

## **Schlussbericht**

### **PETROTEC – Petrogenetische und geotechnische Charakterisierung der Sedimente des Tiefseegrabens und des Kontinentalhangs 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 Garching Forschungreaktor 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“.

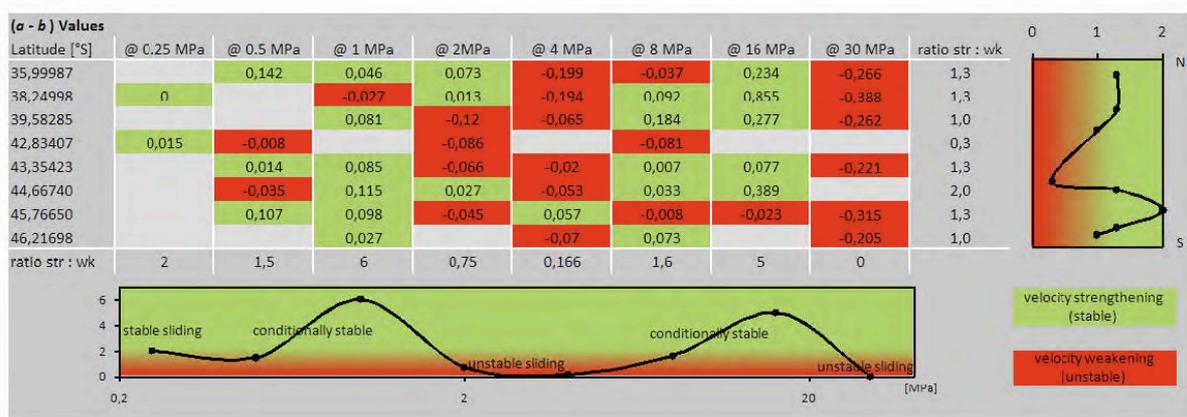


Abb. 1: Velocity weakening ( $a-b < 0$ ) und velocity strengthening ( $a-b > 0$ ) als Funktion von geographischer Breite und Umlagerungsspannung (effektive Spannung) in Ringscher- Und Direktscher-Experimenten an Sedimentproben aus dem Chile Tiefseeegraben. Die Kästen am unteren und am rechten Bildrand 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

nicht überall und bei jedem Umlagerungsdruck gegeben ist, sondern dass zum oberen Ende der seismogene Zone hin instabiles Gleiten vorherrscht. Dieses Ergebnis ist insbesondere angesichts der Tatsache wichtig, als instabiles Gleiten feinkörniger Sedimente im Experiment bisher noch nicht schlüssig nachgewiesen worden ist.

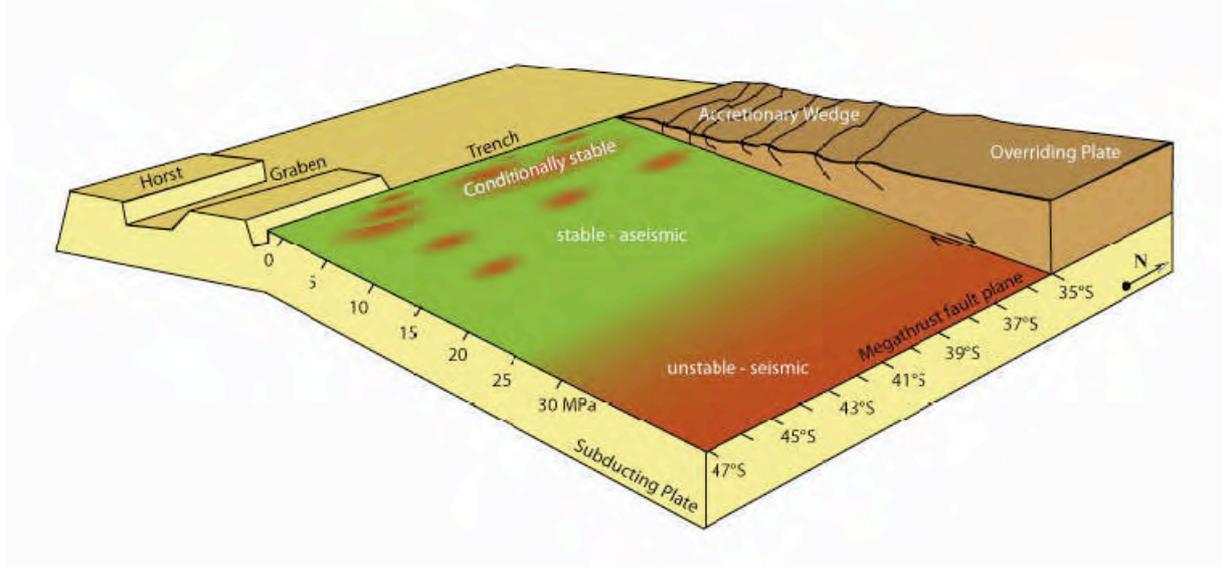


Abb. 2: Schrägaufsicht von Südosten auf die Plattengrenzfläche mit Bedeckung aus subduziertem Sediment, mit leicht schematisierter Darstellung der Bereiche in denen es vorzugsweise zu stabilem (grün) oder instabilem (rot) Gleiten kommt. Die Darstellung ist aus den Daten in Abb. 1 abgeleitet.

Zweitens zeigen die Sedimentproben aus dem Tiefseegraben und damit im Analogschluss auch die subduzierten Sedimente südlich von 37°S eine dramatische und systematische Abnahme der Scherfestigkeit und vor allem des Reibungskoeffizienten (bis 50%; siehe Abb. 3). Dies ist klar zu sehen in Abb. 3a und 3b, wo diese beiden Parameter gegen die geographische Breite aufgetragen sind.

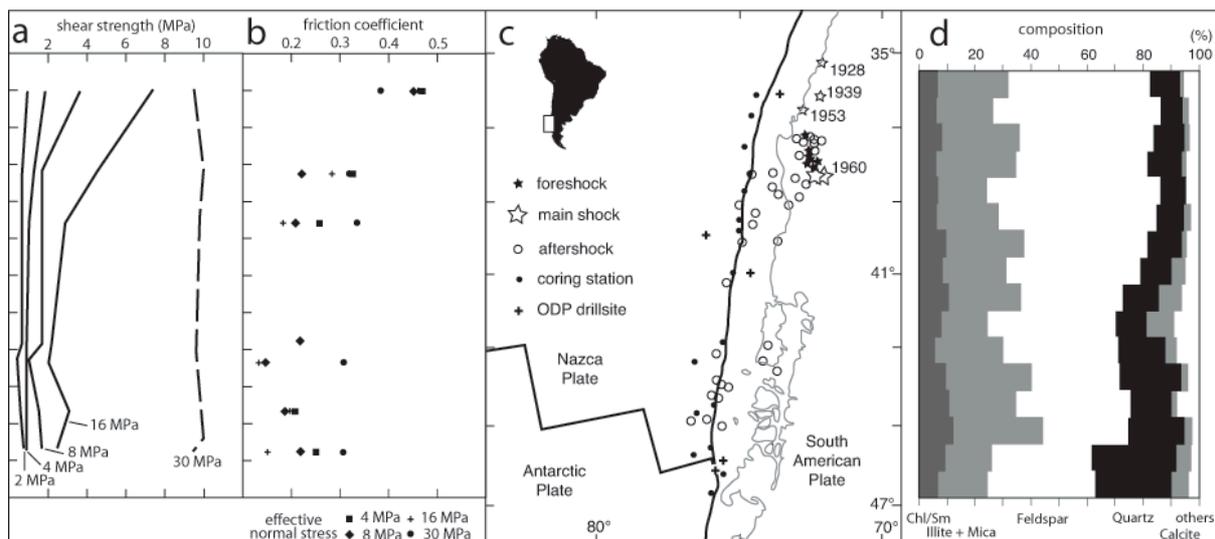


Abb. 3: a) Geotechnische Eigenschaften von Sedimentproben aus dem Chile-Tiefseegraben, aufgetragen gegen die südliche Breitenlage. a) Scherfestigkeit im Ringscher- (durchgezogene Linien) bzw. im Direktscherexperiment (gestrichelt), b) Reibungskoeffizienten bei verschiedenen Umschließungsdrücken, c) tektonische Skizze des Plattenrandes mit Lage der Vor-, Haupt- und Nachbeben des Chilebebens von 1960, d) mineralogische Zusammensetzung der getesteten Kernproben in Abhängigkeit von der geographischen Breite.

Vergleicht man die Daten in Abb. 3a und 3b mit der Kartendarstellung in Abb. 3c, so zeigt sich, dass das große Chile-Beben von 1960 und die Herdlagen der Vorbeben bei etwa 37°S bis 38,5°S zu liegen kommen, wo das Sediment im Tiefseeegraben seine Festigkeits- und Reibungseigenschaften nach Süden hin entscheidend reduziert. Die sehr breite, nach Süden anschließende Zone mechanisch schwachen Sediments, die bis 46°S reicht, hat möglicherweise das Ausmaß der koseismischen Ruptur vorgezeichnet, die durch die Verteilung der Nachbeben (Abb. 3c) verdeutlicht wird. Für das Chile-Beben von 1960 ist also ein Szenario vorstellbar, in dem die Ruptur im Norden in einem Segment des Plattenrandes entstanden ist, in dem subduziertes Sediment hoher Festigkeit eine Spannungskonzentration und damit eine seismische Asperität erzeugt hat. Aus dieser Asperität konnte sich die Bruchfläche in der Seismogenen Zone überaus (etwa 1000 km) weit nach Süden in einen Bereich hinein ausbreiten, in dem hohe Scherwiderstände nicht auftreten. Dieses Modell liefert also eine Erklärung, wieso trotz der extrem niedrigen effektiven Scherspannung an konvergenten Plattenrändern Erdbeben grosser Magnitude auftreten können, einer der zentralen Fragen, die dieses Projekt gestellt hat.

Es gibt noch einen weiteren, möglichen Grund außer dem Reibungsverhalten, wieso die Kopplung zwischen den Platten in verschiedenen Breitenlagen der Subduktionszone so verschieden ist. Betrachtet man den Mineralbestand der getesteten Sedimente in Abhängigkeit der Breitenlage (Abb. 3d), so fällt auf, dass südwärts bei etwa gleich bleibendem Gehalt an Phyllosilikaten der Feldspatgehalt geringer und der Quarzgehalt größer wird. Dieser Unterschied hat wichtige Folgen für das rheologische Verhalten der subduzierten Sedimente bei erhöhter Temperatur, also am unteren Ende der seismogenen Zone. Während Gesteine mit höherem (> 20 %) Quarzgehalt bereits bei ca. 300°C plastisch fließen können, gilt dies für feldspatreiche Gesteine erst bei wesentlich (ca. 500°C) höheren Temperaturen. Auf die südchilenische Subduktionszone bezogen bedeutet dies, dass die mechanische Kopplung im Norden stärker ist und im Süden geringer. Auch dies erklärt die Existenz einer seismischen Asperität im Norden des Gebiets relativ gut.

Die durchgeführten Triaxial-Scherversuche mit konstanter Deformationsrate haben gezeigt, dass die tiefmarinen Silte des Chile-Tiefseeegrabens auf einachiale Belastung nach dem Nachgeben häufig mit mechanischer Schwächung (um etwa 10-15%) reagieren. Dies ist in Abb. 4 dargestellt, wo die Proben, die nach dem Nachgeben mit zunehmender Deformation weiter an Festigkeit verloren hatten („structurally weak“), rot markiert sind. Die Proben, die auf zunehmende Deformation mit Verhärtung reagiert haben („structurally strong“) sind in der Abbildung grün markiert. Wichtig in Abb. 4 ist zu bemerken, dass vor allem die Materialien Verformungsschwächung zeigen (rot), die im Tiefseeegraben selbst bzw. auf der ankommenden Nazca-Platte abgelagert worden sind. Hierbei handelt es sich tendenziell um die feinkörnigeren, besser sortierten Sedimente. Obwohl eine generalisierte Aussage zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich scheint, ist zu vermuten, dass solche gut sortierten Feinsilte, wenn sie auf dem Kontinentalhang oder anderen Gebieten mit Neigung des Meeresbodens abgelagert sind, eine der Ursachen für die häufig auftretenden Rutschungen am unteren Kontinentalhang bilden. Weiter ist zu konstatieren, dass solche Sedimente bei der Gründung von wissenschaftlichen und kommerziellen Installationen in der Tiefsee große geotechnische Probleme bieten könnten. Eine detailliertere Analyse dieses Verhaltens bietet sich vor allem dort an, wo große Meeresbodeninstallationen (Förderplattformen etc.) im „deep offshore“ geplant sind.

Viertens zeigen die Ergebnisse der petrographischen Untersuchungen und der Apatit-Spaltspurenanalysen, dass sich die Sedimente seewärts der großen Flussysteme und der assoziierten submarinen Canyons meist klar und eindeutig auf die Liefergebiete rückbeziehen lassen, wobei der Eintrag jungen Materials mit vulkanischem Ursprung eine große Rolle spielt. Die großräumige Variation der Zusammensetzung des Liefergebietes spiegelt sich zum Beispiel in der Änderung des Feldspat- und Quarzgehalte wieder (Abb. 3d). Die erhöhten Quarzgehalte im Süden lassen sich auf die granodioritischen Gesteine des Patagonischen Batholiten beziehen. Hohe Gehalte an – zum Teil frischen – vulkanischen Gläsern und Gesteinsfragmenten (Abb. 5) sind Sanden aus dem Norden des bearbeiteten Gebietes gefunden worden und legen Zeugnis davon ab, dass die jungen Vulkangebäude der Anden effizient zerstört und abgetragen werden.

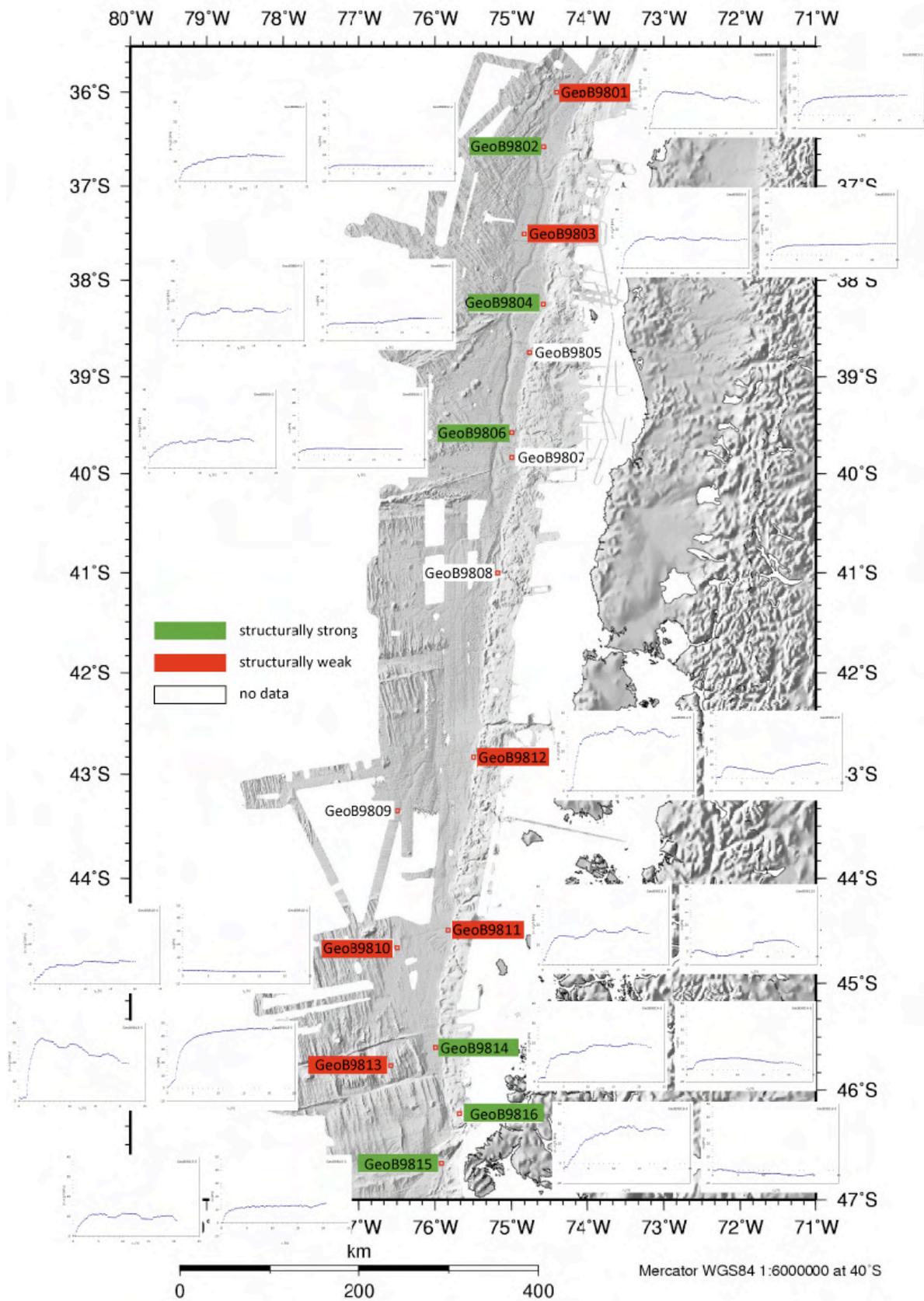


Abb. 4: Einige Ergebnisse der Triaxial-Scherversuche, die die Verteilung von Sedimenten zeigen, die bei der Deformation mechanisch geschwächt werden (rot), bzw. mit Härtung auf Deformation reagieren (grün). In den linken Diagrammen ist die Scherspannung, in den rechten die Porendruckänderung gegen den Verformungsbetrag aufgetragen. Aus Roeser (2007)

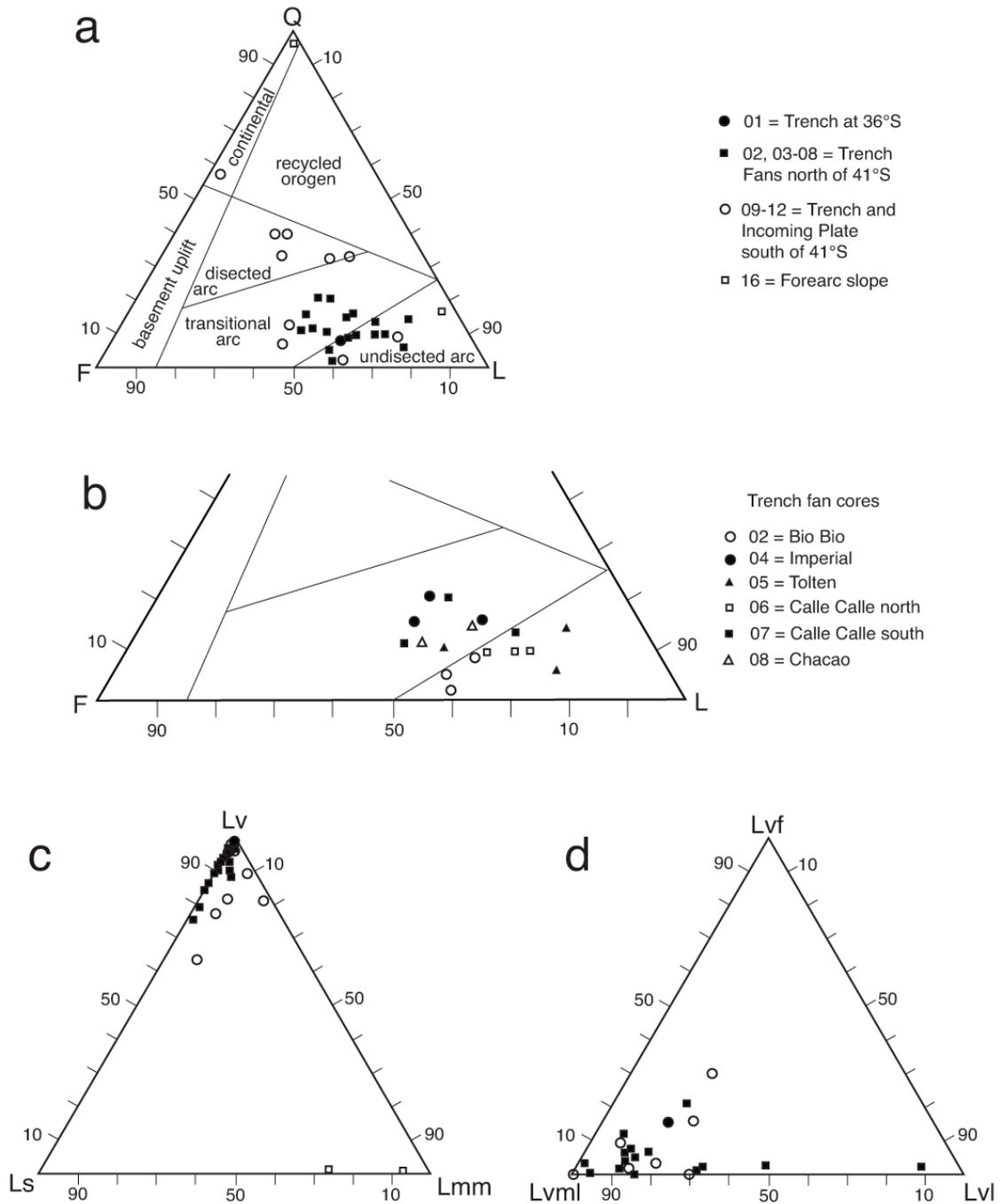


Abb. 5: Ergebnisse der petrographischen Herkunftsanalyse von Sandlagen im Kernmaterial der Expedition 181 von R/V Sonne in Dreiecksdiagrammen. a) Die relativen Gehalte von Quarz (Q), Feldspat (F) und Gesteinsfragmenten (L) zeigen deutliche Unterschiede zwischen dem Süden und dem Norden des Gebiets. Der im Norden höhere Gehalt an Gesteinsfragmenten geht auf die vermehrte Abtragung von Vulkaniten im Hinterland zurück. b) Das QFL-Diagramm von Sanden aus den Tiefseefächern zeigt, dass jeder Tiefseefächer seine eigene petrographische Signatur hat, die mit der Zusammensetzung der Liefergebiete korreliert. c) Die Gehalte an Gesteinsfragmenten vulkanischen (Lv), sedimentären (Ls) und metamorphen (Lmm) zeigen ebenfalls Unterschiede zwischen dem Norden und dem Süden, wobei der Norden am stärksten den Vulkanismus im Liefergebiet widerspiegelt. d) Das Vorherrschen mikrolithischer Gesteinsbruchstücke (Lvml) in fast allen Proben geht auf das starke Vorherrschen von Andesitlaven im Liefergebiet zurück, relativ zu solchen von Basalten (Lvl) oder sauren Vulkaniten (Lv) geliefert worden sind.

Auch ohne die noch nicht abgeschlossene Dokumentation der Ergebnisse der Apatit-Spaltspurenalter (dies wird bei Heberer, 2008 nachzulesen sein) zeigt sich, dass junge (10 Millionen Jahre oder jünger) Heraushebung und Denudation der Oberplatte eine wichtige Rolle bei den Subduktionsprozessen spielt. Die junge Hebung als tektonischer Prozess lässt sich korrelieren mit verstärkter, mechanischer Koppelung zwischen Unter- und Oberplatte, der großmaßstäblichen Unterplattung und Subkretion von subduzierten Sedimenten an die Oberplatte im Arbeitsgebiet.

Ein unerwartetes aber möglicherweise sehr wichtiges Ergebnis unserer Untersuchungen ist, dass die Chronologie von Trübestromablagerungen in den Tiefseefächern im untersuchten Gebiet im Großen und Ganzen den Zyklus schwerer Erdbeben an Land abbildet. Diese Daten sollen in Heberer et al (in Vorbereitung; siehe untenstehende Liste) publiziert werden.

## **2. Zahlenmäßiger Nachweis**

Auskunft über die Verausgabung der bewilligten Mittel gibt der dem Projektträger bereits zugegangene Schlussverwendungsnachweis.

## **3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geleisteten Arbeiten waren ohne Ausnahme zur Erzielung der Ergebnisse notwendig.

## **4. Verwertung**

Die durchgeführten Untersuchungen dienten in erster Linie der Grundlagenforschung und nicht der direkten eigenen Verwertung. Demzufolge wurden und werden die Ergebnisse durch Publikation in geeigneten Fachzeitschriften und auf wissenschaftlichen Tagungen dem interessierten Fachpublikum vermittelt, um so Eingang in die praktische Verwertung zu finden.

Die teilweise neuartigen Deformationsapparaturen, die im Rahmen des Projektes, aber auch anderer, parallel durchgeführter Vorhaben, entwickelt und getestet wurden, bieten die Möglichkeit in der Zukunft neuartige Testverfahren für Baugründungen bei großer Gebirgsbelastung sowie zur Untersuchungen von Hang- und Böschungsstabilitäten, sowie für Baumaterialien, die wechselnden und extremen hydraulischen Bedingungen ausgesetzt sind, einzusetzen. Dies gilt insbesondere für die verwendete Ringscher-Apparatur, ein Gerät, mit dem normalerweise das mechanische Verhalten von Schüttgütern unter geringer Auflast charakterisiert wird. Dieses Gerät wurde für Auflasten bis ca. 20 MPa umgebaut.

## **5. Relevante Ergebnisse Dritter**

Im Verlauf des Projektes wurden keine Ergebnisse Dritter bekannt, die eine Revision der Zielsetzung des Projektes erforderlich machten.

## **6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

### **Erfolgte Veröffentlichungen (Konferenzbeiträge)**

Heberer, B., Rahn, M. & Behrmann, J., 2005. How to decipher upper plate denudation by looking at fission tracks from the lower plate sediments - a concept for a study of the Southern Chile Trench. – In: Rudloff, A. & Stroink, L. (eds.), Geotechnologien, Science Report, 5, 34-38

- Heberer, B., Rahn, M. & Behrmann, J., 2006. Reaction of an upper plate to varying subduction regimes – concept and initial results from the Southern Chile Trench. – In: Ventura, B, & Lisker, F. (eds.), European Conference on Thermochronology, 2006, Bremen, Germany. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 49, 147-149
- Roeser, G., Behrmann, J.H., Kopf, A. & Tipteq Research Group (2006) PETROTEC - geotechnical characterization of trench- and slope sediments off Southern Chile: first results. - Geophysical Research Abstracts, 8, A-04067 (Compact Disc) eISSN 1607-7962
- Roeser, G., Behrmann, J.H. & Kopf, A. (2007) Did differences in strength and frictional behaviour of subducted sediment constrain the rupture of the great 1960 Chile earthquake? - Geophysical Research Abstracts, 9, A-05349 (Compact Disc) eISSN 1607-7962
- Roeser, G., Heberer, B., Behrmann, J.H., Rahn, M. & Kopf, A. (2007) Sedimentology, petrography and provenance of modern Southern Chile Trench sediments (36-47°S). - Geophysical Research Abstracts, 9, A-05357 (Compact Disc) eISSN 1607-7962
- Heberer, B., Behrmann, J.H. & Rahn, M. (2007) Can apatite fission track ages from modern trench sands reflect the dynamics of the upper plate? – Preliminary results from the Southern Chile Trench. - Geophysical Research Abstracts, 9, A-07565 (Compact Disc) eISSN 1607-7962
- Behrmann, J.H., Kukowski, N., Krawczyk, C.M., Rietbrock, A., Schilling, F. & TIPTEQ Research Group (2007) Changing material properties across the south central Chile forearc and impact on seismogenic zone. - Geophysical Research Abstracts, 9, A-09295 (Compact Disc) eISSN 1607-7962
- Heberer, B., Behrmann, J.H. & Rahn, M., 2007. Can apatite fission track ages from modern trench sands reflect the dynamics of the upper plate? – Preliminary results from the Southern Chile Trench. I- n: Abstracts 20th Colloquium on Latin American Earth Sciences Kiel, Germany, 11-13 April 2007, p. 254, SZ1P09
- Roeser, G., Heberer, B., Behrmann, J.H., Rahn, M. & Kopf, A., 2007. Sedimentology, petrography and provenance of modern Southern Chile Trench sediments (36° - 47°S). - In: Abstracts 20th Colloquium on Latin American Earth Sciences Kiel, Germany, 11-13 April 2007, p. 263, SZ1P16
- Heberer, B; Behrmann, J.H. & Rahn, M., 2008. Tracking the provenance – Assessing sedimentary pathways and upper plate dynamics at the South Central Chile margin. - Geophysical Research Abstracts, 10, A-09211 (Compact Disc) eISSN 1607-7962

### **Dissertationen**

- Roeser, G., 2007. Petrography, physical properties, and geotechnical behavior of modern sediments, Southern Chile Trench. Doctoral Thesis, Univ. Freiburg, 129 pp.
- Heberer, B., 2008. Tracking the provenance: denudation, sediment pathways and upper plate geodynamics at the South Central Chile margin. Doctoral Thesis, Univ. Freiburg, to be submitted

### **Veröffentlichungen in Vorbereitung**

- Heberer, B., Roeser, G., Behrmann, J.H., Kopf, A. & Rahn, M., 2008. Young sediments from the Southern Chile Trench: a record of active margin magmatism, tectonics, and paleoseismicity. Bull. Soc. Geol. Am., to be submitted
- Behrmann, J.H., Roeser, G. & Kopf, A., 2008. Did differences in composition and strength of subducted sediment define the rupture of the great 1960 Chile earthquake? Nature, to be submitted
- Heberer, B., Rahn, M. & Behrmann, J.H., 2008. Assessing sedimentary pathways and upper plate dynamics at the South Central Chile margin from apatite fission track data and source area analysis. To be submitted.

### **III. Erfolgskontrollbericht**

#### **1. Beitrag des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen**

Die Forschungen, über die hier berichtet wird, sind über die vom BMBF ermöglichte Expedition 181 von R/V SONNE in das Meeresforschungsprogramm der Bundesregierung eingebettet. Das Projekt trägt zum Einen zur Erforschung von Erdbeben und Deformationsprozessen an aktiven Plattenrändern sowie zur Erforschung ihres Aufbaus und ihrer Struktur bei, zum Anderen liefert es einen wichtigen Beitrag zum generellen Verständnis transienter Phänomene bei Erdbeben erzeugenden Prozessen. Somit hat es einen direkten Bezug zu den Themenschwerpunkten „Das Erdinnere als treibende Kraft geologischer Prozesse“ und „Kontinentränder: Brennpunkte im Nutzungs- und Gefährdungspotenzial der Erde“ aus dem Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN von BMBF und DFG. Weiterhin knüpft das Projekt an Fragestellungen internationaler Großprojekte unter Beteiligung der Bundesrepublik Deutschland (z.B. Integrated Ocean Drilling Program) an, dessen Schwerpunkt in den nächsten Jahren auf dem Studium und der Erforschung Erdbeben erzeugender Prozesse liegen wird, manifestiert vor allem in den Projekten NanTroSeize am Nankai-Trench und Forearc (Japan) und CRISP (Costa Rica Seismogenesis Project) vor Mittelamerika.

#### **2. Wissenschaftliches Ergebnis**

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. Die quarz- und feldspatreichen siltigen Sedimente zeigten in Direktscher- und Ringschertests teils „velocity weakening“ und teils „velocity strengthening“, wobei erstere Eigenschaft vorzugsweise bei höheren Umlagerungsdrücken (bis 30 MPa) auftrat. Velocity weakening verleiht Gesteinen die Fähigkeit zu katastrophaler Bruchausbreitung und damit zur Selbstorganisation von Erdbeben. Zweitens zeigen die Gesteine des Tiefseegrabens südlich von 37°S eine dramatische und systematische Abnahme ihrer Scherfestigkeit und des Reibungskoeffizienten (bis zu 50%). Mit diesem Befund ist erklärbar, wieso sich die koseismische Ruptur des großen Chile-Erdbebens von 1960, dem stärksten je instrumentell registrierten Beben, von seiner Entstehungsregion 1000 km südwärts in eine Zone geringer Festigkeit im Subduktionskanal hinein ausbreiten konnte. Triaxial-Scherversuche mit konstanter Deformationsrate haben drittens gezeigt, dass die tiefmarinen Silte des Chile-Tiefseegrabens auf einachiale Belastung nach dem Nachgeben häufig mit mechanischer Schwächung (um etwa 10-15%) reagieren. In diesem Verhalten könnte eine Erklärung für die häufig auftretenden Rutschungen am unteren Kontinentalhang liegen. Weiter ist zu konstatieren, dass diese Sedimente bei der Gründung von wissenschaftlichen und kommerziellen Installationen in der Tiefsee geotechnische Probleme bieten könnten. Viertens zeigen die Ergebnisse der petrographischen Untersuchungen und der Apatit-Spaltspurenanalysen, dass sich die Sedimente seewärts der großen Flusssysteme und der assoziierten submarinen Canyons meist klar und eindeutig auf die Liefergebiete rückbeziehen lassen, wobei der Eintrag jungen Materials mit vulkanischem Ursprung eine große Rolle spielt. Schließlich und fünftens lässt sich zeigen, dass die Chronologie von Trübestromablagerungen in den Tiefseefächern im untersuchten Gebiet im Großen und Ganzen den Zyklus schwerer Erdbeben an Land abbildet.

#### **3. Fortschreibung des Verwertungsplans**

Grundsätzlich handelt es sich bei dem Projekt der Grundlagenforschung. Es kommt daher nicht zu Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechten, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen werden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten. Ein

wirtschaftlicher Erfolg nach Ende des Projekts wurde und wird wegen der an wissenschaftlichen Grundlagen orientierten Arbeiten nicht angestrebt. Die im Projekt erarbeiteten Daten stehen der Öffentlichkeit über Publikationen zur Verfügung bzw. werden zur Verfügung stehen. Die ausführliche Dokumentation ist im Fall der Dissertation von G. Röser (Röser 2007) bereits über den Dokumentenserver der Universität Freiburg erhältlich (<http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/2008/4203>). Im Fall der Dissertation von Frau Heberer wird dies voraussichtlich im Herbst/Winter 2008 der Fall sein. Zur wissenschaftlichen und wirtschaftliche Anschlußfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase ist zu sagen, dass der Bechluss, das Geotechnologien-Programm nicht zu verlängern hier erhebliche Einschränkungen mit sich bringt. Die Arbeiten haben allerdings dazu beigetragen, in 2008 anlaufende Untersuchungen im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs 574 „Subduktionsmaschine“ zu begründen und erst zu ermöglichen.

#### **4. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung**

Im Verlauf des Projekts konnten die Vorgaben, die in Bezug auf die Arbeiten selbst bestanden, insgesamt voll und ganz eingehalten werden. Bei der Zeitplanung ergaben sich anfänglich Verzögerungen teils durch den Begutachtungsprozess für das Gesamtprojekt TIPTEQ, und teils durch die mit einer gewissen Verzögerung durchgeführte Expedition 181 von R/V SONNE, auf der fast das gesamte für die Studie nötige Kernmaterial genommen wurde. Es ist jedoch gelungen, das volle Programm der geotechnischen Experimente bis zum Projektende 2007 durchzuführen und die Daten auszuwerten. Der im Wesentlichen durch ein Promotionsstipendium der Studienstiftung des Deutschen Volkes an Frau Bianca Heberer finanzierte Projektteil, der sich mit der Analyse des Liefergebietes durch Apatit-Spaltspurendatierungen auseinandergesetzt hat, wurde wegen der zeitversetzten Laufzeit des Stipendiums und deshalb des Arbeitsplanes bis Ende 2007 noch nicht abgeschlossen. Zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Berichts sind die analytischen Arbeiten jedoch abgeschlossen und Frau Heberers Dissertation wird an der Universität Freiburg im Laufe des Sommers 2008 eingereicht und examiniert werden. Es ist um Genehmigung gebeten worden (wissenschaftliche Begründung siehe oben), den Kostenrahmen beim Posten Position 0843 (Verbrauchsmaterial) zum Zweck der erfolgreichen Abwicklung des Projektes um insgesamt EUR 5355,79 zu Lasten der Personalkosten, bei denen erhebliche Einsparungen geleistet werden konnten, zu verstärken. Der Kostenrahmen für das Projekt ist jedoch in der Gesamtheit eingehalten worden, wobei sich eine Minderausgabe gegenüber dem ursprünglichen Kostenansatz in Höhe von EUR 4672,70 ergab.