Zeitgemässe Refraktionsseismik

Autor(en): **Frei, Walter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure**

Band (Jahr): **62 (1995)**

Heft 140

PDF erstellt am: **29.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-218423

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bull. schweiz. Ver. Petroleum-Geol. u. -Ing., Vol. 62, Nr. 140, Juli 1995 - S. 1-16

Zeitgemässe Refraktionsseismik

mit 10 Figuren

vom WALTER FREI*

Zusammenfassung

Fehlende Rechenkapazitäten haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass das von der Reflexionsseismik verfügbare apparative Potential zur Erfassung einer der Fragestellung angepassten refraktionsseismischen Datenredundanz nicht ausgeschöpft werden konnte und eine refraktionsseismische Erkundung schon bei geologisch weniger komplizierten Fällen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet war.
Leistungsfähige computerunterstützte Auswertungsverfahren erlauben heute die Verarbeitung grösserer Datenmengen und eine aussagekräftigere und zuverlässigere Interpretation auch bei nicht planaren Refraktoroberflächen und lateralen Geschwindigkeitsänderungen. Obwohl die Anzahl plausibler Lösungsmodelle mit dem modernen Verfahren der Generalized Reciprocal Method (GRM) eingegrenzt werden kann, bleibt die Entscheidung zur Wahl wichtiger Interpretationsparameter noch immer subjektiv. Refraktionsseismische Interpretationsgrössen sind in der Regel anhand einer Schlüsselbohrung zu kalibrieren.
Praktische Fallstudien beleuchten das Problem "verborgener" Schichten und zeigen ein Beispiel erfolgreicher interdisziplinärer Erkundung unter komplexen geologischen Bedingungen.

Résumé

Par le passé, les méthodes conventionelles d'interprétation de la sismique-réfraction, basées sur le calcul manuel, ont sévèrement limité l'utilisation de cette technique sur le terrain. Dès que le problème géologique à résoudre atteignait un certain degré de complexité, les procédures utilisées pour l'interprétation rendaient celle-ci assez aléatoire, même si, à l'époque déjà, l'instrumentation disponible sur le terrain permettait l'acquisition à faible coût de grandes quantités de données.
Aujourd'hui, avec l'avancée des techniques informatiques, des méthodes de traitement performantes, appliquées à de grandes masses de données, permettent une interprétation plus fiable et plus précise, notamment dans les cas d'interfaces de réfraction inclinées ou de variations latérales de vitesses. Bien que le nombre de solutions possibles soit réduit avec le procédé moderne de la Generalized Reciprocal Method (GRM), le choix de certains paramètres importants d'interprétation reste empreint de subjectivité. Il est par conséquent impératif de caler les données sur un forage.
Deux exemples pratiques illustrent le problème des couches cachées et l'application prometteuse de méthodes interdisciplinaires dans un contexte géologique complexe.

Summary

Conventional seismic refraction interpretation methods based on manual calculations have in the past effectively limited the scope of the data acquisition procedures in the field. Through the 1980s, the seismic refraction method as applied to engineering and environmental problems was perhaps on the decline because geological problems of a more complex nature, due to inappropriate evaluation and computing techniques, could not be addressed adequately although the field instrumentation at hand was capable of acquiring the necessary data redundancy at low cost.The advent of computer assisted modelling employing the modern Generalized Reciprocal Method (GRM) has brought forward a new and powerful tool for handling situations with lateral velocity variations and for mapping non-planar and dipping refraction boundaries with greatly improved accuracy and higher confidentiality. In less simple cases however, the practitioner is still confronted with a constrained set of solution ambiguities

* GeoExpert ag, Geophysikalische Untersuchungen, Postfach 451, CH-8603 Schwerzenbach

based on his choice of the interpretation parameters. For a unique solution well control for calibration is imperative. A practical example illustrates the pit-fall of an interpretation problem in the presence of a hidden layer. Another case study shows the application of state-of-the-art seismic refraction surveying in a geologically complex setting.

1. Einführung

Seit ungefähr 1920 ist die Refraktionsseismik die wohl am häufigsten verwendete geophysikalische Erkundungsmethode für ingenieurgeologische Abklärungen. Der Vorteil des Verfahrens ist die einfache Anwendbarkeit sowohl bei der Datenerfassung wie auch bei der Auswertung und Interpretation der Messergebnisse. Die Nachteile der Methode sind identisch mit denjenigen aller geophysikalischen Kennkurven-Inversionsverfahren, deren geologische Interpretation auf einem Modell beruht, das aus dem Verlauf einer oder mehrerer Anomaliekurven oder, wie im Falle der Refraktionsseismik, aus Laufzeitkurven iterativ abgeleitet wird. Die subjektive Wahl des Initialmodells und die grundsätzlich in diesen Verfahren inhärente Mehrdeutigkeit der Messergebnisse führen dazu, dass die Aussagen schon bei etwas komplexeren geologischen Verhältnissen mit der gebotenen Vorsicht zu bewerten sind.
Im Gegensatz zu den Kennkurven-Inversions Erkundungsmethoden stehen die direkten Abbildungsverfahren, wie die Reflexionsseismik und Georadar. Sie sind in der Lage, geologische Schichtgrenzen gleichsam einer Röntgenaufnahme nach ihrer Tiefenlage getrennt aufzuzeigen. Die geologische Interpretation beschränkt sich hier auf die Identifikation von bereits sichtbar gemachten Strukturen.
Mit der Entwicklung hochauflösender reflexionsseismischer Prospektionsverfahren, die dem Geophysiker im Laufe der achziger Jahre mit den Fortschritten auf dem Gebiet der Computertechnologie immer leistungsfähigere und kostengünstigere Werkzeuge zur Verfügung stellten, glaubte man, dass die Refraktionsseismik stark an Bedeutung verlieren würde.
Die Hauptschwäche herkömmlicher Ingenieur-Refraktionsseismik liegt darin, dass die Technik der Datenerfassung im Feld durch die bisher beschränkten Auswertungsmöglichkeiten diktiert wurde. Das noch heute von vielen Anwendern ausschliesslich angewandte Auswertungsverfahren nach der Interzept-Zeit Methode geschieht manuell und erlaubt deswegen keine umfangreicheren Berechnungen zur Optimierung der Lösungsmodelle, was dem Aussagepotential refraktionsseismischer Daten nicht genügend Rechnung trägt. Die beschränkten Rechenkapazitäten haben dazu geführt, dass die schon seit Jahrzehnten im Feld vorhandenen apparativen Möglichkeiten zur Gewinnung einer höheren Datenredundanz nicht ausgeschöpft wurden und vielerorts auch heute noch nicht genutzt werden.
Seit 1990 sind kostengünstige Analogseismographen mit 48 oder mehr Kanälen sowie sog. roll-along -Schaltvorrichtungen erhältlich, die wie bei der Reflexionsseismik ein kontinuierliches Profilschiessen und damit einen speditiven Messfortschritt mit ausreichend hoher Datenredundanz ermöglichen. Noch immer gibt es Anbieter von refraktionsseismischen Untersuchungen, die, ausgerüstet mit einer 24-Kanal Apparatur, sowie einem Taschenrechner und Millimeterpapier als einziges Auswertungsinstrumentarium, lediglich in der Lage sind, kürzere Einzelprofile aufzuzeichnen und auch nur solche zu interpretieren. Für kleinräumige Erkundungen eines horizontalen Zweischichtenfalles ist eine solche Ausrüstung sicher problemangepasst und die wirtschaftlichste Lösung. Bei längeren Messstrecken führt

eine Billigvariante bei der Datenerfassung im Feld einerseits zu logistischen Unzulänglichkeiten, was unweigerlich eine der Fragestellung schlecht angepasste Wahl von zu grossen Geophonabständen und damit einen Verlust an Detailgenauigkeit nach sich zieht. Andererseits ist im Feld ein langsamerer Messfortschritt vorprogrammiert, da bei zusammengefügten Einzelprofilen viel Totzeit entsteht durch die Verlegung der Geophonauslage, und weil an vielen Schusspunkten mehr als einmal angeregt werden muss.
Ein moderner Ingenieurseismograph mit bis zu 120 Kanälen und eine roll-along - Schaltvorrichtung erlauben durch die Technik des kontinuierlichen Profilschiessens einen drei mal schnelleren Messfortschritt gegenüber dem Aufzeichnen aneinander gereihter Einzelprofile.
Dieser Beitrag soll die Verbesserungen aufzeigen, die der Refraktionsseismik durch die Anwendung computerunterstützter Auswertungsverfahren zu einer Renaissance verholfen haben. FREI (1993) beleuchtet an Beispielen den praktischen Nutzen refraktionsseismischer Messergebnisse im oberflächennahen Tiefenbereich, die bei der Auswertung und Interpretation hochauflösender reflexionsseismischer Daten einen entscheidenden Beitrag leisten.

2. Das Aussagepotential refraktionsseismischer Erkundung

Die Fig. 1 zeigt einen geologischen Zweischichtenfall (oberes Bild) mit einer Quartärüberdeckung, deren Geschwindigkeiten v0 lokal variieren können. Die Topographie der Felsoberfläche weist Unebenheiten auf, die refraktionsseismisch erfasst werden sollen. Die Felsgeschwindigkeiten v1 können entlang der Profilstrecke ebenfalls unterschiedliche Werte annehmen.

Wegen des nicht planaren Verlaufs der Felsoberfläche und wegen der inhomogenen Zusammensetzung des Lockergestgesteins und lateraler Geschwindigkeitsvariationen im Fels streuen die Laufzeiten der Refraktionseinsätze an den Stationen zwischen M und N mehr oder weniger stark.
Bei einer planaren Felsoberfläche und sowohl lateral wie vertikal konstanten Geschwindigkeiten innerhalb der Lockergesteinsüberdeckung und im Fels lägen die Refraktionseinsätze auf einer Geraden. Eine lineare Ausrichtung der Einsatzzeiten auf den einzelnen Laufzeitabschnitten weist somit auf einfache geologische Verhältnisse mit planaren Schichtgrenzen und konstanten Formationsgeschwindigkeiten hin. Die Auswertungsergebnisse sind in diesem Fall eindeutig und stimmen mit der Wirklichkeit überein.

Komplexe geologische Verhältnissen resultieren in einem ausgeprägtem nichtlinearen Verlauf der Kurven für die Ersteinsätze, wie z.B. in Fig. 1. Bei der Auswertung und Interpretation nicht-linear verlaufender Laufzeitkurven gilt der Grundsatz, dass eine unendlich grosse Anzahl von Lösungsmodellen den beobachteten Refraktionslaufzeiten genügt. Ohne geologische Vorkennntnisse und/oder zusätzliche Informationen von Bohrungen oder Resultate von anderen geophysikalischen Erhebungen lässt sich die Anzahl an Modellkandidaten nicht eingrenzen.

Ein Beispiel, das die Mehrdeutigkeit des Verlaufs einer Laufzeitkurve illustriert, ist in Fig. 2 und 3 dargestellt. Der in Fig. 2 und 3 identische Datensatz wurde an einer

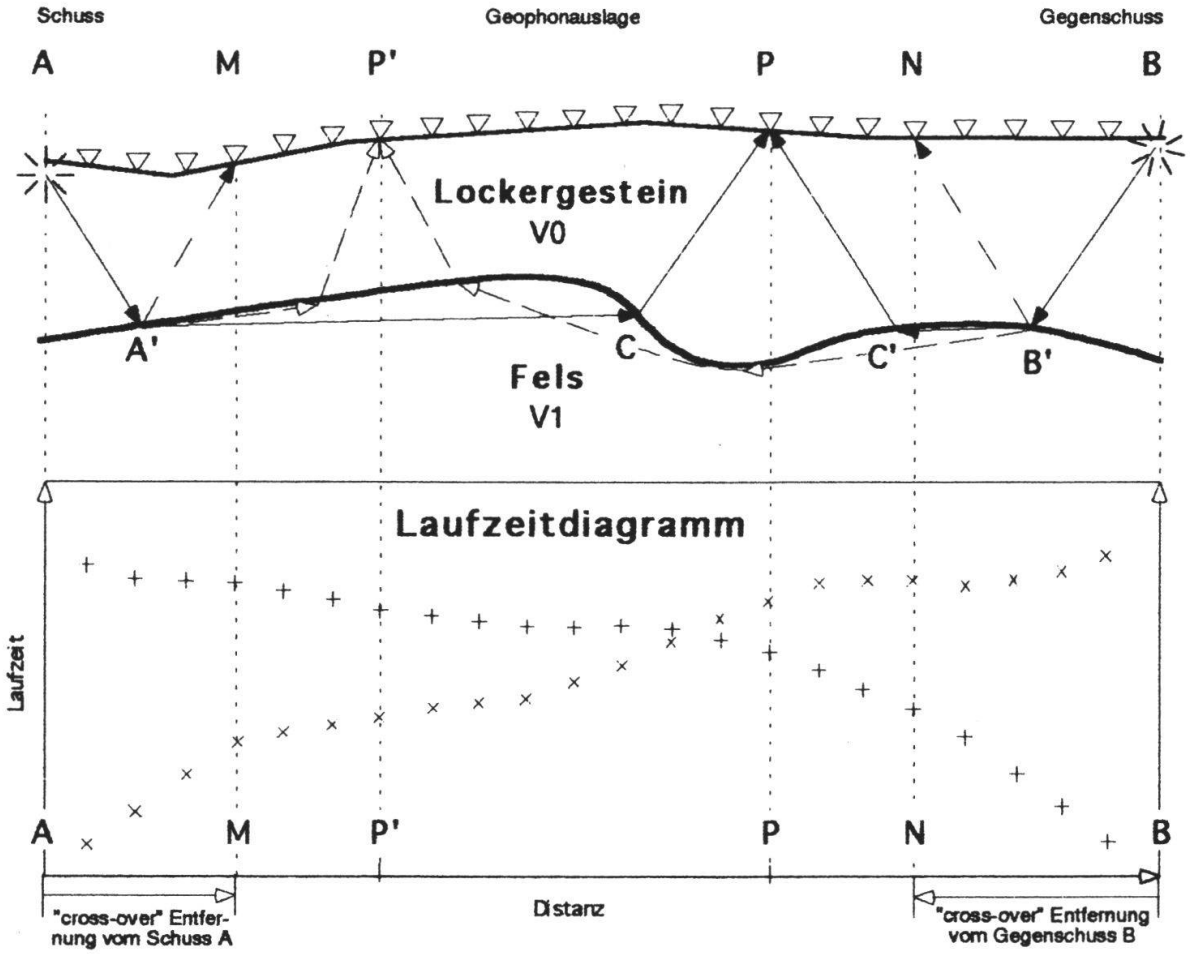

Fig. 1: Darstellung der geologischen Situation eines Zweischichtenfalls in einem refraktionsseismischen Laufzeitdiagramm. Die Aufzeichnungsanordnung besteht aus einem Schuss A und einem Gegenschuss B an je einem Ende der Geophonauslage. Es sind die von der Felsoberfläche refraktierten Wellenstrahlen von den beiden Anregungspunkten zu zwei Geophonstationen P und P' eingezeichnet. Der Strahlenweg für den ersten Einsatz der Schallwelle bei der Station P vom Schuss A ist AA'CP. Analog ist BB'C'P der Strahlenweg vom Gegenschuss B zum Geophon P.
Die Abschnitte AM und BN werden als "cross-over" Entfernungen bezeichnet, d.h. für grössere Abstände von den jeweiligen Schusspunkten überholt der Wellenstrahl, der sich entlang der (schnelleren) Felsoberfläche ausbreitet, die direkte Welle durch das Lockergestein und trifft als Ersteinsatz bei allen Stationen zwischen M und N ein.

steilen Bergflanke aufgezeichnet, die mit Hangschutt von heterogener Zusammensetzung bedeckt ist. Das Untersuchungsziel ist die Kartierung der Tiefenlage der aus möglicherweise verwittertem Mergelkalk bestehenden Felsoberfläche.

Der Verlauf der Kurve für die Ersteinsatzzeiten weist Knickpunkte bei den Geophonstationen 5, 18 und 34 auf. Der auswertende Geophysiker steht nun vor der Frage, ob die *cross-over* Entfernung (s. Fig. 1) für die refraktierte Welle der Felsoberfläche bei der Station 18 oder bei Station 34 liegt. Die in Fig. 2 abgebildete Auswertungsvariante, die den Einsatz der Felsrefraktion bei Station 34 festlegt und eine durchaus plausible Felsgeschwindigkeit von > 3000 m/s ergibt, "sieht" die Felsoberfläche in ca. 28 m Tiefe. Die zweite Auswertungsvariante ist in Fig. 3 dargestellt und legt den Knickpunkt für den Einsatz der Felsrefraktion in die Nähe der

Station 18, was in einer eher tiefen Felsgeschwindigkeit von 2090 m/s resultiert und die Mächtigkeit der Hangschuttüberdeckung auf ca. 15 m berechnet.

Ohne ergänzende Informationen aus Bohrungen oder über die Felsbeschaffenheit (Auflockerungszonen etc.) sind beide Auswertungsvarianten gleichwertig. Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine Abklärung zum Bau eines Stollens, weshalb ein pessimistischer Entscheid zugunsten der grösseren Lockergesteinsmächtigkeit getroffen wurde. Eine Bohrung, die nahe des Schusspunktes angesetzt wurde, zeigt den Fels, stark aufgelockert, in 15 m Tiefe. Aufgrund dieser Information musste die Interpretation zugunsten der zweiten Auswertungsvariante revidiert werden. Der Knick in der Laufzeitkurve bei Station 34 ist auf eine Unebenheit in der Molasseoberfläche zurückzuführen.

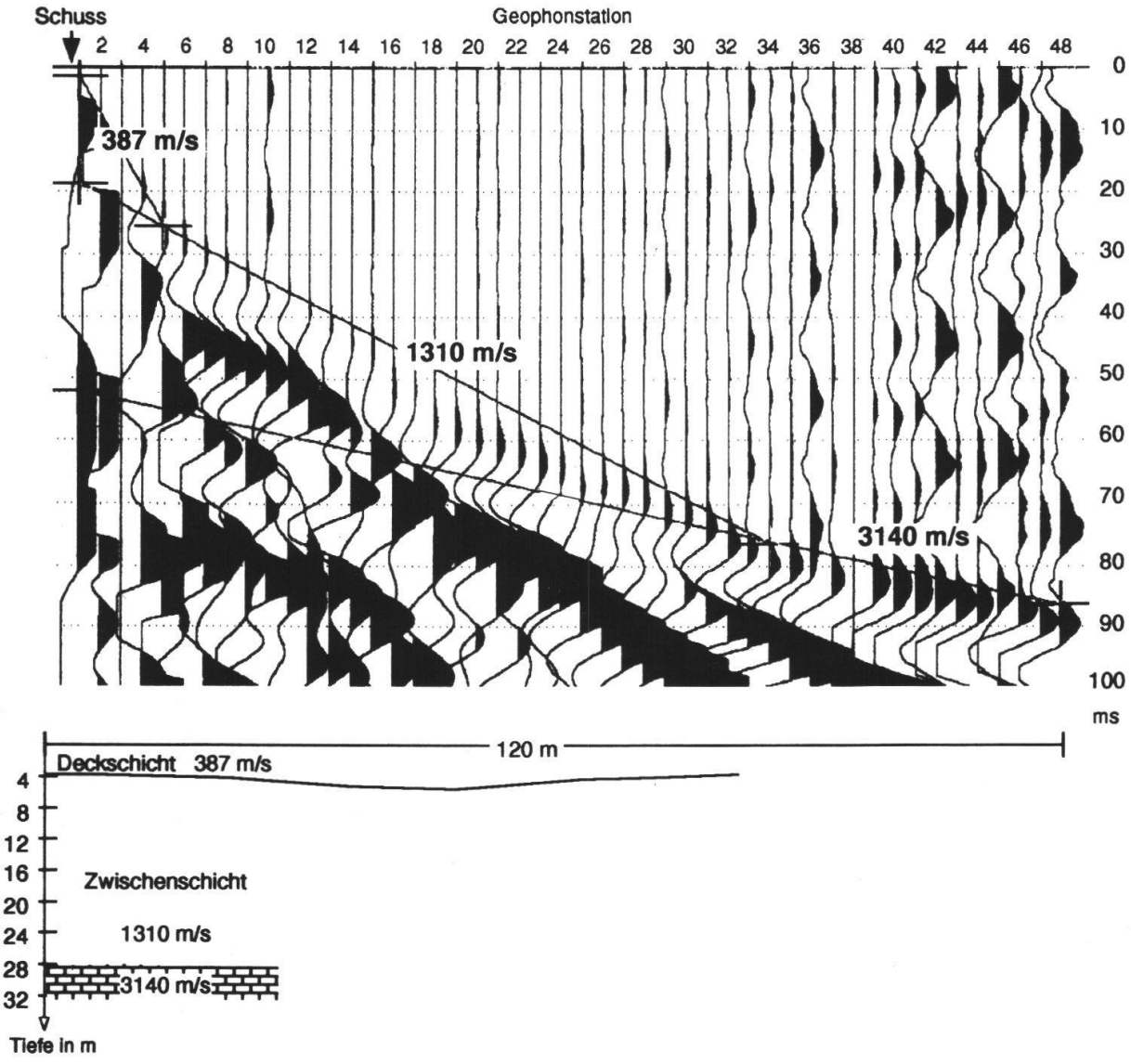

Fig. 2: Aufzeichnung eines Datensatzes mit 48 Geophonstationen und Identifikation von drei Laufzeitsegmenten mit Refraktionsgeschwindigkeiten von 387 m/s, 1310 m/s und 3140 m/s. Das geologische Modell der unteren Bildhälfte wurde ohne die Angaben aus einem Gegenschuss erstellt, d.h. unter der Annahme einer horizontalen Schichtenlage. Die hier und in Fig. 3 dargestellte Problematik der richtigen Zuordnung von Laufzeitsegmenten zu geologischen Strukturen ist allgemeiner Natur und stellt sich in verstärktem Masse auch bei einer vollwertigen Schuss- / Gegenschuss-Auswertung bei geneigten und nicht planaren Schichtgrenzen.

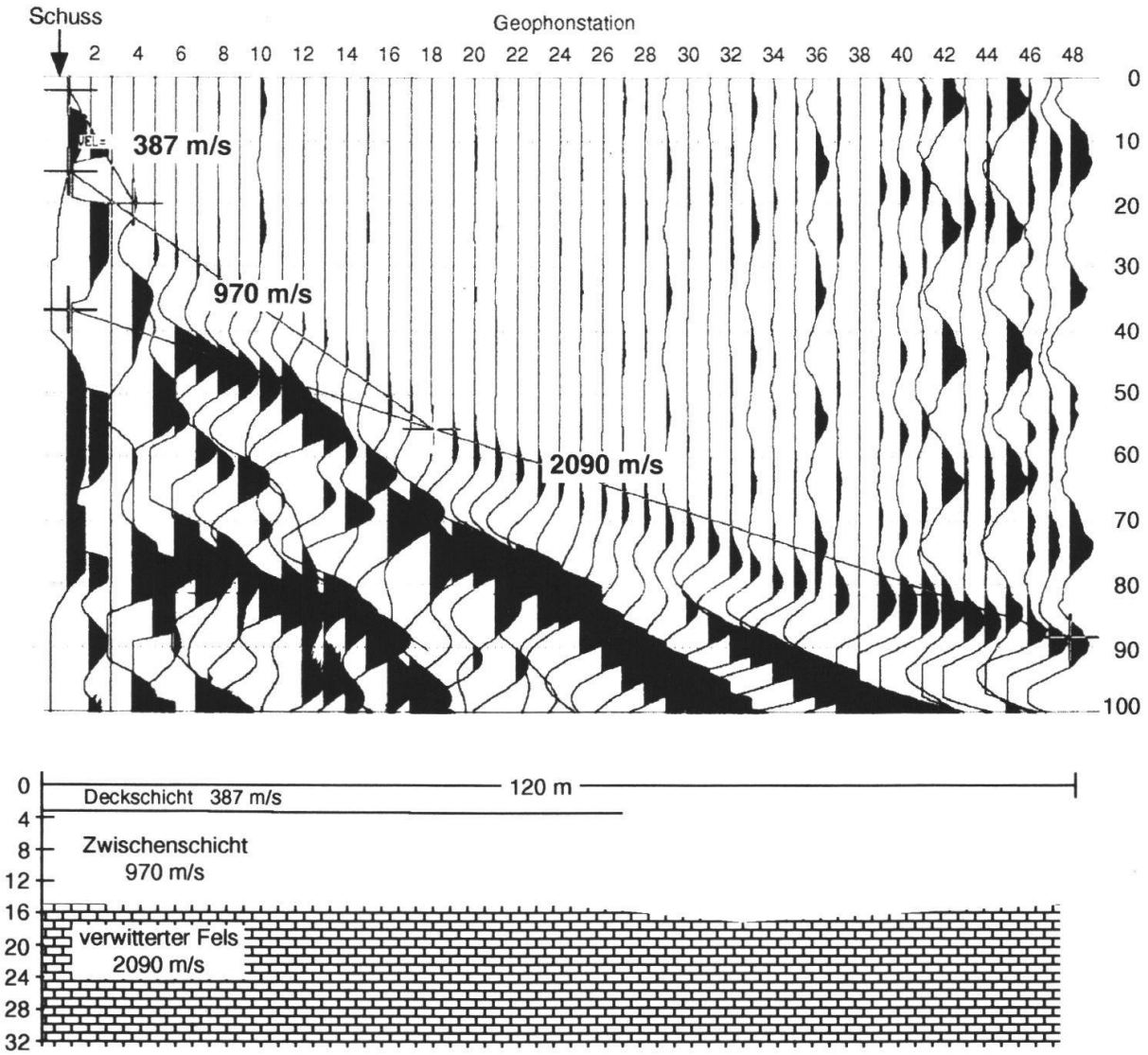

Fig. 3: Gleicher Datensatz wie in Fig. 2 mit einer alternativen, gleichwertigen Interpretation der Laufzeitsegmente. (Tiefe in m)

Dieses Beispiel aus der Praxis zeigt, dass bei schwierigen geologischen Verhältnissen geophysikalische Auswertungsverfahren mit gesicherten Angaben aus einer Schlüsselbohrung kalibriert werden müssen um verlässliche Aussagen zu erhalten.

3. Die Entwicklung refraktionsseismischer Auswertungsverfahren

Es werden die drei in der heutigen Praxis am häufigsten verwendeten Auswertungsverfahren vorgestellt.

3.1 Das Interzept-Zeit Verfahren (Intercept Time Method, ITM)

Es handelt sich hier um die herkömmliche Auswertungsmethode, die sich auch im Feld manuell und ohne grossen Aufwand mit einem Taschenrechner und Millimeterpapier durchführen lässt. Bei einfachen geologischen Verhältnissen, d.h. bei linearem Verlauf der Laufzeitkurven, sind deren Ergebnisse mit geringen Fehlern behaftet. Unter komplexeren geologischen Bedingungen eignet sich das ITM-Ver-

fahren bestenfalls als grobe Überschlagsrechnung, da es nur gerade Refraktortiefen an den Schusspunkten liefert und dazwischen linear interpoliert. Fig. 4 illustriert die Anwendung dieser Methode.

3.2 Die Plus-Minus Methode

Die Anwendbarkeit des Interzept-Zeit Verfahrens ist stark eingeschränkt, da nur in Ausnahmefällen planare Schichtgrenzen und homogene Geschwindigkeitsverteilungen in den zu erkundenden Formationen das Dasein des Geophysikers erleichtern. Die in Fig. 5 vorgestellte und schon in den 50-er Jahren entwickelte Plus-Minus Methode trägt komplizierteren geologischen Situationen besser Rechnung indem an jeder Geophonstation Tiefenbestimmungen vorgenommen werden. Von den in Fig. 4 angeführten, durch den Geophysiker zu treffenden zwei Entscheidungen, die für die Wahl des Lösungsmodells massgebend sind, bleibt nur die erste, d.h. die Bestimmung der Knickpunkte und somit die Identifizierung der Refraktoren, bestehen. Die Ableitung der Refraktorgeschwindigkeit v1 erfolgt ohne subjektive Einflüsse direkt und neigungskorrigiert.

Bei der Anwendung der Plus-Minus Methode ist darauf zu achten, dass der Abstand zwischen den Geophonstationen im Interesse des Auflösungsvermögens nicht grösser als 1/5 des Betrages der zu erwartenden Maximaltiefe des Refraktors gewählt wird.

3.3 Das Verfahren der Generalized Reciprocal Method (GRM)

Das in Fig. 6 illustrierte Verfahren der GRM liefert mit einigem Mehraufwand eine grössere Detailgenauigkeit als die Plus-Minus Methode. Sie setzt voraus, dass sich innerhalb der in Fig. 6 skizzierten optimalen Separation X-Y mindestens 5 Geophonstationen befinden.
Die GRM ist, wie der Name sagt, das allgemein anwendbare Verfahren der reziproken Auswertung von Schuss- und Gegenschussdaten an jeder Geophonstation. Die Plus-Minus Methode in Fig. 5 ist als ein Spezialfall der GRM mit einer X-Y Separation von Null zu betrachten, was den Rechenaufwand erheblich reduziert.

An dieser Stelle ist in Erinnerung zu rufen, dass bei allen refraktionsseismischen Auswertungsverfahren die Genauigkeit der Ergebnisse weitgehend von interpretativen - und somit subjektiven - Faktoren abhängt. Grundsätzlich steigt die Mehrdeutigkeit der Daten mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad der zu untersuchenden Geologie. Den Entscheid, welche Laufzeiten welchen Refraktoren oder noch den direkten Einsätzen zuzuordnen sind, kann auch die ausgeklügeltste Software dem Geophysiker nicht abnehmen. Aus diesem Grunde müssen in geologisch komplexen Gebieten die refraktionsseismischen Aussagen an Schlüsselbohrungen kalibriert werden können.

Auch zu erwähnen ist, dass die Signalqualität der Refraktionseinsätze in Gebieten, in denen starke äussere Störeinflüsse (Industrie- und Verkehrslärm) vorherrschen, oft eine nur ungenaue Bestimmung der Laufzeiten gestattet, was wiederum die Resultate mit zusätzlicher Subjektivität behaftet.

I Auswertung nach der Interzept-Zeit Methode

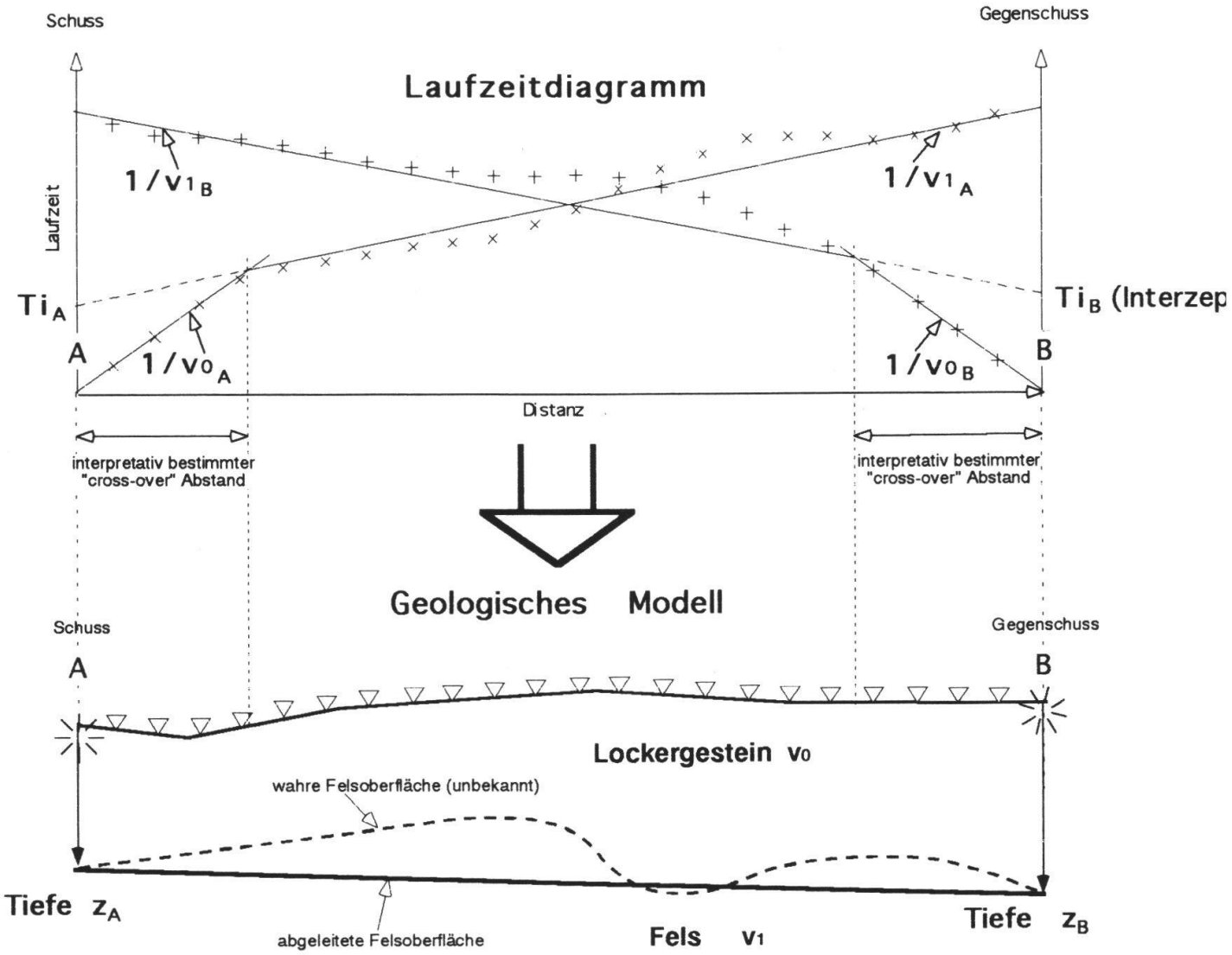

Fig. 4: Das Laufzeitdiagramm (obere Bildhälfte) entspricht der geologischen Situation des in Fig. 1 dargestellten Zwei-Schichtenfalls. Zwei vom auswertenden Geophysiker oder Geologen zu treffende Entscheidungen sind massgebend für die Wahl des geologischen Lösungsmodells:

1. Die Bestimmung der Lage der Knickpunkte auf jeder Laufzeitkurve, welche erstens die Einsätze von der direkten, durch das Lockergestein laufenden Schallwelle vom ersten Refraktionseinsatz, und zweitens die Refraktionseinsätze mehrerer Schichtgrenzen voneinander, trennt. Die Abstände der ersten Knickpunkte von den Schusspunkten entspricht den "cross-over" Abständen in Fig. 1.
2. Die Fixierung der Regressionsgeraden $1 / v1_B$ und $1 / v1_A$ entlang der mehr oder weniger linearen Ausrichtung der Einsatzzeiten im Laufzeitendiagramm.

Die Schnittpunkte der unter Punkt 2 bestimmten Regressionsgeraden mit den Koordinaten der Schusspunkte bei A und B ergeben die Interzept Zeiten Ti_A und Ti_B. Mit den Angaben der Lockergesteinsgeschwindigkeiten $v0_A$ und $v0_B$ sowie der Refraktionsgeschwindigkeiten $v1_A$ und $v1_B$ werden nur die Tiefen z_B und z_A der Felsoberfläche unter dem Schuss A und dem Gegenschuss B ermittelt.

Weitere Tiefenangaben zwischen den Schusspunkten sind mit diesem Verfahren nicht erhältlich, d.h. es eignet sich als vollwertige Auswertungsmethode nur dann, wenn a priori bekannt ist, dass die Felsoberfläche zwischen den beiden Schusspunkten planar verläuft, und die Geschwindigkeiten v0 und v1 zwischen den Schusspunkten A und B konstant sind. Wie aus dem geologischen Modell der Abbildung ersichtlich ist, kann mit diesem Verfahren bei bewegter Topographie der Felsoberfläche die lineare Interpolation lediglich deren ungefähre Tiefenlage aufzeigen.

II Auswertung nach der "Plus - Minus" Methode

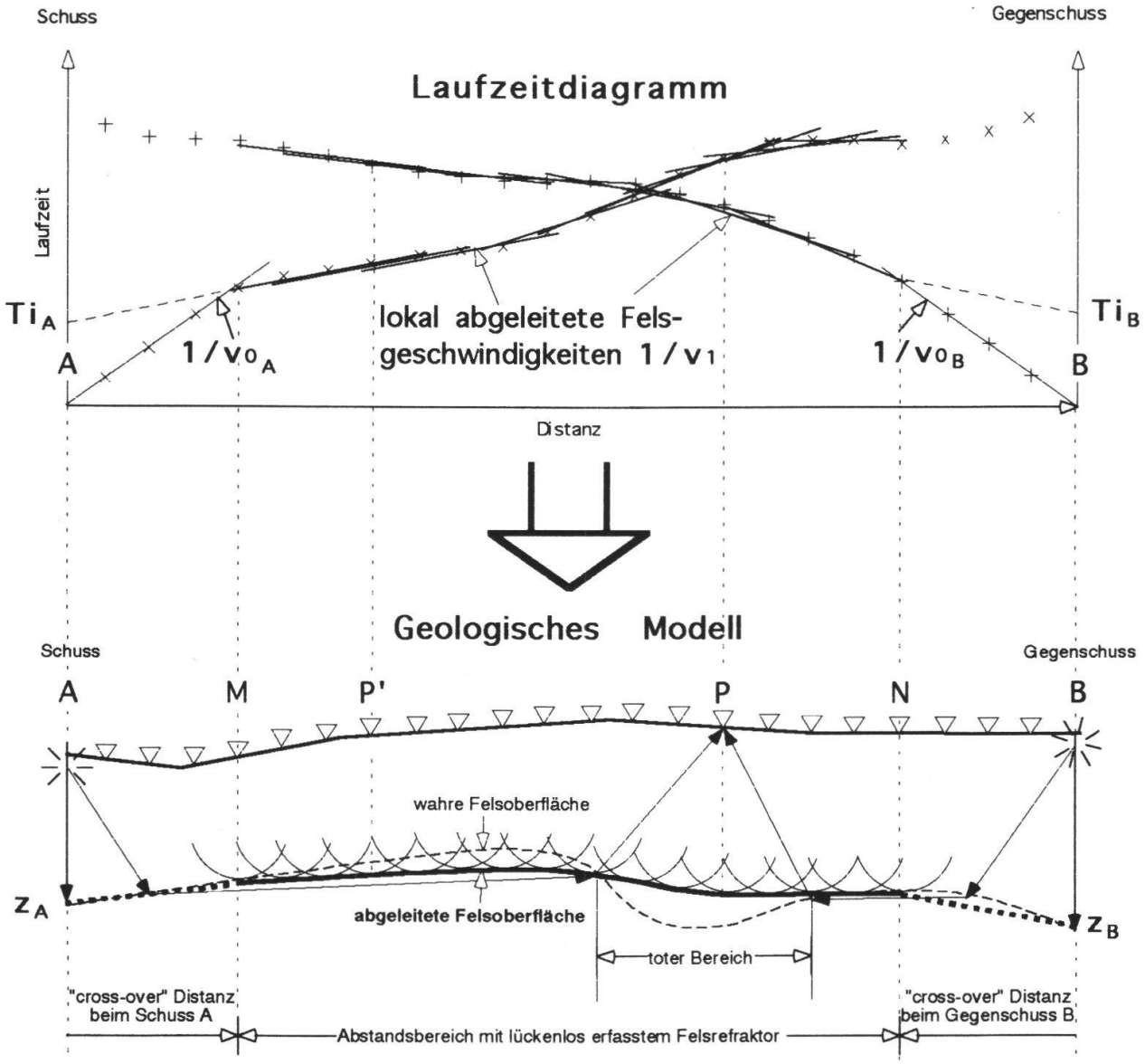

Fig. 5: Zusätzlich zu den über das Interzept-Zeit Verfahren ermittelten Tiefen an den Schusspunkten werden bei der Plus-Minus Methode aus den Refraktionszeiten von Schuss und Gegenschuss an jeder Geophonstation zwischen M und N lokale Refraktorgeschwindigkeiten und sog. Time Depths abgeleitet. Die Time Depths entsprechen den Interzept-Zeiten an den Schusspunkten und sind geometrische Orte der Tiefe des Refraktors unter der jeweiligen Geophonstation. Im geologischen Model (unteres Bild) sind die in Tiefenwerte umgerechneten Time-Depths als Halbkreise eingezeichnet. Die Umhüllende der Halbkreise ist die Felsoberfläche.
Mit der Plus-Minus Methode sind im Gegensatz zum Interzept-Zeit Verfahren auch Kartierungen von nicht planaren Schichtgrenzen und bei variablen Refraktorgeschwindigkeiten v1 entlang der Messstrecke möglich, da an jeder Geophonstation eine getrennte Geschwindigkeits- und Tiefenbestimmung erfolgt. Einschränkungen bei der Detailgenauigkeit der Abbildung bestehen bei stark bewegter Topographie aufgrund im Verfahren inhärenter Unzulänglichkeiten. Wegen des toten Bereichs zwischen den Austrittspunkten der refraktierten Wellenstrahlen von Schuss und Gegenschuss auf der Felsoberfläche (s. unteres Bild) werden kleinräumige Hebungen und Senkungen der Felsoberfläche nicht erfasst. Im abgebildeten Beispiel kann die Methode den Verlauf der Felsoberfläche nur annäherungsweise und geglättet aufzeigen.
Die Plus-Minus Methode kann bei einer geringen Anzahl kürzerer Profile von Hand angewendet werden. Bei längeren Profilen, bestehend aus mehreren aneinandergefügten Geophonauslagen und mehr als zwei Schüssen, empfiehlt sich der Einsatz geeigneter Computerprogramme.

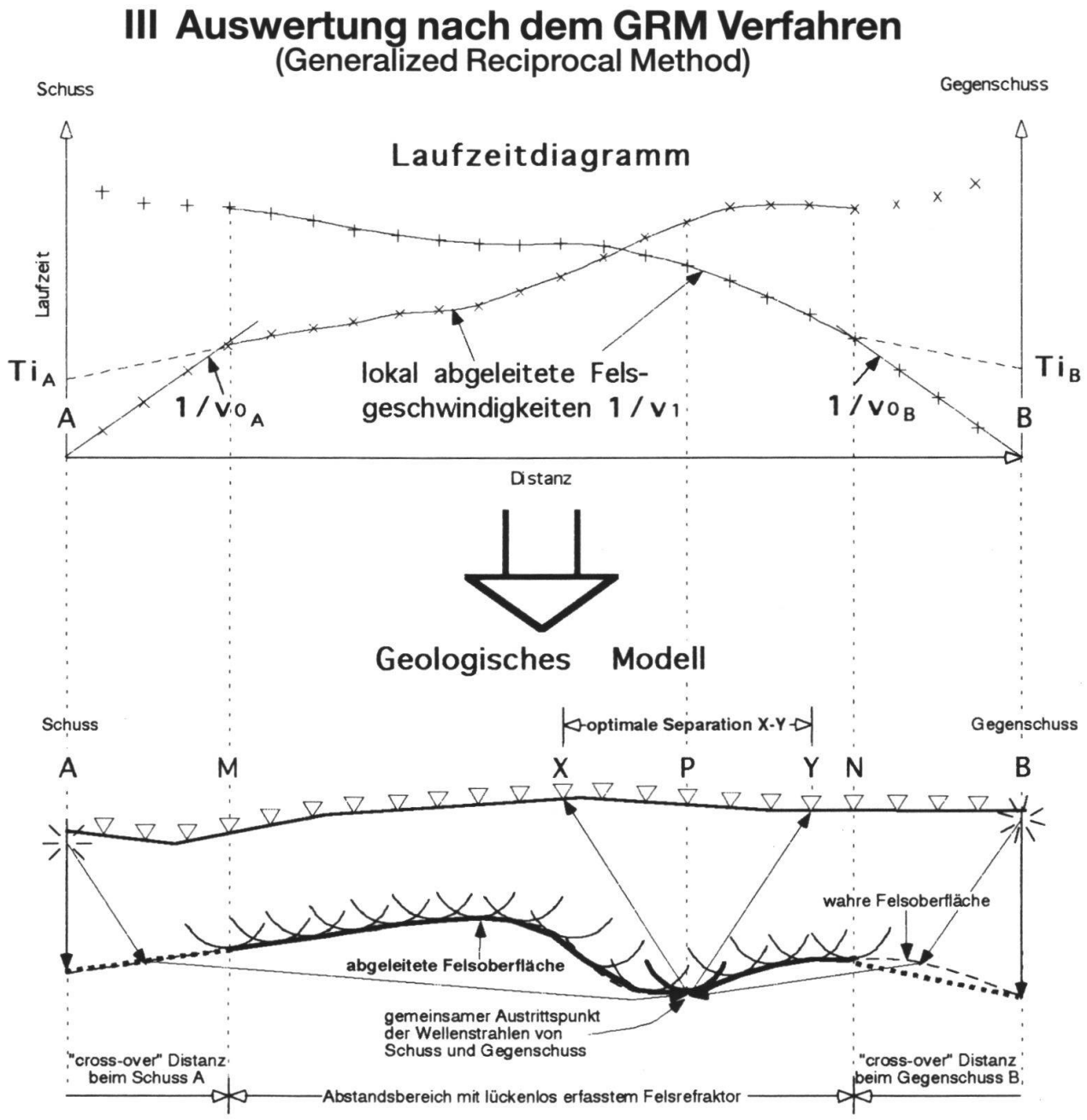

Fig. 6: Das Verfahren der Generalized Reciprocal Method (GRM) repräsentiert den aktuellen technischen Stand refraktionsseismischer Datenauswertung. Es lokalisiert den gemeinsamen Austrittspunkt der refraktierten Wellenstrahlen von Schuss und Gegenschuss auf der Refraktoroberfläche unterhalb jeder Geophonstation. Dies geschieht durch die Bestimmung der optimalen Separation X-Y der Austrittspunkte an der Erdoberfläche. Der tote Bereich beim Plus-Minus Verfahren (Fig. 5) wird dadurch eliminiert und das laterale Auflösungsvermögen durch eine verbesserte Ableitung der lokalen Refraktorgeschwindigkeiten v1 und durch genauere Time Depths Werte erhöht.
Die Bestimmung der optimalen Separation ist aufwendig, da sie z.T. iterativ erfolgt, und die Berechnungen für die optimale X-Y Separation je nach Komplexität der Geologie an jeder Geophonstation verschiedene Werte ergeben. Ohne Computerunterstützung ist die GRM nicht durchführbar.

4. Die Parameterwahl bei der Datenerfassung und das Problem "verborgener" Schichten.

Die modernen EDV-Auswertungsmöglichkeiten nach dem GRM Verfahren ermöglichen die rationelle Verarbeitung umfangreicher Datenmengen zum Vorteil einer verbesserten Detailgenauigkeit und einer grösseren Zuverlässigkeit. Die schon seit etlichen Jahren bestehenden apparativen Kapazitäten zur Gewinnung einer ausreichend hohen Datenredundanz bei der Akquisition im Feld kommen nun auch bei der Auswertung zum Tragen.

Das Augenmerk richtet sich angesichts der stattgefundenen Entwicklung deshalb vermehrt darauf, dass die Wahl der Akqusitionsparameter im Feld dem Untersuchungsziel und den geologischen Rahmenbedingungen optimal Rechnung trägt. Neben der Abkehr von aneinandergereihten Einzelprofilen, die getrennt ausgewertet werden, hin zum rationelleren kontinuierlichen Profilschiessen steht im Vordergrund in erster Linie die Datendichte, ausgedrückt durch die Abstände der Geophonstationen. Eine weitere Grösse sind die Anregungsabstände, d.h. die Dichte der Schusspunkte auf einem Messprofil.

Für eine Auswertung nach dem Verfahren der GRM sollten die Aufzeichnungsparameter die folgenden Anforderungen nicht unterschreiten:

1. *Der Geophonstationsabstand soll 1/5 des Betrages der Tiefe zum untiefsten zu kartierenden Refraktor nicht überschreiten.*
2. *Die Abstände zwischen den Anregungspositionen (Schusspunkte) sind in der Grössenordnung des Betrages der Tiefe zum untiefsten zu kartierenden Refraktor zu wählen.*
3. *Die Länge der aktiven Geophonauslage beträgt das 5-fache der maximalen Erkundungstiefe.*

Die hier angeführten Kriterien zur Parameterwahl sind kein Garant dafür, dass in besonders komplexen Situationen eindeutige Auswertungsergebnisse erzielbar wären. In Fällen, wo sog. *"verborgene" Schichten* vorkommen, kann auch mit allen Regeln der Kunst kein eindeutiges Lösungsmodell herbeigeführt werden. "Verborgene" Schichten sind Formationen, die entweder Geschwindigkeitsinversionen aufweisen, d.h. die seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in der Schicht sind geringer als die im Hangenden, oder deren Mächtigkeit ist so klein, dass deren Refraktionseinsätze nicht vor der Kopfwelle des darunter liegenden Refraktors in die Empfängerauslage eintreffen können.

Ein aus der Praxis stammendes Beispiel zeigt in den Fig. 7 bis 9 den typischen Fall einer "verborgenen" Schicht, die wegen ihrer geringen Mächtigkeit und wegen der etwas zu gross gewählten Geophonabstände refraktionsseismisch nicht unmittelbar in Erscheinung tritt. Die für ein Strassenbauprojekt durchgeführte Untersuchung soll die Tiefe der Felsoberfläche unter einer Moränenüberdeckung aufzeigen. In Fig. 7 ist einer von 20 Datensätzen, die entlang eines 600 m langen Profils aufgezeichnet wurden, dargestellt. Beim Schusspunkt befindet sich eine Sondierbohrung, an der die Seismik zur Eichung "eingehängt" werden kann. Der scharfe Knick im Laufzeitdiagramm, der den starken Schallhärtekontrast zwischen dem

langsamen Lockergestein (ca. 400 m/s) und dem schnellen Fels aus Malmkalken (4'800 m/s) markiert, lassen auf eine einfache Auswertung und ein eindeutiges Ergebnis schliessen - auf den ersten Blick....!

Eine während der Datenerfassung im Feld durchgeführte provisorische Auswertung der Ersteinsatzzeiten ergab für die Felsoberfläche eine Tiefe von 14 m (s. Fig. 8). In der gleichzeitig mit den Messungen abgeteuften Sondierbohrung wurde hingegen in dieser Tiefe ein stark wasserführender Schotter und der Fels erst bei 19 m angetroffen. Auf den ersten Blick überrascht die Diskrepanz von 5 m, d.h. ein Fehler von mehr als 35 % für die ermittelte Felstiefe!

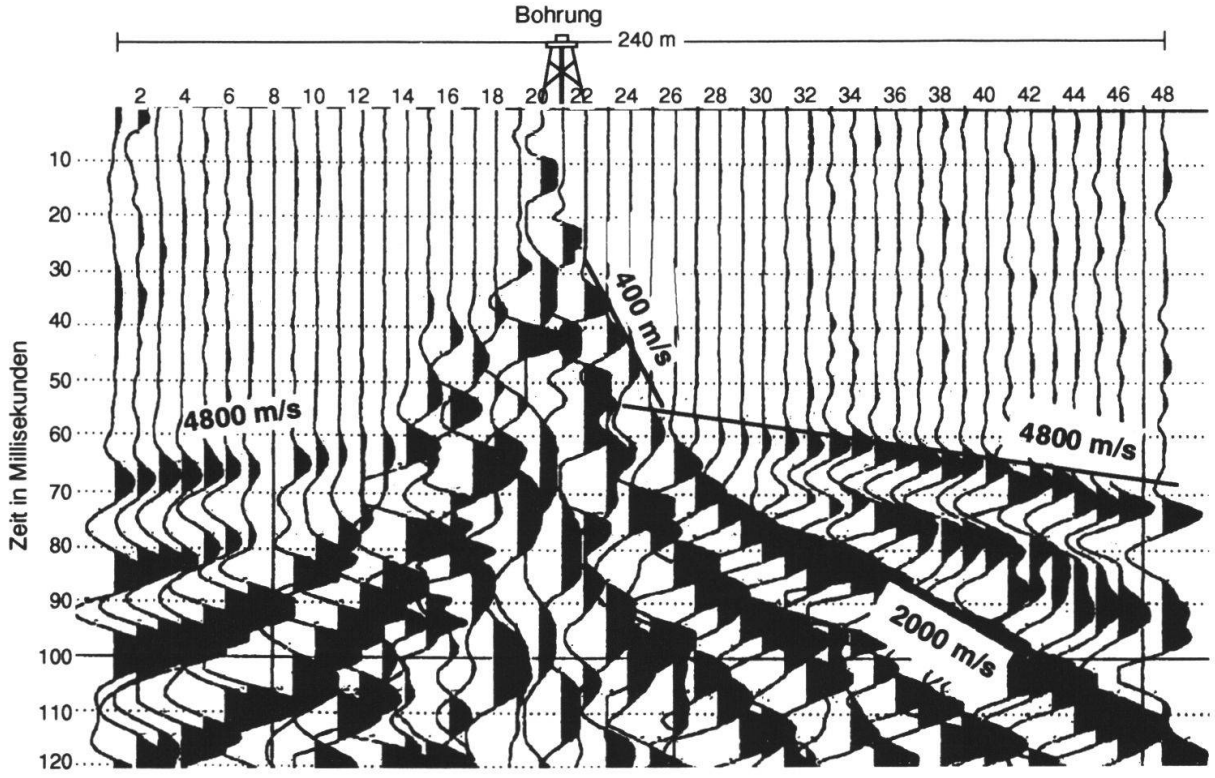

Fig. 7: Datensatz mit gut bestimmbaren Ersteinsätzen und markantem Knick zwischen den Laufzeitkurven für das Quartär (400 m/s) und den Fels (4800 m/s).

Die Ursache für die grosse Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass das Diagramm der Ersteinsätze allein keinen Hinweis auf die Existenz des 5 m mächtigen, wasserführenden Schotters, der eine Geschwindigkeit von mindestens 1500 m/s aufweisen muss, gibt. Eine Analyse der Signale, die nach den Ersteinsätzen eintreffen, zeigt einen verspäteten Refraktionseinsatz von ca. 2'000 m/s (s. Fig. 7). Es handelt sich hier um den klassischen Fall einer "verborgenen Schicht". Wegen der geringen Mächtigkeit des Schotters ist dessen *cross over* - Entfernung der refraktierten Signale (s. Fig. 1) gleich oder grösser als für den schnellen darunterliegenden Fels. Die refraktierte Welle der Zwischenschicht erreicht deshalb die Geophonauslage immer später als die der Felsoberfläche, d.h. nie als als Ersteinsatz (s. Fig. 9).

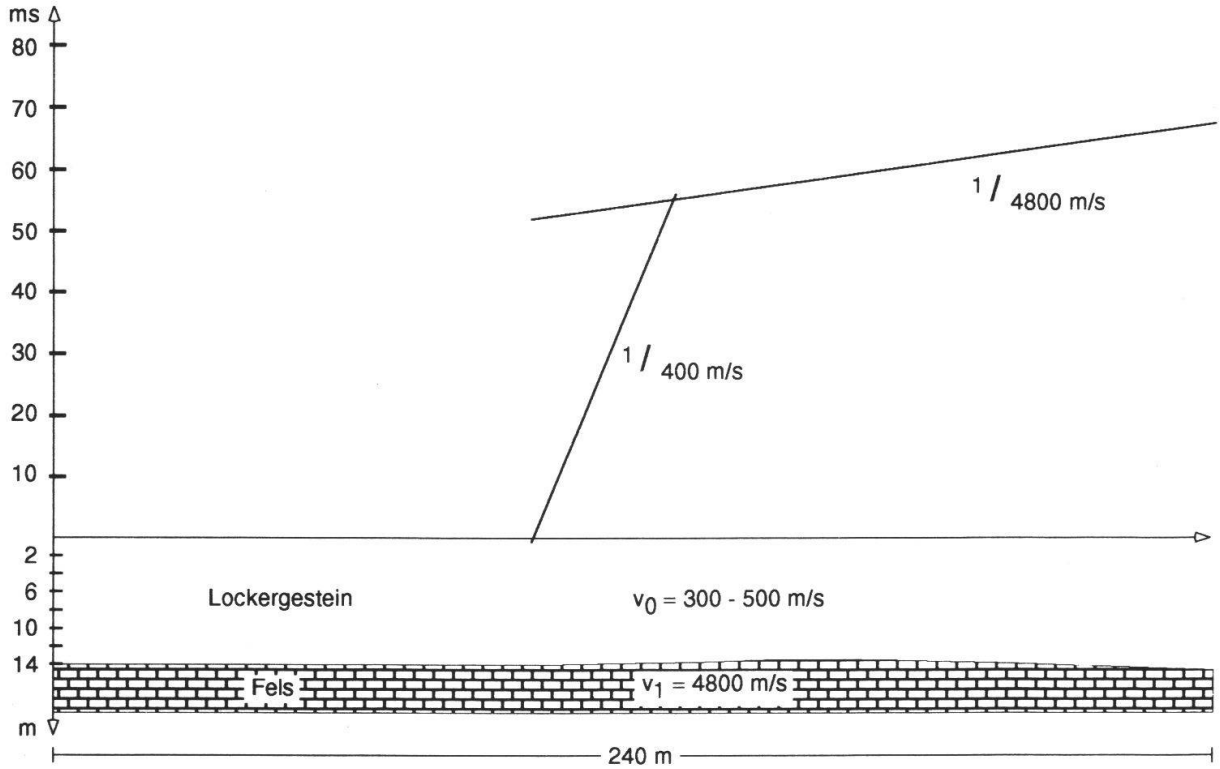

Fig. 8: Das Ergebnis der geologischen Interpretation, die sich lediglich auf die Auswertung der Ersteinsatzzeiten beschränkt, zeigt einen einfachen 2-Schichtenfall mit subhorizontaler Felsoberfläche.

Anhand der Angaben aus der Bohrung und den seismisch abgeleiteten Geschwindigkeiten ergibt sich folgendes Tiefenmodell:

300-500 m/s	0 m	bis	14 m	trockene, verwittere Moräne
2'000 m/s	14 m	bis	19 m	wasserführender Schotter
4'800 m/s	unterhalb 19 m			Malmkalke

Aufgrund dieser Werte betragen die *cross over* -Entfernungen für die wasserführende Schicht 36 m und für den Fels 42 m (s. Fig. 9). Beim verwendeten Geophonabstand von 5 m bedeutet dies, dass nur gerade die Geophonstation im Abstand von 40 m den Refraktionseinsatz vom wasserführenden Schotter als Ersteinsatz wahrnehmen kann. In der Praxis jedoch liegen die beiden Kopfwelleneinsätze bei 36 m und bei 42 m zeitlich und räumlich so nahe beieinander, dass im Laufzeitdiagramm kein getrenntes Segment für die Zwischenschicht erkennbar ist.

Im vorliegenden Fall ist der 5 m mächtige wasserführende Schotter aufgrund der Ersteinsatzzeiten allein nicht wahrnehmbar, d.h. eine mittlere Geschwindigkeit für das gesamte Lockergestein und somit eine zuverlässige Felstiefe lassen sich nicht ermitteln. Möglicherweise hätten kleinere Geophonabstände von 2.5 m, wie sie die oben angeführten Richtlinien vorschreiben, die Ersteinsätze des Schotters für eine Identifkation im Laufzeitdiagramm auf den Stationen zwischen 36 m und 42 m noch abbilden können.

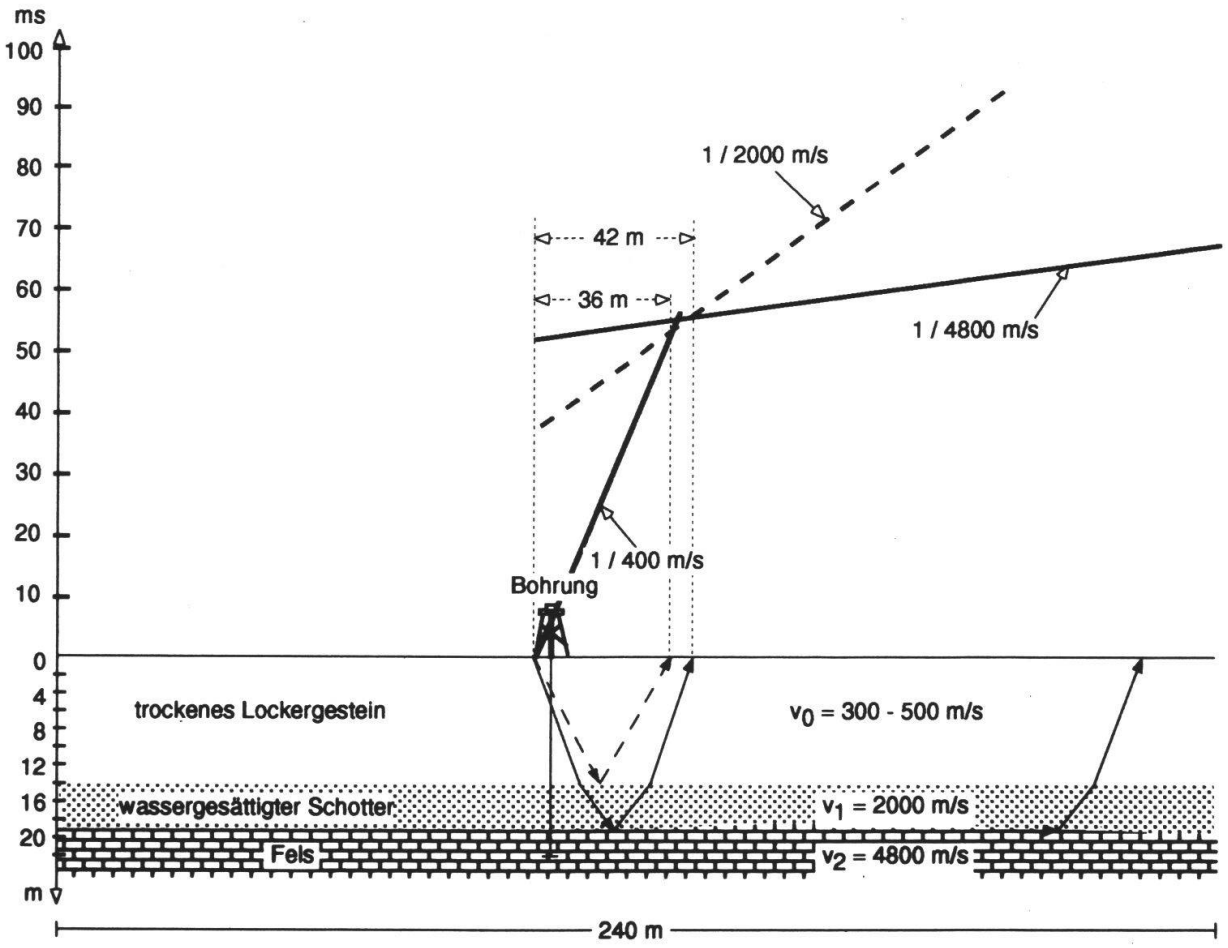

Fig. 9: Das Ergebnis einer weiterführenden Auswertung, die auch Refraktionseinsätze untersucht, die später als die Ersteinsätze in die Geophonauslage eintreffen. Die Darstellung refraktierter Signale, die auf "verborgene" Schichten hinweisen, bedingt allerdings eine gute Datenqualität sowie eine moderne Registrierapparatur und geeignete Ausspielungsmöglichkeiten.

Die Fallstudie zeigt, dass die Daten nicht nur bezüglich der Ersteinsätze analysiert, sondern auch auf später eintreffende Refraktionseinsätze zu untersuchen sind. Sie unterstreicht zudem, dass auch unter vermeintlich geologisch einfachen Verhältnissen der Geophonabstand nicht zu gross gewählt werden darf.

5. Praktisches Beispiel zur Anwendung des zeitgemässen GRM Verfahrens

Im Rahmen von Abklärungen für einen geplanten Deponiestandort wurden in interdisziplinärer Zusammenarbeit umfangreiche Untersuchungen hydrogeologischer, bohrloch- und oberflächengeophysikalischer Art durchgeführt. Das Ziel seismischer Erkundungen war es, die Molasseoberfläche unter einer komplex strukturierten Moränenüberdeckung zu kartieren. Erschwerend für die Erhebungen war die durch Verwitterung ausserordentlich stark aufgelockerte Molasseoberfläche, die über weite Strecken einen ungenügend scharfen Schallhärtekontrast zum Quartär abgibt. Trotzdem konnte mit Hilfe von Kalibrationsbohrungen und Refraktionsseismik eine flächendeckende Kartierung der Felsoberfläche erreicht werden. In Fig. 10 sind die Ergebnisse eines refraktionsseismischen Profils, das nach dem GRM Verfahren akquiriert und ausgewertet wurde, dargestellt.

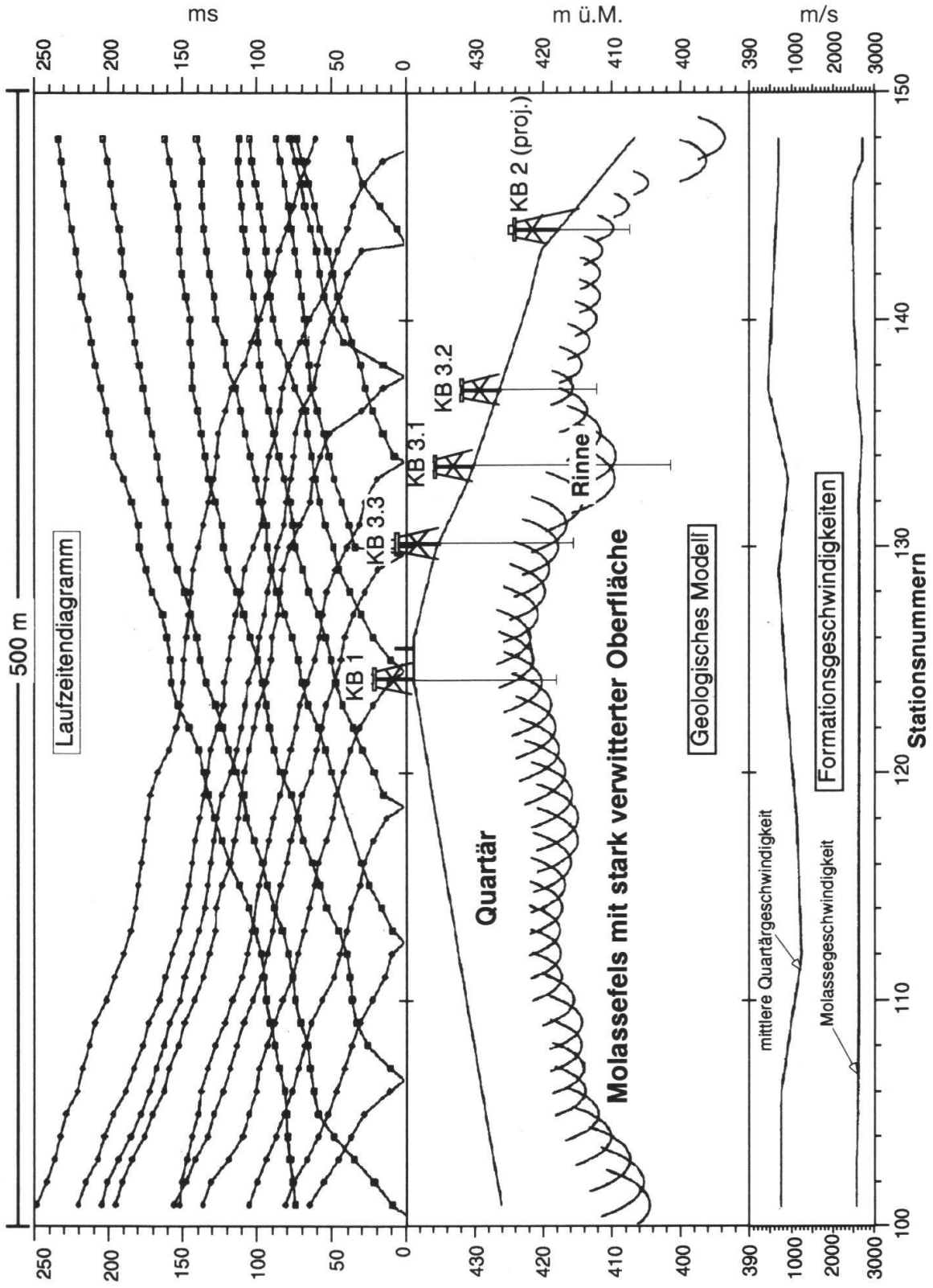

Fig. 10: Messbeispiel eines refraktionsseismischen Profils nach dem zeitgemässen Auswertungsverfahren der *Generalized Reciprocal Method (GRM)*, das eine Tiefenbestimmung unter jeder Geophonstation ermöglicht.
Die Auswertung weist zwischen den Stationen 131 und 137 auf die Existenz einer ca. 10 m tiefen, in die Felsoberfläche eingebetteten Rinne hin. Wegen ihrer bedeutsamen Funktion als potentieller Entwässerungskanal zur Sammlung von Deponiesickerwässer wurden zur Verifikation in der Folge gezielt die Bohrungen KB 3.1, KB 3.2 und KB 3.3 angesetzt. Die Bohrergebnisse bestätigen sowohl die refraktionsseismisch ermittelte Ausdehnung wie auch die Tiefe der Rinne.

6. Schlussfolgerung

Der Stellenwert refraktionsseismischer Erkundung hat mit der Entwicklung der computerunterstützten Auswertung nach dem GRM Verfahren an Bedeutung gewonnen. Die neue Methode ist gegenüber dem herkömmlichen Interzept-Zeit Verfahren in der Lage, auch nicht planare Formationsgrenzen zu kartieren. Es sei darauf hingewiesen, dass auch bei guter Datenqualität und vermeintlich einfach auszuwertenden Laufzeitdiagrammen jede geologische Interpretation mit subjektiven Entscheiden behaftet ist. Mehrdeutigkeiten, die auf mehrere plausible Lösungsmodelle schliessen lassen, können über eine Eichung der refraktionsseismischen Daten mit den Befunden aus einer Schlüsselbohrung aus dem Weg geräumt werden.

Literaturverzeichnis

FREI, W. (1993): Ingenieurseismik sinnvoll eingesetzt - Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing., Vol. 60, Nr. 136, Juli 1993, S. 19-30

LANKSTON, R. W. (1989): The refraction seismic method: A viable tool for mapping shallow targets into the 1990s - Geophysics, Vol. 54, No. 12, December 1989, p. 1535-1542

PALMER, D. (1980): Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation - Society of Exploration Geophysicists SEG, Tulsa, OK 74170-2740, USA; ISBN 0-931830-14-1