

Bewertung der Erkundbarkeit von kristallinen Wirtsgesteinskomplexen mit Oberflächenseismik

Autor: Prof. Dr. Stefan Buske (TU Bergakademie Freiberg)

Vorbemerkungen

- Im Rahmen der Phase II des Standortauswahlverfahrens werden die durch Bundesgesetz bestimmten Standortregionen übertägig erkundet, u.a. mit 3D-Seismik, mit den primären Zielen:

(A) Erstellung eines generellen strukturgeologischen Abbildes des Untergrundes

(B) Erfassung des Zustandes des Wirtsgesteins hinsichtlich seiner Barriere-wirksamen Eigenschaften.

Beide Aspekte spielen in der hier vorgenommenen Bewertung die Grundlage.

- Die Bewertung bezieht sich ausschließlich auf **kristalline Wirtsgesteinskomplexe**, die sich in ihren strukturellen und seismischen Eigenschaften deutlich von sedimentären Gesteinskomplexen unterscheiden, und dies im Hinblick auf die generelle Abbildung des Gesteinskomplexes mit Reflexionsseismik insbesondere durch:
 - höhere Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten, damit größere Wellenlängen bei gleicher Frequenz und dadurch geringere räumliche Auflösung der Strukturen
 - geringere Impedanzkontraste, damit geringe Amplituden des reflektierten und zur Strukturabbildung auswertbaren Signals
 - stärkere strukturelle Heterogenität auf der Skala typischer Wellenlängen des seismischen Signals, damit signifikante Mehrfachstreuung des seismischen Wellenfeldes ("Coda/Rauschen"), folglich ein schlechteres Signal/Rausch-Verhältnis der Reflexionen
 - steiles Einfallen der im Hinblick auf die Standortauswahl relevanten Strukturelemente (z.B. Störungen/Verwerfungen) und damit schwierigere Abbildungsbedingungen durch das Fehlen von Primärreflexionen in den oft räumlich begrenzten Empfängerauslagen entlang der Erdoberfläche, sowie im Vergleich zu Sedimentkomplexen einem Mangel an horizontal ausgerichteten Reflektoren, innerhalb derer z.B. anhand von räumlichen Versätzen eine indirekte Erkennung solcher steilen Strukturelemente möglich ist.

Fragestellungen und entsprechende Bewertungen

Jede oberflächenseismische 3D Messung unterliegt entsprechend ihrer Konfiguration auch Limitierungen in der Abbildung des Untergrundes. Im Folgenden ist die Bewertung der **Erkundbarkeit speziell für 3D-Oberflächenseismik-Messungen und kristalline Wirtsgesteinskomplexe** im Hinblick auf die folgenden konkreten vorgegebenen Fragestellungen bezogen und kann entsprechend qualitativ zusammenfassend beantwortet werden:

1. Wie mächtig darf eine sedimentäre Überdeckung über einem Kristallinkörper sein, um innerhalb des Kristallinkörpers Aussagen zur Homogenität bzw. zu Inhomogenitäten wie bspw. Klüftigkeit, Anisotropie, Verwitterungserscheinungen oder andere Barriere-hemmenden Phänomene bewerten zu können?

Eine sedimentäre Überdeckung erschwert die Abbildung und Charakterisierung eines darunterliegenden Kristallinkörpers im Wesentlichen durch folgende Faktoren:

- a) Ein grosser Teil der Wellenenergie wird in der sedimentären Überdeckung bereits durch die **hohe Reflektivität des Sedimentstapels** absorbiert und nur vergleichsweise **wenig Energie gelangt in den Kristallinkörper** bzw. aus diesem wieder zurück an die Erdoberfläche. Je mächtiger der Sedimentstapel, desto ausgeprägter ist dieser Effekt.
- b) Innerhalb des Sedimentstapels entstehen in der Regel interne **multiple Reflexionen**, die sich dem eigentlichen Primärwellenfeld überlagern. Dies gilt sowohl für das durch den Sedimentstapel auf den Kristallinkörper einfallende Wellenfeld sowie das aus diesem wieder durch den Sedimentstapel zurück an die Erdoberfläche propagierende Wellenfeld. Die zur Charakterisierung des Kristallinkörpers zu verwendenden Reflexionseinsätze sind somit stark mit Sedimentstapel-Multiplen kontaminiert und müssen vor einer Verwendung erst aufwändig bereinigt werden (Internal/Interbed Multiple Elimination).
- c) Die seismischen Geschwindigkeiten steigen an der Grenze zwischen Sedimentstapel und Kristallinkörper in der Regel deutlich an. Dies führt dazu, dass mit zunehmendem Einfallswinkel der seismischen Wellen auf diese Grenze recht schnell **refraktierte Wellen** entstehen, ein Großteil der Wellenenergie vom interessanten abzubildenden Bereich im Kristallinkörper "weggebrochen" wird und diesen nicht erreicht (ein ähnliches Problem wie im Fall der Abbildung unterhalb von Salzkörpern in der Sedimentseismik). Die mit normalen Empfängerauslagen an der Oberfläche beobachtbaren Reflexionen aus dem Kristallinkörper beschränken sich damit auf den **Steilwinkelbereich** und erlauben aus diesem Grund kaum eine Abbildung von stark geneigten Strukturen innerhalb des Kristallinkörpers. Auch hier gilt: je mächtiger der Sedimentstapel, desto ausgeprägter ist dieser Effekt.

Qualitativ lässt sich sagen, dass je mächtiger der Sedimentstapel, desto ausgeprägter sind die o.g. Effekte (a) des Energieverlustes, (b) der Kontamination durch Multiple und (c) der Beschränkung auf den Steilwinkelbereich, und somit desto schwieriger lässt sich ein darunter liegender Kristallinkörper charakterisieren und lassen sich die in der Fragestellung genannten Aussagen zur In-/Homogenität über den Kristallinkörper treffen.

Eine genaue quantitative Angabe einer solchen kritischen Mächtigkeit des Sedimentstapels ist nicht möglich, da dies vom genauen Aufbau und den seismischen Eigenschaften des Sedimentstapels abhängt, aber es lässt sich abschätzen, dass bei typischen Eigenschaften eines Sedimentstapels mit einem

einfachen horizontal geschichteten Aufbau **ab einer Mächtigkeit von ca. 200-400 m** eventuell noch ein generelles strukturgeologisches Abbildes des Untergrundes erstellt werden kann, aber die **Erfassung des Zustandes des Wirtsgesteins hinsichtlich seiner Barriere-wirksamen Eigenschaften kaum noch möglich** sein wird. Somit sind in diesem Fall die Bedingungen für eine **verlässliche Charakterisierung** des darunterliegenden Kristallinkörpers und damit seine **Erkundbarkeit** im o.g. Sinne und **mit reiner Oberflächenseismik nicht mehr gegeben**.

Darüber hinaus ist es wichtig zu erwähnen, dass neben der reinen Mächtigkeit der sedimentären Überdeckung auch deren **interne Komplexität** eine wichtige Rolle spielt. Ist der Sedimentstapel vergleichsweise einfach aufgebaut (nur wenige Schichten, nur geringe Impedanzkontraste zwischen den Schichten, etc.), d.h. ist dessen Komplexität gering, so verringert sich der Einfluss der o.g. Faktoren (a) und (b) deutlich und die Möglichkeit der Abbildung und Charakterisierung des Kristallinkörpers verbessert sich (ähnlich wie im Fall der marinen Seismik, bei der auch eine z.T. mehrere Kilometer mächtige aber weitgehend "homogene" Überdeckung mit Wasser kein Problem für eine Abbildung unterhalb des Meeresbodens darstellt). **Je höher die Komplexität**, d.h. der Aufbau des Sedimentstapels, z.B. durch stark heterogene eingelagerte Schichten (Karst, etc.), Überschiebungen, verschiedene Schichtneigungen, etc., **desto schwieriger wird** die im obigen Sinne genannte **Erkundbarkeit** des Kristallinkörpers.

2. Was gilt bei Überdeckung mit metamorphen und anisotropen Gesteinen ?

Die Anwesenheit von metamorphen und/oder anisotropen Gesteinen **erschwert die Erkundbarkeit drastisch**. Die Abbildung von Kristallinkörpern unterhalb solcher Gesteine gehört zu den schwierigsten Herausforderungen für die Seismik, sowohl bei der Anlage der seismischen Messkonfiguration als auch bei der seismischen Datenbearbeitung und Abbildung.

Um z.B. einen Kristallinkörper verlässlich unterhalb einer Überdeckung von **anisotropen** Gesteinen zu charakterisieren und abzubilden, ist zunächst eine ebensolche Charakterisierung der anisotropen Überdeckung notwendig, um die Ursache der entsprechenden Effekte eindeutig der Überdeckung zuordnen zu können und nicht fälschlich als Eigenschaft des Kristallinkörpers zu interpretieren. Dabei ist zu beachten, dass eine vollumfängliche Charakterisierung der Anisotropie oft nur unter Einbeziehung von Bohrlochseismik und nicht alleine mit Oberflächenseismik möglich ist. Bei der anschließenden Abbildung des Kristallinkörpers müssen dann die entsprechenden abgeleiteten Anisotropie-Parameter der Überdeckung korrekt berücksichtigt werden, d.h. z.B. die korrekte Berechnung von Laufzeiten für die Tiefenabbildung/-konversion der Strukturen innerhalb des Kristallinkörpers muss die anisotropen Geschwindigkeiten der Überdeckung einbeziehen.

Im Fall einer Überdeckung mit **metamorphen** Gesteinen ist der vermutlich am stärksten die Erkundbarkeit beeinflussende Faktor die in der Regel starke strukturelle Heterogenität der metamorphen Gesteine, die zu amplitudenschwachen Reflexionen mit einem sehr schlechten Signal/Rausch-Verhältnis führt und somit keine verlässlichen Aussagen zur In-/Homogenität des darunter liegenden Kristallinkörpers gestattet bzw. folglich dessen Erkundbarkeit dadurch stark einschränkt.

3. Kann man eine Relation der o. g. Faktoren zur Tiefenlage des Kristallinkörpers herstellen?

Generell lässt sich sagen, dass je tiefer der Kristallinkörper liegt (d.h. je mächtiger die Überdeckung), desto schwieriger ist dessen Abbildung und Charakterisierung. Die folgende Tabelle gibt einen qualitativen Überblick zur Einschätzung der Erkundbarkeit in Abhängigkeit der beiden o.g. wesentlichen Faktoren "Mächtigkeit der Überdeckung" und "Komplexität der Überdeckung" (die Komplexität schließt hier sowohl die reine sedimentäre Überdeckung aus Punkt 1 als auch die metamorphe/anisotrope Überdeckung aus Punkt 2 ein):

| Komplexität \ Mächtigkeit | gering | hoch |
|---------------------------|--------|------|
| | gering | ++ |
| hoch | + | -- |

„++“ = sehr gut „+“ = gut „-“ = schlecht „--“ = sehr schlecht

4. Worin sind die Einschränkungen in der Auflösung begründet?

Die folgenden Aspekte sind bei dem Aspekt der "Auflösung" zu berücksichtigen:

- die Auflösung seismischer Wellen hängt generell von der Wellenlänge ab. Hohe seismische Geschwindigkeiten, wie sie in kristallinen Gesteinen der Fall sind, bedingen **große Wellenlängen** und damit eine prinzipiell **geringere Auflösung** als in sedimentären Gesteinen
- in Sedimenten lassen sich geringe vertikale Versätze von Schichtgrenzen als indirekte "**Marker**" für Verwerfungen/Störungen interpretieren, und Letztere damit "auflösen", auch wenn sie nicht direkt als Reflektoren im seismischen Abbild erscheinen. In kristallinen Gesteinen fehlen in der Regel solche "Marker", d.h. eine Verwerfung/Störung ist als solche nicht direkt erkennbar, wenn sie nicht selbst direkt als Reflektor im seismischen Abbild erscheint.
- **starke Heterogenität** des Kristallin führt zu Mehrfachstreuung und schlechtem Signal/Rausch-Verhältnis, und damit automatisch zu Problemen bei der Auflösung von kleinskaligen Strukturen

5. Inwieweit lässt sich eine belastbare Einschätzung der Erkundbarkeit bei bekannter regionaler Geologie jedoch ohne vorhandene Aufschlüsse durch Bohrungen oder geophysikalische Messungen o. a. geben? Wo sind die Grenzen solcher Aussagen?

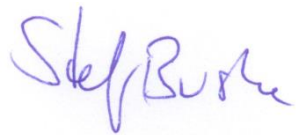
Ohne vorhandene Aufschlüsse durch Bohrungen oder geophysikalische Messungen ist eine Einschätzung der Erkundbarkeit nur auf der Basis "bekannter" regionaler Geologie nur sehr bedingt möglich. Die "Bekanntheit" der regionalen Geologie hat sich in der Vergangenheit schon oft nach einer geophysikalischen Untersuchung stark geändert. Eine verlässliche Charakterisierung und Interpretation des Untergrundes ist nur in Kombination von Geologie und Geophysik möglich. Die Einschätzung der "Erkundbarkeit" kann in diesem Zusammenhang nur auf der Basis von langjähriger Zusammenarbeit in der Kombination dieser Methoden erfolgen. Es existieren insbesondere durch die jahrzehntelange Erfahrung in der Kohlenwasserstoffexploration sehr gute Vorstellungen, inwieweit und mit welchem Aufwand eine "typische" geologische Situation insbesondere mit seismischen Verfahren erkundbar ist. Dies berücksichtigt auch die Anwendung moderner seismischer Verfahren, die inzwischen die Erkundbarkeit von bestimmten Strukturen/Geologien deutlich gegenüber dem Stand von vor 20-30 Jahren verbessert hat.

Die Grenzen der Aussagen über die Erkundbarkeit solcher "typischen" geologischen Situationen liegt eindeutig darin begründet, dass jede geologische Situation ein Einzelfall ist, dessen genaue Konstellation den Grad der Erkundbarkeit festlegt. Hier hilft nur die Zusammenarbeit von erfahrenen Geolog:innen und Geophysiker:innen im Einzelfall auf der Basis einer möglichst umfangreichen Datenbasis.

6. Gibt es weitere geologisch bedingte Faktoren, die die Erkundbarkeit von kristallinem Wirtsgestein durch Seismik verhindern bzw. negativ beeinflussen können?

Die Überdeckung (sedimentär, metamorph, anisotrop, etc.) spielt sicher die wichtigste Rolle bei der Abschätzung der Erkundbarkeit von kristallinen Wirtsgesteinskomplexen. Weitere geologische Faktoren, die die Erkundbarkeit beeinflussen, beziehen sich eher auf den kristallinen Gesteinskörper selbst und seine Struktur. Um nicht nur ein generelles strukturgeologisches Abbild (s. Vorbemerkung "A") des Kristallinkörpers erstellen zu können, sondern auch seinen Zustand hinsichtlich seiner Barriere-wirksamen Eigenschaften erfassen zu können (s. Vorbemerkung "B"), ist seine vollumfängliche seismische Charakterisierung notwendig. Je nach internem geologischen und petrophysikalischen Aufbau des Kristallinkörpers, d.h. z.B. der internen räumlichen Verteilung von Verwerfungen/Störungen/Klüftigkeiten, ihrer Anzahl, Dimensionen, Klüftfüllungen, etc. kann eine Charakterisierung rein mit Oberflächenseismik nicht immer möglich sein sondern auch bohrlochbasierte seismische sowie andere geophysikalische Verfahren erfordern. Dies kann jedoch generell nur sukzessive, iterativ und in Abhängigkeit von den Zwischenergebnissen erfolgen und lässt sich vorab nicht

abschließend festlegen. Diese Aussage gilt eben aufgrund der in dieser Bewertung gelisteten Aspekte insbesondere für kristalline Gesteine und umso mehr für solche mit komplexer Überdeckung, da deren Erkundbarkeit im Vergleich zu einfachen sedimentären Gesteinen mindestens eine Größenordnung schwieriger ist.



(Prof. Dr. Stefan Buske)