

## Kriterien authentischer Hybridseismik

Walter Frei

GeoExpert AG, CH-8424 Embrach / Schweiz, [w.frei@geoexpert](mailto:w.frei@geoexpert)

### **Abstract**

*Conventional reflection seismic velocity analysis tools invariably provide unsatisfactory results when applied to seismic data acquired for mapping complex subsurface structures in the near surface depth range until 300 to 500 m.*

*The method of hybrid seismic surveying, a combination of high-resolution reflection seismic profiling with seismic refraction tomography inversion, overcomes this drawback by extracting more accurate information from the refraction seismic velocity field to be used for the derivation of stacking velocities and of time-to-depth conversion velocities in reflection seismic data processing.*

*Reciprocal calibration of the seismic reflection and refraction tomography results is instrumental for obtaining spatial imaging congruence resulting in the spin-off product of the best fitting velocity information possible. In opposition to the conventional "deep target" reflection seismic data processing schemes, the application of weathering and elevation field static corrections is integrated in the steps of NMO correction and final post stack time-to-depth conversion.*

### **Zusammenfassung**

*Konventionelle reflexionsseismische Analyseverfahren zur Herleitung seismischer Ausbreitungsgeschwindigkeiten erbringen ausnahmslos unbefriedigende Ergebnisse, wenn sie auf seismische Daten angewendet werden, die zur Kartierung komplexer Strukturen im oberflächennahen Tiefenbereich bis 500 m aufgenommen werden.*

*Die Methode der hybridseismischen Kartierung, eine Kombination von hochauflösender Reflexionsseismik mit refraktionsseismischer Tomographie, überwindet dieses Manko, indem präzisere Informationen aus dem refraktionsseismischen Geschwindigkeitsfeld gewonnen werden. Diese dienen dann zur Herleitung der Stapelgeschwindigkeiten (stacking velocities) und der Geschwindigkeitsmodelle zur Zeit-Tiefen-Wandlung (time-to-depth conversion) im Rahmen der reflexionsseismischen Datenverarbeitung.*

*Die reziproke Kalibrierung der reflexionsseismischen und refraktionstomographischen Ergebnisse ist unabdingbar, um eine räumliche Deckungsgleichheit in der Ergebnisdarstellung zu erzielen und führt als Nebenprodukt zur bestmöglich angepassten Geschwindigkeitsinformation.*

*Im Gegensatz zu den konventionellen reflexionsseismischen Datenverarbeitungssequenzen ist dabei die Anwendung feldstatischer Korrekturen (weathering and elevation statics) in die Schritte der NMO-Korrektur und der nach der CMP-Stapelung abschließenden Zeit-Tiefen-Wandlung integriert.*

*Hybridseismische Profile bilden Untergrundstrukturen ab und charakterisieren gleichermaßen die Festigkeit des Gesteins in den verschiedenen Formationen. Die Methode lässt sich ergänzend mit seismischer Scherwellen-Refraktionsstomographie erweitern. Deren Datenerfassung und EDV dient der nicht-intrusiven Bestimmung der dynamischen Elastizitätsmoduli, die räumlich kontinuierlich, zum Beispiel in Form 2-dimensionaler Profile des E-Moduls dargestellt werden.*

### 1. Allgemeine Beschreibung der hybridseismischen Datenbearbeitung

In Abb. 1 ist das seismische Geschwindigkeitsfeld durch refraktionsseismische Inversionstomographie (1) aus einem Datensatz abgeleitet, der in einem einzelnen Feldeinsatz erfasst wird. Als Messgrößen werden kleine Geophon- und Anregungs-abstände verwendet, wie sie für hochauflösende Reflexionsseismik typisch sind. Um eine refraktionsseismisch möglichst große Erkundungstiefe zu erreichen ist eine der gewünschten Eindringtiefe entsprechend lange aktive Empfängerauslage anzulegen.

Die daraus gewonnene Geschwindigkeitsinformation in (1) wird bei der reflexionsseismischen EDV (2) für die Aufgaben der NMO-Korrektur, CDP-Stapelung und Zeit-Tiefen-Wandlung genutzt.

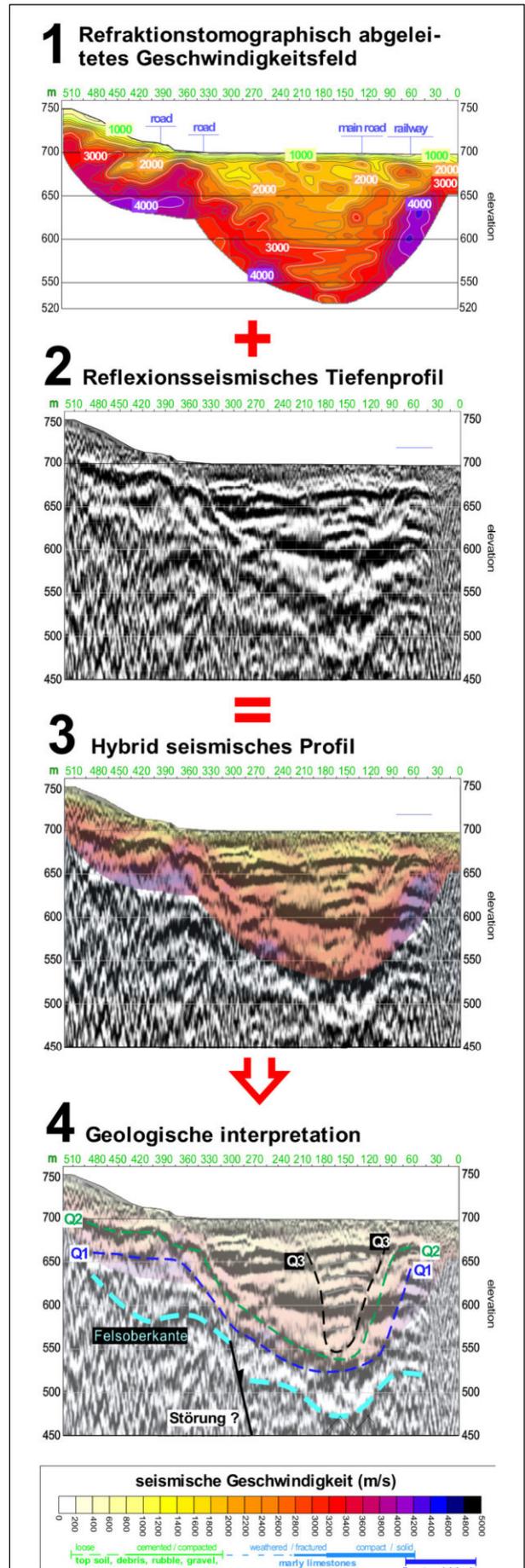
Das refraktionstomographische Geschwindigkeitsfeld (1) wird dem reflexionsseismischen Tiefen-schnitt (2) zwecks visueller Korrelation transparent überlagert und resultiert damit in einer hybridseismischen Darstellung (3), die dann geologisch-geotechnisch zu interpretieren ist (4).

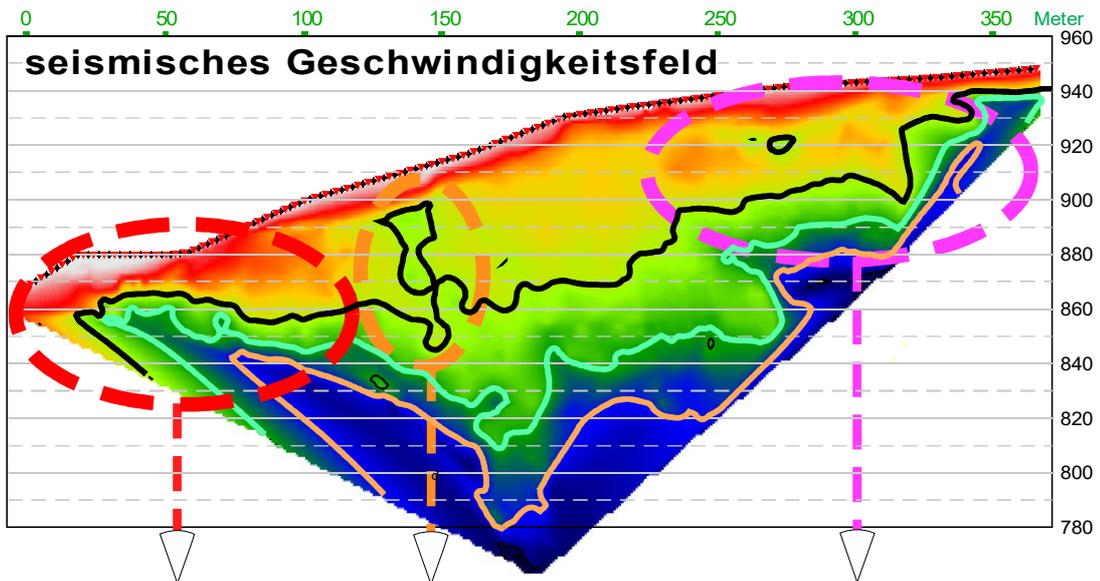
Durch die hybridseismische Kartierung werden strukturelle Details wie tektonische Strukturelemente und sedimentäre Schichtenlagen gemeinsam mit den geomechanischen Gesteinseigenschaften in den einzelnen Formationen aufgezeigt.

Die Ergebnisse von (1) und (2) sind gänzlich unabhängig voneinander, was das Risiko von interpretativen Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten weitgehend ausschließt.

#### 1. Vorbedingung ist räumliche Kongruenz

Bei der hybridseismischen EDV werden die Abbildungen der Refraktionstomographie (1) und der Reflexionsseismik (2) durch gegenseitige Kalibrierung aufeinander abgestimmt, um eine räumliche Deckungsgleichheit der Abbildungen beider Methoden zu erreichen.





Strukturelemente müssen reflexions- & refraktionsseismisch sowohl in ihrer Lage als auch in ihrer Form deckungsgleich abgebildet werden, um Mehrdeutigkeiten bei der geologischen Interpretation auszuschließen.

Hauptanforderung an die hybridseismische EDV ist die reziproke Kalibrierung der reflexionsseismischen und refraktionstomographischen Abbildungen.

Räumliche Deckungsgleichheit ist das Kernstück der Hybridseismik.

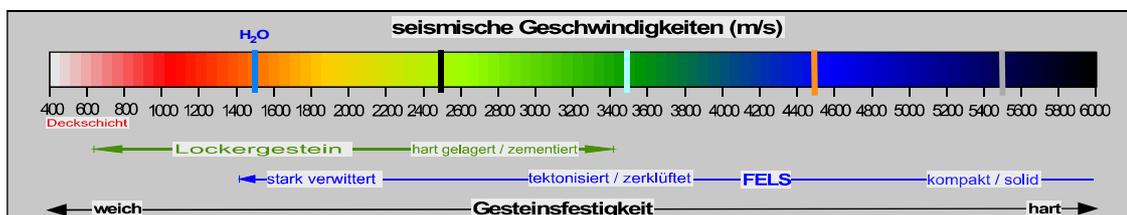
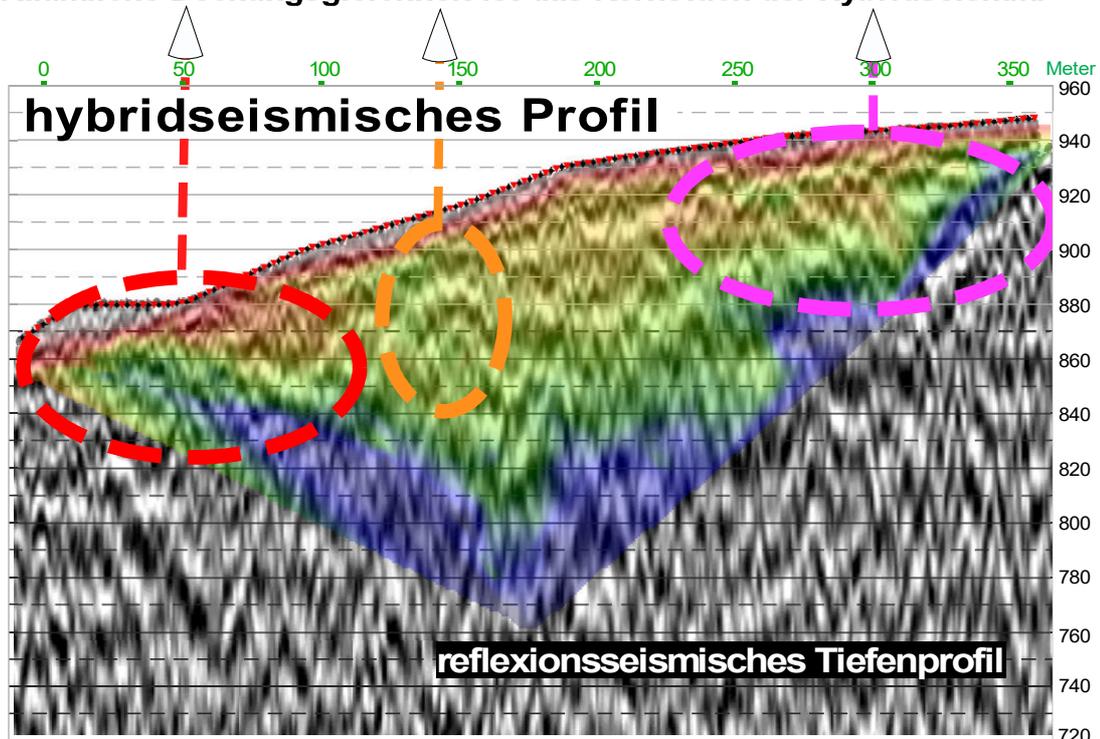


Abb. 2: Das Prinzip der räumlichen Deckungsgleichheit der refraktions- und reflexionsseismischen EDV-Ergebnis

## 2. Die Anwendung statischer Korrekturen im Ablauf der reflexionsseismischen EDV

Bei der EDV konventioneller Erdölreflexionsseismik werden für Daten aus Tiefen von mehr als 1500 m sog. feld- und reststatische Korrekturen abgeleitet um Echozeitanomalien durch die einerseits variable Topographie der Erdoberfläche und andererseits durch das sich sowohl in vertikaler und horizontaler Richtung stark ändernde Geschwindigkeitsfeld in den oberflächennahen Gesteinsschichten auszugleichen. Diese statischen Korrekturwerte, die auf jede einzelne Spur (Seismogramm von jeder Geophonstation) angewendet werden, sind hilfreich, um einen möglichst scharfen Reflexionseinsatz für tiefer liegende Zielhorizonte erhalten. Da diese Korrekturwerte auf das gesamte Seismogramm angewendet werden, geschieht dies leider auf Kosten der Auflösung in der Abbildung der oberflächennahen Schichten, die ja Gegenstand des Interesses der Ingenieurgeologen und Geotechniker sind.

In der hybridseismischen EDV werden vor der Stapelung der CDP-Spuren (*Common Depth Point* Seismogramme) keine statischen Korrekturwerte angewendet. Die "Nullzeit"-Linie entspricht dem Oberflächen-relief, unabhängig davon wie unregelmäßig das Terrain auch sein mag. Die feldstatischen Korrekturen, die oberflächennahe Geschwindigkeitanomalien ausgleichen, werden in die NMO-Korrektur integriert, indem Geschwindigkeitsfunktionen an jeder CDP-Position aus dem refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfeld abgeleitet werden. Oberflächenstatische Elevationskorrekturen werden erst nach der Zeit-Tiefen-Wandlung der gestapelten Zeitsektion angewendet. Das Ergebnis ist ein reflexionsseismischer Tiefenschnitt mit strukturellen Informationen aus dem oberflächennahen Bereich, der mit dem transparent überlagerten, farbkodierten refraktionsseismischen Geschwindigkeitsfeld, als hybridseismische Sektion dargestellt wird (s. Abbildungen 1 & 2 oben).

## 3. Kontinuierlich abgeleitete dynamische Elastizitätsmoduli durch mit s-Wellen – Refraktions-tomographie ergänzte Hybridseismik dargestellt in 2D-Tiefenprofilen

Quantitative Bestimmungen der geotechnischen Elastizitätsmoduli, wie Young's  $E$ -Modul, Schermodul  $G$  oder die Poisson-Zahl  $\nu$  werden normalerweise durch Laboranalysen an Gesteinsproben aus Bohrungen ausgeführt oder aus Ergebnissen geophysikalischer Bohrlochmessungen abgeleitet. Die zu messenden Größen sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten für P- und S-Wellen ( $V_p$  &  $V_s$ ) und die Gesteinsdichte  $\rho$ . Die Refraktionstomographie mit P- und S-Wellen, ergänzt mit Reflexionsseismik, ermöglicht somit eine Herleitung der dynamischen Elastizitätsmoduli mit den folgenden Vorteilen gegenüber den Analysen aus punktuell eingesammelter Gesteinsproben oder von Bohrlochsonden:

- P- und S-Wellen Geschwindigkeiten ( $V_p$  &  $V_s$ ) werden in-situ und im ungestörten Untergrund gemessen;
- $V_p$  &  $V_s$  Geschwindigkeitsfelder werden entlang seismischer Linien vermessen, die abgeleiteten dynamischen Gesteins-Elastizitätsmoduli (z.B. Youngs'  $E$ -Modul) werden somit räumlich kontinuierlich ermittelt und als 2-dimensionale Tiefenschnitte abgebildet;
- Oberflächenbasierte, nicht-invasive seismische Methoden sind deutlich kostengünstiger als geophysikalische Bohrlochmessungen oder Probeentnahmen aus einzelnen Bohrlöchern.
- siehe Abb. 3, nächste Seite

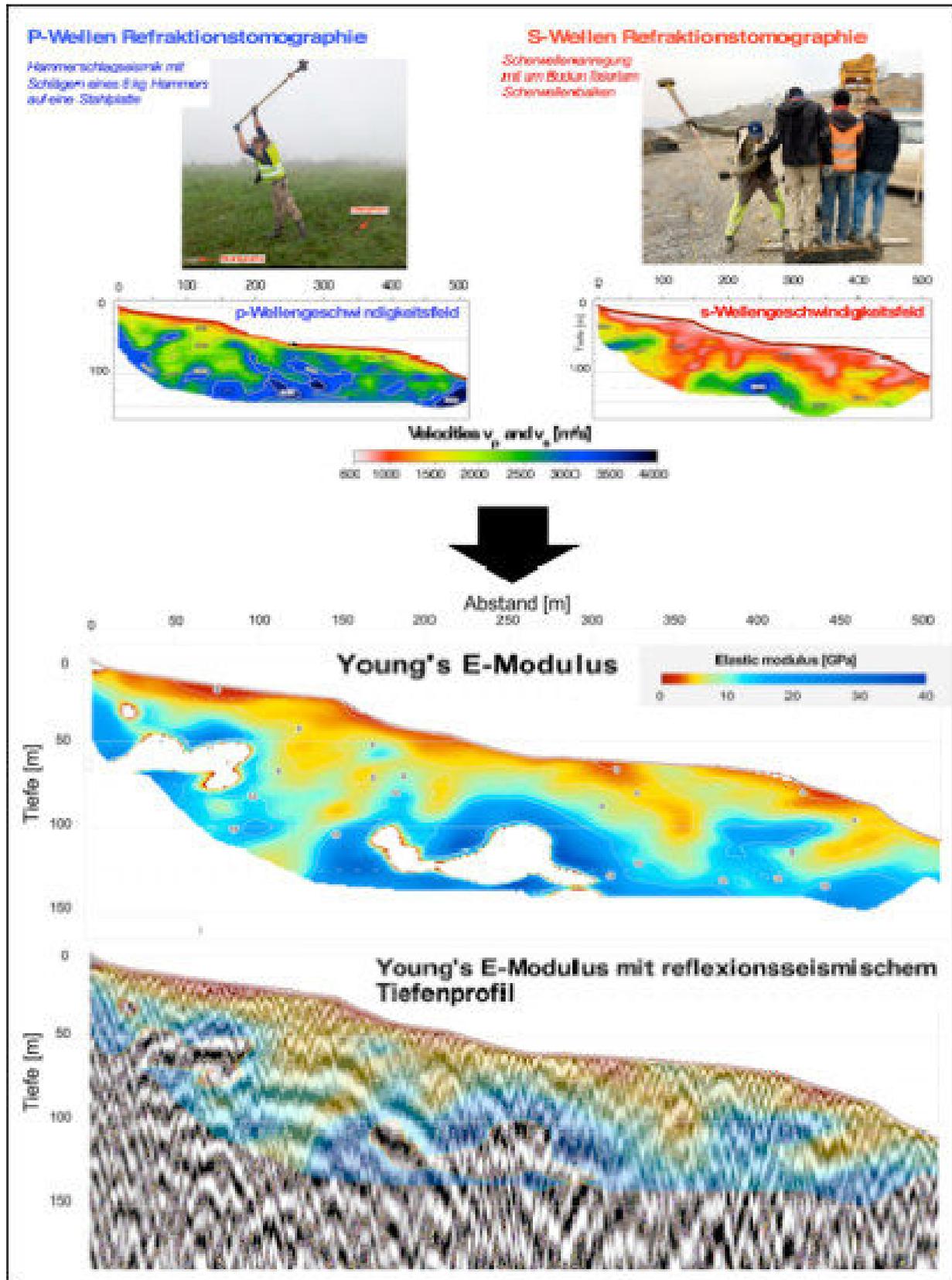


Abb. 3: Herleitung der dynamischen Elastizitätsmoduli in 2D Tiefschnitten, hier des E-Moduls

#### **4. Die Messgrößen der Datenerfassung im Hinblick auf optimale Detailgenauigkeit und maximale Erkundungstiefe**

Das Auflösungsvermögen reflexionsseismischer Abbildungen ist proportional zur räumlichen Datendichte. Diese wird bestimmt durch die Abstände der Empfängerstationen und der Anregungspunkte. Je kleiner die Abstände zwischen den Geophonstationen, desto höher ist die Detailgenauigkeit der Abbildung seismischer Daten.

Die erreichbare Erkundungstiefe der seismischen Refraktionstomographie ist eine Funktion der Länge der aktiven Empfängerauslage.

Selbst mit kleinen Empfängerabständen muss daher der Aufbau einer genügend langen Empfänger-auslage sichergestellt werden, um die gewünschte refraktionstomographische Erkundungstiefe zu erreichen. Aus diesem Grund ist eine ausreichende Anzahl verfügbarer Datenkanäle und Geophone unabdingbar.

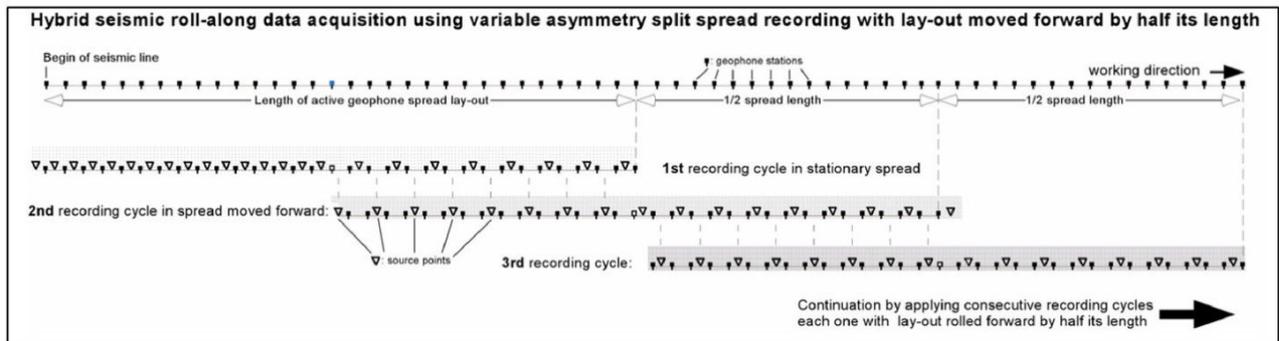
Basierend auf der gewünschten Erkundungstiefe sind für die hybridseismische Datenerfassung folgende grundlegenden Regeln anzuwenden, um eine ausreichende reflexionsseismische Datendichte und eine optimale refraktionstomographische Erkundungstiefe sicher zu stellen:

1. Die Abstände der Empfängerstationen sollten  $1/50$  bis  $1/30$  der erforderlichen Erkundungstiefe nicht überschreiten (abhängig von der lokal erzielbaren Datenqualität und der Komplexität der Untergrundstrukturen).
2. Die Länge der aktiven Auslage sollte mindestens 3 – 4 mal grösser sein als die gewünschte Erkundungstiefe.
3. Der Abstand der Quellenpunkte sollte nicht größer gewählt werden, als 1 – 3 mal den Abstand der Empfängerstationen (abhängig von der lokal erzielbaren Datenqualität und der Komplexität der Untergrundstrukturen).

Hier ein Arbeitsbeispiel aufgrund der oben angegebenen Regeln für eine gewünschte Erkundungstiefe von 100 m:

- Abstand der Empfängerstationen von 2 m ist angemessen (vgl. Regel 1, oben).
- Die Länge der Auslage muss 300-400 m betragen, was bedeutet, dass bei einem Geophonabstand von 2 m die aktive Auslage aus 150-200 Geophonen bestehen muss. Aus diesem Grund muss auch die Registrierapparatur mit dieser Anzahl an Kanälen ausgestattet sein (vgl. Regel 2, oben).
- Der Abstand der Quellenpunkte sollte 6 m nicht überschreiten. Unter schwierigen Bedingungen sind 2 m bis 4 m vorzuziehen (vgl. Regel 3, oben).

Empfehlenswert ist ein gestaffelter, „roll-along“ Registrierer-Zyklus' mit jeweiliger Verschiebungsdistanz der Geophonsauslage um ihre halbe Länge, wie in Abb. 4 unten dargestellt:



**Abb. 4:** Schematisches „roll-along“ Datenerfassungsverfahren für volle Überdeckung von Daten mit maximalen Sender-Empfängerabständen entlang seismischer Linien, die mehrfach länger sind als die aktive Auslage.

Aufnahme-Zyklus 1: Beginn der Datenerfassung bei der ersten Position mit regulären Anregungsabständen bis zur Mitte der Auslage. Danach wird bis zum Ende der Auslage nur an jedem zweiten regulären Quellenpunkt angeregt.

Aufnahme-Zyklus 2: Verschiebung der gesamten aktiven Auslage um die Hälfte ihrer Länge nach vorne und Rückverlagerung der Quelle (Hammer oder Fallgewicht) an den neuen hinteren Anfang. Die Datenerfassung wird fortgeführt an jedem zweiten regulären Quellenpunkt, der im 1. Zyklus nicht genutzt wurde.

Aufnahme-Zyklus 3: Wie in Zyklus 2 Verschiebung der Auslage um die Hälfte der Länge nach vorne und Rückverlagerung der Quelle an den neuen hinteren Anfang. Die Aufnahme wird fortgeführt wie in Zyklus 2 an jedem zweiten Quellenpunkt.

Nachfolgende Registrierungs-Zyklen sind identisch mit Zyklus 3. Im letzten Zyklus muss sichergestellt werden, dass auf der letzten Hälfte der Geophonauslage wieder jeder reguläre Quellenpunkt bedient wird und damit entlang der gesamten Linie reguläre Abstände der Quellenpunkte vorliegen.

Dieses gestaffelte „roll-along“ Schema mit halb-stationären Auslagen (Abb. 4) hat den Vorteil, dass in jedem Zyklus Daten mit maximalen Quellen-Empfängerabstände in Vorwärts- und Rückwärts-Richtung aufgezeichnet werden, die kontinuierlich die maximal mögliche Erkundungstiefe der Refraktions-tomographie sicherstellen

## 5. Schlussfolgerungen

- Hochauflösende Hybridseismik ist ein allgemein anwendbares Verfahren zur Detaillierung des oberflächennahen Untergrunds bis in Tiefen von 500 m. Es macht das gesamte in den Seismikdaten enthaltene Aussagepotenzial der beiden voneinander unabhängigen Methoden der Reflexionsseismik (struktureller Aufbau) und der Refraktionstomographie (physikalische Gesteinseigenschaften) im Untergrund sichtbar.
- Hybridseismik ist auch einsetzbar zur Erkundung größerer Tiefenbereiche (z.B. in der Geothermie) und ist gleichwertig mit der standardisierten Erdölreflexionsseismik.
- Detaillierte Geschwindigkeitsinformation, entnommen aus dem Refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfeld, ist unverzichtbar bei der EDV reflexionsseismischer Daten bis in Tiefen von 500 m. In der hybridseismischen Kartierung werden die Nachteile einer Methode durch die Vorteile der anderen kompensiert.
- Abgesehen von den erheblich geringeren Kosten durch Reduzierung der Datenerfassungsarbeiten auf eine einzige Feldkampagne ist der wesentliche Vorteil in der verbesserten Interpretationssicherheit der hybridseismischen Darstellung zu sehen. Die Beachtung des Kriteriums der räumlichen Deckungsgleichheit (*spatial congruence*) der Refraktionstomographischen und reflexionsseismischen Abbildungen schließt das Risiko interpretativer Mehrdeutigkeiten weitgehend aus.
- Unabdingbar für den Messerfolg ist die Befolgung der Vorgaben für die Wahl der Abstände für die Geophonstationen und der Anregungspunkte und die Länge der aktiven Geophonauslage.
- Die hybridseismische Methode lässt sich mit Scherwellen-Refraktionstomographie erweitern und ermöglicht damit die räumliche Bestimmung der dynamischen Elastizitätsmoduli, mit denen in 2-dimensionalen Tiefenschnitten der Untergrund geotechnisch charakterisiert wird.