Resonanzseismik und Reflexionsseismik

Resonanzseismik lässt sich als gezielte Untersuchung der dynamischen Eigenschaften des Untergrunds etablieren. Eigenfrequenzen, Dämpfung, Modenformen und räumliche Veränderungen erschließen eine eigenständige Gruppe geophysikalischer Merkmale. Ihre Interpretation verbindet elastische Wellenphysik, mechanische Kontaktmodelle und die Kopplung zwischen Gestein und Fluid.

Vom Micara & Retagg Team

Gegenstand und Ausgangspunkt

Im Mittelpunkt steht die Frage, welche Informationen die Schwingungsantwort des Untergrunds zusätzlich zu seiner reflexionsorientierten Abbildung trägt. Die proprietär entwickelte resonanzbasierte Stoßseismik knüpft an mehrjährige praktische Arbeiten und erfolgreiche Anwendungen in der Wasseridentifikation an. Diese Anwendungserfahrung motiviert eine systematische Beschreibung der Messgrößen, ihrer physikalischen Bedeutung und ihrer geologischen Interpretation.

Das Papier entwickelt die dafür erforderliche Theorie und verbindet sie mit publizierter Forschung von 2010 bis 2026. Resonanz wird als Teil der etablierten Akustik und Geophysik behandelt. Die wissenschaftliche Grundlage umfasst Modellrechnungen, kontrollierte Experimente und Feldbeobachtungen; der jeweilige Aussagebereich bleibt bei ihrer Übertragung auf ein Erkundungsverfahren erhalten.

Die sechs zentralen Thesen

1. Reflexion und Resonanz beschreiben unterschiedliche Eigenschaften desselben elastischen oder poroelastischen Systems und können gemeinsam ausgewertet werden.

2. Ein mechanischer Impuls kann mehrere charakteristische Moden anregen. Das Nachschwingen enthält Informationen über Geometrie, Steifigkeit, Kopplung und Verluste.

3. Mechanische Kontaktflächen und fluidgefüllte Klüfte sind dynamische Strukturen. Ihre Antwort kann gegenüber der reinen Zuordnung von Gesteinsarten zusätzliche Unterschiede sichtbar machen.

4. Theoretische Akustik und Phononik erklären frequenzselektiven Transport, Wellenführung und lokale Energiespeicherung. Für die seismische Anwendung ist der klassische Wellenmaßstab maßgeblich.

5. Frequenz, Güte, Polarisation und räumliche Kohärenz bilden zusammen mit einem kalibrierten Modell die Grundlage der Interpretation.

6. Eine etablierbare Resonanzseismik verbindet reproduzierbare Messungen, nachvollziehbare Auswertung und geologisch beziehungsweise hydraulisch überprüfte Ergebnisse.

1 Reflexion und Resonanz als gemeinsame Wellenphysik

Ein mechanischer Stoß erzeugt ein Wellenfeld, das direkte Ankünfte, reflektierte und gestreute Anteile, Oberflächenwellen, geführte Wellen und freie Schwingungen enthalten kann. Stoßseismik bezeichnet zunächst die Anregungsart. Resonanzseismik bezeichnet hier die gezielte Erfassung und Modellierung charakteristischer Schwingungsmerkmale dieses Wellenfeldes.

Reflexion entsteht an einer Änderung der Ausbreitungsbedingungen. Resonanz bezeichnet eine ausgeprägte Antwort in der Nähe charakteristischer Eigenfrequenzen. Wiederholte Reflexion, Interferenz und Modenkopplung können an der Entstehung solcher Antworten beteiligt sein. Die Unterscheidung betrifft daher vor allem die gewählten Beobachtungsgrößen und Inversionsziele.

Aspekt	Reflexionsorientierte Auswertung	Resonanzorientierte Auswertung
Leitfrage	Wo entstehen reflektierte Anteile und welche Struktur erklärt sie?	Welche Moden antworten und welche Eigenschaften prägen sie?
Merkmale	Laufzeit, Phase, Amplitude, Winkel und Frequenzabhängigkeit	Eigenfrequenz, Linienbreite, Abklingen, Polarisation und Modenform
Räumliche Zuordnung	Messgeometrie und Ausbreitungsmodell	Modell, räumliche Messfolgen und zusätzliche Randbedingungen
Modellgrößen	Geschwindigkeit, Impedanzkontraste, Grenzflächen und Dämpfung	Geometrie, Kontaktsteifigkeit, Trägheit, Fluidkopplung und Verluste
Gemeinsame Grundlage	Elastische und poroelastische Wellenphysik	Dieselbe Physik mit Schwerpunkt auf dynamischen Systemeigenschaften

Die Auswertung entscheidet über den Informationsgewinn

Eine auf einzelne Reflexionsereignisse ausgerichtete Verarbeitung gewichtet andere Merkmale als eine Analyse der Coda, also der späteren Signalanteile. Moderne Reflexionsseismik berücksichtigt jedoch ebenfalls Frequenzabhängigkeit, Streuung und Dämpfung. Die vollständige Wellenforminversion verarbeitet die Wellenform über ein physikalisches Vorwärtsmodell. Resonanzmerkmale können diese Auswertung ergänzen oder innerhalb desselben Modells genutzt werden. [20, 22]

Polarisation und Geschwindigkeit sind verschiedene Begriffe

P- und S-Wellen unterscheiden sich durch die Orientierung der Teilchenbewegung. Phasengeschwindigkeit beschreibt die Bewegung einer Phase, Gruppengeschwindigkeit die Ausbreitung einer schmalbandigen Wellenhülle. Geführte Moden können dispersiv sein. Diese Eigenschaften ersetzen die Unterscheidung von P- und S-Wellen nicht, sondern ergänzen sie.

2 Impulsantwort Eigenmoden und Spektren

Für ein diskretisiertes lineares System beschreiben Masse M, Dämpfung C und Steifigkeit K die Verschiebung u unter einer äußeren Anregung F. Im Frequenzbereich ergibt sich daraus die Übertragungsfunktion H:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t)$$

$$H(\omega) = [K - \omega^2 M + i\omega C]^{-1}$$

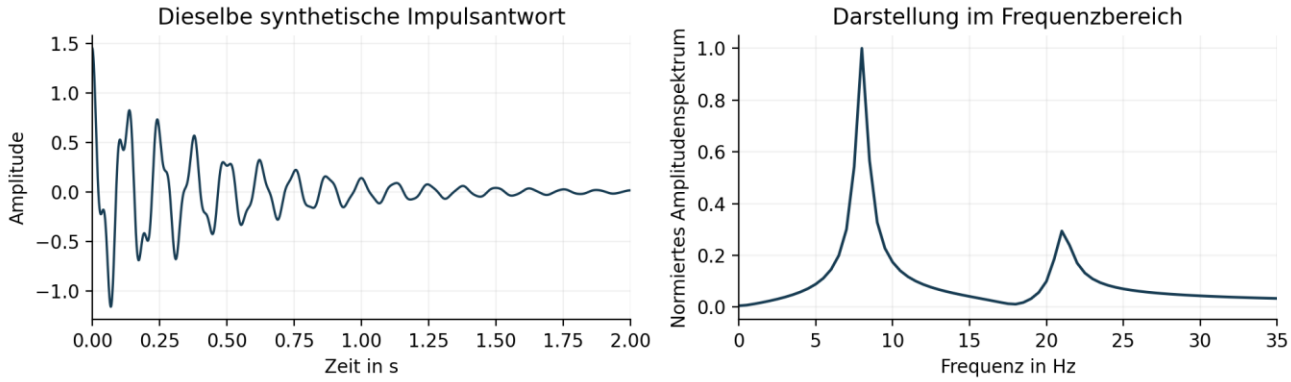
Die Eigenmoden des ungedämpften Systems erfüllen $K\varphi = \omega^2 M\varphi$. Ihre Frequenzen und Formen hängen von Material, Geometrie und Randbedingungen ab. Ein kurzer Stoß kann mehrere erreichbare Moden gleichzeitig anstoßen. Nach Ende der Anregung klingt die Antwort frei ab; bei einer fortgesetzten periodischen Anregung wird dagegen laufend Energie zugeführt.

Wiederkehrende Wellenanteile und Resonanz

Ein idealisierter eindimensionaler Resonator mit Umlaufzeit τ und Amplitudenfaktor r pro Umlauf veranschaulicht den Zusammenhang. Die Summe wiederkehrender Beiträge lautet:

$$G(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} r^n e^{-i\omega n\tau} = \frac{1}{1 - re^{-i\omega\tau}}, \quad |r| < 1$$

Bei passender Phasenlage verstärken sich Beiträge. Die reale Interpretation benötigt darüber hinaus die richtige Modenart. Für Platten kann beispielsweise eine Lamb-Mode die beobachtete Dickenresonanz genauer beschreiben als eine reine Folge von P-Wellen-Reflexionen. [17]



Eigene synthetische Illustration mit zwei gedämpften Schwingungen. Zeitverlauf und Spektrum zeigen dieselbe Impulsantwort; es handelt sich um keine Feldmessung.

Die komplexe Fourier-Transformation bewahrt die Information des Signals. Ein reines Amplitudenspektrum verliert dagegen die Phase. Der Erkenntnisgewinn entsteht durch identifizierbare Moden und geeignete Modellierung, nicht allein durch den Wechsel der Darstellung.

3 Theoretische Akustik und Phononentransport

Vom elastischen Kontinuum zur mikroskopischen Schwingung

Die klassische Elastodynamik beschreibt die Bewegung eines Festkörpers über Dichte, Spannung und Verschiebung. In einem isotropen, homogenen Medium entstehen daraus die bekannten Kompressions- und Scherwellen. In Kristallen lassen sich dieselben langwelligen Bewegungen als kollektive Schwingungen des Atomgitters auffassen. Die quantisierten Anregungen solcher Moden heißen Phononen; akustische Phononen gehen im langwelligen Grenzfall in die Beschreibung durch elastische Wellen über. [6]

$$\varrho\, \partial^2 u/\partial t^2 = \nabla\cdot\sigma + b$$

Hier sind ϱ die Dichte, σ der Spannungstensor und b die Kraft pro Volumen. Für ein lineares elastisches Material verknüpft der Steifigkeitstensor Spannung und Verzerrung. In geklüftetem Gestein kommen Grenzflächen, Fluidbewegung und frequenzabhängige effektive Eigenschaften hinzu.

Was Phononen zum Verständnis beitragen

Die Phononenbeschreibung verbindet mechanische Schwingung mit Energie- und Impulstransport auf mikroskopischer Ebene. Ein einzelnes Schwingungsquant besitzt die Energie $E = \hbar\omega = hf$. Seismische Messungen erfassen jedoch makroskopische, kollektiv besetzte Moden. Bei 100 Hz beträgt hf ungefähr $6{,}6 \times 10^{-32}$ J, während kBT bei 300 K etwa $4{,}1 \times 10^{-21}$ J beträgt. Diese Größenordnung erklärt, weshalb für gewöhnliche Feldseismik eine klassische Beschreibung ausreicht.

Für die Signaldeutung sind insbesondere Dispersion, Kopplung und Streuung relevant. Thermische Phononen und ein kohärentes seismisches Wellenpaket sind dabei unterschiedliche Zustände mechanischer Bewegung. Aus dem Begriff Phonon folgt weder ein zusätzlicher verlustfreier Übertragungsweg noch eine erhöhte Erkundungstiefe.

Phasenbewegung Wellenhülle und Energiefluss

$$v_p = \omega/k \qquad v_g = d\omega/dk$$

Eine dispersive Struktur besitzt frequenzabhängige Ausbreitungseigenschaften. In einem schwach verlustbehafteten System kann die Gruppengeschwindigkeit den Energietransport eines schmalbandigen Pakets beschreiben. In stark dämpfenden oder stark streuenden Medien ist diese Gleichsetzung gesondert zu prüfen. Eine stehende Welle kann eine große lokale Amplitude haben, obwohl ihr mittlerer Nettoenergiefluss klein ist.

Resonanz als Energiespeicherung und selektive Antwort

Ein Resonator speichert vorübergehend Energie in elastischer Verformung und Bewegung. Bei periodischer Anregung kann eine günstige Phasenlage die Antwort aufbauen; nach einem Stoß wird die eingebrachte Energie auf die erreichbaren Moden verteilt. Dissipation und Abstrahlung bestimmen das Abklingen. Phononik und theoretische Akustik erklären diese Konzentration und Umverteilung von Energie innerhalb der Energiebilanz. [12]

4 Wellenführung Kontaktflächen und modaler Transport

Schichten und Platten als mechanische Wellenleiter

Grenzflächen können die Ausbreitung so beeinflussen, dass ein Teil des Wellenfeldes an eine Schicht oder Kontaktzone gebunden bleibt. Lamb-Wellen in Platten und geführte Kluftwellen sind Beispiele solcher Moden. Ihre Frequenzabhängigkeit wird durch Geometrie und Randbedingungen geprägt. Zusätzlich existieren Körperwellen im Volumen und Eigenmoden begrenzter homogener Körper; eine verborgene Oberflächenschicht ist dafür keine notwendige Voraussetzung.

Die Resonanzanalyse erhält dadurch einen präzisen Gegenstand: Sie untersucht, welche mechanischen Teilstrukturen Energie aufnehmen, wie sie miteinander gekoppelt sind und über welche Moden die Antwort zum Empfänger gelangt. Die Bauteilprüfung zeigt den Nutzen einer solchen Zuordnung zwischen Impuls, Modenfrequenz und Geometrie. [17, 23]

Geschwächte Kontakte als geologische Zielgröße

Eine Trennfläche kann bei ähnlicher Lithologie beiderseits der Grenze eine ausgeprägte dynamische Wirkung besitzen. Kontaktsteifigkeit, Rauigkeit, dünne Zwischenlagen, Füllung und wirksamer Normaldruck beeinflussen die Kraftübertragung. In einem vereinfachten linearen Kontaktmodell wird die relative Verschiebung mit der übertragenen Spannung verknüpft:

$$t_n = K_n\,[u_n] \qquad t_t = K_t\,[u_t]$$

K_n und K_t bezeichnen die normale und tangentiale Kontaktsteifigkeit pro Fläche; [u] ist der Verschiebungssprung. Diese Beziehung ist ein lokales Modell für kleine Bewegungen um einen gegebenen Zustand. Öffnen, Schließen und Reibgleiten erfordern gegebenenfalls eine nichtlineare Beschreibung. Die Berücksichtigung endlicher Kluftnachgiebigkeit verändert auch geführte Fluid-Kluft-Wellen. [7]

Lokale Resonanzen verändern die Ausbreitung

Die Phononik zeigt, dass gekoppelte Resonatoren frequenzselektive Transmission, Reflexion, Dämpfung und räumliche Konzentration bewirken können. Lokale Resonanz und periodische Bragg-Streuung sind dabei unterschiedliche Mechanismen. Auch Strukturen kleiner als die umgebende Wellenlänge können bei geeigneter Kopplung wirksam werden. [12]

Feldversuche mit künstlich strukturiertem Boden und mit Baumresonanzen belegen, dass entsprechende Effekte bis in seismische Frequenzbereiche reichen. Sie liefern physikalische Analogien für strukturell kontrollierten Signaltransport. Ein natürliches Kluftnetz ist dadurch jedoch nicht automatisch ein phononischer Kristall mit bekannter Bandstruktur. [8, 13]

Anregung und Rückübertragung gehören zusammen

Ein Zielmodus muss zunächst angeregt werden und anschließend eine messbare Antwort erzeugen. Bei einer Kluft kann Energie lokal geführt und an ihren Enden als Körperwelle abgestrahlt werden. Diese Unterscheidung erklärt, weshalb ein gebundener Modus indirekt beobachtbar sein kann, auch wenn sein eigenes Nahfeld rasch abnimmt. [1]

5 Fluidgefüllte Klüfte als dynamische Systeme

Die Kopplung von Fluidträgheit und Kluftnachgiebigkeit

In einer fluidgefüllten Kluft koppeln Druckänderungen und Fluidbewegung an die elastische Verformung der Kluftwände. Die resultierenden Krauklis-Wellen sind geführte, häufig stark dispersive Moden. Ihre Eigenschaften hängen unter anderem von Kluftlänge, Öffnung, Wandnachgiebigkeit, Fluiddichte, Kompressibilität und Viskosität ab. Ein endlicher Kluftkörper kann daraus charakteristische Schwingungsmuster entwickeln. [7, 9]

Für die Wassererkundung ist damit ein konkreter Mechanismus beschrieben, über den Fluid und Struktur gemeinsam die seismische Antwort prägen. Eine besonders informative Messung erfasst mehrere Merkmale, etwa charakteristische Frequenz, Abklingen, Polarisation und ihre räumliche Veränderung. Die Zuordnung erfolgt zu einem gekoppelten System, nicht allein zu einer Stoffbezeichnung.

Kluftresonanz und poroelastische Relaxation

Fluide können seismische Merkmale auf unterschiedlichen Wegen verändern. Bei einer Kluftresonanz spielen wellenartige Bewegung und begrenzte Geometrie zusammen. Bei welleninduziertem Fluidfluss zwischen Poren oder unterschiedlich gesättigten Bereichen können Druckausgleich und viskose Verluste eine Relaxation erzeugen. Beide Mechanismen können frequenzabhängig sein, besitzen aber unterschiedliche charakteristische Skalen und Vorwärtsmodelle. [2, 3]

Eine Interpretation gewinnt deshalb durch die gemeinsame Betrachtung von Dispersion und Dämpfung. Ein breites Verlustmaximum ist anders zu behandeln als eine schmalbandige, zeitlich nachschwingende Mode. Auch die Abhängigkeit von Sättigung, Druck und Anregungsrichtung hilft, Alternativmodelle zu unterscheiden.

Was an Kluftresonanzen bereits untersucht wurde

Numerische Arbeiten behandeln die Anregung durch vorbeilaufende Körperwellen und die Wechselwirkung mit Bohrlochwellen. Laborversuche zeigen schmalbandige Coda-Anteile künstlicher Klüfte. Weitere Experimente untersuchen, wie bewegte Flüssigkeit charakteristische Signalgrößen verändert. Damit existiert eine zusammenhängende Forschungslinie von der Anregung über die Modenbildung bis zur beobachtbaren Antwort. [5, 11, 14, 18]

Vom Einzelelement zum natürlichen Netzwerk

Ein natürliches Störungs- oder Kluftsystem besteht aus unterschiedlich orientierten, teilweise verbundenen Elementen. Überlagerte Moden, Streuung und hydraulische Kopplung können die Antwort verbreitern oder aufspalten. Für die Interpretation sind deshalb sowohl Modelle einzelner dominanter Strukturen als auch effektive Beschreibungen eines Netzwerks sinnvoll. Welche Darstellung angemessen ist, entscheidet die verfügbare räumliche und spektrale Information.

Die hydraulische Wirksamkeit hängt zusätzlich von Vernetzung, Randbedingungen und Druckgefälle ab. Eine dynamisch auffällige wassergefüllte Kluft kann daher ein relevantes Erkundungsziel sein, ohne allein schon die langfristige Förderleistung eines Brunnens festzulegen. In der praktischen Auswertung werden Struktur, Fluidhinweis und hydraulische Leistung als getrennte, miteinander zu verknüpfende Zielgrößen geführt.

6 Frequenz Güte und Tiefenzuordnung

Güte beschreibt das Abklingen einer Mode

Für einen einzelnen schwach gedämpften Modus gelten näherungsweise die Beziehungen zwischen Abklingkurve, Eigenfrequenz f_0 und Güte Q:

$$q(t) \simeq Ae^{-\pi f_0 t/Q}\cos(2\pi f_0 t + \phi), \qquad Q \simeq \frac{f_0}{\Delta f_{HP}}$$

Δf ist die volle Breite bei halber spektraler Leistung. Die Peakhöhe allein bestimmt Q nicht; sie hängt zusätzlich von Quelle, Ankopplung, Verstärkung, Fensterung und Messdauer ab. Zeitliche Güte und räumliche Dämpfung sind ebenfalls zu unterscheiden. Eine Mode kann lokal nachschwingen und zugleich nur schwach in die Umgebung abstrahlen. [9, 11]

Eine Frequenz wird über ein Modell zur räumlichen Größe

Für eine weiche Schicht über steifem Untergrund liefert das idealisierte Viertelwellenmodell eine Beziehung zwischen Grundfrequenz, Scherwellengeschwindigkeit V_s und Mächtigkeit H:

$$f_0 \simeq \frac{V_s}{4H} \quad \Longleftrightarrow \quad H \simeq \frac{V_s}{4f_0}$$

Grundfrequenz	Angenommenes V_s	Berechnete Mächtigkeit
10 Hz	400 m/s	10 m
10 Hz	1.000 m/s	25 m
10 Hz	2.000 m/s	50 m

Die Rechnung verdeutlicht die Bedeutung einer zusätzlichen Modellgröße. Bei einem anderen Modus oder anderen Randbedingungen ändern sich die Beziehung und ihre Parameter. Ein frequenzbezogener Längenmaßstab kann eine Schichtmächtigkeit, eine Kluftabmessung oder eine effektive Resonatorgröße beschreiben; diese Größen sind nicht grundsätzlich mit der Tiefe unter dem Sensor identisch. [4, 9, 16]

Kalibrierte Beziehungen zwischen Frequenz und Tiefe

Eine empirische Zuordnung der Form $h = \varkappa/f$ kann in einer definierten geologischen und messtechnischen Klasse als Kalibrieransatz untersucht werden. $\varkappa$ besitzt die Einheit einer Geschwindigkeit, ist damit aber noch keine universelle Materialgeschwindigkeit. Es kann Randbedingungen, Modenordnung und Geometrie zusammenfassen. Beispielsweise ergeben 2,5 m und 1 kHz rechnerisch $\varkappa$ = 2.500 m/s. Diese Übereinstimmung an einem Punkt bestimmt die Gültigkeit an anderen Standorten nicht.

Mehrdeutigkeit durch zusätzliche Merkmale verringern

Verschiedene Geometrien und Materialparameter können ähnliche Eigenfrequenzen besitzen; isospektrale Formen liefern dafür ein mathematisches Beispiel. [24] Praktisch werden deshalb mehrere Moden, räumliche Muster und unabhängige Geologie gemeinsam invertiert. Das Ergebnis umfasst passende Modellfamilien und Unsicherheiten. Eine enge Frequenzschätzung darf nicht mit einer ebenso engen Tiefenschätzung gleichgesetzt werden.

7 Von Spektren zu räumlichen Profilen

Spektrale Profile bilden die räumliche Entwicklung ab

Eine Messfolge entlang eines Profils zeigt, wie sich Frequenzen, Amplituden und Abklingmerkmale zwischen benachbarten Punkten verändern. Wiederkehrende Bänder, Unterbrechungen und räumliche Gradienten können zusammenhängende mechanische Strukturen kennzeichnen. Kreuzprofile prüfen deren laterale Fortsetzung. Erst der Zusammenhang vieler Messpunkte ermöglicht eine tragfähige geologische Interpretation.

Die Umrechnung einer Frequenzachse in eine Tiefenachse ist bereits ein Modellschritt. Der ursprüngliche Frequenzbezug und die verwendete Kalibrierung bleiben deshalb nachvollziehbar. Die folgenden Werte sind reine Rechenbeispiele für h = 2.500/f, keine Mess- oder Bohrergebnisse:

Frequenz	Modellrechnung	Zugeordneter Längenwert
33 Hz	2.500 / 33	75,8 m
71 Hz	2.500 / 71	35,2 m
114 Hz	2.500 / 114	21,9 m

Die Tiefeninterpretation wird an unabhängigen Referenzhorizonten geprüft. Ein keil- oder trichterförmiges Muster in einem interpolierten Profil kann unterschiedliche Ursachen haben; es ist nicht ohne weitere Prüfung die geometrische Form einer realen Störung. Messwiederholbarkeit, Interpolation und Richtigkeit der geologischen Zuordnung sind getrennte Eigenschaften.

Welche Frequenzen eine gewählte Tiefenskalierung verlangt

Modellwert h	f bei $\varkappa$ = 2.500 m/s	Periodendauer
100 m	25 Hz	0,04 s
1.000 m	2,5 Hz	0,4 s
5.000 m	0,5 Hz	2 s
6.000 m	0,417 Hz	2,4 s

Diese Tabelle beschreibt die rechnerischen Folgen der angenommenen Skalierung. Sie ist keine Angabe der erreichbaren Messtiefe. Bei 0,417 Hz und Q = 10 läge die Linienbreite bei etwa 0,042 Hz. Eine übliche Fourier-Auswertung erreicht erst bei ungefähr 24 s Aufnahme einen Stützstellenabstand dieser Größenordnung; eine stabile Schätzung der Linienform erfordert geeignete Fenster und ausreichenden Signalabstand.

Räumliche Abtastung und tatsächliche Auflösung

Der Messpunktabstand bestimmt die Abtastung, während die Auflösung zusätzlich von Bandbreite, Wellenlänge, Geometrie, Signalqualität und Modell abhängt. Eine geringe Frequenz kann auch durch eine oberflächennahe große oder weiche Struktur entstehen. Räumliche Kohärenz und alternative Messgeometrien helfen, solche Erklärungen voneinander zu trennen.

8 Methodische Vorgehensweise bei der proprietär entwickelten resonanzbasierten Stoßseismik

Messprinzip und strukturierte Erfassung

Das Verfahren verbindet eine lokale mechanische Impulsanregung mit der Aufnahme der Bodenbewegung und einer räumlich zusammenhängenden spektralen beziehungsweise modalen Auswertung. Ausgangspunkt der proprietären Entwicklung sind mehrjährige Einsätze zur Wasseridentifikation. Der methodische Ablauf umfasst die geologische Fragestellung, die dokumentierte Messkette, die Ermittlung stabiler Merkmale und deren Interpretation im Profilverbund.

Der Impuls wird in definierter Lage zum Empfänger eingebracht. Quelle, Ankopplung, Sensor, Verstärker und Untergrund prägen gemeinsam das aufgezeichnete Signal. Eine vereinfachte Darstellung im Frequenzbereich lautet:

$$Y(f) = S(f)\,G(f)\,I(f) + N(f)$$

Y ist die Messung, S das Quellspektrum, G die Untergrundantwort, I die Instrumentenübertragung und N das Rauschen. Bei gekoppelten Komponenten ist eine entsprechende Matrixbeschreibung erforderlich. Die Auswertung ordnet beobachtete Merkmale diesen Anteilen zu.

Arbeitsschritt	Methodischer Inhalt
Messplanung	Zielgröße, geologische Hypothese, Profil- und Kreuzprofilgeometrie, Referenzpunkte und Umgebungsquellen festlegen.
Impuls und Kontakt	Quellart, Abstand, Orientierung und Kontakt dokumentieren; wiederholte Anregungen erfassen und die Quellvariabilität berücksichtigen.
Aufnahme	Empfängerkomponenten, Abtastrate, Aufnahmedauer, Verstärkung, Filter und Kalibrierung festhalten; Rohsignale unverändert sichern.
Qualitätssicherung	Sättigung, Störlinien, Untergrundkontakt, Zeitbasis und stabile Wiederholungsmerkmale prüfen.
Merkmalsbildung	Frequenzen, Bandbreiten, Abklingkurven, Polarisation und räumliche Konsistenz mit Unsicherheiten bestimmen.

Frequenzabhängige Empfängerantwort berücksichtigen

Auch ein piezoelektrischer Folienempfänger besitzt eine endliche Übertragungsfunktion. Kapazität, Eingangsimpedanz und Elektronik beeinflussen insbesondere tiefe Frequenzen. Die technische Dokumentation solcher Sensoren macht deshalb eine Kalibrierung der gesamten Messkette relevant. [25] Die Kenntnis der Empfängerantwort ermöglicht, geologische Veränderungen von Änderungen des Instruments oder der Ankopplung zu unterscheiden.

9 Interpretation Kalibrierung und Erfahrungsdaten

Vom Einzelmerkmal zur geologischen Aussage

Die methodische Interpretation beginnt mit stabilen Messmerkmalen. Anschließend werden mögliche Moden und ihre räumliche Verteilung mit geologischen Strukturen verknüpft. Der nächste Schritt ist die Kalibrierung von Lage und gegebenenfalls Tiefenintervallen. Eine Aussage zu Wasserführung oder hydraulischer Leistung wird als eigene Zielgröße behandelt. Diese Reihenfolge verhindert, dass eine geologische Deutung bereits bei der technischen Signalaufbereitung vorausgesetzt wird.

Methodische Ebene	Vorgehen	Ergebnis
Reproduzierbarkeit	Wiederholungen, unterschiedliche Bediener und kontrollierte Änderungen von Quelle und Kontakt	Stabile Merkmale und bekannte Empfindlichkeiten
Physikalische Zuordnung	Referenzgeometrien, unabhängige Sensorik sowie trockene, gefüllte und gegebenenfalls durchströmte Modelle	Plausible Moden und getrennte Einflussgrößen
Räumliche Kalibrierung	Profile, Kreuzprofile und unabhängige Struktur- oder Bohrdaten gemeinsam auswerten	Lage und Tiefenintervalle mit Unsicherheit
Bewertung der Anwendung	Vorab dokumentierte Prognosen mit Bohrung, Zuflussdiagnostik und Pumpversuch vergleichen	Aussagekraft für die jeweilige Zielgröße

Jahrelange Messpraxis als zusammenhängende Datenbasis

Die praktischen Anwendungen werden projektbezogen zusammengeführt: Standort, Datum, geologische Ausgangslage, Messkonfiguration, damalige Interpretation und späteres Ergebnis bilden einen Datensatz. Erfolgreiche Wasseridentifikationen werden gemeinsam mit Tiefenabweichungen, uneindeutigen Befunden und unzureichenden Förderleistungen ausgewertet. So lässt sich die Aussagefähigkeit nach Geologie und Messbedingungen differenzieren.

Die Trennung zwischen ursprünglicher Vorhersage und späterer Interpretation bleibt erhalten. Eine nach der Bohrung erkannte Übereinstimmung beantwortet eine andere Frage als eine zuvor festgelegte Prognose. Als Vergleich dient die Standortentscheidung auf Basis der bereits vorhandenen Geologie. Der Zusatznutzen der Resonanzinformation wird an der Veränderung dieser Entscheidung und ihrer Treffergenauigkeit bestimmt.

Datengetriebene Auswertung und proprietäres Wissen

Bei einer datengetriebenen oder maschinell lernenden Auswertung werden Entwicklung und Prüfung auf unterschiedlichen Projekten durchgeführt. Benachbarte Messpunkte derselben Struktur zählen nicht als unabhängige Erfolgsfälle. Eine abweichende Geologie bildet einen eigenen Übertragungsfall. Proprietäre Algorithmen können geschützt bleiben, während Eingangsgrößen, Ergebnisdefinitionen, Unsicherheiten und unabhängige Prüfkriterien offengelegt werden.

Eine kleine mechanische Quelle kann den Flächen- und Logistikaufwand begrenzen. Messdauer, Kosten und Zugänglichkeit werden als betriebliche Eigenschaften dokumentiert; ihre geophysikalische Aussagekraft ergibt sich aus der beschriebenen Mess- und Interpretationskette.

10 Bedeutung für Wassererkundung und Geothermie

Struktur Wasserführung und Ergiebigkeit

Für die Wassererkundung ist die dynamische Charakterisierung von Kontakt-, Kluft- und Störungszonen besonders relevant. Sie kann Hinweise liefern, wo mechanisch unterschiedliche oder fluidbeeinflusste Bereiche liegen. Die praktische Interpretation verbindet diese Hinweise mit Geologie, Topografie, bekannten Bohrungen und hydraulischen Randbedingungen.

Eine erkannte wasserführende Struktur und eine nachhaltig nutzbare Förderleistung sind unterschiedliche Ergebnisse. Wasserzutritt beschreibt das Auftreten von Wasser; Ergiebigkeit verlangt zusätzlich Angaben zu Förderrate, Absenkung und zeitlicher Entwicklung. Selbstfluss kennzeichnet einen entsprechenden Druckzustand, bestimmt aber nicht allein die langfristige Leistung. Chemische Qualität, Herkunft und Alter werden durch eigene Untersuchungen bestimmt.

Geologische Entscheidungen vor und während der Bohrung

Ein räumlich bestätigter Strukturhinweis kann in die Wahl des Ansatzpunkts, die Bewertung einer Bohrtrajektorie oder die Planung weiterer Untersuchungen eingehen. Bei einer potenziell kritischen Zone liegt der Beitrag zunächst in ihrer räumlichen Abgrenzung und Charakterisierung. Die Bewertung konkreter Bohrprobleme verbindet diese Information mit Gesteinseigenschaften, Spannungszustand, Druckverhältnissen und der vorgesehenen Bohrtechnik.

Die während einer Bohrung gewonnenen Informationen können mit dem vorherigen Resonanzprofil abgeglichen werden. Dieser Abgleich aktualisiert das geologische Modell und verbessert die Kalibrierung weiterer Messungen. Ein daraus abgeleiteter Risikobeitrag wird an konkreten Entscheidungen festgemacht, etwa einer veränderten Trajektorie oder einer gezielten zusätzlichen Untersuchung.

Hydrothermale und geschlossene Systeme

Bei hydrothermalen Projekten sind Temperatur und hydraulische Leistungsfähigkeit zentrale Zielgrößen. Resonanzmerkmale können strukturelle und hydromechanische Informationen beitragen, müssen aber mit den übrigen Reservoirparametern verbunden werden. Eine alleinige Spektralanalyse bestimmt die gewinnbare Wärmeleistung nicht.

Bei geschlossenen Wärmetauscherkreisläufen ist die Förderung natürlichen Reservoirwassers keine gleichartige Erfolgsvoraussetzung. Relevante Zielgrößen sind hier insbesondere das geologische Bohrmodell und die thermischen Eigenschaften entlang der geplanten Strecke. Deshalb wird der Nutzen des Verfahrens je nach Systemkonzept unterschiedlich definiert.

Übertragung zwischen Tiefen und geologischen Gruppen

Eine Kalibrierung aus einem Anwendungsbereich wird für neue Tiefen oder andere Gesteinsverbände mit den entsprechenden Modellen und Referenzdaten weitergeführt. Frequenzband, Anregung, Rückübertragung, Dämpfung und Überdeckung bestimmen die beobachtbare Antwort. Karbonate, kristalline Kluftsysteme und sedimentäre Aquifere können unterschiedliche Moden und Kopplungsbedingungen besitzen.

Der fachliche Nutzen liegt in zusätzlichen belastbaren Randbedingungen für die Standort- und Bohrentscheidung. Die anschließende Forschungsauswertung zeigt, welche physikalischen und experimentellen Grundlagen dafür bereits vorliegen.

11 Forschung von 2010 bis 2014

Frehner und Schmalholz 2010 zur Abstrahlung an Kluftenden

Finite-Elemente-Simulationen untersuchen geführte Stoneley-Wellen in fluidgefüllten Rissen. An den Enden wird ein Teil reflektiert und ein Teil als Körperwellen in das umgebende Gestein abgegeben. Der Beitrag erklärt damit einen möglichen Übertragungsweg zwischen lokaler Kluftschwingung und einem entfernten Empfänger. Untersucht wurde ein zweidimensionales numerisches System mit definierter Geometrie und Fluidfüllung. [1]

Müller Gurevich und Lebedev 2010 zur Fluidwirkung

Der Überblick ordnet Modelle und Beobachtungen zu welleninduziertem Fluidfluss in porösen Gesteinen. Unterschiedliche räumliche Skalen und Sättigungsverteilungen beeinflussen Dispersion und Dämpfung. Für Resonanzseismik liefert dies eine wichtige Ergänzung: Die frequenzabhängige Antwort trägt hydromechanische Information, kann jedoch auch durch Relaxationsprozesse entstehen. Eine spezifische Kluftresonanz muss von solchen Prozessen unterschieden werden. [2]

Quintal und Mitautoren 2011 zur numerischen Poroelastik

Die Arbeit berechnet frequenzabhängige elastische Moduln aus quasistatischen poroelastischen Versuchen. Daraus werden Dämpfung und Phasengeschwindigkeit bestimmt. Ein Anwendungsbeispiel untersucht zudem Reflexionskoeffizienten. Der Beitrag verbindet damit Fluidbewegung, Materialantwort und Reflexion innerhalb einer konsistenten Modellierung. Seine Stärke liegt in der numerischen Behandlung heterogener Sättigungsverteilungen. [3]

Sánchez-Sesma und Mitautoren 2011 zur Standortantwort

Die Theorie des H/V-Spektralverhältnisses verknüpft unter der Annahme eines diffusen Wellenfeldes gemittelte Energiedichten mit der Green-Funktion des Untergrunds. Ein geschichtetes Modell berücksichtigt Oberflächen- und Körperwellen; Daten aus Texcoco dienen als Anwendung. Die Arbeit zeigt, wie spektrale Beobachtungen über ein Wellenfeldmodell zu Strukturparametern führen. Sie betrifft passive Aufnahmen und ist deshalb keine direkte Beschreibung einer Stoßmessung. [4]

Frehner 2013 zur Anregung durch Körperwellen

Eine numerische Untersuchung zeigt, dass eine einfallende P-Welle an einer fluidgefüllten Kluft Krauklis-Wellen anregen kann. Die Anregung hängt deutlich von der Orientierung ab. Das begründet, weshalb Quellrichtung und Geometrie auch bei Resonanzmessungen relevant sind. Die Studie behandelt die Entstehung der Mode; ihre sichere Erfassung außerhalb der Kluft folgt daraus nicht automatisch. [5]

Nakagawa und Korneev 2014 zur Kluftnachgiebigkeit

Ein erweitertes Grenzflächenmodell berücksichtigt den mechanischen Kontakt der Kluftwände und mögliche Füllungen. Endliche Nachgiebigkeit verändert die Dispersion und Dämpfung geführter Wellen. Die Resonanzinterpretation erhält damit eine zusätzliche Zielgröße: den mechanischen Zustand der Kontaktzone. Geometrie und Fluid allein beschreiben die Antwort eines teilweise geschlossenen Risses nicht vollständig. [7]

12 Forschung von 2015 bis 2018

Lipovsky und Dunham 2015 zu Frequenz und Geometrie

Die Autoren modellieren dünne hydraulische Klüfte mit Fluidträgheit, Viskosität, Kompressibilität und elastischen Wänden. Resonanzfrequenzen und zeitliche Dämpfung begrenzen innerhalb dieses Modells mögliche Kluftabmessungen. Dispersion führt zu ungleichmäßigen Abständen der Modenfrequenzen. Der Beitrag liefert ein konkretes inverses Problem und zeigt den Nutzen mehrerer gemeinsam ausgewerteter Merkmale. [9]

Watson und van Wijk 2015 zur Resonanzspektroskopie von Gestein

Resonante Ultraschallspektroskopie wird zur Bestimmung anisotroper elastischer Eigenschaften von Tonsteinproben eingesetzt. Aus mehreren Eigenfrequenzen werden Steifigkeitsparameter unter Kenntnis von Probengeometrie und Dichte geschätzt; auch intrinsische Dämpfung wird behandelt. Der Vergleich mit Laufzeitmessungen macht Dispersion sichtbar. Dies ist ein direkter geophysikalischer Beleg dafür, dass Resonanz und Laufzeit unterschiedliche, miteinander verknüpfbare Materialinformationen liefern. Der Maßstab ist die Laborprobe. [10]

Shih und Frehner 2016 zum experimentellen Kluftnachschwingen

In Plexiglasproben mit künstlicher Kluft wurde nach Ultraschallanregung eine schmalbandige, langsam abklingende Antwort in der Coda beobachtet. Die interpretierte Kluftresonanz wurde mit einem analytischen Modell verglichen. Die Studie stützt den Zusammenhang zwischen einer begrenzten Kluft und charakteristischen Nachschwingungen. Sie unterscheidet sich in Material, Frequenz und Messgeometrie von einer oberirdischen Erkundung natürlicher Gesteine. [11]

Liang und Mitautoren 2017 zur Verbindung mit Bohrlochwellen

Numerische Modelle koppeln Fluidbewegung in einer Kluft an das umgebende elastische Medium. Bohrlochwellen können die hydraulisch angeschlossene Kluft anregen; deren frequenzabhängige hydraulische Impedanz prägt Reflexion und Transmission im Bohrloch. Hier werden Resonanz und Reflexion ausdrücklich gemeinsam zur Strukturdiagnostik verwendet. Untersucht wird eine definierte hydraulische Verbindung mit dem Bohrloch, nicht eine beliebige oberirdische Quellkonfiguration. [14]

Clements und Denolle 2018 zum Grundwassermonitoring

Die Auswertung des seismischen Umgebungsfeldes im San-Gabriel-Tal zeigt Geschwindigkeitsänderungen im Zusammenhang mit Entleerung und Wiederauffüllung eines Grundwassersystems. Die Autoren verknüpfen diese Änderungen mit weiteren Beobachtungen und schätzen Veränderungen der Wasserspeicherung. Die Studie liefert einen Feldbeleg für hydrologisch empfindliche seismische Merkmale. Sie verwendet passive Interferometrie und untersucht Veränderungen eines Systems, nicht die direkte Zuordnung einzelner Resonanzpeaks zu neuen Brunnenstandorten. [15]

Gemeinsamer Erkenntnisgewinn

Diese Arbeiten verbinden die Modellierung von Kluftmoden mit Laborbeobachtungen, Gesteinscharakterisierung und hydrologischen Felddaten. Daraus ergibt sich eine belastbare Forschungsgrundlage für eine methodisch eigenständige Resonanzauswertung. Die jeweiligen Kopplungs- und Messbedingungen bleiben entscheidend für die Wahl des passenden Modells.

13 Phononik und Impulsakustik als ergänzende Belege

Maldovan 2013 zur Kontrolle mechanischer Schwingungen

Der Überblick zur Phononik verbindet akustische und thermische Schwingungsphänomene über verschiedene Längenmaßstäbe. Strukturelle Gestaltung beeinflusst den Transport mechanischer Energie. Für die Seismik ist insbesondere die Vorstellung relevant, dass Ausbreitung von Geometrie, Kopplung und Frequenz abhängt. Die mikroskopische Phononenphysik liefert dabei einen begrifflichen Zusammenhang; sie ersetzt das makroskopische geologische Modell nicht. [6]

Brûlé und Mitautoren 2014 zu strukturiertem Boden

Ein großmaßstäblicher Versuch mit einer Anordnung leerer Bohrungen zeigt eine veränderte Verteilung seismischer Energie. Gemessene Teilchengeschwindigkeiten werden mit numerischen Modellen verglichen. Die Arbeit belegt die Wirksamkeit strukturabhängiger Wellenprozesse in realem Boden. Das Experiment untersucht eine künstlich angelegte Struktur und ist kein Nachweis eines Wasserindikators. [8]

Ma und Sheng 2016 zu lokalen Resonanzen

Der Überblick beschreibt, wie lokale Resonatoren dispersive effektive Materialeigenschaften und gezielte Wellenfunktionen erzeugen. Für eine geophysikalische Betrachtung ist besonders die Kopplung zwischen lokaler Schwingung und weiterlaufendem Wellenfeld nützlich. Dieser Mechanismus erklärt, weshalb eine Resonanz sowohl die örtliche Amplitude als auch Reflexion und Transmission beeinflussen kann. Die besprochenen Systeme sind überwiegend gezielt konstruierte Materialien. [12]

Colombi und Mitautoren 2016 zu natürlichen Resonatoren

Ein Feldexperiment und Modellrechnungen untersuchen den Einfluss eines Waldes auf Rayleigh-Wellen unterhalb von 150 Hz. Die Autoren verbinden frequenzselektive Abschwächung mit lokalen Baumresonanzen. Damit existiert ein Beispiel für modale Kopplung unter geophysikalischen Feldbedingungen. Für Erkundungsmessungen folgt zugleich, dass oberflächennahe Resonatoren als Teil der Standortantwort berücksichtigt werden müssen. [13]

Impact Echo und die präzise Bestimmung der Mode

Das Impact-Echo-Verfahren nutzt die Oberflächenantwort nach einem kurzen mechanischen Stoß zur Prüfung von Bauteilgeometrie und Fehlstellen. [23] Wang und Mitautoren entwickeln 2024 die Interpretation der Dickenresonanz über Lamb-Wellen weiter; eine symmetrische Mode bei verschwindender Gruppengeschwindigkeit ist dabei zentral. Materialparameter und Geometrie bestimmen das Ergebnis. [17]

Diese Beiträge verdeutlichen den allgemeinen methodischen Zusammenhang: Ein einfacher Impuls kann eine komplexe Strukturantwort erschließen, wenn Moden und Randbedingungen passend beschrieben werden. Die Übertragung auf den Untergrund erweitert die Aufgabe um heterogene, offene und nur teilweise bekannte Geometrien.

14 Forschung von 2022 bis 2026

Molnar und Mitautoren 2022 zur Standortresonanz

Der Überblick zur MHVSR-Methode ordnet Messpraxis, Interpretation und Unsicherheiten der Bestimmung von Standortfrequenzen ein. Er belegt die breite geophysikalische Nutzung spektraler Standortmerkmale und die Bedeutung der Wellenfeldzusammensetzung. Passive H/V-Verhältnisse sind dabei von einer aktiven Impulsantwort zu unterscheiden. Die gemeinsame Verbindung liegt in der modellgestützten Interpretation frequenzabhängiger Untergrundeigenschaften. [16]

Ray und Mitautoren 2024 zur Wirkung von Strömung

Ein Laboraufbau mit einem Spalt zwischen Aluminiumplatten untersucht Krauklis-Wellen unter Fluidströmung. Frequenz, Phasengeschwindigkeit und Güte reagieren auf die untersuchten Strömungsbedingungen; auch die Richtung ist relevant. Die Arbeit eröffnet damit einen experimentellen Zugang zur dynamischen Wirkung bewegter Fluide. Die direkte Übertragung auf Fördermengen natürlicher Brunnen wäre ein weiterer Kalibrierungsschritt. [18]

Liu und Mitautoren 2024 zur Existenz und Dämpfung von Kluftmoden

Die theoretische Studie untersucht Dispersion, Resonanz und Dämpfung von Krauklis-Wellen über verschiedene Frequenzen und Kluftparameter. Begrenzte Kluftlänge und wiederkehrende geführte Wellen prägen die Moden; viskose Verluste beeinflussen ihre Ausprägung. Ein vollständiges Resonanzmodell beschreibt deshalb neben der Frequenz auch die beobachtbare Stärke und Dämpfung des Signals. [19]

Wang und Tang 2025 und 2026 zur frequenzabhängigen Reflexion

Das Modell geschichteter geklüfteter poröser Medien berücksichtigt mehrere Fluidflussmechanismen. Die berechneten Reflexions- und Transmissionskoeffizienten hängen von Frequenz, Rissen und Fluidzustand ab. Damit wird die Verbindung zwischen dynamischer Materialantwort und Reflexion weiter präzisiert. Die Arbeit erschien online im November 2025 und im Heftjahr 2026. Sie begründet eine gemeinsame physikalische Auswertung, keine Exklusivität eines einzelnen Messverfahrens. [20]

Rattanavetchasit und Mitautoren 2026 zur Aquiferdynamik

Eine 17-jährige Zeitreihe passiver seismischer Interferometrie im Chiang-Mai-Becken zeigt frequenzabhängig unterschiedliche Geschwindigkeitsänderungen. GPS-, Wetter- und Grundwasserdaten sowie poroelastische Modellierung helfen, Sättigung, Porendruck und Massenauflast auseinanderzuhalten. Die Arbeit liefert einen aktuellen Feldbeleg für den Zusammenhang zwischen seismischer Antwort und hydromechanischen Prozessen. Sie unterstreicht die Bedeutung mehrerer Beobachtungsgrößen zur Trennung unterschiedlicher Ursachen. [21]

Bedeutung für die Weiterentwicklung

Die jüngere Forschung erweitert die verfügbaren Modelle von der statischen Struktur zu gekoppelten dynamischen Zuständen. Für Resonanzseismik entsteht daraus ein breiterer Raum an messbaren Merkmalen und vergleichbaren Hypothesen. Entscheidend ist die Zuordnung des jeweiligen Signals zu seinem physikalischen und räumlichen Zusammenhang.

15 Wissenschaftliche Gesamtposition

Resonanzseismik besitzt einen klaren wissenschaftlichen Gegenstand: die Bestimmung dynamischer Eigenschaften des Untergrunds aus seiner frequenzabhängigen und zeitlich abklingenden Antwort. Die theoretischen Grundlagen sind Teil der Elastodynamik, Akustik und Poroelastik. Ihre Anwendung reicht von Laborproben über künstliche und natürliche Resonatoren bis zur seismischen Beobachtung hydrologischer Veränderungen.

Ebene	Wissenschaftlich gestützter Beitrag	Ausgewählte Belege
Theorie	Kluftmoden, Kontaktwirkung, Fluidkopplung, Reflexion und spektrale Antwort lassen sich gemeinsam modellieren.	[1–3, 5, 7, 9, 14, 19, 20]
Labor	Resonanzen liefern Informationen zu Gesteinseigenschaften, künstlichen Klüften und Strömungseinflüssen.	[10, 11, 18]
Feld	Standortantwort, lokale Resonatoren und hydrologische Veränderungen wirken auf seismische Merkmale.	[4, 8, 13, 15, 16, 21]
Anwendung	Die Kombination stabiler Merkmale, räumlicher Modelle und projektbezogener Kalibrierung definiert die anwendungsbezogene Aussagefähigkeit.	Methodischer Zusammenhang der Abschnitte 6 bis 10

Resonanz als ergänzende geophysikalische Informationsklasse

Eine resonanzorientierte Interpretation verschiebt den Schwerpunkt von einzelnen Rückkehrereignissen auf charakteristische Systemeigenschaften. Das ist besonders interessant, wenn Kontaktsteifigkeit, Kluftgeometrie oder Fluidkopplung die Fragestellung bestimmen. Eine schwach ausgeprägte oder geometrisch schwierige Reflexionsabbildung kann Anlass sein, weitere Merkmale desselben Wellenfeldes zu untersuchen; sie beweist für sich noch keine bessere Resonanzabbildung.

Der Zusammenhang zwischen Theorie und Messpraxis

Die physikalische Beschreibung erklärt, warum die gesuchten Merkmale entstehen können. Die Messkette bestimmt, welche davon erreichbar sind. Räumliche Auswertung und geologische Kalibrierung legen fest, welche Aussagen sich daraus ableiten lassen. Die mehrjährige Praxis der proprietären Stoßseismik bietet hierfür anwendungsbezogene Erfahrungen, die projektweise mit den jeweiligen Ergebnissen verknüpft werden.

Schlussfolgerung

Die wissenschaftliche Literatur trägt die Etablierung einer Resonanzseismik, die Eigenfrequenzen, Dämpfung und Modenstruktur ausdrücklich als Interpretationsgrößen nutzt. Der tragfähige Weg verbindet diese Merkmale mit Reflexionsinformation und weiteren geologischen Daten. Auf dieser Grundlage kann resonanzbasierte Stoßseismik als reproduzierbares Erkundungs- und Charakterisierungsverfahren für definierte Einsatzbedingungen beschrieben und angewandt werden.

16 Literaturverzeichnis

[1] Frehner M und Schmalholz S M 2010

Finite-element simulations of Stoneley guided-wave reflection and scattering at the tips of fluid-filled fractures. Geophysics 75, T23–T36.

https://doi.org/10.1190/1.3340361

[2] Müller T M Gurevich B und Lebedev M 2010

Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks — A review. Geophysics 75, 75A147–75A164.

https://doi.org/10.1190/1.3463417

[3] Quintal B Steeb H Frehner M und Schmalholz S M 2011

Quasi-static finite element modeling of seismic attenuation and dispersion due to wave-induced fluid flow in poroelastic media. Journal of Geophysical Research 116, B01201.

https://doi.org/10.1029/2010JB007475

[4] Sánchez-Sesma F J und Mitautoren 2011

A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. Geophysical Journal International 186, 221–225.

https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x

[5] Frehner M 2013

Krauklis Wave Initiation in Fluid-Filled Fractures by a Passing Body Wave. Poromechanics V, 92–100.

https://doi.org/10.1061/9780784412992.011

[6] Maldovan M 2013

Sound and heat revolutions in phononics. Nature 503, 209–217.

https://doi.org/10.1038/nature12608

[7] Nakagawa S und Korneev V A 2014

Effect of fracture compliance on wave propagation within a fluid-filled fracture. Journal of the Acoustical Society of America 135, 3186–3197.

https://doi.org/10.1121/1.4875333

[8] Brûlé S Javelaud E H Enoch S und Guenneau S 2014

Experiments on Seismic Metamaterials: Molding Surface Waves. Physical Review Letters 112, 133901.

https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.133901

[9] Lipovsky B P und Dunham E M 2015

Vibrational modes of hydraulic fractures: Inference of fracture geometry from resonant frequencies and attenuation. Journal of Geophysical Research Solid Earth 120, 1080–1107.

https://doi.org/10.1002/2014JB011286

[10] Watson L und van Wijk K 2015

Resonant ultrasound spectroscopy of horizontal transversely isotropic samples. Journal of Geophysical Research Solid Earth 120.

https://doi.org/10.1002/2014JB011839

[11] Shih P J R und Frehner M 2016

Laboratory evidence for Krauklis-wave resonance in fractures and implications for seismic coda wave analysis. Geophysics 81, T285–T293.

https://doi.org/10.1190/GEO2016-0067.1

[12] Ma G und Sheng P 2016

Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons. Science Advances 2, e1501595.
https://doi.org/10.1126/sciadv.1501595

[13] Colombi A Roux P Guenneau S Gueguen P und Craster R V 2016

Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. Scientific Reports 6, 19238.
https://doi.org/10.1038/srep19238

[14] Liang C O'Reilly O Dunham E M und Moos D 2017

Hydraulic fracture diagnostics from Krauklis-wave resonance and tube-wave reflections. Geophysics 82, D171–D186.
https://doi.org/10.1190/GEO2016-0480.1

[15] Clements T und Denolle M A 2018

Tracking Groundwater Levels Using the Ambient Seismic Field. Geophysical Research Letters 45, 6459–6465.
https://doi.org/10.1029/2018GL077706

[16] Molnar S und Mitautoren 2022

A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSR) method. Journal of Seismology.
https://doi.org/10.1007/s10950-021-10062-9

[17] Wang Y und Mitautoren 2024

Lamb Waves-Based Computation of Impact Echo Thickness Resonant Frequency: Theory Development and Case Study. Advances in Civil Engineering 2024, 7811595.
https://doi.org/10.1155/2024/7811595

[18] Ray S Cao H Waite G P und Askari R 2024

Possibility of Fluid Flow Characterization via a Geophysical Signal: Experimental Study on the Krauklis Wave Under Fluid Flow. Journal of Geophysical Research Solid Earth 129, e2024JB029229.
https://doi.org/10.1029/2024JB029229

[19] Liu H Zhou H Kong L und Ma Y 2024

A theoretical study on Krauklis wave characteristics. Journal of Geophysics and Engineering 21, 1401–1415.
https://doi.org/10.1093/jge/gxae081

[20] Wang W und Tang X 2026

Frequency-dependent seismic reflection and transmission of layered cracked porous media. Geophysical Journal International 244, ggaf452. Online veröffentlicht am 11. November 2025.
https://doi.org/10.1093/gji/ggaf452

[21] Rattanavetchasit C Huang H H Sone H und Wu Y M 2026

Frequency-Dependent Seismic Velocity Variations Reveal Layered Aquifer Behavior Under Groundwater Fluctuations. Geophysical Research Letters 53, e2025GL118568.
https://doi.org/10.1029/2025GL118568

[22] Virieux J und Operto S 2009

An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. Geophysics 74, WCC1–WCC26.
https://doi.org/10.1190/1.3238367

[23] Carino N J 2001

The Impact-Echo Method: An Overview. Proceedings 2001 World Structural Engineering Congress, ASCE. NIST.
https://www.nist.gov/publications/impact-echo-method-overview

[24] American Mathematical Society 2022
Tony's Take August 2022. Hearing shapes revisited. Mathematische Einordnung isospektraler Formen.
https://mathvoices.ams.org/mathmedia/tonys-take-august-2022/

[25] Measurement Specialties ohne Jahresangabe
Piezo Film Sensors Technical Manual. Technische Dokumentation zu piezoelektrischen Folien und ihrer Beschaltung.
https://courses.media.mit.edu/2022spring/mas836/readings/MSI-techman.pdf