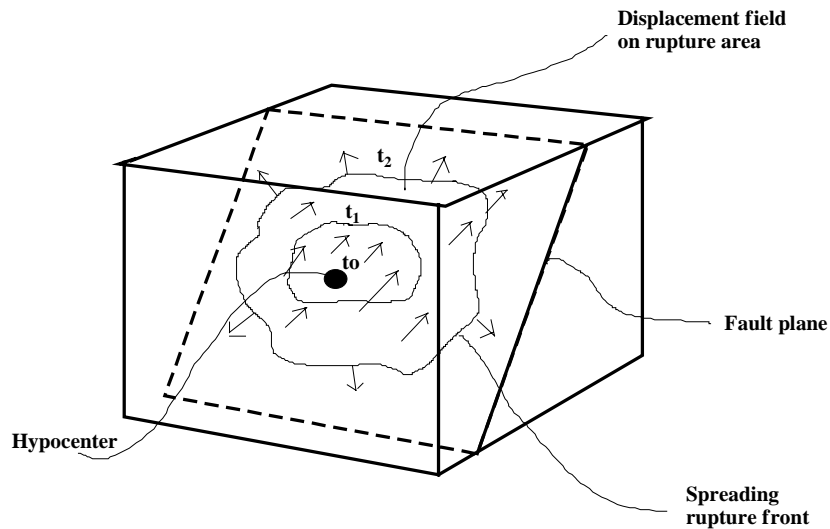
Wie zu sehen ist, stimmen die Mechanismen großer Erdbeben ( $m_b > 5,0$ ) meistens gut mit dem regionalen Spannungsfeld überein. Im Gegenteil dazu können kleinere Beben ( $m_b < 5,0$ ) entscheidende Schwankungen zeigen. Die Interpretation ihrer Herdflächenlösungen wird durch den tektonischen Rahmen gesteuert. In dieser Sinne sollten sich Herdmechanismen im kristalen Bereich nicht unbedingt auf das Hauptspannungsfeld richten. Da in der Erdkruste im Gegenteil zu der Benioff-Zone eine Überlagerung von verschiedenen Spannungsmustern herrscht, werden kleine Beben auf lokale Variationen reagieren. Diese Variationen können mit dem Austausch der Hauptspannungsachse im Verbindung gebracht werden, d.h. der sog. „*deviatoric stress*“ wird von keiner dominierenden Spannungsrichtung geprägt. Dieser Zustand könnte mechanisch als Gleichgewicht zwischen einer regionalen kompressiven Spannung und der lithostatischen Kraft interpretiert werden.

### 6.2) Grundlage zur Darstellung der Quelle eines Erdbebens

Die in Seismogrammen eingetragenen Bewegungen sind hauptsächlich das Ergebnis der Effekte des Laufweges (*Verbreitung elastischer Wellen*) und der Quelle (*Erzeugung elastischer Wellen*). Da der Laufweg die Information der inneren Struktur der Erde trägt, wird der Effekt der Erdbeben-Quelle isoliert. Damit bleibt eine grundlegende Frage, wie die elastischen Wellen erzeugt werden.

Die mathematische Beschreibung von seismischen Quellen ist in der klassische Literatur (*Aki und Richards, 1980*) zu finden. Grundsätzlich gibt es zwei Arten der Beschreibung dieses Problems: (1) unter Anwendung der sogenannten Raumkräfte in einer Umgebung, welche die Quelle enthält, (2) unter Anwendung einer Verschiebung bzw. einer Verformung quer über eine Scherfläche (*fault*) sowie Raumfläche (*Sprengung*). Das Hauptergebnis dieser Beschreibung handelt davon, dass verschiedene Systeme in Bezug auf die angewendeten Kräfte eine gleichwertige Unterbrechung in der Verschiebung beschreiben können. Diese Kräfte werden in der

Literatur „body-force equivalents“ genannt. Sie stellen die Basis zur Interpretation eines Bebensmechanismus als gekoppeltes Kräftepaar dar.



**Abbildung 6.1**

Darstellung einer Bruchfläche in einem Volumen. Der Bruch beginnt im Hypozentrum bei  $t_0$  und breitet sich bis zur Zeit  $t_1$  und  $t_2$  auf die markierten Flächen (aus Lay und Wallace, 1995)

Fault plane representation in a volume. The rupture starts at the hypocenter at time  $t_0$  and expands to time  $t_1$  and  $t_2$  at indicated areas (after Lay und Wallace, 1995)

Das Gedankenmodell ist ein Scherbruch (Abb. 6.1). Ein Grund dafür ist die Beobachtungen von Scherflächen, die an einer zerrissenen Oberfläche zu sehen sind und durch die Entstehung eines Erdbebens erzeugt wurden. Ausgehend von der Untersuchungen am 1906-San Francisco-Erdbeben (USA,  $M_s=8.4$ ) wurde von Reid die bekannte Theorie zum elastischen Rückprall („elastic rebound“) vorgeschlagen. Diese nimmt eine Scherbewegung an und äußert sich in der Art, dass sich die Verformung um die Scherfläche wegen der Zerreißfestigkeit der Gesteine ansammelt, bis die entsprechenden Spannungen ein Maximum erreichen. Dadurch wird die Zerreißfestigkeit überstiegen und es kommt zum Riss im Form eines Erdbebens. Ein Medium mit solch einer Eigenschaft wird als elastisch bezeichnet und folgt dem allgemeinen Hooke’sche Gesetz.

### 6.3) Bestimmung von Herdflächenlösungen

Zur Bestimmung von Herdflächenlösungen werden sowohl die Raumwellen (*P und S*) als auch die Oberflächenwellen (*Love und Rayleigh*) verwendet. Im folgendes wird versucht, einen Überblick über die Eigenschaften der Abstrahlung von P- und S-Wellen zu geben.

Die Amplituden der P- und S-Wellen hängen nicht nur von Dämpfungsfaktoren ab, sondern auch von einem eigenen Abstrahlmuster. Erdbebenwellen werden nicht gleichmäßig über alle Abstrahlrichtungen vom Hypozentrum aus wahrgenommen. Aus dem bekannten Abstrahlmuster eines Bebens können Informationen über die Lage der Herdfläche, das am Beben beteiligte Spannungsregime und den Mechanismus des Bebens gewonnen werden. Die Darstellung eines Abstrahlmusters basiert auf ein Quellmodell, welches durch eine Kraft, die eine Verschiebung auslöst, modelliert wird. In dieses Problem wird die Green’sche Funktion eingeführt, welche die Antwort eines Systems auf eine impulsive Eingabe ist:

$$G_{np}=G_{np}(\mathbf{x},t;\boldsymbol{\varepsilon},\tau) \quad (\text{G.6.1})$$

$G_{np}$  stellt die Verschiebung in Richtung  $n$  eines Punktes  $\mathbf{x}$  um Zeit  $t$  wegen der Verschiebung in Richtung  $p$  eines Punktes  $\boldsymbol{\varepsilon}$  um Zeit  $\tau$  dar. Bei Einführung einer impulsiven Eingabe  $\mathbf{F}_p$  in die Richtung  $p$  im  $(\boldsymbol{\varepsilon},\tau)$  ergibt die Konvolution zwischen beiden Funktionen ( $\mathbf{F}_p * G_{np}$ ) die Verschiebung in die Richtung  $n$  im  $(\mathbf{x},t)$ .

$$\mathbf{u}_n(\mathbf{x},t)=\mathbf{F}_p * G_{np} \quad (\text{G.6.2})$$

Andererseits entsteht eine mathematische Darstellung für die Verschiebung in die Richtung  $n$   $\mathbf{u}_n(\mathbf{x},t)$  wegen eines plötzlichen Bruches im  $(\epsilon,\tau)$  ( $\Sigma$ ) durch die Anwendung des sog. Lehrsatz von Bettis (G.6.2).

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_n(\mathbf{x},t) &= \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_{\Sigma} [u_i(\epsilon,\tau)] C_{ijpq} v_j \partial \mathbf{G}_{np} / \partial \epsilon_q d\Sigma \\ [u_i(\epsilon,\tau)] &= \text{Verschiebung entlang } \Sigma \\ C_{ijpq} &= \text{elastische Konstanten} \\ v_j &= \text{Normal zur } \Sigma \end{aligned} \quad (\text{G.6.3})$$

Die Ableitung von  $\mathbf{G}_{np}$  im Bezug auf die Quellkoordinaten  $\epsilon_q$  stellt physikalisch ein einzelnes Kraftpaar (mit Arm in der  $\epsilon_q$ -Richtung) auf der Scherfläche dar. Die Summe über  $q$  bedeutet, dass jeder Teil der Verschiebung im Orte  $\mathbf{x}$  gleich den Effekt der Summe von Kräftepaaren ist, die sich auf der Scherfläche verteilen.

Aus einer Analogie zwischen G.6.2 und G.6.3 ergibt sich die Verschiebung in die Richtung  $n$   $\mathbf{u}_n(\mathbf{x},t)$ , wie in der Gleichung G.6.4 zu sehen ist.

$$\mathbf{u}_n(\mathbf{x},t) = \int_{\Sigma} [u_i(\epsilon,\tau)] C_{ijpq} v_j * \partial \mathbf{G}_{np} / \partial \epsilon_q d\Sigma \quad (\text{G.6.4})$$

wobei \* auf die Konvolution hindeutet.

In einem homogenen, isotropen und ideal-elastischen Raum ist  $C_{ijpq}$  gleich  $\mu$ , eine der Lamé'schen Konstanten. Durch die Einführung der Variable  $m_{pq}$  kann (G.6.4) geschrieben werden wie folgt

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_n(\mathbf{x},t) &= M_{pq} * \partial \mathbf{G}_{np} / \partial \epsilon_q \\ \text{mit} \\ M_{pq} &= \int_{\Sigma} m_{pq} d\Sigma \end{aligned} \quad (\text{G.6.5})$$

Falls ein Scherbruch, der durch zwei senkrecht aufeinander stehenden, gekoppelten Kräftepaare entsteht, mit einer Bewegung parallel zu  $\epsilon_1$  und einer Normalen  $\epsilon_3$  zur Scherfläche berücksichtigt wird, ist  $m_{pq}$  gleich  $\mu[u_1]$ . Damit ergibt sich für  $M_{pq}$ :

$$M_{pq} = \mu[u_1] \Sigma \quad (\text{G.6.6})$$

Hier kann man erkennen, dass  $M_{pq}$  der Momenten-Tensor ist und bei einem Scherbruch das seismische Moment  $M_0$  darstellt. Die Ableitungen von  $\mathbf{G}_{np}$  stellen die gekoppelten Kräftepaare dar.

$$\mathbf{u}_n(\mathbf{x},t) = M_0 (\partial \mathbf{G}_{n1} / \partial \epsilon_3 + \partial \mathbf{G}_{n3} / \partial \epsilon_1) \quad (\text{G.6.7})$$

Da Kraft und Verschiebung Vektoren sind, ist die komplette Beschreibung der Modellantwort ein Tensor (Green'scher Tensor). Die Fernfeldapproximation für den Green'schen Tensor ist

$$\begin{aligned} G_{ij}(\mathbf{x},t;0,0) &= (1/4\pi\rho\alpha^2) \gamma_i \gamma_j (1/r) X_o(t-r/\alpha) - (1/4\pi\rho\beta^2) (\gamma_i \gamma_j - \delta_{ij}) (1/r) X_o(t-r/\beta) \\ \text{wobei} \\ X_o &= \text{Kraft in Richtung } j \text{ im punkt } (0,0) \\ \gamma_i &= X_i / r = \partial r / \partial x_i \\ \rho &= \text{Dichte} \\ \delta_{ij} &= \text{Deltafunktion Dirac} \end{aligned} \quad (\text{G.6.8})$$

Der erste Term auf der rechten Seite stellt die P-Wellenantwort dar, eine sphärisch expandierende Welle mit einer Wellengeschwindigkeit  $\alpha$ . Da die P-Wellenantwort von  $x_i x_j$  abhängt, ist diese Welle longitudinal. Der zweite Term stellt die S-Wellenantwort dar, eine sich sphärisch mit der Geschwindigkeit  $\beta$  ausbreitende transversale Welle, da er von  $x_i x_j / r^2 - \delta_{ij}$  abhängt.

Wendet man diesen Term an (G.6.5), so ergibt sich

$$\mathbf{u}(\mathbf{x},t) = (1/4\pi\rho\alpha^3) A^{FP}(1/r) \mu \Sigma \mathbf{u}'(t-r/\alpha) + (1/4\pi\rho\beta^3) A^{FS}(1/r) \mu \Sigma \mathbf{u}'(t-r/\beta)$$

wobei

$\mathbf{u}' =$  Ableitung der Verschiebung auf  $\Sigma$

$$A^{FP} = \sin(2\theta)\cos(\phi) \mathbf{r}$$

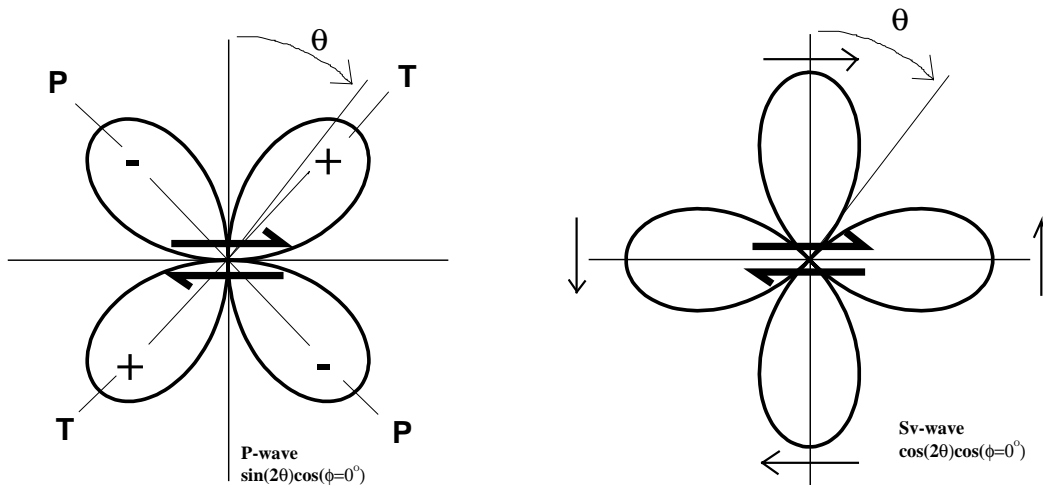
**P**-Fernfeld

$$A^{FS} = \cos(2\theta)\cos(\phi) \Theta - \cos(\theta)\sin(\phi) \Phi$$

**S**-Fernfeld

(G.6.9)

Die Vektoren  $\mathbf{r}$ ,  $\Theta$ , und  $\Phi$  sind dabei jeweils die Einheitsvektoren in die radiale und in die transversale Richtung (in Abb. 6.2  $\Phi=0$ ). Die Gleichung G.6.9 zeigt, dass sowohl die P- als auch die S-Wellenabstrahlung vier Quadranten belegen, die von Bereichen ohne Verschiebung gekennzeichnet sind (Abb.6.2). Aus der Symmetrie der Abstrahlungscharakteristik folgt, dass zwei Flächen als Herdflächen geeignet zu sein scheinen. Welche der beiden Nodalflächen die Herdfläche und welche die Hilfsfläche ist, kann aus dem Abstrahlmuster beider Wellentypen nicht entnommen werden. Zusatzinformation, wie tektonische Überlegungen, können die Wahl der Herdfläche jedoch einschränken.



**Abbildung 6.2**

Auf der linken Seite wird das Diagramm für die Fernfeld-Abstrahlcharakteristik einer P-Welle aus einer Double-Couple-Quelle dargestellt, auf der rechten Seite das sprechende Diagramm für eine S-Welle. Dicke Pfeile deuten auf die Scherdislokation und ihre Richtungen hin. Die Zeichen (+) und (-) weisen jeweils Bewegung nach außen und nach innen auf. P und T deuten jeweils die Kompressions- und Dehnungsspannung an.

On the left the far field radiation pattern for a P-wave is shown, due to a shear dislocation (thick arrows), on the right for a S-wave. (+) and (-) indicate respectively motion outwards and inwards. P and T refer respectively to compressional and extensional stress.

#### 6.4) Darstellung des Spannungsfeldes

Aus den Herdflächenlösungen kann auf die Orientierung des Spannungsfeldes geschlossen werden. In der Bruchtheorie liegen die Scherflächen um 45°-Winkel auf den maximalen und minimalen Spannungsvektoren (genannt Hauptspannungen). In diesem Fall werden P- und T-Achse jeweils parallel zur Achse der maximalen und minimalen Spannung liegen. Beiden beziehen sich auf eine Kompression, die bei der T-Achse ein Minimum des deviatoric stresses bedeutet. Die P-Achsen schneiden die Dehnungsquadranten, die T-Achsen die Kompressionsquadranten (Abb.6.2). Während die Achsen immer in der Mitte der Sektoren der Lösung liegen, kann aber die wahre Spannungsverteilung davon abweichen. Nur bei einem Bruch in einem homogenen, isotropen und ideal-elastischen Körper liegen die P-Achse und der maximale Spannungsvektor sowie die T-Achse und der minimale Spannungsvektor tatsächlich zusammen. Das liegt daran, dass sich nur in diesem Körper ungestörte Scherflächen bilden können, die im 45°-Winkel zur größten Hauptspannungsrichtung liegen. In einem solchen Fall könnte die Verteilung von P- und T-Achsen direkte Auskunft über die Hauptspannungen geben. Falls man die innere Reibung berücksichtigt, kann dieser Winkel aber z.B. auch nur 30° erreichen. Dies kann an Schwächezonen geschehen, z.B. an bereits existierenden Störungen. Herlitz (1998) deutet an, dass im krustalen Bereich die Richtung von der maximalen Hauptspannung fast immer von der von P abweicht. Dieser Bereich muss als stark gestört angenommen werden, denn die Kruste reagiert rigide und ist ständig tektonischen

Spannungen ausgesetzt. Andererseits stimmen die Schwerpunkte der P- und T-Achsen in intermediären Tiefen im Bereich Nord-Chiles gut mit den Konfidenzbereichen für maximale und minimale Hauptspannungen überein (Rudloff, 1998; Herlitz, 1998). Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass klassische Scherbrüche in intermediären Tiefen dominieren.

### 6.5) Darstellung der Herdkugel und der Herdflächenlösungen

Herdflächenlösungen werden aus den Ersteinsätzen von Seismogrammen gewonnen (Abb. 6.3). Die P-Wellenstrahlen verlassen dabei den Herd mit einem bestimmten Winkel, durchstoßen die Herdkugel und erreichen die seismologischen Stationen. Die Herdkugel und die Durchstoßpunkte der Strahlen werden stereografisch an die Oberfläche projiziert (Schmidt'sche Netz). Dabei wird nur die untere Hälfte grafisch dargestellt. Die erste Bewegung erzeugt einen kompressiven Einsatz (+ oder Schwarz) an Stationen, deren Position im Bezug auf das Ereignis bewirkt, dass sich die Scherbewegung nach der Station bewegt. Im Gegenteil dazu wird die erste Bewegung einen dilatativen Einsatz (- oder Weiß) an Stationen erzeugen, deren Position im Bezug auf das Ereignis bewirkt, dass sich die Scherbewegung von der Station weg bewegt. Die Nodalflächen (in der Projektion Linien) müssen die Beobachtungen der dilatativen von denen der kompressiven Ersteinsätze trennen. Bedingt durch die Symmetrie der Abstrahlcharakteristik kann nicht weiter entschieden werden, welche von den beiden Nodalflächen die Bruchfläche und welche die Hilfsfläche ist.

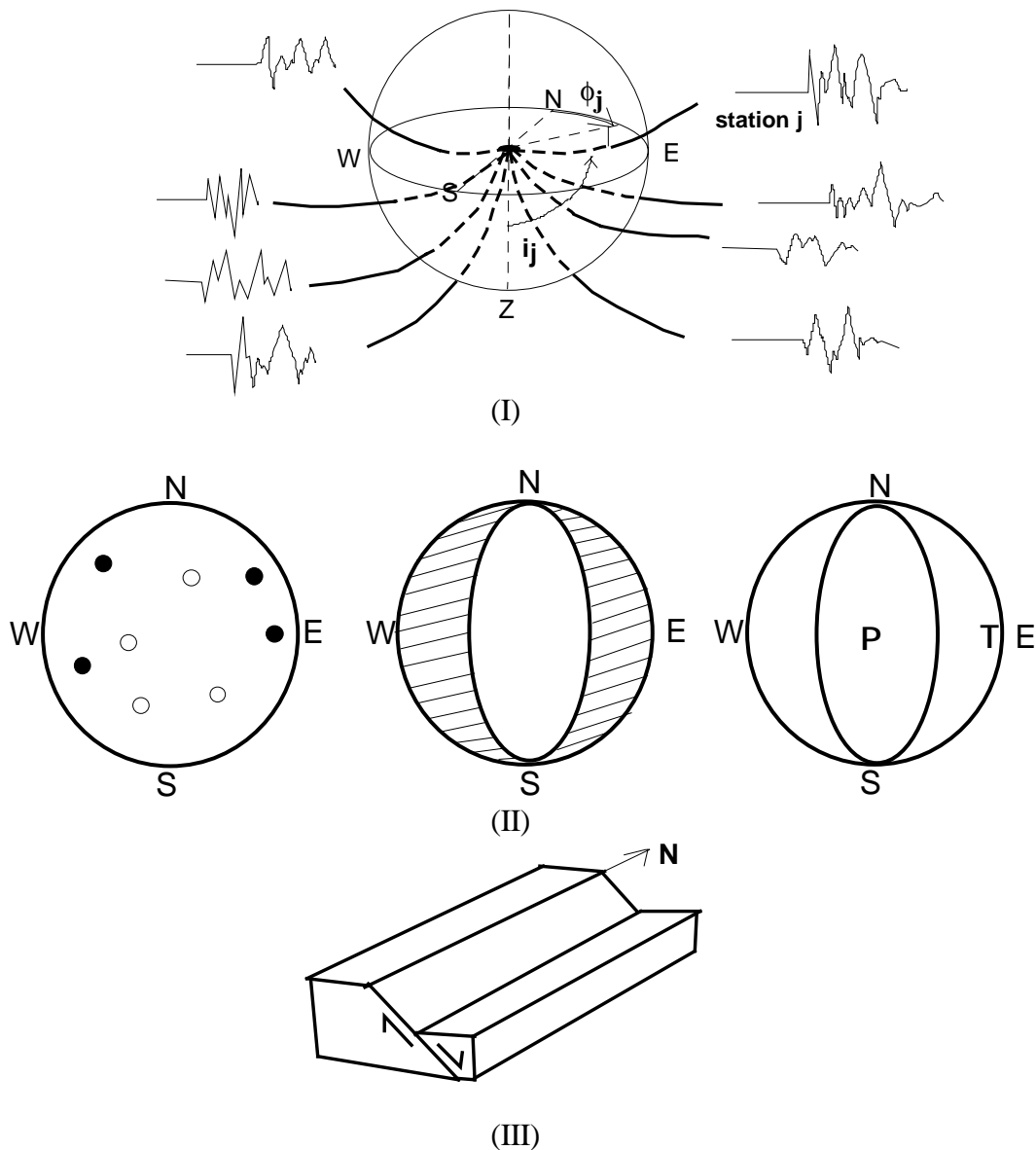


Abbildung 6.3

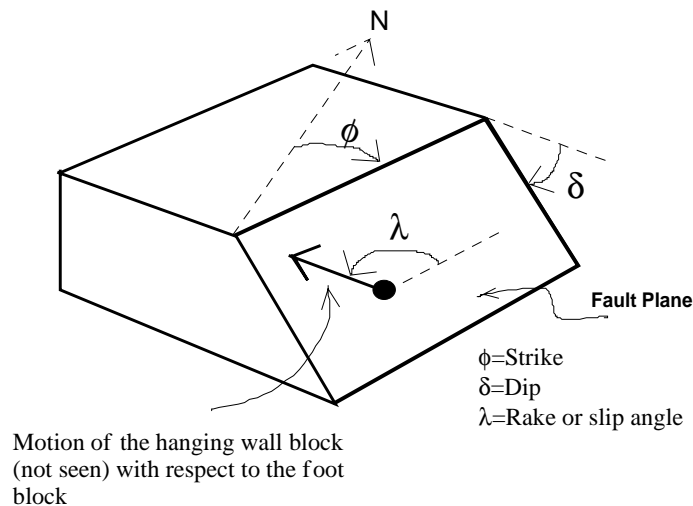
Ersteinsätze von seismischen Spuren erlauben die Bestimmung der Bruchorientierung eines Bebens. Als Beispiel sind die Ersteinsätze eines Bebens in der Herdkugel dargestellt (I). Falls sie auf kompressive oder dilatative

Einsätze deuten, wird der Herdkugel und ihre Nodalflächen durch eine stereographische Projektion an die Oberfläche projiziert (II, links). Daraus ergibt sich die fertige Herdflächenlösung (Kompression als gestrichelte Zone und Dehnung in weiß) (II, mitte) und die zugehörigen P- und T-Achsen (II, rechts). Aus diesem Beispiel ergibt sich ein Abschiebungsmechanismus als Interpretation (III).  
Zu den Parametern der Scherfläche siehe Abbildung 6.4.

First motions obtained from seismological recordings allow to determine the earthquake faulting orientation. As example earthquake first motions in a focal sphere are to be seen (I). According to the first motion direction (up or down) the focal sphere and nodal planes are plotted on a lower-hemisphere stereogram (II, left). The best fitting great circles define regions of compression (shaded) and tension (unshaded) (II, middle) and the P-and T-axes (II, right). It turns out then a determined shear plane (normal fault) as possible interpretation (III).

Die Herdflächenlösung an sich wird durch die Streichrichtung der Störungsfläche, den Eintauchwinkel sowie den Winkel der Bewegungsrichtung mit der Horizontalen angegeben (Abb. 6.4)

- a) Azimuth oder strike angle ( $\Phi$ ): Der Winkel zwischen Nord und der Achse der Scherfläche ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ).
- b) Dip angle ( $\delta$ ): Orientierung der Scherfläche im Bezug auf die Erdoberfläche ( $0^\circ$ - $90^\circ$ ).
- c) Rake oder Slip angle ( $\lambda$ ): Richtung der Bewegung des oberen Blockes im Bezug auf den unteren Block ( $-180^\circ$ - $180^\circ$ )



**Abbildung 6.4**

Darstellung der Parameter Strike, dip und rake auf der Bruchfläche bei Herdflächenlösungen.

Representation of parameter strike, dip and rake (slip angle) on the focal mechanism fault plane.

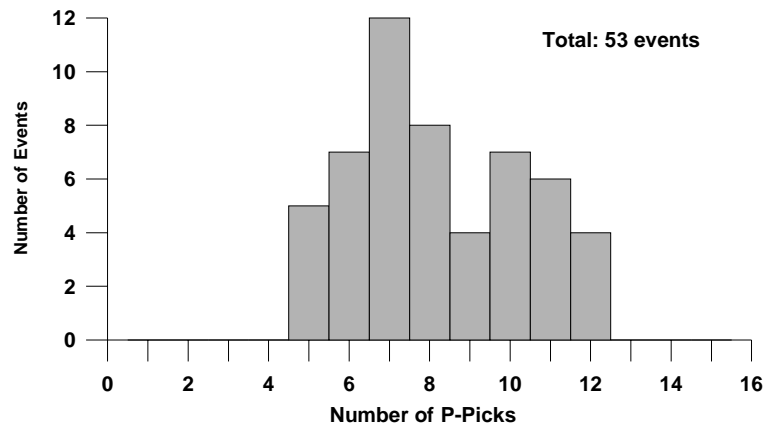
Mit  $\lambda=0^\circ$  tritt ein sinistraler Blattverschiebungsmechanismus ein, mit  $\lambda=\pm 180^\circ$  ein dextraler Blattverschiebungsmechanismus, bei  $\lambda=90^\circ$  ein Aufschiebungsmechanismus (reverse) und bei  $\lambda=-90^\circ$  ein Abschiebungsmechanismus (normal).

## 6.6) Darstellung der Ergebnisse

Die Berechnung der Herdflächenlösungen erfolgte mit dem Programmpaket *Fpfit* (Reasenber und Oppenheimer, 1985) durch die Bestimmung der Polarität des ersten Einsatzes. Als Kontrolle wurde auch das Programm *FocMec* (Snok et al. 1984) verwendet. Beiden Routinen stehen innerhalb des Programmsystems *GIANT* (Rietbrock & Scherbaum, 1998) zur Verfügung. Auf Grund der niedrigen Anzahl von Einsätzen im Datensatz (7 P-Phasen im Durchschnitt) konnten nur für ein viertel der Beben sichere Herdflächenlösungen bestimmt werden (Abb. 6.5). Der Rest besitzt große Variationen und lässt sich nicht zuverlässig interpretieren.

Der Algorithmus zur Berechnung der Herdflächenlösungen invertiert über eine zweistufige Gitternetzsuche, die nach einem Herdflächenmodell sucht, bei welchem die gewichteten Summen der P-Polaritätenabweichungen minimiert werden. Zwei Wichtungsfaktoren beeinflussen dabei die Minimierung: die abgeschätzte Varianz der Daten einerseits und die mit der theoretischen Amplitude nach dem Abstrahlmuster der P-Wellen verglichenen

wahren Amplituden der P-Wellenersteinsätze andererseits. Ein gefundenes absolutes Minimum wird festgehalten; gleichzeitig werden aber auch Lösungen an lokalen Minima gesucht. Für jedes errechnete stabile Modell werden die Modellparameter berechnet (*Strike, Dip und Rake*) sowie die P- und T-Achsen in dem vom Modell bestimmten Fehlerbereich. Da innerhalb von *Fpfit* die Amplituden mit der P-Wellenabstrahlcharakteristik verglichen werden, ist das Programm streng genommen nur auf Double-Couple-Beben anzuwenden. Dies ist eine Einschränkung, da die Herdmechanismen im überwiegenden Fall sicher nicht als bekannt anzusehen sind.



**Abbildung 6.5**

*Beziehung zwischen der Anzahl von Ereignissen, für die Herdflächenlösungen berechnet wurde, und Anzahl der P-Einsätze.*

*Relationship between number of events, whose focal mechanism was determined, and number of P-onsets.*

Das Programm *FocMec* wurde grundsätzlich als Kontrolle des Fehlerbereichs verwendet, da es alle möglichen Nodalflächen angibt. Die Verteilung aller möglichen Nodalflächen (*FocMec*) als auch die erlaubten Variationen der Modellparameter (*Fpfit*) ergeben einen maximalen Fehler für die Nodalflächen von  $\pm 15^\circ$ .

In der *Abbildung 6.6* sind die Herdmechanismen als stereografische Projektion auf die Oberfläche der unteren Herdhalbkugel dargestellt. Die schwarzen sog. „beach balls“ deuten auf einen Aufschiebungsmechanismus hin, die grauen auf einen Abschiebungsmechanismus. Es werden nur wenige Blattverschiebungsmechanismen beobachtet. In der *Abbildung 6.7* sind die Extensionsachsen (T) und Kompressionsachsen (P) nach dem Tiefenbereich der Hypozentren dargestellt. T-Achsen sind grau dargestellt, P-Achsen schwarz. In der *Abbildung 6.8* sind die Herdflächenlösungen auf einen W-E-Querschnitt dargestellt. Hier werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zum Vergleich mit den von *Rudloff (1998)* abgeleiteten Herdflächenlösungen dargestellt. Aufschiebungsmechanismen sind schwarz gehalten, Lösungen mit Abschiebungsmechanismen grau markiert. In der *Abbildung 6.9* und *6.10* sind die P- und T-Achsenschnitte, die jeweils aus den Auf- und Abschiebungsmechanismen abgeleitet wurden, dargestellt.

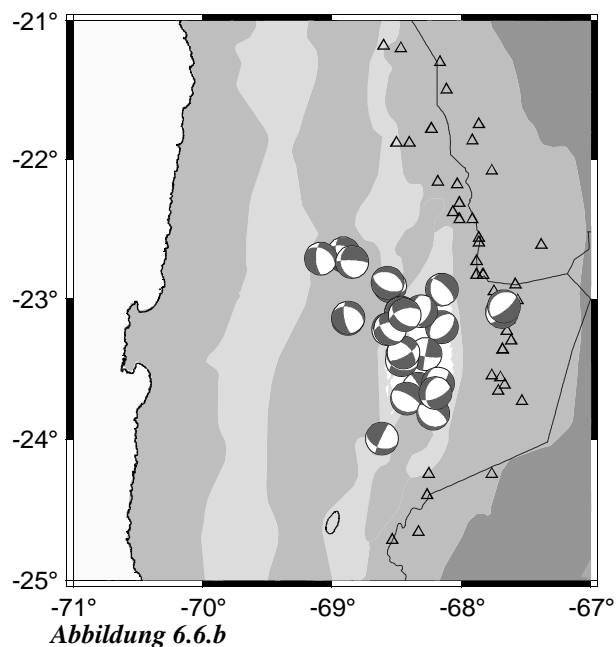
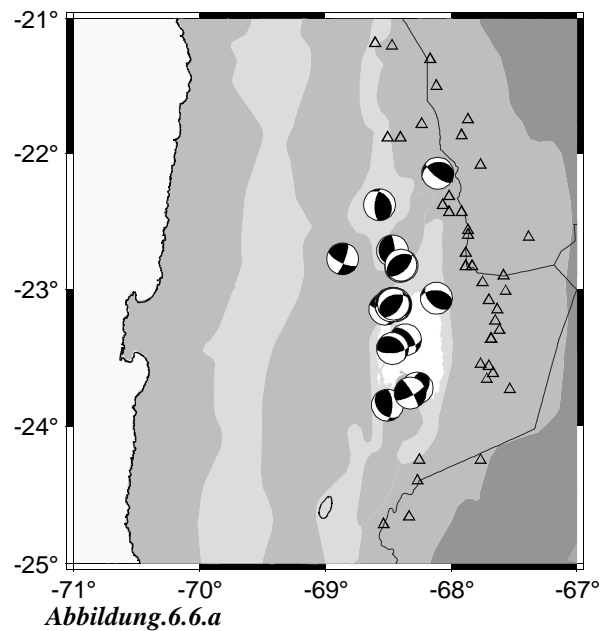
Obwohl die Herdflächenlösungen nur für etwa 25% aller gefundenen Beben (53 aus 215) berechnet werden konnten, ergeben sich die folgenden Tendenzen:

- 1.- Abschiebung- und Aufschiebungsmechanismen konzentrieren sich gleichmäßig oberhalb ~50 km Tiefe. In den Tiefen darunter treten mehrheitlich Abschiebungsmechanismen auf (*Abb. 6.8*).
- 2.- Die zu Ereignissen oberhalb ~50 km Tiefe gehörigen P- und T-Achsen sind charakterisiert durch eine sehr variable Richtungsverteilung auf der horizontalen Ebene. Die geringe Zahl der Ereignisse (n=6) in Tiefen darunter zeigen einen SW-NE-Trend (*Abb. 6.7*).
- 3.- Oberhalb ca. 50 km Tiefe verteilen sich die P-Achsen aus den Aufschiebungsmechanismen und die T-Achsen aus den Abschiebungsmechanismen fast parallel zu der horizontalen Ebene (*Abb. 6.9 (P-Achse) und 6.10 (T-Achse)*). Es fällt auf, dass die Herdflächenlösungen hier von „reinen dip slip“ stärker geprägt sind als im tieferen Bereich (50-70 km).

Unter Berücksichtigung eines regionalen, kompressiven Spannungsfeldes im Untersuchungsgebiet, ist die Verteilung der P- und T-Achsen wie folgt zu interpretieren: die vertikale Verteilung der P-Achsen, die aus den Abschiebungsmechanismen abgeleitet wurde (*Abb. 6.10 (P-Achse)*), könnte auf den maximalen Spannungsvektor und deshalb auf eine lithostatische (senkrechte) Kraft hindeuten, welche die Ursache der

Mechanismen erklären könnte. Andererseits könnte die horizontale Verteilung der P-Achsen, die aus den Aufschiebungsmechanismen abgeleitet wurde (Abb. 6.9 (P-Achse)), ebenfalls den maximalen Spannungsvektor andeuten und deshalb eine kompressive Kraft zeigen. Die scheinbar „chaotische“ Verteilung der P- und T-Achsen auf die horizontale Ebene könnte die Folge von lokalen Spannungsfeldern sein (Kuhn, 1999), welche sich auch in kleinen Bebenmagnituden widerspiegeln.

4.- Unterhalb von 50 km Tiefe sind Herdflächenlösungen durch schräge Mechanismen (*oblique*) gekennzeichnet. Diese Lösungen resultieren aus der Kombination von „*strike slip*“- und „*dip slip*“-Mechanismen. In ca. 60 km Tiefe unterscheiden sich P- und T-Achsen teilweise von den zu der subduzierenden Platte gehörigen Mechanismen, es ist aber schwierig sie zu interpretieren. Ob diese Mechanismen überhaupt durch eine lithostatische Kraft oder ein extensives Regime verursacht werden, bleibt eine offene Frage.

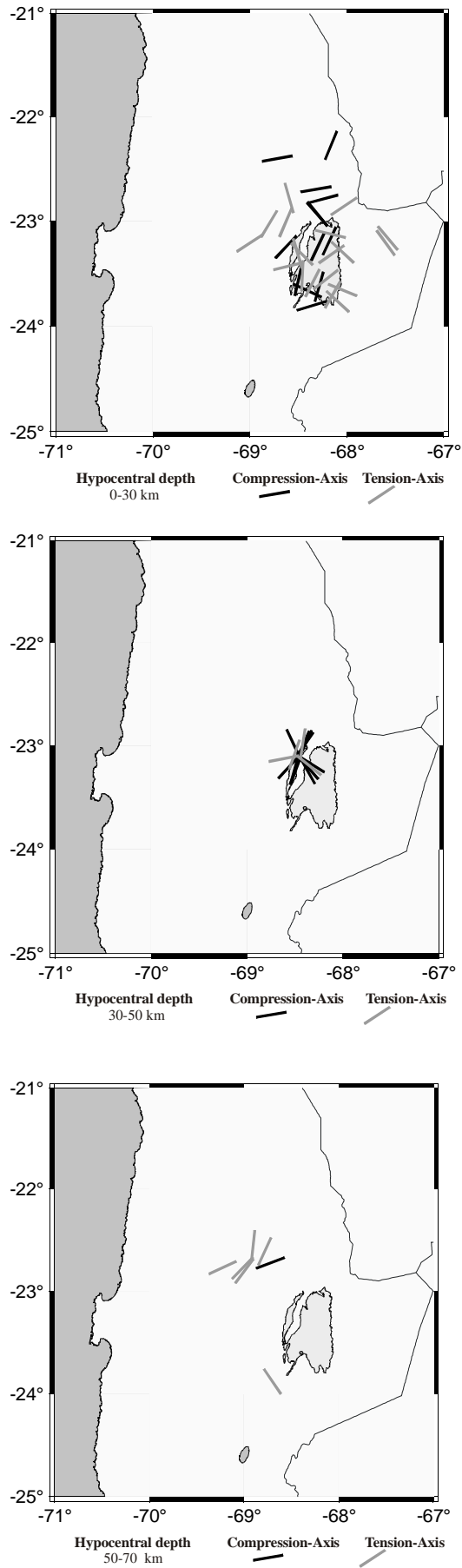


**Abbildungen 6.6.a,b**

Verteilung der im PISCO-Datensatz gefundenen Herdflächenlösungen. In der Abb.6.6.a sind die Aufschiebungsmechanismen (schwarz, rake ( $\lambda$ )  $> 0$ ) dargestellt, in der Abb.6.6.b die Abschiebungsmechanismen (grau, rake ( $\lambda$ )  $< 0$ ).

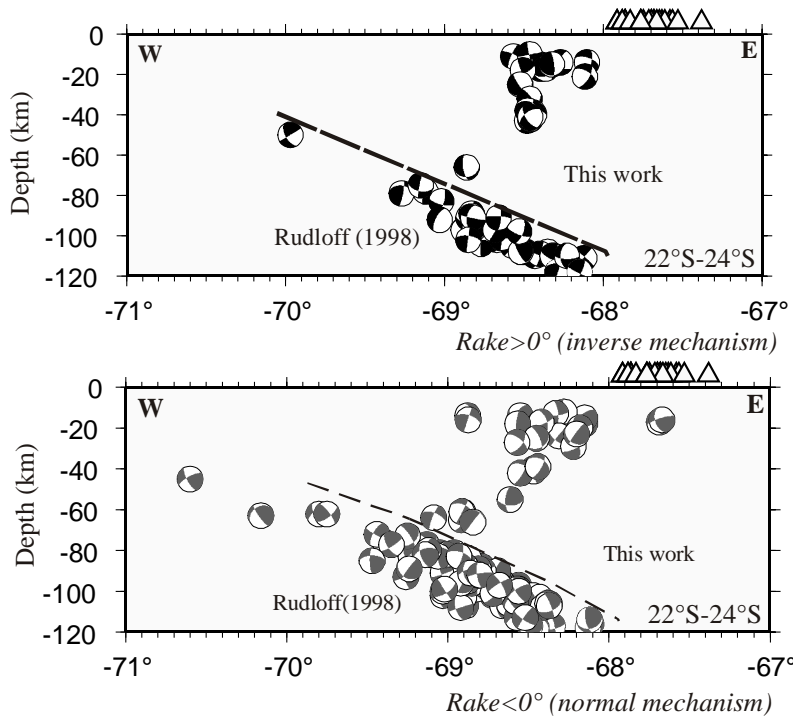
Distribution of focal mechanism. Reverse (black, rake ( $\lambda$ )  $> 0$ ) and normal (grey, rake ( $\lambda$ )  $< 0$ ) mechanisms are shown respectively in the figures 6.6.a and 6.6.b.





**Abbildung 6.7**

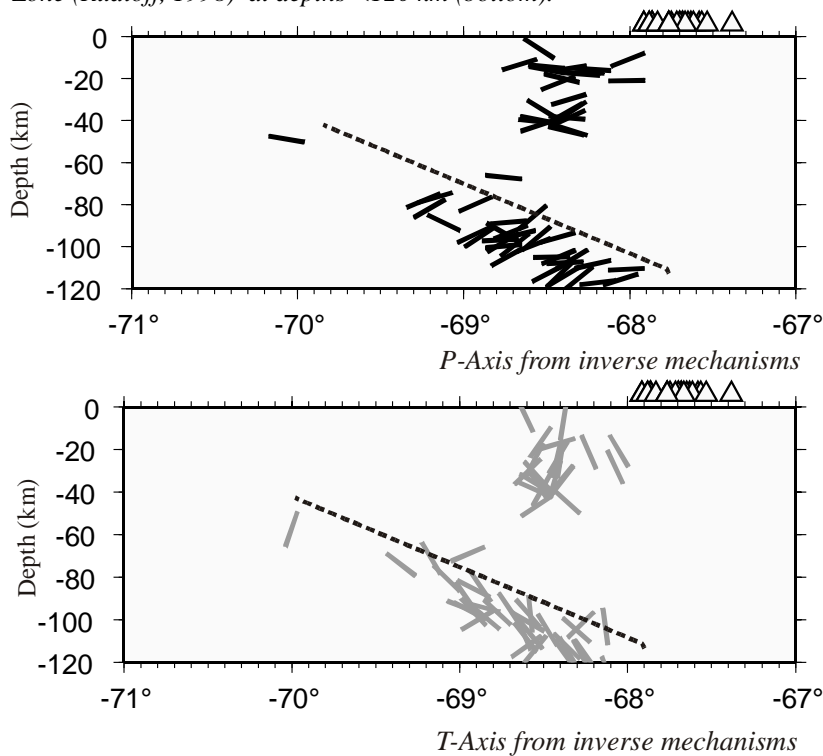
Verteilung der P (Kompression - und T (Extension)-Achsen für verschiedene Tiefenbereiche.  
Distribution of P (compression)- and T (extension)-Axis for different depth levels.



**Abbildung 6.8**

Profil in Richtung des Einfallens der Nazca-Platte (78° Azimuth). Die Darstellungen der Herdflächenlösungen beziehen sich auf die rückwertige Halbkugel und auf die Ereignisse zwischen 22°S und 24°S. Die gestrichelte Linie trennt die Ereignisse dieser Arbeit (oben) von den bei Rudloff (1998) bearbeiteten Benioff-Zonen-Ereignissen mit Tiefen < 120 km (unten).

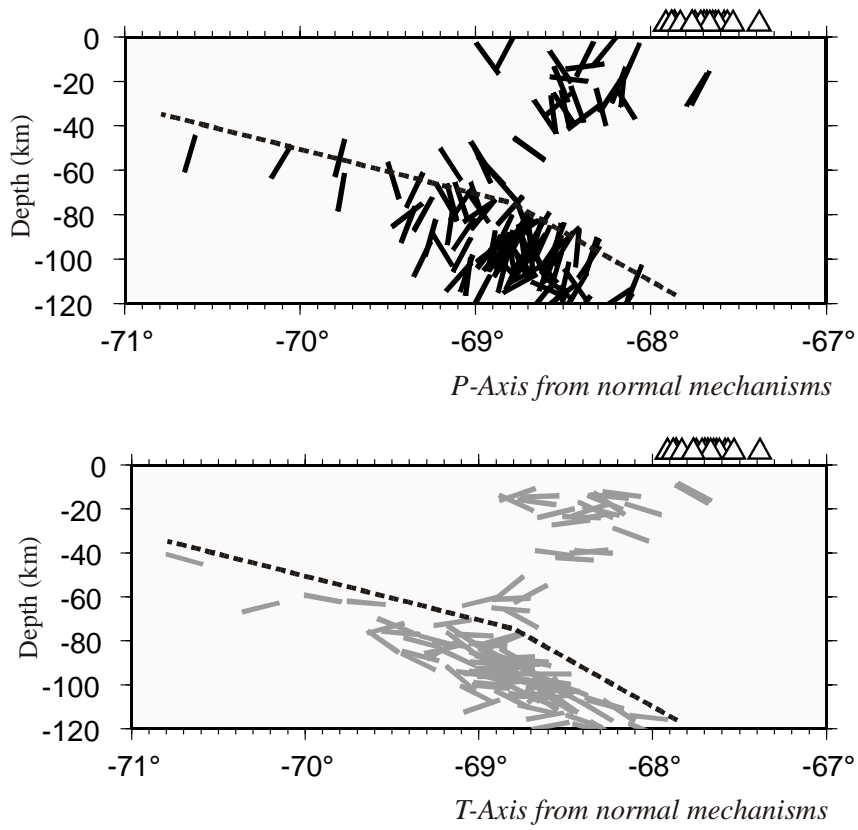
Profile along the subduction azimuth (78°). Focal mechanisms representations related to inverted half sphere and events between 22°S and 24°S. The dotted line separates the results of this work (top) from those lying along the Benioff-Zone (Rudloff, 1998) at depths < 120 km (bottom).



**Abbildung 6.9**

Verteilung der P- und T-Achsen, die aus Aufschiebungsmechanismen abgeleitet wurden. Andere Bemerkungen s. r. Abbildung 6.8

Distribution of P- and T-Axis obtained from reverse mechanisms. Other remarks as in figure 6.8



**Abbildung 6.10**

Verteilung der P- und T-Achsen, die aus Abschiebungsmechanismen abgeleitet wurden. Andere Bemerkungen s. Abbildung 6.8

*Distribution of P- and T-Axis obtained from normal mechanisms. Other remarks as in figure 6.8*