

## **Schlussbericht**

### **PETROTEC – Petrogenetische und geotechnische Charakterisierung der Sedimente des Tiefseegrabens und des Kontinentalhanges vor Südchile**

Verbundprojekt KR: TIPTEQ; Vorhaben: TIPTEQ 8 – Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN (03G0594G)

vorgelegt von

#### **Jan Behrmann**

Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, IFM-GEOMAR, Wischhofstr. 1-3, 24148 Kiel  
E-mail: jbehrmann@ifm-geomar.de

#### **Achim Kopf**

RCOM, Universität Bremen, MARUM-Gebäude, Leobener Straße, 28359 Bremen  
E-mail: akopf@uni-bremen.de

## **I. Sachbericht**

### **1. Aufgabenstellung**

Im Einklang mit der Grundlegenden Zielsetzung von TIPTEQ, nämlich der Untersuchung der Effekte, die eine mechanisch und thermisch verschieden strukturierte abtauchende Platte (die Nazca-Platte) auf die überfahrende Platte (die Südamerikanische Platte) ausübt, wurden in diesem Teilprojekt drei spezifische Aufgabenstellungen formuliert, die nur aus dem Studium der jungen Sedimente im Tiefsee Graben an der Grenze zwischen beiden Lithosphärenplatten zu bearbeiten sind.

- Charakterisierung der Zusammensetzung und der Dynamik des Liefergebietes auf der überfahrenden Platte. Dabei sind insbesondere Informationen zum jungen Hebungs- und Exhumierungsgeschehen im Pazifischen Randbereich des südamerikanischen Kontinents zu gewinnen.
- Bestimmung des Einflusses der mineralogischen Zusammensetzung und des Mikrogefüges auf das mechanische Verhalten der Tiefseesedimente
- Gewinnung direkter Informationen über das Festigkeitsverhalten der Tiefseesedimente, die Rückschlüsse auf die Mechanik subduzierter Sedimentpakete erlauben.

Diese drei Aufgabenstellungen definierten die Projektziele und den Ablauf, so wie sie unten im Abschnitt 4 und im Kapitel II dieses Berichts dargestellt sind.

### **1. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Vorhaben hat bereits von Anfang an von Veränderungen in der Arbeitssituation eines der Antragsteller (A. Kopf) profitiert. Durch seine Berufung an das RCOM (Research Center Ocean Margins) in Bremen ergab sich die Möglichkeit, einen Teil der Arbeiten in das dort neu aufgebaute Geotechnik-Labor zu verlagern. Alle Ringscher-Experimente sind auf diese Art und Weise in Bremen

durchgeführt worden, genau wie die Beschreibung und die Multisensor Track (MST) Analysen der Expedition 181 des Kernmaterials von R/V SONNE, das im Rahmen des projekts eine zentrale Wichtigkeit hatte. Durch diesen Umstand wurden die Nachteile, die von der gegen die ursprüngliche Planung verspäteten Durchführung von Expedition 181 ausgingen, zumindest teilweise wieder kompensiert. Die Ringscher-Experimente tragen nach Art und Umfang der Daten und Ergebnisse den vielleicht wichtigsten Teil zum Projekt bei. Die Triaxial-Scherexperimente wurden wie geplant im vorausgesehenen Umfang im Tektoniklabor der Universität Freiburg durchgeführt. Um das Festigkeits- und Reibungsverhalten bei den höchsten Auflastdrücken (30 MPa) zu simulieren, wurde das Kooperationsangebot mit dem geotechnischen Labor von Dr. Kevin Brown an der Scripps Institution of Oceanography angenommen, die dortigen Direktscher-Apparaturen zu nutzen. Es war nötig, die Geräte teils zu rekonfigurieren und neu zusammenzubauen, um die nötigen, drainierten Scherversuche durchzuführen. Für die Durchführung waren mehrere Reisen des Projektmitarbeiters Georg Röser nach La Jolla notwendig. Georg Röser hat seine Arbeiten mit der Promotion im November 2007 erfolgreich abgeschlossen. Im Verlauf des Projekts hat sich gezeigt, dass das mechanische Verhalten der Kernproben besser verstanden werden konnte, wenn man ab den Proben quantitative Röntgendiffraktometrie (Rietveld) zur Bestimmung des Mineralbestandes durchführt. Dies ist durch entsprechende Analysen am GFZ Potsdam und am RCOM Bremen geschehen. Die Herkunftsanalyse an Tiefseesanden und –silten sowie die Apatit-Spaltpurenanalysen (FT-Analysen) wurden von der Stipendiatin der Studienstiftung des Deutschen Volkes, Frau Bianca Heberer, durchgeführt. Frau Heberer wird ihre Dissertation im Verlauf des Jahres 2008 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg vorlegen. Sie hat ihre Arbeiten in Freiburg (Präparation und Mikroskopie), Basel (FT) und als Gastwissenschaftlerin am Institut für Geologie und Geographie der Universität Salzburg (FT-, Mikrosondenanalysen und GIS-Arbeiten durchgeführt. Zum Erreichen der Projektziele waren ursprünglich nicht vorgesehene Feldarbeiten von Frau Heberer in Chile notwendig, für die eine Begründung untenstehend gegeben wird. Ihre Flugkosten nach Chile wurden von der Studienstiftung des Deutschen Volkes getragen; Transportkosten im Gelände und Frachtkosten für den Probentransport wurden im Rahmen dieses Projekts finanziert und durch Einsparungen bei anderen Kostenansätzen kompensiert (siehe untenstehende Erklärung und Begründung). Zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Berichts sind die Arbeiten so gut wie beendet, und die Ergebnisse können in der vollen Dokumentation voraussichtlich Ende 2008 zur Verfügung stehen. Im Mai 2006, und damit in der Mitte der Laufzeit des Projekts erfolgte der Wechsel des Projektleiters J. Behrmann an das IFM-GEOMAR, Kiel. Die organisatorischen Probleme in Verbindung mit diesem Wechsel konnten durch den administrativen Verbleib des Projekts an der Universität Freiburg minimiert werden.

## 2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Planung und Ablauf des Projektes waren bestimmt von den oben genannten drei hauptsächlichen Aufgabenstellungen, aus denen sich die folgenden drei Zielsetzungen ableiten:

**Charakterisierung der Zusammensetzung und der Dynamik des Liefergebietes auf der überfahrenden Platte.** Dieses Ziel ist mit Hilfe von petrographischen Herkunftsanalysen und der Bestimmung von Spaltspurenaltern in relativ grobklastischen Lithologien angegangen worden. Die wichtigste Frage lautete in diesem Zusammenhang, ob die Sedimente Plio-Quartären Alters mit den Spaltspurenaltern detritischer Apatite Informationen über bestimmte Perioden besonders starker Hebung und Abtragung auf dem benachbarten Kontinent liefern. Diese Perioden wiederum können Ausdruck thermisch induzierter Hebung aufgrund der Unterfahrung durch eine heiße Unterplatte sein, oder können auf Zeiten starker, mechanischer Koppelung zwischen den beiden konvergierenden Platten hinweisen.

**Bestimmung des Einflusses der mineralogischen Zusammensetzung und des Mikrogefüges auf das mechanische Verhalten der Tiefseesedimente.** Das zweite Ziel wird erreicht durch eine eingehende Untersuchung von Kernmaterial mit hoch auflösender Raster-Elektronenmikroskopie. Die Untersuchungen haben ergeben, dass es sich bei den Proben vorherrschend um feine Silte handelte, die keinem nennenswerten Einfluss durch diagenetische Prozesse unterlegen gewesen sind. Die

quantitativen Untersuchungen der mineralogischen Zusammensetzung der experimentell deformierten Proben mit Rietveld-Röntgenbeugungsanalysen haben ergeben, dass entlang des Tiefseegrabens nach Süden der Feldspatgehalt systematisch abnimmt und der Quarzgehalt ebenso systematisch zunimmt. Die Tonmineralgehalte sind auch in den feinkörnigen Sedimenten überraschend gering gewesen, und die Tonmineralspezies zeigen keine systematischen Variationen entlang des Tiefseegrabens.

**Analyse des Festigkeitsverhaltens der Tiefseesedimente, um Rückschlüsse auf die Mechanik subduzierter Sedimentpakete ziehen zu können.** Die geotechnischen Experimente als drittes Herzstück der Untersuchungen schließlich ließen Licht auf sehr praktische Fragen fallen. Die Experimente haben die geomechanischen „Startbedingungen“ bei der Subduktion im obersten Teil der Plattengrenzstörung (décollement) simuliert, wo die frontale Abscherung die ungestörten Sedimente auf der abtauchenden Platte betrifft. Wie Röser (2007) zeigen konnte, war mit den drainierten Ringscherversuchen und Direktscherversuchen eine realistische Simulation der (dort undrainierten) Bedingungen am oberen Ende der Seismogenen Zone möglich, wenn man von einem dort herrschenden Verhältnis zwischen Porenfluiddruck und lithostatischem Auflastdruck von etwa 0,9 ausgeht. Die geotechnischen Schertests unter niedrigen Auflastspannungen haben deshalb geholfen, die Reibungskoeffizienten der chilenischen Sedimente entlang des Streichens des Plattenrandes zu charakterisieren. Am südchilenischen Kontinentalrand führt die Variabilität im Aufbau und in der Altersstruktur des Plattenrandes im Streichen sowohl zu verschiedener seismischer Kopplung als auch zu abruptem Wechsel von Akkretion und Subduktionserosion (Behrmann & Kopf, 2001). Solche Prozesse steuern maßgeblich globale Massenbilanzen, sind aber hinsichtlich ihrer Kontrollparameter nur unzulänglich untersucht. Die wichtigsten Ausgangsfragen, die in diesem Kontext beantwortet werden sollten, sind:

- Welche Parameter in den Sedimenten kontrollieren, wo die Plattengrenze sich ausbildet?
- Welche Faktoren steuern das Einsetzen seismogenen Verhaltens im tieferen Teil dieser sedimentführenden Störungszonen?
- Wieso ist die Kopplung zwischen den Platten in verschiedenen Bereichen der Subduktionszone so verschieden? Sind die wichtigsten Steuerungsfaktoren der geringe Reibungskoeffizient mancher Minerale, hoher Porenwasserdruck (der die effektive Scherspannung herabsetzt), oder eine Kombination beider Größen?
- Weshalb treten trotz der extrem niedrigen effektiven Scherspannung an konvergenten Plattenrändern Erdbeben grosser Magnitude auf?

Auf diese Fragen wird wieder in Abschnitt II.1 zurückzukommen sein.

### **3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Auf der Erde entstehen die stärksten Erdbeben entlang von Subduktionszonen an konvergierenden Plattenrändern. Bei diesen Ereignissen entlädt sich 90 % aller durch Plattendrift und Reibung aufgebauten Spannung. Solche Erdbeben bedrohen dichtbesiedelte Regionen und wirtschaftliche Zentren, und führten schon in der Vorgeschichte der Menschheit, so zum Beispiel am Ausgang der Bronzezeit, zum Untergang ganzer Kulturen. Im Gegensatz zu intrakrustalen Beben im kontinentalen Bereich, deren Herde zumeist in flachen Tiefen (4-12 km) lokalisiert sind, entstehen große koseismische Rupturen in Subduktionszonen vornehmlich in einem Tiefenbereich von 10 km und 50 km. Als solche „seismogenen Zonen“ bezeichnet man den gekoppelten Bereich zwischen den sich gegenläufig bewegenden tektonischen Platten, dessen oberes, seewärtiges Ende in Tiefen entsprechend einer Gebirgstemperatur von ca. 100-150°C postuliert wird. Ein Regime starker, mechanischer Koppelung zwischen den Platten in der seismogenen Zone kann den Aufbau großer, horizontaler Einspannung bewirken, was wiederum zur Kompression, Verdickung und Heraushebung der überfahrenden Platte führen kann Ausbildung. Säkuläre, schwache Koppelung hätte dagegen einen „Rückbau“ von Orogenen zur Folge, mit geringeren Hebungsraten, eventuell tektonischer Extension

und der Entwicklung von Sedimentbecken an der Krustenoberfläche der überfahrenden Platte. Eine weitere Ursache der Variation von Hebungs- und Exhumierungsraten in der überfahrenden Platte sind regionale und damit temporäre Unterschiede in der thermisch verursachten Heraushebung. Diese Frage sollte durch das vorgeschlagene Programm der Beprobung von Kernmaterial für Spaltspurenuntersuchungen angegangen werden.

Die strukturgeologischen und petrologischen Vorgänge in der seismogenen Zone sind durch die Entwässerung und mineralogische Umwandlung von Tonmineralen und Biogensilikat charakterisiert, und einer der Kernfragen geowissenschaftlicher Forschung an Kontinentalrändern ist das Verständnis der Mechanik der Plattengrenze. Insbesondere ist es wichtig, zu trennen, inwieweit niedrige Reibungskoeffizienten mancher Mineralphasen das Einschneiden des Décollements und die Bewegung an der Aufschiebung kontrollieren, oder ob und in welchem Ausmass Porendruckanstieg durch Überfahung der fluidreichen Sedimente im Tiefseegraben das Störungsverhalten mit beeinflusst. Bisher liegen relativ wenige Ergebnisse experimenteller Forschung zu den Reibungskoeffizienten natürlicher Sedimente vor. Der Reibungskoeffizient ( $\mu$ ) variiert über etwa eine Größenordnung (von  $\sim 0.85$  bis  $\sim 0.07$ ) von quarzreichen Gesteinen zu Tonen. Es wurde zudem gezeigt, dass unterschiedliche Wassersättigung und die variable Scherrate einen massgeblichen Einfluss auf das mechanische Verhalten haben. Heute existieren verschiedene Hypothesen hinsichtlich der geringen Scherwiderstände und niedrigen Stressabfälle während Erdbeben, das Einhergehen von diagenetischen und metamorphen Reaktionen in der seismogenen Zone, und das komplexe Wechselspiel von Mineralogie und Porenwasserdruck. Mit den hier vorgeschlagenen geotechnischen Experimenten können mehrere dieser Hypothesen getestet und auf die Ergebnisse den chilenischen Kontinentalrand angewandt werden. Die Untersuchungen der Sediment- und Sedimentgesteinsproben mit hochauflösender Raster-Elektronenmikroskopie können helfen, abzuklären, ob es eine mineralogische oder mikrostrukturelle „*prima causa*“ für ein bestimmtes mechanisches Verhalten gibt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Subduktionszone am pazifischen Rand Südamerikas im Bereich des für TIPTEQ gewählten Untersuchungsgebietes ideale Voraussetzungen bot, die Änderungen im Streichen bei der Sedimentzusammensetzung, dem geomechanischen Verhalten und bei der Abtragungsdynamik auf dem Kontinent zu studieren, und die Ergebnisse auf Variationen in der Topographie und der mechanischen sowie thermischen Struktur der abtauchenden Nazca-Platte rückzubeziehen.

#### **4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Im Rahmen des Projekts ist intensiv mit den TIPTEQ-Partnern an den Universitäten FU Berlin, Bremen, Hamburg, Potsdam und Kiel, sowie an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, dem GeoForschungsZentrum Potsdam und dem IFM-GEOMAR, Kiel zusammengearbeitet worden. Die Direktscher-Experimente wurden im Geotechnischen Labor der Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, USA durchgeführt. Hinsichtlich der Spaltspurenanalysen kam es zu einer produktiven Zusammenarbeit mit den zuständigen Stellen am neuen Garchingener Forschungsreaktor FRM II (Bestrahlung von Probenmaterial). Teile der Apatit-Spaltspurenanalysen wurden an den Mikroskopen am Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Basel und am Institut für Geographie und Geologie der Universität Salzburg durchgeführt. Die Nutzung der Geräte und der dortigen fachlichen Expertise erwiesen sich als überaus hilfreich und dem Projekt dienlich.

## II. Ergebnisse

### 1. Ergebnisse im Einzelnen

Dieses Teilprojekt von TIPTEQ hat fundamentale Daten zur Petrogenese, zur Herkunft und zu den gesteinsphysikalischen Eigenschaften von Sedimenten erbracht, die gegenwärtig im Tiefseeegraben und am Kontinentalhang vor Südchile abgelagert, zu Gesteinen verfestigt und dann zum Teil unter den südamerikanischen Kontinent subduziert wurden und werden. Grundlegend waren die Arbeiten erstens zum Verständnis der Natur seismogenen Verhaltens in den flachen Teilen von Subduktionszonen. Hierbei lässt sich zum Ersten zeigen, dass die quarz- und feldspatreichen siltigen Sedimente in Direktscher- und Ringschertests teils „velocity weakening“ und teils „velocity strengthening“ als dynamische Eigenschaft im Reibungsverhalten besitzen. Hierbei tritt erstere Eigenschaft vorzugsweise bei höheren Umlagerungsdrücken (bis 30 MPa) auf (siehe Abb. 1). Im Diagramm (Abb. 1) sind die a-b Werte für Festigkeitsänderungen bei Erhöhung der Scherrate in den Ringscher- und Direktscher-Experimenten aufgetragen, und zwar als Funktion der geographischen Breite (°S) auf der vertikalen Achse und des Umlagerungsdruckes (MPa effektive Spannung). Der Umlagerungsdruck kennzeichnet zunehmende Tiefenlage, wobei seismogenes Verhalten in der Natur bei effektiven Spannungen von etwa 15-30 MPa aufzutreten beginnt. Negative Werte (rot unterlegt) kennzeichnen „velocity weakening“, positive Werte kennzeichnen „velocity strengthening“.

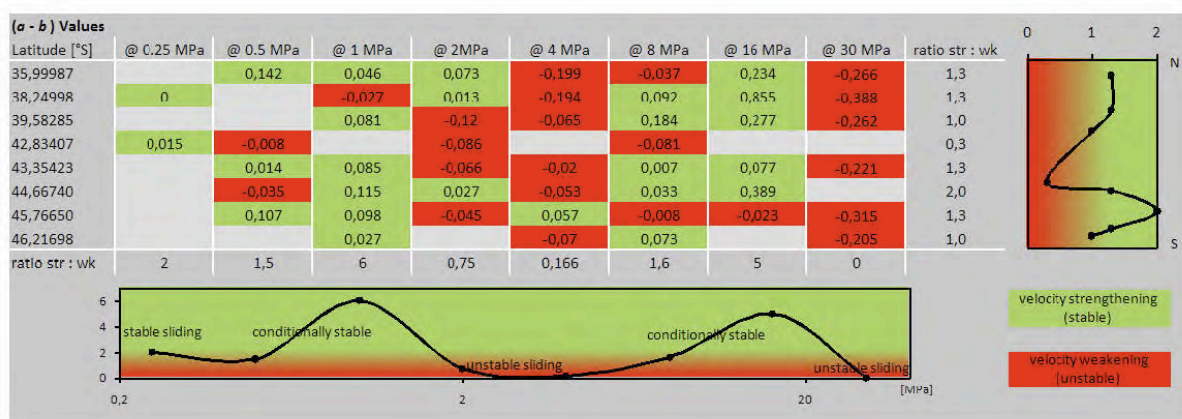


Abb. 1: Velocity weakening ( $a-b < 0$ ) und velocity strengthening ( $a-b > 0$ ) als Funktion von geographischer Breite und Umlagerungsspannung (effektive Spannung) in Ringscher- Und Direktscher-Experimenten an Sedimentproben aus dem Chile Tiefseeegraben. Die Kästen am unteren und am rechten Bildrand veranschaulichen die Auflastbereiche bzw. Breitenlagen, in denen es vorzugsweise zu stabilem (grün) oder instabilem (rot) Reibungsgleiten kommt. Aus Roeser (2007).

Velocity weakening verleiht Gesteinen die Fähigkeit zu katastrophaler Bruchausbreitung und damit zur Selbstorganisation von Erdbeben. Aus Abb. 1 ist ersichtlich, dass „velocity weakening“, und damit instabiles Gleiten bei effektiven Spannungen von etwa 2-4 MPa vorherrscht, und genau so bei hohen (30 MPa) effektiven Spannungen. Nimmt man nun die in den Experimenten ermittelten dynamischen Reibungsdaten in ein Modell einer mit subduzierenden Sedimenten ausgekleideten Plattengrenzfläche für das untersuchte Gebiet auf, so ergibt sich im Prinzip das Bild einer nach Osten geneigten Plattengrenzfläche, auf der im flachen (westlichen) Teil mit Ausnahme von „asperity patches“ stabiles Gleiten vorherrscht, und damit aseismische Deformation. Zum tieferen, östlichen Teil hin herrscht instabiles Gleiten vor, und damit seismische, also Erdbeben erzeugende Deformation. Hiermit ist eine mögliche Antwort gefunden auf eine der wichtigsten Ausgangsfragen des Projekts, nämlich welche Faktoren das Einsetzen seismogenen Verhaltens im tieferen Teil der Sediment führenden Störungszone steuern? Es spricht in der Tat Einiges dafür, dass die Stabilität des Reibungsgleitens