

Seismic monitoring and elastic full waveform inversion investigations applied to the radioactive waste disposal issue

Doctoral Thesis

Author(s):

Manukyan, Edgar

Publication date:

2011

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006689521>

Rights / license:

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

DISS. ETH NO. 19822

**SEISMIC MONITORING AND ELASTIC FULL WAVEFORM INVERSION
INVESTIGATIONS APPLIED TO THE RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL
ISSUE.**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

EDGAR MANUKYAN

Master of Science in Desert Studies,
Ben-Gurion University of the Negev, Israel
born June 22, 1984
citizen of
Armenia

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hansruedi Maurer, examiner
Prof. Dr. Alan Green, co-examiner
Prof. Dr. Stewart Greenhalgh, co-examiner
Prof. Dr. Thomas Bohlen, co-examiner

2011

ZUSAMMENFASSUNG

Weltweit suchen viele Länder nach Lösungen für die permanente Endlagerung von hochradioaktivem Abfall (“high-level radioactive waste“ (HLW)) und gebrauchten Kernbrennstäben (“spent nuclear fuel“ (SF)). Die Konstruktion von mehrfachen Barrieren rund um den Abfall, und eine Platzierung des Endlagers in einer geeigneten tiefen geologischen Einheit wird zurzeit als die beste Option betrachtet, um die radioaktiven Abfälle von der Biosphäre für die nächsten 10^5 - 10^6 Jahre zu isolieren. Als zusätzliche Sicherheitsmassnahme wird von der Öffentlichkeit gefordert, dass ein Endlager für die nächsten 100 bis 300 Jahre überwacht werden kann, nachdem es gefüllt und versiegelt wurde. Überwachungsmethoden, die die künstlichen und natürlichen Barrieren des Lagers nicht beeinträchtigen, sind jedoch schwierig zu realisieren. Seismische Tomographie ist eine mögliche, und zurzeit favorisierte Option. Um die Möglichkeiten der seismischen Tomographie weiter zu erforschen, haben wir ausgedehnte Messungen im Felslabor Mont Terri durchgeführt, das sich in der Opalinuston-Formation befindet, die im Moment als mögliches Wirtgestein für ein Endlager in der Schweiz betrachtet wird. Hier wurde ein skaliertes HLW/SF Lager mit einem Mikrotunnel von 13 m Länge und 1 m Durchmesser simuliert. Der Tunnel wurde mit trockenem Sand aufgefüllt. Dann wurde er zunehmend wassergesättigt, und es wurde ein leichter Überdruck erzeugt. Das Experiment wurde mit seismischen Bohrloch-zu-Bohrloch Messungen begleitet, wobei ein Sparker und eine Hydrophonkette zum Einsatz kamen. Zusätzlich wurden 8 Geophone im Mikrotunnel installiert.

Nichtlineare strahlenbasierte Laufzeittomographie erlaubte eine Charakterisierung der seismischen Grobstruktur des Wirtgesteins. Bedingt durch die Geometrie der Bohrlöcher und der inhärenten Limitierungen der Laufzeittomographie, konnte keine Information bezüglich des Mikrotunnels gewonnen werden. Im Gegensatz dazu lieferten die Geophone, die im Mikrotunnel installiert waren, eine detaillierte Charakterisierung des Sättigungsprozesses. Eine integrative Interpretation der Daten in Kombination mit ausgedehnten Modellierungen ergaben, dass kurz nach

der Wasserinjektion eine Aufspaltung des Tongesteins in der Auflockerungszone rund um den Tunnel (“excavation damage zone“ (EDZ)) stattfindet. Dann quillt das Tongestein auf und homogenisiert den EDZ Bereich. Diesen Prozess konnte mit Hilfe der Laufzeitdaten der Geophone im Mikrotunnel charakterisiert werden. Meine numerischen Simulationen zeigten, dass dies auch möglich wäre, wenn die Geophone in einer gewissen Distanz vom Mikrotunnel installiert würden.

Mit Hilfe von Wellenforminversionen wäre es möglich, tomographische Bilder mit einer deutlich besseren Auflösung zu berechnen, als dies mit Laufzeitinversionen möglich ist. Dazu braucht es jedoch seismische Daten von hoher Qualität. Nur wenn die Effekte in den Seismogrammen, die von physikalischen Änderungen im Endlager hervorgerufen werden, grösser sind als die Messfehler, kann mit befriedigenden Resultaten gerechnet werden. Der in dieser Arbeit verwendete P-Wellen Sparker scheint genügend gute Signale im Frequenzbereich 3 - 4 kHz und für Messdistanzen von einigen Zehnern von Metern zu liefern. Die Hydrophon-Sensoren zeigen jedoch zwischen zwei Experimenten grosse Variationen, was auf Änderungen in den Kopplungsbedingungen zurückgeführt werden kann. Es wird deshalb empfohlen, anstelle von Hydrophonen fest einzementierte Geophone in den Beobachtungsbohrlöchern zu verwenden. Nebst den Kopplungsproblemen wurden weitere systematische Effekte in den Hydrophondaten erkannt: (1) Mechanisch induzierte elektrische Pulse überlagern die Aufzeichnungen, (2) die hohen elektrischen Spannungen im Kabel zu der Sparkerquelle wirken als zusätzliche Linienquelle und (3) seismische Wellen die sich in den Bohrlochfluiden fortpflanzen. Im Rahmen meiner Arbeit habe ich quantitative Richtlinien erarbeitet, wie man die Tauglichkeit seismischer Daten für Monitoringzwecke beurteilen kann.

Um die im Felslabor Mont Terri gesammelten seismischen Wellenformen zu invertieren, wird ein Inversionsalgorithmus benötigt, der die Anisotropie des Opalinustons berücksichtigt. In einem ersten Schritt habe ich einen 2D elastisch und isotropen Algorithmus entwickelt. Diesen habe ich benutzt, um den Informationsgehalt von elastischen seismischen Wellen zu untersuchen. Vollständige Datensätze (Multikomponenten Quellen und Empfänger sowie Quellen- und Empfängerpositionen rund um das Untersuchungsgebiet) erlauben alle elastischen Parameter zu bestimmen. Ähnlich gute Resultate können mit Bohrloch-zu-Bohrloch Geometrien erzielt werden, wie sie typischerweise in der Bohrlochtomographie eingesetzt werden. Selbst wenn nur Einzelkomponenten Quellen eingesetzt werden

(senkrecht zur Bohrlochwand), verändert sich die Qualität der Tomogramme kaum. Verwendet man anstelle von gerichteten Quellen isotrope Druckquellen, dann lassen sich die P- und S-Wellengeschwindigkeiten immer noch gut bestimmen, aber die Dichte wird praktisch nicht mehr aufgelöst. Verwendet man die Druckquellen in Kombination mit isotropen Druckaufnehmern, dann beinhalten die resultierenden Datensätze immer noch gewisse Informationen über die P- und S-Wellengeschwindigkeiten. Es existieren jedoch starke Abhängigkeiten zwischen diesen beiden elastischen Parametern. Dies konnte durch Analysen der vollen Modelresolutionsmatrizen gezeigt werden. Meine Untersuchungen haben zudem demonstriert, dass eine Kombination von isotropen Druckquellen und Mehrkomponenten-Geophonen den besten Kompromiss zwischen effizienter Datenaufnahme und hohem Informationsgehalt liefert. Diese Erkenntnis habe ich für eine Machbarkeitsstudie für nicht-invasives seismisches Monitoring eines HLW Endlagers ausgenutzt. Mit meinen Berechnungen konnte ich zeigen, dass Bohrloch-zu-Bohrloch Daten in Kombination mit zusätzlichen Geophonen, die in der Nähe des Endlagers platziert sind, ausreichend Information liefern, um Wassersättigungsprozesse zu detektieren und zu charakterisieren.

Nach der erfolgreichen Implementierung meines elastischen und isotropen Wellenform Programms, habe ich den Algorithmus erweitert, sodass auch anisotrope Medien mit einer vertikalen Symmetrieachse berücksichtigt werden können. Meine ersten Berechnungen zeigten, dass, verglichen mit dem isotropen Fall, die anisotropen Inversionen komplizierter sind. Selbst für den günstigsten Fall von Mehrkomponenten Quellen und Empfängern und einer optimalen Aufnahmegeometrie wurden Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Modellparametern beobachtet.

ABSTRACT

Countries worldwide are seeking solutions for the permanent removal of high-level radioactive waste (HLW) and spent nuclear fuel (SF) from the environment. Surrounding the waste with multiple engineered barriers and emplacement in deep geological repositories is widely accepted as a safe means of isolating it from the biosphere for the necessary 10^5 – 10^6 years. As a precautionary measure, society demands that repositories be monitored for 100–300 years after they are backfilled and sealed. Effective monitoring that does not compromise the engineered and natural barriers is challenging. Seismic full-waveform tomography is a possible option. To address this issue, we have conducted extensive seismic measurements at the Mont Terri Rock Laboratory, located within a clay formation that is a potential host rock in the Swiss HLW/SF program. A scaled-down HLW/SF repository has been simulated with a 13 m long microtunnel of 1 m diameter. Initially, it was empty and then sand-filled and dry. Subsequently, it was progressively water-saturated and slightly overpressured. The monitoring system consisted of a pressure source and a hydrophone streamer located in two boreholes drilled perpendicular to the microtunnel and eight geophones equally distributed around the periphery of the microtunnel.

A non-linear anisotropic inversion of crosshole traveltimes (ray tomography) allowed the gross velocity structure of the host rock to be delineated. Due to the experiment geometry, the distances of sources and receivers from the microtunnel and the inherent limitations of traveltime tomography, this was inadequate for monitoring changes within the repository. In contrast, analysis of the seismic traces acquired using the geophones installed around the periphery of the microtunnel enabled the saturation process to be characterized in detail. An integrated interpretation of the data in combination with extensive numerical modeling suggested that after injecting the water, the clay material within the microtunnel's excavation damage/disturbed zone (EDZ) first spalled rapidly, then it began to swell and self-sealing of the EDZ started. It was possible to characterize this change in physical properties of the EDZ by using traveltimes of the geophone data. My numerical simulations, using full knowledge of

the host rock, the microtunnel and its EDZ properties, show that with sensors installed as close to the repository as regulations allow, should allow one to be able to observe even changes in traveltimes, and thus infer changes in the repository condition.

Higher resolution images could be obtained by inverting waveforms rather than only traveltimes. But full-waveform inversion will only be able to resolve the changes occurring in the repository if the changes in the recorded data due to changed physical properties (i.e., water saturation) are not overwhelmed by recording variations. I found that a P-wave sparker source is highly repeatable up to frequencies of 3–4 kHz for propagation distances up to tens of meters involved in repository-scale monitoring. Hydrophone repeatability is limited by variable hydrophone-borehole coupling conditions, but firmly grouted geophones within the tunnels yield consistent recordings. Three kinds of coherent noise contaminate the data: (1) mechanically induced electrical effects in the hydrophone chains; (2) high currents in the sparker cable, which cause it to oscillate radially as a line source; and (3) tube waves. My investigations outline a quantitative methodology to assess data-quality requirements for successful monitoring.

To invert the data collected at Mont Terri, one needs an elastic full-waveform inversion algorithm that takes into account the anisotropy of the Opalinus clay host rock. As a first step, I developed a 2D elastic isotropic inversion algorithm that I used in a synthetic study to explore the information content offered by elastic waveform data. Comprehensive data sets that include recordings based on multicomponent (directed) sources and multicomponent (vector) receivers that fully surround the area of interest allow all elastic parameters to be reliably recovered. Similarly good results can be achieved using the more commonly employed crosshole configurations. If only single source components (e.g., those oriented perpendicular to the borehole walls) are used, there is still no significant degradation of the quality of the tomographic images. Likewise, crosshole experiments that include pressure sources and multicomponent receivers still allow P- and S- wave velocities to be recovered, but such data sets contain virtually no information about the density. Finally, seismic data collected with omni-directional pressure sources and pressure receivers contain information about P- and S- wave velocities, but there are pronounced trade-offs between these parameters. This was demonstrated through formal model-resolution analyses. From my study, I conclude that seismic data recorded with pressure sources and two-component receivers offer the best compromise between acquisition efficiency and data-

information content. This finding was exploited in a model study, in which the feasibility of non-intrusive seismic monitoring of high-level radioactive waste repositories was tested. My results indicate that sources fired along boreholes on either side of the repository and receivers suitably placed around the repository would allow water saturation processes to be characterized reliably.

Following the successful implementation of elastic isotropic waveform inversion, I have extended the algorithm to the anisotropic case with a vertical symmetry axis. My initial calculations showed that inversion for anisotropic model parameters is more complicated. Even for the most favorable source - receiver types and coverage, I observed trade-offs between the different elastic parameters.