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-Geowissenschaftern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 29 (2024)

Heft: 1-2

Artikel: Das Wesen hybridseismischer Erkundung

Autor: Frei, Walter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1062150

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.01.2026

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

Das Wesen hybridseismischer Erkundung

Walter Frei[1]

Zusammenfassung

Die beiden wichtigsten oberflächenseismischen Erkundungsmethoden, die Refraktionstomographie und die Reflexionsseismik werden symbiotisch zur Methode der Hybridseismik kombiniert. Die Nachteile und methodischen Einschränkungen der einen Methode in Bezug auf die tiefenabhängige Detailgenauigkeit werden durch die Vorteile der anderen wettgemacht.

Das Kernstück der Hybridseismik ist die räumlich-geometrische Übereinstimmung der Abbildungen der Auswertungsergebnisse der beiden von einander unabhängigen Methoden, was durch geeignete EDV-Schritte erreicht wird. Dies führt zu einer erheblich höheren Übereinstimmung des Messergebnisses mit der Realität, als es z. B. mit konventioneller Reflexionsseismik allein möglich ist.

Dadurch dass von ein und demselben Datensatz die refraktions- und reflexionsseismischen Signale voneinander getrennt mit methodisch unterschiedlichen EDV-Verfahren zu einem räumlich deckungs-gleichen Ergebnis führen, ist als herausragendes Alleinstellungsmerkmal einer eineindeutigen Interpretierbarkeit zu werten. Keine andere geophysikalische Methode verfügt basierend auf einem einzigen Datensatz über eine derartige reziproke Kalibrationsmöglichkeit zur Gewährleistung der Aussagesicherheit.

Während in der Vergangenheit und bei anderen geophysikalischen Methoden die subjektive Interpretation lückenhafter, und oft wenig zweckdienlicher Messdaten bei der Erstellung eines geologischen Modells im Vordergrund stand und steht, ist das hybridseismische Profil gleichsam eine ganzheitliche Momentaufnahme, vergleichbar mit einer Fotografie der Wand einer Kiesgrube oder einer Felswand.

Es zeigt reflexionsseismisch neben dem strukturellen Aufbau des Untergrundes, vergleichbar mit einer Röntgenaufnahme, in einer gemeinsamen Darstellung die refraktionstomographisch abgeleitete Verteilung der seismischen Geschwindigkeiten und damit farbkodiert auch das Feld der Gesteinsfestigkeiten, d.h. auch Hinweise auf lithologische Eigenschaften.

Für reflexionsseismisch Eingeweihte: Im Gegensatz zum konventionellen Ablauf der reflexionsseismischen EDV werden die hybridseismische Herleitung und Anwendung der statischen Verwitterungs- und Elevations-korrekturen – wie auch allfällige dip move-out Korrekturen – auf Basis des refraktionstomographisch detailgenauen Geschwindigkeitsfeldes vereinfacht, und in qualitativ stark verbesserter Weise in die EDV-Sequenz der NMO-Korrektur und der abschließenden post-stack Laufzeit-Tiefen-Wandlung integriert.

Das Verfahren der Hybridseismik stellt sicher, dass hohe Frequenzanteile in reflektierten Signalantworten aus Tiefen von 2'000 m und grösser auch tatsächlich erfasst werden. Sie bietet somit Gewähr für die best-mögliche räumliche Bildauflösung. Dies ist insbesondere bei mitteltiefen Geothermieprojekten und bei der Suche nach CO_2-Speichermöglichkeiten von Bedeutung [1], [3] und [5].

Es werden die grundlegenden Richtlinien betreffend der Parameterwahl für die hybridseismische Datenerfassung vorgegeben.

Résumé

Les deux principales méthodes d'exploration sismique de surface, la tomographie par sismique-réfraction et la sismique réflexion, sont combinées de manière symbiotique pour aboutir à la technique de la sismique hybride. Les inconvénients et les limites méthodologiques de l'une des méthodes en termes de précision des détails en fonction de la profondeur sont compensés par les avantages de l'autre.

Des étapes appropriées dans le traitement informatique des deux méthodes d'exploration sismique totalement indépendantes l'une de l'autre remplissent l'exigence la cohérence spatio-géométrique des deux images du sous-sol, le cœur de la méthode sismique hybride. Il en résulte une concordance nettement plus élevée entre le résultat de la mesure et la réalité qu'avec la seule méthode de sismique-réflexion par exemple.

Le fait que les signaux de sismique-réfraction et de sismique-réflexion d'un seul et même jeu de données soient traités séparément par des méthodes informatiques totalement différentes pour aboutir

[1] FREI Engineering Seismology Consult, Embrach, info@geoexpert.ch

à un résultat spatial concordant doit être considéré comme une caractéristique unique et exceptionnelle permettant une interprétation claire. Aucune autre méthode géophysique ne dispose d'un tel étalonnage réciproque pour garantir la fiabilité des résultats.

Alors que par le passé et avec d'autres méthodes géophysiques, l'interprétation subjective de données de mesure lacunaires et souvent peu utiles était et reste au premier plan lors de l'élaboration d'un modèle géologique, le profil sismique hybride est en quelque sorte un instantané global, comparable à une photographie de la paroi d'une gravière ou d'une falaise.

Il montre, par sismique réflexion, les structures du sous-sol, comparable à une radiographie, ainsi que la répartition des vitesses sismiques déduites par tomographie par réfraction et le champ de résistance des roches avec un code de couleurs, c'est-à-dire également des indications sur les propriétés lithologiques.

Pour les initiés à la sismique-réflexion: Contrairement au déroulement conventionnel du traitement informatique de la sismique-réflexion, la dérivation et l'application des corrections statiques d'altération et d'élévation selon la méthode de la sismique hybride – ainsi que les éventuelles corrections dip move-out – sont simplifiées sur la base du champ de vitesse détaillé par la tomographie de réfraction et intégrées de manière qualitativement très améliorée dans la séquence informatique des corrections NMO, la sommation (CDP stack) et la conversion temps-profondeur finale.

La technique de sismique hybride garantit que les plus hautes composantes de fréquence, qui sont décisives pour la résolution spatiale, sont effectivement encore enregistrées à des profondeurs d'exploration allant jusqu'à 2 000 mètres et plus. Ceci est particulièrement important pour les projets géothermiques de moyenne profondeur et pour la recherche de possibilités de stockage de CO_2 [1], [3] et [5].

Des directives de base sont données concernant le choix des paramètres pour l'acquisition de données de sismique hybride.

Abstract

The two most important surface seismic exploration methods, seismic refraction tomography and reflection seismic profiling, are combined symbiotically to form the hybrid seismic method. The disadvantages and methodological limitations of one method in terms of depth-dependent imaging resolution are compensated for by the advantages of the other.

The core of the hybrid seismic method is the spatial-geometric coherence of the images of the evaluation results of the two independent methods, which is achieved using appropriate data processing steps. This leads to a considerably higher level of agreement between the hybrid seismic surveying results and reality than is possible using conventional reflection seismic profiling alone, for example.

The fact that the refraction and reflection seismic signals from one and the same data set lead to a spatially consistent result using completely different computerized methods is an outstanding unique selling point in terms of unambiguous interpretability. No other geophysical method features such a reciprocal calibration to assure the reliability of the results.

In the past and with other geophysical methods, the subjective interpretation of incomplete and often faulty field data was and is the main focus for creating a geological model. In contrast, the hybrid seismic profile is, so to speak, a holistic snapshot, comparable to a photograph of the wall of a gravel pit or a rock face.

In addition to the structural composition of the subsurface, the hybrid seismic profile shows, in a joint representation, the distribution of the seismic velocities derived by refraction tomography and thus also the colour-encoded field of rock strengths, i.e. also indications of lithological properties.

For reflection seismic insiders: In opposition to the conventional procedure of reflection seismic data processing, the hybrid seismic derivation and application of the weathering and elevation field static corrections – as well as any dip move-out corrections – are simplified and integrated, in a qualitatively improved manner, on the basis of the detailed seismic refraction tomographic velocity field, into the processing sequence of the NMO correction and the final post-stack traveltime-depth conversion.

The hybrid seismic technique ensures that the signal arrivals with the highest frequency components, which are crucial for the spatial resolution, are actually recorded from exploration depths of up to 2,000 metres and deeper. This applies in particular to intermediate-depth geothermal energy projects and with the search for CO_2 storage solutions [1], [3] and [5].

Basic guidelines are given on the choice of parameters for hybrid seismic data acquisition.

1 Einführung

Ziel dieses Artikels ist es, Geowissenschaftlern mit Grundkenntnissen über oberflächengeophysikalische Erkundungsmethoden das Verfahren der Hybridseismik anhand von Bildbeispielen so anschaulich wie möglich zu erklären.

Hybridseismik ist keine neue Methode. Neu ist das charakteristische Merkmal der Hybridseismik als symbiotische Kombination der Reflexions- mit der Refraktionsseismik. Dabei wird für jedes Messziel die Nachteile der einen Methode durch die Vorteile der anderen wettgemacht.

Die klassische Reflexionsseismik eignet sich zur Kartierung des strukturellen Aufbaus des Untergrunds bis in Tiefen von mehreren Kilometern, wie z.B. in der Erdölindustrie. Sie ist als alleiniges Verfahren jedoch methodisch nicht einsetzbar für oberflächennahe Abklärungen, wie z.B. bei Baugrund- oder hydrogeologischen Erkundungen, weil sie in geringen Tiefen nicht in der Lage ist die Verteilung der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen.

Anforderungen bzw. Eignung zur Erreichung der Messziele	Reflexionsseismik	Refraktionstomographie
Auflösungsvermögen in geringen Tiefen (← 10 m)	schlecht	gut
Auflösungsvermögen in grösseren Tiefen (→ 40 m)	gut	begrenzt
Erkundungstiefe	sehr hoch	methodisch begrenzt
Indikator f. Gesteinsfestigkeit / Auflockerung / Permeabilität	begrenzt	sehr gut
Detektion von Hohlräumen	schlecht	gut
Detektion von Geschwindigkeitsinversionen (hidden layers)	schlecht	gut
Detektion von Störungs- und Bruchzonen	gut	begrenzt

Tabelle 1

Die Refraktionsseismik, seit Mitte der 90er Jahre mittlerweile auf dem Markt als weiterentwickeltes tauchwellentomographisches Verfahren, ist hingegen sehr wohl dazu geeignet, hat methodisch bedingt aber die Nachteile der beschränkten Erkundungstiefe und des verminderten lateralen Auflösungsvermögens.

Falls einzeln angewandt haben diese beiden Methoden je nach Fragestellung und gewünschter Erkundungstiefe die folgenden Vor- und Nachteile (s. Tabelle 1).

Wurden früher die Refraktions- und Reflexionsseismik als eigenständige Disziplinen mit getrennter Datenerfassung und individueller EDV durchgeführt, so sind heute die Datenerfassung und das Processing beider Verfahren gemäss der Hybridseismik miteinander eng verzahnt ([1], [3], [5], [6] & [7]).

Der Grundgedanke der authentischen Hybridseismik besteht darin, dass die für die EDV einer hochauflösenden Reflexionsseismik benötigte genaue Kenntnis der Verteilung der oberflächennahen seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten mit dem Verfahren der refraktionstomographischen Inversion hergeleitet wird.

Dabei kommt dem Grundsatz der räumlichen Deckungsgleichheit (spatial coherence) der Ergebnisse der Refraktionstomographie und der Reflexionsseismik für die detailgenaue Abbildung der strukturellen Aufbaus des Untergrunds auch bis in grössere Tiefen von 2 - 3 km eine besondere Bedeutung zu.

Die Hybridseismik ist der Schlüssel für die detailgenaue strukturelle Kartierung und Beschaffenheit des oberflächennahen Untergrunds bei ingenieur- und hydrogeologischen Untersuchungen einerseits, und andererseits

für die Detektion wasserführender Zonen bis rund 2'500 m der mitteltiefen Geothermie.

2 Von dem im Feld erfassten Rohdaten zur Abbildung des Untergrundes

Die Erfassung seismischer Daten erfolgt in der Regel entlang linearer Auslagen von Geophonen (seismischer Erschütterungsaufnehmern). Die von der seismischen Quelle abgegebene Schallenergie breitet sich als halbkugelförmige Wellenfront im Untergrund in alle Richtungen aus.

Die Ausbreitungsrichtung der Schallwellenfront an jeder Stelle im Untergrund wird durch die senkrecht zur Wellenfront stehenden Wellenstrahlen (ray paths) angezeigt. Diejenigen Wellenstrahlen, die mit zunehmender Tiefe

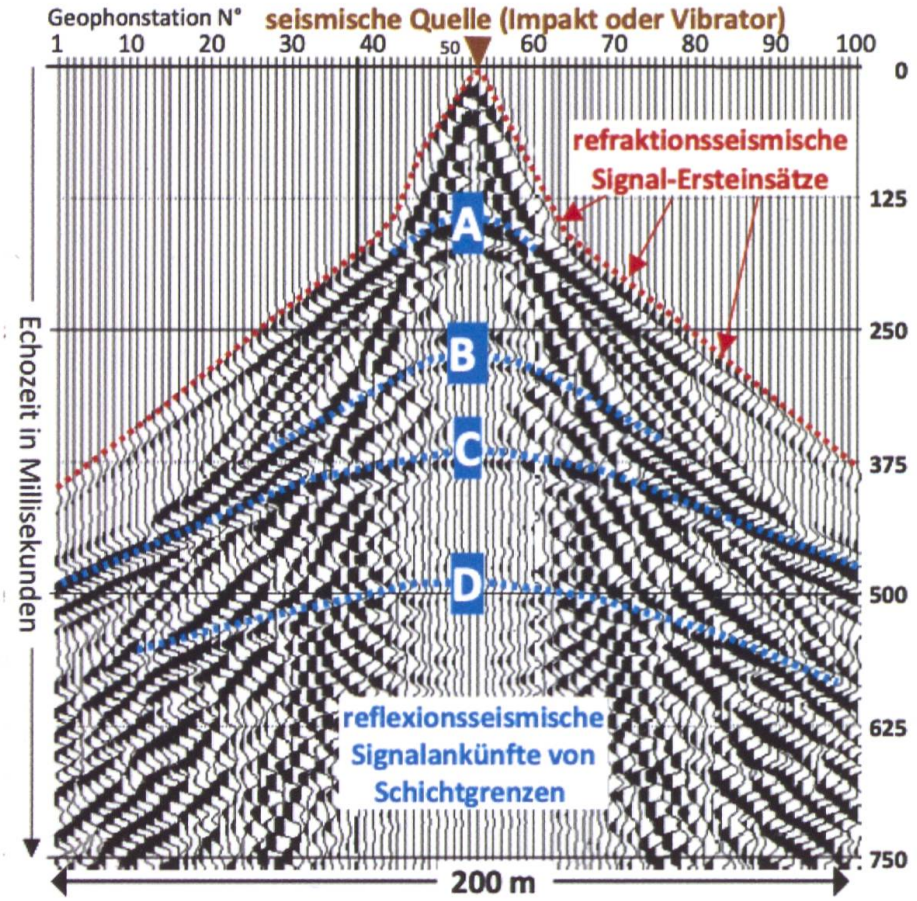

Fig. 1: Rohdatensatz einer Feldaufzeichnung mit einer Messauslage von 100 Geophonstationen in Abständen von 2 m über einem Untergrund mit horizontaler Lagerung von vier Schichten, in denen die jeweiligen seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in lateraler Richtung konstant sind.

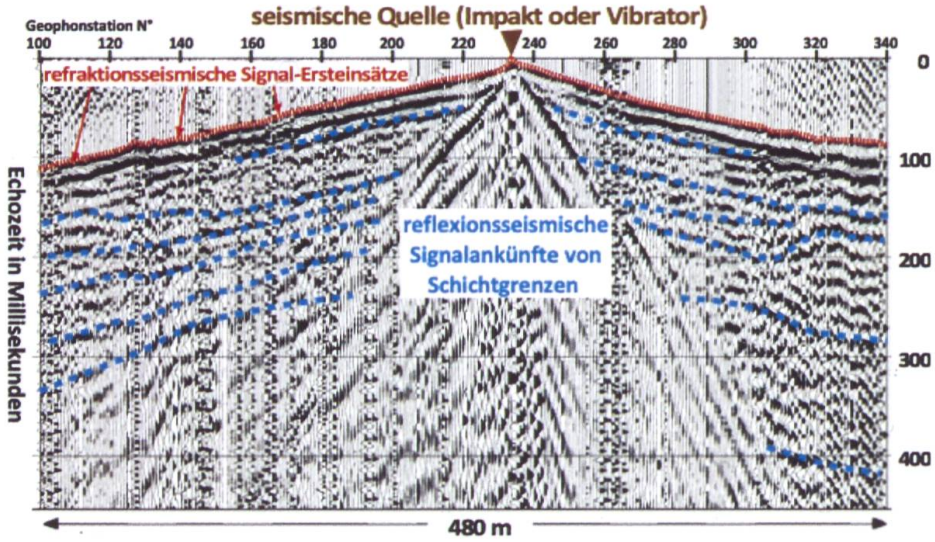

Fig. 2: Rohdatensatz einer Feldregistrierung über einem heterogen strukturierten Untergrund mit einer Messauslage von 240 Geophonstationen in Abständen von 2 m.

wegen der grösseren Gesteinsfestigkeit und dementsprechend höherer Geschwindigkeit von der Vertikalen in horizontale Richtung gebrochen und wieder an die Oberfläche abgelenkt werden, erzeugen entlang der Geophonauslage die sog. refraktierten Ersteinsätze (siehe rot markiert).

Spätere Signaleinsätze nach den Refraktionsankünften stammen von Wellenstrahlen, die (sub-)vertikal in den Untergrund eindringen und an Formationsgrenzen an die Oberfläche zurückgeworfen werden (s. blau markierte Reflexionseinsatzsignale A bis D).

Die Fig. 2 zeigt einen Rohdatensatz wie er sich in der gelebten Praxis auf dem Bildschirm bei dessen Registrierung im Feld unter geologisch heterogenen Bedingungen präsentiert:

Die refraktionsseismischen Ersteinsätze (rot eingefärbt) sind gut erkennbar, was auf einen geringen Pegel der externen Störeinflüsse durch Verkehr und Industrie hinweist. Hingegen sind die Reflexionseinsätze in blau aufgrund der komplexen Ablagerungsstrukturen häufig in Bruchstücken und weniger deutlich erkennbar.

In der Regel beträgt der Abstand zwischen den Feldaufzeichnungen das 2- bis 3-fache des Abstandes zwischen den Geophonstationen, d.h. bei einem Geophonabstand von 2 m erfolgt die Registrierung der Datensätze in Abständen von 4 m bis 6 m.

EDV-Schritt 1 der Hybridseismik, die refraktionstomographische Auswertung (Inversion)

Die erste Phase der EDV besteht darin, dass entlang einer Messlinie von den in regelmässigen Abständen [hier 6 m] registrierten Rohdatensätzen – wie in Figur 2 – die rot markierten Laufzeitkurven der refraktionsseismischen Ersteinsätze zusammengefasst werden (Figur 3a).

Auf einem Messprofil von knapp 1'100 m Länge, wie in Figur 3 dargestellt, wird von den rund 190 Laufzeitkurven das seismische Geschwindigkeitsfeld in Figur 3b bis in rund 180 m Tiefe abgeleitet.

Die Herleitung der Verteilung der Geschwindigkeiten erfolgt analytisch-arithmetisch oder gemäss iterativen Modellierungsverfahren. Beide Methoden haben je nach Komplexität der Untergrundstrukturen ihre Vor- und Nachteile. Bei deren Anwendung kommt der Erfahrung des auswertenden Geophysikers,

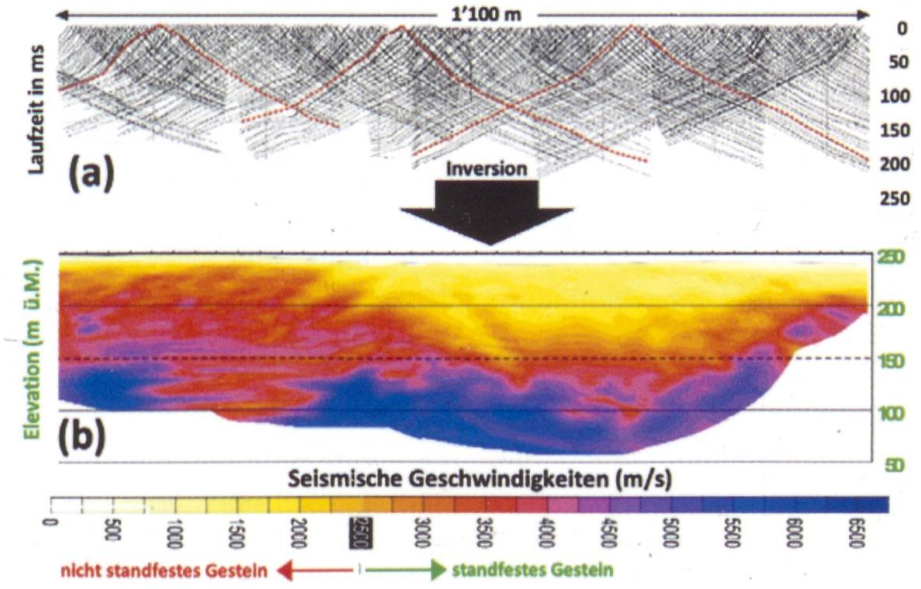

Fig. 3: Die obere Darstellung (a) zeigt die rund 290 refraktionstomographischen Ersteinsatz-Laufzeitkurven auf dem rund 1'100 m langen Profil. In (b) unten ist durch die refraktionstomographische Inversion lückenlos abgeleitete farbkodierte Verteilung der seismischen Geschwindigkeiten dargestellt.

sowie der Leistungsfähigkeit der verwendeten Software eine hohe Bedeutung zu.

Die refraktionstomographische Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Figur 3b ist hier methodisch bedingt bis in eine Tiefe von rund 180 m beschränkt.

Diesen Nachteil kompensiert die Refraktionstomographie damit, dass allein sie in der Lage ist abrupte Geschwindigkeitsvariationen von mehreren Tausend m/sec sowohl in vertikaler wie auch in lateraler Richtung mit ausreichender Genauigkeit zu kartieren.

Grössere Tiefenbereiche können ggfs. durch längere Geophonauslagen oder mittels Fernanregung in den Verlängerungen von ausserhalb [off end] der Geophonauslage erfasst werden.

EDV-Schritt 2 der Hybridseismik, die reflexionsseismische EDV (für reflexionsseismisch Eingeweihte)

Der zweite Schritt der hybridseismischen EDV besteht in der Inversion der reflexionsseismischen Signaleinsätze (blau eingefärbt in Figur 1 und Figur 2). Dem refraktionsstomographisch abgeleiteten Geschwindigkeitsfeld in Figur 3b kommt dabei die Schlüsselrolle zu, da reflexionsseismische Standard-Softwarepakete nicht über geeignete Analysemethoden zur Bestimmung der seismischen Geschwindigkeitsverteilung im oberflächennahen Tiefenbereich verfügen.

Die detailgenaue Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund gleich ab der Oberfläche ist jedoch unverzichtbar für die verzerrungsfreie Abbildung und für die Bestimmung der exakten Tiefenlage der tektonisch-geologischen Strukturelemente. Dies nicht nur im oberflächennahen Tiefenbereich der obersten 3 - 500 m, sondern auch bei Erkundungstiefen von weit über 1 km.

Gemäss der herkömmlichen Praxis werden aufgrund rudimentärer Annahmen des strukturellen Aufbaus und der Lithologie sowie einer Abschätzung des seismischen Geschwindigkeitsfeldes, Laufzeitkorrekturwerte, sog. statische Korrekturen abgeleitet. Diese Korrekturwerte, in denen auch das Relief der Oberfläche berücksichtigt wird, sind je nach geologischer Komplexität und topographischer Unebenheiten entprechend fehlerhaft. Auch bei deren Anwendung ist zudem die Wahl mehrerer Processingparameter stark subjektiv geprägt.

Das hybrid-reflexionsseismische EDV-Verfahren unterscheidet sich deshalb grundlegend von der konventionellen reflexionsseismischen EDV. Das detailgenaue refraktionstomographische Geschwindigkeitsfeld in Figur 3b wird direkt in das übergeordnete Feld der Stapelgeschwindigkeiten (NMO-Stapelgeschwindigkeiten) integriert. Die topographischen Höhenkorrekturen werden zusammen mit der abschliessenden post stack Laufzeit/Tiefen Wandlung angewendet.

Auf diese Weise werden alle Fehler und Unsicherheiten vermieden, die durch subjektive Annahmen bei der Ableitung und Anwendung der statischen Korrekturen entstehen. Das gesamte (NMO-) Geschwindigkeitsfeld wird vollständig aus den aufgezeichneten Daten selbst und nicht aufgrund ungenauer Modellannahmen abgeleitet.

Unterhalb der methodisch begrenzten refraktionseismischen Erkundungstiefe von rund 180 m in Figur 3b betragen die Geschwindigkeiten mehr als 4'000 m/s. Signifikante Zunahmen von mehr als 5% der seismischen Geschwindigkeiten über eine Tiefenzunahme von 200 m im tieferen Felsuntergrund lassen sich mittels herkömmlicher reflexionsseismischer Analyseverfahren ermitteln und finden Berücksichtigung in der Gesamtanalyse der Geschwindigkeiten über das ganze Profil (sog. NMO-velocities).

Figur 4 zeigt das reflexionsseismische Tiefenprofil mit unmittelbar ab der Oberfläche gut definierten Ablagerungsstrukturen in den obersten 50 m.

Durch transparente Überlagerung des refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfeldes der Figur 3b auf das reflexionsseismische Tiefenprofil Figur 4 wird das hybridseismische Profil in Figur 5 erstellt.

In dieser gemeinsamen Darstellung der Ergebnisse beider Methoden in Figur 5 werden die geologisch-tektonischen Strukturen gemeinsam mit der Verteilung der Gesteinsfestigkeiten zur lithologischen Identifizierung und z.B. zur Abschätzung der Permeabilität von möglicherweise wasserführenden Schichten aufgezeigt.

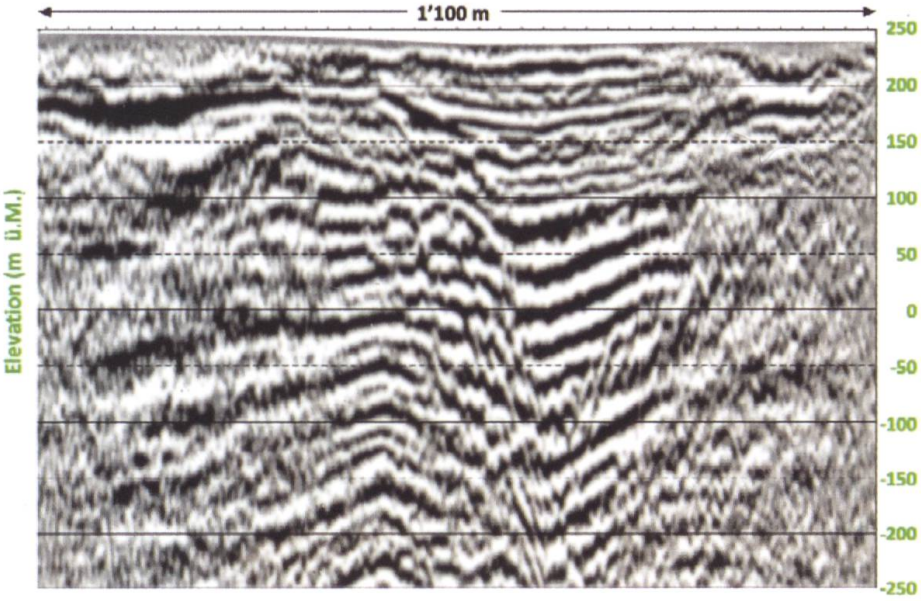

Fig. 4: Reflexionsseismisches Tiefenprofil erstellt mittels des in Fig. 3b abgeleiteten seismischen Geschwindigkeitsfeldes.

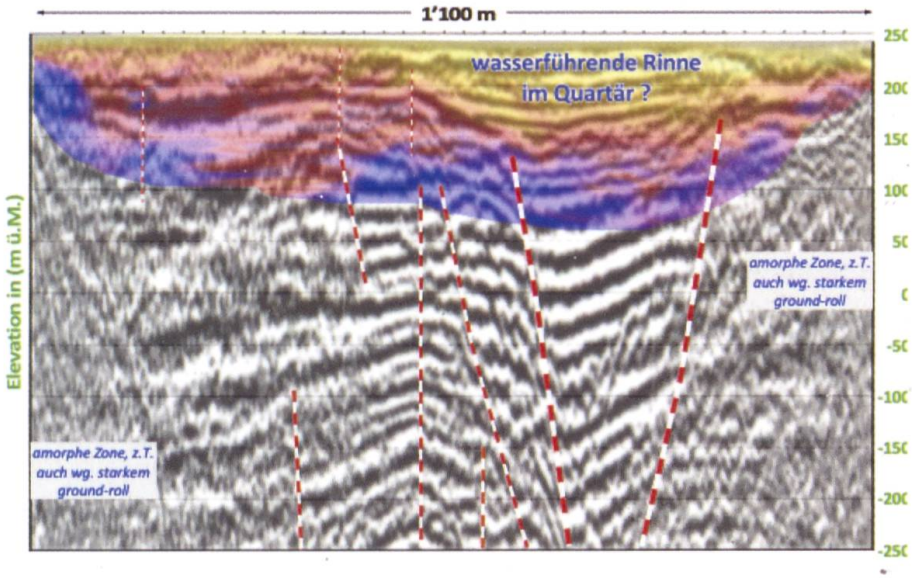

Fig. 5: Interpretation des hybridseismischen Profils im Rahmen einer Grundwassererkundung bei F-Venère, Dépt. Haute-Saône.

3 Räumliche Deckungsgleichheit als Kriterium authentisch hybridseismischer EDV

Strukturelemente müssen in der reflexionsseismischen Wiedergabe und durch das refraktionstomographische Geschwindigkeitsfeld sowohl in ihrer Lage und Form deckungsgleich abgebildet werden, um bei der geologischen Interpretation Mehrdeutigkeiten auszuschliessen (Figur 6).

Die **räumliche Deckungsgleichheit** *[spatial congruence]* ist Garant für eine bislang unereicht hohe Übereinstimmung seismischer Messergebnisse mit der Wirklichkeit. Wie in Figuren 5 bis 8, 10 und 11 aufgezeigt, erfüllt die räumliche Deckungsgleichheit die zentrale Anforderung an seismische Abbildungen des Untergrunds, nämlich dass wesentliche Grundzüge betreffend strukturellen Aufbaus und der Gesteinseigenschaften durch die Daten selber und möglichst wenig durch subjektiv gefärbte Interpretation darzustellen sind.

So sind z.B. in Figuren 5 bis 8 & 10 lediglich die rot/weiss gestrichelt eingezeichneten Störungen/Brüche der subjektiven Deutung seitens des interpretierenden Geophysikers zuzuschreiben.

Der Bezug hybridseismischer Resultate zur Wirklichkeit ist in Figur 7 durch die Übereinstimmung der seismischen Ergebnisse mit der in zwei Bohrungen bei einem Pumpspeicherprojekt im Tirol angetroffenen Felsoberfläche illustriert. Deren Verlauf und Tiefenlage ist entlang des Profils mittels der hell blauen Geschwindigkeits-Isolinie von 3'500 m/s detailliert dokumentiert.

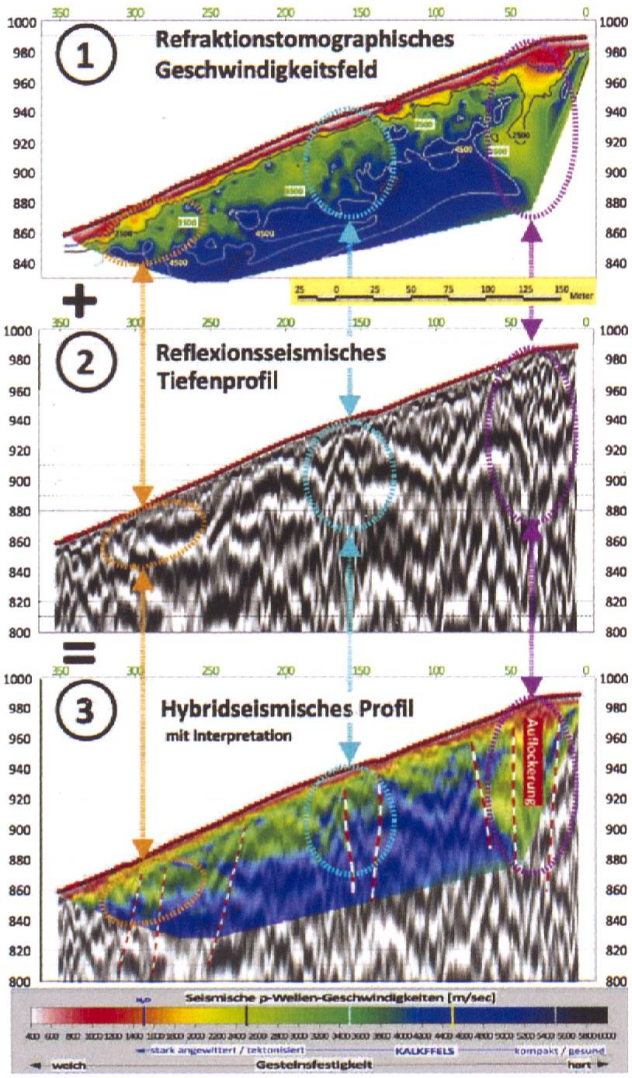

Fig. 6: Bildliche Erklärung des Prinzips der räumlichen Deckungsgleichheit anhand von Daten entnommen von [2] im Rahmen einer hybridseismischen Baugrunderkundung bei einem Deponiestandort in der Steiermark.

4 Der allgemeine Nutzen der Hybridseismik

Wie in Figur 7 dargestellt, kommt der Nutzen der Hybridseismik v.a. bei der detaillierten Darstellung des strukturellen Aufbaus und der Verteilung der Gesteinsfestigkeiten im oberflächennahen Tiefenbereich zum Tragen. Die genaue Kenntnis der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in der Lockergesteinsüberdeckung und in der Verwitterungszone des Felsuntergrunds wirkt sich aus qualitativen Gründen auch auf die Abbildung des reflexionsseismisch erfassten tieferen Untergrund aus bezüglich

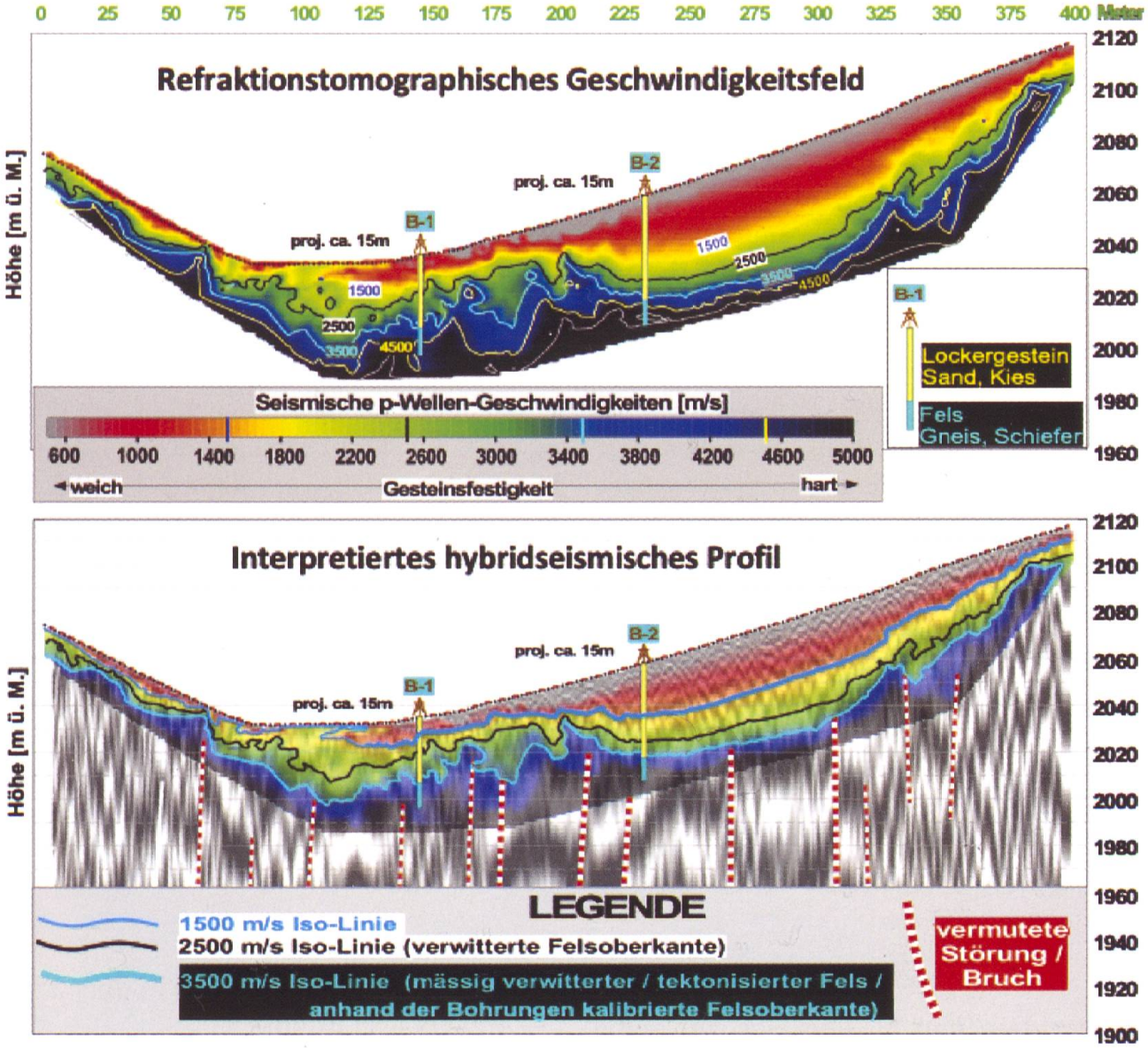

Fig. 7: Bestätigung der Tiefenlage der Felsoberkante durch Kalibration anhand von Bohrergebnisse und deren detaillierte Kartierung der Topographie (Publikation mit freundlicher Genehmigung der TIWAG Innsbruck).

- des allgemein erhöhten Auflösungsvermögens, und
- der allgemein verbesserten Genauigkeit der Tiefenangaben.

Das knapp 2 km lange Hybridseismikprofil in Figur 8 (siehe Anhang) wurde im Rahmen einer Kampagne zur Erkundung potenzieller Erdfallgefahrenbereiche erstellt. Die Vorgaben der mit einem mittelschweren Fallgewicht erfassten Daten waren eine Erkundungstiefe von 700 m mit einer möglichst hohen Auflösung in den obersten 100 m. Die Abstände zwischen den 320 Geophonstationen der 640 m langen aktiven Geophonauslage sind 2 m und zwischen den Anregungspunkten 6 m.

Die hohe Auflösung der reflexionsseismischen Abbildung der tektonischen Strukturen bis in die Zieltiefe ist vorwiegend auf die detaillierte Erfassung des refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfeldes bis in 300 m Tiefe, d.h. über die obersten 100 m des Felsuntergrunds zurückzuführen

5 Grafische Darstellung der Entwicklung der Explorationsseismik seit 1970

In Figur 9 ist anhand von Gesamtleistungskurven die technisch-wissenschaftliche sowie wirtschaftliche Entwicklungsgeschichte der Refraktionstomographie, Reflexionsseismik und der Hybridseismik aufgetragen.

Die vertikale Achse zeigt den Entwicklungsstand zu verschiedenen Zeitenabschnitten auf der horizontalen Achse zwischen 1970 und 2024 in % im Vergleich zum heutigen Stand der Technik und Popularität von 100%. Die variable Strichdicke der Kurven in den verschiedenen Zeitabschnitten illustriert zusätzlich bildlich den jeweiligen Entwicklungsstand der drei seismischen Erkundungsmethoden.

Die Knickpunkte mit zunehmender Steigung markieren die Zeitpunkte, zu denen signifikante methodische Verbesserungen und leistungsfähigere IT-Komponenten auf dem Markt erschienen sind.

Kommentare und Meilensteine zur zeitlichen Entwicklung seismische Explorationsverfahren in Figur 9

1980 – 1985
Allgemeine methodische Verbesserungen der Refraktions- und Reflexionsseismik; Beginn der 3D-Seismik

1984 - 1985
Leistungsstarke PC's auf dem Markt für reflexionsseismische EDV.

Um 1995
Refraktionsseismischer Entwicklungssprung zur Refraktionstomographie (u.a. Möglichkeit zur Kartierung von Geschwindigkeitsinversionen (hidden layers).

2000 – 2010
Markteinführung der Hybridseismik und damit die Aufwertung der Reflexionsseismik für untiefe Erkundungen.

Ab 2015
Die Verfahren der Refraktionstomographie und Reflexionsseismik verbleiben methodisch bedingt als nicht vollwertige Erkundungsverfahren, da sie einzeln angewendet nicht den gesamten Untergrund, d.h. oberflächennah und bis in grössere Tiefen abbilden (s. auch Tabelle 1 der aufgeführten Nachteile beider Methoden im Kapitel 1 „EINFÜHRUNG").
Universell anwendbar ist allein die Hybridseismik, also die Symbiose der beiden Verfahren!

Die Verheiratung der Reflexionsseismik mit der Refraktionstomographie ist als Vollendung einer ganzheitlichen Seismik zu werten. Deren Ergebnisse sind vergleichbar mit denen des auf hochkomplexen Modellierungsmethoden basierenden Verfahrens der *full wave form inversion.*

6 Anwendungsrichtlinien in der Praxis und Ausblick

Dem Kriterium der räumlichen Deckungsgleichheit für die authentisch hybridseismische EDV, wie oben und in [3] und [5] beschrieben, ist die geeignete Parameterwahl für die Datenerfassung vorangestellt. Diese wird durch die maximalen Abstände zwischen den einzelnen Geophonstationen und zwischen den bei der Datenerfassung im Feld angewandten Abständen zwischen den seismischen Anregungspunkten ausgedrückt. Die räumliche Datendichte ist der entscheidende Parameter für die Detailgenauigkeit des seismischen Abbildung.

Basierend auf der gewünschten Erkundungstiefe sind für die hybridseismische Datenerfassung folgende grundlegenden Regeln anzuwenden, um eine ausreichend reflexi-

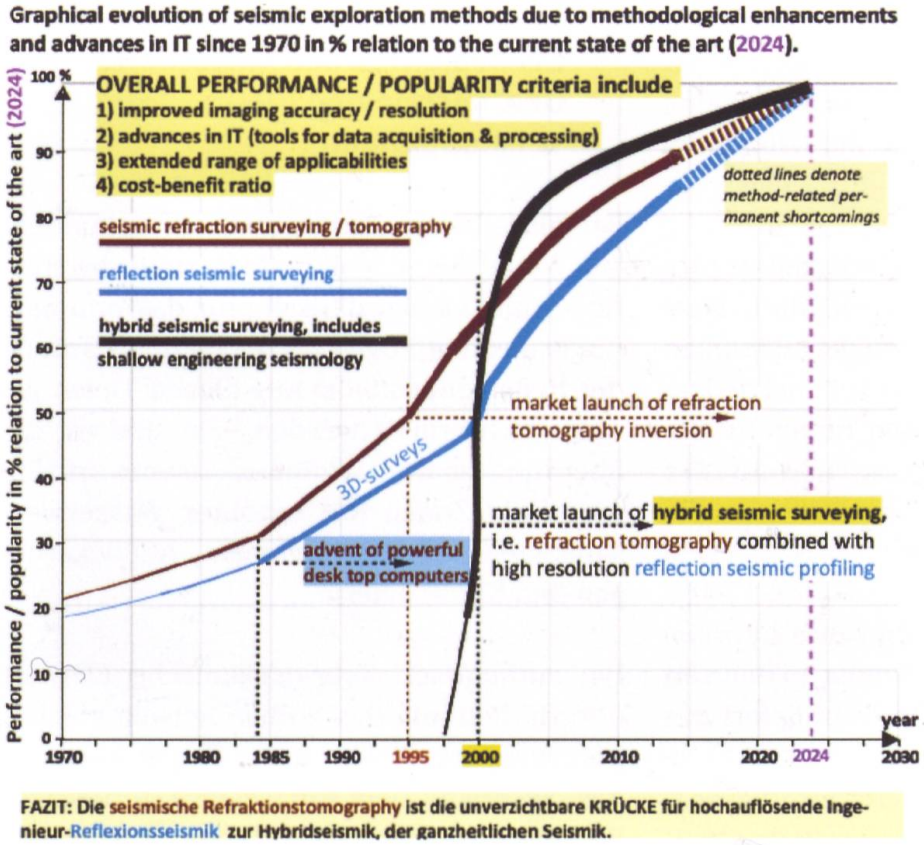

Fig. 9: Prozentuale Leistungs- / Popularitätsentwicklung der Refraktionstomographie, Reflexionsseismik und der Hybridseismik seit 1970 im Vergleich zum heutigen Stand der Technik betreffend Benutzerfreundlichkeit, Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten und des Kosten/Nutzen-Verhältnisses.

onsseismische Datendichte und eine optimale refraktionstomographische Erkundungstiefe sicher zu stellen:

1) Die Abstände der Empfängerstationen dR sollten 1/60 bis 1/30 der erforderlichen Erkundungstiefe Z nicht überschreiten (Anforderung an die Reflexionsseismik).
2) Der Abstand der Anregungspunkte dT sollte nicht grösser gewählt werden, als 1 – 3 mal den Abstand der Empfängerstationen (Anforderung an die Reflexionsseismik).
3) Die Länge der aktiven Geophonauslage sollte rund dreimal grösser sein als die gewünschte Erkundungstiefe (Anforderung an die Refraktionstomographie).

Der Länge der aktiven Geophonauslage in Regel 3) kommt insofern die Bedeutung zu, dass sie unter den gegebenen geologischen Umständen lang genug sein muss, um das refraktionstomographische Geschwindigkeitsfeld bis

a) mindestens der Untergrenze der quartären Deckschicht und/oder

b) bis in eine Tiefe des Felsuntergrunds erfassen muss, ab der nur noch geringfügige Geschwindigkeitszunahmen von weniger als 5% pro 200 m zu erwarten sind. Unterhalb dieser Tiefen kommen die Verfahren der reflexionseismischen Geschwindigkeitsanalyse zum Zuge, so dass über den gesamthaft zu erkundenden Tiefenbereich die Verteilung der Geschwindigkeiten lückenlos mit zuverlässig gemessenen Daten bestimmt werden können.

In der Regel geht schon bei der Projektierung hervor, welche entscheidenden Informationen über die Beschaffenheit des Untergrundes mehrheitlich von der Refraktionstomographie oder der Reflexionsseismik zu erwarten sind. Figur 10a (siehe Anhang) zeigt das hybridseismische Profil, das im Rahmen einer geplanten Sesselbahn entlang der Abfolge der Stützmast-Standorte zur Abklärung der Baugrundstabilitäten erstellt wurde.

Die Datenerfassung in topographisch schwierigem Gelände erfolgte mit Schlägen eines 6 kg Hammers in Abständen von 5 m in eine 800 m lange Geophonauslage mit 320 Stationen in Abständen von 2.5 m.

Da die seismischen Geschwindigkeiten proportional zur Gesteinsfestigkeit sind, lässt sich anhand der Geschwindigkeitsisolinien von 500 m/sec bis 3'000 m/sec bei jedem Standort der 13 Stützmasten qualitativ die Baugrundstabilität ein- und quantitativ der Arbeitsaufwand für die Verankerung der Mastfundamente abschätzen.

Die praktisch gesamte erwünschte Information über die Gesteinsfestigkeiten an den verschiedenen Stützmast-Standorten liefert das bis in Tiefen von rund 100 m farbkodierte refraktionstomographische Geschwindigkeitsfeld wie in Figur 10b auf dem Profilabschnitt zwischen den Masten 6 und 10 detailliert vergrössert dargestellt.

Beim im Rahmen eines Geothermieprojekts erfassten Seismikprofil in Figur 11 (siehe Anhang) mit einer Zieltiefe von mehr als 3'000 m das Umgekehrte der Fall, nämlich dass praktisch 100% der gewünschten Information vom Ergebnis der Reflexionsseismik kommt.

Neben der ausgezeichneten Reflektivität des Untergrunds bis zur Endtiefe von 4'300 m ist die qualitativ sehr gute Datenqualität des Profils nicht zuletzt auf die geringe Quartärüberdeckung von wenigen Metern und dem darunter liegenden horizontal gelagerten und kompetenten Molassefels mit Geschwindigkeiten von mehr als 3'500 m/s zurückzuführen.

Diese hier besonders vorteilhaften Rahmenbedingungen, d.h. das Fehlen oberflächennaher heterogen strukturierter Tiefenbereiche mit stark variierenden Geschwindigkeiten bis in mehrere 100 m Tiefe, und einer flachen horizontalen Oberfläche, sind in in der gelebten Praxis jedoch die Ausnahme.

7 Bedeutung der Hybridseismik bei Projekten der mitteltiefen Geothermie und CO_2-Verklappungen

Bei mitteltiefen geothermischen Erkundungen bis in Tiefen von 2 - 3 km stellt die Hybridseismik sicher, dass die für das optimale Auflösungsvermögen hohen Frequenzanteile der Reflexionsantwort aus diesen Tiefen gerade noch erfasst werden. Sie sind es, die über die Signatur der Reflexionsantwort Hinweise auf Zonen mit erhöhter Wasserwegsamkeiten wie Verkarstungen, Auflockerungen und Klüfte liefern.

Die authentisch hybridseismische EDV ist erforderlich, um das Vorhandensein solcher potenziell wasserführender Zonen aufzuzeigen. Sie leistet dem Processing-Geophysiker Beihilfe dazu, der Versuchung zu widerstehen – im Bestreben einer Verbesserung der Kontinuität der Reflexionseinsätze – solche aufschlussreiche, signalcharakterische Hinweise bei der reflexionsseismischen EDV durch übertrieben starke kosmetische Mehrspur-Amplitudenausgleichsverfahren zu verwischen. Zu solchen Verfahren gehören multi-trace lateral coherency filtering, weighted running trace mixing, residual static corrections, common reflection surface (CRS) stacking und die Migration. Diese Amplitudenausgleichs- und -regularisierungsmethoden sind mit Bedacht anzuwenden [1], [3] & [5].

Die in letzter Zeit zunehmend im Fokus stehenden CO_2-Sequestrationsprojekte haben den Tiefenbereich zwischen 800 m und 1'300 m als die technisch geeignete Lagerstättentiefe im Visier. Aus technischer wie auch aus wirtschaftlicher Sicht bietet sich über diesen Tiefenbereich die Hybridseismik als empfehlenswerte Vorerkundungsmethode an.

Literatur und Referenzen

[1] Frei, W., Martin, D. & Baumann, M. 2021: Seismik im Tiefenbereich bis 2000 m; Swiss Bulletin of Applied Geology Vol. 26/1 2021.

[2] Frei, W. & Martin, D. 2021: Tiefstpreis oder Bestpreis? – Richtlinien zur Ausschreibung authentischer Hybridseismik; Tagungsband 23. GEOFORUM Symposium A-Umhausen; 14.-15. Oktober 2021.

[3] Frei, W., Martin, D. & Baumann, M.; 2020: Hochauflösende seismische Vorerkundung - eine wirksame Massnahme zur Minderung des finanziellen Risikos bei Geothermieprojekten; Swiss Bulletin of Applied Geology Vol. 1+2 / 2020.

[4] Frei, W. 2019: Hybrid seismic surveying for detailed characterization of the shallow and intermediate depth subsurface; Extended abstract of a poster presented at the Modern2020; 2nd International Conference about Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste; 9. – 11. April 2019 – Paris.

[5] Frei, W., Bauer, R., Corboz, Ph. & Martin, D.; 2015: Pitfalls in processing near-surface reflection seismic data: Beware of static corrections and migration; The Leading Edge; November 2015; v. 34 no. 11, p. 1382 – 1385; doi: 1190; Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA.

[6] 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; Paper presented at the 4th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC'4) at Porto-de Galinhas, Brazil, 18-21 Sept. 2012.

[7] Frei, W. & Keller, L. 2000: Hybride Seismik - eine verbesserte Methode zur Verwertung des Aussagepotenzials seismischer Daten Bull. angew. Geol. Vol. 5, Nr. 2, p. 229 - 236; December 2000.

[8] Frei, W. 1995: Refined field static corrections in near surface reflection seismic profiling across rugged terraln; The Leading Edge, April 1995, Vol. 14, No. 4, pp. 259-262; Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA.

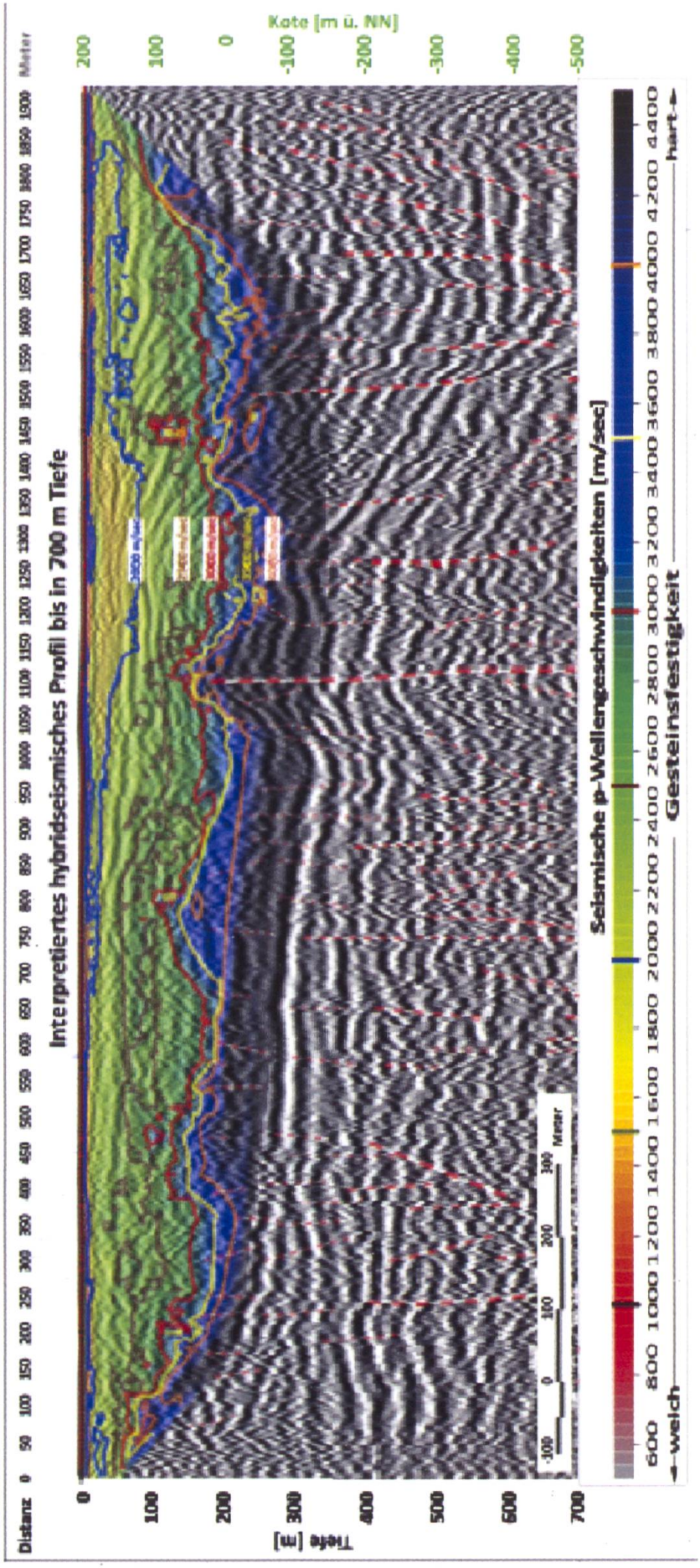

Fig. 8: Seismische Darstellung der Untergrundstrukturen in urbaner Umgebung der Stadt D-Nordhausen (2022) zeigt den universellen Nutzen der Hybridseismik für praktisch alle Anwendungsbereiche und -tiefen.

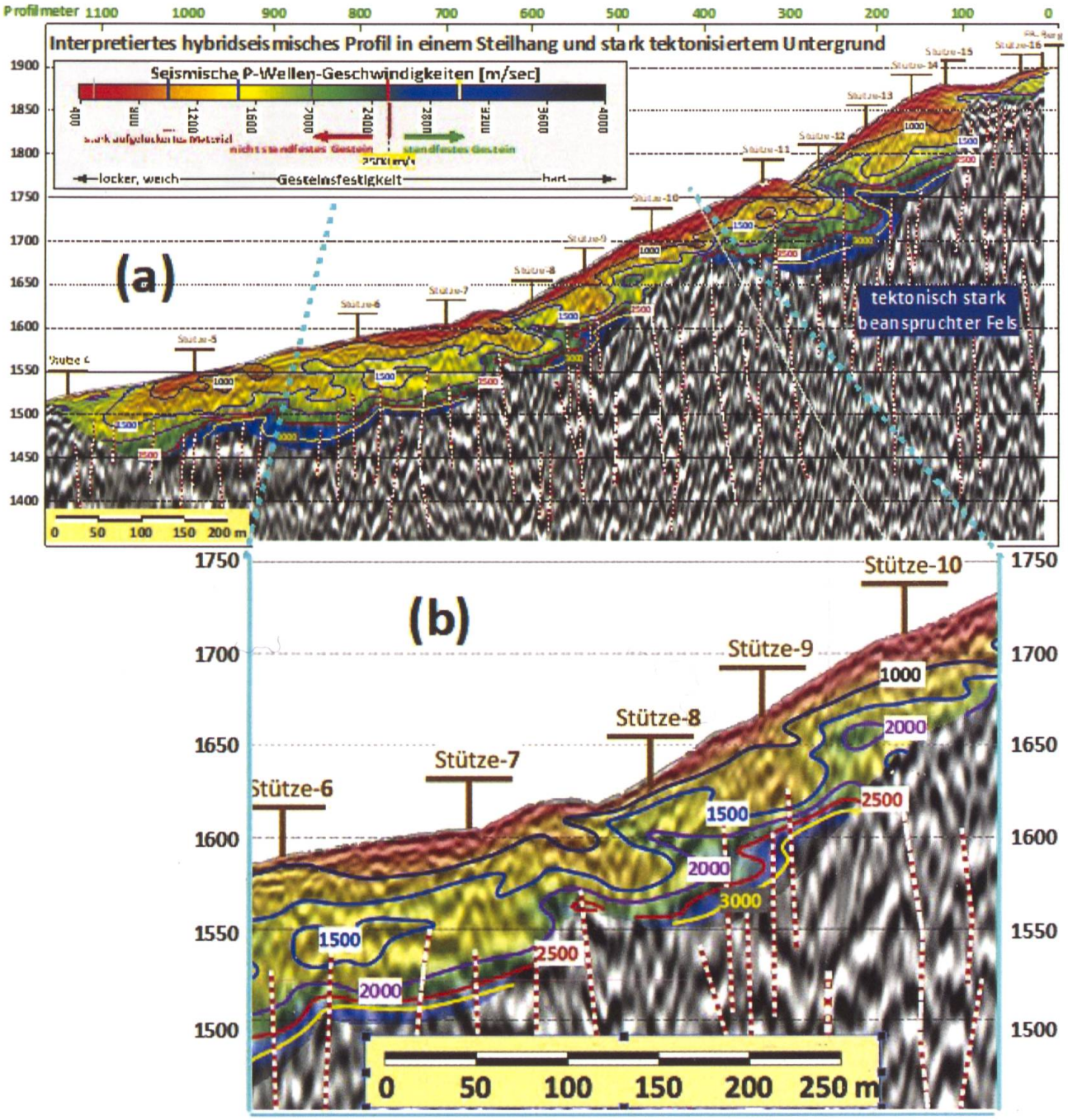

Fig. 10: Bestimmung der Gesteinsfestigkeiten im Fundament der 13 Stützmasten im Rahmen eines geplanten 8-er-Sesselbahn-Projekts bei A-Kirchberg / Tirol in der oberen Darstellung (a). Der untere, vergrösserte Profilabschnitt (b) zeigt anhand der Isogeschwindigkeits-Konturlinien detailliert die Gesteinsfestigkeiten im Nahbereich jedes Mast-Standorts.

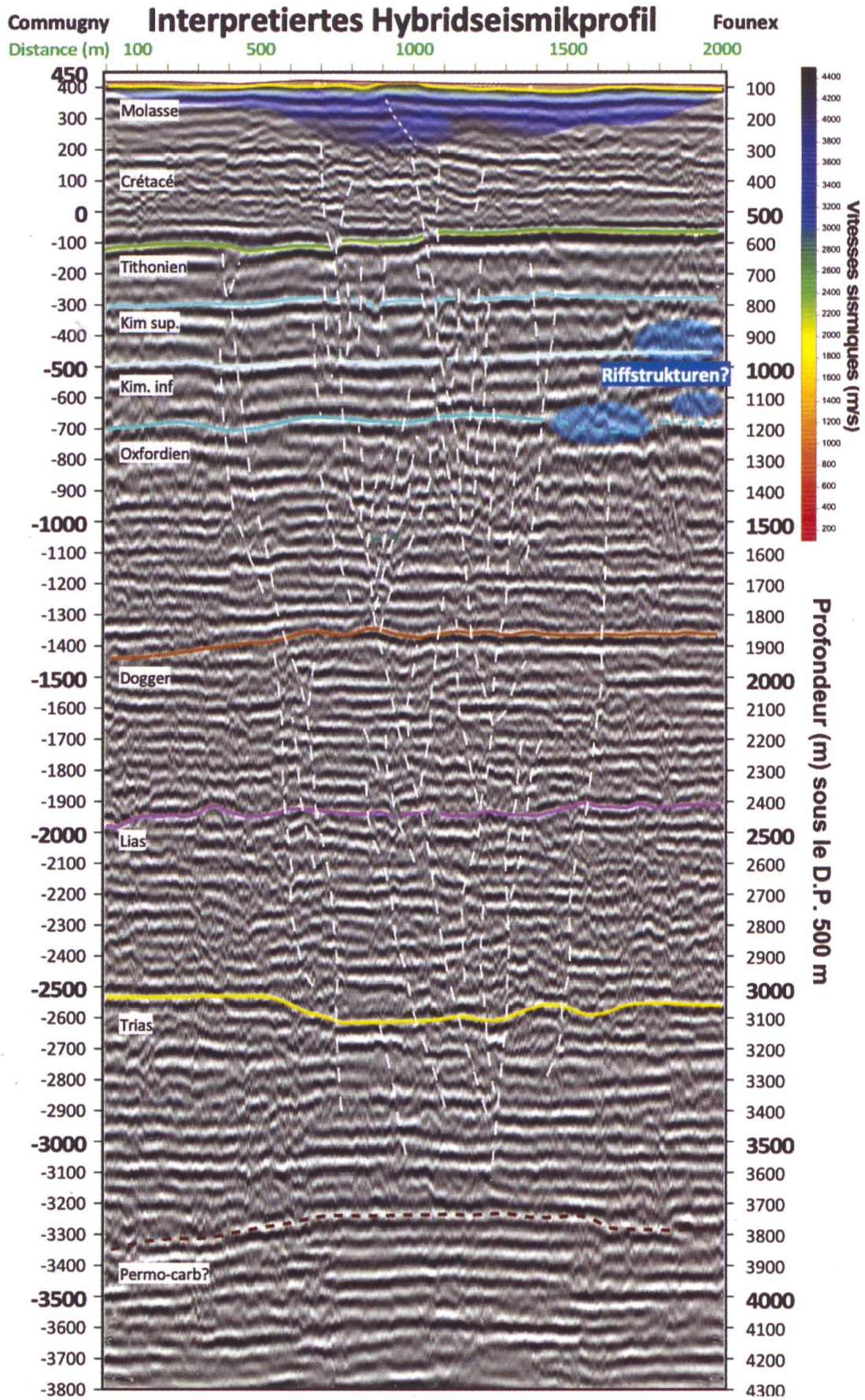

Fig. 11: Hybridseismisches Profil erstellt mit einem mittelschweren Fallgewicht von 10 Nm Impaktenergie als seismische Quelle im Rahmen einer geothermischen Erkundung in der Region CH-Coppet VD.
Die übrigen Messgrössen: Länge der aktiven Geophonauslage: 900 m; Geophonabstand 2.5 m; Anregungsabstand 7.5 m.