

# Probleme bei der echometrischen Vermessung von Speicherkavernen

Ernst Nolte und Erich Wierczyko

*Prakla Seismos GmbH  
Haurstrasse 5  
D-3000 Hannover 1.*

---

## ZUSAMMENFASSUNG

Form und Größe von ausgesolten Kavernen werden seit Jahren im Rahmen echometrischer Messungen bestimmt.

1. Für solegefüllte Kavernen ergeben sich mit dem von der Prakla-Seismos entwickelten Echo-Log meist nur dann Probleme bei der Interpretation, wenn

1.1 die Messungen innerhalb einer Stahlverrohrung ausgeführt werden müssen oder

1.2 der Strahlenweg des Ultraschallstrahles infolge irgendwelcher Besonderheiten in der Kaverne nicht mehr geradlinig verläuft.

2. Bei ölbefüllten Kavernen wird mit zunehmender Viskosität der Rohöle die Reichweite von Ultraschallmessungen begrenzt. Durch Herabsetzen der Meßfrequenz bis auf ca. 100 kHz ist eine weitgehende Nachvermessung unverrohrter Speicherkavernen möglich. Über Versuche, auch verrohrte, rohölbefüllte Kavernen echometrisch zu vermessen, wird berichtet.

3. Gas- und luftgefüllte Kavernen lassen eine Verwendung von Ultraschall zur echometrischen Vermessung nicht zu. Über Versuche, echometrische Vermessungen mit Hilfe eines neu entwickelten Impulslasers im Infrarotbereich unter Ausnutzung der bisher üblichen Technik des Echo-Logs durchzuführen, wird berichtet.

---

## EINLEITUNG

Form und Größe von ausgesolten Salzkavernen werden seit Jahren mit Hilfe echometrischer Vermessungen bestimmt. Hierzu wird durch das Kavernenbohrloch an einem elektrischen, stahlarnierten Bohrlochkabel eine sogenannte Echosonde eingefahren. Von modernen Echosonden wird verlangt, daß der zur Echolaufzeitmessung benutzte Ultraschallwandler lückenlos den gesamten Kavernenhohlraum erfassen kann. Dies bedeutet, daß ein Ultraschall-Sender/Empfängersystem stufenweise oder kontinuierlich in der Horizontalen um 360° drehbar ist und in der Vertikalen von oben nach unten einen Winkel von 180° überstreichen kann.

Durch ein magnetisches Kompaßsystem soll der Ultraschallwandler mit einer Genauigkeit von  $\pm 2^\circ$  in jede gewünschte Winkelstellung gedreht werden können, wobei ein Kreisel-Stabilisationssystem dafür sorgt, daß unerwünschte Drehbewegungen des Sondenkörpers unterdrückt werden.

Um bei Messungen in Sole bei den verschiedenen Entfernungen mit genügend enger Strahlbündelung, d.h. mit möglichst hoher räumlicher Genauigkeit, messen zu können, sind Meßfrequenzen oberhalb von 200 kHz erforderlich.

Über das Meßverfahren und die Darstellung der Ergebnisse im einzelnen wurde durch E. Wierczyko mit Literatur in den Jahren 1971 bzw. 1972 berichtet.

## MESSPROBLEME BEI SOLEGEFÜLLTEN KAVERNEN

Mit dem von Prakla-Seismos für die echometrische Vermessung von solegefüllten Kavernen entwickelten Verfahren "Echo-Log" treten heutzutage meist nur noch dann Probleme bei der Vermessung und Interpretation auf, wenn 1) die Messungen innerhalb einer Stahlverrohrung ausgeführt werden müssen und 2) der Strahlenweg des Ultra-

schallstrahles infolge irgendwelcher Besonderheiten in der Kaverne nicht mehr geradlinig oder nicht auf direktem Weg verläuft.

**Echometrische Kavernenvermessung durch die Wandung einer Stahlverrohrung.** Bei der echometrischen Vermessung durch die Wandung einer Stahlverrohrung hindurch muß der Ultraschallstrahl zweimal die etwa 7 bis 10 mm dicke Rohrwandung durchdringen. Um befriedigende Meßergebnisse erzielen zu können, sollten zunächst folgende technische Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Um störende Reflexionen an der inneren bzw. äußeren Rohrwandung möglichst klein zu halten, sollte die Meßfrequenz so gewählt werden, daß die halbe Wellenlänge oder ein Vielfaches derselben etwa der Dicke der Rohrwandung entspricht.
2. Nicht zu vermeidende Reflexionen (Rohrschaft) sollten durch geeignete Ultraschallwandler-Systeme mit verbesserter Richtwirkung vermindert werden. Dabei sollte nach Möglichkeit auch die Schallbrechung durch das Rohr kompensiert werden.
3. Damit der Ultraschallwandler im Bedarfsfalle mit maximaler Amplitude zu senden in der Lage ist, sollte die Meßfrequenz von obertage her nachstimbar sein, um so eine Änderung der Resonanzfrequenz infolge Druck- und Temperaturänderungen auszugleichen.
4. Letztlich sollte die Sonde, um in allen Richtungen gleich günstige akustische Verhältnisse zu erreichen, durch eine Zentriervorrichtung im Rohr vollständig zentriert sein, auch wenn z.B. im Kavernenkopf ein kleinerer Durchmesser durchfahren werden muß als im zu vermessenden Verrohrungsbereich.
5. Um auch in einer Stahlverrohrung eine Richtungsorientierung vornehmen zu können, ist es erforderlich, das magnetische Kompaßsystem durch einen Kreiselkompaß zu ersetzen.
6. Neben diesen rein meßtechnischen Erfordernissen muß auch noch gewährleistet sein, daß das von den Ultraschallwellen zu durchdringende Stahlrohr sowohl innen als außen frei von Ablagerungen jeder Art ist. Unter Ablagerungen kann man dabei verstehen:
  - 6.1. Reste einer ehemaligen Zementierung an der Außenseite der Verrohrung
  - 6.2. Gipsablagerungen, die in ungünstigen Fällen entweder außen oder innen in der Stahlverrohrung eine Dicke bis 30 mm erreichen können
  - 6.3. sonstige aus dem Süßwasser ausgefällte Ablagerungen im Inneren der Stahlverrohrung, wie Mangano usw., sowie
  - 6.4. Rostbildungen bzw. Aufblätterungen am Stahlrohr infolge von Rostbildung.

7. Eine weitere Erschwernis beim zweimaligen Ultraschalldurchgang durch die Verrohrung können die Rohrverbindungen verursachen. Aus diesem Grunde sollte zu einer Echomessung immer ein taufengleiches Casing-Collar-Log zur Verfügung stehen, um Messungen im Bereich der Rohrverbindungen auszuschließen.

Da erfahrungsgemäß nie alle diese Voraussetzungen erfüllt sein können, werden Echomessungen durch eine Stahlverrohrung immer mehr oder weniger Mängel aufweisen, die eine eindeutige Interpretation der Meßergebnisse nicht ermöglichen. Insbesondere muß auf die Existenz von Seitenechos und rückwärtigen Echos hingewiesen werden (siehe, Wierczyko, 1972).

Als Positivum sei hier jedoch noch berichtet, daß unter günstigen Voraussetzungen echometrische Vermessungen auch durch zwei Stahlverrohrungen hindurch mit Erfolg durchgeführt worden sind. Obwohl infolge der schlechteren akustischen Bedingungen, die sich aus zwei hintereinanderliegenden Rohrwandungen ergeben (u.a. vergrößerter Öffnungswinkel des Echostrahles), mehr Seiten- und rückwärtige Echos aufgetreten sind als bei Messungen durch nur eine Verrohrung, war es dennoch möglich, eine eindeutige Interpretation abzugeben, die nach späterem Ziehen der Verrohrungen bei Folgemessungen voll bestätigt worden ist.

**Echometrische Vermessung unter Berücksichtigung eines nicht geradlinig oder nicht auf direktem Weg verlaufenden Strahlenweges.** Die echometrische Vermessung einer Kavernenwandfläche, die nicht senkrecht zum einfallenden Ultraschall steht, ist nur deshalb möglich, weil es in der angesetzten Salzoberfläche immer genug Kleinflächen in der Größenordnung von einigen Millimetern Durchmesser gibt, die senkrecht zum Echostrahl stehen. Von diesen Kleinflächen wird der überwiegende Teil der ausgesandten Ultraschallenergie in Form eines Echos zum Ultraschallstrahler zurückgeworfen. Nur ein geringer Teil der Energie wird entsprechend den Reflexionsgesetzen der Seismik in die Kaverne reflektiert.

Auf die Möglichkeit von Interpretationsfehlern durch Auswerten von reflektierten Echos als "echte Echos" wurde in Wierczyko 1972a, b schon hingewiesen. Aus der heutigen Sicht kann man Folgendes feststellen:

Neben den erwünschten "Echos" treten bei der echometrischen Vermessung von Kavernen auch Reflexionen bzw. reflektierte Echos auf. Die Häufigkeit reflektierter Echos hängt von der "Rauigkeit" der angesetzten Salzoberfläche und vom Auftreffwinkel des Echostrahles ab. Bei einer normalen Salzoberfläche und einem Auftreffwinkel von  $45^\circ$  kann man damit rechnen, daß 70% der auftreffenden Energie als echte Echos zurückkommen und 30% als Reflexion zerstreut werden. Bei einer Anhydritoberfläche scheint das

Verhältnis genau umgekehrt zu sein, denn in diesem Fall werden 70% der Energie reflektiert, während vielleicht 30% in Form eines echten Echos direkt zum Wandler zurückkommen. Aus diesem Grunde sind auch schon Versuche unternommen worden, anhand des Amplitudenverhältnisses Echo/Reflexion in der Kavernenbegrenzung Salz von Anhydrit zu unterscheiden.

Noch stärker ausgebildet in Richtung Reflexion ist das Echo/Reflexionsverhältnis im Bereich der Kavernenabdeckung mit Blanket, wobei auf dem Wege von Rohöl-Dieselöl-Benzin-Propan zu Luft das Verhältnis 0% zu 100% werden kann. Mit anderen Worten, wenn man unter einem gewissen Winkel eine durch Luft geschützte Kavernendecke vermessen will, dann erhält man von der Sole/Luft-Grenze meist keinerlei Echos mehr, dafür aber sehr deutlich reflektierte Echos vom Kavernenboden bzw. der Kavernenwand.

Erwähnt sei in diesem Zusammenhang noch ein weiteres Problem. Wenn man mit dem nach oben gerichteten Ultraschallwandler den schmalen "Finger" einer Hintersolung vermessen muß, dann beobachtet man meistens mehrere Echos, von denen die dem ersten Echo folgenden in diesem "Finger" hin- und herreflektiert worden sein können. Bei Auftreffwinkeln des Echostrahles von weniger als etwa 15° auf die Salzoberfläche einer Kavernenwand muß ferner auch noch mit Beugungseffekten infolge höherer Temperatur und Dichte und deshalb mit einer Geschwindigkeitsänderung in Nähe der Kavernenwand gerechnet werden. Die Nichtberücksichtigung dieses Beugungseffektes kann zu einer unberechtigten Ausweitung der dargestellten Kavernenwand und damit zu einem zu großen errechneten Volumen führen.

### ECHOMETRISCHE VERMESSUNG VON ROHÖLGEFÜLLTEN KAVERNEN

Die z.T. recht hohe Viskosität der in Speicherkavernen eingelagerten Rohöle bedingt in diesem Übertragungsmedium für Ultraschallwellen eine nicht unbeträchtliche Dämpfung, die mit steigender Frequenz zunimmt. Um auch nach der Befüllung eine Rohölspeicherkaverne hinsichtlich Form und Größe echometrisch vermessen zu können, muß die für Messungen in solegefüllten Kavernen erprobte technische Ausrüstung wesentlich modifiziert werden. Dabei ist es notwendig, mit der Sendepulsleistung und der Empfangsempfindlichkeit bis an die Grenze des physikalisch-technisch Möglichen zu gehen.

Durch Herabsetzung der Meßfrequenz bis auf ca. 100 kHz unter Beibehaltung der mit 200 kHz in Sole in etwa erreichbaren Echostrahlbündelung sowie durch Benutzung eines Signalstapelgerätes konnten in Rohöl mittlerer Viskosität immerhin Reichweiten bis 50 m erreicht werden.

Da bei rohölgefüllten Kavernen nur in seltenen Fällen mit dem Ausbau des Ölbefüllungsstranges gerechnet werden kann, mußte für die Durchführung einer echometrischen Vermessung auch für solche extremen Meßbedingungen nach einer Lösungsmöglichkeit gesucht werden. Gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie wird von der Prakla-Seismos ab 1.8.1975 ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit diesem Ziel durchgeführt. Unter Mitausnutzung aller bisher in offenen, rohölgefüllten Kavernen gemachten Erfahrungen konnten bei einer versuchsweise durchgeführten Vermessung einer mit einem Befüllungsstrang bestückten Speicherkaverne Reichweiten bis zu 20 m gemessen werden. Erzielt wurden diese Ergebnisse durch die Wandung eines 7"-Stahlrohres mit 7,62 mm Wanddicke in Rohöl mit einer Viskosität von ca. 8 cSt bei ca. 27°C.

Bei dieser Messung erwiesen sich als besonders geeignet eine Frequenz von 300 kHz und eine aufwärts gerichtete Schrägstellung des Ultraschallwandlers von 20° gegenüber der Vertikalen. Es ist zu erwarten, daß die bisher erzielte Reichweite von 20 m durch die Verwendung des bereits erwähnten Signalstapelgerätes sowie eines verbesserten Wandlerystems noch vergrößert werden kann.

### ECHOMETRISCHE VERMESSUNG VON GAS- UND LUFTERFÜLLTEN KAVERNEN

Für die echometrische Vermessung von gas- oder luftgefüllten Speicherkavernen ist Ultraschall als Energieform wenig geeignet. Als praktikabel hat sich ein optisches Laufzeitmeßverfahren ergeben, das mit Laserpulsen im Infrarotbereich arbeitet.

Unter Verwendung eines großen Teils der für die Ultraschallmessungen entwickelten Techniken, wie Drehen und Kippen der Meßrichtung, Kompaßorientierung und Kreisel-Drehstabilisation, wurde für den dreh- und ausklippharen Unterteil der bisherigen Echosonde ein spezieller Lasermeßkopf entwickelt. Auch diese Entwicklung der Prakla-Seismos wird durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie seit dem 1. Oktober 1977 gefördert. Erste Meßerfahrungen mit einem Laser-Meßsystem liegen von der Vermessung einer in einem Salzbergwerk bergmännisch hergestellten Kaverne sowie von der Vermessung einer gesolten und dann leergepumpten, noch unter atmosphärischem Druck stehenden Preßluft-Speicherkaverne vor.

Nach Überwindung von hauptsächlich temperaturbedingten Schwächen und Ungenauigkeiten des Gerätes, die bei den ersten Versuchsmessungen auftraten, haben weitere Messungen in den genannten Objekten bereits recht brauchbare Ergebnisse mit Reichweiten bis ca. 20 m erbracht. Mit einer in bezug auf Reichweite und Meßge-

nauigkeit wesentlich verbesserten Laser-Meßsonde soll Ende März 1978 versucht werden, die bereits teilweise vermessene, dann in Betrieb befindliche Preßluft-Speicherkaverne sowie eine mit Gas befüllte Kaverne unter Umgebungsbedingungen von ca. 100 bar Druck und ca. 30°C Temperatur zu vermessen.

#### LITERATUR

- Wierczyko, E. 1972a. Echo-Log, ein geophysikalisches Messverfahren zur Bestimmung von Form von Aussolungshohlräumen im Salzgebirge. *Geophysical Prospecting* 20(3).
- , 1972b. Determination of cavity form and volume spread with Echo-Log. SMRI Meeting, Montreal, Canada, June 7–8, 1972.