

Diss. ETH No. 19081

**IMAGING LATE QUATERNARY DEFORMATION
IN THE SHALLOW ALPINE FAULT ZONE (NEW ZEALAND)
USING 2D AND PSEUDO-3D HIGH-RESOLUTION SEISMIC METHODS**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

(Swiss Federal Institute of Technology)

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

ANNA E. KAISER

MSc. Geophysics,

Victoria University of Wellington, New Zealand

born December 6th, 1980

New Zealand and British Citizen

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Green, examiner

H. Horstmeyer, co-examiner

Dr. S. Carpentier, co-examiner

Prof. Dr. B. Milkereit, co-examiner

2010

Zusammenfassung

Kenntnisse über Strukturen und Verschiebungsraten von aktiven Verwerfungszone sind für regionale seismische Gefährdungs- und Risikoanalysen von entscheidender Bedeutung. Hochauflösende geophysikalische Methoden stellen 3D Bilder von Deformationsstrukturen in oberflächennahen Störzonen zur Verfügung und sind daher eine notwendige Ergänzung zur geologischen Studie von Verwerfungszone.

Innerhalb der „Alpine Fault“, der grössten aktiven Verwerfung Neuseelands, kam es während der letzten ~200 Jahre zu keinen signifikanten Brüchen, obwohl paläoseismische Studien den Nachweis über drei grosse Erdbebenbrüche innerhalb der letzten ~600 Jahre lieferten. Der bisherige Wissenstand über die Geometrie, z.B. das oberflächennahe Einfallen, und die Gleitrate der Alpine Fault basiert grösstenteils auf geologischen Aufschlüssen, der Geomorphologie, flachen Bohrlöchern, Ausgrabungen und einer geringen Anzahl von Georadarstudien. Starke Ablagerung und Erosion verdecken oder zerstören Deformationsstrukturen an der Oberfläche. Insbesondere für diesen Fall dienen hochauflösende seismische Abbildungen bis zur Tiefe des Grundgebirges als weitere Informationsquelle um die Struktur und das Verhalten der Verwerfung zu erfassen. Während 2D seismische Profile bereits häufig zur Abbildung von aktiven Verwerfungen angewandt wurden, sind 3D seismische Studien grösstenteils auf marine oder grossskaligere Untersuchungen beschränkt. Diese Arbeit stellt eine einzigartige 2D und pseudo-3D seismische Reflexions-/Refraktionsstudie der oberflächennahen transpressiven „Alpine Fault“ Störzone entlang ihres nördlichen Abschnittes in der Nähe von Springs Junction dar.

Ein 2D ultrahochauflösende seismische Probelinie ist senkrecht zur Ausbisslinie der Verwerfungszone an der Oberfläche vermessen worden. Der dichte Geophonabstand von 0.5 m entlang des 360 m langen Profiles gewährleistete hochwertige Abbilder des Untergrundes für Tiefen von 3.5 bis 150 m. Eine innovative Abfolge von Prozessingschritten wurde erarbeitet, mit dem Ziel Reflexionen innerhalb komplexer, spätpleistozäner bis holozäner glazialer Sedimente darzustellen sowie flach bis steil einfallende Grenzflächen in der Störzone abzubilden. Die resultierenden Abbilder zeigen einen steileintauchenden Hauptverwerfungsstrang ($75 - 80^\circ$) quer durch die Sedimentschichten, der einen Versatz der pleistozänen Oberfläche des Grundgesteins verursacht hat. Aufgrund dieses scheinbaren vertikalen Versatzes wurde eine dip-slip Rate von ~2 mm/yr abgeschätzt.

Die 2D Messung wurde durch eine deutlich umfassendere pseudo 3D Untersuchung an gleicher Stelle erweitert. Diese konzentrierte sich auf eine Fläche von 200 x 500 m mit einem CMP Abstand von 2 x 4 m. Durch die parallelen Schuss- und Empfängerlinien der relativ kostengünstigen pseudo 3D Methode konnten komplexe 3D Strukturen innerhalb der Störzone gut aufgelöst werden. Die oberflächennahen Daten wurden durch tiefe Geschwindigkeiten nahe der Oberfläche beeinflusst, weswegen starke statische Verschiebungen, variable Datenqualität und starkes quellinduziertes Rauschen beobachtet wurden. Die Datenqualität konnte durch eine speziell angepasste Prozessingabfolge verbessert werden. Diese beinhaltete oberflächenkonsistente Dekonvolution, refraktionsstatische Korrekturen und Rauschunterdrückungstechniken. Um stark geneigte, diffraktierte und sich kreuzende Strukturen auflösen zu können wurden eine dreidimensionale Geschwindigkeitsanalyse, eine DMO Korrektur und Tiefenmigration durchgeführt.

Durch gemeinsame Interpretation der seismischen 3D Daten und zusätzlicher Geo-Radar

Profile, konnten Deformationsstrukturen von der Oberfläche bis in eine Tiefe von 200 m verfolgt werden. Durch die pseudo 3D Daten konnte der vertikale Versatz des Grundgesteins entlang des Streichens besser und repräsentativer, als mit einem 2D Profil, bestimmt werden. Die revidierte vertikale Verschiebung von 25 ± 5 m und das Alter der Erosionsfläche von 14 ± 4 ka bestätigen eine dip-slip Rate von 2 ± 1 mm/yr des Hauptverwerfungsstrangs. Obwohl die seitliche Verschiebung nicht direkt aus den seismischen Daten bestimmt werden konnte, wurde die strike-slip Rate aufgrund des Verhältnisses der vertikalen und horizontalen Verschiebung der geomorphologischen Marker an der Oberfläche auf ca. 8 mm/yr geschätzt. Die neuen Verschiebungsraten sind vereinbar mit einer nach Norden abnehmenden Verschiebungsrates des Alpine Faults aufgrund von Spannungsaufnahme anderer Strukturen im Osten.

Obwohl nur ein Hauptstrang der Verwerfung abgebildet wird, deuten Strukturen der Spät-Pleistozän - Holozänen Sedimente und Deformationen des Grundgebirges auf eine 60 m breite Verformungszone hin. Innerhalb des Grundgebirges verjüngt sich diese Verformungszone und bildet einen einzigen Verwerfungsstrang. Die Verteilung der Deformation in der untiefen Verformungszone deutet auf eine grössere Gleitrate hin, als man mit Hilfe von Markern an der Oberfläche schätzen würde.

Diese Untersuchung zeigt klar, wie seismische 3D Methoden unser Verständnis von Struktur und Gleitrate von aktiven Störungen in komplexer geologischer Umgebung verbessern können. Die Ergebnisse sind richtungsweisend für weitere seismische Untersuchungen welche in Vorbereitung auf ein gross angelegtes Bohrprojekt auf dem Alpine Fault geplant sind.

Abstract

Knowledge of the structure and slip-rate of active faults is critical for assessments of regional seismic hazard and risk. High-resolution geophysical methods can complement geological studies by providing 3D images of the deformation structures that accommodate strain within the shallow fault zone.

The Alpine Fault, New Zealand's largest active fault, has not ruptured during the past ~200-year historical record, although there is paleoseismic evidence for three large earthquake ruptures within the past ~600 years. Much of our current knowledge of the shallow dip, geometry and slip-rate of the Alpine Fault is derived from surface outcrops, geomorphology, shallow boreholes and/or trenches and a limited number of ground-penetrating radar studies. Since rapid rates of deposition and erosion may modify, erase or bury deformation features at the surface, high resolution seismic imaging down to basement depth has the potential to extend and enhance interpretations of fault structure and behaviour. Whereas 2D seismic profiles have been widely employed to image active faults, 3D seismic imaging has thus far been largely limited to marine and regional-scale surveys. I present the results of a unique 2D and pseudo-3D seismic reflection/refraction study of the shallow transpressive Alpine Fault Zone along its northern section near Springs Junction.

A pilot 2D ultra-high-resolution seismic line was collected perpendicular to the surface fault scarp. The dense 0.5-m spacing of receivers along a 360-m-long profile provided high-quality images from ~3.5 - 150 m depth. An innovative processing sequence was required to image reflections from within the complex late Pleistocene to Holocene postglacial sediments and shallowly to steeply dipping features within the fault zone. The resulting images revealed a steeply-dipping fault strand ($75 - 80^\circ$) through the sediments and substantial offset of the late Pleistocene erosional basement surface. Based on the apparent vertical offset of this important marker horizon, a provisional dip-slip rate of ~2 mm/yr was estimated.

A more extensive pseudo-3D seismic reflection survey covering a ~200 x 500 m area with 2 x 4 m CMP coverage was carried out at the same location. The relatively inexpensive pseudo-3D acquisition strategy, employing parallel receiver lines and inline sources, provided narrow-azimuth data that was well suited for resolving complex structures within the fault zone. The shallow data were strongly influenced by the effects of the near-surface low velocity layer, exhibiting severe statics shifts, variations in data quality, and strong source-generated noise. The data quality was greatly improved by applying a carefully tailored processing scheme that included surface-consistent deconvolution, refraction static corrections and noise reduction techniques. Three-dimensional velocity analyses, DMO corrections, and post-stack signal-to-noise enhancement were then applied in order to accurately resolve the complex dipping, diffracted, and crossing events before 3D depth migration of the data.

Joint interpretation of the detailed 3D seismic images with complementary ground-penetrating radar profiles enabled deformation structures to be traced from the surface down to basement at depths up to 200 m. The pseudo-3D data yielded a more representative estimate of the vertical offset of basement along fault strike than was possible based on the single 2D profile. The revised 25 ± 5 m apparent vertical offset and 14 ± 4 ka estimated age of the erosional basement surface confirmed a dip-slip rate of 2 ± 1 mm/yr across the main strand of the fault. Although the dextral offset could not be determined directly from the seismic data, I provided a rough ~8 mm/yr estimate of the strike-slip rate based on the ratio of vertical-to-horizontal

offsets of geomorphic markers at the surface. The new slip-rates are consistent with the expected northward decrease in slip along the Alpine Fault as a result of strain partitioning on to other structures to the east.

Although a single dominant fault strand is imaged, truncations, tilting, and rotations of the late Pleistocene - Holocene sediments and deformation of the underlying basement surface indicate that shallow strain extends across a 60-m-wide zone encompassing two blind en-echelon fault structures. The zone of deformation likely narrows at shallow depths within the basement to form a single mature fault strand. The distribution of deformation across the shallow fault zone suggests there is potentially greater slip at depth along the fault than that traditionally measured by offset of localised markers across the main strand close to the surface.

This study demonstrates the ability of 3D seismic methods to enhance our understanding of the structure and slip-rate of active faults in complex geological environments. The results of this survey are encouraging for further reconnaissance seismic surveys that are planned along the Alpine Fault in the lead-up to a major international project to drill down to the Alpine Fault at a depth of several kilometres.