

# Die interne Struktur von Subduktionszonen

## Das Zusammenspiel geophysikalischer Methoden ergibt ein detailliertes Bild

### Abstract

Geophysical research in subduction zones is based on bathymetric, seismic, magnetic, gravimetric measurement as well as numerical and analog modeling. Their combined interpretation leads to an image of the sub-surface and the dynamic processes related with subduction. They serve to classify the subduction type and to estimate fluid and mass transfer within the subduction complex. The top of the subducting oceanic plate can be imaged seismically, which could have practical implications for more precise earthquake hazard analysis in the areas investigated.

### 1 Einführung

Die wichtigsten Fragen für Geowissenschaftler, die sich mit konvergenten Plattengrenzen, also den Subduktionszonen, beschäftigen, lauten:

- I. Welcher rezente strukturelle Aufbau liegt vor, und wie kam es zu seiner Entstehung?
- II. Welches sind die derzeit aktiven geologischen, physikalischen, biologischen und chemischen Prozesse?
- III. Welche regionalen Unterschiede bestehen zwischen den verschiedenen Gebieten konvergenter Plattenbewegung?
- IV. Welche Folgen haben die typischen Phänomene wie Vulkanismus, Erdbeben und durch sie ausgelöste Tsunamis für die ansässige Bevölkerung und wie lässt sich eine verlässlichere Frühwarnung erreichen?

Die Komplexität dieser Fragen erfordert den Einsatz interdisziplinärer Forschung. Die Methoden, die seitens der Geophysik zu ihrer Beantwortung beitragen, werden im Folgenden beschrieben (Kapitel 2).

#### 1.1 Klassifizierung von Subduktionszonen

Für die morphologische Struktur einer Subduktionszone ist entscheidend, ob sie vorwiegend akkretive oder erosive

Eigenschaften hat. Im akkretiven Fall kommt es zur frontalen, keilförmigen Anhäufung von Sedimenten, dem Akkretionskeil. Im erosiven Fall ist solch ein Keil nur klein oder kaum vorhanden. Das kann daran liegen, dass der Sedimenteintrag sehr gering ist, oder auch daran, dass die gesamten Sedimente subduziert werden. Die akkretiven Subduktionszonen, die an etwa 15 % aller konvergenten Plattengrenzen auftreten, sind meistens durch eine geringe Konvergenzrate und eine flache abtauchende ozeanische Platte ( $1-2^\circ$ ) mit glatter Oberfläche gekennzeichnet.

Die erosiven Zonen mit einem Anteil von 50 % haben eine höhere Konvergenzrate und eine steiler abtauchende Platte ( $8-11^\circ$ ), oft aufgerauht durch Rücken und Seamounts. Die übrigen 35 % der Subduktionszonen weisen sowohl akkretive als auch erosive Merkmale auf [1].

Die Gebiete, in denen die Abteilung *Marine Geodynamik* des GEOMAR aktive Subduktionszonenforschung betreibt, erstrecken sich zum Beispiel entlang der Westküste des amerikanischen Kontinents (Abbildung 1). Die dortigen Subduktionszonen bieten eine reiche Vielfalt bezüglich ihrer tektonischen Struktur und Entwicklung. Sie umfassen das gesamte oben genannte Spektrum und lassen sich durch weitere Merkmale wie Plattenalter und Sedimentauflast unterscheiden.

### 2 Untersuchungsmethoden

#### 2.1 Bathymetrie

Wer ein unbekanntes Gebiet erforschen will, der verschafft sich zunächst am besten durch kartografische Vermessung einen Überblick. Auch wenn diese Vorgehensweise so alt ist wie die Forschung selber, so ist sie längst nicht überholt und auch auf den submarinen Raum anwendbar. Eine Kartierung des

Meeresbodens mit dem Fächerlotsystem wird deshalb auf modernen Schiffen standardmäßig durchgeführt. Diese Kartierung ist keineswegs so oberflächlich, wie sie auf den ersten Blick erscheint, denn die Morphologie gibt auch Einblick in die Prozesse, die zu ihrer Entstehung geführt haben. Ein Beispiel dafür ist die bathymetrische Kartierung bereits subduzierter Seamounts. Eine genauere Beschreibung dieses Phänomens befindet sich im Artikel *Hochauflösende Bathymetrie* (S. 278 im vorliegenden Heft).

#### 2.2 Seismik und Seismologie

Das wichtigste Werkzeug zur Erkundung der Struktur des tieferen Untergrundes ist die Seismik. Dabei kommen sowohl Steilwinkel- als auch Weitwinkelseismik zur Anwendung.

Die Steilwinkelseismik misst die Laufzeit elastischer Wellen von der Oberfläche bis zu Grenzflächen in der Tiefe und liefert ein hochauflösendes Bild der tektonischen Strukturen. Aus den Daten der Weitwinkelseismik ergibt sich durch inverse Modellierung des Strahlenverlaufs eine Geschwindigkeits-Tiefenbeziehung. Aus ihrer Kombination lässt sich mit einigem numerischen Aufwand ein Tiefenprofil erstellen. Daraus wiederum kann mit Hilfe des sogenannten *Section Balancing* die Ursprungslage deformierter Bereiche rekonstruiert werden (Abbildung 2).

Anhand der Längendifferenz zwischen Ursprungslage und dem im Laufe der Subduktionsvorgänge deformierten Abschnitt kann bei bekannter Konvergenzrate das Alter eines Akkretionskeils bestimmt werden. Für den dargestellten Profilausschnitt der Subduktionszone vor Alaska ergibt sich aus der Verkürzung um 5,1 km eine Dauer der bisherigen Deformation von circa 0,25 Millionen Jahren [2]. Des Weiteren bedeutet eine lückenlose Rekonstruktion, dass die strukturelle In-

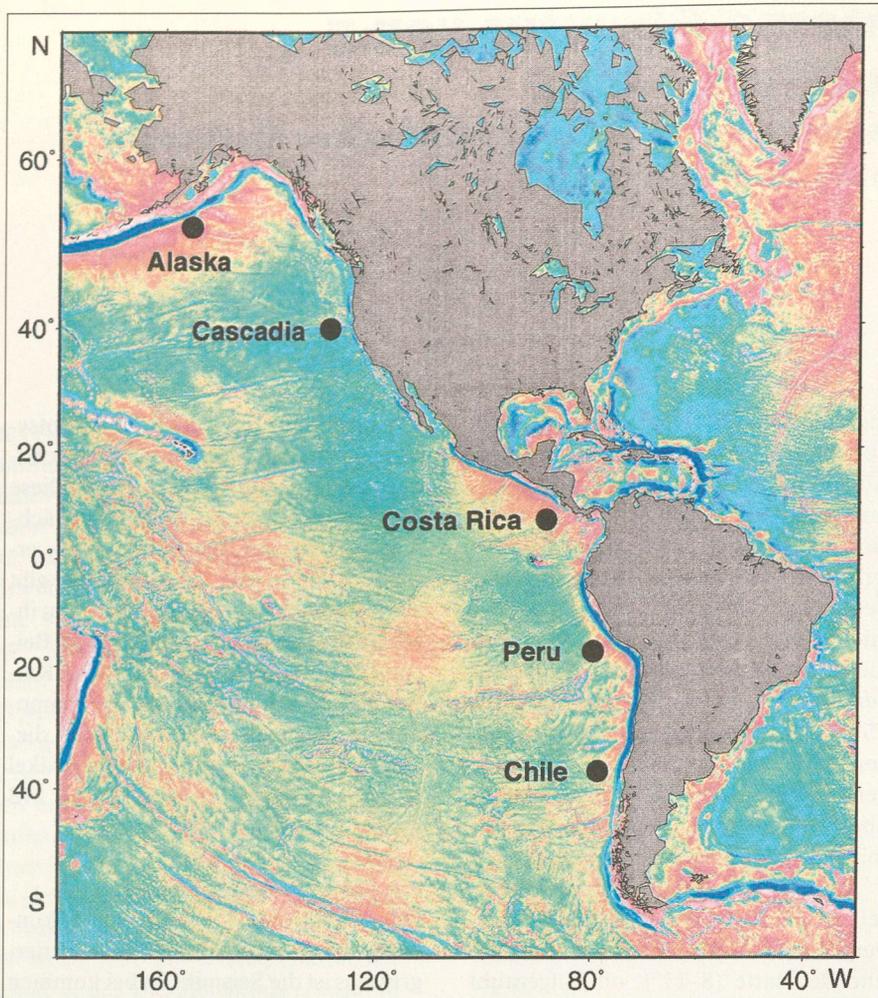


Abb. 1. Schwerpunktgebiete geophysikalischer Subduktionszonenforschung am GEOMAR. Farblich hinterlegt ist die Freiluftschwere aus der Satellitengravimetrie (nach [4]). Blaue Farben markieren negative Schwereanomalien, rote Farben positive Anomalien. Deutlich zeichnen sich die Tiefseegräben mit negativen Anomalien ab.

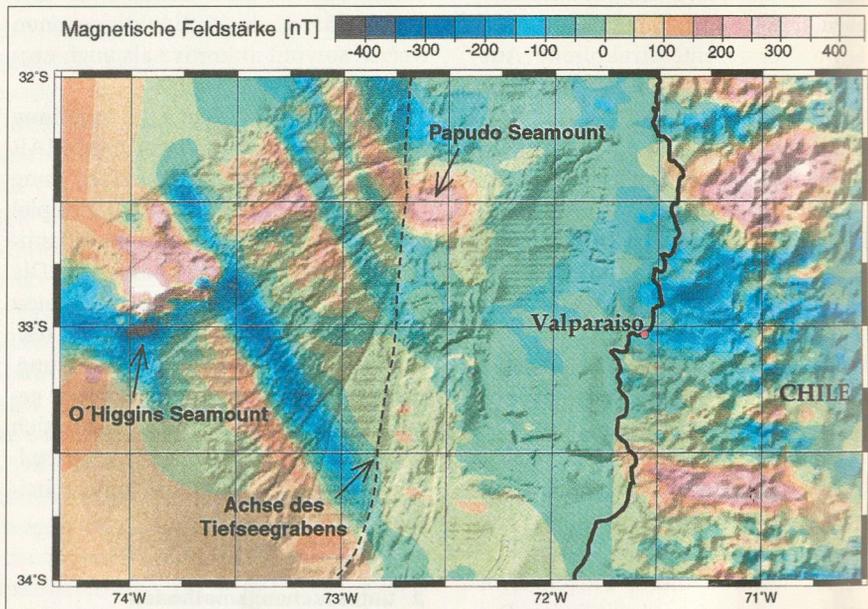


Abb. 3. Bathymetrie bzw. Topographie (schattiert) und Magnetik (farbig) des Subduktionskomplexes vor Chile. Die Seedaten wurden während des CONDOR-Projekts gesammelt [9], die Landdaten stammen vom SERNAGEOMIN (Chilenischer Geologischer Dienst).

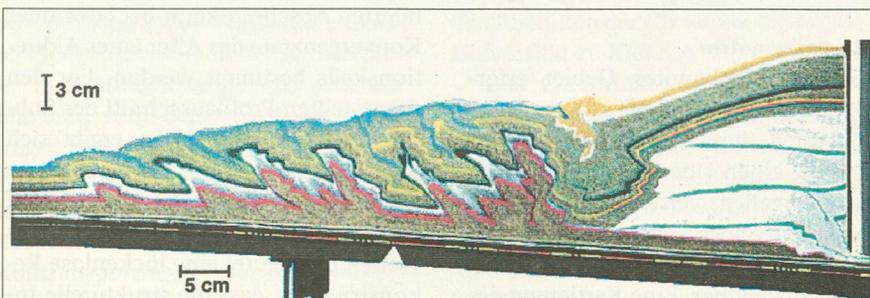


Abb. 4. Resultat einer Modellierung der Sedimentakkretion im Sandkasten. Geringe basale Reibung und ein nahezu geschlossenes Subduktionsfenster führen zu einer frontalen Akkretion.

terpretation der seismischen Tiefensektion konsistent war.

Die Geschwindigkeits-Tiefenbeziehung der Weitwinkelseismik ist auch Basis weiterer Betrachtungen: Aus ihr können, gestützt durch empirische Ergebnisse aus Bohrkernen, Dichte- und Porositätsverteilung im Untergrund abgeleitet werden. Diese Kenntnisse sind nötig, um den Massenhaushalt der akkretierten Sedimente abzuschätzen, ihren Fluidgehalt zu quantifizieren und Transportvorgänge zu verfolgen [3]. Sie bilden damit wichtige Randbedingungen in numerischen Modellen.

Die natürliche hohe Seismizität in Subduktionszonen wird ebenfalls genutzt: Die Lokationen von Erdbebenherden markieren die Reibungspunkte zwischen ozeanischer und kontinentaler Lithosphäre und damit die Grenze der abtauchenden Platte.

### 2.3 Gravimetrie und Magnetik

Für eine globale Übersicht der gravimetrischen Anomalien nutzt man Satellitendaten. Negative Schwereanomalien über den Tiefseegräben, verursacht durch das Absinken der relativ schweren ozeanischen Platte, und positive Anomalien über den akkretierten und aufgewölbten Sedimenten sind darin deutlich zu erkennen (Abbildung 1). Ihre räumliche Auflösung ist allerdings zu gering für die Interpretation regionaler und lokaler Strukturen, die Schiffsmessungen erfordern.

Auch die Magnetik wird zum Gewinn detaillierter Information vom Schiff aus durchgeführt. Die magnetischen Streifenmuster der basaltischen Gesteine der ozeanischen Kruste waren in den 60er Jahren der wichtigste Beweis für die Richtigkeit der Theorie der Plattentektonik. Sie erlauben auch eine Bestimmung des Alters sowie der Bewegungsrichtung der Platten. Des Weiteren spiegeln sich in den magnetischen Anomalien bathymetrische Strukturen wider. So können die erwähnten subduzierten Seamounts auch in der Magnetik erkannt und direkt mit der Bathymetrie korreliert werden, wie zum Beispiel der Papudo Seamount vor Valparaíso in Chile (Abbildung 3). Die Art der Anomalie ist von Fall zu Fall unterschiedlich, zum Beispiel kreisförmig oder dipolartig, und kann Rückschlüsse auf die Petrologie des Seamounts geben.

Es kommt jedoch auch vor, daß Magnetik und Topographie sich nicht decken. Dieser Fall tritt vor Costa Rica

auf: Eine in der bathymetrischen Karte klar erkennbare Grenze zwischen glattem und stark zerklüftetem Meeresboden wird dort durch magnetische Anomalien, die räumlich versetzt sind, nicht erkannt [5]. In solchen Fällen ist es schwierig, eine exakte Grenze der subduzierenden Platte, in diesem Fall der Cocosplatte, zu definieren.

### 2.4 Analoge und numerische Modellierung

Modellierungen haben einen Vorteil: Sie können Abläufe veranschaulichen, die man in der Natur nur selten oder nie direkt zu sehen bekommt. Gleichzeitig ist dies auch ihr größter Nachteil, der ihre Aussagefähigkeit begrenzt. Sie haben jedoch dann ihren Wert, wenn sie zur Ergänzung vorhandener Methoden eingesetzt werden und das Vorstellungsvermögen über die ablaufenden Prozesse verbessern. Auch ist eine Rekonstruktion von Paläoabläufen nur dann als logisch anzusehen, wenn sie durch ein Vorwärtsmodell bestätigt werden kann. Dabei ist von Vorteil, daß die Modellierung im Gegensatz zur Momentaufnahme einer geophysikali-

schen Messung ein zeitabhängiges Bild liefern kann.

Der Massen- und Fluidtransport sowie der Spannungszustand in Subduktionszonen gehorchen physikalischen Gesetzen, die numerisch simuliert werden können. Wonach richtet sich, ob die ankommenden Sedimente subduziert oder akkretiert werden? Wo findet die Sedimentanlagerung bevorzugt statt? Wächst der Keil nur im vorderen Abschnitt oder verdickt er sich auch durch Unterschiebung? An welchen Stellen kommt es zu Brüchen im Gestein, und welche Rolle spielen dabei die Fluide?

Eine sehr anschauliche Darstellung der tektonischen Vorgänge bieten analoge Modellierungen im Sandkasten [6]. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis eines solchen Experiments. Eine schieb- und neigbare PVC-Platte stellt das ozeanische Basement dar und erhält durch einfache Manipulation unterschiedliche basale Reibung. Sie wird mit Sand bestreut, der die Tiefseesedimente repräsentiert. Die kontinentale Kruste, gegen welche die Akkretion stattfindet, wird durch dicht gepackten

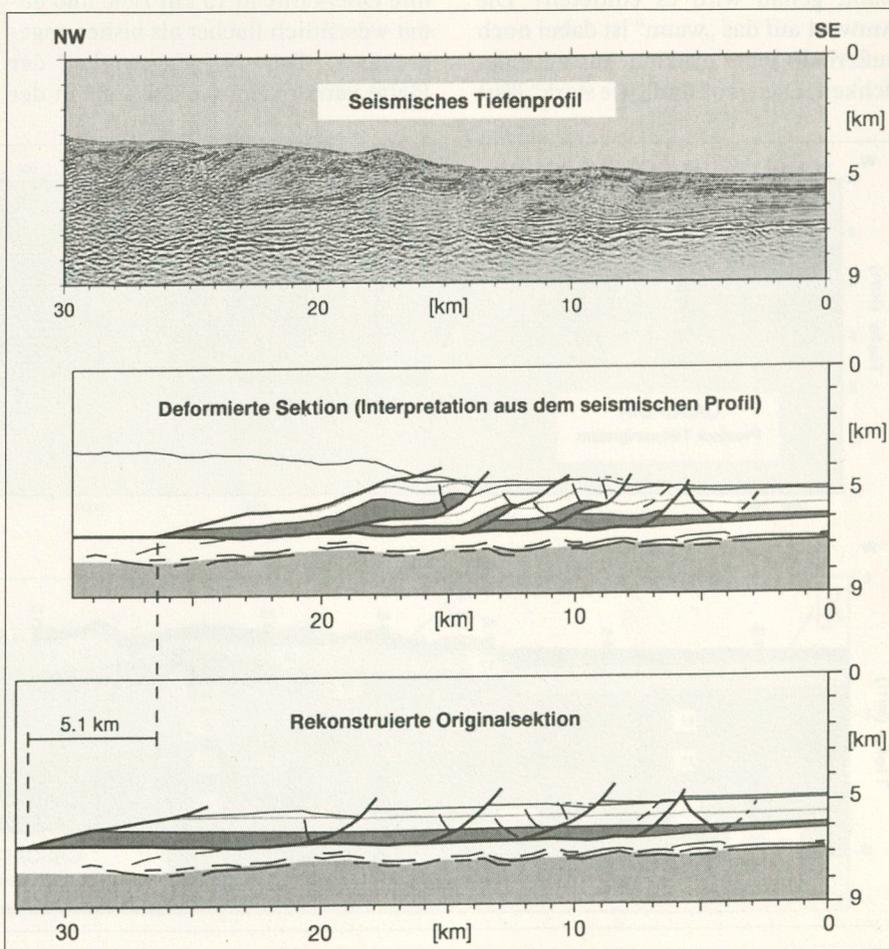


Abb. 2. Rekonstruktion des undeforzierten Zustands eines Akkretionskeils aus einem seismischen Tiefenprofil, hier am Beispiel eines Profilausschnitts vor Alaska [2].

Sand oder stärker kohäsives Material erzeugt. Farbige Sandschichten dienen zur Sichtbarmachung der Deformation. Die Bildung eines langgestreckten Keils mit frontaler Akkretion der Sedimente in mehreren Schuppen (wie in Abbildung 4) entsteht bei geringer basaler Reibung. Wird sie erhöht, so kommt es stattdessen zu Unterschiebungen [7].

### 3 Ergebnisse aktueller Forschungsprojekte

Die Cascadia-Subduktionszone entlang der amerikanischen Westküste vor Oregon und Washington gehört zum akkretiven Typ. Wegen der geringen Beben-tätigkeit in den letzten 300 Jahren war der Verlauf der abtauchenden Platte allerdings nicht besonders gut bekannt. Doch gerade wegen der relativen seismischen Ruhe und zusätzlichen Dokumentationen über sehr große Erdbeben in der Vergangenheit [8] ist die Lage dort bedrohlich. Ein Beben in naher oder ferner Zukunft scheint sicher. Wie stark wird es sein? Wo wird es sein Zentrum haben? Und wann genau wird es eintreten? Die Antwort auf das „wann“ ist dabei noch außerhalb jeder exakten Aussagemöglichkeit. Das „wo“ und „wie stark“ lässt

sich schon eher bestimmen, wenn man den Verlauf der Plattengrenzen kennt.

Die Intensität der Erschütterung an der bewohnten Erdoberfläche ist dabei sowohl von der Tiefe und Lage des Bebenherdes als auch von der Größe der vorher aufgebauten Spannungen im Gestein abhängig.

Im Frühjahr 1996 wurde während einer Fahrt mit dem Forschungsschiff SONNE und in Zusammenarbeit mit dem United States Geological Survey (USGS) die Cascadia Subduktionszone bathymetrisch, reflexions- und refraktionsseismisch untersucht [9]. Seismisch zeigten sich Verwerfungen im Akkretionskeil, die bis auf das ozeanische Basement reichen (Abbildung 5). Sie lassen darauf schließen, dass die gesamten Sedimente akkretiert und nicht zusammen mit der ozeanischen Platte subduziert werden.

Eine andere Besonderheit sind seewärts einfallende Strukturen im Keil. Sie sind von anderen Orten bisher selten bekannt und nicht einfach zu erklären. Als weiteres Ergebnis konnte die abtauchende ozeanische Platte kartiert werden. In Küstennähe liegt ihre Oberkante in 13 km Tiefe und damit wesentlich flacher als bisher angenommen. Der Neigungswinkel der Platte variiert von 0,5° bis 1,5° in der

Nähe des Grabens bis 3,5° weiter landwärts.

Gegenüber Cascadia ist entlang der chilenischen Küste nur ein sehr kleiner Keil ausgebildet. Diese Subduktionszone, 1995 Ziel interdisziplinärer Forschungsprojekte [10], gilt als erosiv. Der Sedimenteintrag vom Land ist sehr gering, und der größte Teil der Tiefseesedimente wird subduziert. Ein äußerst interessantes Phänomen besteht darin, dass sich die Neigung der abtauchenden Platte in einzelnen Segmenten entlang des Peru-Chile Grabens stark ändert. Stellen flachen Einfalls korrespondieren dabei mit fehlendem quartären andinen Vulkanismus auf dem Kontinent.

Welche Ursachen haben die Segmentgrenzen? Stehen sie in Zusammenhang mit der Subduktion von ozeanischen Rücken inklusive ihrer Seamounts wie zum Beispiel des Juan-Fernández-Rückens vor Valparaíso, zu dem der O'Higgins Seamount gehört (Abbildung 3)?

Viele Fragen bleiben bestehen und die Forschungsfahrten und -projekte, die zu ihrer Klärung führen sollen, werden weitere Fragen aufwerfen. Das neueste Geophysik-Projekt am GEOMAR beschäftigt sich mit der Subduktionszone von Makran im Golf von

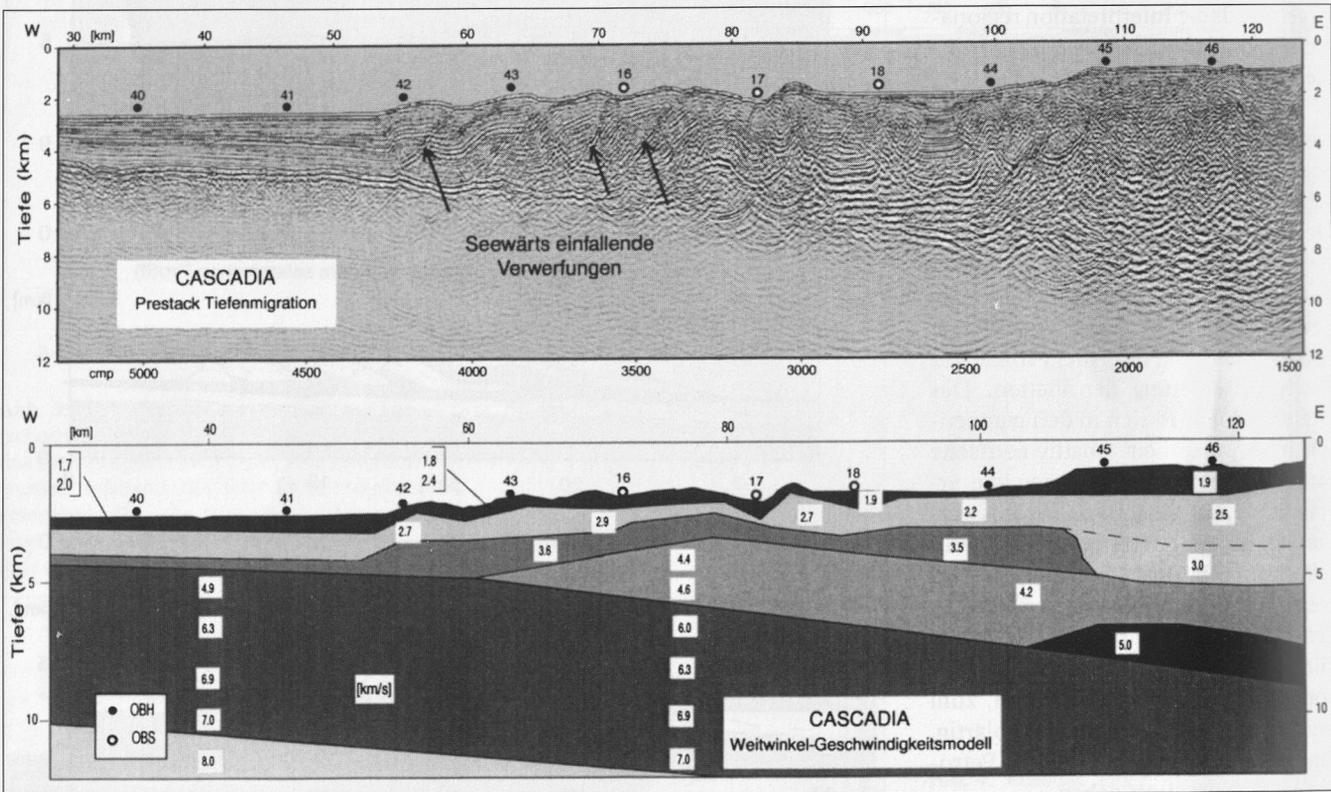


Abb. 5. Tiefenprofil und Geschwindigkeitsmodell aus einem seismischen West-Ost-Profil der Cascadia-Subduktionszone vor Washington. Auffallend sind die seewärts einfallenden Störungen im vorderen Teil des Keils. Die Obergrenze der ozeanischen Platte ist durch Geschwindigkeiten über 5,5 km/s markiert.

Oman, die durch die größte Sedimentzufuhr weltweit und starke Akkretion charakterisiert ist. Auf die Einzelheiten darf man gespannt sein – und auf Über- raschungen gefasst.

Die Subduktionszonen sind und bleiben somit ein spannendes Feld für die geophysikalische Forschung, vor allem auch im Austausch mit ihren Nachbardisziplinen.

#### Literatur

[1] R. v. Huene & D. Scholl: Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust; *Rev. Geophys.* 29/3 (1991) 279–316.  
[2] R. v. Huene, D. Kläschen, M.-A. Gutscher & J. Fröhn: Mass and fluid flux during accretion at the Alaska Margin; *Geol. Soc. Am. Bull.*, im Druck.  
[3] J. Fröhn: Tektonik und Entwässerung

des aktiven Kontinentalrandes südöstlich der Kenai-Halbinsel, Alaska; Dissertation (1995), Univ. Kiel, 93 S.

[4] D. T. Sandwell & W. H. F. Smith: Global marine gravity from ERS-1, Geosat and Seasat reveals new tectonic fabric; *EOS Trans. AGU 73 Fall Meet. Suppl.* (1992) 133.

[5] U. Barckhausen: Bearbeitung und Interpretation seemagnetischer Meßdaten aus dem Pazifik vor der Küste von Costa Rica, Dissertation (1996), Univ. Göttingen, 131 S.

[6] N. Kukowski, R. von Huene, J. Malavieille & S. Lallemand: Sediment accretion against a buttress beneath the Peruvian continental margin as simulated with sandbox modelling; *Geol. Rundschau* 83 (1994) 822–831.

[7] M.-A. Gutscher, N. Kukowski, J. Malavieille & S. Lallemand: Behaviour of thrust wedges: Insights from high basal friction sandbox experiments; *Geology* 24 (1996) 135–138.

[8] K. Satake, K. Shimazake, Y. Tsuji & K. Uyeda: Time and size of a giant earthquake

in Cascadia inferred from Japanese tsunami records of January, 1700; *Nature* 379 (1996) 246–249.

[9] E. R. Flueh, M. Fisher, D. Scholl, T. Parsons, U. ten Brink, D. Kläschen, N. Kukowski, A. Trehu, J. Childs, J. Bialas & N. Vidal: Scientific teams analyze earthquake hazards of the Cascadia subduction zone; *EOS Trans. AGU 78* (1997) 153, 157.

[10] R. v. Huene, J. Corvalán, E. R. Flueh, K. Hinz, J. Korstgard, C. Ranero, W. Weinrebe and the CONDOR Scientists: Tectonic control of the subducting Juan Fernández Ridge on the Andean margin near Valparaiso, Chile; *Tectonics* 16, 3 (1997) 474–488.

#### Anschrift der Verfasser:

Dörte Mann, Dr. Nina Kukowski, Prof. Dr. Ernst R. Flueh, GEOMAR, Abteilung Marine Geodynamik, Wischhofstraße 1–3, D-24148 Kiel.