

**Zeitschrift:** Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

**Herausgeber:** Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftlern;  
Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

**Band:** 19 (2014)

**Heft:** 1

**Artikel:** Seismik damals und heute

**Autor:** Frei, Walter

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-583911>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 22.01.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Seismik damals und heute

Walter Frei<sup>1</sup>

Vortrag gehalten am Gedenk-Kolloquium für Peter Lehner, 23. Januar 2014, Universität Bern

## 1 Die technischen Fortschritte auf dem Gebiet seismischer Erkundung in den vergangenen 25 Jahren

Der praktizierende Geophysiker verfügt heute dank der Entwicklungen auf dem IT-Gebiet über ein Instrumentarium zur Erfassung und Auswertung seismischer Daten, von dessen Leistungsfähigkeit nur wenige seiner Berufskollegen anfangs der 90-er Jahre geträumt hatten.

Im Vordergrund steht die seit 1990 erfolgte drastische Senkung der Investitionskosten für Hardware um rund 70% bei den seismischen Registriersystemen und um rund 90% bei den EDV-Auswertungs- und Interpretationssystemen.

Zu erwähnen sind die gleichzeitig einhergegangene, apparative Miniaturisierung und die um tausendfach erhöhte Speicherkapazität moderner Datenträger. Diese Entwicklungen haben dazu beigetragen, dass heute eine fachgerechte, umfassende EDV einen Bruchteil des Zeitaufwandes wie noch vor der Jahrhundertwende in Anspruch nimmt. Der modulare Aufbau heutiger Datenerfassungssysteme, bei denen intelligente Datenaufbearbeitungsaufgaben wie die A/D-Wandlung nicht mehr in einem zentralen Computer, sondern bereits in den Geophonen vorgenommen werden, hat gegenüber älteren Seismograph-Apparaturen gewichtige Vorteile. Ihre Kapazität, d. h. die Anzahl verfügbarer Datenkanäle, ist beliebig erweiterbar.

Der Ersatz und die Reparaturen von defekten Komponenten sind ohne grossen Zeitverlust während eines Feldeinsatzes durchführbar.

Das Gewicht moderner kompakter Datenerfassungssysteme mit bis zu 300 Datenkanälen für 2D-Abklärungen bis in 1'000 m Tiefe beträgt heute noch 4-500 kg. Mit Luftfracht ist somit der weltweite Einsatz zu erschwinglichen Kosten und kurzfristig möglich. Das Erscheinen auf dem Markt von kabellosen Systemen, die über Funk die Übertragung der Daten auf eine zentrale Speichereinheit sowie das Monitoring der Registrierarbeiten on-line ermöglichen, ist in weniger als einem Jahr Realität. Dadurch entfällt mit den Kabeln und ihren Steckerverbindungen eine kostspielige und zudem die reparaturanfälligste Systemkomponente.

Ebenfalls kurz vor der Marktreife steht der Einsatz elektronischer Akzelerometer, sogenannter MEMS (Mikroelektronisch-Mechanische Systeme), von bewegungssensitiven Chips, die gegenüber herkömmlichen Geophonen beinahe revolutionäre Vorteile aufweisen:

- Ihr Gewicht ist um ein Mehrfaches geringer als das eines Geophons.
- MEMS-Sensoren haben wie Hydrophone eine flache Frequenzcharakteristik mit einem verzerrungsfreien Durchlassbereich für breitbandige Signale.
- Der Chip erfasst allseitige Bewegungsrich-

<sup>1</sup> GeoExpert AG, 8424 Embrach



tungen, entspricht also einem 3-Komponenten-Geophon.

- Die erfassten Signale liegen bereits digital vor, wodurch die Analog/Digital-Wandlung entfällt. Durch den geringeren Stromverbrauch müssen weniger Batterien im (oft unwegsamem) Gelände ausgelegt werden.
- Interferenzen durch elektromagnetische Felder, z. B. von Hochspannungsleitungen und Bahnlinien, haben keine störende Auswirkungen auf die Datenqualität.
- MEMS-Sensoren sind in ihrer Funktionsweise und im nicht immer pfleglichen Feldeinsatz robuster als Geophone.

Diese segensreichen Auswirkungen der heutigen IT führen jedoch nicht zwangsläufig auch zu einer verbesserten Qualität der im Feld erfassten seismischen Daten. Als Beispiel seien die im Rahmen des NFP20 im Jahre 1988 erfassten Vibroseisprofile im Mendrisiotto erwähnt: Der Verlauf eines dieser Profile fällt über eine Strecke von 2.3 km zusammen mit der Linienführung eines im Jahre

2011 aufgezeichneten Vibroseisprofils. Bei den beiden Messkampagnen wurden identische Feldparameter verwendet. Der Vergleich des Reprocessings der Daten aus dem Jahre 1988 mit dem EDV-Ergebnis des Profils von 2011 zeigt auf den Daten von 1988 einen markanten, kontinuierlichen Reflexionseintritt des Autochthons in ca. 5.5 km Tiefe, von dem auf dem Profil von 2011 überraschenderweise kaum ansatzweise etwas erkennbar ist. Als Erklärung dafür mag angeführt werden, dass die generellen Linienführungen der beiden Profile in einem Winkel von ca. 60° zueinander stehen und somit möglicherweise eine azimutale, strahlengeometrische Bevorzugung für das NFP20-Profil im Spiel ist.

Dieses Beispiel belegt, dass die grundlegende Methodik der seismischen Kartierung des Untergrunds sich nicht im gleichen Ausmass wie die auf dem IT-Sektor erzielten apparativen Fortschritte entwickelt hat.

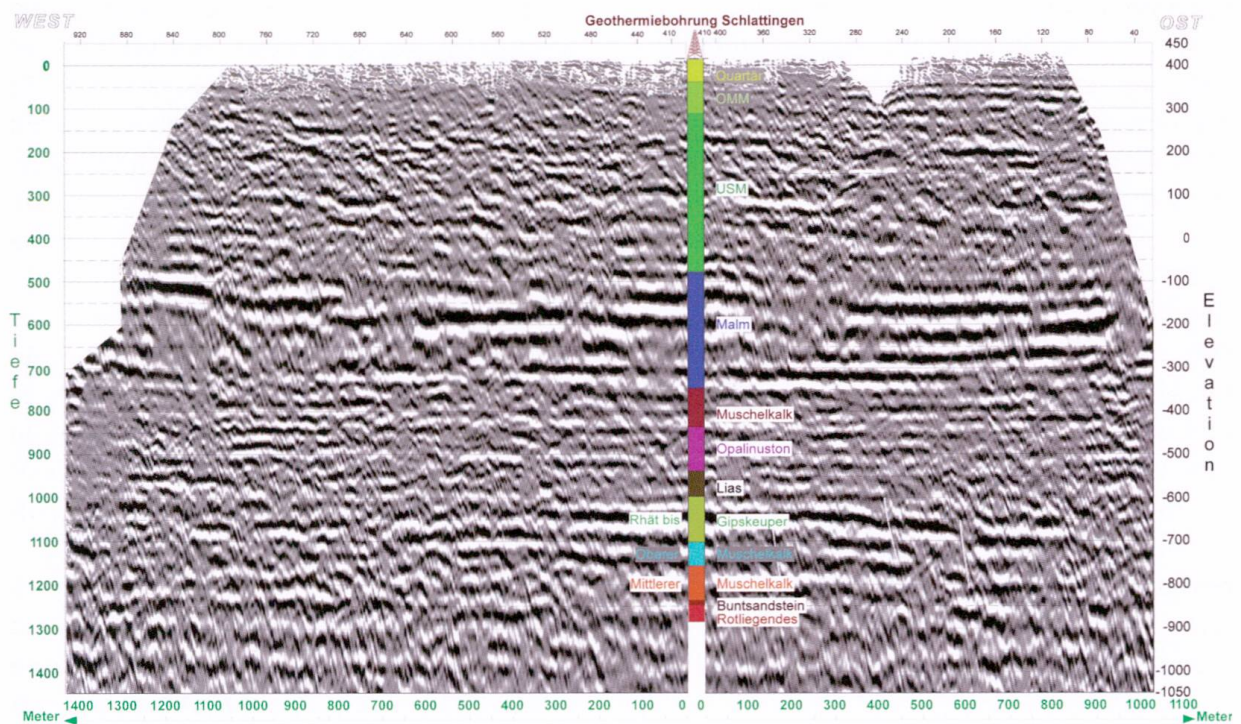


Fig. 1: Reflexionsseismisches Tiefenprofil über die Geothermiebohrung bei Schlattingen TG, erstellt mit einem Fallgewicht als seismische Quelle und registriert mit einer Registrierapparatur von 360 Datenkanälen, d. h. mit 360 aktiven Geophonstationen in Abständen von 2.7 m.



## 2 Es muss nicht immer Vibroseis sein

Die vorgängig erwähnten, massiv gesenkten Investitionskosten für Datenerfassungs- und EDV-Systeme stellen dem Geophysiker leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung, mit denen er heute in Tiefen vordringen kann, die vor zwei Jahrzehnten millionenteuren Vibroseistrupps vorbehalten waren. Den unbestrittenen Vorteilen der Vibroseisanregung stehen jedoch die hohen Kosten für die Beschaffung, den Unterhalt und für den Betrieb einer Gruppe von Vibratoren gegenüber.

Kostengünstige Alternativen für Erkundungen bis in Tiefen von 1'500–2'000 m stehen mit Fallgewichtsanzregung und Seismographsystemen mit 300–500 Datenkanälen zur Verfügung. Fig. 1 zeigt ein 2.4 km langes reflexionsseismisches Profil über die Geothermiebohrung Schlattigen TG aus dem Jahr 2012. Als seismische Quelle wurde ein Fallgewicht eingesetzt, bei dem ein 250 kg schwerer Stempel aus 70 cm Höhe auf eine Stahlplatte aufschlägt. Der Fall wird durch vorgespannte dicke Gummibänder beschleunigt.

## 3 Die detailgenaue Erkundung des oberflächennahen Untergrunds ist die heutige Herausforderung an die Ingenieurseismik

Auf den Anwendungsgebieten der Geotechnik, der Hydrogeologie, des Bergbaus und bei Umweltaufklärungen sind tiefengewandelte seismische Sektionen mit hoher Auflösung im oberflächennahen Untergrund eine Herausforderung, für die noch keine weitverbreitete Lösung gefunden worden ist. Für den *processing geophysicist*, mit einem Fachwissen, das sich auf die EDV tiefenseismischer Daten mit Zielhorizonten unterhalb der Verwitterungsoberfläche, also unterhalb von Tiefen von 200–400 m, beschränkt, bedeutet diese Anforderung eine grundlegend andere Welt.

Die bei der Tiefenseismik bewährten und häufig angewandten Processing-Verfahren der (rest)statischen Korrekturen und der Migration sind im oberflächennahen Untergrund aus theoretischen Gründen nicht anwendbar. Der Grund liegt in den in vertikaler und horizontaler Richtung abrupten und starken Variationen der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten im oberflächennahen Untergrund. Eine auch nur annähernd genaue Bestimmung der Verteilung der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten ist mit reflexionsseismischen Analysemethoden hier nicht durchführbar.

Die für den Tiefenseismiker alltäglichen Verfahren zur Herleitung und Anwendung (rest)statischer Korrekturen beruhen auf der Annahme, dass Laufzeitunterschiede für NMO-korrigierte Einzelspuren innerhalb eines *CDP-gathers* einerseits durch topographische Variationen im Oberflächenrelief, andererseits durch die vorhin angeführten, oberflächennahen vertikalen und lateralen Geschwindigkeitsanomalien hervorgerufen werden.

Diese Verfahren der statischen Korrekturen ermitteln Laufzeitanpassungen für jedes Einzelseismogramm mit dem Ziel, bei der Aufsummierung der Spuren der gemeinsamen Spiegelpunkte einen möglichst scharfen und präzisen Reflexionseinsatz zu erhalten. Diese (rest)statischen Korrekturwerte werden für die ganze Einzelspur, also auch für den oberflächennahen Tiefenbereich, angewendet. Sie zerstören dadurch hier jede in den seismischen Daten für den Ingenieurgeologen vorhandene, relevante Information.

Aus diesem Grund sind Migrationsverfahren auf einem statisch korrigierten Datensatz im oberflächennahen Untergrund gesteigert kontraproduktiv, da sie versuchen, bereits vorgängig verzerrte Strukturen deutlicher abzubilden. Als Maxime ist festzuhalten,



dass je näher der Oberfläche man eine Migration versucht, desto grösser ist die Untauglichkeit und desto folgenschwerer sind die schädlichen Nebenwirkungen dieses Verfahrens (Black et al. 1994). Ab welcher Tiefe die Migration wirklich als geeignete Massnahme, auch bei nicht statisch korrigierten 2D-Daten, bezeichnet werden kann, ist von der jeweiligen Komplexität der geologischen Strukturen und der Qualität der erfassten Daten abhängig.

Fig. 2 zeigt einen Datensatz in einem geologisch einfachen Gebiet mit subhorizontalen Ablagerungsstrukturen und geringen, gleichmässig auftretenden Werten der vertikalen und horizontalen Geschwindigkeitsgradienten. Das Erkundungsziel war die Detektion von fossilen Flussbetten bis in Tiefen von 250 m für den bergmännischen Abbau von Erzvorkommen in alluvialen Lagerstätten.

Fig. 2a zeigt das reflexionsseismische Tiefenprofil, das mit einer konventionellen EDV-Abfolge, d. h. einem grossen Aufwand zur Ermittlung und Anwendung von (rest)statischen Korrekturen und einer nachfolgenden Tiefenmigration erstellt wurde. Bei der EDV des Profils der unteren Fig. 2b wurden im Sinne eines *«hands-off»-Processings* weder statische Korrekturen noch eine Migration vorgenommen. Die Geschwindigkeiten für die direkte Laufzeit/Tiefen-Wandlung wurden dem refraktionstomographisch abgeleiteten Geschwindigkeitsfeld entnommen.

Vom ästhetischen Gesichtspunkt her betrachtet mag das Profil in Fig. 2a ansprechender sein. Die Reflektoren sind hier dank der Anwendung (rest)statischer Korrekturen schärfer und mehrheitlich kontinuierlicher abgebildet. Jedoch mit dem Zweck der Untersuchung vor Augen, nämlich dem Aufspüren von kleineren Strukturen oberhalb von 250 m Tiefe, bildet das Profil in Fig. 2b deutlich mehr strukturelle Feinheiten in den Schichtabfolgen der Ablagerungen ab. Am Standort der Bohrung links der Station 51'800 befindet sich in ca. 220 m Tiefe ein etwa 30 m tiefes fossiles Flussbett, dessen

Existenz durch die Sondierbohrung belegt ist. Im Profil von Fig. 2b wird wegen methodik-inhärenter Nebenwirkungen bei der Anwendung der Verfahren der reststatischen Korrekturen, und v. a. der Migration, diese Flussbettstruktur gänzlich verschmiert und nicht aufgezeigt. Weitere Hinweise auf mögliche alluviale Erzlagerstätten sind in Fig. 2b mit Kreisen gekennzeichnet.

Dieses Beispiel zeigt, dass im oberflächennahen Bereich gegebenenfalls zwei EDV-Strategien anzuwenden sind, eine die dem ästhetischen Empfinden Rechnung trägt und eine, bei dem die Verfahren der statischen Korrekturen und der Migration im oberflächennahen Bereich keinen Schaden anrichten.

Im vorliegenden Beispiel beträgt der Abstand zwischen den Empfängerstationen 5 m. Zur wirksamen Erhöhung des Auflösungsvermögens im oberflächennahen Tiefenbereich ist die Verkleinerung dieses Abstandes auf 2 m empfehlenswert.

#### **4 Verbesserung des Auflösungsvermögens im oberflächennahen Bereich mit dem Verfahren der Hybriden Seismik**

In Gebieten mit einfacher Geologie, wie im vorangegangenen Beispiel, sind wesentliche Unterschiede zwischen der konventionellen EDV und einem Processing ohne Anwendung statischer Korrekturen und von Migration lediglich in der Abbildungsgenauigkeit von kleineren Strukturen feststellbar. Mit zunehmender Komplexität der Untergrundstrukturen nehmen die Defizite der tiefenseismischen EDV ein zerstörerisches Ausmass an. Dies wird illustriert am Beispiel einer hochauflösenden seismischen Erkundung zur Verifizierung einer vermuteten neotektonischen Störung in der Umgebung eines Kernkraftwerks. Der Untergrund entlang der 1.5 km langen Messtrecke mit bewegter Oberflächentopographie besteht aus tektonisch stark beanspruchtem tertiä-



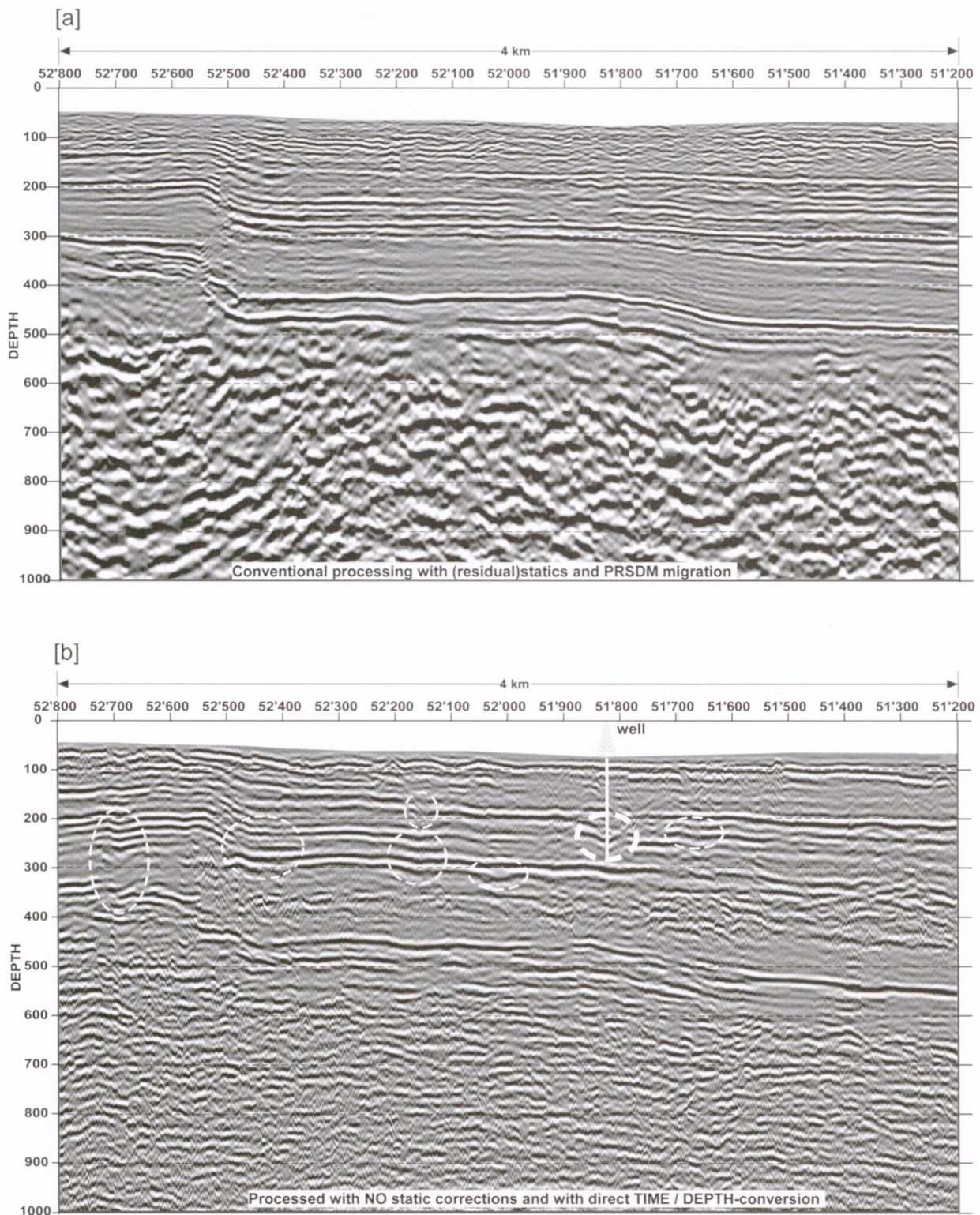


Fig. 2: Vergleich der Ergebnisse zweier unterschiedlicher EDV-Strategien zur Herleitung eines hochauflösenden reflexionsseismischen Tiefenprofils in einem Untersuchungsgebiet mit subhorizontalen Ablagerungsstrukturen und einfacher Verteilung der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten bis in 500 m Tiefe. Zu beachten ist, dass unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilungen für die Laufzeit/Tiefenwandlungen verwendet wurden.

[a] EDV mit (rest)statischen Korrekturen und Migration zur Verbesserung der Kontinuität und der Schärfe der Reflexionsseinsätze auf Kosten der Detailgenauigkeit zur Kartierung alluvialer Lagerstätten in Tiefen bis 250 m.

[b] EDV ohne jegliche statische Korrekturen und mit direkter Laufzeit/Tiefenwandlung mittels refraktions-tomographisch ermittelten seismischen Geschwindigkeiten.



rem Fels mit einer 0-100 m mächtigen Lockergesteinsüberdeckung.

Die Parameter der Datenerfassung sind ein Geophonabstand von 2 m, ein Anregungsabstand von 4 m, 360 aktive Kanäle und als Quelle ein 8 kg Hammer. Die Vorgabe war eine Erkundungstiefe bis 150 m. Die Primärdaten sind charakterisiert durch kaum erkennbare Reflexionsseinsätze. Da jedoch gut ausgebildete und scharf definierte Refraktionseinsätze bis in Entfernungen von mehr als 300 m vom Anregungspunkt vorhanden sind, kann davon ausgegangen werden, dass die mit dem Hammer erzeugte Energie ausreichend ist.

In erster Instanz wurde ohne Erfolg eine konventionelle tiefenseismische EDV mit einem beträchtlichen Aufwand zur Ableitung statischer Korrekturen durchgeführt. Aus der Reflexionsantwort der komplexen und kleinräumigen Untergrundstrukturen waren keine brauchbaren Reflexionseinsätze für eine reflexionsseismische Geschwindigkeitsanalyse ableitbar, womit die EDV mit einem einigermaßen befriedigenden Ergebnis hätte

abgeschlossen werden können. Das Resultat dieser erfolglosen Bemühungen ist als uninterpretierbare seismische Sektion in Fig. 3 dargestellt.

Abhilfe bei Nichtanwendbarkeit der tiefenseismischen EDV bietet das Verfahren der Hybriden Seismik an (Frei & Keller 2000). Es eignet sich grundsätzlich für alle oberflächennahen seismischen Erkundungen, da es die Auswertungsmethoden der Refraktions-tomographie in Kombination mit der hochauflösenden Reflexionsseismik und mit der Möglichkeit der gegenseitigen Kalibration anwendet. Der erste Schritt der hybriden Auswertungsmethode ist die refraktionstomographische Herleitung des Geschwindigkeitsfeldes. Im hier vorliegenden Fall wird dank der guten Datenqualität mit gut definierten Ersteinsätzen über die gesamte Geophonauslage die Verteilung der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten bis in Tiefen von 200 m kartiert (Fig. 4a).

Im zweiten und arbeitsintensivsten Schritt der hybridseismischen EDV wird das reflexionsseismische Tiefenprofil gänzlich ohne Anwendung von feldstatischen und reststa-

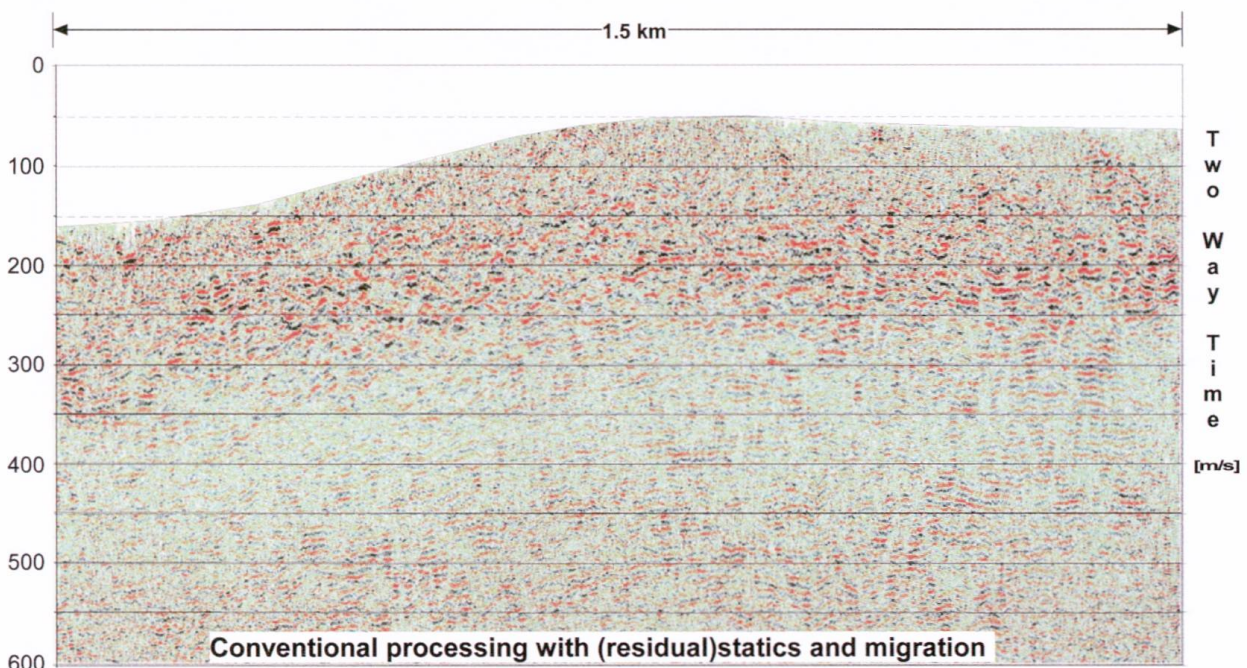


Fig. 3: Reflexionsseismisches Laufzeitprofil nach mehreren missbräuchlichen Durchläufen mit reststatischen Korrekturen und einer Migration.



tischen Korrekturverfahren erstellt. Für die Stapelgeschwindigkeiten werden an mehreren Punkten entlang der Messlinie die Geschwindigkeitsfunktionen aus dem refraktionstomographisch abgeleiteten Geschwindigkeitsfeld der Fig. 4a errechnet. Die Laufzeit/Tiefenwandlung erfolgt direkt und ohne Migration wiederum mit den Geschwindigkeiten aus dem tomographischen Geschwindigkeitsfeld (Fig. 4b). Der dritte Schritt besteht lediglich in der graphischen Zusammenführung der Ergeb-

nisse der Refraktions- und der Reflexionsseismik durch Aufeinanderlegen der beiden Profilschnitte (Fig. 4c).

Die geologisch-geotechnische Interpretation im vierten und letzten Schritt (Fig. 4d) erfolgt mit Vorteil in Zusammenarbeit mit dem ortskundigen Geologen, der in der Regel über zusätzliche Information (z. B. Bohrprofile) über das Untersuchungsgebiet verfügt. Die seismischen Ergebnisse sind als ein interdisziplinärer Beitrag zu seiner Gesamtbeurteilung der Situation zu verstehen.

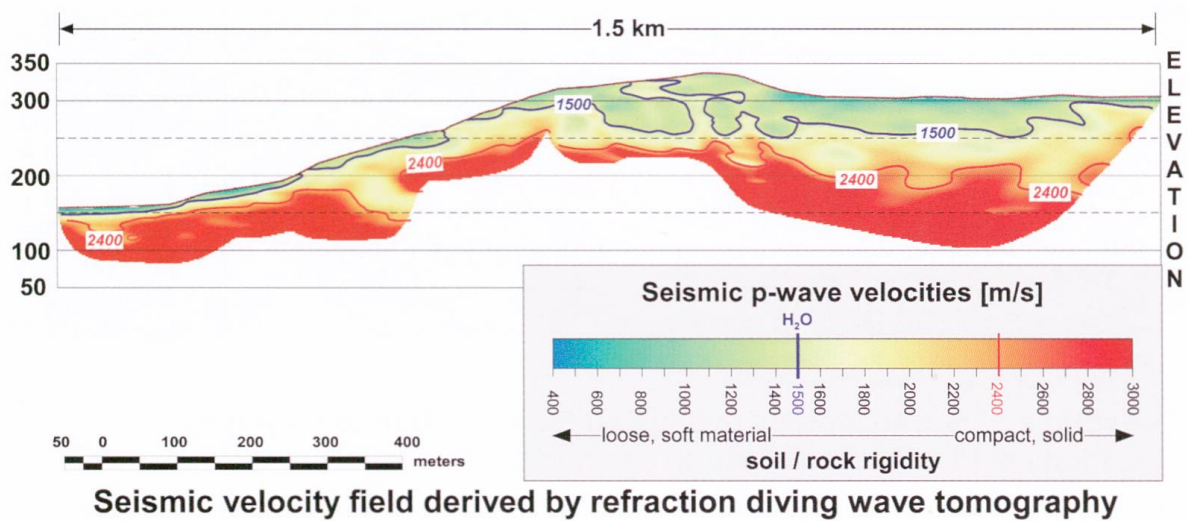


Fig. 4a: Tauchwellentomographisch abgeleitetes Geschwindigkeitsfeld. Gut erkennbar ist die tertiäre Felsoberfläche, die ungefähr entlang der Geschwindigkeits-Isolinie von 2'400 m/s verläuft.

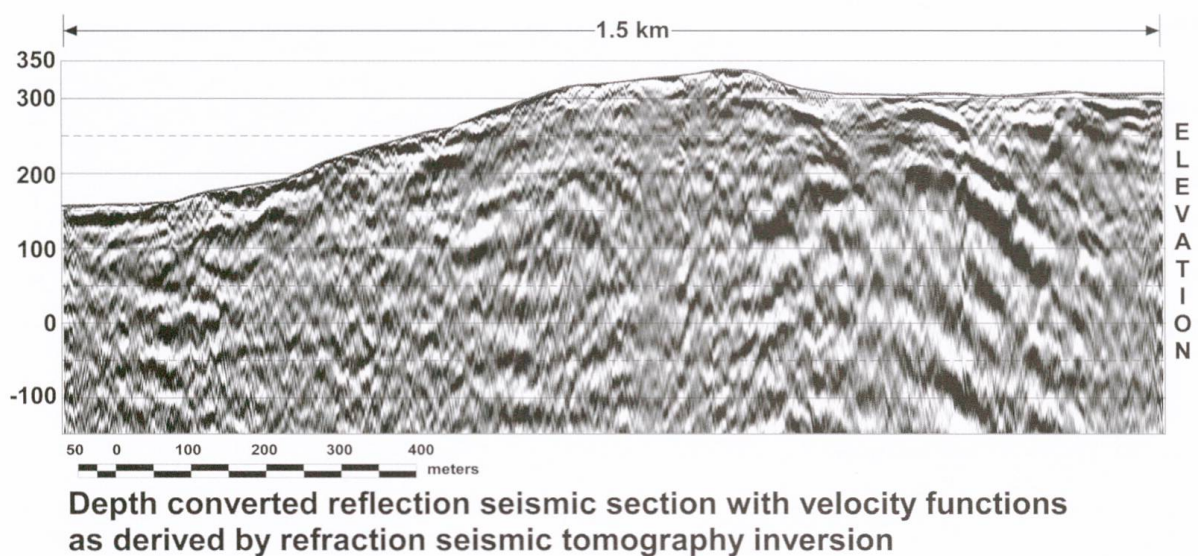


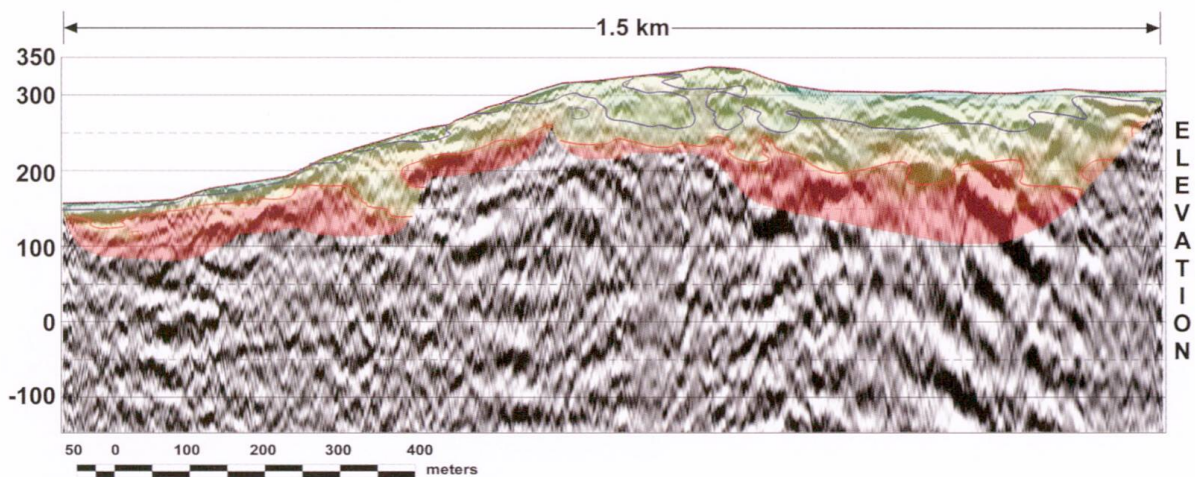
Fig. 4b: Reflexionsseismisches Tiefenprofil vom gleichen Datensatz wie in Fig. 3 aber ohne (rest)statische Korrekturen und mit direkter Laufzeit/Tiefen-Wandlung.



Die Vorteile der hybriden Seismik sind zusammengefasst die folgenden:

- Die beiden Verfahren der Refraktionstomographie und der hochauflösenden Reflexionsseismik lassen sich auf demselben Datensatz anwenden, der in einem Arbeitsgang im Feld erfasst wird.
- Die Nachteile des einen Auswertungsverfahrens werden durch die Vorteile des anderen weitgehend kompensiert.

- Die gegenseitige Kalibration der Ergebnisse resultiert in einer Erhöhung der Ausagesicherheit bei der Interpretation.



**Hybrid seismic section by overlaying the refraction tomography velocity field onto the reflection seismic depth section**

Fig. 4c: Hybridseismisches Profil, das dem Ingenieurgeologen oder Geotechniker zur Interpretation vorgelegt wird.

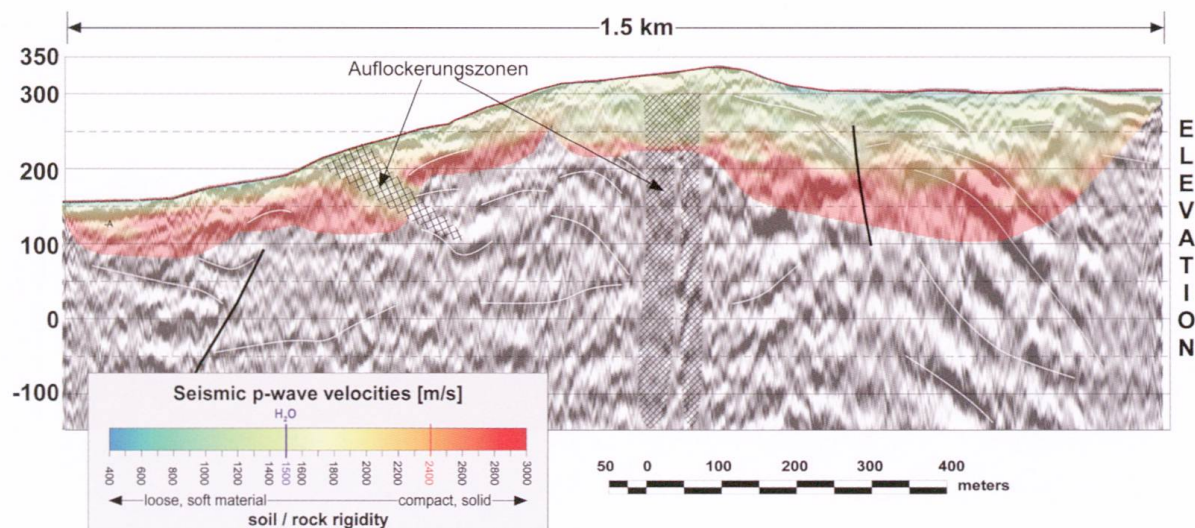


Fig. 4d: Vorschlag einer Interpretation des hybridseismischen Profils in Fig. 4c. Zu beachten ist die an mehreren Stellen gute Übereinstimmung der refraktionstomographisch und reflexionsseismisch abgebildeten Strukturen, z. B. bei der flach einfallenden Auflockerungszone in der linken Profilhälfte. Die visuelle Korrelation ist als gegenseitige Kalibration der beiden Auswertungsverfahren zu betrachten und eine Hilfe bei der geologisch-geotechnischen Interpretation.

## Literaturverzeichnis

- www.parkseismic.com: Ein umfassendes und leicht verständliches Tutorial aller seismischen Erkundungsverfahren.
- Black, R. A., Steeples, D. W. & Miller Richard, D. 1994: Migration of shallow seismic data. *Geophysics*, Vol. 59, No. 3.
- Frei, W. & Keller, L. 2000: Hybride Seismik – eine verbesserte Methode des Aussagepotentials seismischer Daten, *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.*, 5/2, 229–236.
- Osyov, K. 2000: Robust refraction tomography, 70<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., 2032–2035.
- Barton, N. 2006: *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*, 729 p. Taylor & Francis, UK & Netherlands, ISBN 9-78041-539-4413.
- Frei, W. 2012: Methodology and Case History of Hybrid Seismic Surveying in Combination with Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW); A Useful Tool for the Detection of Rock and Soil Instability Zones. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC'4)*, Porto de Galinhas, Brazil 18–21 Sept. 2012, CRC Press, ISBN 978-0-415-66070-9 [p. 1297ff, Vol. 2] or ISBN 978-0-203-073896 (eBook).





# UNVERFÄLSCHT?



**DATEN UND TATEN  
MIT TIEFGANG.**

**Geniessbare und präzise Informationen erhalten Sie bei  
Stump FORATEC AG: [www.stump.ch](http://www.stump.ch)**