

DISS. ETH Nr. 9335

**RAY-BASED IMAGE RECONSTRUCTION IN
CONTROLLED-SOURCE SEISMOLOGY WITH AN
APPLICATION TO SEISMIC REFLECTION AND
REFRACTION DATA IN THE CENTRAL SWISS ALPS**

ABHANDLUNG

Zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

KLAUS HOLLIGER

Dipl. Natw. ETH

geboren am 2. Juni 1962

von Boniswil AG

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. St. Mueller, Referent

PD Dr. E. Kissling, Korreferent

Dr. M. R. Warner, Korreferent

1991

ABSTRACT

In this work I have tried to explore the potential of ray theoretical migration and forward modelling techniques for the joint - albeit not synoptic - interpretation of deep seismic reflection and refraction data. Simple analytical considerations show that for the velocities and travel times relevant for deep seismic reflection data migration displacements easily exceed 5 km vertically and 10 km laterally. This implies that virtually every deep seismic reflection profile needs to be migrated and that a minimum profile length of at least some 30 to 50 km is required to allow structural interpretation at greater depths. Estimates of the influence of uncertainties in velocity upon migration show that the error in the average velocity must not exceed 0.2 km/s at Moho depth in order to allow a meaningful comparison of the reflectivity imaged by normal-incidence profiling and the crustal velocity structure inferred from seismic wide-angle data. Conventional migration schemes based on the solution of the scalar wave equation rarely produce satisfying results when applied to deeper crustal data. An extensive review of the corresponding algorithms shows why these methods are highly sensitive to lateral velocity variations as well as to the short, laterally discontinuous reflection segments and high noise levels in conjunction with the high velocities and long travel times characteristic of deep seismic reflection data. These problems can be largely overcome by ray theoretical depth migration of digitised line drawings. As a case study the individual deep seismic reflection profiles of the eastern (ET) and southern (ST) traverses across the Swiss Alps, which were acquired as part of the National Science Foundation Program 20 (NFP20), have been combined along the course of the European Geotraverse (EGT). The resulting reflectivity distribution was simultaneously depth migrated with the contours of the smoothed, laterally consistent velocity field obtained by the reinterpretation of the seismic wide-angle profiles running parallel to the strike of the Alpine arc. This led to an overall excellent agreement between the most prominent reflectivity patterns and the strongest wide-angle reflections, which is considered to be an important criterion for successful migration. Assuming that the result of this migration represents an unbiased acoustic image of the present-day tectonic configuration of the crust below the central Alps low-angle subduction of the lower crust and uppermost mantle of the European plate below the Adriatic promontory of the African plate is clearly depicted. Orogenic crustal thickening is interpreted to arise from the stacking of nappes onto the European upper crust and from wedging of the European and Adriatic middle crusts. At least part of the south-vergent upper crustal thrusting in the Southern Alps can be accounted for by the inferred northward downbending of the Moho and lower crust of the Adriatic plate.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung der geometrischen Strahltheorie auf die Migration und Modellierung des Laufzeitverhaltens von krustenseismischen Daten. Das Ziel hierbei ist, durch das Verständnis der theoretischen Beziehungen zwischen Wellen- und Strahltheorie sowie durch die Charakterisierung des zu betrachtenden seismischen Datenmaterials die kombinierte - wiewohl nicht synoptische - Interpretation von reflexions- und refraktionsseismischen Daten zu verbessern. Einfache analytische Betrachtungen des Migrationsvorganges zeigen, dass bei den für die kontinentale Kruste relevanten Laufzeiten und Kompressionswellengeschwindigkeiten der Migrationsweg 5 km in der vertikalen und 10 km in der horizontalen Richtung oft übersteigt. Einerseits bedeutet dies, dass für eine aussagekräftige Interpretation von reflexionsseismischen Daten deren vorgängige Migration eine *conditio sine qua non* darstellt, und andererseits, dass Profillängen von weniger als 30 bis 50 km für krustenseismische Untersuchungen wenig sinnvoll sind. Wiederum ausgehend von analytischen Betrachtungen lässt sich der Einfluss von Fehlern in der Parametrisierung des Geschwindigkeitsfeldes auf den Migrationsweg abschätzen. Dabei ergibt sich, dass für einen aussagekräftigen Vergleich zwischen der aus refraktionsseismischen Daten abgeleiteten Geschwindigkeitsstruktur und der durch die Migration erhaltenen Reflektivitätsverteilung die Unsicherheit in der mittleren Krustengeschwindigkeit einen Wert von 0.2 km/s nicht überschreiten sollte. Die gängigen, vornehmlich von der Erdölindustrie entwickelten Migrationsverfahren basieren auf der numerischen Lösung der skalaren Wellengleichung für die Rand- und Anfangswerte der gemessenen seismischen Daten. Eine eingehende Betrachtung der gebräuchlichsten Migrationsalgorithmen zeigt, dass diese generell sensibel auf laterale Änderungen der Geschwindigkeit sowie Insuffizienzen der Anfangs- und Randbedingungen, wie z.B. geringes Verhältnis von Nutz- zu Störsignal und unvollständige Registrierung des reflektierten Wellenfeldes, reagieren. Hierbei erweist sich, dass mit der Genauigkeit eines Migrationsalgorithmus in Bezug auf die Lösung der skalaren Wellengleichung auch dessen Empfindlichkeit gegenüber den obengenannten Phänomenen zunimmt. Damit lassen sich einerseits die wohlbekannten Probleme bei der Migration von krustenseismischen Reflexionsdaten erklären, und andererseits wird klar, dass wenig Hoffnung besteht, ausgehend von der Wellentheorie Algorithmen zu entwickeln, die diese Probleme grundsätzlich lösen. Die Migration der beobachteten Laufzeiten basierend auf der geometrischen Strahltheorie, einer groben

Hochfrequenzapproximation der Wellentheorie, stellt daher zur Zeit und wohl auch in absehbarer Zukunft für krustenseismische Reflexionsdaten die praktikabelste Lösung dar.

Als Fallstudie wurden die Reflexionsprofile der Ost- und Südtraverse des Nationalen Forschungsprogramms 20 (NFP 20) "Geologische Tiefenstruktur der Schweiz" betrachtet. Die für die Migration benötigte Geschwindigkeitsinformation ergab sich durch eine lateral geglättete Reinterpretation der parallel zum alpinen Streichen verlaufenden Refraktionsprofile. Die Reflexionsprofile wurden entlang des alpinen Segments der Europäischen Geotransverse (EGT) kombiniert und strahlentheoretisch tiefenmigriert. Dies führte zu einer generell guten Übereinstimmung zwischen den dominierenden Reflektivitätsmustern und den über den gesamten Zentralalpenbogen hinweg lateral kontinuierlich verfolgbaren Weitwinkelreflexionen. Das resultierende akustische Bild der Erdkruste unter den Zentralalpen reicht in eine Tiefe von 60 km und weist deutlich auf die etwa 15 Grad nach Süden geneigte Subduktion der unteren Kruste und des obersten Mantels der europäischen unter die afrikanische Platte hin. Die orogene Verdickung der alpinen Kruste lässt sich einerseits durch die Stapelung von Kristallindecken in der Oberkruste der europäischen Platte und andererseits durch ein Ineinanderschieben der Mittelkrusten der europäischen und afrikanischen Platten interpretieren. Das nordvergente Abtauchen der Unterkruste der afrikanischen Platte kann die beobachtete südvergente Verkürzung der Oberkruste in den Südalpen zumindest teilweise erklären.