

Licht ins Dunkel bringen

Stefan Lüth¹, Roman Esefelder^{1,2}, Heike Richter^{1,2}, Katrin Jaksch¹, Benjamin Schwarz¹, Britta Wawerzinek¹, Rüdiger Giese¹, Charlotte M. Krawczyk^{1,2}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² TU Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Berlin

Die Mindestanforderungen des Standortauswahlgesetzes stellen hohe Ansprüche an die physikalischen Eigenschaften des Wirtsgesteins an einem möglichen Endlagerstandort. Geophysikalische Verfahren können ein strukturelles Abbild des Untergrunds liefern und diesen beschreiben, von der Erdoberfläche bis in die Tiefe des Endlagers und darunter. Für die Erkundung eines Endlagerstandorts sind hochauflösende Verfahren notwendig, die weit über Standardmethoden der seismischen und geologischen Untersuchungen hinausgehen.

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) definiert Mindestanforderungen an die Eigenschaften und die geometrische Anordnung des Wirtsgesteins an einem Endlagerstandort. Die Gesteinsformation, die den hochradioaktiven Abfall aufnehmen soll, muss mindestens 100 m mächtig sein und mindestens 300 m unter der Geländeoberfläche liegen. Sie muss außerdem eine ausreichende flächenhafte Ausdehnung aufweisen, um das gesamte Endlager und alle damit verbundenen Bauwerke (z. B. auch ein unter Umständen erforderliches Bergungsbergwerk) aufnehmen zu können. Innerhalb dieser Gesteinsformation muss die Vorkundung sicherstellen, dass die geologischen Strukturen die langfristige Stabilität und das Rückhaltevermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht beeinträchtigen. Dies können Schwächezonen wie z. B. Störungen oder interne Unregelmäßigkeiten (Heterogenitäten) innerhalb der Formation sein.

Kernaussagen

- Die **seismische Vorkundung** eines potenziellen Endlagerstandorts liefert zerstörungsfrei ein detailliertes **strukturelles und physikalisches Abbild** des Untergrunds.
- Die **begrenzte räumliche Auflösung der Oberflächenerkundung** wird **untertägig** ergänzt. Die in **verschiedenen Untertagelaboren validierte Seismik** erlaubt die Abbildung und physikalische Charakterisierung von kleinräumigen Strukturen, die von der Oberfläche nur unzureichend sichtbar gemacht werden können.
- Es werden neue Auswertemethoden entwickelt, die eine **verbesserte Abbildung** von internen Strukturen wie **Störungen oder Schwächezonen** innerhalb geologischer Formationen erlauben.

Modellierungen für die Langzeitprognose der Entwicklung eines Endlagerstandorts sind auf eine möglichst genaue Beschreibung des „Ist-Zustands“ in einem statischen Modell (Lage und Geometrie des

einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der darüber liegenden Schichten sowie ihrer physikalischen Eigenschaften) angewiesen (Kühn et al., 2021, S. 30 in diesem Heft).



Abb. 1: Untertägige seismische Messungen bringen Licht ins Dunkel. In einem Salzbergwerk wurden so durch das GFZ Umfelderkundungen durchgeführt. Vordergrund: Digitale Datenaufzeichnung; Hintergrund: Anregung seismischer Signale durch eine auf einen Gabelstapler montierte Vibrationsquelle (Foto: R. Giese, GFZ)

Ein für die Endlagerung hochradioaktiven Abfalls in Frage kommender Standort muss also umfassend erkundet werden, und dies soll möglichst „zerstörungsfrei“ geschehen, also ohne das zu untersuchende Wirtsgestein anzubohren und so Risse und Klüfte zu schaffen. Deshalb sind im Rahmen der übertägigen Erkundung durchgeführte geophysikalische (seismische) Messungen ein wichtiges Werkzeug zur Untergrundabbildung eines möglichen Endlagerstandorts. Diese können durch untertägige, seismische Messungen ergänzt werden, die eine höhere Auflösung von Strukturen im unmittelbaren Umfeld eines potenziellen Endlagers ermöglichen (Abb. 1).

Seismische Abbildung von Störungen

Als klassisches geophysikalisches Verfahren liefert die Reflexionsseismik hochaufgelöste strukturelle Abbilder des Untergrunds. Sie findet seit mittlerweile über 50 Jahren verlässlich Einsatz in der Prospektion. Insbesondere in Sedimentbecken, welche für die Erkundung und Erschließung von Kohlenwasserstoffen von zentraler Bedeutung sind, ermöglicht die Reflexionsseismik detaillierte Rekonstruktionen von Schichtgrenzen, die eine wichtige Grundlage für die Inter-

pretation und die Modellbildung darstellen (Doornebal und Stevenson, 2010; Ziesch et al., 2017). Während reflektierte Wellenfelder eine ausgezeichnete vertikale Auflösung in der Oberflächen-seismik ermöglichen, ist das laterale Auflösungsvermögen physikalisch begrenzt, was zur Folge hat, dass kleinräumige Heterogenitäten nur unzureichend abgebildet werden können. Zudem ist es insbesondere schwierig, steilstehende Strukturen mit einer typischen Messanordnung verlässlich zu rekonstruieren.

Begünstigt durch die Erhebung immer größerer und dichter Datensätze, werden vor allem im Rahmen von Forschungsarbeiten neben Reflexionen an Schichtgrenzen vermehrt schwache, an kleinräumigen Diskontinuitäten rückgestreute Wellenfelder untersucht, die in herkömmlichen Bearbeitungsschritten gewöhnlich unterdrückt werden. Diese sogenannten Diffraktionen (siehe Infobox Reflexionen und Diffraktionen S. 23) haben trotz ihrer Schwäche die einzigartige Eigenschaft, dass die Streuung in guter Näherung gleichförmig in alle Richtungen erfolgt. Dadurch kann auch mit wenigen Empfängern an der Oberfläche eine ausreichende Beleuchtung von beliebig steilstehenden Strukturen gewährleistet werden (Schwarz, 2019).

Lokalisierte Heterogenitäten, deren laterale Ausmaße sich im Bereich oder unterhalb der seismischen Wellenlänge bewegen, zeichnen sich durch die Erzeugung von diffraktierten Wellenfeldern aus, die mit modernen, speziell zugeschnittenen Bearbeitungsmethoden ausgewertet werden können. Insbesondere treten Diffraktionen vermehrt an Brüchen und Störungen auf, deren genaue strukturelle Beschreibung in direktem Zusammenhang mit der wichtigen Abschätzung der Durchlässigkeit für Fluide und von Gefahrenpotenzialen steht (Schwarz und Krawczyk, 2020).

Abbildung 2 zeigt einen Vergleich einer herkömmlichen reflexionsbasierten Untergrundabbildung (a) mit einer Rekonstruktion basierend auf Diffraktionen (b) für einen industriellen seismischen Datensatz, der vor der Küste Israels im Levantebecken aufgezeichnet wurde (Schwarz und Krawczyk, 2020). Abgebildet sind oberflächennahe, weitgehend ungestörte, horizontale Reflektoren, eine darunter angeschlossene ältere Schicht resultierend aus chaotischer Sedimentation durch turbulente Bodenströmungen, sowie tiefer liegende, ältere Sedimentgesteine, die von durch Salztektonik verursachten Störungen (S1 bis S4 in Abb. 2) durchzogen sind. Während herkömmliche Reflexionsabbilder



Kontakt: Stefan Lüth
(slueth@gfz-potsdam.de)

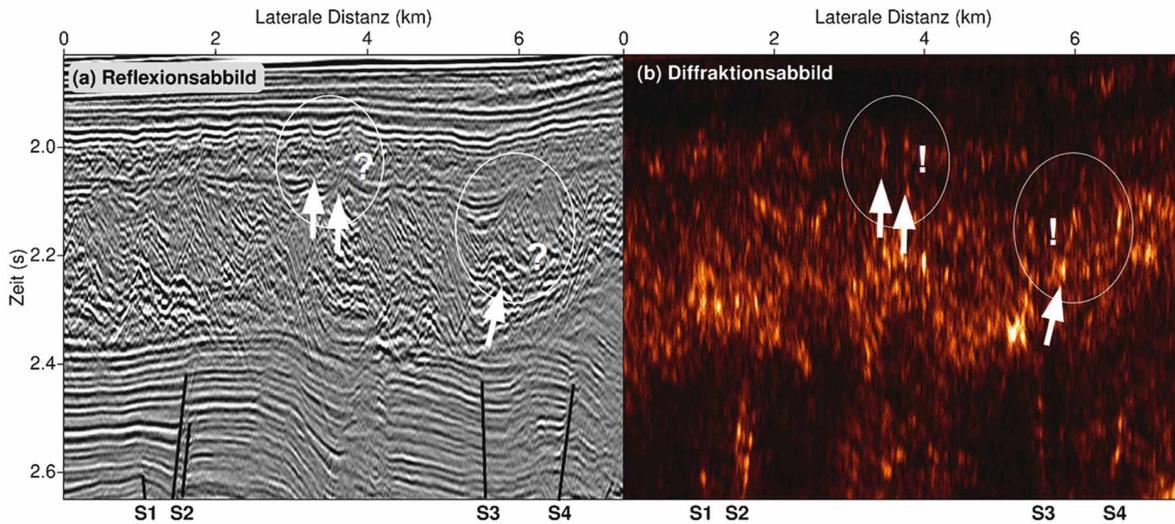


Abb. 2: Vergleich von seismischen Abbildungstypen im Levantebecken mit a) konventioneller Reflexionsabbildung nach Kirchhoff-Migration und b) neuartiger Diffraktionsabbildung. Komplementär werden horizontale Strukturen und Schichtgrenzen (a) sowie Störungen (S1 bis S4) und Heterogenitäten (b) hervorgehoben. Die weißen Ellipsen markieren beispielhaft Bereiche mit Störungen, die in der konventionellen Migration kaum interpretierbar sind (nach Schwarz und Krawczyk, 2020). Im Diffraktionsbild (b) sind diese als steilstehende, lineare Elemente zu erkennen.

oft nur indirekt über kleinräumige Heterogenitäten Aufschluss geben, kann mit Diffraktionen ein hochaufgelöstes, direktes Abbild von Bruch- und Störungszonen gewonnen werden, auch wenn diese selbst keine seismische Aktivität aufweisen. Die in Abb. 2 angedeuteten komplementären Eigenschaften reflexions- und diffraktionsbasierter Rekonstruktionen des Untergrunds begünstigen eine gemeinsame, integrierte Auswertung im Rahmen der Standortsuche für ein Endlager.

Seismik im Untertagelabor

Die Kombination von übertägig aufgenommener Reflexionsseismik und Detailinformationen aus einzelnen Vertikalbohrungen hat bei der Erkundung und Überwachung von Erdöl- und Erdgasreservoirs, in der Geothermie (Krawczyk et al., 2019) oder auch der geologischen Speicherung von CO₂ (Lüth et al., 2017) umfassende Daten zur Erstellung von Modellen und zur Beschreibung von Prozessen in den Reservoirs beigetragen. Ein Endlagerbergwerk muss über die

mehrere Jahrzehnte dauernde Einlagerungsphase sicher betrieben werden und, zusammen mit dem umgebenden Wirtsgestein, eine sichere Verwahrung des Abfalls über einen noch viel längeren Zeitraum gewährleisten. Deshalb ist eine sehr detaillierte Erkundung des betreffenden Standorts erforderlich, die ein rein übertägiger Ansatz nicht leisten kann.

Um die Lücke zwischen der relativ großräumigen Erkundung von der Oberfläche und den punktuell gesetzten Vertikalbohrungen (die an einem möglichen Endlagerstandort auf ein Minimum reduziert sein sollten) zu schließen, hat das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ ein modulares seismisches Erkundungssystem entwickelt (Giese et al., 2021). Dieses System erlaubt die Erkundung im Vor- bzw. Umfeld eines untertägigen Bauwerks (Tunnel, Stollen und Bergwerk) und ermöglicht über die Integration von flexiblen seismischen Quellen in verschiedenen Größen Messungen vom Tunnel oder Stollen aus. Die wesentlichen Komponenten dieses Messsystems sind kompakte seismische Quellen

(Impulsanregung sowie Anregung von exakt definierten Vibrationssignalen) sowie in Felsanker integrierte seismische Empfänger. Weitere bohrlochgestützte Quellen und Empfänger erlauben die Erweiterung der Messgeometrie um kurze Erkundungsbohrungen (bis rund 120 m Bohrlochtiefe) im Umfeld der Bauwerke.

Beispiele der reflexionsseismischen Abbildung von Strukturen im direkten Umfeld von unterirdischen Bauwerken, einem Stollen im Kristallingestein (Schweizer Alpen, Richter et al., 2018), einem Salzbergwerk im Werra-Revier in Hessen (Giese et al., 2021), sowie einem Felslabor im Tonstein (Mont Terri, Schweiz, siehe Infobox S. 21) sind in Abb. 3 zu sehen. Für diese Untersuchungen wurden mit Hilfe des am GFZ entwickelten untertageseismischen Systems (Systembeschreibung unter: <https://www.3duslab.com/>) Messungen in den unterirdischen Bauwerken durchgeführt. Eine noch genauere Charakterisierung der physikalischen Eigenschaften des Gesteins im Umfeld eines Bergwerks oder Stollens wird mit Hilfe der seismischen Tomographie erreicht (Abb. 5).

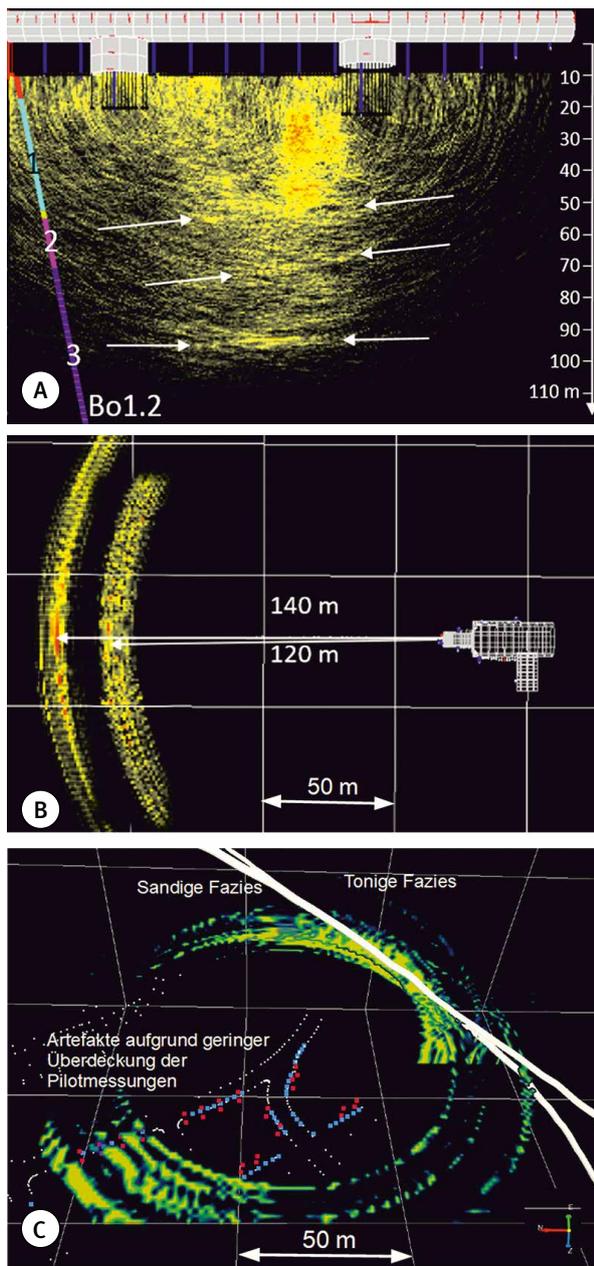


Abb. 3: Reflexionsseismische Umfeldabbildung in der untertägigen Erkundung mit Beispielen aus dem A): Kristallin (Piora-Sondierstollen, Richter et al., 2018), B): Salzgestein (Werra-Revier, Giese et al., 2021) und C): Tonstein (Felslabor Mont Terri). In allen drei geologischen Umgebungen ist eine strukturelle Abbildung prinzipiell möglich. Im Vordergrund steht dabei insbesondere die Detektion und Ortung von Heterogenitäten (z. B. potenziell wasserführenden Störungszonen) innerhalb einer Gesteinsformation.



Untertagelabore – Das Beispiel Mont Terri



Abb. 4: Seismische Messungen unter Tage im Felslabor Mont Terri (Foto: K. Krüger, GFZ)

Untertägige Labore werden in Gesteinsformationen eingerichtet, die sich grundsätzlich für die Endlagerung radioaktiver Abfälle eignen. Sie sind wichtig, um unter kontrollierten und gleichzeitig natürlichen Randbedingungen das komplexe Verhalten von Endlagersystemen zu untersuchen. Ein Beispiel hierfür ist das Felslabor Mont Terri, das seit 1996 unter der Leitung des Schweizer Bundesamts für Landestopographie (swisstopo) besteht (Abb. 4). Es befindet sich im Kanton Jura, nahe der Kleinstadt Saint-Ursanne. Für das Felslabor wurden rund 1200 m Stollen und Nischen aufgeföhrt, um eine Forschungsplattform für verschiedenste Experimente im Opalinuston zur Verfügung zu stellen.

Neben der Endlagerung werden im Rahmen eines internationalen Forschungsprojekts auch Experimente zu anderen geowissenschaftlichen Themen, z. B. zur geologischen CO₂-Speicherung, durchgeführt. Das Mont-Terri-Projekt besteht aus 22 Mitgliedern aus neun Nationen und wird durch swisstopo koordiniert. Die Partner sind für die Finanzierung und Durchführung der wissenschaftlichen Experimente im Felslabor verantwortlich. Die Helmholtz-Gemeinschaft, vertreten durch GFZ, UFZ, KIT, FZ Jülich und HZDR, ist seit dem 1. Juli 2018 Mitglied des Projekts. Neben der geophysikalischen Erkundung (siehe dieser Beitrag) sind die Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft an verschiedenen Experimenten zur Hydrogeologie, Mikrobiologie und zur Geochemie eines Endlagerkomplexes beteiligt.

Mehr Informationen auf der Website:

<https://www.mont-terri.ch/>

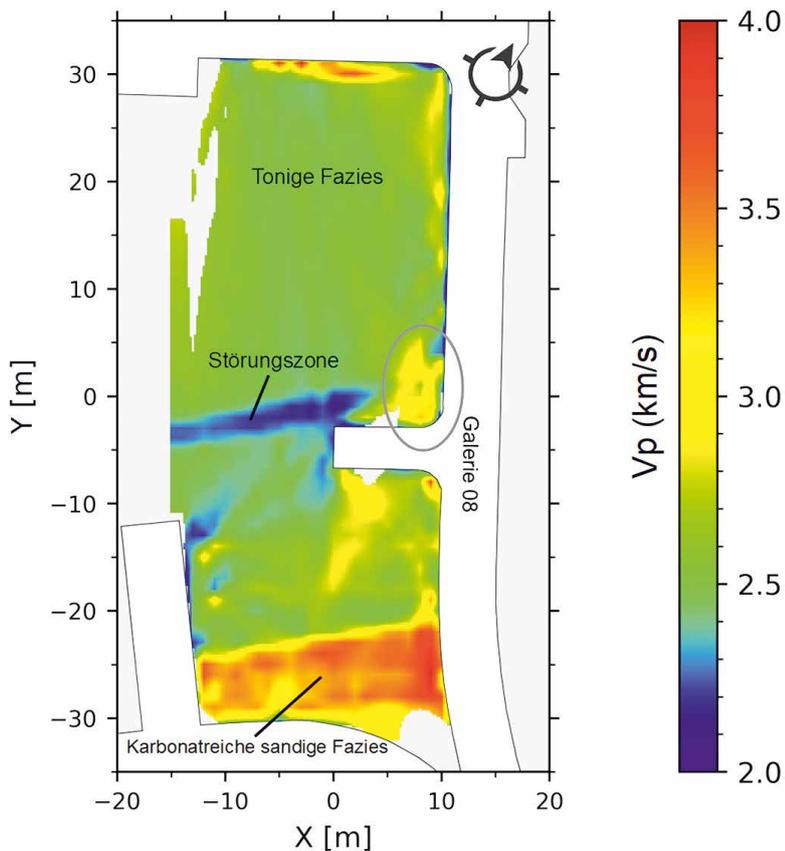


Abb. 5: Tomographische Durchschallung eines Teils der Tonsteinformationen im Mont-Terri-Felslabor. Anhand unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen (V_p) lassen sich verschiedene Typen des Opalinustons unterscheiden. Eine Störungszone ist durch besonders niedrige seismische Geschwindigkeiten gekennzeichnet. Im Verlauf der Störungszone befindet sich ein Gebirgsbereich, der von den tomographischen Messungen nicht gut abgebildet werden konnte (markiert durch eine Ellipse) und daher zu hohe seismische Geschwindigkeiten aufweist.

Für diese „Durchschallung“ wurden seismische Messpunkte um das zu untersuchende Gestein herum platziert, sodass eine direkte Analyse der Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen in diesem Gesteinskomplex ermöglicht wurde. Die Verteilung von Geschwindigkeiten in diesem Gesteinskomplex erlaubt die Erkennung von mechanisch stabilen und weniger stabilen Zonen. Aus dem seismischen Tomogramm lässt sich ein präzises geologisches Modell des direkten Umfelds eines Endlagers konstruieren. Eine wiederholte Durchführung dieser Durchschallungsmessungen erlaubt außerdem eine Überwachung des betreffenden Gesteinskomplexes, z. B. im Rahmen weiterer Baumaßnahmen oder in der frühen Phase der Einlagerung hochradioaktiven und Wärme entwickelnden Abfalls.

Fazit und Ausblick

Die seismische Erkundung von der Erdoberfläche ist eine der wesentlichen Komponenten der übertägigen Standorterkundung im Rahmen der Suche nach einem geeigneten Endlagerstandort für hochradioaktiven Abfall. Das Standortauswahlgesetz führt in seinen Mindestanforderungen Kriterien auf, welche die bisher eingesetzten seismischen Erkundungsverfahren vor neue Herausforderungen stellen. Die Auswertung der übertägigen Erkundung muss einen starken Fokus auf die Erkennung von Störungszone und anderen geologischen Strukturen, die einen negativen Einfluss auf die langfristige Stabilität eines Endlagers haben können, legen. Es existieren vielversprechende Ansätze zur Abbildung solcher kleinräumigen Strukturen, die, anders als die klassische reflexionsseismische Erkundung, noch keine breite

Anwendung außerhalb der Forschung gefunden haben. Eine Validierung dieser Ansätze mit weiteren Datensätzen sowie mit synthetischen Modellrechnungen unter besonderer Berücksichtigung von realistischen Szenarien für mögliche Strukturen eines Endlagerstandorts wird eine wichtige künftige Forschungsfrage sein. Aufgrund der physikalisch bedingten Begrenzungen der übertägigen Erkundung (Frequenz, Wellenlänge), werden auch fortgeschrittene Abbildungsverfahren möglicherweise nicht alle für ein unterirdisches Endlagergebäude kritischen Strukturen erfassen. Deshalb bleibt die untertägige Erkundung, mit zwar geringeren Reichweiten, dafür aber auch aufgrund der höheren Signalfrequenzen deutlich besserer Auflösung, ein weiterer wichtiger Baustein bei der Erkundung und auch Überwachung eines möglichen Endlagerstandorts.

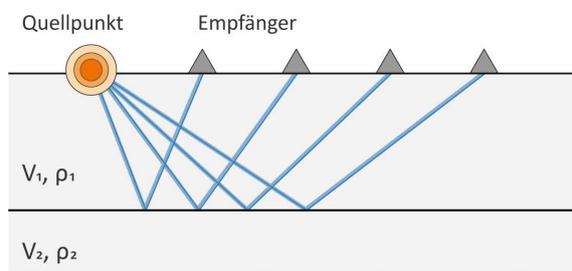


Reflexionen und Diffraktionen

In der seismischen Erkundung werden elastische Wellen verwendet, die von seismischen Quellen an oder nahe der Erdoberfläche angeregt wurden. An geologischen Schichtgrenzen, an denen sich die elastischen Eigenschaften (Geschwindigkeit V und Dichte ρ) der Gesteine ändern, wird ein Teil des elastischen Wellenfelds reflektiert. An Störungszonen oder anderen kleinräumigen Unregel-

mäßigkeiten im Untergrund treten Diffraktionen auf, d. h., das auf diese Unregelmäßigkeiten auftreffende Wellenfeld wird in alle Richtungen zurück gestreut (Abb. 6). Bei der konventionellen seismischen Datenbearbeitung werden die reflektierten Wellenfeldanteile hervorgehoben, während diffraktierte Anteile gezielt unterdrückt werden.

REFLEXION



DIFFRAKTION

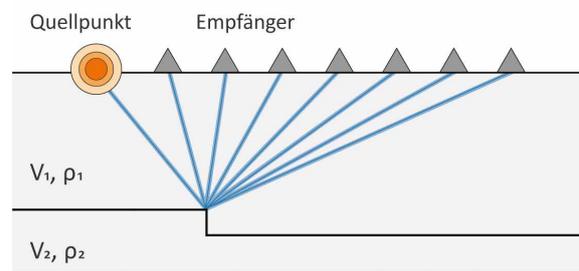


Abb. 6: Laufwege seismischer Wellen vom Quellpunkt zu seismischen Empfängern bei Reflexion (links) und Diffraktion (rechts)

Literatur

- Doornenbal, H., Alan, S., European Association of Geoscientists Engineers (Eds.). (2010). *Petroleum geological atlas of the Southern Permian Basin Area*. EAGE.
- Giese, R., Lüth, S., Richter, H., Wawerzinek, B., Jaksch, K., Esefelder, R. (2021). *3D-Underground Seismics in crystalline, salt and clay rocks NSG2021 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120046>
- Krawczyk, C., Stiller, M., Bauer, K., Norden, B., Henniges, J., Ivanova, A., Huenges, E. (2019). 3-D seismic exploration across the deep geothermal research platform Groß Schönebeck north of Berlin/Germany. *Geothermal Energy*, 7 (1). <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0131-x>
- Kühn, M., Hennig, T., Heidbach, O., Scheck-Wenderoth, M. (2021). Modelle simulieren die Zukunft. *System Erde*, 11 (2), 30–35. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.5>
- Lüth, S., Bergmann, P., Huang, F., Ivandic, M., Ivanova, A., Juhlin, C., Kempka, T. (2017). 4D Seismic Monitoring of CO₂ Storage During Injection and Post-closure at the Ketzin Pilot Site. *Energy Procedia*, 114, 5761–5767. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1714>
- Richter, H., Hock, S., Mikulla, S., Krüger, K., Lüth, S., Polom, U., Dickmann, T., Giese, R. (2018). Comparison of pneumatic impact and magnetostrictive vibrator sources for near surface seismic imaging in geotechnical environments. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.08.010>
- Schwarz, B. (2019). An introduction to seismic diffraction. In C. Schmelzbach (Ed.), *Recent Advances in Seismology* (Vol. 60, pp. 1–64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agph.2019.05.001>
- Schwarz, B., Krawczyk, C. (2020). Coherent diffraction imaging for enhanced fault and fracture network characterization. *Solid Earth*, 11 (5), 1891–1907. <https://doi.org/10.5194/se-11-1891-2020>
- Ziesch, J., Aruffo, C. M., Tanner, D. C., Beilecke, T., Dance, T., Henk, A., Weber, B., Tenthorey, E., Lippmann, A., Krawczyk, C. (2017). Geological structure and kinematics of normal faults in the Otway Basin, Australia, based on quantitative analysis of 3-D seismic reflection data. *Basin Research*, 29 (2), 129–148. <https://doi.org/10.1111/bre.12146>