

Diss. ETH no. 14971

3-D GEORADAR SURVEYING OF ACTIVE FAULTS

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Natural Sciences

presented by

Ralf Gross

Dipl. Geophys., University of Münster, Germany

born June 1st, 1970

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A.G. Green, examiner

PD Dr. K. Holliger, co-examiner

Prof. Dr. F. Marillier, co-examiner

2002

Zusammenfassung

Die Analyse von Mustern rezenter und historischer Seismizität bilden die Basis der meisten Methoden zur Erfassung von seismischer Gefährdung. Wichtige Daten zur Erstellung von Karten seismischer Gefährdung sind zeitliche Abfolge, Magnituden und Koordinaten des Hypozentrums von Erdbeben, die Geometrien aktiver Verwerfungszonen und die Beträge seismischer Verschiebungen. Die Verlässlichkeit solcher Gefährdungskarten hängt von der Genauigkeit der benutzten seismischen Parameter und von der Vollständigkeit des Erdbebenkatalogs ab.

Die Paläoseismologie ist das Studium prähistorischer Erdbeben und ihrer Verteilung in Raum und Zeit. Unter günstigen Voraussetzungen können paläoseismologische Untersuchungen der Geomorphologie und der oberflächennahen Geologie wichtige Informationen über seismologische Parameter liefern und den Erbebenkatalog in die Vergangenheit verlängern. Ausser der Untersuchung geomorphologischer Erscheinungen und natürlicher Aufschlüsse werden in der Paläoseismologie standardmässig Ausgrabungen gemacht, die tektonisch beanspruchte Boden-, Sediment- und Felsformationen offenlegen. Konventionelle paläoseismologische Untersuchungen seismisch gestörter Untergrundmerkmale liefern wertvolle aber manchmal unvollständige Details der komplexen Geometrie im flachen Untergrund.

Georadar ist ein hochauflösendes geophysikalisches Werkzeug, dass zur Lösung einer breiten Auswahl von oberflächennahen geologischen, ökologischen und ingenieurtechnischen Problemen geführt hat. Innerhalb der letzten zehn Jahre wurde Georadar auch vermehrt zur Untersuchung tektonischer Untergrunderscheinungen benutzt. Obwohl die Lage von Rissen und Störungen in verschiedenen geologischen Umgebungen auch mit zweidimensionalen (2-D) Georadar-Methoden erfasst wurde, haben jüngste Erkenntnisse gezeigt, dass isolierte Profile oft nicht ausreichen, um die Geometrie von Störungszonen in Gebieten zu erfassen, die durch äusserst heterogene Untergrundcharakteristiken geprägt sind. In dieser Arbeit präsentiere ich die Ergebnisse der Entwicklung und Anwendung von dreidimensionalen (3-D) Georadartechniken zur Kartierung oberflächennaher seismischer Störungszonen.

Als Teil eines Programmes zur Bestimmung der Lage und der Geometrie der San Andreas Verwerfung unter einer Lage von oberflächennahen Sedimenten nahe der Grenze ihrer nördlichen Landausdehnung in Kalifornien wurden drei ca. 20 m lange parallele Ausgrabungen über eine Distanz von etwa 55 m durchgeführt. Aktive Störungszonen wurden in jedem Aufschluss identifiziert und anfänglich als einzelne Spur der San Andreas Verwerfung interpretiert. Um die San Andreas Verwerfung zwischen und

jenseits der Ausgrabungen zu kartieren und andere aktive Störungszonen unter der jungen Sedimentbedeckung zu finden, habe ich einen engmaschigen 3-D Georadardatensatz auf einer Fläche von 23.2 x 72 m aufgenommen. Die Daten wurden mit einem relativ neuen semi-automatischen System aufgenommen, welches eine konventionelle Georadaranlage mit einem Laser-Theodoliten inklusive automatischer Zielverfolgung verbindet. Weil diese Daten aufgrund erhöhter elektrischer Leitfähigkeit der oberflächennahen Sedimente mit starken systembedingten und lateral kohärenten Störsignalen versehen waren, habe ich eine spezielle Datenbearbeitungs-Strategie entwickelt, um sinnvolle Untergrundinformationen zu erhalten. Diese Strategie umfasste: (i) Skalierung der einzelnen Spuren auf der Basis ihrer Hilbert-Transformation, um die relativen Amplituden später Einsätze zu verstärken, (ii) Anwendung eines Karhunen-Loève Filters zur signifikanten Reduzierung der direkten Wellen und der systembedingten Störsignale, (iii) 3-D Phasenverschiebungs-Migration zur korrekten Positionierung geneigter Reflexionen und zur Fokussierung von Diffraktionen und (iv) F-XY Dekonvolution zur Reduzierung inkohärenter Störsignale.

Der vollständig bearbeitete Georadardatensatz zeigte lebhaftere Abbildungen sub-horizontaler gekrümmter Reflexionen, hervorgerufen durch einige paläofluviatile Strukturen. Diese Reflexionen waren abgeschnitten und durch zwei unterschiedliche Äste der San Andreas Verwerfung versetzt. Nachdem ich die Laufzeiten der wichtigsten Reflexionshorizonte bestimmt hatte, entdeckte ich die Anordnung ihrer fast linearen Grenzen entlang zweier NW-SO verlaufender Spuren der San Andreas Störung in diesem Gebiet. Der östliche Teil der Störung konnte im Georadardatensatz nur über eine Länge von ca. 38 m verfolgt werden und wurde auch vom nördlichen geologische Aufschluss durchzogen. Der westliche Teil der Störung verläuft dagegen über die gesamte Länge des Datensatzes und wurde im zentralen und im südlichen Graben erfasst. Auffällige Reflexionen in zwei-dimensionalen Ausschnitten des Georadarvolumens sind über beide Störungen um 0.2 bis 0.3 m vertikal versetzt. Eine deutliche, lineare Struktur, die auf horizontalen Ausschnitten in einer Tiefe von 3.3-3.6 m erkennbar war, ist entlang der östlichen Störung um 4.5-5.5 m lateral versetzt worden. Die interpretierten vertikalen und horizontalen Verschiebungen können durch das San Francisco Erdbeben von 1906 und/oder durch frühere Ereignisse verursacht sein. Diese San Andreas-Daten repräsentieren den weltweit ersten 3-D Georadardatensatz, der auf einer aktiven Erdbeben-Störungszone aufgenommen wurde.

Mit der Erfahrung von Kalifornien wurde eine zweite Feldkampagne in Neuseeland initiiert. Entlang ihres südlichen Segments führt die aktive Wellington-Verwerfung durch Neuseelands Hauptstadt Wellington und das dicht besiedelte Hutt-Tal. Folglich wird sie als äusserst gefährliche Struktur eingestuft. Um die oberflächennahe Geometrie der Wellington-Störungszone zu kartieren, habe ich an zwei Standorten im Hutt-Tal dreidimensionale Georadardaten aufgenommen. An beiden Stellen ist die Wellington-Störung durch scharfe Diskontinuitäten in den Reflexionen von flachliegenden

Kiesbetten und der Sediment-Gesteins Grenzfläche sowie unterschiedlichen Reflexionsmustern aus dem Basisgestein auf beiden Seiten der Störung gekennzeichnet. Auffällige Reflexionen aus der Gesteinsbasis, deren Anordnung parallel zur Wellington-Verwerfung verläuft, wurden überall auf den beiden 25 x 50 m und 50 x 50 m grossen Messflächen beobachtet. Sie erlauben eine Abschätzung der minimalen Ausdehnung von Scherungen, Brüchen und Quetschungen die mit anormalen Aufbau von Druck und der Verschiebung während Erdbeben verbunden sind. Das Einfallen und die Tiefenlagen der primären Störungszonen an beiden Stellen betrug 55-75°SO und ca. 20 m sowie 72-84°SO und ca. 12 m. Beide Störungszonen sind einige Meter breit. In einem Messgebiet wurde die erste direkte Georadarreflexion an einer Verwerfungsebene einer aktiven Horizontal-Verschiebung beobachtet. Diese Reflexionen stimmen mit auffälligen Diffraktionen überein, die durch abrupte Diskontinuitäten von Strukturen entlang der Verwerfung verursacht wurden. Im zweiten Messgebiet sind scheinbare Versätze von Lineamenten in den Sedimentsektionen auf beiden Seiten der Störung konsistent mit den horizontalen Verschiebungsbeträgen von ca. 20 m, die in nahegelegenen Flussbetten festgestellt wurden. Die Georadardaten der Wellington-Störung sind die bislang lebhaftesten oberflächennahen Abbildungen einer aktiven Erdbebenverwerfung.

Abstract

Patterns of recent and historical seismicity are the basis for most methods of assessing seismic hazard. Critical data required for the construction of seismic hazard maps include the timing, magnitudes and hypocentral coordinates of earthquakes, the geometries of the active faults and the associated coseismic displacements. The reliability of seismic hazard maps depends on the accuracy of these seismological parameters and the completeness of the earthquake record.

Under favorable circumstances, paleoseismological studies of the surface geomorphology and shallow subsurface geology may yield information that improves our knowledge of the seismological parameters and extends the earthquake record back in time. Paleoseismology is the study of prehistoric earthquakes and their distribution in space and time. In addition to the examination of geomorphological features and natural outcrops, it is common practice in paleoseismology to excavate trenches that provide exposures of tectonically affected soil, sediment and rock formations. However, conventional paleoseismological investigations of fault related subsurface features may yield valuable but sometimes incomplete details on the complex geometry in the shallow underground.

Ground-penetrating radar (georadar or GPR) is a high-resolution geophysical tool that has been employed successfully to resolve a wide variety of shallow geological, environmental and engineering problems. Over the past ten years, georadar has been increasingly used to investigate tectonic related subsurface structures. Locations of fractures and faults were mapped in diverse geological settings, mainly by two-dimensional approaches. But, recent experience has shown that isolated 2-D profiles may not be sufficient for determining the geometries of faults in regions distinguished by highly heterogeneous subsurface structures. In this thesis, I show that it is usually necessary to employ 3-D georadar techniques to map the shallow geology in such environments.

As part of a program to determine the location and geometry of the San Andreas Fault (SAF) buried beneath shallow sediments near its northern landward limit, three >20 m long parallel trenches were constructed at positions distributed over a distance of ~55 m. Single zones of active faulting identified in each of the trenches were initially interpreted in terms of a solitary strand of the SAF. To map the SAF between and beyond the trenches and to detect other active fault zones hidden by the young sedimentary cover, I collected a dense 3-D georadar data set across a 23.2 x 72 m area. The data were recorded using a relatively new semi-automated acquisition system that included a conventional georadar unit coupled to a self-tracking laser theodolite with automatic target recognition capabilities. Since these data were contaminated by system ringing as a result of the moderate- to high-electrical conductivities of the surficial sediments, I designed a special data processing strategy to obtain meaningful subsurface information.

The 3-D georadar data were subjected to an extensive processing scheme that included: (i) scaling of each trace based on its Hilbert transform to increase the relative amplitudes of later arrivals, (ii) Karhunen-Loève filtering to reduce significantly direct waves and system ringing, (iii) 3-D phase-shift migration to position correctly dipping reflections and collapse diffractions, and (iv) F-XY deconvolution to reduce incoherent noise.

The fully processed georadar volume contained vivid images of subhorizontal and trough-shaped reflections from a number of fluvial paleochannels. These reflections were truncated and offset by two distinct branches of the San Andreas Fault. After semi-automatically picking the times of the most important reflecting horizons, I discovered that alignments of their nearly linear boundaries defined two NW-SE trending strands of the SAF within the survey area. The georadar expression of the eastern SAF strand could only be traced over a distance of ~38 m. It had been intersected in the northern trench. In contrast, the western SAF strand extended over the entire length of the georadar volume and had been intersected in the central and southern trenches. Prominent reflections on georadar cross-sections were found to be vertically displaced by 0.2-0.3 m across both SAF strands. A conspicuous linear-trending feature observed on horizontal sections at 3.3-3.6 m depth was laterally offset by 4.5-5.5 m along the eastern SAF strand. The interpreted vertical and horizontal offsets could have been generated by the 1906 San Francisco earthquake and/or earlier events. The 3-D georadar data recorded across the San Andreas Fault represent the first 3-D georadar data set of an active earthquake fault, worldwide.

With the knowledge obtained in California, a second field campaign was initiated in New Zealand. Along its southern segment, the Wellington Fault passes through Wellington, New Zealand's capital, and the densely populated Hutt Valley. Consequently, it is considered to be a highly hazardous structure.

In an attempt to map the shallow geometry of the Wellington Fault, I have collected 3-D georadar data at two sites along the Hutt Valley. At both sites, the Wellington Fault is delineated by sharp discontinuities in georadar reflections from near-surface gravel sheets and the sediment-basement interface and by contrasting basement reflection patterns on either side of the fault. Prominent basement reflection fabrics that parallel the trends of the Wellington Fault are observed everywhere across the 25 x 50 m and 50 x 50 m survey sites, providing a minimum estimate of the extent of shearing, fracturing, and crushing associated with anomalous stress accumulations and earthquake-related faulting. The dips and depth extents of the primary zones of fault displacement at the two sites are 55-75° SE and ~20 m and 72-84° SE and ~12 m, respectively. Both zones of faulting are a few meters wide. At one site, the first georadar fault-plane reflections from an active strike-slip fault are observed. These reflections coincide with conspicuous diffractions generated by abrupt truncations of structures against the fault

plane. At the second site, apparent offsets of lineaments in the sedimentary sections on either side of the fault are consistent with ~20 m of dextral displacement estimated from offsets of nearby terrace risers. The Wellington Fault georadar data provide the most vivid shallow images of any active fault surveyed to date.