

Flachseismische Messungen mit  
Kompressions- und Scherwellen  
im Bereich der  
Kontinentalen Tiefbohrung

B. Steuernagel  
W. Rabbel  
H. Stümpel



**FLACHSEISMISCHE MESSUNGEN MIT KOMPRESSIONS- UND SCHERWELLEN  
IM BEREICH DER KONTINENTALEN TIEFBOHRUNG**

B. Steuernagel, W. Rabbel, H. Stümpel

**Zusammenfassung**

Zur Kartierung von Tiefenverlauf und Geschwindigkeiten der Verwitterungsschicht und oberflächennaher Refraktoren an der Bohrlokation KTB-Oberpfalz wurden flachseismische Messungen sowohl mit Kompressions- als auch mit Scherwellenanregung durchgeführt.

Durch das zunächst vorgegebene Meßschema konnten oberflächen- nahe Inhomogenitäten nicht aufgelöst werden. Die beobachteten Laufzeitanomalien wurden daher vorläufig im Sinne eines Zweischichtfalls durch Refraktorenundulationen erklärt.

Erst durch die nachfolgende kleinräumige Messung wurden mehr Informationen über die genauen oberflächennahen Geschwindigkeiten erlangt.

Es konnte eine wenige Meter mächtige Deckschicht aus verwittertem Festgestein aufgelöst werden. Außerdem war es möglich, laterale Änderungen in der seismischen Geschwindigkeit zu bestimmen und mit deren Hilfe frühere Interpretationen zu verbessern.

---

B. Steuernagel, W. Rabbel, H. Stümpel  
Institut für Geophysik  
Christian-Albrechts-Universität  
Olshausenstr. 40  
D-2300 Kiel 1

## 1 KARTIERUNG OBERFLÄCHENNAHER REFRAKTOREN

### 1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel der seismischen Messungen im Raum Erbindorf/Windischeschenbach war die Kartierung von Tiefenverlauf und Geschwindigkeiten der Verwitterungsschicht und oberflächennaher Refraktoren in unmittelbarer Nähe der geplanten Tiefbohrlokation. Hierzu wurden auf mehreren parallelen und sich kreuzenden Profilen refraktionsseismische Messungen mit Kompressions- (P-) und Scherwellenanregung (SH) vorgenommen.

### 1.2 Durchführung der Feldmessungen

Im Raum Erbindorf/Windischeschenbach wurden entlang des allgemeinen Profilnetzes refraktionsseismische Messungen durchgeführt. Das Meßprogramm bestand aus vier Profilen mit Kompressions- und zwei Profilen mit kombinierter Kompressions- und Scherwellenanregung. Räumliche Lage und Interpretation der einzelnen Profile im Gitternetz ist in Figur 1 dargestellt.

Die Registrierungen erfolgten mit einer 24-kanaligen Digitalapparatur des Instituts für Geophysik Kiel. Zur Anregung horizontal polarisierter Scherwellen (SH) diente ein pneumatischer Wechselhammer.

Dabei wird ein in einem Rohr befindlicher Kolben mit Preßluft beschleunigt und trifft am Ende des Zylinders gegen Aufschlagflächen. Der so entstehende horizontale Impuls wird durch Ankopplungsflächen an den Boden übertragen. Die P-Wellen wurden ebenfalls mit einer pneumatisch betriebenen Quelle, jedoch mit vertikal beschleunigtem Kolben, angeregt.

Signalaufnehmer waren sechsfach gebündelte Horizontal- und Vertikalgeophone mit 10 Hz Eigenfrequenz. Der Spurbabstand betrug 5 m. Die on-line erstellten Feldschriebe zeigten bei den schußpunktfernen Spuren ein niedriges Signal/Noise-Verhältnis, so daß eine Auslagenlänge von mehr als 500 m bei den zur Verfügung stehenden Anregungsmöglichkeiten und dem beständigen Hintergrundnoise nicht sinnvoll waren.

Es wurde deshalb als Registrierschema ein Profil mit einer Gesamtlänge von 480 m mit Schußpunkten am Anfang, Mitte und Ende des Profils aufgestellt. Je nach Geländegegebenheiten wurde dieses Schema leicht abgewandelt.

Starker niederfrequenter Hintergrundnoise durch eine Straßenbaustelle in enger Nachbarschaft zum Meßgebiet verschlechterte die Datenqualität zum Teil erheblich und machte eine Bandpaßfilterung der meisten Daten notwendig.

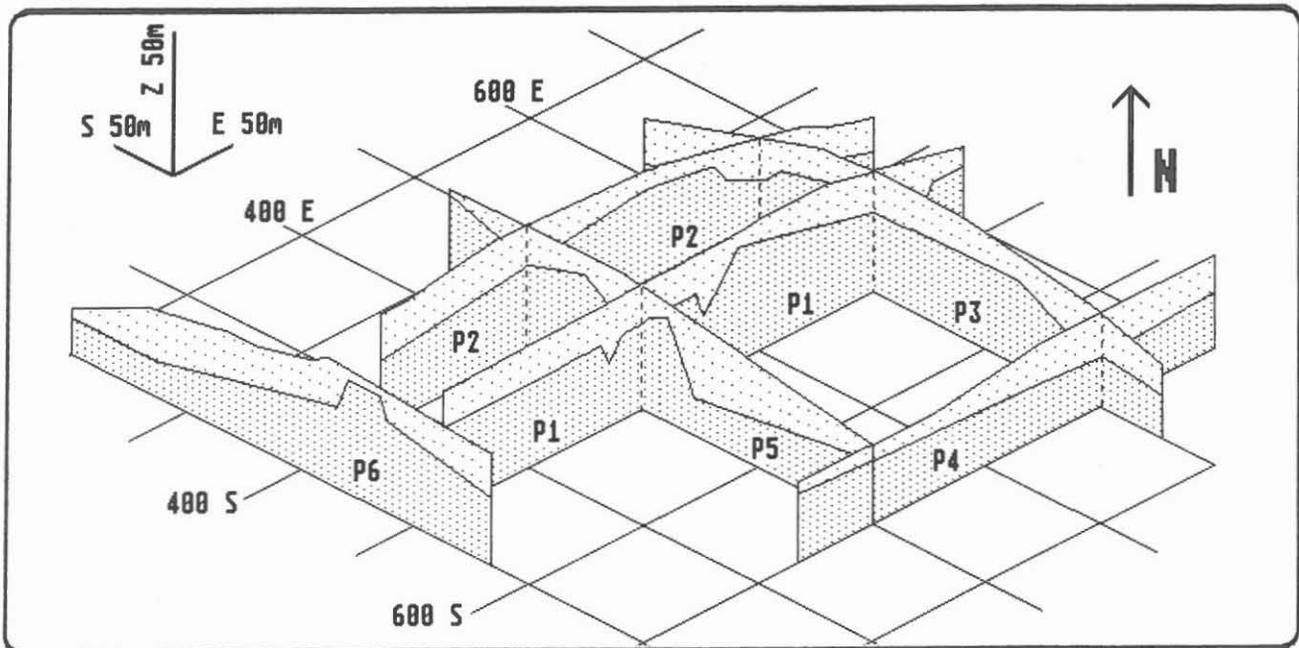


Fig. 1: Profilplan und dreidimensionale Interpretation der Refraktionsmessung. Obere Schicht  $V_p = 1850$  m/s, untere Schicht  $V_p = 4700$  m/s.

### 1.3 Auswertung

Eine erste Betrachtung des Datensatzes deutet darauf hin, daß bereits oberflächennah ein komplexer geologischer Aufbau vorliegt. Es zeigen sich auf mehreren Profillinien Laufzeitanomalien für Schuß und Gegenschuß, die auf Undulationen im Refraktor hinweisen (siehe auch Fig. 2).

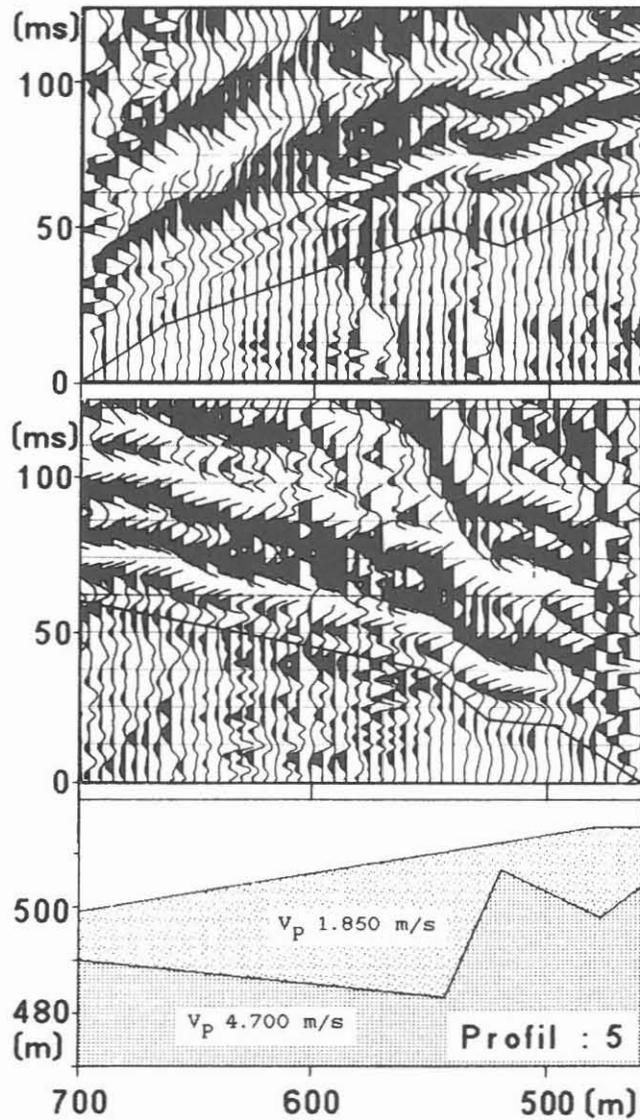


Fig. 2: Beispiel für Laufzeitanomalien in Schuß und Gegenschuß (oben und Mitte) und zugehörige geologische Interpretation (unten). Laufzeitäste sind in die Seismogramme eingetragen.

Da die Geschwindigkeit der Verwitterungsschicht aus dem vorliegenden Datenmaterial nur lückenhaft und ungenau bestimmt werden konnte, wurde für die Interpretation der P-Sektionen der einfachste Fall angenommen, nämlich ein Zweischichtfall mit homogener Verwitterungsschicht.

Die seismischen Profile wurden mit Hilfe des Ray-Tracing-Verfahrens interaktiv ausgewertet. Dabei wird die Wellenausbreitung in komplexen Untergrundmodellen mit Hilfe von Strahlen beschrieben, deren Laufzeiten durch sukzessive Modellveränderungen an die beobachteten Laufzeiten angepaßt werden (siehe Fig. 5).

Für die abschließende Interpretation werden die so ermittelten Mächtigkeitsvariationen der Schichten unter der wahren Topographie aufgetragen.

Die sich kreuzenden seismischen Registrierungen konnten in sich stimmig als Zweischichtfall mit undulierender Refraktortopographie interpretiert werden (siehe Fig. 1). Figur 2 ist ein Beispiel für Laufzeitanomalien. Oberer und mittlerer Abschnitt zeigen Schuß und Gegenschuß in P mit eingezeichneten Ray-Tracing-Laufzeiten. Unten sieht man die Refraktorundulationen im geologischen Modell als Interpretation der Laufzeitanomalien. Die P-Geschwindigkeiten betragen 1850 m/s in der Verwitterungsschicht und 4700 m/s im Festgestein.

Figur 3 zeigt eine typische seismische Registrierung. Im oberen und mittleren Teil der Abbildung sind ein P- bzw. SH-Seismogramm desselben Profils dargestellt, unten das zugehörige geologische Modell mit den seismischen Geschwindigkeiten für P und SH. In die Seismogramme eingezeichnet sind die berechneten Ray-Tracing-Laufzeitäste.

Der Vergleich der P- und SH-Geschwindigkeiten auf Profil 3 (s. Fig. 3) zeigt relativ niedrige  $V_P/V_{SH}$  - Verhältnisse (1.9 - 2.8) für die Deckschicht. Derartige Werte sind untypisch für wassergesättigte Lockersedimente, so daß die Niedriggeschwindigkeitszone eher als stark verwittertes Festgestein anzusprechen ist.

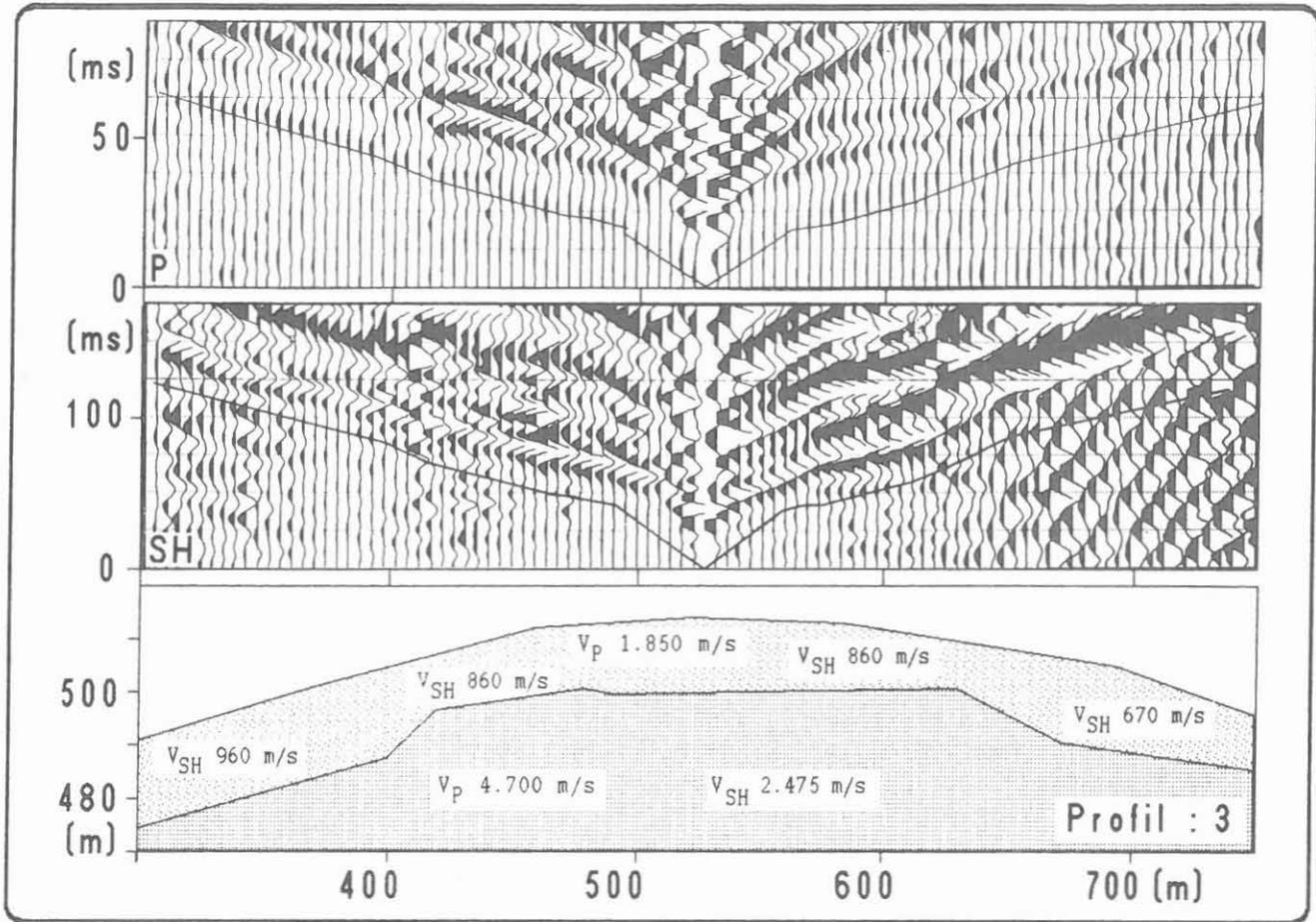


Fig. 3: Typische Seismogramme in P und SH (oben und Mitte) mit zugehörigem geologischem Modell (unten). Die berechneten Ray-Tracing-Laufzeitäste sind in die Seismogramme eingetragen.

Da die explizite Refraktortiefe wegen der hohen Geschwindigkeitskontraste zwischen Verwitterungsschicht und Festgestein im wesentlichen durch die oberflächennahen Niedriggeschwindigkeiten bestimmt werden, und diese nur ungenau bekannt sind, ist die Interpretation hinsichtlich der Tiefenlage der Refraktoren allerdings nicht eindeutig.

Eine verbesserte Geschwindigkeitskartierung war daher das Ziel einer zweiten Meßkampagne (s. Kap. 2).

## 2 KARTIERUNG OBERFLÄCHENNAHER SCHERWELLENGESCHWINDIGKEITEN

### 2.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Geophysik Kiel wurde auf dem Gelände der Kontinentalen Tiefbohrung eine weitere seismische Messung vorgenommen mit dem Ziel, mehr und genauere Informationen über die seismischen Geschwindigkeiten in der Verwitterungsschicht zu erlangen.

### 2.2 Durchführung der Feldmessungen

Auf mehreren, zum Teil zu den vorherigen Messungen parallelen, Profilen wurden kleinräumige Messungen mit kurzen Geophonauslagen vorgenommen.

Angeregt wurden Scherwellen, da man sich von deren Ausbreitungsverhalten eine bessere laterale Auflösung versprach. Die Signalanregung für SH-Wellen erfolgte diesmal mit einem Hammer und einem horizontal liegenden Eisenträger.

Die Schußpunkte waren jeweils 4 m voneinander entfernt und lagen meist innerhalb der Auslagen, so daß bei einem Geophongruppenabstand von 2 m eine maximale Schuß-Geophon-Entfernung von 48 m zu verzeichnen ist.

### 2.3 Auswertung

Die hier gezeigten Daten und Aussagen beschränken sich exemplarisch auf ein Stück des Profils 5 (siehe Fig. 4), das sich nach der ersten Refraktorkartierung mit P-Wellen (s. Kap. 1) durch eine erhebliche Refraktortopographie auszeichnen sollte.

Nach einer ersten Durchsicht zeigten die SH-Seismogramme drei Schichten: In Schußpunktnähe sehr starke Krümmung der Laufzeitkurve (hoher oberflächennaher Geschwindigkeitsgradient) sowie zwei Refraktionsäste.

Auch hier wurde für eine genauere Auswertung auf das Ray-Tracing-Verfahren zurückgegriffen, das explizite Angaben über Geschwindigkeiten, Tiefen sowie horizontale und vertikale Geschwindigkeitsgradienten ermöglicht.

Das Ergebnis der Scherwellenkartierung zeigt Fig. 4. Die seismische Geschwindigkeit für die SH-Wellen beträgt an der Oberfläche durchgehend 60 m/s - typisch für einen durch Beackering aufgelockerten Boden - mit einem starken Gradienten von ungefähr 160 (m/s)/m bis in 2 - 3 m Tiefe. Diese Geschwindigkeiten sind durch stark aber unterschiedlich verwittertes Festgestein zu erklären.

Daran schließt sich ein Refraktor mit einer Mächtigkeit von 7 bis 9 m an. Auffällig ist hier, was sich bereits in der oberen Deckschicht andeutet, ein markanter lateraler Sprung der SH-Geschwindigkeit im linken Profilabschnitt von 300 m/s auf Werte von 700 m/s. Im weiteren Verlauf pendeln sich die Geschwindigkeiten bei über 800 m/s ein.

Der liegende Refraktor mit der schon in der ersten Messung beobachteten  $V_{SH} = 2350$  m/s war aufgrund der geringen Auslagenlänge nur auf wenigen Profilen zu beobachten; sein Verlauf mußte in Figur 4 teilweise interpoliert werden (gekennzeichnet durch geringere Strichstärke in Figur 4). Die sich hier kaum ändernden Geschwindigkeiten sind durch die kurzen Refraktionsäste nicht im gleichen Maße gesichert, wie die Geschwindigkeiten der hangenden Refraktoren.

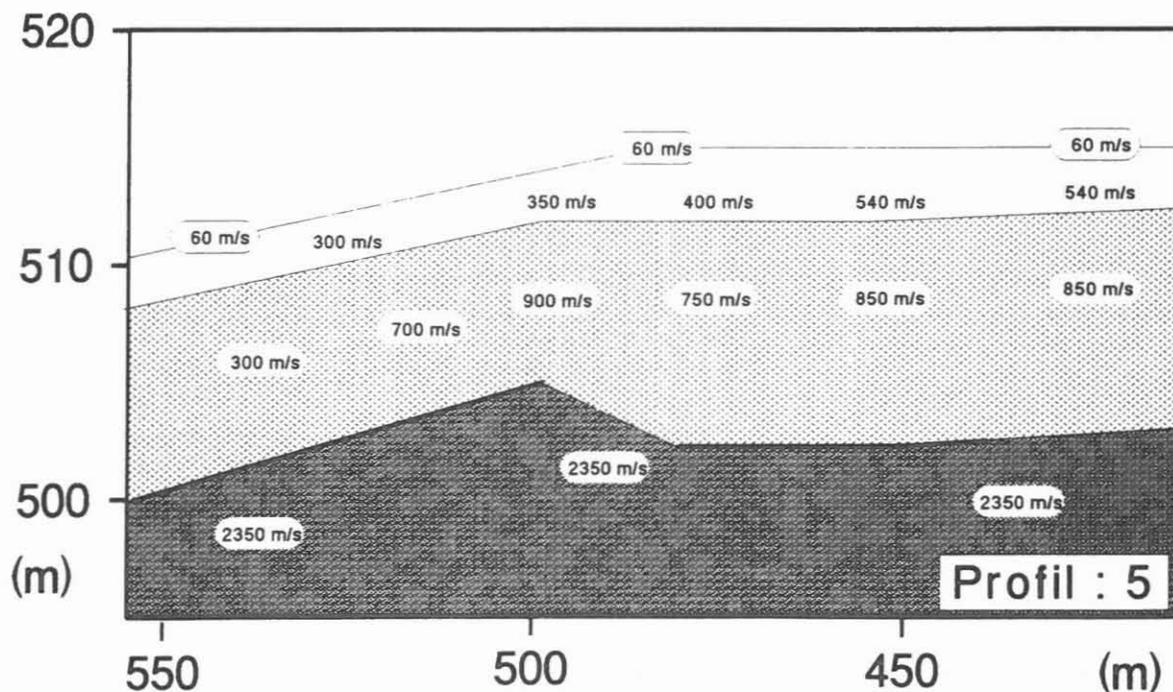


Fig. 4: Ergebnis der Scherwellenkartierung.

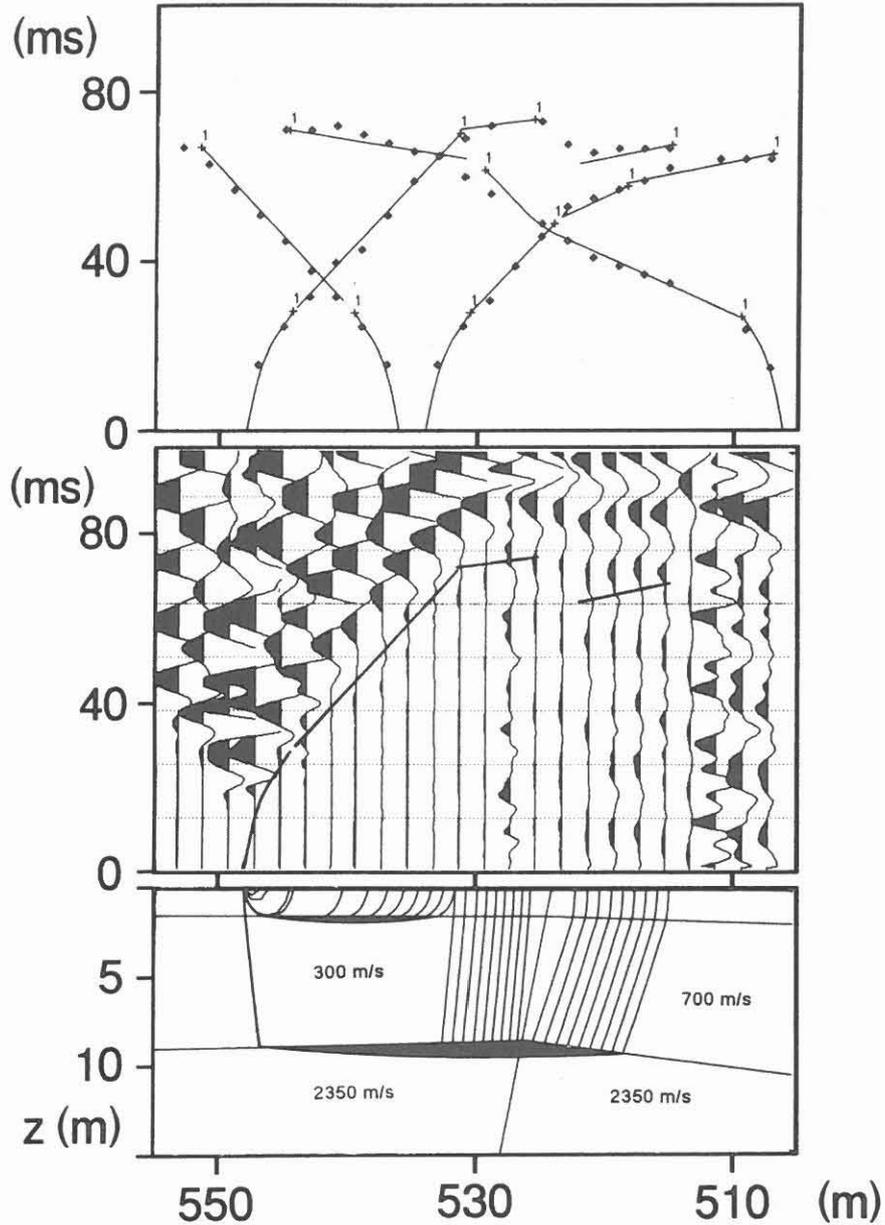


Fig. 5: Beispiel für das Ray-Tracing-Verfahren: Modell mit Strahlenverlauf für einen Schußpunkt (unten), ange-rissene (Punkte) und berechnete Laufzeiten (durchgezogene Linien) (oben) und Seismogrammbeispiel mit be-rechneten Laufzeiten (Mitte).

Von großem Interesse war, ob sich die für Profil 5 Koordinate 530 auf Grund der P-Refraktionsseismik vorhergesagte starke Refraktorundulation mit der SH- Hammerschlagseismik bestätigen läßt. Es stellte sich heraus, daß gerade an dieser Stelle der oben erwähnte Sprung in der Geschwindigkeit des ersten Refraktors vorhanden ist.

Diese starke laterale Geschwindigkeitsvariation innerhalb dieser Schicht kann sicherlich nicht nur durch unterschiedliche Verwitterung erklärt werden. Hier muß auch ein echter Materialwechsel in Betracht gezogen werden.

In Figur 5 ist dieser Bereich mit einer detaillierten Interpretation dargestellt. Der untere Teil der Abbildung zeigt ein Untergrundmodell wie es beim Ray-Tracing benutzt wird. Als Ergebnis sieht man eine Störung mit den oben genannten Geschwindigkeiten.

Eingezeichnet ist außerdem der Strahlenverlauf von direkten und refraktierten Wellen für einen Schußpunkt. Die dazugehörigen berechneten Laufzeiten wurden direkt in das Seismogramm eingetragen (Mitte).

Das obere Bild zeigt alle für diese Interpretation benutzten Schußpunkte und erlaubt einen direkten Vergleich der digitalisierten Ersteinsätze (Punkte) mit den berechneten Laufzeiten (durchgezogene Linien).