

Zur Detailgenauigkeit reflexionsseismischer Messresultate bei ingenieurgeologischen Anwendungen

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

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **59 (1992)**

Heft 134

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-216061>

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 Ausdrücke 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.

Zur Detailgenauigkeit reflexionsseismischer Messresultate bei ingenieurgeologischen Anwendungen

mit 6 Bildern

WALTER FREI*

Zusammenfassung

Hochauflösende Reflexionsseismik eignet sich für den Einsatz bei ingenieurgeologischen Abklärungen. Die Datenerfassungsparameter sind sorgfältig zu planen. Besondere Aufmerksamkeit kommt der Wahl der Abstände der Anregungs- und Empfängerpunkte zu. Diese beiden Grössen entscheiden über den Messerfolg.

Résumé

La sismique-réflexion à haute résolution est devenue en quelques années un outil très performant pour la géologie de l'ingénieur. Pour la bonne réussite d'une campagne de mesures, une attention particulière doit être prêtée aux paramètres d'acquisition des données et tout spécialement à la densité des points d'émission et d'enregistrement qui doit être suffisamment élevée.

Abstract

High resolution reflection profiling has evolved a powerful tool for engineering applications during the past few years. Special attention has to be paid to the choice of the acquisition parameters. Unless the seismic wave field is not sampled densely enough in the spatial direction the outcome of a survey is questionable.

Einführung

Die Reflexionsseismik wird für geologische Abklärungen im oberflächennahen Bereich noch immer spärlich eingesetzt. Das Verfahren wurde in der Erdölindustrie entwickelt und das Know-how fliesst von dort nur tropfenweise in ingenieurgeologische Kreise. Man behilft sich hier vorwiegend mit den übrigen Disziplinen der Geophysik, wie der Refraktionsseismik, den elektromagnetischen Methoden, Gravimetrie und der Geoelektrik.

Ein Grund für die fehlende Akzeptanz der Reflexionsseismik als unbestritten leistungsfähigstes Prospektionsverfahren ist, neben den höheren Kosten, das vermeintlich im obersten Tiefenbereich herabgesetzte Auflösungsvermögen, z.B. gegenüber der Refraktionsseismik. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass bei einer richtigen Wahl der Datenerfassungsparameter die Reflexionsseismik punkto Detailgenauigkeit eine überlegene Stellung einnimmt. Nur das elektromagnetische Reflexionsverfahren des Georadars erreicht für den Tiefenbereich der obersten 5 m eine gleichwertige Aussagekraft. Georadar ist jedoch gegenüber akustischen Messverfahren weniger universell einsetzbar.

* GeoExpert ag, Geophysikalische Untersuchungen, Bahnhofstrasse 35, 8603 Schwerzenbach

Bekannt sind akustische Durchschallungsverfahren aus der Medizin, wo z.B. bei Schwangerschaftsuntersuchungen Abbildungen mit einer sehr hohen Detailgenauigkeit möglich sind. Bestimmend für das Auflösungsvermögen von Messungen mit Wellenfeldern als Informationsträger ist die Breite des abgestrahlten und empfangenen Frequenzspektrums.

Hohe Frequenzen werden in einem seismischen Signal mit zunehmender Eindringtiefe stärker vom Gestein absorbiert als die langwelligen Anteile. Je nach Gesteinsart liegt die Obergrenze des seismisch verwendbaren Frequenzbereichs für Erkundungen bis in ca. 10 m Tiefe zwischen 600 Hz und 2000 Hz. Trockenes unkonsolidiertes Lockermaterial absorbiert hochfrequente Schallenergie stärker als z.B. ungestörtes Granitgestein.

Die Detailgenauigkeit in Abhängigkeit der im seismischen Signal enthaltenen Wellenlängen

Modellstudien und praktische Versuche zeigen, dass zwei untereinander liegende Schichtgrenzen seismisch noch getrennt erfasst werden, wenn deren *Abstand mindestens einen Viertel der im Seismogramm dominierenden Wellenlänge λ_{dom}* beträgt.

Bilder 1 a-c illustrieren das vertikale Auflösungsvermögen anhand einer auskeilenden Schicht zwischen zwei Formationen. Die Mächtigkeit des Keils ist als Bruchteil der dominierenden Wellenlänge λ_{dom} angegeben. In **Bild 1 b** liegt die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_2 im Keil zwischen den Geschwindigkeiten v_1 und v_3 . Es ist zu erkennen, dass die Signalform deutlich zwei getrennte Einsätze aufweist, sobald die Dicke des Keils grösser als $\frac{1}{4} \lambda_{dom}$ ist.

In **Bild 1 c** ist der Keil v_2 in eine Formation eingebettet ($v_1 = v_3$). Auch hier sind bei einer Keilmächtigkeit ab $\frac{1}{4} \lambda_{dom}$ zwei getrennte Reflexionseinsätze zu erkennen. Es ist zu bemerken, dass der Keil auch bei kleinerer Dicke immer noch eine starke Reflexion erzeugt. Bei guter Datenqualität ist eine Schicht mit kleinen Mächtigkeiten von $\frac{1}{20} \lambda_{dom}$ bis $\frac{1}{30} \lambda_{dom}$ noch kartierbar. Ihre Dicke ist aus der Signalform jedoch nicht mehr ableitbar.

Bild 1 d zeigt die seismische Abbildung eines geologischen Horizonts, der von 5 Brüchen mit Verschiebungsbeträgen entsprechend $\frac{1}{16} \lambda_{dom}$, $\frac{1}{8} \lambda_{dom}$, $\frac{1}{4} \lambda_{dom}$, $\frac{1}{2} \lambda_{dom}$ und λ_{dom} unterbrochen ist. Der kleinste seismisch noch sichtbare Bruch ist derjenige mit einem Verschiebungsbetrag von $\frac{1}{4} \lambda_{dom}$.

Praktisches Beispiel zur Berechnung der Detailgenauigkeit anhand seismischer Daten aus einer quartären Talfüllung:

- dominierende Frequenz f : 50 Hz
- seismische Ausbreitungsgeschwindigkeit v : 2000 m/s
- $\lambda_{dom} = v/f = 2000 / 50$ [m s / s] : 40 m
- $\frac{1}{4} \lambda_{dom}$ (**Detailgenauigkeit**) = **40/10 m** : **10 m**

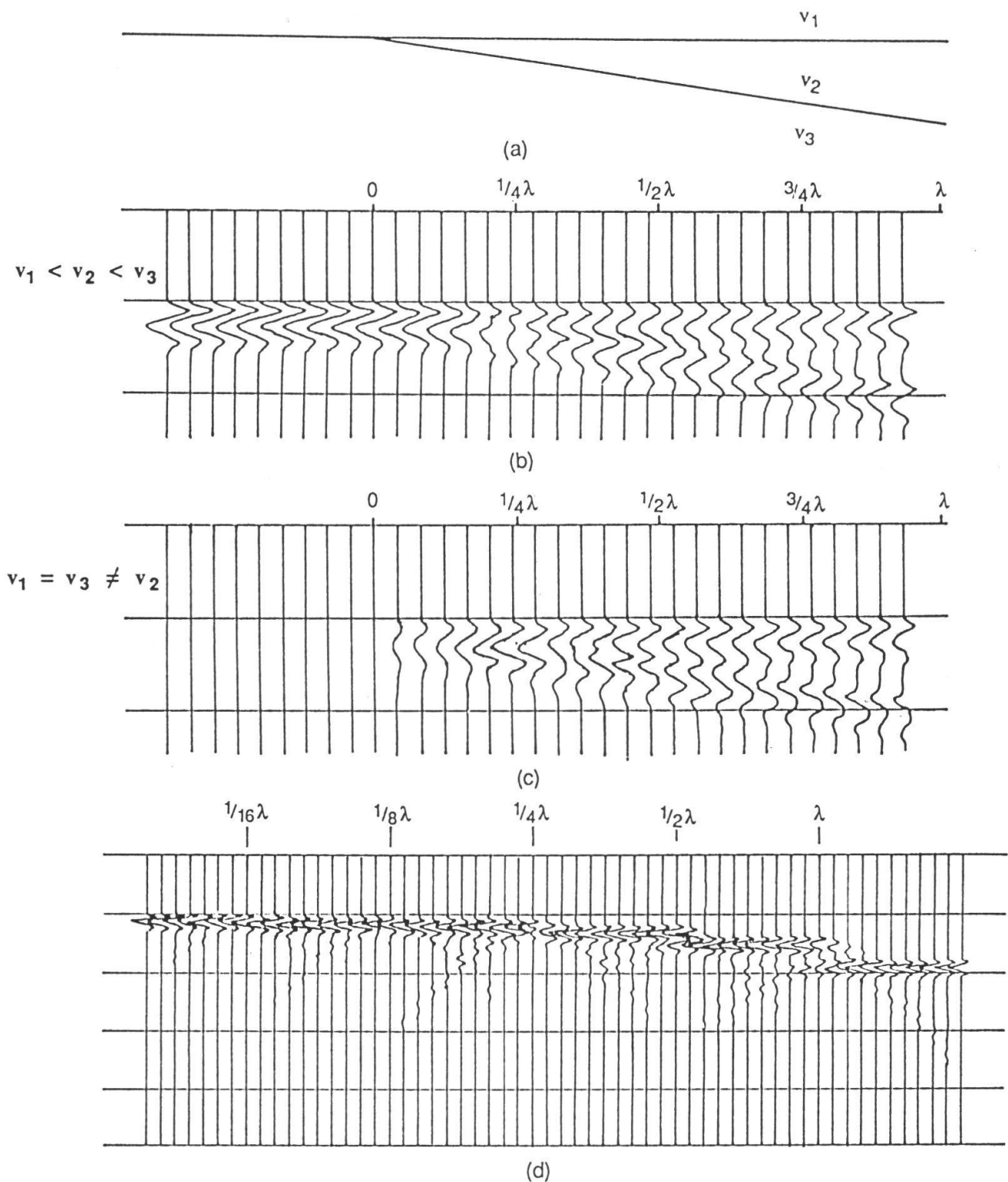


Bild 1 Seismisches Auflösungsvermögen am Beispiel eines Modells einer auskeilenden Schicht (a - c) und eines von fünf Verwerfungen unterbrochenen Reflektors (d).

In der Regel sind seismische Daten von Störsignalen überlagert, die oft so stark sind, dass sie Nutzeinsätze auf den Einzelseismogrammen unsichtbar machen. Aus diesem Grunde ist die Reflexionsseismik auf eine genügend hohe Datenredundanz angewiesen, d.h. ein Reflektor muss mit möglichst vielen Einzelseismogrammen erfasst werden. Es ist dann die Kunst der EDV-Auswertung, die von Störungen überlagerten, meistens von Auge nicht erkennbaren Nutzeinsätze auf den Einzelseismogrammen heraus-

zufiltern und sie anhand eines gestapelten seismischen Tiefenprofils für den Geologen interpretierbar zu machen.

Daraus folgt, dass nicht nur die Qualität des Quellensignals bezüglich Frequenzinhalt (möglichst kleine λ_{dom}) sondern auch die Datendichte massgeblich über die Detailgenauigkeit und somit über den Messerfolg entscheiden. In der Folge werden die Parameter diskutiert, welche bei der Datenerfassung für die Datendichte eine wichtige Rolle spielen. Anhand eines praktischen Beispiels wird gezeigt, dass die Datendichte das Auflösungsvermögen nicht nur in lateraler Richtung, sondern auch in vertikaler Richtung beeinflusst.

Welche Grössen bestimmen die Datendichte ?

Die beiden Grössen, mit welche die Datendichte definieren, sind

- a) der Überdeckungsgrad als energetische Dimension der Datendichte,
- b) der Abstand der gemeinsamen Untergrundpunkte (*Common Depth Point /CDP - distance*) als räumliche Dimension der Datendichte.

Der **Überdeckungsgrad** (*coverage oder multiplicity*) gibt an, wie oft ein Punkt auf einem Reflektor beim kontinuierlichen Profilschiessen (*roll-along* Aufnahmetechnik) mit verschiedenen Sender-Empfänger-Konfigurationen aufgezeichnet worden ist. Er ist abhängig vom Verhältnis der Abstände der Empfänger- und Anregungspunkte und von der Anzahl Kanäle, mit denen jede Anregung aufgezeichnet wird.

Es gilt folgende Formel:

$$\text{Überdeckungsgrad} = \frac{\text{Anzahl Kanäle} \times \text{Empfängerabstand}}{2 \times \text{Schussabstand}}$$

(wobei Schussabstand = $n \times$ Empfängerabstand; $n = 1,2,3\dots$)

Beispiel: Es wird mit einer Auslage von 48 Kanälen registriert
Schussabstand = 10 m, Empfängerabstand = 10 m

$$\begin{aligned} \text{Überdeckungsgrad} &= 48 \times 10 / 2 / 10 \\ &= \underline{24} \end{aligned}$$

Der Überdeckungsgrad ist die **energetische Redundanz der Datendichte**. Er bestimmt das Nutz-/Störsignalverhältnis und somit die Datenqualität der gestapelten Sektion, hat aber keinen direkten Einfluss auf das Auflösungsvermögen.

Der **Abstand der gemeinsamen Untergrundpunkte** (*CDP-distance*) ist die räumliche Abtastrate des Wellenfeldes, das durch die Empfängerauslage an der Erdoberfläche aufgezeichnet wird. Er beträgt die Hälfte des Abstandes zwischen den Empfängerstationen (s. **Bild 2**).

Eine gestapelte seismische Sektion ist eine Anordnung von Informationspunkten auf einer Ebene, die durch die Laufzeitachse als Tiefenkoordinate und durch die horizontale x-Achse entlang des Messprofils definiert ist. Zusammen mit der zeitlichen Abta-

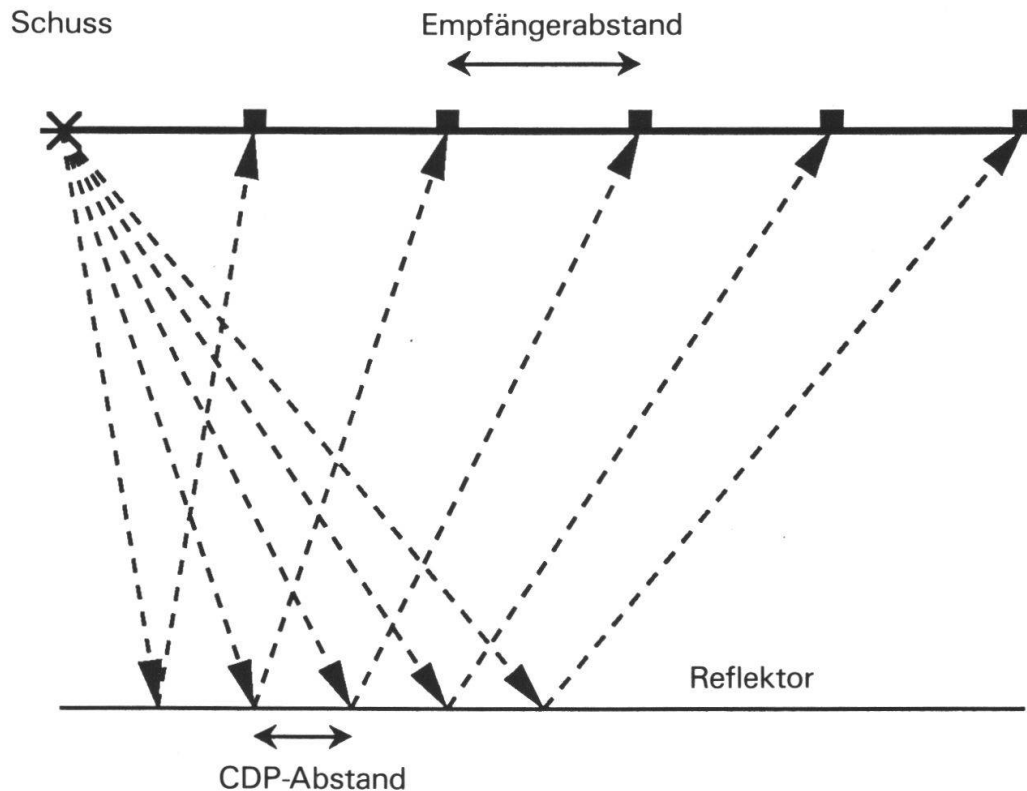


Bild 2 Beziehung zwischen dem Empfängerabstand und dem CDP-Abstand

strate bestimmt somit der CDP-Abstand die Datendichte im engeren Sinne **einer räumlichen Redundanz**, analog des Auflösungsvermögens eines Bildschirms, das bekanntlich durch die Anzahl Pixels in vertikaler und horizontaler Richtung angegeben wird.

Praktisches Beispiel

Zur Illustration des Einflusses, den der CDP-Abstand auf die Detailgenauigkeit hat, wurden in einer Kiesgrube bei Hüntwangen ZH praktische Versuche durchgeführt. Sie sollen gleichzeitig die Möglichkeiten hochauflösender Reflexionsseismik aufzeigen. Von der Geologie waren die Tiefen des Grundwasserspiegels bei ca. 2 m und der Molasseoberfläche zwischen 20 m und 30 m bekannt. In den Wänden der Grube sind zahlreiche stark verkittete Zementationszonen von lateralen Ausdehnungen bis zu 10 m zu beobachten.

Bild 3 zeigt das seismische Profil, das mit den folgenden Parametern aufgenommen wurde:

Profillänge	24 m
Auslage / Anzahl Kanäle	split-spread / 48
Empfängerabstände	25 cm
Anregungsabstand	25 cm
Quelle	5 kg Hammer
Anzahl Schläge / Station	6
Geophontyp	50 Hz
Abtastrate	0.1 ms
Horchzeit	50 ms

Auf dem Profil ist der Grundwasserspiegel deutlich in ca. 1.8 m Tiefe (ca. 6.5 ms Laufzeit) erkennbar. Zwischen 12 m und 18 m Profillänge befindet sich in ca. 3 m Tiefe eine linsenförmige Zementationszone, die deutlich höhere Ausbreitungsgeschwindigkeiten als das umgebende Lockergestein aufweist. In ca 22 m Tiefe (ca. 28 ms Laufzeit) ist als starker Reflektor die Molasse sichtbar.

Die Geschwindigkeitsanomalie der Zementationszone wird durch ein leichtes Anheben, einen sog. *pull-up*, des darunter liegenden Abschnitts des Molassereflektors bestätigt (markiert durch zwei Kreise in **Bild 3**). Wegen der erhöhten Ausbreitungsgeschwindigkeit durch die Zementationslinse ist die Echozeit zur darunter liegenden Molasse etwas kürzer als neben der Linse.

Der Reflektor in der Molasse in ca. 44 m Tiefe ist geologisch nicht identifiziert.

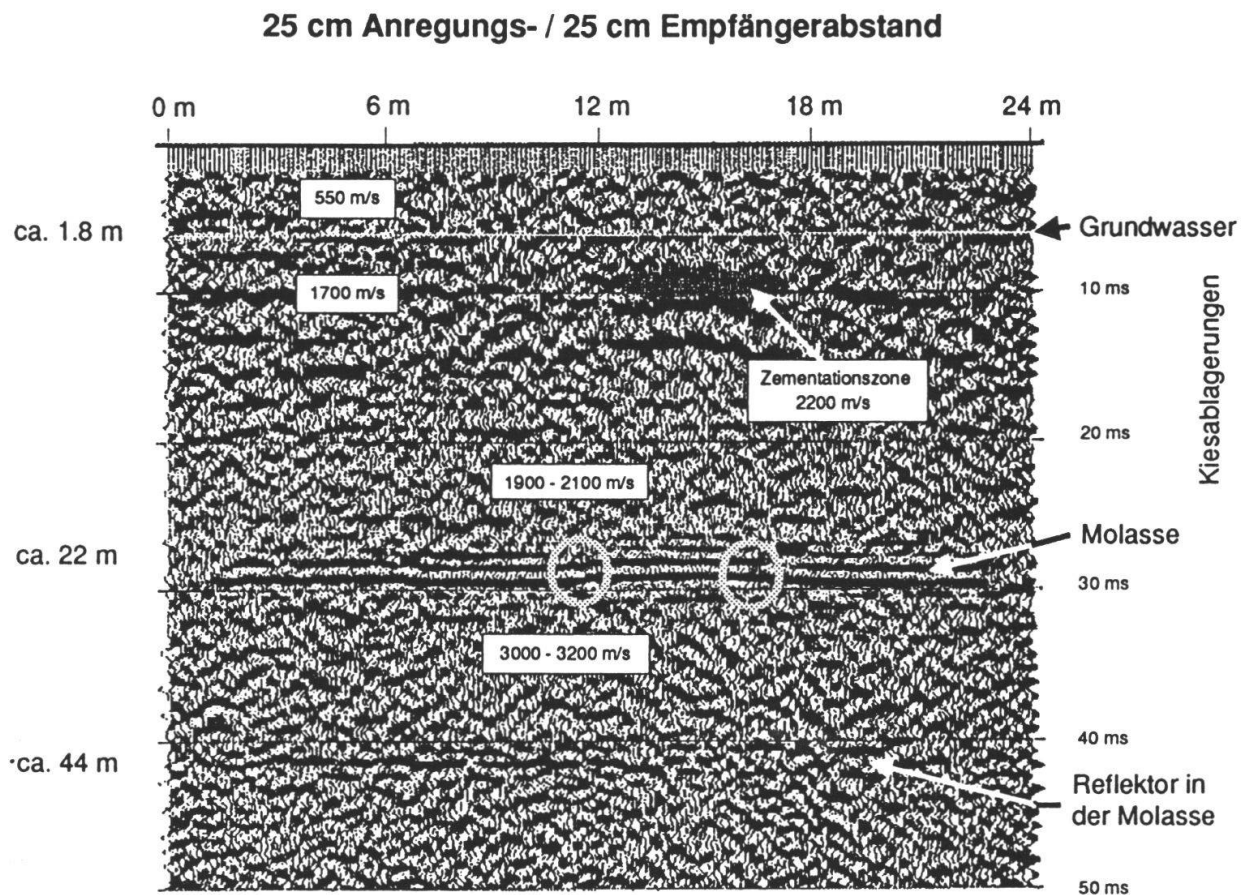


Bild 3 Hochauflösende Reflexionsseismik mit 25 cm Anregungs- und Empfängerabständen

Eine Ausdünnung der Datendichte über eine Verdoppelung der Anregungs- und Empfängerabstände auf 50 cm bewirkt eine drastische Verminderung der Detailgenauigkeit, wie **Bild 4** zeigt. Nur noch die Molasseoberfläche ist scharf erkennbar. Die EDV-Auswertung ist für beide Profile identisch. Der Vergleich zeigt, dass eine Erhöhung der Anregungs- und Empfängerabstände nicht nur das laterale, sondern auch das vertikale Auflösungsvermögen stark beeinträchtigt.

50 cm Anregungs - / 50 cm Empfängerabstand

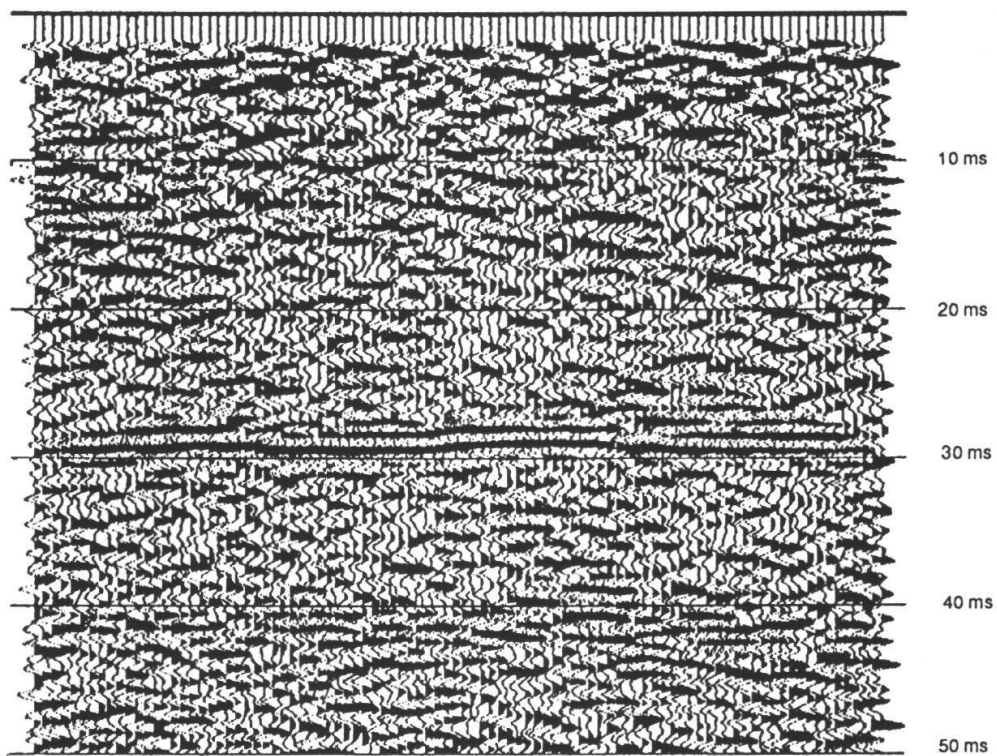


Bild 4 Gleiches Profil wie in Bild 3 mit doppelt so grossen Anregungs- und Empfängerabständen

50 cm Anregungs - / 25 cm Empfängerabstand

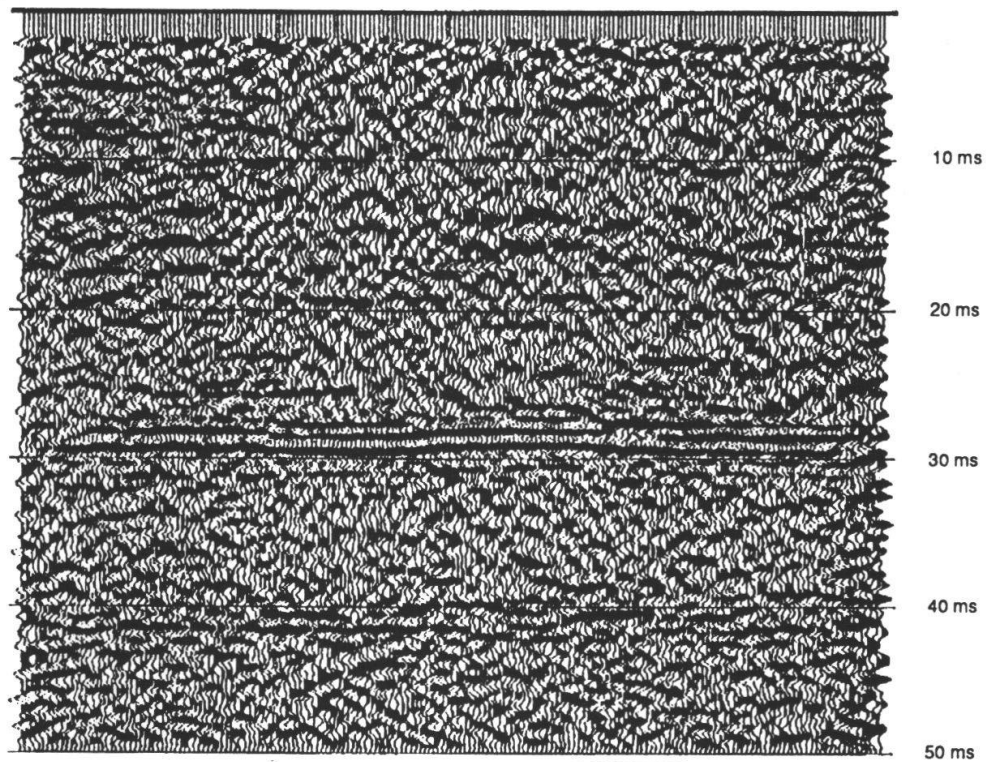


Bild 5 Gleiches Profil wie in Bild 3 mit Anregungsabständen von 50 cm. Der Grundwasserspiegel und die Zementationszone sind noch andeutungsweise erkennbar.

25 cm Anregungs - / 50 cm Empfängerabstand

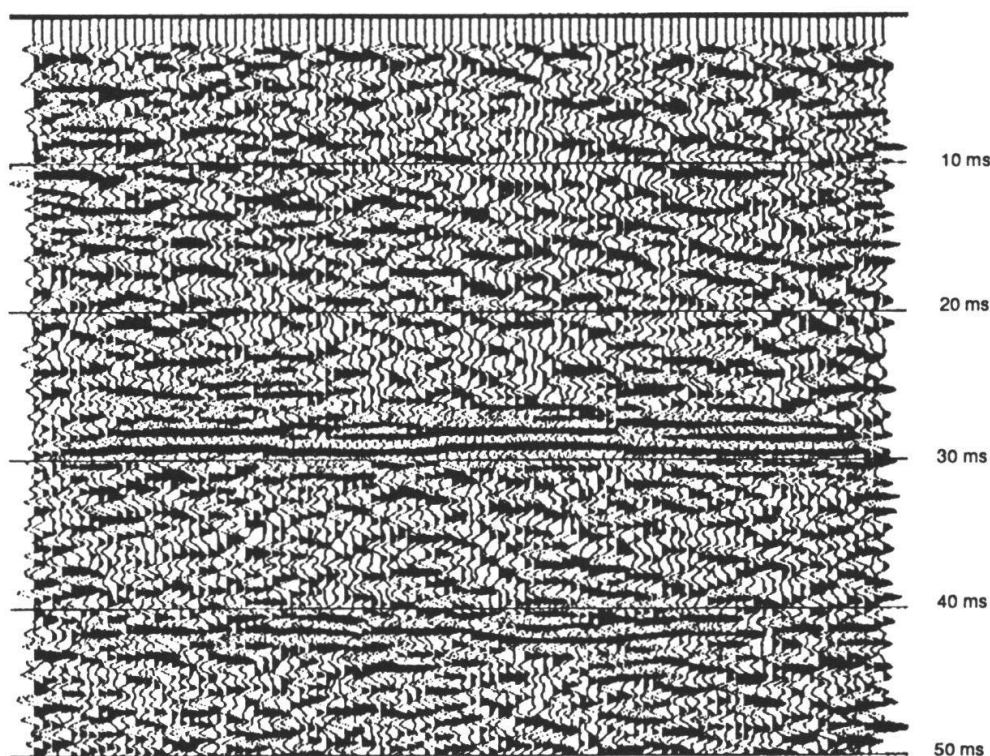


Bild 6 Gleiches Profil wie in Bild 3 mit Empfängerabständen von 50 cm. Nur noch die Molasseoberfläche und der Reflektor in der Molasse sind vorhanden.

Die **Bilder 5** und **6** zeigen das Profil einmal nur mit den Anregungsabständen auf 50 cm verdoppelt (Bild 5) und einmal mit auf 50 cm vergrösserten Empfängerabständen (Bild 6). Ein Vergleich der beiden Profile zeigt sichtlich aufschlussreichere Daten für die kurzen Empfängerabstände in Bild 5.

Als praktische Folge ergibt sich daraus die Tatsache, dass Sparmassnahmen im Feld zuerst über eine Erhöhung der Anregungsabstände zu suchen sind. Dies ist erfreulich, lässt sich doch der Messfortschritt eher über grössere Anregungsabstände als über grössere Geophonabstände beschleunigen.

Die Feldarbeiten für das oben erwähnte Profil dauerten inklusive Auf- und Abbau des Messdispositivs knapp vier Stunden. Der personelle und materielle Aufwand betrug 4 Mann und eine Messausrüstung im Wert von Fr. 230'000.—. Die EDV-Auswertung nahm zwei Tage in Anspruch und wurde auf einem Spezialrechner im Wert von Fr. 95'000.— vorgenommen.

Schlussfolgerungen und Anregungen

Hochauflösende Reflexionseismik ist mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln zu Preisen durchführbar, die auch für ingenieurgeologische Untersuchungen erschwinglich sind. Die erzielbare Detailgenauigkeit liegt, wie im angeführten Beispiel gezeigt, im Dezimeterbereich.

Bei der Wahl des Abstandes der Empfängerstationen ist der zu erkundende Tiefenbereich die massgebende Grösse. Es ist darauf zu achten, dass die Geophonstationen so dicht ausgelegt werden, dass das Wellenfeld mit einer genügend hohen räumlichen Abtastrate aufgezeichnet wird.

Ohne Anspruch auf strenge Wissenschaftlichkeit lässt sich für den Praktiker folgende **Faustregel** aufstellen:

- *Der Abstand der Empfängerstationen muss 10 — 15 Mal kleiner sein als die Obergrenze des zu erkundenden Tiefenbereichs.*

Abweichungen von der Faustregel sind zulässig in Gebieten, wo aufgrund früherer Erfahrungen gute Resultate mit geringerem Aufwand zu erwarten sind. Bei grösseren Messvorhaben empfiehlt es sich, eine Versuchsmessung von 1-2 Tage Dauer über einen repräsentativen Messabschnitt durchzuführen. Neben der Bestimmung der Aufnahmeparameter gewinnt man damit zugleich eine Vorstellung über die Erfolgsaussichten im vorliegenden Messgebiet und kann bei Chancenlosigkeit das Programm mit minimalen Kosten noch abbrechen.

Kleine *CDP*-Abstände bringen bei der EDV gewichtige Vorteile. Die Programme für die zwei-dimensionale Filterung (f - k und τ - p) und zur Ermittlung der reststatischen Korrekturen sowie Migrationsalgorithmen sind für gute Ergebnisse auf eine möglichst hohe räumliche Datenredundanz angewiesen.

Der praktische Versuch oben zeigt, dass in unbekanntem Untersuchungsgebieten die Gefahr besteht, Daten mit vermindertem Aussagegehalt aufzuzeichnen, wenn über eine Vergrösserung der Empfänger- und Anregungsabstände der Messfortschritt beschleunigt werden soll. Derartige Sparmassnahmen können das bewirken, was sie verhindern sollen, nämlich dass viel Geld für wenig Nutzen ausgegeben wird.

Schriftenverzeichnis

- FREI W.; 1991; *Reflexionsseismik; Ein Leitfaden über ihre Möglichkeiten und Anwendungen in der Praxis*; zu beziehen bei GeoExpert ag, Bahnhofstrasse 35, CH-8603 Schwerzenbach
- McQUILLIN R.M. et al; 1984; *An Introduction to Seismic Interpretation*; Graham & Trotman, London; ISBN 0 86010 496 6
- MEEKES J.A.C. et al; 1990; *Optimization of high-resolution seismic reflection parameters for hydrogeological investigations in the Netherlands*; First Break (EAEG), Vol. 8, No. 7 July 1990
- PRITCHETT W.C.; 1990; *Acquiring Better Seismic Data*; Chapman and Hall Ltd., London; ISBN 0 412 35000 9
- STEEPLES D.W. and MILLER R.D.; 1990; *Seismic Reflection Methods Applied to Engineering, Environmental, and Ground Water Problems*; Geotechnical and Environmental Geophysics, Volume 1, SEG Tulsa OK; ISBN 1 56080 000 3