



Doctoral Thesis

## Seismo-thermo-mechanical modeling of subduction zone seismicity

**Author(s):**

Dinther, Ylona van

**Publication Date:**

2013

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010051499> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 21331

SEISMO-THERMO-MECHANICAL MODELING OF  
SUBDUCTION ZONE SEISMICITY

A dissertation submitted to  
ETH ZÜRICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
YLONA VAN DINTHER  
MSc in Geophysics, Utrecht University, the Netherlands

born on February 1<sup>st</sup> 1984

citizen of the Netherlands

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Domenico Giardini	ETH Zürich
Prof. Dr. Jean-Philippe Avouac	California Institute of Technology
Prof. Dr. P. Martin Mai	King Abdullah University of Science and Technology
Prof. Dr. Taras V. Gerya	ETH Zürich
Dr. Luis A. Dalguer	ETH Zürich

---

The catastrophic occurrence of the 2004 M9.2 Sumatra and 2011 M9.0 Tohoku earthquakes illustrated the disastrous impact of megathrust earthquakes on society. They also emphasized our limited understanding of where and when these "big ones" may strike. The necessary improvement of long-term seismic hazard assessment requires a better physical understanding of the seismic cycle at these seismically active subduction zones. Models have the potential to overcome the restricted, direct observations in space and time. Currently, however, no model exists to explore the relation between long-term subduction dynamics and relating deformation and short-term seismogenesis. The development, validation and initial application of such a physically consistent seismo-thermo-mechanical numerical model is the main objective of this thesis.

First, I present a novel analog modeling tool that simulates cycling of megathrust earthquakes in a visco-elastic gelatin wedge. A comparison with natural observations shows interseismic and coseismic physics are captured in a robust, albeit simplified, way.

This tool is used to validate that a continuum-mechanics based, visco-elasto-plastic numerical approach, typically used for large-scale geodynamic problems, can be extended to study the short-term seismogenesis of megathrust earthquakes. To generate frictional instabilities and match laboratory source parameters, a local invariant implementation of a strongly slip rate-dependent friction formulation is required. The resulting continuum approach captures several interesting dynamic features, including inter-, co- and postseismic deformation that agrees qualitatively with GPS measurements and dynamic rupture features, including cracks, self-healing pulses and fault re-rupturing.

To facilitate a comparison to natural settings, I consider a more realistic setup of the Southern Chilean margin in terms of geometry and physical processes. Results agree with seismological, geodetic and geological observations, albeit for their coseismic speeds. They show a surprisingly good agreement with inter- and coseismic displacements measured before and during the 2010 M8.8 Maule earthquake. I further discuss on implications for several outstanding problems, including the contribution of cyclic to long-term deformation, physical mechanisms governing seismogenic zone limits and the low strength of megathrust faults.

Finally, I demonstrate one of the main advantages of this approach; the spontaneous unstable rupturing of both on- and off-megathrust events. Simulated outerrise and splay and antithetic normal events geometrically resemble natural observations. They are triggered by megathrust-induced quasi-static stress changes and agree with analytical predictions of dynamic Coulomb wedge theory. Their impact is distinct, both on megathrust cycling, due to premature updip triggering of megathrust events, and for tsunami hazards that are increased due to steeply dipping off-megathrust fault planes.

The innovative character of this seismo-thermo-mechanical approach opens a world of interdisciplinary research between geodynamics and seismology. This can relate to the generation and characteristics of megathrust earthquakes and beyond.

---

Das katastrophale Auftreten des 2004er M9.2 Sumatra und des 2011er M9.0 Tohoku Erdbebens veranschaulicht die desaströsen menschlichen und wirtschaftlichen Auswirkungen von Überschiebungserdbeben und unser begrenztes Verständnis davon, wo und wann diese "Megabebeben" zuschlagen können. Die notwendige Verbesserung von langfristigen seismischen Gefährdungsanalysen erfordert ein besseres physikalisches Verständnis des seismischen Zyklus in seismisch aktiven Subduktionszonen. Modelle haben das Potenzial, die eingeschränkten, direkten Beobachtungen in Raum und Zeit zu überwinden, obwohl derzeit kein Modell für die Erkundung der Beziehung zwischen langfristiger Subduktionsdynamik und entsprechender Deformation und kurzfristiger Seismogenese existiert. Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung, Validierung und erste Anwendung einer solchen physikalisch konsistenten seismo-thermo-mechanischen numerischen Modellierung.

Zunächst stelle ich ein neues Modellierungswerkzeug vor, das Zyklen von Überschiebungserdbeben in einem viskoelastischen Gelatinekeil simuliert. Ein Vergleich mit natürlichen Beobachtungen zeigt, dass die Physik interseismischer und koseismischer Perioden in einer robusten, wenn auch vereinfachten Art und Weise erfasst ist.

Dieses Werkzeug wird verwendet, um zu validieren, dass ein Kontinuum-Mechanik basierendes, visko-elasto-plastisches numerisches Verfahren, welches in der Regel für großskalige geodynamische Probleme verwendet wird, erweitert werden kann, um die kurzfristige Seismogenese von Überschiebungserdbeben zu untersuchen. Um Reibungsinstabilitäten zu erzeugen und um mit Quellparametern aus dem Labor übereinzustimmen, ist eine lokale invariante Implementierung eines stark verschiebungsratenabhängigen Reibungsterms erforderlich. Der resultierende Kontinuumsansatz erfasst mehrere interessante dynamische Merkmale, einschließlich inter-, ko- und postseismischer Deformationen, die qualitativ mit GPS-Messungen und intensiv diskutierten dynamischen Bruchcharakteristika, darunter Impulse, Risse und Störungsreaktivierung, übereinstimmen.

Um einen Vergleich zu natürlichen Umgebungen zu erleichtern, ziehe ich einen Kontinentalrand in Betracht, der eine realistischere Geometrie hat und komplexe physikalische Prozesse umfasst. Die Ergebnisse stimmen ungeachtet der koseismischen Geschwindigkeiten mit seismologischen, geodätischen und geologischen Beobachtungen überein, und zeigen eine überraschend gute Übereinstimmung mit den gemessenen inter- und koseismischen Verschiebungen vor und während des 2010er M8.8 Maule Erdbebens. Darüber hinaus diskutiere ich die Implikationen für mehrere rätselhafte offene Probleme, einschließlich der physikalischen Mechanismen von seismogenen Zonengrenzen und die geringe Festigkeit von Überschiebungstörungen.

Schließlich veranschauliche ich einen der wichtigsten Vorteile dieses Ansatzes: den spontanen instabilen Bruch von sowohl "On-" als auch "Off-" Überschiebungserdbeben. Die Geometrien simulierter Beben im Sedimentationskeil ähneln natürlichen Beobachtungen. Sie werden durch von Überschiebungserdbeben induzierten statischen Spannungsveränderungen

gen ausgelöst und stimmen mit analytischen Vorhersagen der dynamischen Coulomb-Keil-Theorie überein. Ihr Einfluss ist deutlich, sowohl auf Überschiebungsbebenzyklen, aufgrund des verfrühten Auslösens von Überschiebungsbeben, als auch auf Tsunami-Gefahren, die durch das Nachgeben des äußeren Keils und durch das steile Einfallen von Störungsflächen erhöht werden.

Der innovative Charakter dieses seismo-thermo-mechanischen Ansatzes eröffnet eine Welt der interdisziplinären Forschung zwischen Geodynamik und Seismologie, sowohl in Bezug auf die Erzeugung als auch in Bezug auf die Merkmale von Überschiebungserdbeben in Subduktionszonen und andernorts.

---

De catastrofale 2004 M9.2 Sumatra en 2011 M9.0 Tohoku megaoverschuivings aardbevingen herinneren ons eraan wat voor desastreuze impact deze kunnen hebben op onze samenleving. Eveneens benadrukken deze aardbevingen ons beperkte begrip van waar en wanneer deze natuurrampen toeslaan. De noodzakelijke verbetering van de lange termijn inschatting van seismische risico's vereist een beter fysisch begrip van de aardbevingencyclus in seismisch actieve subductie zones. Modellen hebben de potentie om de beperkte, directe observaties in ruimte en tijd te overwinnen. Momenteel bestaat er echter geen model dat de relatie tussen lange termijn subductie dynamiek en gerelateerde deformatie en korte termijn aardbevingen kan analyseren. De ontwikkeling, validatie en toepassing van een dergelijk fysisch kloppend seismo-thermo-mechanische numerieke model is de belangrijkste doelstelling van dit proefschrift.

Eerst presenteer ik een nieuwe analoog model die cycli van megaoverschuivings aardbevingen simuleert in een visco-elastische wig van gelatine. Een vergelijking met natuurlijke observaties laat zien dat de fysica van de periode tijdens en tussen twee aardbevingen wordt gesimuleerd op een robuuste, zij het vereenvoudigde, manier.

Dit analoge model gebruik ik vervolgens voor het valideren van een op continuum mechanica gebaseerde, visco-elasto-plastische numeriek model. Dit model wordt doorgaans gebruikt voor grootschalige geodynamische problemen. Het genereert nu ook wrijvings instabiliteiten wiens parameters overeenkomen met die van het analoog model, zolang een ontwikkelde lokale, invariante variant van een sterk slip-snelheids afhankelijke wrijvings formulering gebruikt wordt. Dit model simuleert enkele interessante dynamische processen, waaronder de inter-, co- en postseismische deformatie die kwalitatief met GPS metingen overeenkomt en dynamische ruptuur processen, zoals scheuren, zelfhelende pulsen en het opnieuw breken van eenzelfde breuk.

Om een vergelijking met waarnemingen van de aarde te vergemakkelijken, beschouw ik vervolgens een realistischere opzet van de Zuid Chileense plaatgrens in termen van geometrie en fysische processen. Resultaten komen overeen met seismologische, geodetische en geologische waarnemingen, zij het met te lage coseismische snelheden. Zij vertonen eveneens een verrassend goede overeenkomst met inter- en coseismische verplaatsingen gemeten voor en tijdens de 2010 M8.8 Maule aardbeving. Verder bespreek ik de implicaties voor een aantal onopgeloste problemen, inclusief de contributie van cycli tot lange termijn deformatie, de fysieke mechanismen die de seismogene zone begrenzen en de geringe sterkte van megaoverschuivings breuken.

Tot slot demonstreer ik een van de belangrijkste voordelen van deze aanpak; het spontaan ontstaan van aardbevingen zowel tussen als midden in de convergerende platen. De gesimuleerde 'outerrise' en sedimentaire wig aardbevingen komen geometrisch overeen met natuurlijke waarnemingen. Deze worden geactiveerd door quasi-statische spanningsveranderingen door megaoverschuivingen en kloppen met de analytische voorspellingen van dynamische Coulomb wig theorie. Haar invloed is significant. Zowel op de cycli van megaoverschuivingen door de vroegtijdige, ondiepe veroorzaking van hen. Als voor

het risico op grote tsunamis, welke toeneemt door de steile breuken in de lithosfeer.

Het innovatieve karakter van dit seismo-thermo-mechanische model opent een wereld van interdisciplinair onderzoek tussen geodynamica en seismologie. Zowel met betrekking tot het ontstaan en de kenmerken van (megaoverschuivings) aardbevingen, als daar voorbij.