

# Kapitel 3

## Das *TRANSALP*- Projekt

Unter dem Projektnamen TRANSALP sind mehrere internationale seismische und seismologische Teilprojekte zusammengefaßt, die in den Jahre 1998 und 1999 in den Ostalpen durchgeführt wurden. Begleitende geowissenschaftliche Untersuchungen wie die Modellierung des Schwerefeldes, tektonische Bilanzierung und dynamische Modellierung der Ostalpenorogenese wurden bereits begonnen bzw. sind geplant. Die Federführung von TRANSALP in den beteiligten Ländern liegt bei folgenden Institutionen:

- GeoForschungsZentrum Potsdam und Ludwig-Maximilians-Universität München (Deutschland)
- Montanuniversität Leoben (Österreich)
- CNR Rom und ENI/AGIP Mailand (Italien)
- ETH Zürich (Schweiz)

Zentraler Bestandteil von TRANSALP ist eine reflexionsseismische Traverse (Teilprojekte TP1-TP3), die auf einer Länge von fast 300 *km* die tektonischen Einheiten der Ostalpen senkrecht zum Streichen schneidet (Abb. 3.1 und TRANSALP Working Group [2001]). Sie beginnt im Norden in der Molasse bei Miesbach südöstlich von München, überquert die Nördlichen Kalkalpen, das Tauernfenster und die Dolomiten unter anderem in *Valepptal*, *Zillertal* und *Gardatal* und endet im Süden in der Poebene bei Treviso.

Vibroseis- und Sprengseismische Anregungen wurden gemeinsam eingesetzt, um eine günstige Durchdringung des gesamten Krustenbereiches zu erzielen. Die seismischen Signale wur-

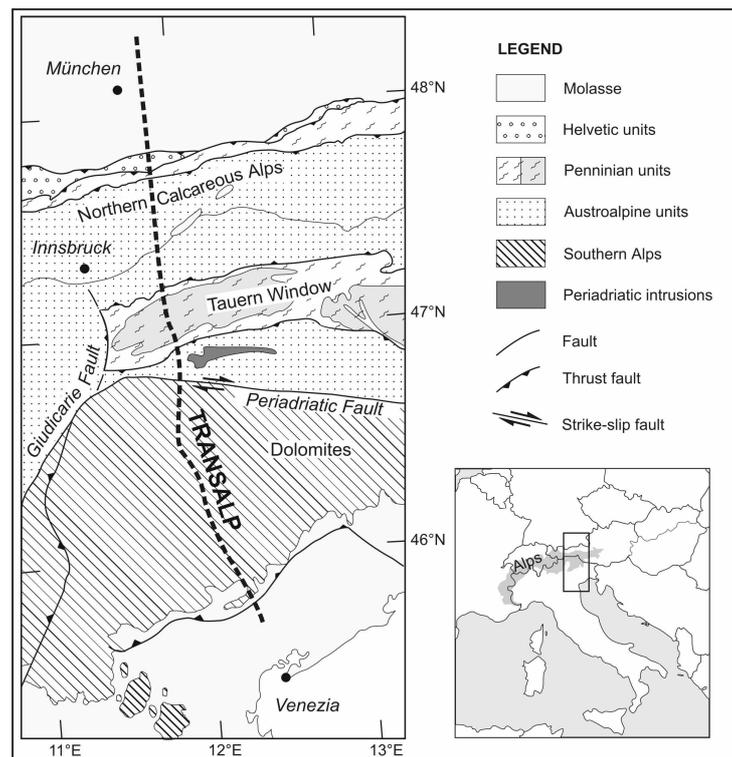


Abbildung 3.1: Tektonische Karte der Ostalpen mit Lage des TRANSALP- Profils.

den in Ergänzung zur Geophonauslage von 3-Komponenten- Seismometern aufgezeichnet (TP4 *Mohokartierung*, TP5 *Aktive Tomographie* und TP6 *Seismotektonik und Erdbeben-tomographie*; siehe Abb. 3.2). Während die Stationen aus TP4 und TP5 zeitgleich mit den aktiven Messungen registrierten, um zusätzliche Informationen über die krustale Geschwindigkeitsverteilung und die Mohostruktur zu erhalten, verblieben die Geräte aus TP6 über einen längeren Zeitraum (bis zu 12 Monate) im Feld. Vorrangiges Ziel war dabei die Aufzeichnung von regionalen und teleseismischen Erdbeben, die die Basis für die Auswertung in der vorliegenden Arbeit und eine tomographische Studie an der ETH Zürich bildet.

Gemeinsam versuchen die Projekte, mithilfe der in verschiedenen Tiefenbereichen bestimmten seismischen Parametern Antworten auf folgende Fragen zu finden:

- Wie weit und in welcher Tiefe erstreckt sich die Europäische Lithosphäre im Ostalpin/Südalpin nach Süden?
- Wo befindet sich die Grenze zwischen Europäischer und Adriatischer Lithosphäre?
- Wie ist der detaillierte Aufbau im Kollisionsbereich? Kam es bei der Orogenese zu Krusten/Lithosphärenverdopplung?

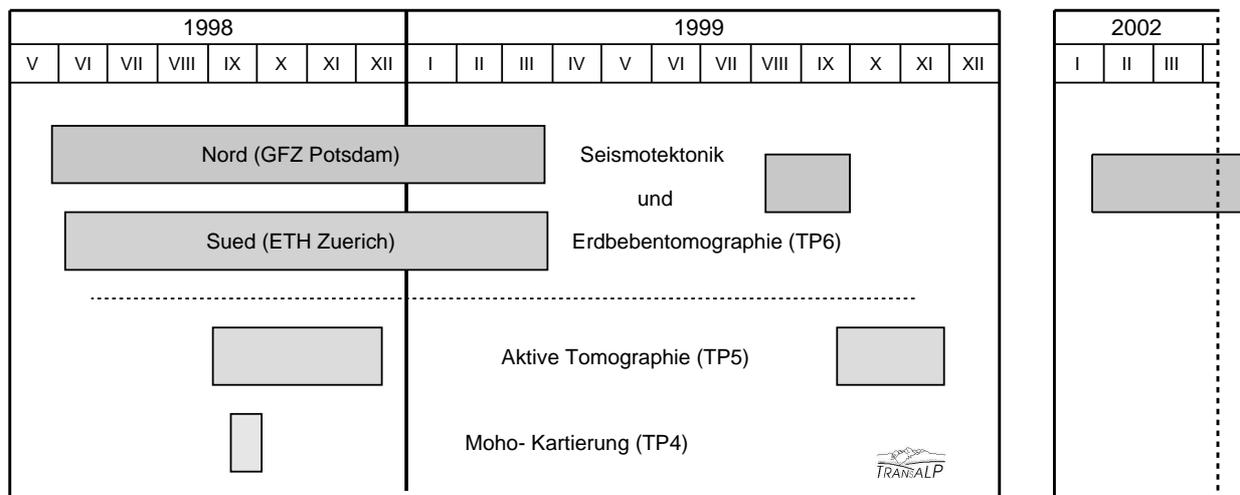


Abbildung 3.2: Überblick der seismologischen Feldexperimente mit 3-Komponenten-Stationen im Rahmen von TRANSALP. Die Zusatzmessungen des TP6 im Herbst 1999 und im Jahr 2002 wurden nur vom GFZ Potsdam durchgeführt und die Stationen dabei vorrangig im südlichen Teil installiert.

- Wie ist im besonderen die Topographie der Moho im Übergangsbereich von Europäischer zu Adriatischer Platte charakterisiert?
- Können postulierte große *Detachments* in den Nördlichen Kalkalpen und im Südalpin in die Tiefe verfolgt werden?

## Passives Experiment und Daten (TP6)

### Überblick

Die Konfiguration des temporären seismischen Netzes orientierte sich in erster Linie an den Anforderungen der Auswertemethoden (*Receiver Functions*, *SKS-Analyse*, *Tomographie*). Je nach Verfügbarkeit der Meßgeräte registrierten bis zu 60 Einheiten gleichzeitig in einem ca. 30 km schmalen Streifen um das Reflektionsprofil (s. Abb. 3.3). Diese Geometrie gewährleistete einen sehr engen Stationsabstand in Nordsüdrichtung (ca. 5 km im Mittel) und damit eine kontinuierliche Überdeckung der Übergänge zwischen den ostalpinen Hauptstrukturen. Parallel zur Reflektionsseismik resultierte für die *Receiver Functions* eine 2D-Tiefensektion entlang des 12. Längengrades.

Aus logistischen Gründen wurde das Netz während des Hauptexperimentes (Juni 1998-Mai 1999) in einen nördlichen und einen südlichen Teil getrennt. Aufbau und Betreuung der Stationen sowie die Datenaufbereitung im italienischsprachigen Gebiet übernahm die

ETH Zürich, unterstützt durch das OGS Trieste und die Uni Potsdam. Die Verantwortlichkeit im deutschsprachigen Teil lag bei GFZ Potsdam und LMU München.

Ein wesentlicher Unterschied betraf den Registriermodus: Die im Norden eingesetzten Datenlogger vom Typ *PDAS-100* registrierten kontinuierlich, während das Schreiben der Daten auf Festplatte bei den *M88*- Geräten im südlichen Teil von einem Trigger kontrolliert wurde. Nachteilig wirkte sich die Triggereinstellung bei den tiefperiodischen *SKS* Phasen aus mit der Folge, daß ein großer Prozentsatz der Daten verlörenging. Für einige

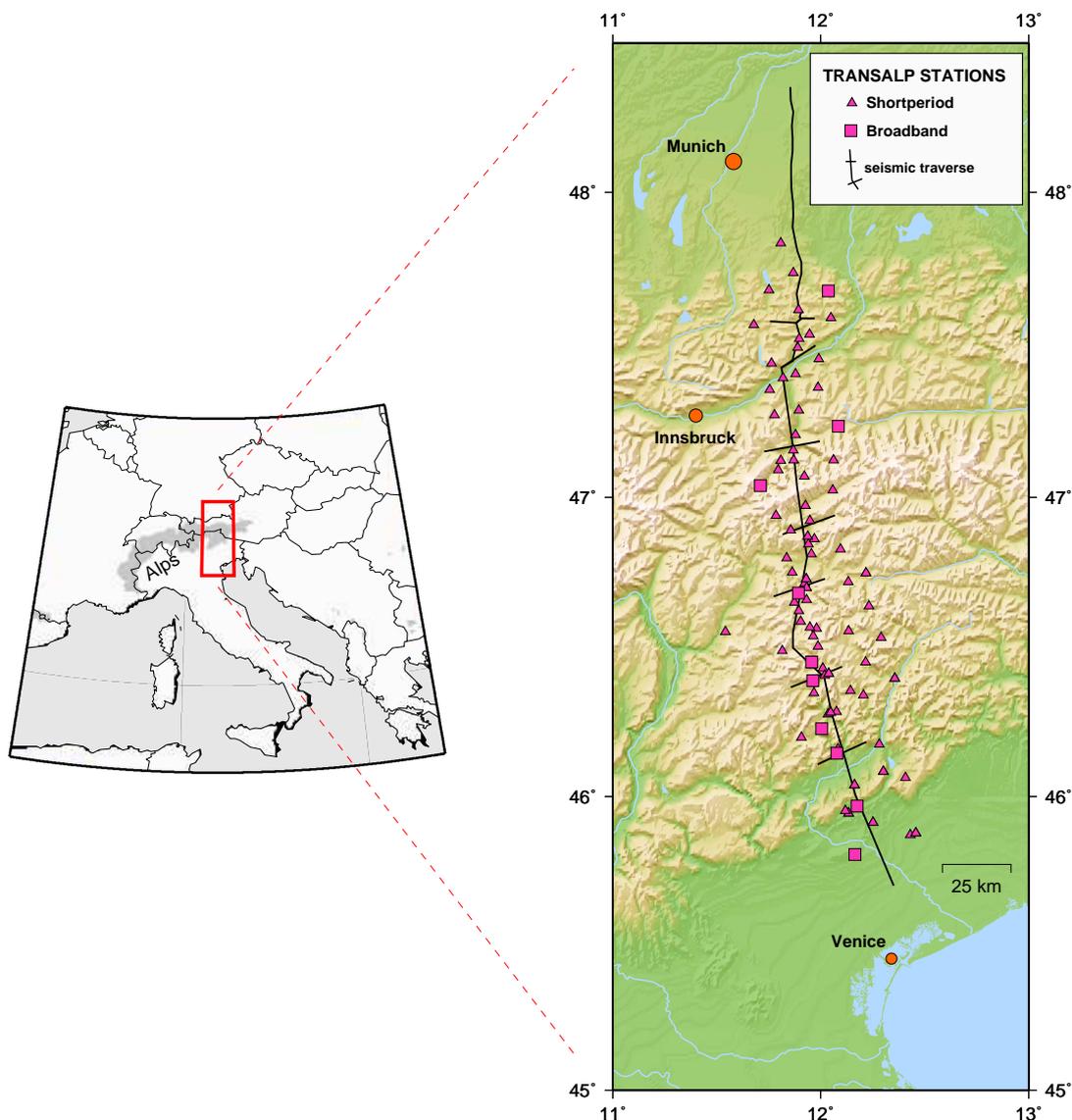


Abbildung 3.3: Lageplan der 3-Komponentenstationen des passiven seismischen TRANSALP Netzes (*TP6*). Die Registrierdauer der einzelnen Stationen variierte beträchtlich und betrug 2 – 12 Monate. Die 7 Breitbandstationen am südlichen Ende wurden im Februar 2002 installiert und setzen das eigentliche TRANSALP Experimente aus den Jahren 1998 und 1999 fort. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Wochen wurden 10 *M88-Logger* durch *Marslite*- Apparaturen ersetzt, die ebenfalls kontinuierlich aufzeichneten (s. auch Anhang A).

Differenzen ergaben sich gerätebedingt auch in der Abtastrate (100 *Hz* bzw. 62.5 *Hz*).

Alle Stationen waren mit GPS (*Global Positioning System*)- Antennen ausgestattet, die ein regelmäßiges Abgleichen der internen Uhr mit dem GPS- Zeitsignal ermöglichten. Die Stationskoordinaten wurden nicht per GPS bestimmt, sondern aufgrund der höheren Genauigkeit aus Meßtischblättern abgelesen.

Durch die Verzögerung der 2. Meßphase der Reflektionsseismik im Spätsommer 1999 ergab sich die Möglichkeit, noch einmal 27 Registriereinheiten von August bis September 1999 für das passivseismische Projekt zu nutzen. Sie wurden im zentralen und südlichen Abschnitt des Profils verdichtet aufgebaut, da die Auswertung bis dahin gezeigt hatte, daß der Bedarf an zusätzlichen Daten dort am größten war. Dreizehn der früheren Stationspunkte wurden dabei wiederbesetzt, die restlichen Geräte wurden an neu gewählten Standorten und meist autark mit Akku oder Solarpanel betrieben. Während letztere nur ca. 7 Wochen lang registrierten, konnten an einigen wenigen Stationen über einen Zeitraum von insgesamt 12 Monaten Daten gesammelt werden. Die Registrierdauer der meisten Stationen lag zwischen diesen Extremwerten und war durch Standortwechsel und die nicht durchgängige Verfügbarkeit einiger *Datenlogger* eingeschränkt.

Anfang Februar 2002 begann ein ergänzendes Experiment mit 7 Breitbandseismometern (Typ *STS2*), die im südlichsten Profilschnitt installiert wurden (Abb. 3.3). Die Messungen dauern zur Zeit noch an (Stand: Dezember 2002) und sollen bis mindestens Anfang 2003 fortgesetzt werden. Registrierungen bis Oktober 2002 finden in der vorliegenden Arbeit Berücksichtigung.

Für den nördlichen Teilarray folgt eine ausführlichere Beschreibung der Feldmessungen und Datenbearbeitung, um dem damit verbundenen zeitlichen Aufwand gerecht zu werden.

### **Feldexperiment und Datenbearbeitung**

Im Mittel standen 30 PDAS-100 (Teledyne Geotech [1989]) Registriereinheiten mit kurzperiodischen 3- Komponenten- Seismometern vom Typ *Mark L-4 3D* aus dem Gerätepool des GeoForschungszentrum Potsdam zur Verfügung. 3 *Mark*-Seismometer wurden für einige Monate durch *STS2*- Breitbandsensoren ersetzt. Soweit wie möglich wurden Stationspunkte mit Netzstromanschluß gewählt, um kontinuierliche Energieversorgung zu gewährleisten und zu verhindern, daß der Wartungszyklus der Stationen von der Energieversorgung abhing und verkürzt werden mußte. Bei der vorgegebenen Festplattenkapa-

zität von 1 GByte und einer gewählten Abtastrate von 100 Hz ergab sich eine maximale Registrierdauer von 20 Tagen. Einzelne Stationen mußten jedoch mangels Alternative mit Batterien und Solarpanelen betrieben werden und hatten infolge der auftretenden Energieprobleme eine höhere Datenausfallquote. Während des aktiven seismischen Experimentes im September 1998 wurde die Abtastrate vorübergehend auf 200 Hz erhöht, was den Betreuungszyklus auf 10 Tage verringerte und den zu verarbeitenden Datenstrom verdoppelte. Aus diesem Grund wurde die Datenzentrale für einige Wochen von Potsdam ins *Zillertal* in Österreich verlegt und ein zweites Fahrzeug zur Stationswartung eingesetzt. Ansonsten wurde die Feldarbeit von einem Team, bestehend aus 2 Mitarbeitern plus einem Fahrzeug, übernommen, die Datenverarbeitung erfolgte jeweils nach der Tour an einem PC im Geoforschungszentrum Potsdam. In den Wintermonaten Januar bis März 1999 und in der zweiten Meßkampagne von August bis September 1999 wurde die Abtastrate auf 50 Hz herabgesetzt. Während des Winters waren einige abgelegene Stationen wegen der schwierigen Wetterverhältnisse über längere Zeiträume nicht erreichbar.

Nach dem Aufbau des Stationsnetzes bestand die routinemäßige Feldarbeit im wesentlichen aus dem Wechseln der Festplatte vor Ort, der Datensicherung und der Überprüfung der Funktionsfähigkeit der gesamten Registrierapparatur. Die seismischen Daten wurden von den Feldplatten ausgelesen, auf portablen 20 GByte- Platten zwischengespeichert und später in Potsdam auf DAT-TAPES gesichert. Eine Wartungstour dauerte im Durchschnitt 7 Tage.

In Potsdam erfolgte die Weiterverarbeitung der Datenmengen. Sie wurden auf Vollständigkeit und Zeitfehler kontrolliert, in zeitsortierte Verzeichnisse geschrieben und auf CD-ROM gebrannt (Details zum *processing* siehe Asch et al. [1996]). Das Signal/Störverhältnis wurde parallel analysiert, um die Wahl des Stationsortes zu überprüfen und gegebenenfalls zu verändern. Die vollständige Rohdatenbasis des passiven seismologischen TRANSALP-Projektes TP6, nördlicher Teil, umfaßt  $\sim 400$  GByte auf 815 CD-ROM im *PDAS*- Format. Zusätzlich wurden alle Daten auf insgesamt 200 DAT-TAPES gesichert und archiviert. Zur Zeit werden sie ins *GEOFON*- Archiv integriert, so daß sie in wenigen Monaten *online* verfügbar sein werden.

Aus verschiedenen Erdbebenkatalogen wurden lokale, regionale und teleseismische Ereignisse herausgesucht und die dazugehörigen Zeitfenster aus den Registrierungen ausgeschnitten. Die Seismogramme der Teilprojekte TP4 und TP5 wurden dabei hinzugefügt. Um einen homogenen Datensatz zur Verfügung zu haben und den Datenaustausch mit den Arbeitsgruppen in München und Zürich zu erleichtern, wurden die Dateien in *MSEED*-Format umgewandelt. Es ergeben sich schließlich 18 Ereignis- CD's mit Daten von lokalen und regionalen Beben sowie 26 mit teleseismischen Registrierungen. Die Länge der Zeitfenster beträgt jeweils 60 *min* bei den Fernbeben und 30 *min* bei den übrigen Ereignissen.

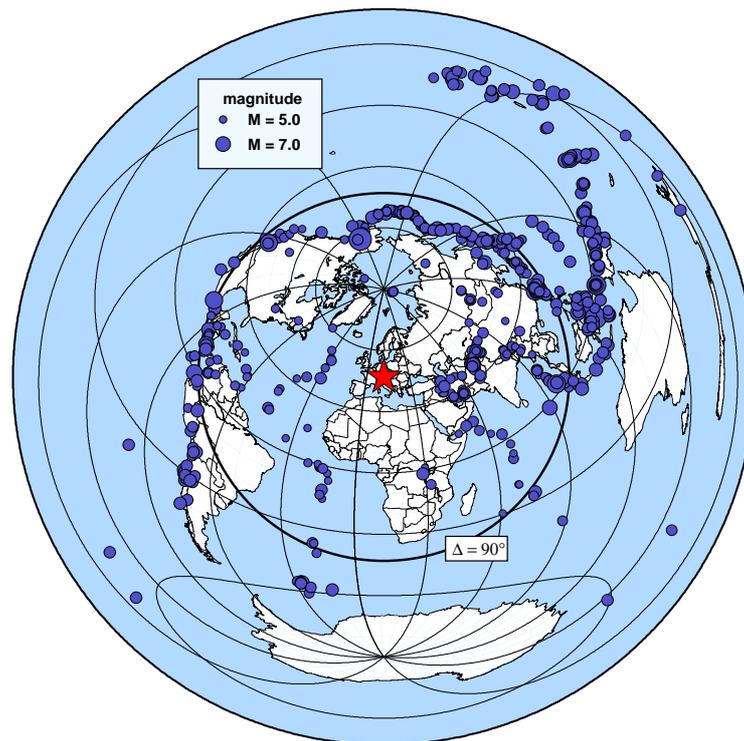


Abbildung 3.4: Verteilung der mit dem TRANSALP-Netz aufgezeichneten und ausgeschnittenen teleseismischen Ereignisse.

## Daten

Die erste Auswahl der Fernbeben erfolgte anhand des Magnitudenkriteriums. Für Epizentralentfernungen  $\Delta \sim 30^\circ - 97^\circ$  wurden Ereignisse mit Magnitude  $M \geq 5.0$  berücksichtigt, für Distanzen  $> 97^\circ$  galt  $M \geq 5.7$ .

Bei der *Receiver Functions- Methode* liegt der relevante Entfernungsbereich der verwendeten *P*- Phasen zwischen ca.  $30^\circ$  und  $97^\circ$ . Für kleinere Entfernungen ist die *P*- Wellenform wegen der Phasenübergänge im Oberen Mantel in  $410\text{ km}$  und  $660\text{ km}$  Tiefe komplex, welche zu einer zeitlichen Überlagerung von Signalen mit deutlich verschiedenen Strahlparametern führen. Für die jenseits von  $97^\circ$  auftretende *Pdiff*- Phase ist der Einfallswinkel zu klein (s. Abb. 4.3). Durch Einbeziehung der an der Oberfläche reflektierten *PP*- Phase erweitert sich der nutzbare Bereich auf bis ca.  $150^\circ$  Herdentfernung.

Der typische Entfernungsbereich für *SKS*- und *SKKS*- Phasen liegt bei  $88^\circ - 150^\circ$ . Darunter ist der zeitliche Abstand zur *S*- Phase zu gering.

Anhand von Qualitätsabschätzungen wie der Berechnung des Signalstörverhältnisses und der visuellen Kontrolle am Bildschirm wird der Datenumfang weiter reduziert. Übrig bleiben schließlich 138 *RF*- und 36 *SKS*- Ereignisse als Grundlage der Auswertung (siehe Anhang B).

Die Verteilung der mit TRANSALP- Stationen registrierten Beben wird von der Seismizität an den Rändern der Pazifischen Platte dominiert (Abb. 3.4). Die Subduktionszonen vor den Aleuten, Japan und Südamerika liegen relativ zum Stationsnetz in N-, NE- und W- Richtung, in einem Entfernungsbereich zwischen ca.  $80^\circ$  und  $100^\circ$ . Aus südlichen Azimuthen hingegen ist die Ereignisdichte sehr gering.

Eine möglichst gleichmäßige Abdeckung der verwendbaren Azimuth- und Entfernungsintervalle hat einen positiven Einfluß auf die Robustheit bzw. Eindeutigkeit der Ergebnisse (s. spätere Kapitel). Durch zusätzliche Berücksichtigung von *PP*- Phasen bei der *RF*- Methode gelingt zumindest eine homogenere Entfernungsverteilung (Abb. 3.5). Das Schließen der Lücken im Azimuthbereich ist jedoch wegen der ungünstigen Bebenverteilung nicht möglich. Im Entfernungsbereich  $60^\circ - 97^\circ$  werden zum Teil sowohl *P*- als auch *PP*- Phase desselben Ereignisses benutzt.

Die analysierten *SKS events* stammen vorwiegend aus ENE und WSW. Wie sich herausstellt, fallen ihre Azimuthe ungefähr mit der Lage der mittleren *schnellen Achse* im Meßgebiet zusammen (s. Kapitel 6).

Die hohe Stationsdichte entlang des gesamten TRANSALP- Profils und die Registrieredauer von bis zu 12 Monaten schlagen sich in einer beachtlichen Anzahl auswertbarer Seismogramme nieder (Abb. 3.5, rechte Spalte). Durch die Ergänzungsmessungen 1999 und 2002 konnten Datenlücken im südlichen Bereich des Profils z.T. kompensiert werden. Es resultiert eine kontinuierliche Verteilung der Daten sowohl für die *RF*en als auch die *SKS* Analyse mit Maxima im Alpenhauptkamm bei ca.  $47^\circ N$ .

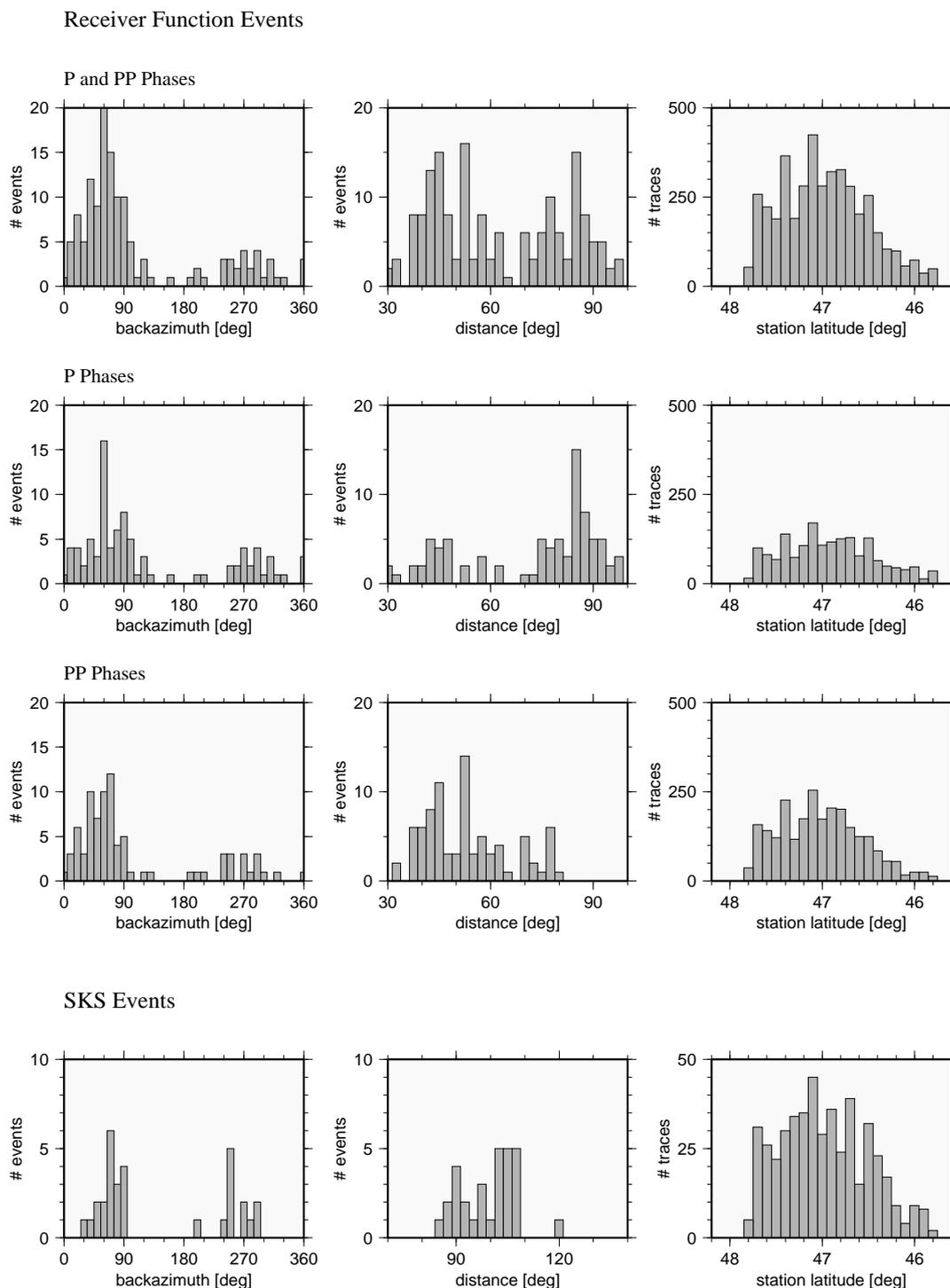


Abbildung 3.5: Die Verteilung der Ereignisse als Funktion von Backazimuth und Herdentfernung, getrennt aufgetragen für *P*-, *PP*- und *SKS*- Phasen. Die jeweils rechten Histogramme zeigen die Anzahl der registrierten Beben in Abhängigkeit der Stationslatitud und sind damit ein Maß für die Datendichte entlang des Profils.

Für *PP*- Phasen entspricht die Entfernung dem Abstand zwischen dem Reflexionspunkt an der Erdoberfläche und der Station (also etwa der halben Epizentraldistanz).