



GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

Scientific Technical Report

Katrin Huhn

**Analyse der Mechanik des Makran Akkretionskeils mit Hilfe der Finiten
und der Diskreten Elemente Methode sowie analoger Sandexperimente**

Dissertation zur Erlangung
des akademischen Grades Dr.rer.nat.

Freien Universität Berlin, 2002

IV Zusammenfassung, Schlussbetrachtung & Ausblick

1 Zusammenfassung & Schlussbetrachtung

Mit der hier vorgelegten Arbeit werden die Deformationsprozesse im *forearc* der Makran Subduktionszone mit Hilfe verschiedener Simulationstechniken, die sich ergänzende und vergleichende Ergebnisse liefern, untersucht (FEM, DEM, Analogexperimente). Der Analyse der Mechanik Makrans gehen umfassende Parametersensitivitätsstudien zur Identifizierung des Einflusses einzelner Materialeigenschaften auf das Deformationsverhalten sowie die Massentransferprozesse im *forearc* Bereich von Subduktionszonen voraus. Diese Untersuchungen werden ausschließlich durch numerische Simulationstechniken (FEM, DEM) ermöglicht. Zudem erlauben diese Verfahren umfassende rheologische Untersuchungen. In allen Experimenten erweist sich dabei eine Mohr-Coulomb Rheologie mit *strain hardening/strain softening* oder einem *work hardening* zur Beschreibung des Deformationsverhaltens im *forearc* als geeignet.

Mit Hilfe umfangreicher Finite Elemente Simulationen werden das Elastizitätsmodul der Oberplatte sowie die basale und die interne Reibung des Akkretionskeils als entscheidende Schlüsselfaktoren für die Scherspannungsverteilung bzw. die Scherspannungsmagnituden im Akkretionskeil identifiziert. Bereits bei geringfügigen Variationen dieser Parameter ändert sich das Deformationsverhalten im *forearc* Bereich deutlich.

Die Schlüsselfunktion dieser beiden Materialeigenschaften beinhaltet einerseits, dass es erst bei einem hohen Elastizitätsmodul der Keilmaterialien bzw. ab einer bestimmten mechanischen Festigkeit dieser Materialien zu lokalisierten Deformationen in der Oberplatte kommt. Andererseits werden sowohl die Störungs- als auch die Keilgeometrien entscheidend von der basalen Reibung bzw. dem Reibungscontrast zum Keilmaterial bestimmt. Die vorliegenden Simulationen haben gezeigt, dass im Fall einer geringen Reibung der Décollementzone bzw. einem hohen Reibungscontrast gegenüber dem akkretierten Sediment hohe Scherspannungen entlang schmaler, in landwärtiger Richtung einfallender Lamellen akkumuliert werden. Diese markieren die Lage frontaler Überschiebungen im Keil, die als aktive Störungen identifiziert werden können, sobald die maximalen Scherspannungen von der Keiloberfläche bis an das Décollement eine durchgehende Linie bilden. Demgegenüber zeigen die Scherspannungsmuster in der Oberplatte im Fall einer hohen Reibung der Décollementzone basisparallele Lamellen hoher Spannungswerte in unmittelbarer Décollementnähe. Diese können im Vergleich zu den frontalen, reaktivierten Überschiebungen erst bei höheren Konvergenzbeträgen als Störungen aktiviert werden. Eine kinematische Interpretation dieser Strukturen ist methodisch bedingt nicht möglich.

Des weiteren zeigen die FE Experimente, dass die durch die Abtauchbewegung der ozeanischen Platte ausgelösten Spannungen und Deformationen durch eine schwache Schicht, deren Top die potentielle basale Scherfläche des Keils bildet, gut an die Oberplatte übertragen werden. Dieses Schichtpaket selbst akkumuliert dabei in Abhängigkeit von seinen internen Reibungseigenschaften nur sehr geringe Scherspannungen.

Diese Schlüsselfunktion der basalen und der internen Reibung wird mit Hilfe der Diskrete Elemente Simulationen und der Analogexperimente auch für die Massentransferprozesse und die Mechanik bei großen Verkürzung bestätigt. Es zeigt sich, dass einerseits die zeitliche Entwicklung des Akkretionskeils und andererseits die dabei ablaufenden Massentransferprozesse durch die Reibungsverteilung bzw. die Reibungscontraste innerhalb der zu akkretierenden Sedimente bestimmt werden. Auch hier wird bereits durch eine geringfügige Änderungen der Reibungsparameter ein deutliche Veränderung des Deformationsverhalten bzw. der Störungsgeometrien ausgelöst. Dies betrifft sowohl die Anzahl als auch die Position und den Verlauf der neuen Akkretionsschuppen und der reaktivierten Störungen. Des weiteren wird auch die Position sowie das Maß der maximalen Deformation im *forearc* Bereich durch die Reibungsverteilung in den herangeführten Sedimenten gesteuert. Die Ergebnisse der DEM Simulationen werden dabei die Analogexperimente abgeglichen.

Die Ergebnisse dieser Simulationen fließen in die Analyse des Deformationsverhaltens des Makran Akkretionskeils ein. Dabei wird eine Bewertung und Einschätzung der jeweiligen Ergebnisse der verschiedenen Methoden erst bei der Übertragung auf das natürliche Fallbeispiel möglich. Mit der Analyse der Mechanik der Makran Subduktionszone wird die Schlüsselrolle der Reibungsverteilung auf die Massen- und Deformationsprozesse bestätigt.

Die verschiedenen Simulationstechniken haben gezeigt, dass für die Bildung des Makran Akkretionskeils zwei potentielle Abscherhorizonte in den Turbiditen verantwortlich sind. Der obere Abscherhorizont weist eine geringe interne Reibung auf und zeichnet sich damit durch einen deutlichen Reibungscontrast von $\sim 200\%$ gegenüber dem umgebenden Sediment aus. Diese Schicht wird sofort nach Eintritt in die Subduktionszone als *Décollement* aktiviert und überträgt damit bereits unmittelbar Spannungen an die Oberplatte. Oberhalb dieser Schicht wird das Material frontal akkretiert. Der frontale Akkretionskeil bildet einen flachen unteren Hang. Das Material unterhalb dieser mechanisch schwachen Lage wird weit unter den Keil unterschoben und oberhalb des tiefergelegenen zweiten potentiellen Abscherhorizont höherer Reibung basal akkretiert. Dabei wird das Material vor der ‘basalen’ Deformationsfront stark horizontal kompaktiert bzw. verfestigt. Infolge der basalen Akkretion wird das Material oberhalb dieses Bereichs gehoben und erfährt im gesamten Schichtpaket eine deutliche Dehnung. Es bildet sich ein deutlich steilerer oberer Hang aus. Die interne Reibung des unteren Abscherhorizontes weicht nur wenig von der des umgebenden Materials ab. Demgegenüber ist der Reibungscontrast zwischen den beiden potentiellen Abscherhorizonten deutlich größer. Es wird somit rezent im Bereich der Makran Subduktionszone zeitgleich Material frontal und auch basal akkretiert, was auf die Existenz zweier potentieller Abscherhorizonte unterschiedlicher Reibung zurückzuführen ist.

Die mechanische Entkopplung der Bereiche frontaler und basaler Akkretion erfolgt über *out-of-sequence* Störungen, die während der Keilentwicklung gegen den Uhrzeigersinn rotiert werden und dabei versteilen. Des Weiteren zeigt eine Analyse der Deformation maximale Verkürzungsbeträge im frontalen Bereich des Keils.

Anhand dieser Arbeit wird gezeigt, dass nur durch die Kombination verschiedener Simulationstechniken eine umfassende Analyse der Mechanik des Makran Akkretionskeils möglich ist. Es ist nicht ausreichend, ausschließlich eines der hier benutzten Verfahren zu verwenden, da damit jeweils nur ein Aspekt beleuchtet werden kann. Dies bedeutet beispielsweise, dass ohne Untersuchungen mit der Finiten Elemente Methode keine Aussagen zur Spannungsentwicklung bzw. den Spannungsmagnituden möglich wären. Zudem erlaubt dieses Verfahren umfangreiche Rheologiebetrachtungen sowie Materialstudien, um die Bedeutung einzelner Parameter für die globale Spannungsverteilung im *forearc* zu identifizieren. Ein weiterer Vorteil der FEM ist es, dass aufgrund des Kontinuumsansatzes die Spannungswerte für jeden Punkt des Modellgebietes bestimmt werden können und zudem keine Skalierungsprobleme auftreten. Unberücksichtigt bleiben in den FE Simulationen einerseits die Betrachtungen des Massentransfers und es ist andererseits nicht möglich, große Deformationen in einem Material, das dem Mohr-Coulomb’schen Bruchkriterium gehorcht, zu simulieren. Demzufolge kann die Evolution eines Akkretionskeils nicht mit diesem Verfahren modelliert werden.

Hierfür eignet sich die Diskrete Elemente Methode. Mit dieser Simulationstechnik können aufgrund der Betrachtung eines granularen Mediums sowohl die Massentransfer- als auch die Deformationsprozesse in einem Mohr-Coulomb Material während der Evolution des *forearcs* untersucht werden. Zudem werden die Ergebnisse der FEM durch Aussagen zur Lage und Entwicklung von Störungszonen ergänzt. Da es sich ebenfalls um ein numerisches Verfahren handelt, bestehen einerseits wiederum keine Skalierungsprobleme gegenüber der Natur und es sind andererseits umfangreiche Parametersensitivitätsstudien durchführbar. Dies ermöglicht einerseits einen direkten Vergleich der Ergebnisse der FEM Experimente mit den DEM Simulationen und andererseits können die anhand der einen Methode identifizierten Schlüsselparameter mit dem anderen Verfahren getestet werden. Im Unterschied zu den Finite Elemente Experimenten liefert die DEM aber keine Informationen zum globalen Spannungsfeld bzw. den Spannungsmagnituden. Die Auflösung der Modelle wird jedoch durch die Rechnerleistung begrenzt.

Um die Ergebnisse der Numerik mit einer weiteren Methode abzugleichen, eignen sich analoge Sandexperimente. Diese ermöglichen ebenfalls die Untersuchung großer Deformationen in einer Mohr-Coulomb Rheologie. Mit diesem Verfahren kann äquivalent den Diskrete Elemente Simulationen die Entwicklung des Akkretionskeils betrachtet werden. Aufgrund der deutlich höheren Auflösung gegenüber den DEM Modellen lässt sich mit dieser Methode die Lage bzw. die Entwicklung einzelner Störungszonen wesentlich genauer untersuchen. Im Unterschied zu den numerischen Verfahren sind mit dieser Methode keine umfangreichen Materialparameter- und Rheologiestudien möglich. Zudem müssen die analogen Sandexperimente stets auf die Natur skaliert werden.

Alle Verfahren liefern somit vergleichende und sich ergänzende Ergebnisse, die in ihrer Summe zu einer möglichst umfassenden Beschreibung der Mechanik und Kinematik des *forearcs* beitragen. Aus diesem Grund sollten möglichst alle drei Verfahren parallel eingesetzt werden. Die Diskrete Elemente Methode bildet dabei als ein

numerisches Verfahren, welches granulare Materialien betrachtet, das Bindeglied zwischen der Finiten Element Methode und den Analogexperimenten.

2 Ausblick

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit, die ausschließlich 2-dimensionale Modell betrachtet, sollte die Mechanik eines *forearc* Gebietes nochmals mit allen drei Simulationstechniken in einem 3-dimensionalen Modellaufbau analysiert werden. Der Schwerpunkt liegt dabei neben Parameterstudien auf der Untersuchung des Einflusses schiefer Konvergenz bzw. lateraler Variationen.

Zudem soll getestet werden, welche Analyseansätze bzw. Auswertemethoden 3-dimensionaler Analogexperimente in die Interpretation äquivalenter DEM Modelle einfließen können. Dabei ist von besonderem Interesse, wo und mit welchem Verlauf Tiefenprofile im ‘numerischen Sandkasten’ gelegt werden sollen. Parallel dazu muss die Auflösung der DEM Experimente durch Softwareoptimierungen weiter erhöht werden, um die Ergebnisse zunehmend mit denen der Analogexperimente vergleichbar zu machen.

Für die Simulationen mit der Methode der Finiten Elemente sollte versucht werden, Kontaktelementen in die FE Gitter zu integrieren, die ein ‘Aufreißen’ an Knotenpunkten bei einem Überschreiten einer kritischen Scherspannung erlauben. Dies schafft vielleicht die Möglichkeit eine ‘echte’ basalen Scherzone zu simulieren. Dabei würden einerseits Informationen zur Scherspannungsverteilung bzw. der Scherspannungsentwicklung innerhalb der Scherzone gewonnen und andererseits der Einfluss einzelner Parameter auf die Spannungen in der Scherzone untersucht