

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:	16 (2011)
Heft:	2
Artikel:	Die Detektion von Hohlräumen und Auflockerungszonen mit seismischen Verfahren
Autor:	Frei, Walter
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-327747

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: 07.01.2026

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

Die Detektion von Hohlräumen und Auflockerungszonen mit seismischen Verfahren Walter Frei¹

Stichworte: Reflexionsseismik, seismische Refraktionstomographie, hybride Seismik, Signalfrequenz, seismische Wellenlänge, seismisches Geschwindigkeitsfeld.

Zusammenfassung

Hinweise auf die Existenz von Hohlräumen und kleineren Auflockerungszonen sind über eine geeignete Wahl der seismischen Messparameter erhältlich, die eine ausreichend hohe Datendichte für eine genaue Kartierung gewährleisten. Es ist darauf zu achten, dass die Abstände zwischen den Empfängerstationen ausreichend klein und die aktive Geophonauslage genügend lang ist. Die Methode der hybriden Seismik, eine Kombination von hochauflösender Reflexionsseismik mit seismischer Refraktionstomographie, ist das geeignete Erkundungsverfahren.

Résumé

Des indications quant à la présence de cavités et de petites zones d'ameublement peuvent être obtenues grâce à un choix approprié des paramètres d'acquisition sismiques afin de garantir une densité élevée de données pour une cartographie précise. Ceci est réalisé par un espacement des stations réceptrices suffisamment petit et un dispositif de géophones actifs assez long. La méthode par sismique hybride, combinaison de sismique réflexion à haute résolution et de tomographie sismique réfraction, est la technique d'exploration la plus pertinente.

Abstract

Seismic evidence of the existence of voids and small scale decompression zones is obtained by the appropriate design of high data density acquisition parameters for accurate imaging. This is achieved by a sufficiently small receiver station spacing and a long enough active geophone spread lay-out. Hybrid seismic surveying, a combination of high resolution reflection seismic profiling and seismic refraction tomography, is considered to be the appropriate surveying method.

1. Einleitung

Bei der Detektion von Störungs- und Schwächezonen im Untergrund ist das Verfahren der hybriden Seismik, einer Kombination von hochauflösender Reflexionsseismik mit Refraktionstomographie, die zuverlässigste Erkundungsmethode (Frei & Keller 2000). Sie kartiert einerseits reflexionsseismisch, gleichsam einer Röntgenaufnahme, die Ablagerungsstrukturen und tektonischen Charakteristika wie Störungen, und gibt andererseits über das refraktionstomographisch hergeleitete Geschwindigkeitsfeld Auskunft über die Verteilung der Gesteinsfestigkeit im Untergrund.

Die Eignung dieser beiden bedeutendsten seismischen Erkundungsverfahren sind für die verschiedenen Erkundungsziele in Tab. 1 zusammengefasst.

Die dominierende Wellenlänge λ im seismischen Quellsignal ist die entscheidende Größe für das vertikale und laterale reflexionsseismische Auflösungsvermögen. Zur Abschätzung des vertikalen Auflösungsvermögens gilt die Faustregel, dass eine Schicht mindestens $\lambda/4$ mächtig sein muss, damit sie seismisch abgebildet werden kann (Frei 1992). Es ist also ein Quellsignal mit einer möglichst kleinen dominierenden Wellenlänge $\lambda = v/f$ anzustreben, um das vertikale Auflösungsvermögen zu erhöhen (wobei v = seismische Ausbreitungsgeschwindigkeit und f = dominierende Frequenz im Quellsignal). Tab. 2 gibt Aufschluss über die minimale vertikale Ausdehnung einer theoretisch gerade noch erfassbaren Struktur.

Je nach Qualität der Ankoppelungsbedin-

¹ W. Frei, GeoExpert AG, Oberfeldstrasse 6, 8514 Amlikon, w.frei@geoexpert.ch

gungen sowohl auf der Sender- wie auch auf der Empfängerseite (Geophone) bewegen sich in der Ingenieurseismik die im Quellsignal dominierenden Frequenzen im Bereich zwischen 30 Hz und 125 Hz. Durch hochfrequente Geophone und geeignete Filtermassnahmen lassen sich diese Werte auf über 180 Hz erhöhen.

Das laterale Auflösungsvermögen ist neben der dominierenden Wellenlänge λ , respektive

der Frequenz f , von der Tiefenlage z des zu erfassenden Strukturelementes und von der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeit v abhängig. Es wird definiert als der Mindestabstand r zwischen zwei Punktreflektoren, so dass die beiden Punkte noch getrennt und nicht als ein einzelner wahrgenommen werden. Für diesen Mindestabstand r gilt die folgende Beziehung $r \approx 2(z\lambda/2)^{1/2}$.

AUFGABENSTELLUNG / AUSSAGEPOTENTIAL / KRITERIUM	REFLEXIONSEISMIK	REFRAKTIONSTOMOGRAPHIE
Auflösungsvermögen in geringen Tiefen (< 10 m)	BEGRENZT	GUT
Auflösungsvermögen in grösseren Tiefen (> 20 m)	GUT	SCHLECHT
Erkundungstiefe	HOCH	BEGRENZT
Indikator für Gesteinsfestigkeit / Reissbarkeit	SCHLECHT	GUT
Detektion von Geschwindigkeitsinversionen	SCHLECHT	GUT
Detektion von Störungs- und Bruchzonen	GUT	BEGRENZT

Tab. 1: Eignung der Reflexionsseismik und der Refraktionstomographie für verschiedene Erkundungsziele.

Dominierende Frequenz f (Hz)	Ausbreitungsgeschwindigkeit v (m/s)	dominierende Wellenlänge λ (m)	Auflösungsvermögen $\lambda/4$ (m)
40	3000	75	18.8
90	2000	22	5.6
125	1000	8	2.0

Tab. 2: Vertikales Auflösungsvermögen in Abhängigkeit der lokalen seismischen Geschwindigkeit und der im Quellsignal dominierenden Frequenz.

Tiefe z (m)	Geschwindigkeit v (m/s)	dominierende Frequenz f (Hz)	dominierende Wellenlänge λ (m)	laterale Auflösung r (m)
20	500	125	4.0	12.6
20	1000	90	11.1	21.1
40	1000	40	25.0	44.7
40	1000	90	11.1	29.8
40	2500	40	62.5	70.7
40	2500	90	27.8	47.1
40	2500	125	20.0	40.0
100	3000	40	75.0	122.5
100	3000	90	33.3	81.6

Tab. 3: Laterales Auflösungsvermögen in Abhängigkeit der Tiefenlage, der dominierenden Frequenz und der mittleren seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeit bis an die Oberfläche.

2. Die Schwierigkeiten der Reflexionsseismik bei der Erkennung von Hohlräumen

Hohlräume sind in seltensten Fällen mit geophysikalischen Methoden direkt als solche erkennbar. Natürliche Hohlräume befinden sich in der Regel in einem tektonisch oder verwitterungsbedingt stark gestörten Wirtsgestein mit kleinräumigen, komplexen Strukturen, deren detaillierte Erfassung wegen des begrenzten Auflösungsvermögens des angewandten Verfahrens nicht möglich ist.

Ausserdem weisen Hohlräume in der Regel keine geometrisch einfache Form (wie z. B. eine Kugel) auf, sondern sind im Falle von Karst verästelt und schon aus diesem Grund schwer kartierbar.

Die Schwierigkeiten, Hohlräume mit dem reflexionsseismischen Verfahren aufzuspüren, sind strahlengeometrisch bedingt. In einer Übergangszone von weicherem zu härterem Gestein ändert sich die Ausbreitungsrichtung seismischer Wellen hin zum härteren Gestein mit der höheren seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeit (Snell's Ge-

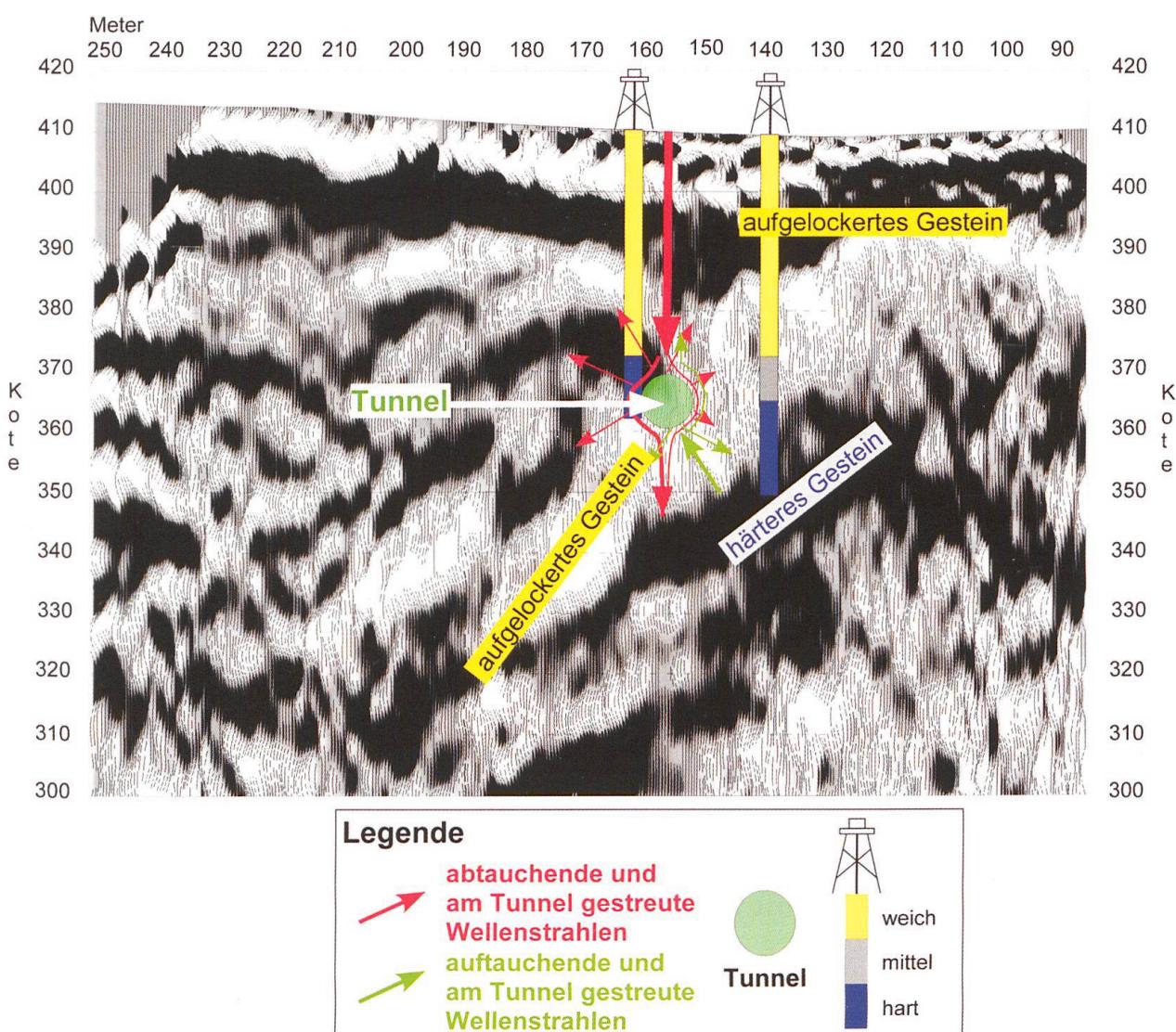


Fig. 1: Reflexionsseismisch nicht kartierbare Tunnelröhre. Nur ein verschwindend geringer Anteil der seismischen Energie wird wegen der geringen Ausdehnung der Tunnelröhre direkt an die Erdoberfläche zurückgeworfen. Zudem liegt der Tunnel in einer steil einfallenden, relativ weichen Gesteinsschicht, deren Reflexionsantwort mit einer Dilatationsphase, d. h. mit einer negativen, hier weißen Amplitudenauslenkung dargestellt wird. Da die schwache Reflexionsantwort von der Tunnelröhre ebenfalls eine negative, weiße Signalamplitude aufweist, lässt sich der Tunnel aus grafischen Gründen in der üblichen schwarz-weiß Darstellung nicht abbilden.

setz und Prinzip von Huygens). Die Richtungsänderung ist proportional zur Stärke des Geschwindigkeitskontrasts an der Grenzfläche. Für einen Hohlraum bedeutet dies, dass auftreffende Wellenstrahlen diesen umrunden, sowohl beim Abtauchen wie auch als Reflexionsantwort einer tiefer liegenden Schichtgrenze auf ihrem Weg zurück an die Erdoberfläche. Je kleiner der Hohlraum und je unregelmässiger seine geometrische Form sind, desto geringer ist die Chance, diesen seismisch zu «sehen». Figur 1 illustriert diesen Sachverhalt am Beispiel eines reflexionseismischen Profils über den im Jahre 2002 im Bau befindlichen Umfahrungstunnel bei Sissach BL. Der Tunnel hat einen Durchmesser von rund 10 m und liegt in 40 m Tiefe. Aus der Praxis lassen sich drei Gründe anführen, die dem Existenznachweis von Hohlräumen durch Reflexionseismik im Wege stehen:

- Die Ausdehnung des Hohlraums ist für eine erkennbare Reflexionsantwort zu klein (Hauptgrund). Siehe die in der Einleitung erwähnten Einschränkungen des vertikalen und lateralen Auflösungsvermögens (Tab. 2, 3) auf Grund der dominierenden Wellenlänge im seismischen Quellensignal.
- Der überwiegende Anteil der seismischen Energie «umrundet» den Hohlraum.
- Der Hohlraum liegt in einer Zone weichen Gesteins, deren Reflexionsantworten beide mit einer Dilatationsphase (= negative Amplitudenauslenkung) einsetzen.

3. Die Detektion von Hohlräumen und von Schwächezonen mit hybrider Seismik

Unter der Voraussetzung, dass die seismischen Daten mit einer ausreichend langen aktiven Geophonauslage registriert werden und dadurch der vermutete Hohlraum auch refraktionstomographisch von seiner Tiefenlage her noch erfasst wird, sind die Erfolgsaussichten einer Kartierung durchaus

intakt. Dies wird durch das Fallbeispiel eines Erdfalls in einem Wohnquartier der Stadt Alt-kirch im Sundgau (F) illustriert (Fig. 2 bis 6): Von insgesamt sechs seismischen Profilen sind hier die Profile 1 und 2 (Fig. 3) dargestellt. Die Datenerfassung erfolgte im Hinblick auf ein möglichst hohes Auflösungsvermögen im Tiefenbereich der obersten 20-30 m mit einem Geophonabstand von 50 cm und einem Anregungsabstand von 1 m. Als seismische Energiequelle wurde ein 6 kg schwerer Hammer verwendet, mit dem auf eine Stahlplatte geschlagen wird. Figur 4 zeigt links das Resultat der refraktionstomographischen Auswertung und rechts die aus dem gleichen Datensatz erarbeitete reflexionseismische Tiefensektion von Profil 2. Die hohe seismische Auflösung zur Abbildung des Erdfallschlots wird dadurch erreicht, dass die Abstände zwischen den Geophonstationen mindestens 15–20 mal kleiner sind als der Durchmesser des Schlots oder der Breite der Störungszone, die hier mit diesem identisch ist. Bei der in Figur 1 seismisch nicht erfassten, 10 m breiten Tunnelröhre betragen die Abstände zwischen den Geophonstationen 2 m und sind somit nur 5 mal kleiner als der Durchmesser des Tunnels. Die Datendichte, ausgedrückt durch die Abstände zwischen den Empfängerstationen, ist somit für die Detektion von Hohlräumen und von kleinräumigen Auflöckerungszonen die entscheidende Grösse.

Auf dem in E-W Richtung verlaufenden Profil 1 (Fig. 5) sind der Erdfall und die Störungszone bei Station 142 überhaupt nicht erkennbar. Störungen und Bruchzonen, die parallel zu seismischen Profilen verlaufen, werden durch diese selten erfasst. Daraus ist zu schliessen, dass die Störung mit dem Erdfall parallel zum Profil 1, d. h. in E-W Richtung verläuft.

Deutlich sind auf dem refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfeld mehrere bis 30 m tief reichende Anomalien zu beobachten (Fig. 5a), so bei den Stationen 220 und 180. Sie sind als Vorboten für weitere Erdfälle



Fig. 2: Erdfall unter der Grenzmauer eines Gartens (Bild links) zum Gehsteig einer Quartierstrasse (Bild rechts). Der Einsturz erfolgte spontan und ohne irgendwelche Vorwarnung durch frühere Vorkommnisse ähnlicher Art in der Region. Der Untergrund besteht aus Elsässer Molasse, die Malmkalken überlagert ist. Als Ursache werden Karsthohlräume im Malm vermutet, die sich über einen längeren Zeitraum gebildet haben.

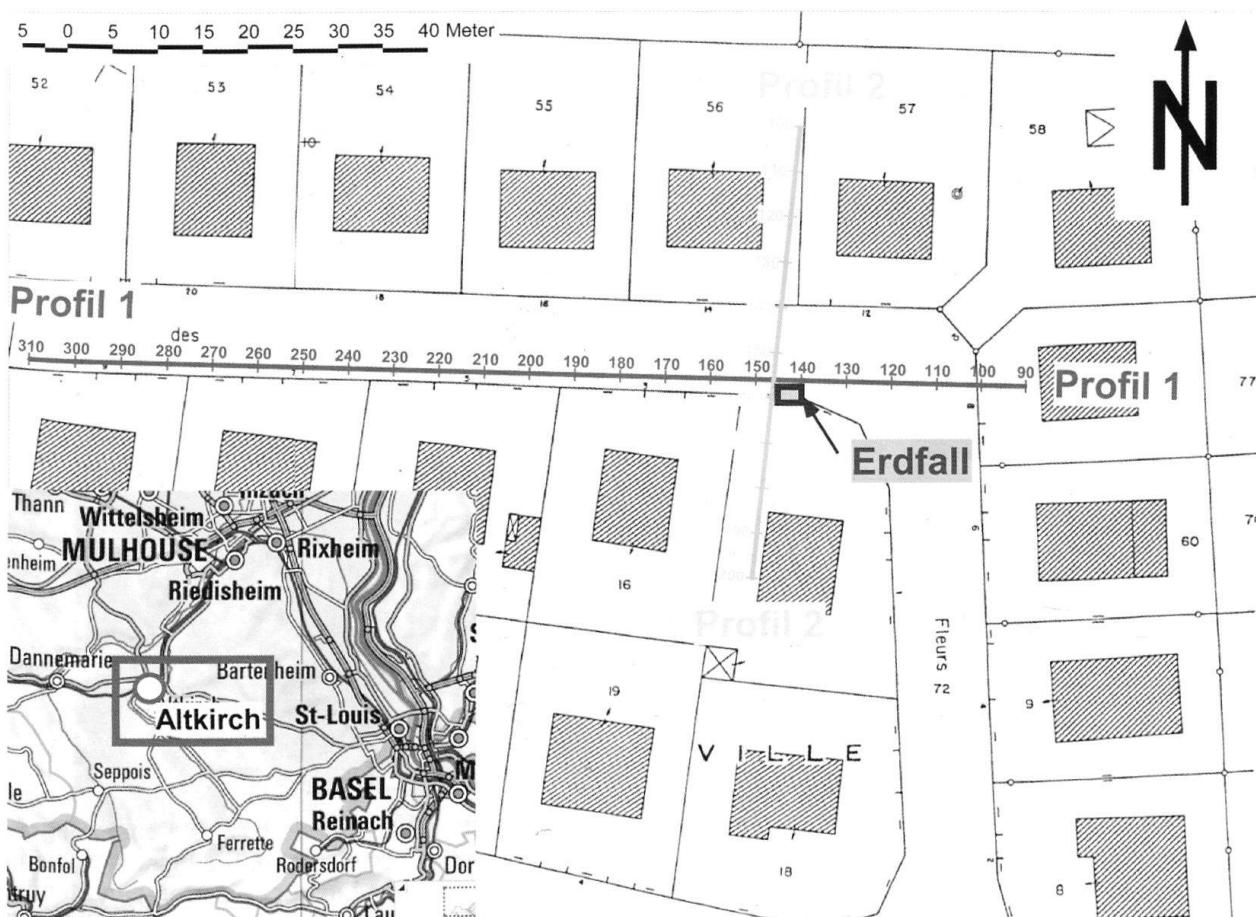


Fig. 3: Situation beim Erdfall in einem Wohnquartier der Stadt Altkirch im Sundgau (F) und Lage der beiden hier vorgestellten seismischen Profile.

le mit Gefährdung der umliegenden Gebäude zu betrachten.

Auf dem hybridseismischen Profil (Fig. 5b) zeigen die reflexionsseismischen Einsätze der vermuteten Malmoberkante an diesen Stellen subvertikal einfallende Brüche mit einem Verlauf in N-S Richtung.

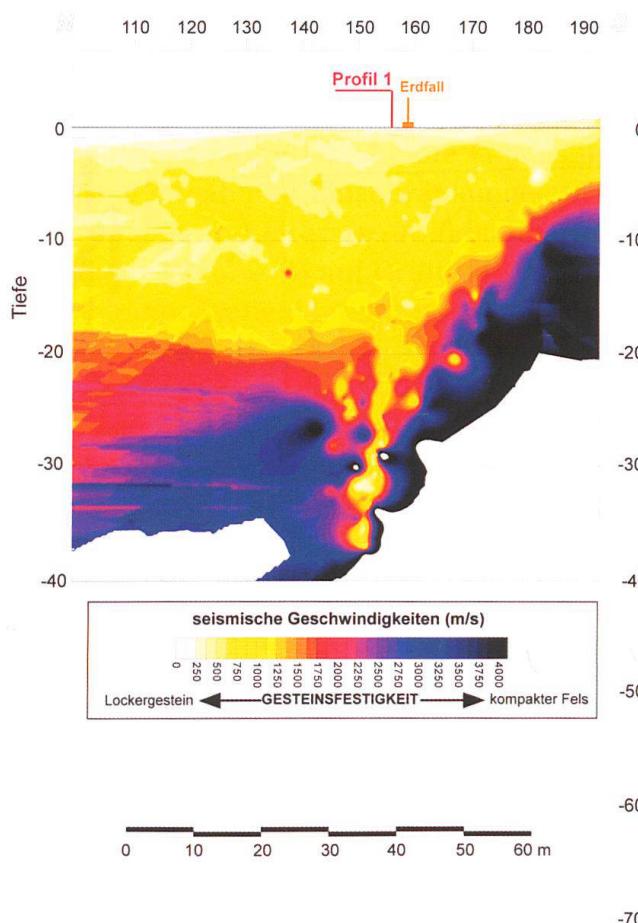
Das untersuchte Gebiet liegt somit auf der Schnittstelle zweier sich kreuzender Störungszonen. Die Ergebnisse der vier weiteren seismischen Profile bestätigen diesen Sachverhalt, wie in Figur 6 dargestellt.

4. Lokalisierung der Abflussöffnung einer Doline

Im Bach am Fusse der Talflanke, auf der sich die Kommunaldeponie der Stadt La Chaux-de-Fonds befindet, wurden Verunreinigungen festgestellt. Sie können nur von der höher gelegenen Deponie stammen. Die Deponie wurde auf einer Doline angelegt, an deren Sohle die Abflussöffnung seismisch zu lokalisieren ist.

Das refraktionstomographische Geschwindigkeitsfeld in Figur 7a zeigt den ungefähren Verlauf der Malmoberkante. Im Gegensatz zum Beispiel des Erdfalls bei Altkirch (Fig. 4, 5) weist das refraktionstomographische

a) Refraktionstomographisch abgeleitetes Geschwindigkeitsfeld



b) Reflexionsseismisches Tiefenprofil

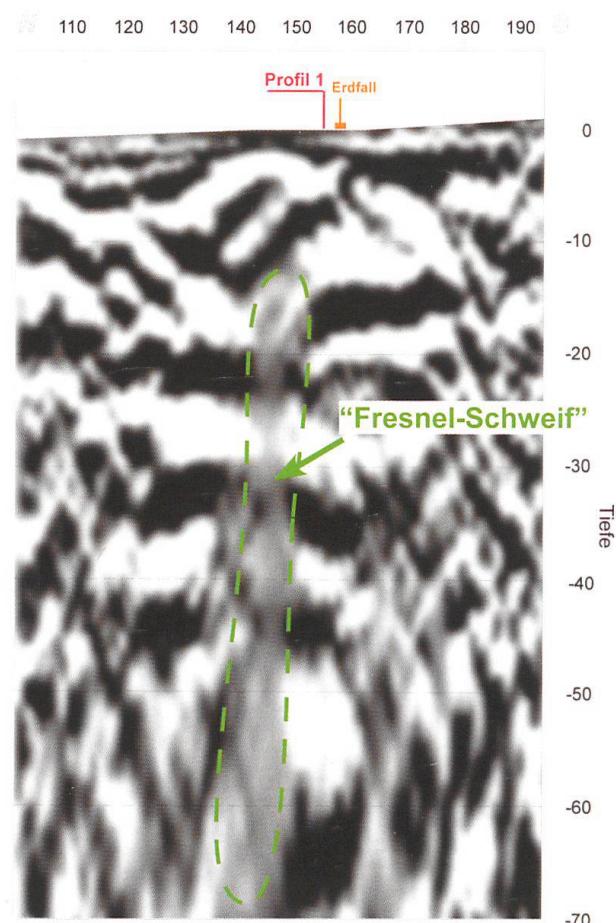


Fig. 4: Ergebnisse der EDV von Profil 2. Gut erkennbar ist der Erdfallschlott auf dem refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfeld (links) als ausgeprägte Geschwindigkeitsanomalie. Sie lässt sich bis in eine Tiefe von 35 m verfolgen. Reflexionsseismisch manifestiert sich der Einsturz als steil einfallende, schmale Zone mit stark verschmierten Signaleinsätzen (rechts), die sich über den ganzen Tiefenbereich erstreckt. In Anlehnung an die Verdienste des französischen Physikers Fresnel sei dieser Effekt hier als «Fresnel-Schweif» bezeichnet.

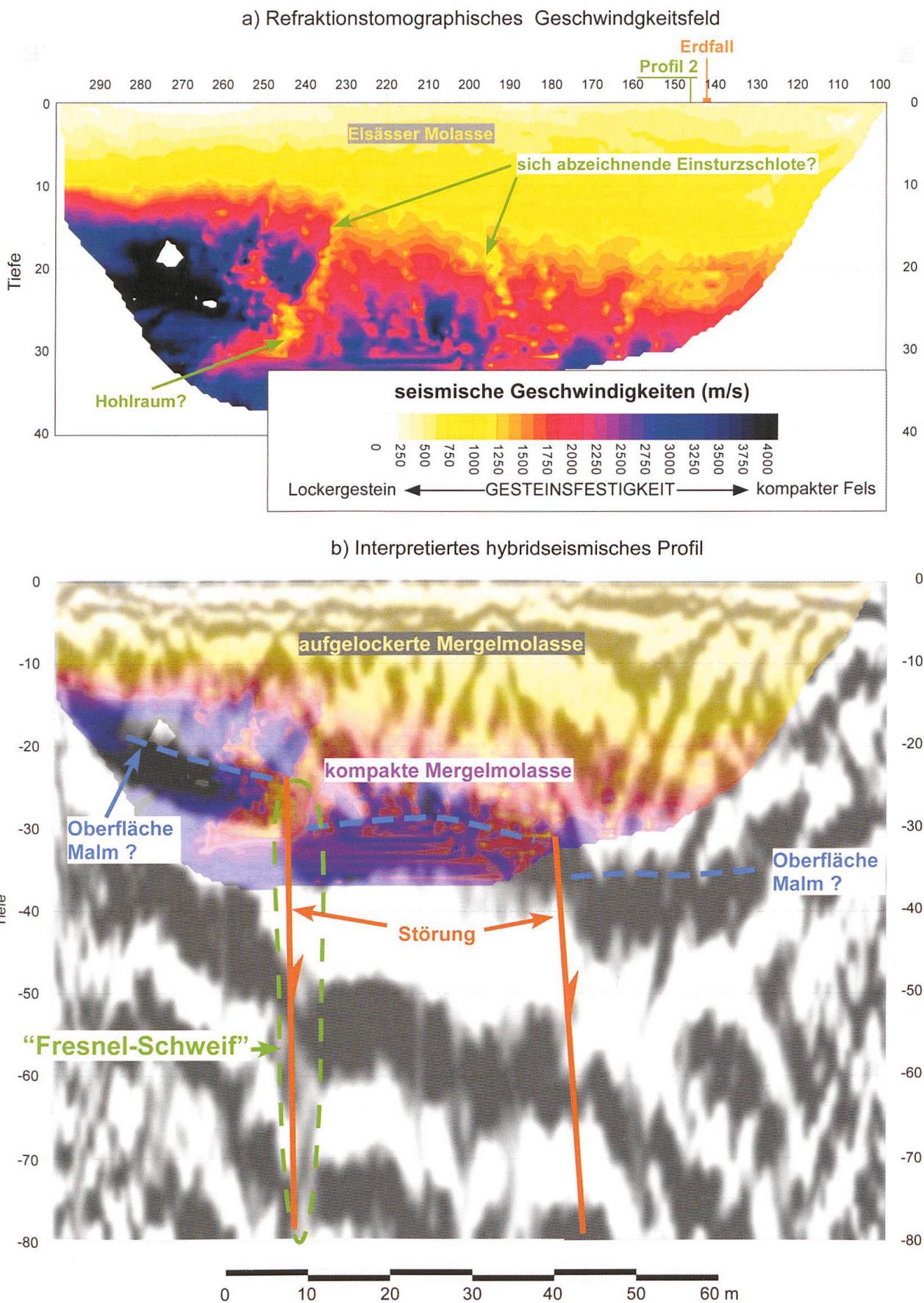


Fig. 5: E-W Profil 1 bei Altkirch, mit seismisch gut erkennbaren, weiteren sich abzeichnenden Einsturzschlotten. Diese stehen in Zusammenhang mit zwei in N-S Richtung verlaufenden Brüchen.

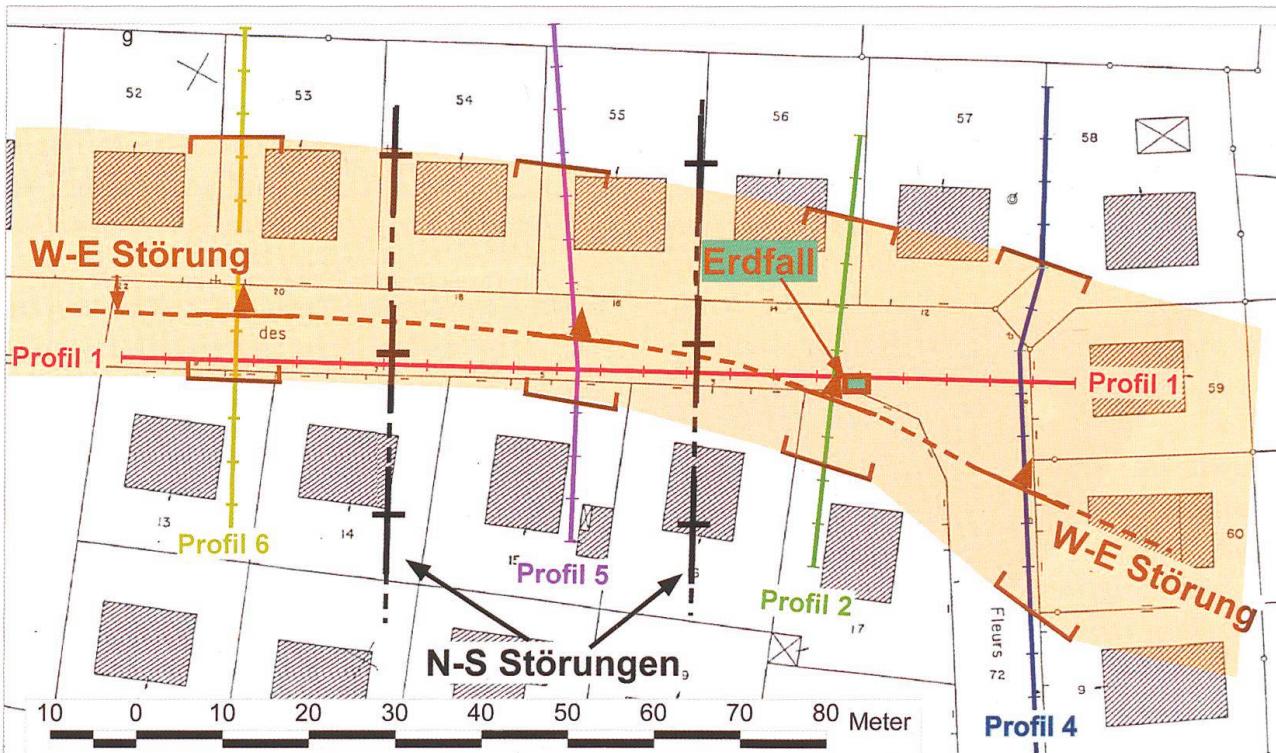


Fig. 6: Gesamtsituation nach Auswertung der 6 seismischen Profile bei Altkirch. Der Erdfall und sich abzeichnende weitere Instabilitäten im Untergrund befinden sich am Schnittpunkt eines E-W orientierten Grabenbruchs mit einer N-S verlaufenden Störungszone.

Geschwindigkeitsfeld hier nicht das erforderliche Auflösungsvermögen auf, um die Abflussöffnung bei Station 205 abzubilden. Das reflexionsseismische Laufzeitprofil (Fig. 7b) zeigt hingegen die Abflussöffnung mit der erforderlichen Deutlichkeit. Die Laufzeitdarstellung (mit nicht-linearer Tiefenskala) wurde in diesem Fall wegen ihrer erhöhten Detailgenauigkeit gewählt.

Die seismische Kartierung der Abflussöffnung mit einem Durchmesser von 10-15 m erfolgte mit einem Geophonabstand von 1.5 m.

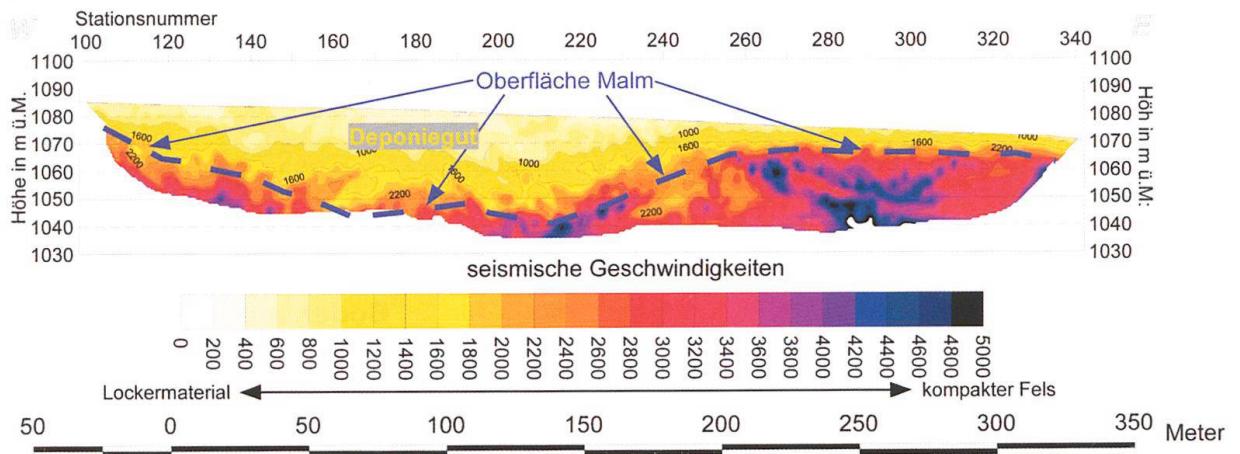
als 1/50 bis 1/20 der gewünschten Erkundungstiefe gewählt werden.

- Die Länge der aktiven hybridseismischen Geophonauslage soll mindestens das 3-fache der gewünschten Erkundungstiefe betragen.

5. Schlussfolgerungen

- Zur seismischen Erfassung von Hohlräumen und kleinräumiger Schwächezonen empfiehlt sich der kombinierte Einsatz von hoch auflösender Reflexionseismik und Tauchwellentomographie (hybride Seismik).
- Die Datenerfassung ist mit kleinen Geophonstationsabständen vorzunehmen. Als Faustregel sollen diese nicht grösser

a) Refraktionstomographisches Geschwindigkeitsfeld



b) Reflexionsseismisches LAUFZEITprofil

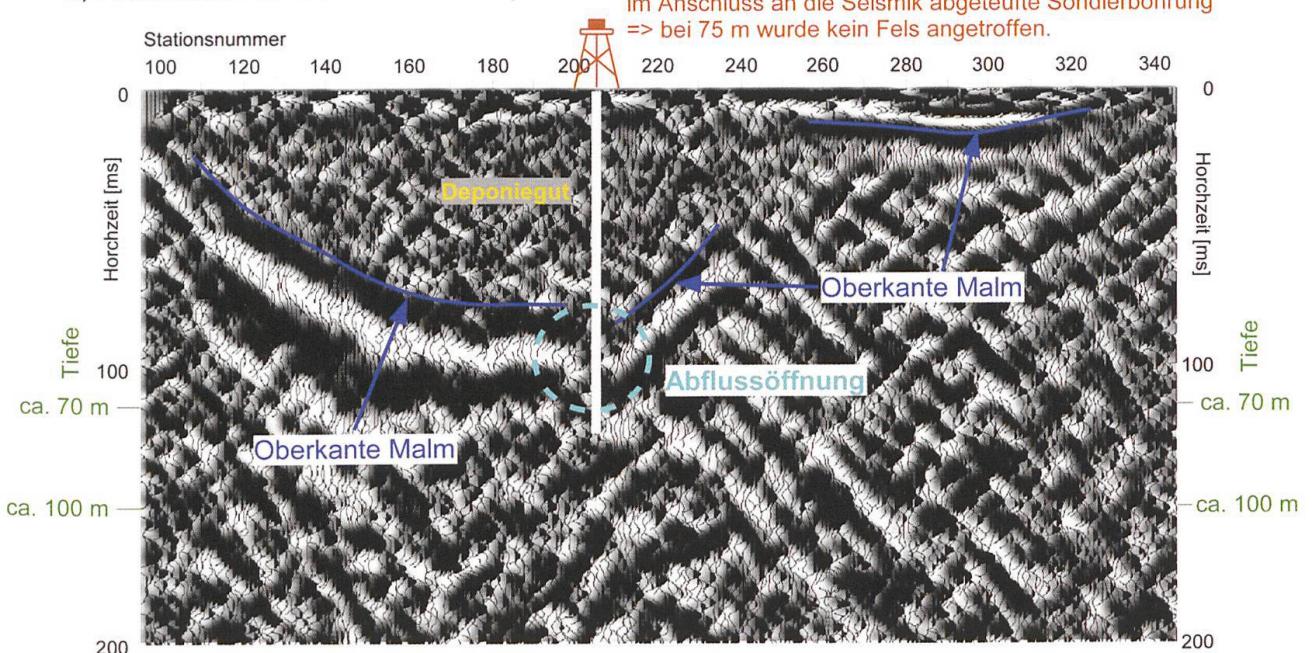


Fig. 7: Hybridseismische Erkundung einer als Deponie genutzten Doline zur Bestimmung der Abflussöffnung. Auf dem reflexionsseismischen Profil im unteren Bild ist die Öffnung deutlich zu erkennen. Eine im Anschluss an die Seismik durchgeführte Bohrung hat bei einer Tiefe von 75 m keinen Fels angetroffen.

Literaturverzeichnis

- Barton, N. 2006: Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy, 729 p. Taylor & Francis, UK & Netherlands, ISBN 9-78041-539-4413.
- Frei, W. 1992: Zur Detailgenauigkeit reflexionsseismischer Daten, Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing., Vol. 59, Nr. 134, 37–45.
- Frei, W. & Keller, L. 2000: Hybride Seismik – eine verbesserte Methode des Aussagepotentials seismischer Daten, Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing., Vol. 5, Nr. 2, 229–236.
- Frei, W. 2010: Seismic surveying tools for the early detection of rock instability zones, European Rock Mechanics Symposium (EUROCK2010), Lausanne, 15.–18. Juni 2010.

Osypov, K. 2000: Robust refraction tomography, 70th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., 2032–2035.

www.parkseismic.com: Ein umfassendes und leicht verständliches Tutorial aller seismischen Erkundungsverfahren.

RISSE? SENKUNGEN?

URETEK DEEP INJECTIONS®: DIE LÖSUNG BEI FUNDATIONSPROBLEmen



IHR NUTZEN

- einfache und schnelle Ausführung
- sofortige Wirkung
- keine Baustelle
- zeit- und kosten-sparend

Europa-Patent

Bodenverdichtung durch URETEK DEEP INJECTIONS®

Die Uretek-Techniker führen kleine Bohrungen (Durchmesser 2 cm) in einem Abstand von 0,5–1,5 m direkt durch das Fundament aus. In das Bohrloch werden Kupferrohre, in die für das Projekt vorgesehene Tiefe der Injektionen, gestossen. Das Geoplus-Kunstharz wird flüssig injiziert und expandiert in wenigen Sekunden auf ein vielfaches seines Volumens, wobei es einen Expansionsdruck von 100 kg/cm² erreichen kann.

Die Injektionen werden fortgesetzt, bis eine Anhebung des aufliegenden Gebäudes entsteht. Am Gebäude werden Lasermessgeräte installiert, um Bewegungen im Millimeterbereich festzustellen und die anzuhebende Struktur zu überwachen.



Kostenlose Angebote

URETEK Schweiz AG

6052 Hergiswil

Tel. 041 676 00 80

www.uretek.ch - uretek@uretek.ch

Mit 35 Jahren
Erfahrung weltweit
im Einsatz