

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: 25 (2020)

Heft: 1-2

Artikel: Hochauflösende seismische Vorerkundung : eine wirksame Massnahme zur Minderung des finanziellen Risikos bei Geothermieprojekten

Autor: Frei, Walter / Martin, Dieter / Baumann, Marco

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-977311>

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>

Hochauflösende seismische Vorerkundung – eine wirksame Massnahme zur Minderung des finanziellen Risikos bei Geothermieprojekten

Walter Frei¹, Dieter Martin¹, Marco Baumann²

Zusammenfassung

Bei hydrothermalen Geothermieprojekten gilt grundsätzlich die alte Bergbauregel «vor der Hacke war et duster!», da die grosse Unbekannte die Wasserwegsamkeit in der Zielformation ist. Erst nach erfolgreich durchgeführter Bohrung und allfälliger Stimulationsmassnahmen ist das Fündigkeitsrisiko bestimmt, d.h. der Wasserfluss ist bekannt. Optimale Verhältnisse in Bezug auf Wasserwegigkeit sind entweder in tektonisch zerklüftetem oder karstifiziertem Gestein zu erwarten.

Das Augenmerk für mitteltiefe Geothermieprojekte ist deshalb auf die Ortung von (wasserführenden) Störungen, Bruchzonen und karstifizierten Bereichen bis Tiefen von rund 2'000 m zu richten. Mit dem von der GeoExpert AG entwickelten und schon seit mehr als 20 Jahren erfolgreich im Einsatz stehenden Verfahren der Hybridseismik sind 2D-Untergrunderkundungen bis in Tiefen von 5 km möglich.

Das kostengünstige Verfahren kommt auch bei Baugrund- und bei Grundwasserfragen zum Einsatz. Aus der Sicht der Autoren ist insbesondere bei geothermischen Projekten eine hybridseismische Untersuchung mit zwei sich rechtwinklig schneidenden 2D-Profilen eine zuverlässige, praktische und kostengünstige Massnahme, die gewichtige Informationen zur Entscheidungsfindung über den vielversprechendsten Bohrstandort liefert.

Résumé

Pour les projets géothermiques hydrothermaux, l'ancienne règle minière «c'est lugubre avant la houe» s'applique de manière générale, car la grande inconnue est la voie d'eau dans la formation cible. Ce n'est qu'après un forage réussi et l'application des mesures de stimulation que le risque de découverte est déterminé, c'est-à-dire que le débit d'eau est connu. On peut s'attendre à des conditions optimales en ce qui concerne l'écoulement de l'eau dans les roches fissurées par la tectonique ou karstifiées.

Pour les projets de géothermie à moyenne profondeur, il faut donc prêter attention à la localisation des failles (aquifères) et des zones karstiques jusqu'à des profondeurs d'environ 2'000 m. Grâce à la méthode de sismique hybride développée par GeoExpert SA, et utilisée avec succès depuis 1999, des investigations souterraines en 2D jusqu'à une profondeur de 5 km sont possible.

Cette méthode peu onéreuse est également utilisée pour les questions relatives à la géotechnique et aux eaux souterraines. Du point de vue des auteurs, en particulier pour les projets géothermiques, un levé sismique hybride avec deux profils 2D se croisant à angle droit est une mesure fiable, pratique et peu coûteuse qui apporte une contribution précieuse pour décider du lieu de forage le plus prometteur.

Abstract

For hydrothermal geothermal projects, the old mining rule «in front of the hoe it is gloomy!» applies at every project since the great unknown is the water conductivity in the target formation. Only after having drilled costly bore holes can the risk of discovery be assessed, i.e. is the water flow known. Optimum conditions with regard to water flow can be expected only in either tectonically fissured or karstified rock.

For medium-deep geothermal projects the aim should therefore be directed to the detection of (water-bearing) faults, fracture and karstified zones in depths of around 2'000 m. By using the hybrid seismic profiling method developed by GeoExpert AG, that has been applied successfully in more than 400 projects since 1999, 2D-underground investigations down to a depth of 5 km are today feasible.

The cost-efficient method is also used for civil engineering and groundwater issues. From the authors' point of view, especially for geothermal projects, a hybrid seismic survey with two 2D profiles intersecting at right angles is a reliable, practical and cost-efficient measure that provides a valuable contribution for the evaluation of the most promising drilling location.

¹ info@geoexpert.ch

² mbaumann@rsq-gmbh.ch

1 Einführung

Die Geothermie gilt als «unversiegbare» und erneuerbare Energiequelle. Warmes Tiefengrundwasser aus dem mitteltiefen Bereich lässt sich z.B. für die Wärmeversorgung von Privathaushalten, Bädern oder Gewerbebetrieben wirtschaftlich nutzen. Die Förderung des Tiefengrundwassers erfolgt aus Bohrungen mit Tiefen von 400 m bis 2'000 m, deren Kosten in der Grössenordnung von CHF 500'000 bis mehr als CHF 2'000'000 liegen. Der wirtschaftliche Erfolg hängt in grossem Masse von der Kenntnis der lokalen hydraulischen Durchlässigkeiten und schlussendlich vom Vorhandensein des Formationswassers ab.

Bei keinem Verfahren zur Gewinnung alternativer und erneuerbarer Energie ist jedoch die Ungewissheit des finanziellen Risikos so gross wie bei den hydrothermalen Geothermieprojekten. Eine Aussage über den Erfolg eines mitteltiefen hydrothermalen Geothermieprojektes kann erst nach Abschluss einer Tiefbohrung gemacht werden.

Die grossräumigen tektonischen Bedingungen im Schweizerischen Mittelland sind aufgrund der seit 1970 im Rahmen von verschiedenen Kohlenwasserstoffexplorationen und von der Nagra durchgeführten seismischen Profilen gut dokumentiert. Die Untergrundstrukturen sind in vielen Gebieten durch Bohrungen zur Grundwassererschliessung geologisch so weit bekannt, dass sie als Kandidaten für geothermisch mitteltiefe «hot spots» eingestuft werden können.

Die grosse Unbekannte ist jedoch die Wasserwegsamkeit in der Zielformation. Optimale Verhältnisse in Bezug auf Wasserwegsamkeit sind entweder in tektonisch zerklüftetem oder karstifiziertem Gestein zu erwarten, da für Schichtaquifere die Porosität und somit die Permeabilität mit zunehmender Tiefe abnimmt. Das Augenmerk für mitteltiefe Geothermieprojekte ist des-

halb auf die Ortung von (wasserführenden) Störungen, Bruchzonen und karstifizierter Bereichen bis Tiefen von rund 2'000 m zu richten.

Die Kosten für grossflächige 3D-Vibroserkundungen, wie sie in St.Gallen im Jahre 2010 im Vorfeld der Tiefbohrung durchgeführt wurden, sind hoch. Angesichts der in der Schweiz generell hohen Risikoaversion und fehlender geologischer Detailinformation zur Abschätzung des mitteltiefen geothermischen Potenzials ist die Hürde für den Entscheid zu konkreten Erkundungsaktivitäten für die Projektentwickler auch hoch.

2 Beschränkte Eignung der Erdölreflexionsseismik für geothermische Vorabklärungen

Seismische Untersuchungen gelten von jeher als ein aufwendiges und damit kostspieliges Erkundungsverfahren für grössere Tiefen. Die seismischen Erkundungen sollen den Projektgeologen bei Geothermieprojekten ein direktes strukturelles Abbild des Untergrundes liefern. Damit können die lokalen Gegebenheiten in Bezug auf ihr geothermisches Potenzial besser analysiert und bewertet sowie ein Projekt entsprechend detailliert geplant werden.

Die klassische Reflexionsseismik aus der Erdölindustrie, wie sie auch die Nagra anwendet, ist für die Detektion kleinerer tektonischer Strukturen bis in Tiefen von 2'000 m aufgrund ihres reduzierten Auflösungsvermögens zu wenig aussagekräftig (Fig. 1). Der Grund dafür sind einerseits die bei der Datenerfassung oft zu grossen Abstände zwischen den Anregungs- und Empfängerstationen und andererseits das Fehlen geeigneter reflexionsseismischer Analysemethoden zur detaillierten Herleitung der Verteilung der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten im zu untersuchenden Untergrund.

Voraussetzung für eine erfolgreiche reflexionsseismische Datenverarbeitung ist jedoch die genaue Kenntnis des seismischen Geschwindigkeitsfeldes. Standardisierte reflexionsseismische Verfahren zur Analyse des Geschwindigkeitsfeldes basieren auf der Annahme, dass der Untergrund aus horizontal gelagerten homogenen Schichten besteht, innerhalb derer keine lateralen Geschwindigkeitsvariationen auftreten. Letzteres, sowie geologisch komplexe Strukturen, sind in der Schweiz jedoch im oberflächennahen Tiefenbereich die Regel und bis in mehrere Hundert Meter unter der Oberfläche anzutreffen.

Seit mehr als 20 Jahren ist das Verfahren der refraktionsseismischen Tauchwellentomographie auf dem Markt. Damit lässt sich das seismische Geschwindigkeitsfeld im oberflächennahen Tiefenbereich mit der für die reflexionsseismische Datenverarbeitung erforderlichen Genauigkeit herleiten.

Sowohl die Reflexionsseismik wie auch die refraktionsseismische Tauchwellentomographie haben als einzeln angewendetes Verfahren je nach Fragestellung und Erkundungstiefe unbestrittene Vorteile, aber auch Nachteile:

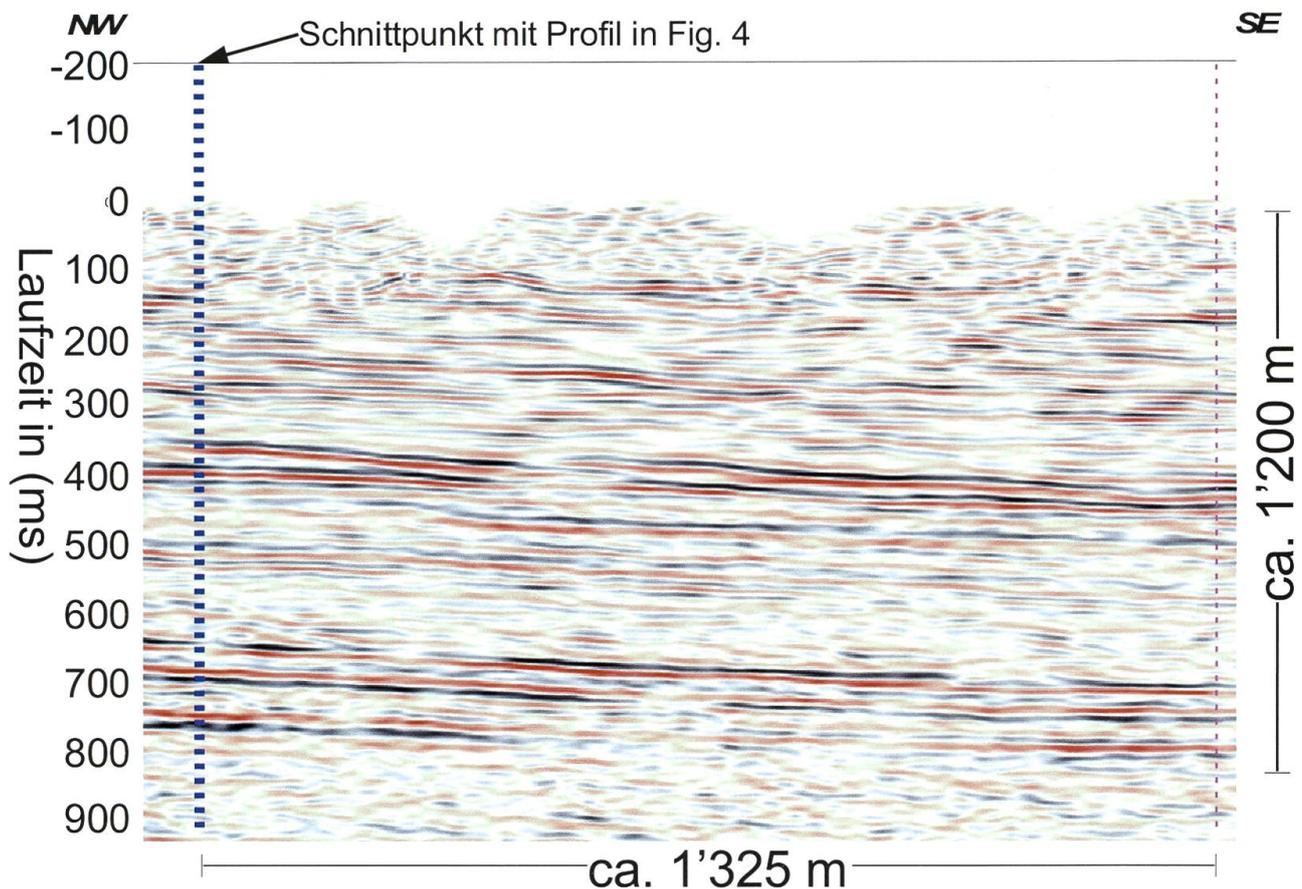


Fig. 1: Vibroseis Profil der Nagra im Raum Schlattingen – Diessenhofen TG aus dem Jahr 1991; erstellt mit Messgrößen und mit einer EDV, wie sie in der Erdölindustrie üblich sind. Zur Verbesserung der Kontinuität der Reflexionseinsätze werden in der Erdölseismik üblicherweise wirkungsvolle, jedoch auch mit Nebenwirkungen behaftete Kohärenzfiltertechniken angewendet. Dies hat zur Folge, dass strukturelle Feinheiten wie kleinere Störungen und karstifizierte Auflockerungszonen verschmiert und somit nicht abgebildet werden. Mangels genauer Angaben über die Verteilung der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Untergrund ist dieses Profil nicht Laufzeit-Tiefen gewandelt. Die vertikale Achse bezeichnet die Echozeit und ist deshalb metrisch nicht linear. Eine geologische Interpretation dieses Profils mittels Korrelation mit einem stratigraphischen Profil aus einer Bohrung zur Eichung der Interpretation, wie in Fig. 4 dargestellt, ist aus diesem Grund nicht möglich.

Anforderungen / Messziele	Reflexions-seismik	Refraktions-tomographie
Auflösungsvermögen in geringen Tiefen (< 10 m)	Begrenzt	gut
Auflösungsvermögen in grösseren Tiefen (> 40 m)	Gut	Schlecht
Erkundungstiefe	Hoch	Begrenzt
Indikator für Gesteinsfestigkeit / Auflockerung / Permeabilität	Schlecht	Gut
Detektion von Geschwindigkeitsinversionen (hidden layers)	Schlecht	Gut
Detektion von Störungs- und Bruchzonen	Gut	Begrenzt

Der obige Vergleich legt es nahe, die beiden Verfahren miteinander zu kombinieren, da die Nachteile der einen Methode durch die Vorteile der anderen wettgemacht werden. Dadurch dass die Datenerfassung mit den heute zur Verfügung stehenden Messgeräten nicht mehr für beide Methoden getrennt durchgeführt werden muss, sondern

in einem Arbeitsgang und ohne zusätzlichen Feldaufwand möglich ist, wird das Aussagepotenzial der seismischen Daten durch die Datenbearbeitung nach beiden Verfahren ausgeschöpft.

Detaillierte Aussagen über den Aufbau der geologischen Strukturen und somit über das mitteltiefe Geothermiepotenzial sind mit dem von der Firma GeoExpert AG im Jahre 2000 entwickelten und seither laufend verbesserten Verfahren der Hybridseismik erhältlich. Die Methode trägt dem Anspruch an ein höheres Auflösungsvermögen der seismischen Abbildung dadurch Rechnung, dass

- a) zur Kartierung kleinräumiger Untergrundstrukturen die Datenerfassungsparameter, d.h. die Abstände zwischen den seismischen Empfängerstationen (dRx) und der Anregungspunkte (dTx) um ein Mehrfaches kleiner als in der Erdölindustrie gewählt werden; und

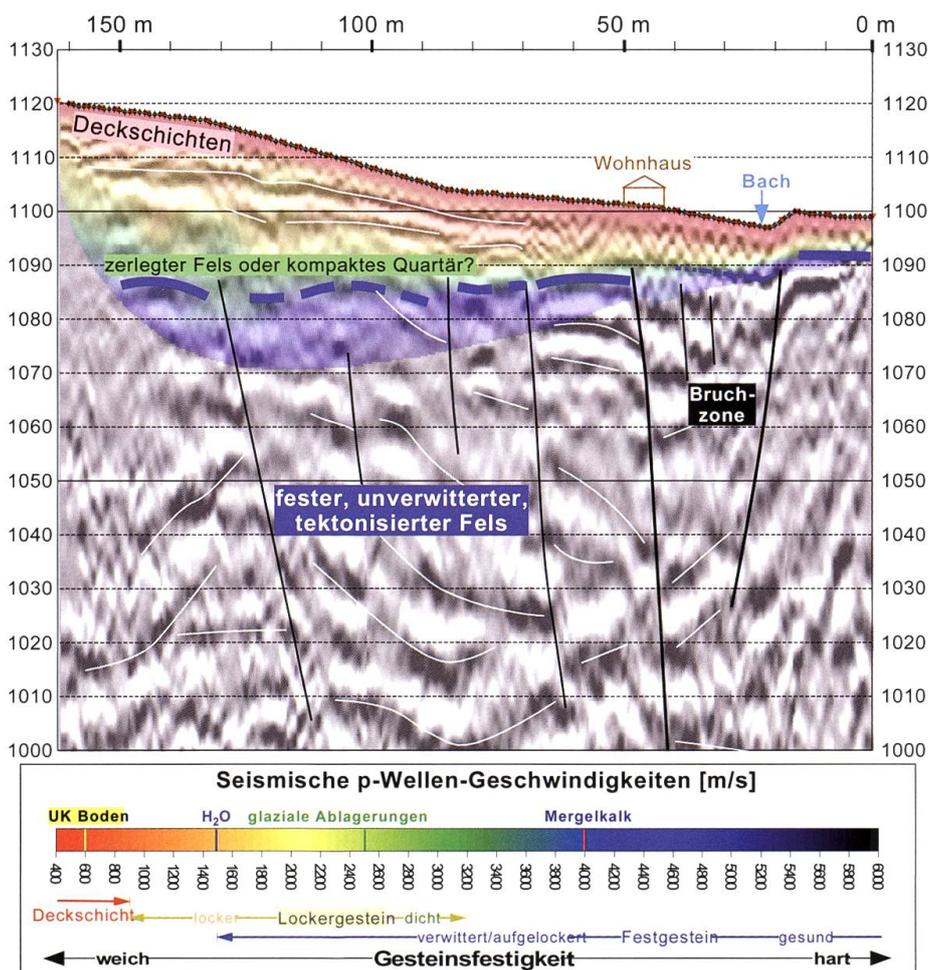


Fig. 2: Anwendungsbeispiel hochauflösender Hybridseismik zur Kartierung der Untergrundstrukturen aufgrund von Setzungserscheinungen bei einem Wohnhaus, das, wie die Seismik zeigt, direkt über einer Störungszone gebaut wurde.

b) die Datenverarbeitung gemäss einer gegenüber der Tiefenseismik der Erdölindustrie fundamental anderen Strategie durchgeführt wird, wobei für das reflexionsseismische Processing das refraktionstomographisch hergeleitete detaillierte seismische Geschwindigkeitsfeld verwendet wird.

Zusätzlich zum stark verbesserten Auflösungsvermögen kartiert die Hybridseismik nicht nur die Untergrundstrukturen in der Art einer Röntgenaufnahme, sondern liefert bis in Tiefen von 400 m gleichzeitig auch Aussagen über die Gesteinsfestigkeit und somit indirekt auch über die Permeabilität.

Obwohl die Methode der Hybridseismik dank der Anforderungen aus der Bau- und Hydrogeologie den heutigen technischen Stand erreicht hat, ist sie durchaus mit gewichtigem Vorteil auch für die reflexionsseismische Erkundung grösserer Tiefenbereiche anzuwenden. Dieser Vorteil liegt darin, dass bei der hybridseismischen Herleitung und Anwendung des Geschwindigkeitsfeldes dieses im oberflächennahen Tiefenbereich detailgenau ist, was sich in einer bedeutend verbesserten Ableitung der statischen Korrekturen und deren Anwendung auszahlt.

Somit kann auf die herkömmlichen reflexionsseismischen Verfahren zur Analyse und Anwendung der feld- und reststatischen Korrekturen verzichtet werden. Diese beruhen allein auf Modellannahmen und Modellrechnungen und haben keinen Bezug zur Wirklichkeit im oberflächennahen Tiefenbereich. Bei Verwendung dieser Verfahren sind daher negative Auswirkungen in Form von erheblichen Laufzeitdiskrepanzen nicht nur im oberflächennahen, sondern auch im gesamt zu erkundenden Tiefenbereich unvermeidlich.

Zur Kompensation dieser Diskrepanzen werden in der Tiefenreflexionsseismik verschiedene zweidimensionale Filtertechniken zur

Erhöhung der Kontinuität der Reflexionshorizonte angewendet. Diese Vorgehen haben jedoch negative Auswirkungen in Form von Verschmierungen auf das laterale Auflösungsvermögen der seismischen Abbildung (s. Kommentar zu Fig. 1 und Frei et al. 2015).

3 2D seismische Vorerkundung mit Fallgewichtsseismik im Rahmen von Geothermieprojekten.

Der personelle, logistische und apparative Aufwand der 2D hybridseismischen Datenerfassung mit einem mittelschweren Fallgewicht als Energiequelle ist im Vergleich zur üblichen 2D Vibro-Tiefenseismik rund viermal geringer (Fig. 3). Seit der Einführung im Jahr 2000 ist die Hybridseismik im In- und Ausland bei rund 400 Projekten, u.a. auch bei geothermischen Vorabklärungen, eingesetzt worden.

Im Kanton Genf und Umgebung wurden zwischen 2014 und 2016 mehrere seismische Kampagnen zur Abklärung des geologischen Aufbaus des Untergrundes durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war die Identifizierung potenzieller Formationen für die geothermische Energiegewinnung. Mit den durchgeführten Untersuchungen sollten geeignete Zielhorizonte für eine tiefe Geothermiebohrung festgelegt werden. GeoExpert AG wurde für ein ca. 2 km langes Profil durch das Städtchen Coppet beauftragt. In Figur 3 ist zu erkennen, dass ein mittelschweres Fallgewicht als Energieanregung ausreicht, um Reflektorhorizonte bis in Tiefen von mehr als 4'000 m abzubilden.

4 Anwendungsbeispiel Geothermiebohrung

Ein weiteres Beispiel für den erfolgreichen Einsatz der Hybridseismik ist die durch die GeoExpert AG im Jahr 2012 im Auftrag des Kantons Thurgau durchgeführte seismische

Profil de sismique hybride à Coppet VD (2015)

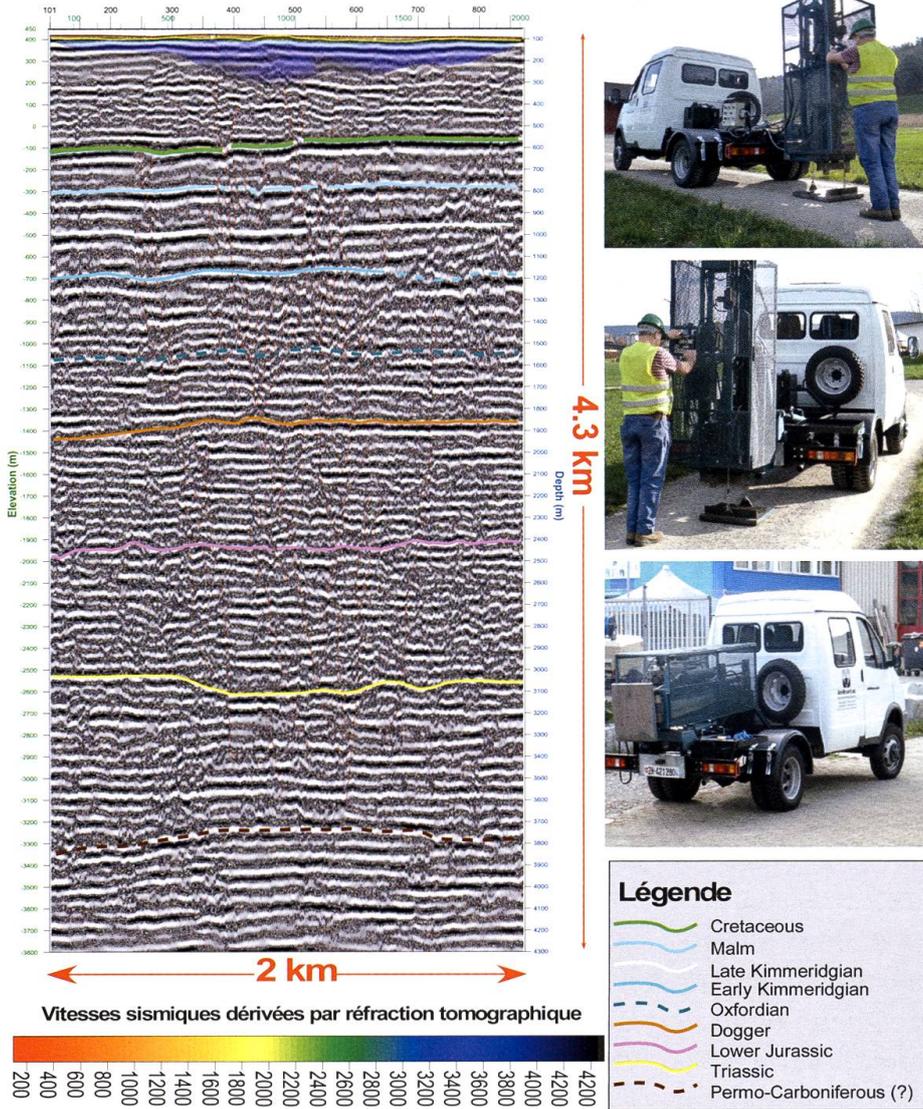


Fig. 3: Fallgewichts-hybridseismische Kartierung der Untergrundstrukturen im Rahmen eines Geothermieprojekts im Auftrag der Services Industriels de Genève (SIG). Die Messstrecke liegt zu 80% in urbanem Gebiet mit dichter Besiedlung.

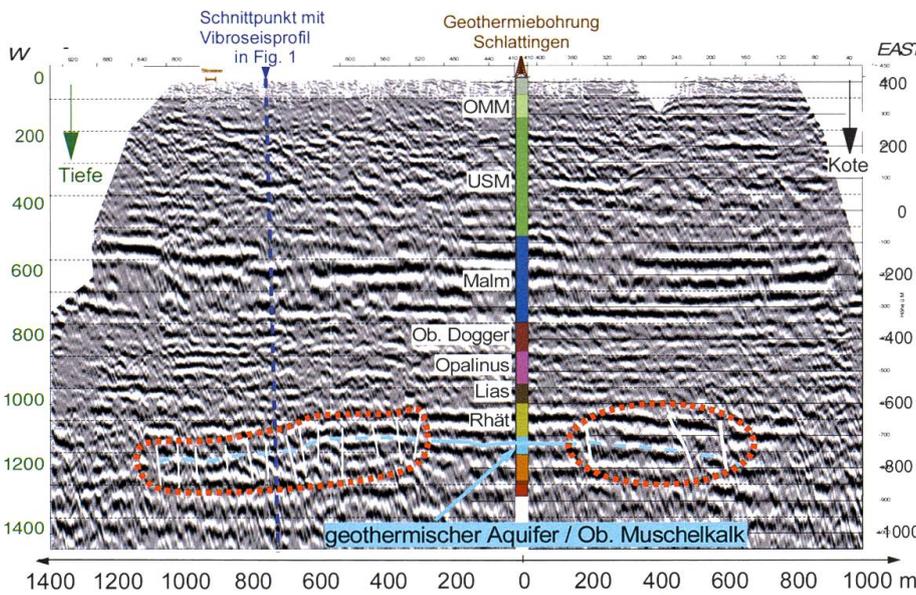


Fig. 4: Hoचाуflösendes Fallgewicht-Seismikprofil (2012) bei der Geothermiebohrung Schlattingen. Im Aquifer des Oberen Muschelkalks sind Auflockerungs- und Störungszonen mit herabgesetzter Reflektivität zu erkennen, in denen eine höhere Durchlässigkeit als beim in wenigen hundert Meter entfernten Bohrstandort erwartet werden kann. Das Profil schneidet in etwa 600 m Entfernung von seinem westlichen Ende das Laufzeitvibroseisprofil der Nagra in Fig. 1.

Erkundung bei der Geothermiebohrung Schlattingen. Die Seismikkampagne wurde durchgeführt nachdem die erste Bohrung (Vertikale Bohrung SLA1) erfolgreich abgeschlossen wurde. Sie hatte zum Ziel aufzuzeigen, ob für Vorerkundungen bei Geothermieprojekten im mittleren Tiefenbereich verwertbare Ergebnisse auch mit einem geringeren apparativen und personellen Aufwand als mit einer grossen Vibroseiskampagne erzielt werden können. Die Datenerfassung für die Messstrecke von 4.4 km durch einen Messtrupp von vier Mann erfolgte während vier Tagen mit hochauflösenden Parametern (Geophonabstand 2.5 m, Quellenabstand 10 m) und mit einem beschleunigten Fallgewicht als seismische Anregung.

Der geothermische Aquifer mit einer Mächtigkeit von 31 m im Oberen Muschelkalk ist auf dem 2.4 km langen W-E Profil in Figur 4 gut erkennbar. Zudem ist zu sehen, dass über den ca. 450 m langen Profilschnitt in der nahen Umgebung der Sondierbohrung sich die Schichtenlage weder tektonisch noch durch Karstifizierung beeinflusst präsentiert. Die Signatur der markanten und gut definierten Reflexionseinsätze weist deutlich auf kompakten und ungestörten Kalkfels hin.

In 200 m Entfernung östlich der Bohrung ist jedoch ein rund 500 m langer Streckenschnitt mit drei gut erkennbaren, steil einfallenden und den Aquifer schneidenden Störungen zu beobachten (rot markierte Zone). Gleichermassen markiert ist in 400 m westlicher Entfernung der Bohrung eine rund 800 m lange Zone mit einer dichten Abfolge von Störungen durch den Aquifer zu erkennen. Die Reflektivität und die Kontinuität des Aquiferreflektors sind in diesem Profilschnitt markant herabgesetzt, was als Verkarstung interpretiert werden kann. Das bedeutet, dass in diesem Bereich eine höhere Durchlässigkeit anzunehmen ist.

Die vertikale Geothermiebohrung Schlattingen (SLA1) hat relativ kompaktes, tektonisch

ungestörtes und hydraulisch weniger durchlässiges Felsgestein (Muschelkalk) angetroffen. Die nach Fertigstellung der Bohrung durchgeführten Pumpversuche ergaben eine kleinere Wassermenge als angenommen. Das geförderte Tiefengrundwasser wird für den vorgesehenen Betrieb wärmetechnisch genutzt.

Aufgrund der durchgeführten Hybridseismik-Kampagnen kann die Frage gestellt werden, wie hoch die Fündigkeitswahrscheinlichkeit gewesen wäre, wenn aufgrund der Resultate der hochauflösenden Seismik der Zielpunkt der Bohrung im westlichen Teil der Figur 4 festgelegt worden wäre. Mit dem Niederbringen der Bohrung vor der Seismik wurde die Möglichkeit einer optimierten Wahl des Bohrstandortes mit verbesserten Fündigkeitsaussichten verpasst.

Die Kosten für die seismische Erkundung mit zwei Messlinien von total 4.4 km bei Schlattingen belaufen sich auf rund Fr. 45'000.

Aus Sicht der Autoren ist die Hybridseismik ein zuverlässiges, praktikables, bewährtes und kostengünstiges Verfahren, dem bei der Entscheidungsfindung zur Festlegung des Bohrstandorts bei einem Geothermieprojekt eine wesentliche Bedeutung zukommt.

Literatur

- Frei, W. 2019: Hybrid seismic surveying for detailed characterization of the shallow and intermediate depth subsurface; Extended Abstract of poster presented at the Modern 2020 2nd International Conference about Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste; 9. – 11. April 2019 – Paris
- 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

GeoExpert AG, 2012: Geothermiebohrung Schlatt-
tingen TG, Reflexionsseismische Erkundung
des Untergrunds bis in Tiefen von ca. 1'500 m;
abschliessender Kurzbericht an AfU TG Frauen-
feld; Oktober 2012

Frei, W. & Keller, L. 2000: Hybride Seismik eine
verbesserte Methode zur Verwertung des Aus-
sagepotentials seismischer Daten. Bull. angew.
Geol. Vol. 5, Nr. 2, p. 229 - 236; Dezember 2000

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