

1 KONWIHR – GeoPF: Progress Report 2012 und Fortsetzungsantrag 2014

1.1 Bezeichnung des Projektes

QUAKE: An Earthquake Simulator for Continents

1.2 Antragsteller und verantwortlicher Projektleiter

Name: Prof. Dr. Heiner Igel
Dienststellung: Leiter Seismologie
Institut: Department für Geo- und
Umweltwissenschaften
Dienstadresse: Theresienstr. 41, 80333 München
Telefon: 089-21804204
Telefax: 089-21804205
E-mail: heiner.igel@lmu.de

1.3 (Ko-) Finanziertes Personal

Stefan Wenk, Doktorand
Dr. Alan Schiemenz, Postdoctoral researcher
Antonio Molina, Doktorand

2 Ergebnisse Projektphase 2012 und 2013

Das GeoPF Projekt ist seit dem Beginn des EU geförderten VERCE Projekts (www.verce.eu) stark in dieses eingebunden und verknüpft. Die Ziele, welche die Seismologiegruppe der LMU verfolgt sind die Weiterentwicklung der numerischen Verfahren zur seismischen Wellenausbreitung und deren Bereitstellung für die Community auf den PRACE HPC Systemen. Dazu gehören zusätzlich zu den in den letzten Jahren entwickelten Solvern *seissol* und *ses3d* auch das Verfahren *specfem* (spektrale Elemente). Langfristig zielt die Anwendung dieser Verfahren auf das tomographische Inversionsproblem. In diesem Kontext sind die Arbeiten im vorliegenden Projektbericht einzuordnen. Die Ergebnisse sind ausführlich in zwei Publikationen zusammengefasst (Wenk et al., 2012; Schiemenz und Igel, 2013), die dem Bericht beigelegt sind. Im Folgenden werden die Ergebnisse kurz umrissen:

Globale und regionale Wellenausbreitung (S. Wenk):

Das Verfahren zur Simulation der Wellenausbreitung (*seissol* – discontinuous Galerkin) wurde dahingehend erweitert und ausführlich getestet, dass vor allem im Bereich kontinentaler Wellenausbreitung eingesetzt werden kann. Die starken

Heterogenitäten, die in der Erdkruste zu erwarten sind, können durch geeignete Tetraedergitter mit starker Verfeinerung nahe der Erdoberfläche berücksichtigt werden. Diese wird für die Evaluierung neuer Erdmodelle in naher Zukunft von Bedeutung sein. Dieser Ansatz wurde auf den europäischen Kontinent angewandt. Diese steht im Zusammenhang mit dem geplanten Erdbebensimulator für den europäischen Kontinent der in Kooperation der GeoPF und VERCE Projekte im Aufbau ist. Ein Vergleich mit Beobachtungen (Wenk et al., 2013) zeigt eindrucksvoll, wie durch die 3-D Rechnungen ein großer Teil der Beobachtungen erklärt werden kann. Damit ist *seissol* bereit für den Einsatz als Erdbebensimulator für Europa.

Seismische Tomographie mit specfem (A. Schiemenz):

Langfristig ist das Ziel die 3D Verfahren zur tomographischen Rekonstruktion von Erdmodellen zu nutzen. Der dazu notwendige *workflow* wurde nun erstmals mit Hilfe eines sehr großen Industriedatensatzes durchgespielt. Durch Zusammenarbeit mit BP konnte ein Datensatz des Valhall Erdölfeldes in der Nordsee genutzt werden, das aus 50000 Quellen und 3000 Empfängern besteht. Diese Dimension erlaubt eine Qualität der Abbildung die an die medizinische Tomographie erinnert. In Schiemenz und Igel (2013) wird nun erstmals mit echten Daten ein Ansatz ausgenutzt in dem die Linearität der Wellengleichung ausgenutzt und die Daten verschiedener Quellen einfach aufsummiert wird. Damit kann man im Idealfall (aus Gründen der Reziprozität) einen Faktor 3000 an Rechengeschwindigkeit gewinnen. Im Falle der Realdaten konnte zumindest eine Effizienzsteigerung von ca 20 mit diesem Ansatz erreicht werden. Dieses Konzept wird bei der Weiterentwicklung in Richtung 3-D Tomographie eine wichtige Rolle spielen.

Wellenausbreitung an Vulkanen (A. Molina):

Durch das große Ozeanbodenseismometerprojekt (RHUM, www.rhum-rum.net), konnte eine enge Kooperation mit dem Observatorium La Réunion (IPG Frankreich) initiiert werden. Der Vulkan Piton de la Fournaise auf der Insel La Réunion gehört zu den aktivsten Vulkanen der Erde. Mit einem detaillierten Geländemodell konnte eine hochgenaues 3-D Modell des Vulkans erstellt werden, welches jetzt bereit steht um damit 3-D Wellenausbreitung zu simulieren und die zahlreichen seismischen Ereignisse am Vulkan zu modellieren. Molina (2013) hat eine große Zahl Simulationen durchgeführt, um Streueffekte im Innern des Vulkangebäudes zu analysieren. Die Beobachtungen suggerieren, dass ein Streukörper im Inneren des Vulkanes die Beobachtungen massiv beeinflusst. Dieser Streukörper könnte mit der Magmakammer übereinstimmen. Die 3-D Gitter Erzeugung ist immer noch ein schwieriger Bestandteil im workflow der Seissol Simulationen. Im Rahmen dieses Teilprojekts wurde mit einem neuen Meshprogramm (Simmodeler) experimentiert, welches in Zukunft bei den Seissol Simulationen bevorzugt zum Einsatz kommen wird.

Literatur

Die u.a. Artikel sind dem Bericht beigelegt.

Wenk, Stefan, Christian Pelties, Heiner Igel, and Martin Käser (2013), Regional wave propagation using the discontinuous Galerkin method, *Solid Earth*, 43-57, doi:10.5194/se-4-43-2013.

Schiemenz, Alan, and Heiner Igel (2013), Accelerated 3-D full-waveform inversion using simultaneously encoded sources in the time domain: application to Valhall ocean-bottom cable data, *Geophysical Journal International*, doi:10.1093/gji/ggt362.

Molina, A., Scattering phenomena in Piton de la Fournaise volcano, Reunion island, Progress report, 2013.

Fortsetzungsantrag 2014

Der Fokus des letzten GeoPF Projektjahres soll auf der Erweiterung des mittlerweile hochgradig optimierten *seissol* Kernprogramms (e.g., Heinecke et al., 2013; Breuer et al., 2013) bestehen. Die Optimierung der zentralen Routinen des *seissol* Programms haben dazu geführt, dass im Moment nur die einfacheren Rheologien (isotrope Wellenausbreitung, sowie dynamische Bruchsimulation, Pelties et al., 2013, Gabriel et al., 2013) in verifizierter Form vorliegen. Damit *seissol* als „workhorse“ für Simulationsaufgaben in der Seismologie eingesetzt werden kann, und in die sich entwickelnde VERCE Plattform (www.verce.eu) integriert werden kann, müssen folgende Erweiterungen erfolgen:

- Erweiterung der Spannungs-Dehnungsbeziehung auf allgemein anisotrope Medien
- Erweiterung auf viskoelastische Medien (Dämpfung)
- Erweiterung auf poroelastische Medien (*optional, allerdings für Reservoirstudien sehr attraktiv*)

Die relevanten Unterprogramme für dieser Rheologien bestehen bereits sind aber nicht mit dem derzeitigen Kernel verknüpft. Ziel ist, es, sie in das optimierte Programm zu integrieren und sie in das automatisierte „regression testing“ welches jede Nacht durchgefahen wird, aufzunehmen. Mit diesen Entwicklungen könnte *seissol* zu einer echten Alternative zu anderen Community Codes werden (zB specfem) vor allem für Medien die sich durch starke Topographie und/oder interne komplexe Grenzflächen auszeichnen.

Nach Abschluss dieser technischen Entwicklungen sind folgende speziellen Anwendungen vorgesehen, die mit anderen Projekten integriert werden:

- Ein archäo-seismologisches Projekt in Zusammenarbeit mit der Universität Köln (Prof. Dr. K. Hinzen): Die historischen Städte Midea und Tiryns in Griechenland weisen Schadensmuster aus (16. Jhdt. vor Christus), die möglicherweise von Erdbeben herrühren. Der Untergang dieser Hochkultur ist historisch nicht verstanden. Es soll die Hypothese getestet werden, ob der Fall mit Erdbeben zusammenhängen könnte. Dazu sollen speziell topographische und 3-D Effekt, die dort verstärkend wirken könnten, untersucht werden. (Ko-finanzierung durch Gerda Henkel Stiftung).
- Eines der großen ungelösten Probleme in der Seismologie zur Zeit ist die Beobachtung sogenannter Love Wellen, im Wellenfeld des ozean-erzeugten Rauschens (5-15s Periode). Dieser Frequenzbereich wird seit einigen Jahren massiv zur Tomographie und zur Ermittlung zeitabhängiger Eigenschaften der Erdkruste eingesetzt. Der Ursprung der Love Wellen ist dabei nicht verstanden. Am wahrscheinlichsten sind die Konversion von Energie am Meeresboden, bzw. Streuung in der Kruste und im oberen Mantel. Diese

Hypothese soll mit *seissol* – Simulationen getestet werden. (Ko-finanzierung durch Emmy-Noether Gruppe „The origin of Love waves in the ocean-generated noise“ Dr. Celine Hadziannou).

Ingesamt sollen die technischen Weiterentwicklungen und die Anwendungen dazubeitragen, dass sich *seissol* zu einem *community code* entwickelt, der auf der über das VERCE Projekt auf allen europäischen PRACE Supercomputern zur Verfügung steht und auch über die VERCE Plattform für einfachere Anwendungen nutzbar ist.

Literatur

- Gabriel, Alice-Agnes, Jean-Paul Ampuero, Luis A. Dalguer, and P. Martin Mai (2013), Source Properties of Dynamic Rupture Pulses with Off-Fault Plasticity, *J. Geophys. Res.*, 118(8), 4117–4126, doi:10.1002/jgrb.50213.
- Pelties, C., A.-A. Gabriel, and J.-P. Ampuero (2013), Verification of an ADER-DG method for complex dynamic rupture problems, *Geoscientific Model Development Discussions*, 6(4), 5981–6034, doi:10.5194/gmdd-6-5981-2013.
- Heinecke, A., A. Breuer, S. Rettenberger, M. Bader, A. Gabriel und C. Pelties: Optimized Kernels for large scale earthquake simulations with SeisSol, an unstructured ADER-DG code. In *Supercomputing 2013, The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*. IEEE, Denver, November 2013. accepted for publication, poster abstract..
- Breuer, A., A. Heinecke, M. Bader und C. Pelties: Accelerating SeisSol by Generating Vectorized Code for Sparse Matrix Operators [BibTeX]. In *International Conference on Parallel Computing (ParCo) 2013*, Oktober 2013. accepted for publication.