

5 ZYKLISCHE SEDIMENTATION

Bei der Betrachtung der Bearbeitungsergebnisse fällt auf, dass die Ablagerung der terrigenen Sedimente im Peru-Chile-Graben offensichtlich zyklisch erfolgt ist. Dieser Umstand wird weder von Bangs und Cande (Bangs et al., 1997), noch von Diaz-Naveas (Diaz-Naveas, 1999) erwähnt, die die von R/V CONRAD (1997) in diesem Gebiet gemessenen seismischen Daten bearbeitet haben. Auch die erste Auswertung der SPOC-Daten, dokumentiert im Fahrtbericht (Reichert et al., (1), 2002.) und bei Reichert (Reichert et al., (2), 2002), enthält noch keinen Hinweis auf dieses Phänomen. Deshalb wird der Untersuchung dieses Sachverhaltes das folgende Kapitel gewidmet.

Über zyklische Sedimentation und deren Ursachen liegen zahlreiche Publikationen vor, in denen bei lang-periodischen Zyklen eine Verbindung zwischen dem Sedimentationsmuster und astronomisch bedingten globalen Klimaveränderungen im Quartär hergestellt wird (Fischer, 1986, Fischer, 1998, Imbrie et al., 1992, Imbrie et al., 1993, Bender et al., 1994, Mix et al., 2003). Diese Klimaveränderungen können durch kosmische Strahlung verursacht werden (Marsh et al., 2000, Spötl et al., 2002). In einer Versuchsreihe über 16 Jahre hat man einen Zusammenhang zwischen der Strahlungsintensität und der Dichte der Wolkendecke hergestellt, wobei eine geringere Strahlung mit einer dünneren Wolkendecke korreliert, was eine höhere Temperatur zur Folge hat. Andererseits wird das Beryllium-Isotop ^{10}Be , vorhanden in pelagischen Sedimenten, als Maß für die Strahlungsintensität herangezogen. Marsh und Svenmark glauben, damit den Verlauf des kosmischen Strahlungseinfalls auf der Erde über die letzten 300.000 Jahre rekonstruieren sowie die Korrelation der Strahlung mit dem Temperaturverlauf über die letzten 200.000 Jahre nachweisen zu können.

Andererseits werden die globalen Klimaschwankungen auf die Variationen der Erdbahnparameter zurück, die eine Veränderung der Insolation und damit des Klimas bewirken (Milankovitch, 1941, Vail et al., 1991). Bei den sogenannten Milankovitch-Zyklen handelt es sich um periodische Änderungen der Erdumlaufbahn (Exzentrizität) mit Perioden von 95.000, 100.000, 120.000 und 410.000 Jahren (Berger et al., 1986), der Neigung der Erdachse mit Perioden von 29.000, 41.000 und 54.000 Jahren (Imbrie et al., 1980) und der Präzession der Erdachse mit Perioden von 19.000 und 23.000 Jahren (Berger et al., 1986).

Die zyklischen Variationen der Erdbahnparameter überlagern sich und führen zu den kurz- und lang-periodischen globalen Änderungen (Imbrie et al., 1993). Während im Nordatlantik, aber auch in Afrika und in den Monsungebieten die 41.000 bzw. die 19.000/23.000 Jahr-Perioden vorherrschen (Lamy, 1998), wurden die paläoklimatischen Verhältnisse in der Antarktis von dem 100.000 Zyklus bestimmt (Bender, 1994). Die Erforschung vor allem der kurz-periodischen Klimaschwankungen ist für das Verständnis der globalen paläoklimatischen Entwicklung während des Quartär von entscheidender Bedeutung (Broecker, 1998). Es sei darauf hingewiesen, dass neben den bereits erwähnten Milankovitch-Zyklen weitere kurz-periodische klimatische Variationen während der letzten Vereisungsphase in grönländischen Eiskernen nachgewiesen werden

konnten (Dansgaard et al., 1993). Nach Lamy (Lamy, 1998) konnten diese sogenannten Dansgaard-Oeschger-Zyklen in nordatlantischen Sedimenten gefunden werden, in denen sie als Abkühlungszyklen (Bond-Zyklen) mit Perioden zwischen 7.000- und 10.000 Jahren dokumentiert sind (Bond et al., 1993, Bond & Lotti, 1995). Einlagerungen von eis-transportiertem Material in den Sedimenten, die als Heinrich-Ereignisse bezeichnet werden (Heinrich, 1988, Bond et al., 1992) deuten auf das verstärkte Abschmelzen von Gletschern und Eisbergen am Ende der Bond-Zyklen hin.

5.1 Sedimentation im Peru-Chile-Graben

Die Nazca-Platte weist im Grabenbereich zwischen 36°S und 38°S ein Alter von ca. 30-33 Millionen Jahren auf (Cande et al., 1992, Cande et al., 1995). Sie ist mit einer dünnen Schicht (bis max. 150 m) pelagischer Sedimente bedeckt. Im trench wird diese Schicht von terrigenen Sedimenten überlagert, deren Mächtigkeit mit der geographischen Breite stark variiert. Dabei werden Werte bis zu 3.000 m erreicht, die im Gegensatz zu den in Abb. 5-1 gezeigten Darstellung stehen. Die Diskrepanz kann daher rühren, dass in dem gezeigten Längsschnitt die Sedimentmächtigkeit an einer anderen Stelle als bei den SPOC-Profilen ermittelt worden ist.

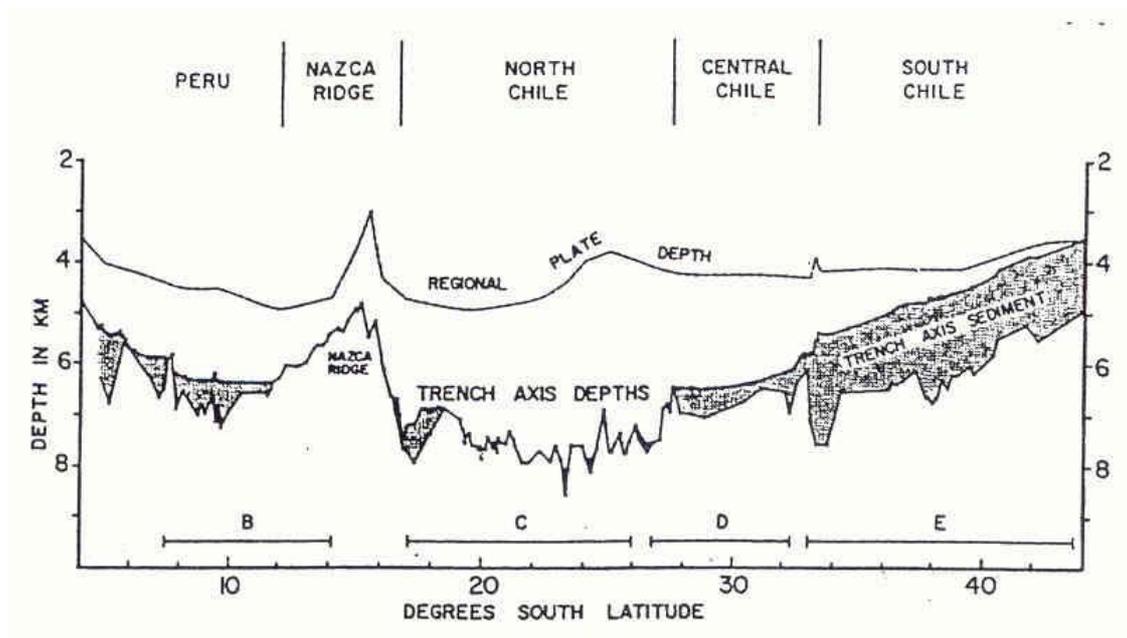


Abb. 5-1: Tiefenlage der Nazca-Platte und des trench mit Sedimenten (aus Schweller et al., 1981)

Die signifikante Änderung der Sedimentmächtigkeit bei etwa 33°S wird einerseits durch eine morphologische Schwelle verursacht (Schweller et al., 1981), die den Transport der Sedimente trotz des nach Norden geneigten Meeresbodens verhindert, andererseits durch

die klimatischen Bedingungen begünstigt. Während im Norden Chiles bis 27°S extrem arides Klima vorherrscht, findet man im Bereich Zentral-Chiles zwischen 31°S und 37°S semiarid-mediterranes Klima vor, das durch die saisonale Lage der Westwindzone gekennzeichnet ist. Das Gebiet südlich von 37°S liegt im ganzjährigen Einflußbereich der Westwindzone. Das Klima ist humid-temperiert, südlich von 42°S humid-kühl-temperiert. Die Niederschläge sind generell ergiebig, hängen aber im Einzelnen von der Höhenlage und Exposition zu den Frontalniederschlägen der Westwindzone ab (Lamy, 1998).

Die terrigenen Sedimente entstehen durch Verwitterung und/oder Erosion auf dem Kontinent und werden auf fluvialen und äolischem Wege an den Ablagerungsort im trench transportiert. Die Geologie des Herkunftsgebietes, die Verwitterungs- bzw. Erosionsintensität und die Art des Transportes sind die Faktoren, die primär die chemisch-physikalische Zusammensetzung, die Korngröße und das Volumen der Sedimente bestimmen (Lamy, 1998). Als Transportwege kommen in erster Linie die Flussläufe und deren unterseeische Fortsetzung, die Canyons, in Betracht.

Das Sedimentmaterial wird durch die Flüsse und Canyons in das Meer verfrachtet und vor den Canyon-Mündungen oder unterhalb derer, sofern der Canyon am Schelfabhang und nicht an dessen Basis austritt, abgelagert, wo sogenannte Schutt-Fächer gebildet werden. Derartige Fächer sind zwischen 33°S und 41°S gut ausgebildet und erstrecken sich weit in den trench hinein (Thornburg et al., 1990). Das deponierte Sedimentmaterial weist ausgeprägte Erosionsrinnen auf, die den Fächer in morphologisch unterschiedliche Hälften teilt und ein Relief von bis zu 400 m Höhendifferenz bilden. Südlich der Canyon-Mündung wird das Material aufgeschichtet und es entstehen Sedimentdecken mit einer relativ glatten Oberfläche. Das nördlich der Canyon-Mündung abgelagerte Material wird auf Grund der Strömung infolge des Süd-Nord-Gradienten stark erodiert und ist durch eine Vielzahl von Kanälen, Rinnen und Vertiefungen gekennzeichnet. Im trench kann das Material durch verschiedene Mechanismen, zu denen vorwiegend die Turbidite zu zählen sind, über größere Strecken transportiert und abgelagert werden (Talling, 2002).

Dabei entscheidet die Zusammensetzung und die Korngröße des zu transportierenden Materials über den Typ der Turbidite und über die Entfernung, die von gravitationsbedingten Sedimentströmen zurückgelegt wird. Die Massenströme klastischer Sedimente sind durch geringe Kohäsion gekennzeichnet und transportieren das Sedimentmaterial in Form von Debrites oder Olistostrome über kurze Strecken. Im Übergang von proximaler zu distaler Sedimentation lagern die durch hohe Dichte und Geschwindigkeit gekennzeichneten feinkörnig-sandigen Turbiditströme ihr Transportmaterial ab. Durch Aufnahme zusätzlichen Wassers nimmt die Dichte ab und es bilden sich Schlamm-Turbidite, die die Sedimente über große Strecken transportieren und im distalen Bereich ablagern. (Einsele, 1991).

Ausgelöst werden die Turbidite durch verstärkte Zufuhr terrigenen Materials, das auf Grund klimatischer Veränderungen anfällt, aber auch durch lokale Ereignisse wie Erdbeben oder andere Bodenerschütterungen. Der südliche Teil des Peru-Chile-Grabens (40°-50°S) ist durch eine Sedimentationsrate von 0,3-1,0 mm/a gekennzeichnet, die zu den Höchsten zählt, die an aktiven konvergenten Plattenrändern weltweit gemessen wurden (Kilian et al., 2003, Behrmann et al., 2001, Lamy et al., 2001). Die Ursache für diese Sedimentationsrate ist vermutlich in dem extrem humiden Klima und in den häufig auftretenden ausgedehnten Vergletscherungen des Kontinentalrandes entlang der

südlichen Anden zu sehen. Es muss an dieser Stelle betont werden, dass sich diese Sedimentationsraten auf den Schelfbereich beziehen und nicht im trench selbst gemessen wurden.

Die trench-Sedimente werden auf Grund der Konvergenz der Nazca-Platte am Kontinentalrand akkretiert und/oder mit der ozeanischen Platte subduziert (Kulm et al., 1977, Cloos et al., 1988, Ranero et al., 2000, von Huene et al., 2003, Clift et al., 2003).

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass die Sedimentation klimatischen Zyklen unterworfen ist (Clapperton, 1993, Markgraf et al., 2001, McCulloch et al., 2000, Lamy et al., 1998). Zur Bestimmung der Zyklen bedient man sich der Pollen-Analyse, die z. B. eine Rekonstruktion des Klimaverlaufs der letzten 21.000 Jahre im Gebiet der südlichen Anden (39°-40°S) ermöglichte (Markgraf et al., 2001) oder aber der Radiokarbonmethode, basierend auf dem Kohlenstoff-Isotop ^{14}C , das eine Bestimmung des Klimaverlaufs über die letzten 17.500 Jahre für den Bereich 40°-56°S erlaubte (McCulloch et al., 2000). Unter Anwendung der Radiokarbonmethode und mit Hilfe von Korngrößenbestimmung eines Bohrkerns (Bohrung GeoB 3375-1 bei 27,5°S am Schelfabhang), sowie mittels Atterberg-Separation und SediGraph-Analysen konnten paläoklimatische Veränderungen über den Zeitraum von 10.000-120.000 Jahren nachgewiesen werden, die mit der Verlagerung der Westwindzone zusammenhängen und die dem durch die Präzession der Erdachse verursachten Zyklus folgen (Lamy et al., 1998).

5.2 Zyklische Reflexionen in den SPOC-Daten

In Anbetracht der Tatsache, dass paläoklimatische Variationen einen signifikanten Einfluss auf die Ablagerung von Sedimenten haben können, liegt es nahe, die SPOC-Daten auf mögliche zyklische Reflexionen im Bereich der terrigenen Sedimente im trench zu untersuchen. Auf Grund der Quellencharakteristik (airgun array) und der Empfänger-Konfiguration (hydrophone pattern) ist bei der Akquisition der seismischen Daten nur die reflektierte P-Welle registriert worden. Als Ergebnis der Datenbearbeitung liegen folglich P-Wellen Sektionen vor. Diese Sektionen stellen die Reflexionskoeffizienten, konvolviert mit Nutz- und Störsignalen dar. Eine Änderung des Reflexionsbildes innerhalb einer Sektion ist auf die Abnahme der Energie mit zunehmender Signallaufzeit und auf Streuungseffekte, aber auch auf die Änderung von Gesteinsparametern wie chemische und petrophysikalische Zusammensetzung, Korngröße, Porenvolumen und Porenfüllung zurückzuführen.

Da es sich bei den SPOC-Daten um 2D Seismik handelt, muss mit Signalen in den Sektionen gerechnet werden, deren Reflexionspunkte ausserhalb der betrachteten x-z-Ebene liegen. Diese Signale lassen sich nicht von den in der Ebene reflektierten Nutzsignalen trennen (Wapenaar, 1992). Die Energie der reflektierten Nutzsignale, dargestellt durch die Größe der Amplituden, hängt von der Energie des ankommenden

Signals, der Impedanzänderung an der geologischen Schichtgrenze und dem Einfallswinkel ab, wobei die akustische Impedanz z wie folgt definiert ist:

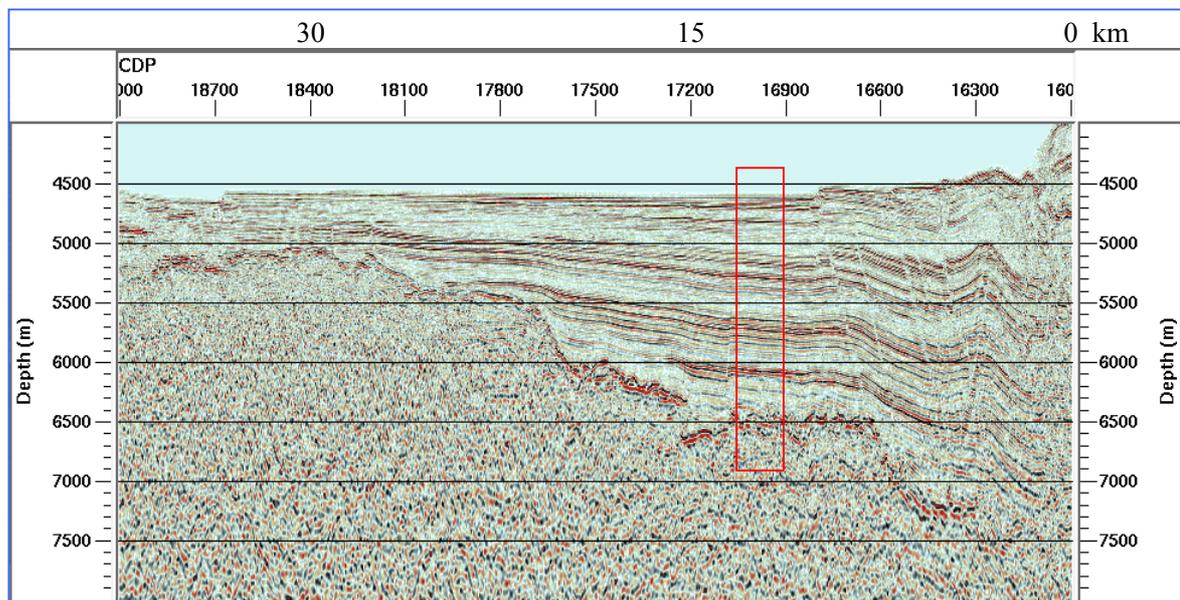
$$z = \rho \cdot v$$

mit $\rho \equiv$ Dichte und $v \equiv$ seismische Geschwindigkeit.

Beide Parameter hängen direkt von der chemischen und physikalischen Zusammensetzung des sedimentierten Gesteinsmaterials ab (Castagna et al., 1993). Unterschiedlich starke Amplituden in der seismischen Sektion deuten darauf hin, dass diese Parameter in der Umgebung der Reflexionspunkte variieren, wenn man von Effekten wie Absorption und Streuung einmal absieht (Trappe et al., 1988).

5.3 Nachweis der Zyklizität mittels Kreuzkorrelation

Betrachtet man die Ergebnisse der seismischen Datenbearbeitung, dann fällt auf, dass bei wenigstens zwei der Profile (022 und 3842) das Reflexionsbild eine gewisse Systematik zeigt. Die tiefenmigrierte Sektion des Profils 3842 weist vier ausgeprägte Reflexionszyklen im Bereich der trench-Sedimente auf. Zur Überprüfung dieser Beobachtung wurde zunächst ein visueller Vergleich der Signalphasen vorgenommen.



**Abb. 5-2: Trench-Sedimente des tiefenmigrierten Profils 3842
100 benachbarte Spuren (rot markiert) wurden aussortiert und
auf Zyklizität untersucht.**

Die aussortierten Spuren wurden in Tiefenblöcke von 500 m Mächtigkeit unterteilt. Wie die Darstellung Abb. 5-3 (nächste Seite) deutlich macht, kann man einzelne

Signalphasen über alle vier Blöcke verfolgen. Dabei ist zu beachten, dass die Amplituden korrespondierender Signale unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. Im vierten Block sind diese Phasen nur noch sporadisch vorhanden, da durch die Subduktion der Nazca-Platte die Sedimente massiv deformiert oder bereits subduziert sind. Ferner verändert sich der Frequenzinhalt der Signal mit zunehmender Tiefe durch die Absorption höherer Frequenzen.

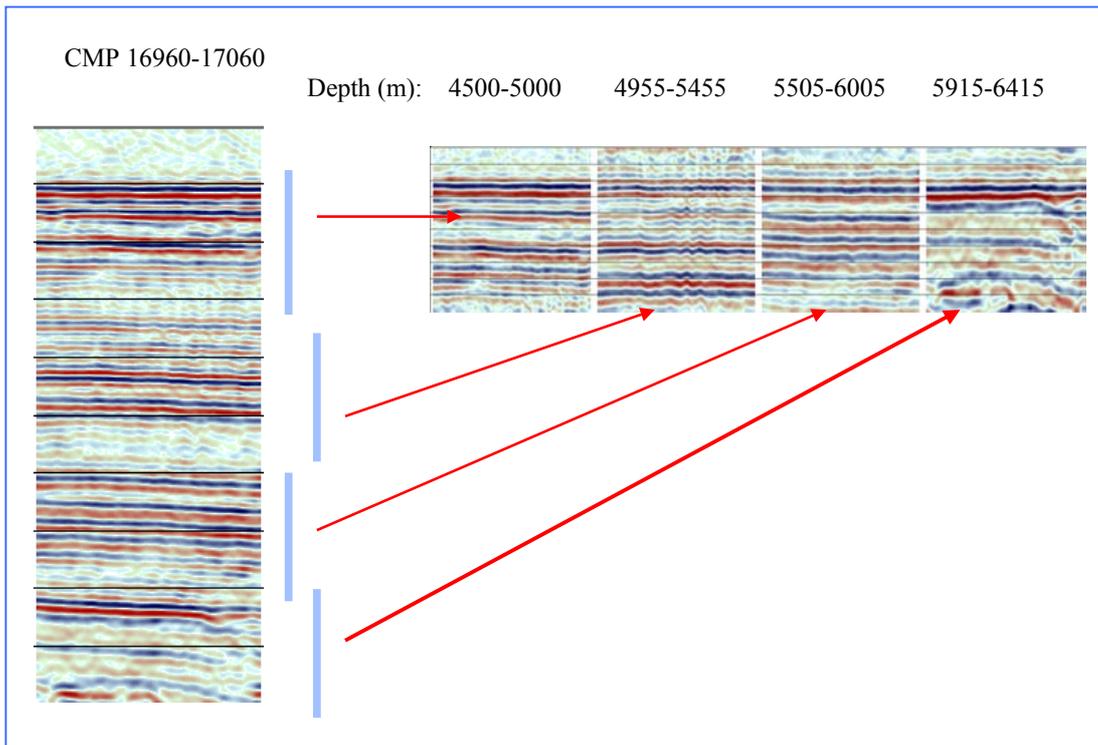


Abb. 5-3: Visueller Vergleich der tiefenmigrierten Horizonte
Einzelne Signalphasen können über alle Tiefenblöcke verfolgt werden. Der vierte Block weist nur noch Reste der Sedimente auf, da hier ein Großteil deformiert oder subduziert ist.

Diese Betrachtungsweise kann und soll nicht mehr als ein Hinweis sein, dass offensichtlich eine zyklische Reflexionsfolge in den trench-Sedimenten vorhanden ist. Der Nachweis selbst wird mit Hilfe der Kreuzkorrelation geführt.

Die Kreuzkorrelation ist ein mathematisches Hilfsmittel zum Nachweis der Ähnlichkeit der Wellenformen zweier Signale. Die normalisierte Kreuzkorrelationsfunktion wird auch als Korrelationskoeffizient bezeichnet und nach folgender Formel berechnet:

$$\Phi_{GH}(\tau) = \frac{\sum_{-x}^x G_k H_{k+\tau} dt}{\left[\sum_{-x}^x G_k^2 dt \sum_{-x}^x H_k^2(t) dt \right]^{1/2}}$$

mit $G(k)$ und $H(k)$ als diskreten Zeitreihen (aus Sheriff, 1991).

Übertragen auf die Seismik bedeutet das, dass man die Kreuzkorrelation zwischen einem aus den seismischen Daten extrahierten Wavelet und den seismischen Spuren berechnet kann. Die Maxima der so ermittelten Kreuzkorrelationsfunktion geben die Tiefenlage an, bei der das Wavelet und die seismischen Signale in den Spuren am besten übereinstimmen.

Im CMP-Bereich von 16960-17060 wurde ein über 21 benachbarter CMPs gemittelt Wavelet extrahiert und hinsichtlich des Frequenzinhaltes und der Phasenlage analysiert. Anschließend wurden die seismischen Spuren mit diesem gemittelten Wavelet korreliert.

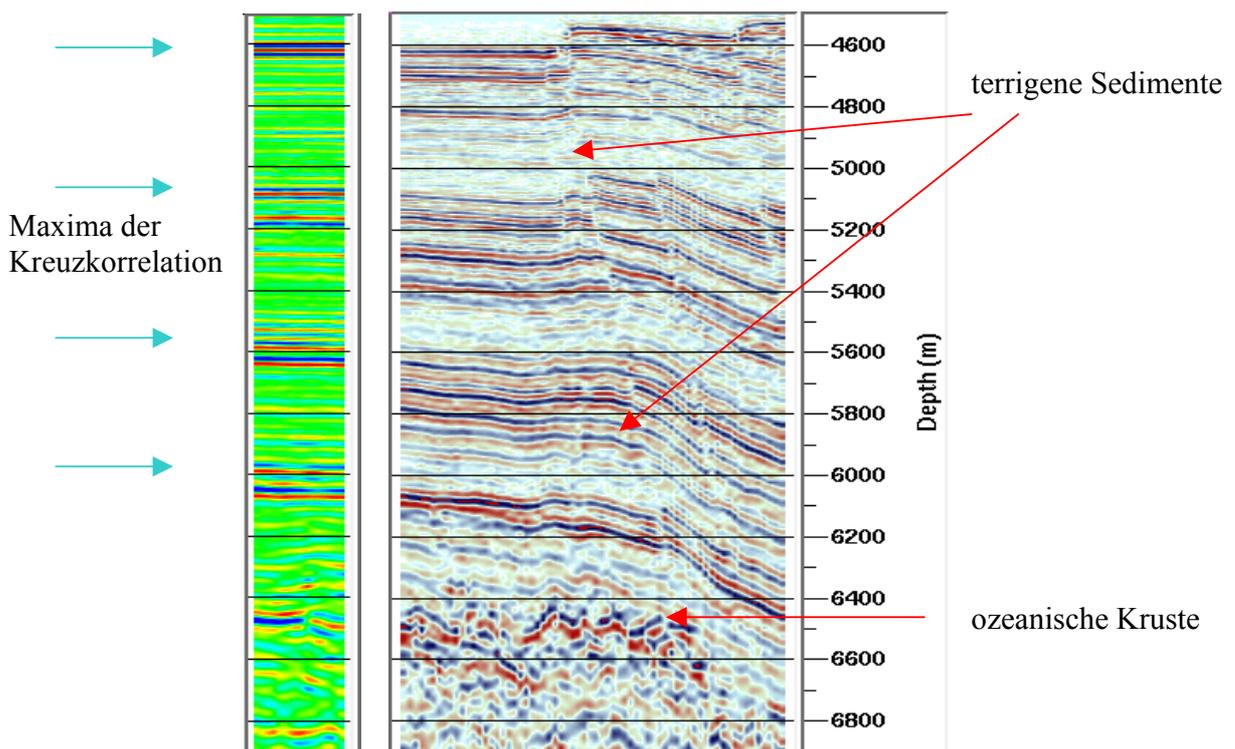


Abb. 5-4: Linie 3842 Reflexionen und Kreuzkorrelationsfunktion
 Die Maxima der Kreuzkorrelationsfunktion (links) sind durch blaue Pfeile gekennzeichnet. Die seismischen Spuren (rechts) zeigen Sedimente aus dem trench-Bereich.

Abb. 5-4 zeigt einen Ausschnitt des Profils 3842 mit trench-Sedimenten und der Oberkante der ozeanischen Kruste (rechts). Daneben ist die Kreuzkorrelationsfunktion über 100 Spuren dargestellt (links). Die ausgeprägten Maxima der Kreuzkorrelationsfunktion, deren Amplituden um rund einen Faktor 4 größer sind als ihre Umgebung, zeigen an, dass die Wellenform des aus der Seismik in einem Tiefenbereich von 4.500-5.000 m extrahierten Wavelets gut mit den Reflexionssequenzen in den vier Tiefenblöcken übereinstimmt.

Damit ist gezeigt worden, dass die Sedimentablagerung im trench auf dem Profil 3842 durch vier Zyklen geprägt ist. Diese können durch kurzperiodische oder spontane singuläre Ereignisse überlagert sein. Allerdings sollte man die Auflösung der seismischen Ergebnisse und die der Kreuzkorrelationsfunktion nicht überinterpretieren, um den Nachweis für diese Überlagerungen auch noch zu führen.

5.4 Altersbestimmung ausgewählter Horizonte

Nachdem die Zyklizität der Reflexionen der Trench-Sedimente festgestellt und nachgewiesen worden ist, soll der Mechanismus gefunden werden, der dieses Erscheinungsbild hervorrufen kann. Um die Maxima der ermittelten Kreuzkorrelationsfunktion und die damit korrespondierenden seismischen Horizonte zu anderen globalen zyklischen Vorgängen in Beziehung setzen zu können, müssen diese in eine Zeitskala eingeordnet werden. Da keine Bohrungsdaten aus dem Bereich der trench-Sedimente vorliegen, die zur Altersbestimmung der geologischen Formationen herangezogen werden können, bietet sich als Notlösung an, diese Altersbestimmung über die Konvergenzrate der Nazca-Platte vorzunehmen. Diese Konvergenzrate wird in der Literatur mit 80-90 mm/a angegeben (DeMets et al., 1990). Da sich offensichtlich die Geschwindigkeit der Nazca-Platte in den letzten 3 mio Jahren deutlich verringert hat (Khazaradze et al., 2003), wird ein kleinerer Wert in Ansatz gebracht.

Nach Angermann (Angermann et al., 1999) wird die Konvergenzrate mit 65.6 mm/a und das Konvergenzazimut mit 78.3° E auf der Basis des Andean Elastic Dislocation Model (AEDM) für die Südzone um 38° S angenommen. Mit Hilfe dieser Werte kann man eine grobe Abschätzung des Alters verschiedener geologischer Schichten vornehmen. Im Folgenden werden zwei Wege aufgezeigt, die eine derartige Abschätzung erlauben.

5.4.1 Altersbestimmung über die mittlere Sedimentationsrate

Aus der Konvergenzrate der Nazca-Platte lässt sich das maximale Alter der Sedimente im trench abschätzen. Wie oben gezeigt, bewegen sich die Sedimente auf Grund der starken Haftreibung mit der gleichen Geschwindigkeit wie die ozeanische Platte in Richtung des Konvergenzazimuts. Aus den geometrischen Abmessungen des Trench kann man die Konvergenzstrecke bestimmen, die die ozeanische Platte vom westlichen Rand der Bedeckung mit terrigenen Sedimenten bis zur Deformationsfront zurückgelegt hat. In Verbindung mit der Konvergenzrate ergibt sich der Zeitraum, der für diese Translationsbewegung erforderlich war. Folgende Werte wurden für die drei Profile ermittelt:

Profil	Konvergenzrate (mm/a)	Konvergenzstrecke (m)	Alter (a)	Mächtigkeit (m)	Sedimentationsrate (mm/a)
022	70,27	30.000	427.000	2.110	4,9
046	68,60	36.250	528.000	3.000	5,7
3842	69,81	24.125	345.500	1.780	5.2

Tabelle 5-1: Sedimentationsrate, abgeleitet aus der Konvergenzrate der Nazca-Platte

Bei der Berechnung der Konvergenzrate und -strecke wurden nur die horizontalen Komponenten berücksichtigt und die Neigungswinkel der abtauchenden Nazca-Platte vernachlässigt. Die Berechnung der Konvergenzraten ist im Anhang unter Punkt 10.5 zu finden.

Die so ermittelten Sedimentationsraten stellen mittlere Werte dar. Der Nachteil der Methode ist darin zu sehen, dass die Sedimentation sicher nicht gleichmäßig abgelaufen ist, die Kompaktion der Schichten unberücksichtigt bleibt und eine Ungenauigkeit bei der Bestimmung der geometrischen Abmessungen der trench-Sedimente vorliegen kann. Ausserdem erhält man über die mittlere Sedimentationsrate Altersangaben, die für eine ausgewählte Schicht innerhalb der Sedimente variieren, was der Wirklichkeit nicht entspricht.

Der Vergleich mit Sedimentationsraten, die entlang des chilenischen Kontinentalrandes aus Bohrungen ermittelt worden sind, zeigt, dass diese mit Maximalwerten von 0.8-2.3 mm/a für das Gebiet südlich von 40°S deutlich unter den oben aufgeführten Werten liegen (Lamy et al. 2000). Allerdings gelten diese Raten für den Schelfbereich und nicht für den Tiefseegraben.

5.4.2 Altersbestimmung über Reflexionshorizonte

Durch Berechnung der Kreuzkorrelationen zwischen den seismischen Spuren und einem Wavelet wurde die Zyklizität der sedimentierten Schichten nachgewiesen. Die mit den Maxima der Kreuzkorrelationsfunktion korrespondierenden geologischen Horizonte können als Deckschicht einer Reflexionsfolge angesehen werden, die sich zyklisch wiederholt. Diese Deckschichten haben in der Vergangenheit den Meeresboden im trench-Bereich gebildet. Wenn es möglich ist, aus der Wanderung der westlichen Begrenzung dieser Deckschichten in die heutige Position die zurückgelegte Strecke zu bestimmen, dann kann über die scheinbare Konvergenzrate der Zeitraum berechnet werden, der für diese Verschiebung erforderlich war. Durch Extrapolation der Begrenzungspunkte auf den heutigen Meeresboden kann das Alter dieser geologischen Schicht unter der Annahme, dass die Geometrie des trench und die Konvergenzrate in dem betrachteten Zeitraum konstant waren, berechnet werden. Da die Form der

ozeanischen Kruste keinen Einfluss auf das Alter der Sedimente haben kann, darf sie nicht in die Altersbestimmung einfließen. Deshalb wurde die ozeanische Kruste in dem Bereich, in dem die terrigenen Sedimente abgelagert sind, durch eine geneigte Gerade genähert. Durch Extrapolation dieser Geraden auf den heutigen Meeresboden erhält man den Bezugspunkt für die Altersbestimmung der markierten Schichten. Die Stufencharakteristik im linken Teil des trench, die die Ergebnisse verfälschen würde, wird so eliminiert.

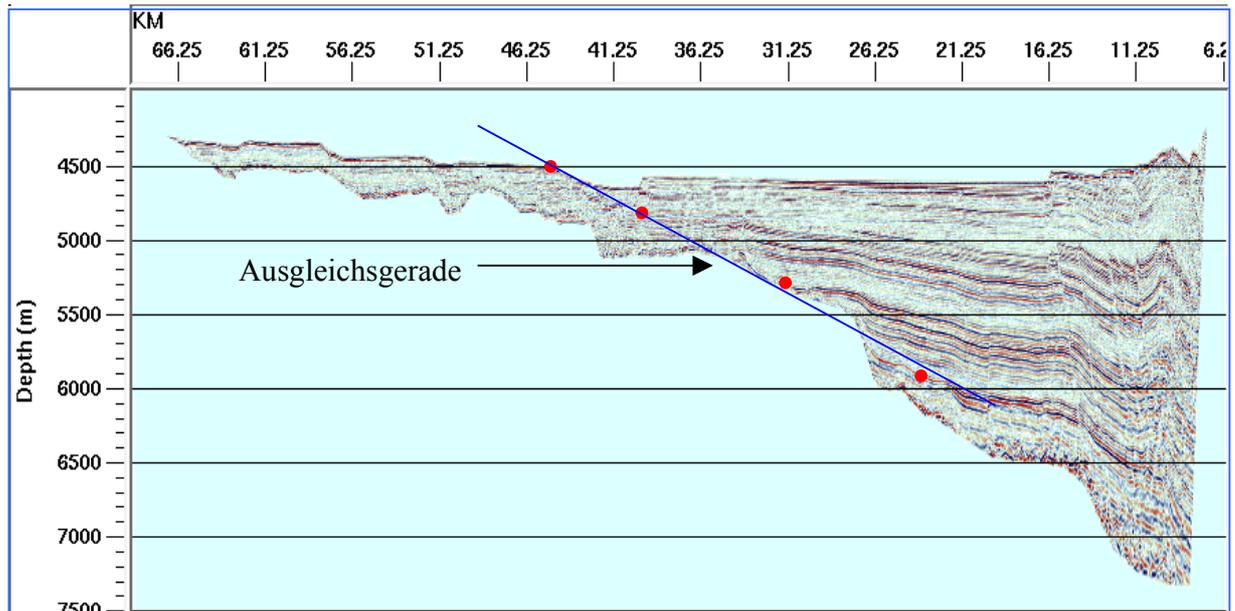


Abb. 5-5: Altersbestimmung über Reflexionshorizonte

Die roten Punkte markieren die definierte westliche Begrenzung der terrigenen Sedimente für die jeweilige Deckschicht der vier Reflexionssequenzen, die hinsichtlich der Tiefenlage mit den Maxima der Kreuzkorrelationsfunktion zusammenfallen.

Folgende gerundeten Werte wurden für das Profil 3842 ermittelt:

Horizont	CMP Bereich	Strecke (m)	Alter (a)
1	19400 - 19400	0	rezent
2	18735 - 19400	8312	119000
3	18050 - 19400	16874	242000
4	17500 - 19400	23749	340000

Tabelle 5-2: Alter der Reflexionshorizonte

5.5 Vergleich der Reflexionszyklen mit globalen klimatischen Perioden

Nachdem die zyklische Sedimentation terrigenen Materials im trench plausibel gemacht worden ist, liegt es nahe zu untersuchen, ob die gefundenen Perioden von 100.000-120.000 Jahren mit globalen Zyklen übereinstimmt, die in der Einleitung dieses Kapitels angesprochen worden sind. Dabei muss man berücksichtigen, dass zyklische Sedimentationsrhythmen, die von den Variationen orbitaler Parameter gesteuert werden, durch Vorgänge wie Ablagerung der Sedimente, Diagenese oder Tektonik modifiziert werden können (Schwarzacher, 1991). Dies erschwert die Zuordnung einer stratigraphischen Sektion zur Zeitskala. Ferner muss damit gerechnet werden, dass die Wellenlängen der Milankovitch-Zyklen in geologischen Zeiträumen nicht konstant geblieben, sondern größer geworden sind (Berger et al., 1989). Dennoch ist es gelungen, für den Zeitraum des Pleistozäns die Relation zwischen Milankovitch-Zyklen und rhythmischer Sedimentation nachzuweisen (Grötsch et al., 1991).

Da die Variationen der orbitalen Parameter die Sedimentation nicht direkt steuern, sondern globale chemische und physikalische Prozesse beeinflussen, die ihrerseits auf die Produktion, den Transport und die Ablagerung von Sedimenten einwirken, werden wir uns diesen zuwenden.

5.5.1 Vostok-Projekt

Kenntnisse über paläoklimatische Verhältnisse lassen sich aus Bohrungsdaten gewinnen. Besonders geeignet sind Bohrkerne, die im permanenten Eis erbohrt wurden, da Eiskerne Informationen über lokale Temperaturverhältnisse, Niederschlagsraten und Feuchtigkeitsverteilung, über Windstärken und Aerosolströme marinen, terrestrischen, vulkanischen, kosmogenen und anthropogenen Ursprungs beinhalten (Petit et al., 1999). Ferner findet man häufig Luft einschüsse, die die Änderungen der Atmosphäre in der Vergangenheit dokumentieren. Solche Bohrungen gibt es in Grönland, in der Arktis und in der Antarktis.

Im Januar 1998 erreichte die Bohrung, die von einem internationalen Konsortium an der russischen Vostok-Station (geographische Koordinaten: 78°S, 106°E, Höhe: 3488 m) in der östlichen Antarktis niedergebracht wurde, eine Teufe von 3.623 m und wurde 120 m über dem Wasserspiegel des unterglazialen Vostok-Sees gestoppt. Damit war die bis dahin tiefste Bohrung im Eis erfolgreich abgeschlossen. Der Bohrkern enthält Eisablagerungen, die älter als 400.000 Jahre sind, eine Zeitspanne, die auch in zahlreichen ozeanischen und kontinentalen Bohrkernen dokumentiert ist.

Nach Auswertung der Gesamtdaten wurde die von Lorius et al. (Lorius et al., 1985) für die ersten klimatischen Zyklen der Vostok-Kurve aufgestellte glaziale Zeitskala und die darauf basierende Erweiterung von Jouzel et al. (Jouzel et al., 1993) zum Extended Glaciological Timescale (EGT) benutzt, um das Klimamodell GT4 zu entwickeln, das ein Alter von 423.000 Jahre für die Bohrtiefe von 3.310 m angibt.

Der Vostok-Eiskern enthält Informationen über folgende chemische und physikalische Parameter:

Parameter	Bezeichnung	Indikator für
Deuterium	^2H	lokale Temperaturänderung
Staubanteil	kontinentales Aerosol	
Natrium	marines Aerosol	
Kohlendioxid	CO_2	Temperaturänderung
Kohlenwasserstoff	CH_4	Temperaturänderung
Sauerstoff-Isotop	^{18}O	hydrologische Zyklen und Änderung des Eisvolumen

Tabelle 5-3: Auswertbare Komponenten im Vostok-Eiskern (aus Petit et al., 1999)

Die gemessenen Größen und die daraus abgeleiteten Parameter sind in der folgenden Abbildung graphisch aufgetragen.

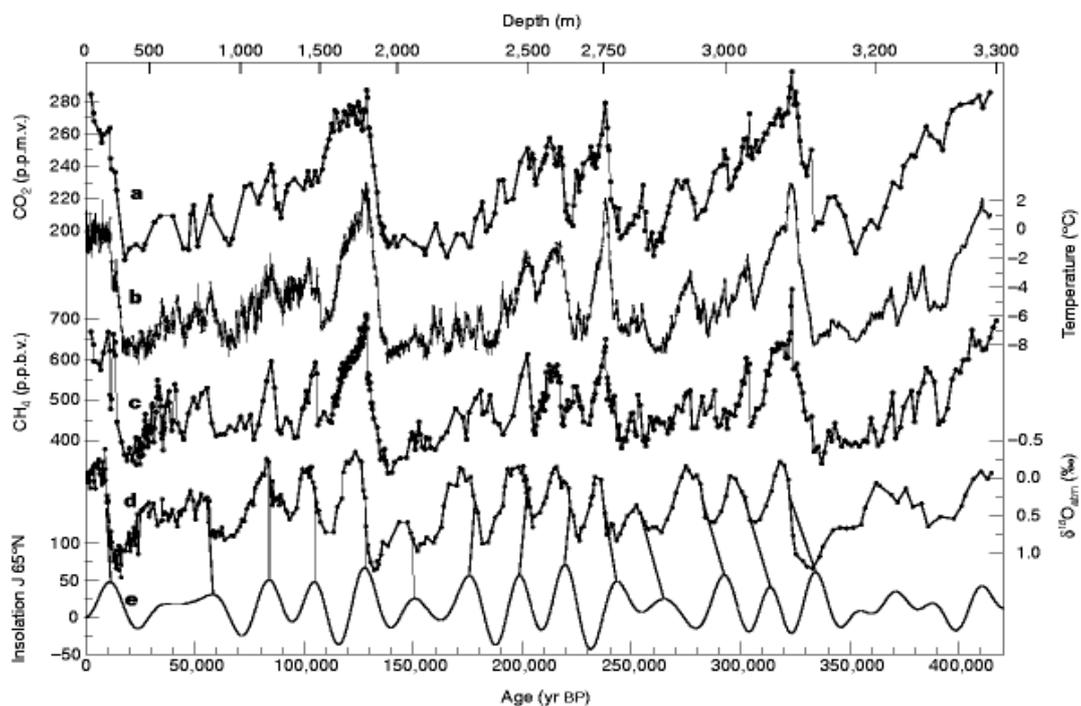


Abb. 5-6: Vostok-Eiskern: abgeleitete Parameter (aus Petit et al., 1999)

- a. CO_2 Gehalt, extrahiert aus der im Eis eingeschlossenen Luft (linke Ordinate),
- b. Temperaturverlauf (rechte Ordinate),
- c. CH_4 Gehalt, extrahiert aus der im Eis eingeschlossenen Luft (linke Ordinate),
- d. Sauerstoff-Isotop $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ (rechte Ordinate),
- e. Mitte-Juni Sonneneinstrahlung bei 65°N (linke Ordinate)

Aus dieser Graphik sind die Kurven für den Temperaturverlauf und den CO₂-Gehalt extrahiert und in Abb. 5-7 separat dargestellt worden.

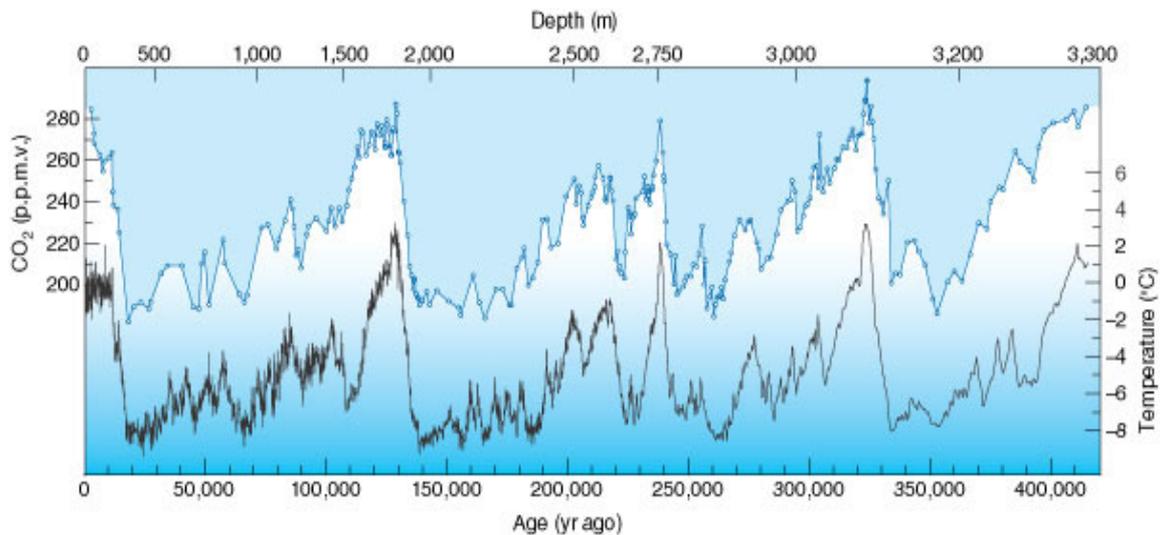


Abb. 5-7: Vostok-Eiskern: Temperaturverlauf und CO₂ Gehalt
(aus Petit et al., 1999, modifiziert)

Die untere Kurve (rechte Ordinate) stellt den Temperaturverlauf mit vier vollständigen Zyklen dar.

Die obere Kurve (linke Ordinate), die der Temperaturkurve folgt, zeigt den Verlauf der CO₂ Konzentration.

5.5.2 Epica-Projekt

Die klimatischen Bedingungen der letzten 500.000 Jahre in der Antarktis sind charakterisiert durch einen ausgeprägten Zyklus mit einer Periode von 100.000 Jahren, während in der Zeit des frühen Quartärs (vor 1 Million Jahre) ein 41.000-Jahre Zyklus dominierte (Epica, 2004).

Das European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) wird von einem internationalen Konsortium durchgeführt, das zwei Bohrungen im Osten der Antarktis niedergebracht hat. Eine Bohrung an der Kohnen-Station im Dronning Maud Land Sektor hat zum Ziel, ein hochauflösendes Ergebnis wenigstens eines glazialen Zyklus zu produzieren, um Vergleiche mit den Ergebnissen aus Grönland zu ermöglichen. Die zweite Bohrung, niedergebracht am Dome C (geographische Koordinaten: 75°06'S, 123°21'E, Höhe: 3.233 m), hat eine Teufe von 3.190 m erreicht, von denen 3.139 m Bohrkern ausgewertet sind. Der Bohrpunkt liegt 560 km von der Vostok-Bohrung entfernt. Das Ziel dieser Bohrung ist die bisher längste Aufzeichnung paläoklimatischer Parameter.

Folgende Parameter wurden untersucht und aus dem Bohrkern extrahiert:

- Elektrische Leitfähigkeit
- Korngröße
- Staubanteil
- Deuteriumgehalt

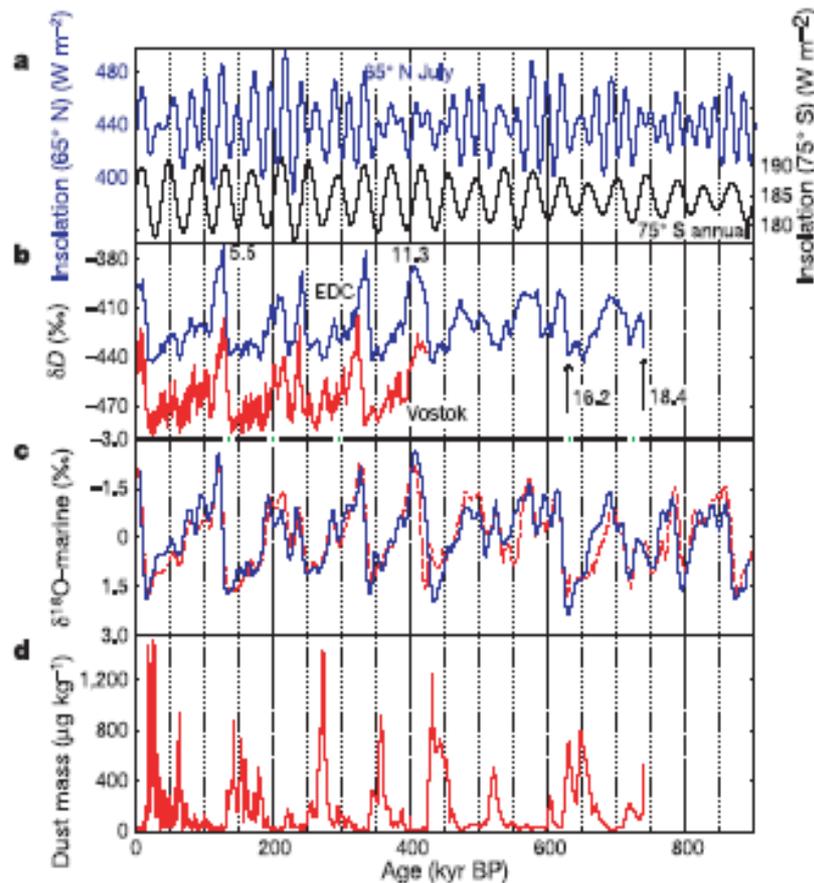


Abb. 5-8: Vergleich der Epica-Dome-C-Daten mit den Vostok-Daten (aus Epica, 2004)

- Insolationsaufzeichnung:** Insolation Mitte Juli bei 65°N (blaue Kurve (linke Ordinate)), jährliche mittlere Insolation bei 75°S (geographische Breite von Dome C, schwarze Kurve (rechte Ordinate)),
- Deuterium δD von Epica Dome C (gemittelt über 3.000 Jahre) und von Vostok (rote Kurve), die Lage der Kontrollfenster (unterhalb von 800 m Tiefe) sind auf der Abszisse durch Rhomben dargestellt.**
- Marines Sauerstoff-Isotop:** Zusammenfassung der Werte von Lokation MD900963 und ODP677 (blaue Kurve), um die Ungenauigkeit der Werte zu zeigen, ist ein Datensatz dargestellt (rote Kurve), der aus 7 Lokationen für die letzten 400.000 Jahren zusammengefasst wurde, die älteren Werte bestehen nur aus der ODP677 Kurve.
- Staubanteil von Epica Dome C**

Der Vergleich der Deuterium-Kurven (Abb. 5-8, Graph b) von Epica und Vostok zeigt eine relativ gute Übereinstimmung über einen Zeitraum von 400.000 Jahren, obwohl das dritte Maximum der Vostok-Kurve (bei ca. 325.000 Jahren) um rund 15.000 Jahren früher erscheint. Mit der Auswertung der Epica-Messungen ist es gelungen, die Zeitskala auf 740.000 Jahre zu erweitern und 8 glazial-interglaziale Zyklen nachzuweisen. Die Diskrepanz zwischen den Epica-Daten (Nachweis von 8 Zyklen bei 3.139 m Bohrkern) und den Vostok-Daten (Nachweis von 4 Zyklen bei 3.310 m Bohrkern) kann mit den unterschiedlichen örtlichen Gegebenheiten erklärt werden. An der Epica-Lokation waren die Niederschlagsmengen nur etwa halb so groß wie im Bereich der Vostok-Lokation. Das führt bei gleicher Bohrkernlänge zu einer längeren Zeitskala mit allerdings geringerer Auflösung.

Für die weiteren Betrachtungen und Vergleiche mit der Seismik wurden die Vostok-Daten verwendet.

5.5.3 Seismische Kreuzkorrelationsfunktion und Vostok-Temperaturkurve

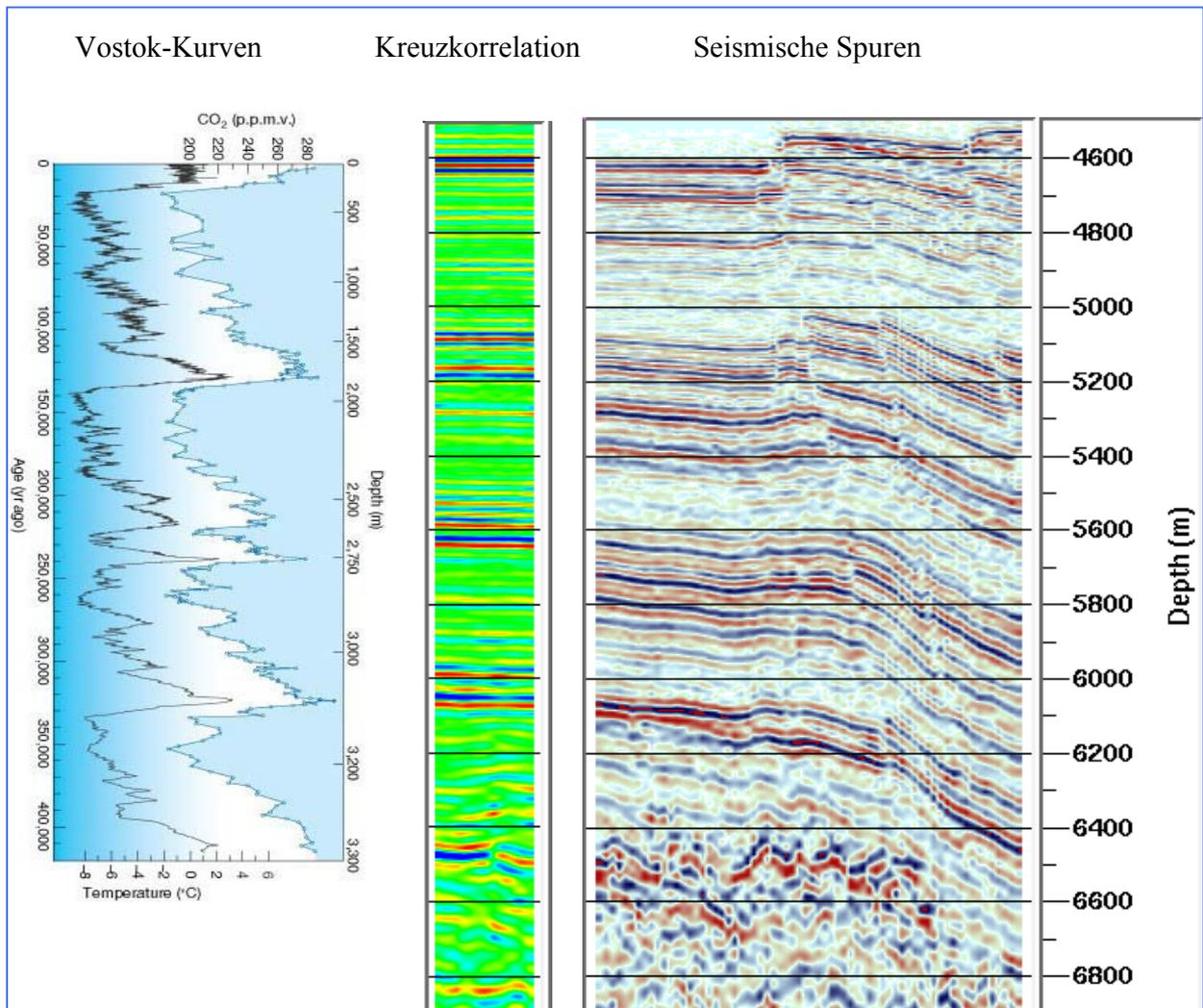
Nachdem die globalen klimatischen Änderungen, die sich in den Vostok- bzw. den Epica-Messergebnissen manifestieren, über einen Zeitraum von bis zu 740.000 Jahren aufgezeigt worden sind, stellt sich die Frage, ob diese Variationen auch in der Ablagerung von terrigenen Sedimenten im Peru-Chile-Graben ihren Niederschlag gefunden haben.

Zu diesem Zweck werden die seismischen Reflexionen der trench-Sedimente in Form einer Korrelationsfunktion den Maxima des Temperaturverlaufs aus den Vostok-Kurven gegenüber gestellt.

Maximum der Funktionen	Vostok-Temperaturkurve (Alter in Jahren)	Kreuzkorrelationsfunktion (Alter in Jahren)	
		Profil 3842	Profil 022
1	0	0	0
2	128.000	119.000	115.600
3	238.000	242.000	240.000
4	322.000	340.000	329.000

Tabelle 5-4: Alter der Maxima von Vostok-Kurve (Temperatur) und der Kreuzkorrelation

Die Abweichung der Werte um maximal 10% stellt in Anbetracht der simplen Berechnungsmethode eine gute Übereinstimmung dar. Dies wird auch deutlich durch den visuellen Vergleich der Vostok-Kurven mit der Kreuzkorrelationsfunktion und den seismischen Reflexionshorizonten in Abb. 5-9.



**Abb. 5-9: Vostok-Kurven (Temp. & CO₂, l.), Kreuzkorrelation (m.) und Seismik (r.)
Die vier Maxima der Kreuzkorrelationsfunktion korrespondieren mit den Maxima des Temperaturverlaufs und dem CO₂-Gehalt aus den Vostok-Kurven.**

Damit ist es gelungen, die Zyklizität der Ablagerung terrigenen Sedimentmaterials im Peru-Chile-Graben in den seismischen Sektionen des Profils 3842 nachzuweisen und eine Korrelation mit paläoklimatischen Variationen während der letzten 400.000 Jahren herzustellen.

5.5.4 Proximale und distale Sedimentation im trench

Nachdem die Zyklizität der Reflexionen in den terrigenen Sedimenten des Trench auf dem Profil SO161-3842 nachgewiesen worden ist, stellt sich die Frage, ob dieser Effekt allgemein in den trench-Sedimenten vorhanden ist.

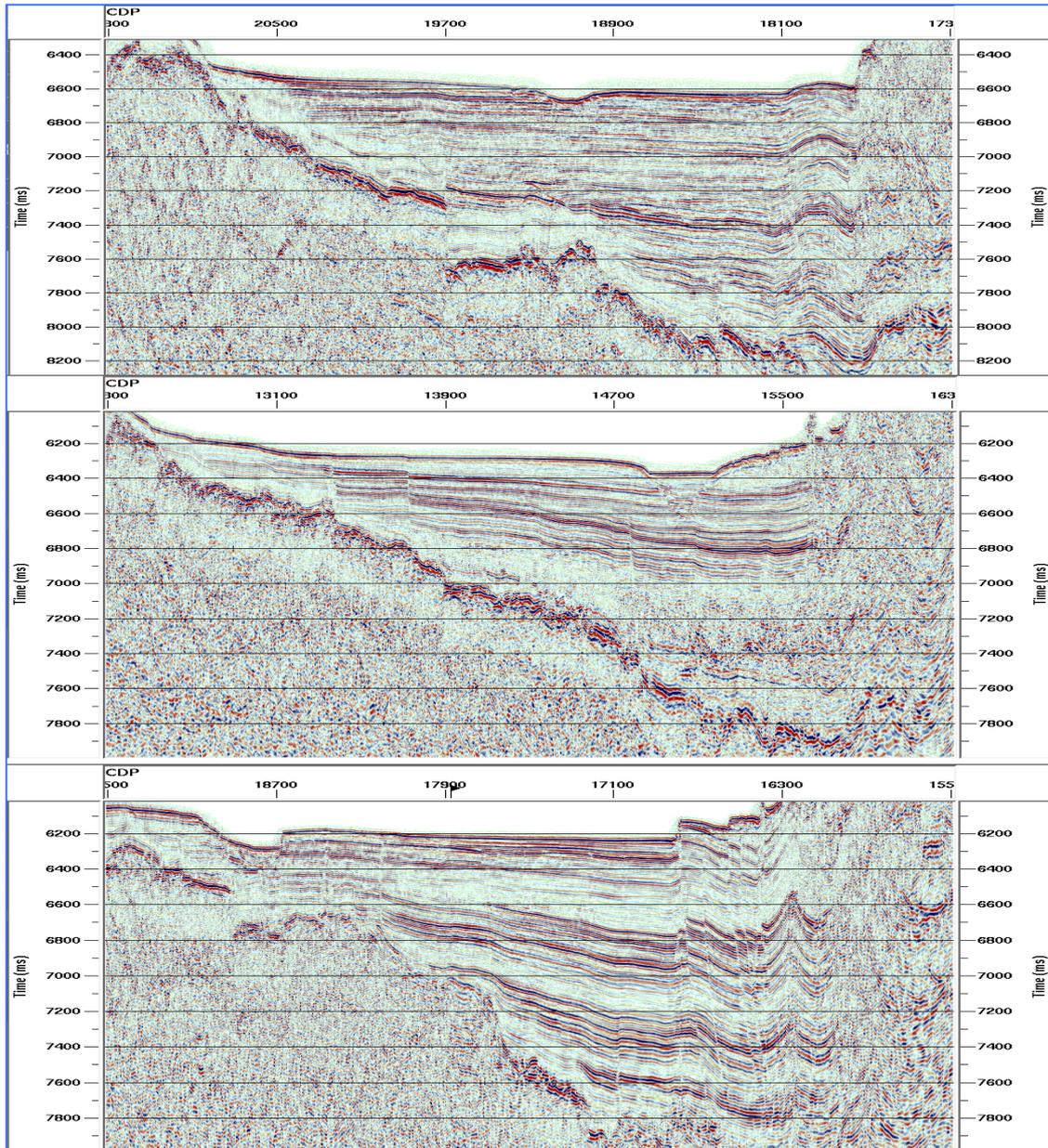


Abb. 5-10: Reflexionen der trench-Sedimente (Profil 022(o.), 046(m.), 3842(u.))

Der Vergleich der drei ausgewählten Profile zeigt, dass bei dem Profil 022 offensichtlich ebenfalls zyklische Reflexionen vorliegen, während das Profil 046 einen völlig anderen Reflexionscharakter aufweist. Die vier Zyklen, die auf dem Profil 3842 das Reflexionsbild der terrigenen Sedimente dominieren, lassen sich auch auf dem Profil 022 nachweisen. Eine fünfte Reflexionssequenz ist im Ansatz zu erkennen, durch den Subduktionsvorgang aber nur noch unvollständig vorhanden.

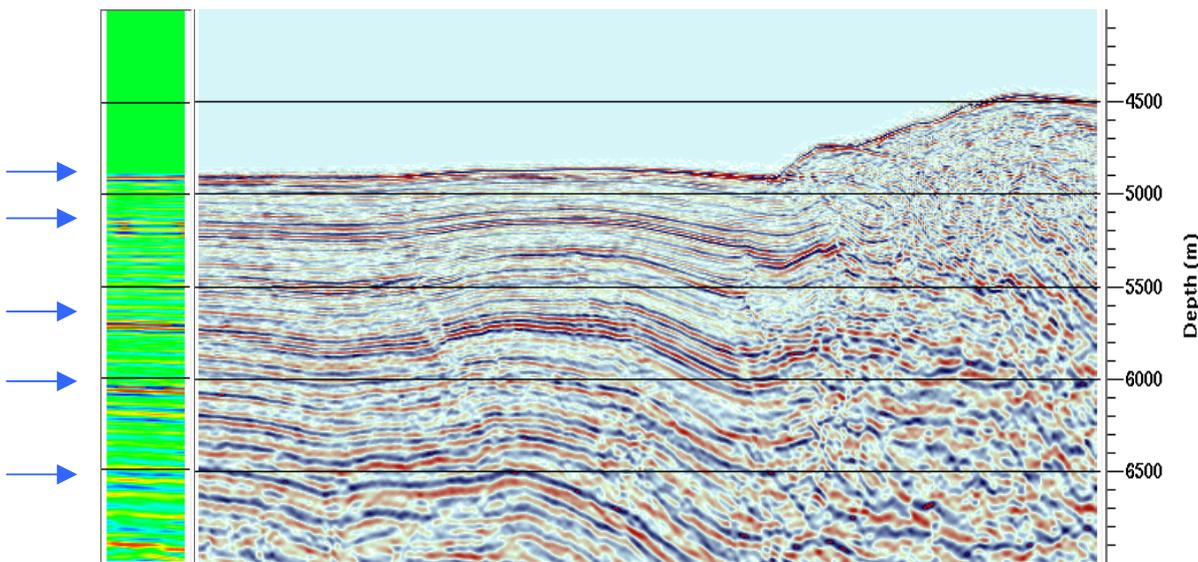


Abb. 5-11: Linie 022 Reflexionen und Kreuzkorrelationsfunktion

Die Maxima der Kreuzkorrelationsfunktion (l.) sind durch blaue Pfeile gekennzeichnet. Die seismischen Spuren (r.) zeigen Sedimente aus dem trench-Bereich.

Die Kreuzkorrelationsfunktion zeigt fünf Maxima, die belegen, dass eine periodische Wiederholung einer Reflexionssequenz in den seismischen Daten vorhanden ist.

Ein konträres Bild liefert das Profil 046, bei dem schon die visuelle Prüfung ergeben hat, dass eine ähnlich deutliche Systematik in der Reflexionsfolge wie bei den beiden anderen Profilen nicht gegeben ist.

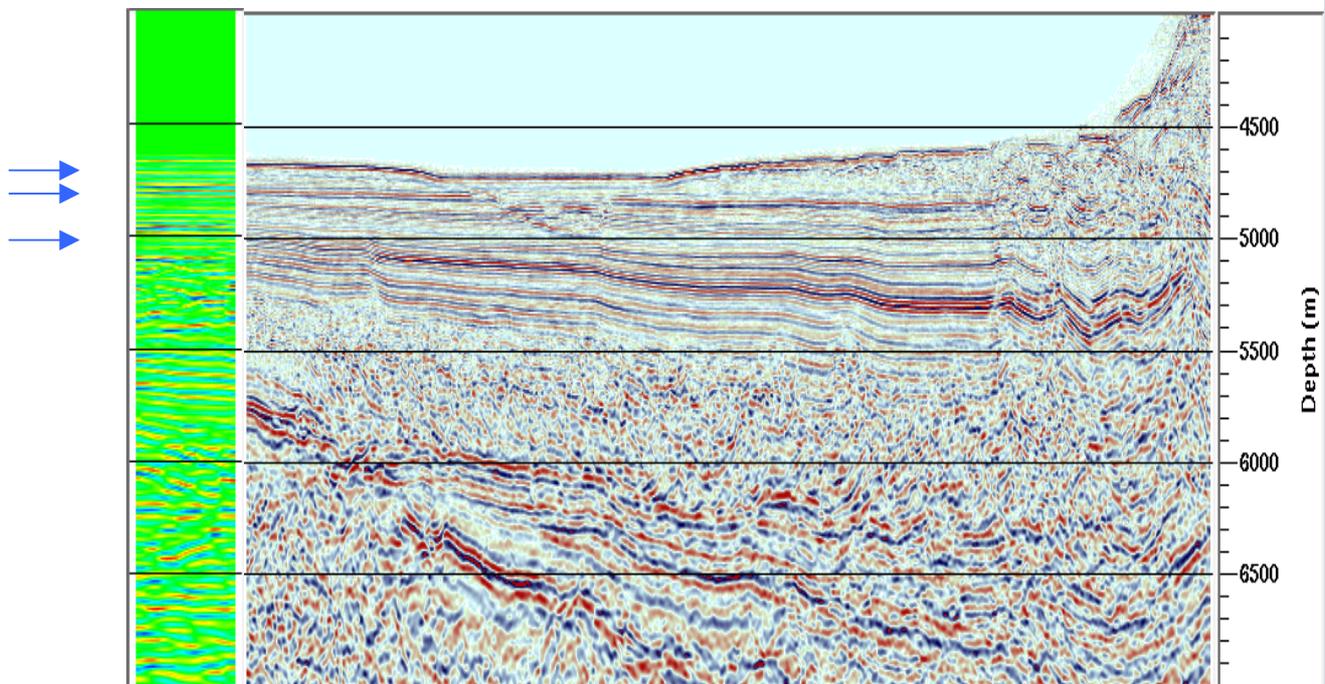


Abb. 5-12: Linie 046 Reflexionen und Kreuzkorrelationsfunktion

Die Maxima der Kreuzkorrelationsfunktion (l.) sind durch blaue Pfeile gekennzeichnet. Die seismischen Spuren (r.) zeigen Sedimente aus dem trench-Bereich.

Die Kreuzkorrelationsfunktion weist keine deutlichen Maxima auf und belegt damit, dass keine zyklische Wiederholung einer Reflexionssequenz innerhalb des betrachteten Zeitraumes stattgefunden hat. Bei dem Profil 046 schließen der Meeresboden und ein starker Reflektor bei einer Tiefe von ca. 5.200 m eine Serie von schwächeren Reflexionen ein, während das Bild unterhalb dieses Reflektors bis zur ozeanischen Kruste tektonisch stark veränderte Sedimente zeigt und insgesamt wenig strukturiert erscheint.

Offenbar zeigen einige der Profile zyklische Reflexionssequenzen, die bei anderen Profilen fehlen. Um nachprüfen zu können, ob eine Systematik dieser Unterschiede in den SPOC-Daten vorliegt, müssen die benachbarten Profile betrachtet werden. Die BGR hat die Daten der gestapelten und/oder migrierten Versionen der übrigen Profile in Form von screen dumps zur Verfügung gestellt. Würden die Ergebnisse in digitaler Form vorliegen, dann könnte man über die Berechnung einer Kennzahl, die den Grad der Zyklizität beschreibt, eine Klassifizierung vornehmen. Da dies nicht der Fall ist, kann nur eine deskriptive, vergleichende Betrachtung angestellt werden.

Die vorliegenden Profile lassen sich grob in drei Klassen einteilen:

- Profile mit zyklischen Reflexionen der trench-Sedimente
- Profile mit zyklischen Reflexionen der trench-Sedimente, die unmittelbar im Bereich einer Canyon-Mündung liegen
- Profile mit nicht-zyklischer Reflexionscharakteristik

Die erste Gruppe von Profilen zeichnet sich dadurch aus, dass die Sedimente einen leicht zum Kontinentalrand abfallenden geomorphologisch glatten Meeresboden aufweisen, der nur von dem Axialkanal angeschnitten wird. Die Reflexionen der vorwiegend söhlig gelagerten Sedimente lassen sich in Zyklen zusammenfassen.

Die zweite Gruppe von Profilen zeigt die gleichen Merkmale wie die Erste, nur dass hier der Meeresboden am Fuße des Schelfabhangs durch aufgeschüttetes Material gebildet wird, das topographisch stark bewegt ist.

Die dritte Gruppe von Profilen zeigt in der oberen Hälfte der Sedimente gut ausgebildete Reflexionen, während in größeren Tiefen das Reflexionsbild ziemlich diffus wird. Eine Systematik im Reflexionsmuster lässt sich bei diesen Profilen nicht erkennen.

Zieht man die geographische Lage der Profile in Betracht (siehe Abb. 5-13, nächste Seite), dann fällt auf, dass die beiden Profile der Kategorie 1 (Linie 022 und 3842) jeweils unmittelbar nördlich einer Canyon-Mündung liegen (Bio Bio- bzw. Imperial-Canyon), während das Profil 046, das der Kategorie 3 zuzuzählen ist, südlich des Bio Bio Canyons liegt. Eine Überprüfung der benachbarten Profile stützt die Vermutung, dass der Transportweg der terrigenen Sedimente von der Canyon-Mündung zum Ablagerungsort eine entscheidende Rolle für das Reflexionsmuster spielt. Auf Grund des nach Norden abfallenden Meeresbodens bewegen sich die Turbidite, die im Wesentlichen den Transport der Sedimente bewerkstelligen, im trench von Süden nach Norden. Auf den Profilen, die eine ausgeprägte Zyklizität der Reflexionen zeigen, sind die Sedimente nach einer kurzen Wegstrecke deponiert worden, während wie auf Profil 046 der Transportweg vom Imperial- und Tolten-Canyon mehr als 100 km beträgt.

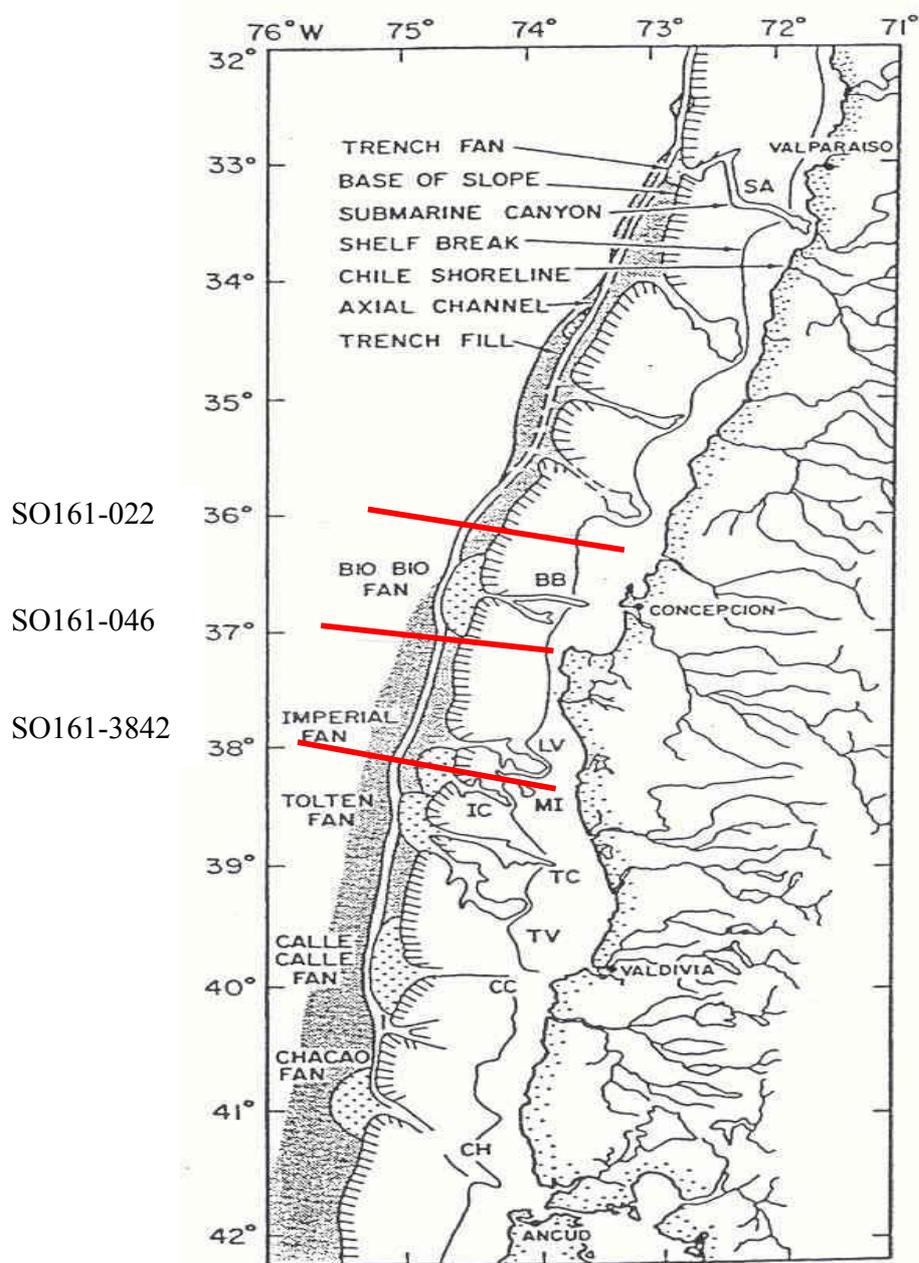


Abb. 5-13: Lage der Profile mit trench, Schelf- und Küstenbereich (nach Thornburg et al., 1990, modifiziert)

Wie oben schon erwähnt, ist das Reflexionsverhalten der geologischen Schichten von der chemischen und physikalischen Zusammensetzung des sedimentierten Gesteinsmaterials, von der Korngröße, von dem Porenvolumen und der Porenfüllung abhängig. Das

zyklische Reflexionsbild, das die Sedimente zeigen, kann durch die Änderung dieser Parameter auf Grund von paläoklimatischen Variationen verursacht worden sein. Ebenso ist das unterschiedliche Reflexionsbild der Profile in Abhängigkeit vom Transportweg der Sedimente durch Änderung dieser Gesteinsparameter zu erklären. Eine definitive Antwort auf diese Fragen kann wohl nur die Produktion und Auswertung von Bohrkernen aus dem Bereich der trench-Sedimente liefern.

Abschließend muss noch einmal betont werden, dass die Klassifizierung der Profile subjektiv und nach rein visuellen Gesichtspunkten vorgenommen worden ist. Eine objektive Überprüfung mit numerischen Hilfsmitteln ist dringend erforderlich.

Bei der Ableitung von Attributen, die die Reflexionsfolge beschreiben, kann man sich an dem Quantified Quality Assurance (QQA) Verfahren orientieren, das vom Schlumberger Research Centre in Cambridge (UK) entwickelt worden ist. Bei diesem Verfahren lassen sich verschiedene Attribute aus der Seismik extrahieren, die die Qualitätsverbesserung der Bearbeitungsschritte anzeigen.