

Bewertung von Zementintegrität bei Tiefbohrungen durch Ultraschallmessungen

Christoph Klieber

Schlumberger Oilfield Services,

1 rue Henri Becquerel, 92140 Clamart, Frankreich, E-Mail: cklieber@slb.com

In der Öl- und Gasindustrie wird nach der Bohrung ein Stahlrohr, genannt Futterrohr, in das mehrere Kilometer tiefe Bohrloch eingeführt und der Zwischenraum zwischen Rohr und Gestein, genannt Annulus, mit Zement verfüllt. Die vollständige Füllung des Zwischenraums mit Zement bewirkt hydraulische Isolation der verschiedenen Produktionszonen. Diese hydraulische Isolation unterbindet jegliche Flüssigkeits- oder Gasbewegung außerhalb des Futterrohres, um mögliche Verschmutzung von Grundwasserschichten und Unfälle zu verhindern. Aus diesem Grund wird der Zement im Annulus nach Aushärtung durch akustische Messungen von innerhalb des Futterrohres überprüft. Die genauesten Messungen basieren auf Ultraschalltechniken, die entweder den Abklang der natürlichen Resonanz des Futterrohres ausnutzen oder auf den Eigenschaften der niedrigsten symmetrischen und antisymmetrischen Schwingungsformen von Lamb-Wellen basieren. Eine detaillierte Analyse dieser Messtechniken hat in den letzten Jahren einer Weiterentwicklung und Verbesserung der Techniken bei schwierigen äußeren Bedingungen ermöglicht und deren Messgenauigkeit gesteigert.

Einleitung

Bei der Konstruktion eines Tiefbrunnens (wie er z.B. bei der Öl- und Gasförderung, CO₂- Abtrennung und Speicherung und bei Geothermieprojekten Anwendung findet) ist ein wesentlicher Schritt die Installierung eines Stahlrohres, genannt Futterrohr, das in das mehrere Kilometer tiefe Bohrloch eingeführt wird. Im direkten Anschluss daran wird der Zwischenraum zwischen Rohr und Gestein – genannt Annulus – mit Zement verfüllt, um unerwünschte Öl-, Gas- oder Wasserbewegung zwischen verschiedenen Produktionszonen zu unterbinden, das Bohrloch vor möglichem Kollaps zu bewahren oder Korrosion oder Verformung des Futterrohrstahls zu verhindern. Tiefbohrungsgestaltungen steigender Komplexität und strengere staatliche Anforderungen bezüglich Sicherheit und Umweltschutz stellen immer höhere Herausforderung an Begutachtungsmessungen der Zementqualität und Integrität. Solche Messungen müssen zerstörungsfrei und unter harschen Bedingungen (Sensortechnik und Elektronik müssen bei Druck bis zu 1400 bar und Temperatur bis zu 200°C operieren) von der Innenseite des Futterrohres aus Stahl ausgeführt werden. Diese Messung soll mögliche Kanäle erkennen, die zu unerwünschten Flüssigkeits- oder Gasbewegungen außerhalb des Futterrohres führen können. Besonders schwerwiegend sind Verbindungen zwischen geologischen Schichten mit verschiedenem Reservoirdruck und solche, die zu Grundwasserschichten und bis zur Oberfläche führen. Die besten Bewertungsergebnisse bieten akustische Messtechniken, die Resonanzen oder geführte Moden im mechanisch kontrastreichen Futterstahl benutzen.

Akustische Zementintegritätsbestimmung

Die einfachste, akustische Bestimmungsmethode wird im englischen *Cement Bond Logging* genannt [1] und basiert auf einer Messung der niedrigsten Ordnung symmetrischer Lamb-Wellen (S₀) im hörbaren Schallbereich (um 15-20 kHz). Wegen der niedrigen Frequenz und der damit verbundenen großen Wellenlänge bietet diese Messung nur eine geringe räumliche Auflösung, also Mittelung über größere Volumen. Ergebnisse dieser Messungen können schwierig zu interpretieren sein, da Verbindungen zwischen

Stahl und Zement und Kanäle ähnliche Signaturen der Signalamplituden aufweisen und dadurch eine Unterscheidung zwischen beiden Effekten nicht möglich ist. Erhöhung der Frequenz in den Ultraschallbereich erlaubt diese Beschränkung auf Kosten einer komplexeren Messung zu überwinden [2].

Abbildung 1 zeigt das Foto einer Feldmessung. Ein Team vor Ort hat das Messgerät zusammengesetzt und an einem Kran aufgehängt. Das Haltekabel dient gleichzeitig als Zwei-Weg-Datenkabel, worüber das Messgerät mit dem Auswertungswagen verbunden ist.



Abbildung 1: Foto des Ultraschallmessaufbaus in einer Feldmessung, bevor das Messgerät in das Bohrloch abgelassen wird.

Ultraschallbasierte Messungen

In einer ersten Ultraschallmesstechnik wird ein einzelner Puls-Echo Transducer benutzt, der an einem rotierenden Messkopf am unteren Ende des Messgerätes sitzt (siehe Abbildung 2). Durch die kontinuierliche Drehung und gleichzeitig vertikale Bewegung des Messkopfes durch das Haltekabel können beliebig viele Messpunkte azimuthal und vertikal aufgenommen werden [3]. Bei dieser sogenannten

Echo-Resonanzmessung sendet ein Ultraschalltransducer ein Signal im Bereich 100-600 kHz aus, wobei die Frequenz auf die fundamentale Resonanz der Dicke des Futterstahlrohres abgestimmt ist. Weiterentwicklung von Hardware [4] und Analysesoftware hat es nun ermöglicht, diese Messungen unter fast allen Bedingungen (jegliche Stahlrohrdicke und Bohrspülung) durchzuführen [5]. In Abbildung 3 wird das Grundprinzip dieser Messung schematisch dargestellt. Ein Großteil der Energie wird direkt von der Rohrrinnenseite reflektiert und wird als erstes Echosignal vom selben Transducer registriert. Diesem folgt eine abklingende Resonanz mit der charakteristischen Frequenz, gegeben durch die Stahlrohrdicke. Die Auswertung dieses Echosignals, genauer gesagt dessen Resonanzfrequenz, Resonanzamplitude und Abklinggeschwindigkeit im Verhältnis zur Hauptreflektion erlauben die Bestimmung der Stahldicke und der akustischen Impedanz der Bohrspülung und des Annulus [6].

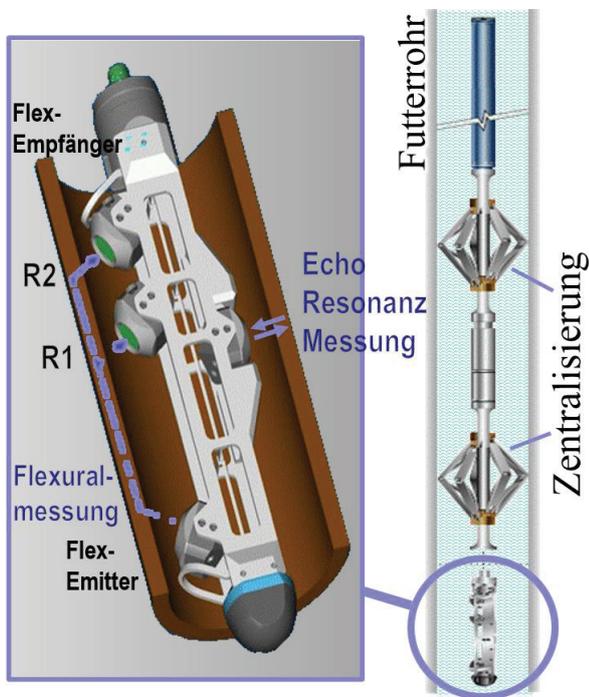


Abbildung 2: (Rechts) Skizze eines kompletten Messgerätes mit Zentralisierungsvorrichtungen und einem Ultraschallmesskopf (Gesamtlänge ca. 10 Meter) wie es an einem Halte- & Datenkabel in das Futterrohr bis zu einer Tiefe von mehreren tausend Metern für Messungen hinabgelassen wird. (Links) Detailabbildung des Ultraschallmesskopfes mit Echo-Resonanzmesseinheit auf der einen und antisymmetrischen Lamb-Wellenmesseinheit (Flexuralmessung) auf der gegenüberliegenden Seite. Kontinuierliche Rotation des Messkopfes mit mehreren Umdrehungen pro Sekunde und der gleichzeitigen vertikalen Bewegung durch das Haltekabel erlaubt eine vollständige azimutale Untersuchung des Futterrohres über hunderte bis tausende Meter.

Die Echo-Resonanzmessung erlaubt eine eindeutige Unterscheidung zwischen gut gebundenen, harten Festkörpern (normaler Zement), beziehungsweise Flüssigkeit oder Gas im Annulus. Sobald jedoch die Dichte des Füllmaterials reduziert wird (z.B. leichter Zement), wird eine eindeutige Unterscheidung gegenüber Flüssigkeiten schwieriger. Darüber hinaus ist die Untersuchung des

vollständigen Annulus über die äußere Oberfläche des Stahlrohres hinaus sehr wünschenswert und mit der Echo-Resonanzmethode nicht möglich. Zu diesem Zweck wurde ein weiteres Ultraschallmessverfahren entwickelt, das auf der Anregung niedrigster Ordnung anti-symmetrischer Lamb-Wellen (A0) im Futterrohrstahl beruht [7]. Die resultierende, im Stahlrohr geführte Welle strahlt Energie in die angrenzenden Materialien und, aufgrund der wenig dispersiven Natur dieser Mode, können deshalb nach einer bestimmten Entfernung kompakte Wellenpakete empfangen werden. Diese empfangenen Wellenformen beinhalten Informationen über das Annulusmaterial und den Zustand der Grenzfläche zwischen Annulusmaterial und Gestein, des sogenannten TIE (*Third Interface Echo*, siehe Abbildung 3). Eine besonders wichtige Information, die aus der TIE Messung abgeleitet werden kann, ist die lokale Annulusdicke – eine Information, die es wiederum ermöglicht, die Zentralisierung des Futterrohres im Bohrloch zu ermitteln.

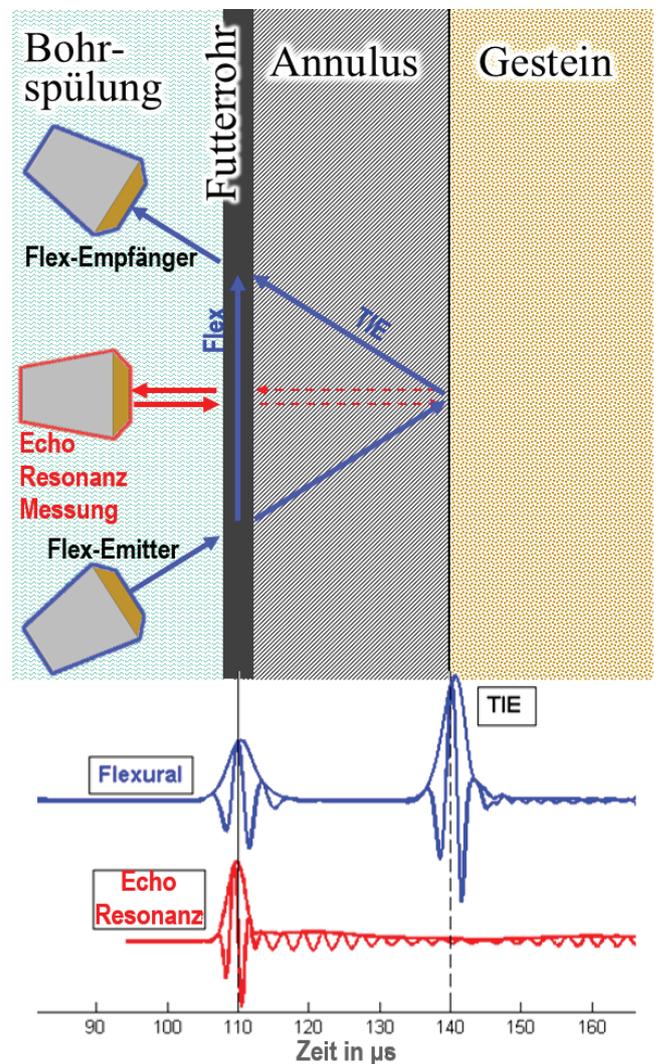


Abbildung 3: Prinzipbild der verschiedenen Ultraschallmessungen (oben) zusammen mit idealisierten Wellenformen (unten). Gezeigt werden in rot die Echo-Resonanzmessung und in blau die Messung, basierend auf der niedrigsten Ordnung antisymmetrischer Lamb-Wellen (genannt Flexural). Als drittes ist eine mögliche akustische Reflexion von der Annulus-Gestein-Grenzfläche als TIE (*Third-Interface Echo*) gezeigt, die zur Bestimmung der Futterrohrzentralisierung herangezogen wird.

Laborexperimente

Für ein genaueres Verständnis der einzelnen Bestandteile der aufgenommenen Wellenformen haben wir experimentelle Messungen entlang räumlicher und zeitlicher Dimensionen ausgeführt, um die sich ausbreitenden Wellenformen für verschiedene Annulusmaterialien visuell darzustellen.

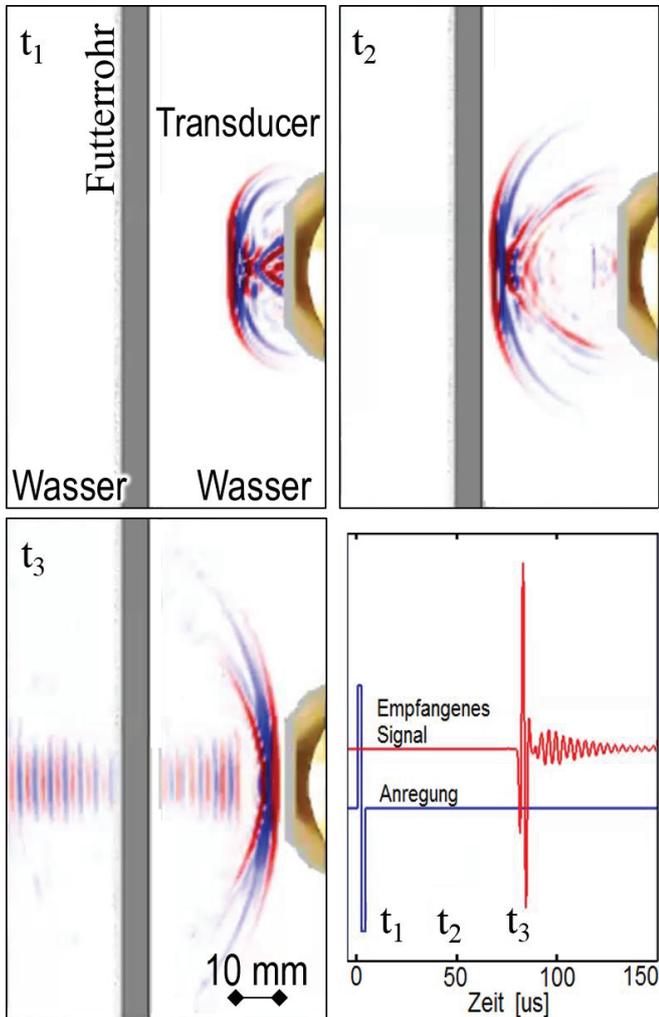


Abbildung 4: Nadelhydrophon-Messungen stellen die Aussendung eines bipolaren Pulses von einem Puls-Echo-Transducers (t_1), dessen Wechselwirkung mit dem Futterrohrstahl (t_2) und das zurückgeworfene Signal (t_3) mit einer führenden Hauptreflektion und der nachfolgenden Resonanz des Stahlrohres sichtbar dar. Zeit-Wellenformen zeigen das ausgesendete und empfangene Signal des Puls-Echo-Transducers.

Zuerst haben wir dies für den Fall der Echo-Resonanzmessung ausgeführt. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse einer Messung mit einem 1 mm großen Nadelhydrophon, sowohl innerhalb als auch außerhalb eines 8 mm dicken Stahlrohres. Mehrere hunderttausend Wellenformen wurden über den gezeigten Raum nacheinander aufgezeichnet und so transformiert, dass eine Vielzahl einzelner zweidimensionaler Abbildungen die lokale Druckverteilung zu jedem relevanten Zeitpunkt visualisieren. All diese Zeitabbildungen können in Form eines Films abgespielt werden; aus Platzgründen beschränken wir uns in Abbildung 4 auf drei repräsentative Zeiten. Nachdem der ca. 30 mm große Transducer eine über die relevante Ausdehnung

planare, bipolare Druckwelle ausgesendet hat (t_1), interagiert sie mit dem Stahl gegebener Dicke (t_2), der eine abklingende Resonanz zurückwirft (t_3).

Für die Vermessung der antisymmetrischen Lamb-Wellen ist das zentrale Element des Versuchsaufbaus (Abbildung 5) wiederum eine 8 mm dicke Stahlplatte, hinter der sich ein 50 mm Annulus befindet, der entweder mit Wasser oder PMMA (Plexiglass stellvertretend für leichten Zement) gefüllt ist. Die ganze Struktur wird in einem Wasserbecken installiert, so dass wassergekoppelte Ultraschallsender und Empfänger ihre akustische Energie effizient in die Plattenmoden ein- und auskoppeln können. Der Ultraschallsender bestrahlt die Innenseite der Stahlplatte und koppelt dadurch Energie in die A0-Mode der Platte. Während diese Mode in der Platte propagiert, strahlt sie Energie in die beiden angrenzenden Materialien ab, die Flüssigkeit auf der Innenseite und in den Annulus auf der Außenseite. Die Geometrie des Aufbaus (Sender zu Empfängerdistanz und Plattenabstand) wurden so optimiert, dass die primäre A0-Welle beide Empfänger vor jedem anderen Signal erreicht. Akustische Energie, die in den Annulus abstrahlt, wird von der Annulus-Felsgestein Grenzfläche zurück zur Stahlplatte reflektiert, in der sie eine sekundäre A0-Welle erzeugen kann.

Die beiden Empfänger R1 und R2 registrieren jeweils zuerst das Signal der primären A0-Welle. Die Amplitudendämpfung dieser primären A0-Welle über die Propagationsstrecke R1 zu R2 erlaubt es nun, die akustischen Eigenschaften des Materials im direkten Kontakt zu dem Futterrohr zu bestimmen [8]. Darüber hinaus wird immer auch akustische Energie der primären A0-Welle in den Annulus abgestrahlt, welche abhängig von den Eigenschaften des Annulusmaterials longitudinalen (P) und/oder transversalen (S) Wellencharakter haben kann. Im einfachsten Fall eines flüssigkeitsgefüllten Annulus wird Energiepropagation nur in Form von Longitudinalwellen unterstützt, und einfache Reflektionen dieser Wellen erzeugen sekundäre A0-Wellen (PP, PPPP, usw.). Bei festen Annulusmaterialien gibt es, abhängig von den longitudinalen (V_p) und transversalen (V_s) Schallgeschwindigkeiten, modale Umwandlungen an den Grenz- und Reflektionsflächen, die dann über PP, PS, SP, SS und weiter zahlreiche mehrfach-reflektierte sekundäre A0-Wellen erzeugen können. Besonders interessant sind Fälle, bei denen eine Annulusschallgeschwindigkeit (V_p oder V_s) die A0-Dispersionkurve im relevanten Frequenzbereich schneidet. Ein solches Szenario wird in Abbildung 5 im Falle des Festkörpers gezeigt, bei dem wir eine Aufspaltung der Dispersionskurve in einen niedrigfrequenten langsameren und einen höherfrequenten schnelleren Ast erkennen können.

Zusammenfassung

Die hochpräzise Bewertung von Zementintegrität bei Tiefbohrungen wird durch die Kombination von verschiedenen, komplementären akustischen Messungen ermöglicht. Messungen im hörbaren Bereich (15-20 kHz) bieten zwar eine geringere räumliche Auflösung, beschränkt durch ihre große Wellenlänge, jedoch sind sie auch weniger anfällig für lokale Bindungseigenschaften der Grenzflächen. Ultraschallmessungen hingegen ermöglichen eine sehr hohe räumliche Auflösung und erlauben die Identifizierung und

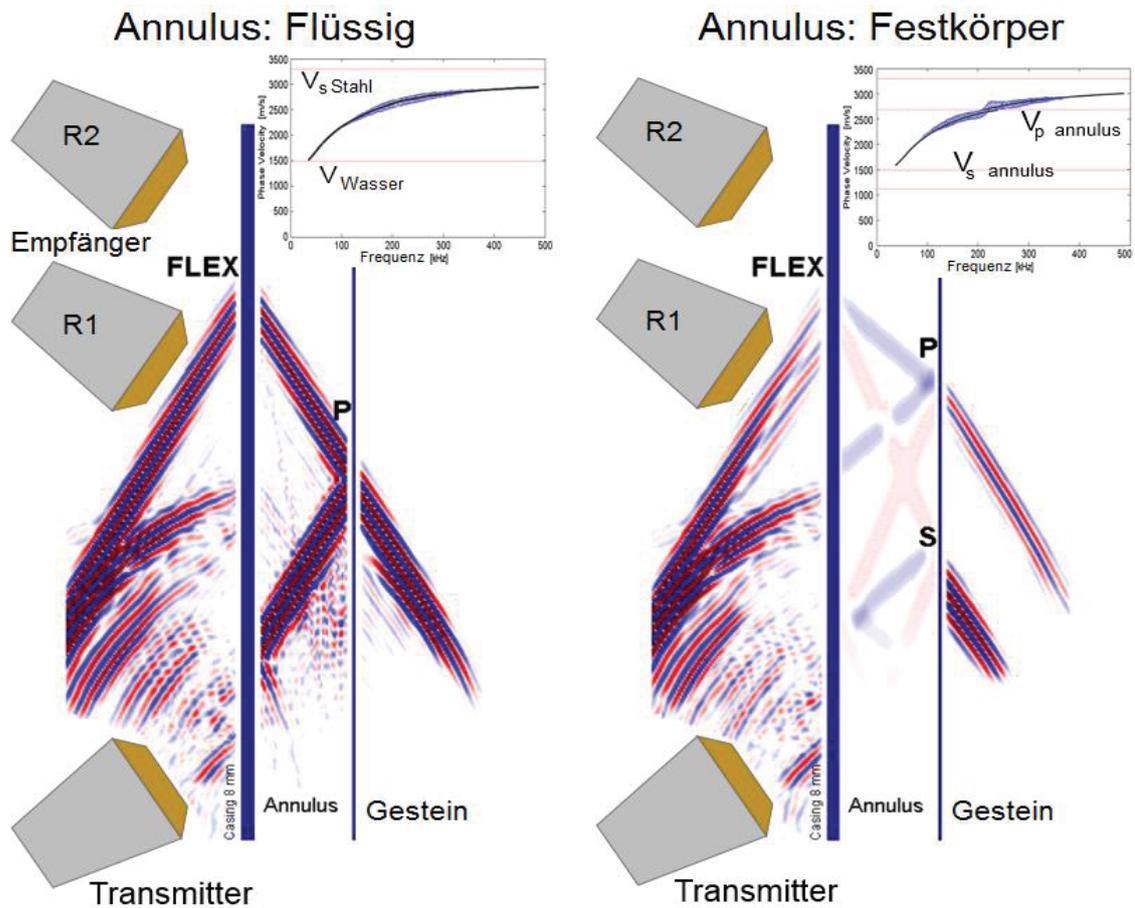


Abbildung 5: Beispiele experimentell aufgenommener Druckfeldmessungen mit einem Nadelhydrophon für den Fall eines flüssigkeitsgefüllten Annulus auf der linken und eines festkörpergefüllten Annulus auf der rechten Seite. Im Falle eines Annulusmaterials mit einer longitudinalen Wellengeschwindigkeit im Bereich der antisymmetrischen Lamb-Welle beobachten wir eine Aufspaltung der Phasendispersion um den Schnittpunkt der beiden Dispersionskurven.

genaue Lokalisierung von Kanälen im Annulus durch die Auswertung von Millionen von Einzelmessungen. Diese große Anzahl von Messdaten erfordert eine effiziente, automatisierte Auswertung, die durch optimierte Analyseprogramme ermöglicht wird, die Resultate schnellstmöglich vor Ort erzeugt. Mit Hilfe dieser Analyse kann zwischen kostspieligen Entscheidungen (z.B. die Verfüllung eines Kanals durch sogenanntes Zement-Squeezing) abgewogen werden.

Danksagung

Besonderer Dank gilt Martin G. Lüling für das sorgfältige Korrekturlesen des Manuskriptes.

Literatur

- [1] Che Xiao-Hua, Qiao Wen-Xiao, Ju Xiao-Dong, and Wang Rui-Jia. Azimuthal cement evaluation with an acoustic phased-arc array transmitter: numerical simulations and field tests. *APPLIED GEOPHYSICS* 13(1), (2016), 194-202.
- [2] Zeroug, S., Bose, S., Sinha, B., et al. 2016. Sonic and Ultrasonic Measurement Applications for Cased Oil Wells, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016.
- [3] Hayman, A.J., Hutin, R., and Wright, P.V., High Resolution Cementation and Corrosion Imaging by Ultrasound. *Transactions, SPWLA 32nd Annual Logging Symposium* (1991).
- [4] S. Thierry, C. Klieber, M. Lemarenko, et al., New-Generation Ultrasonic Measurements for Quantitative Cement Evaluation in Heavy Muds and Thick-Wall Casings, *SPE-181450-MS*, (2016).
- [5] C. Klieber, A. Timonin, et al., Leading Edge Developments in Ultrasonic Logging Improves Cement Evaluation Quality in Extreme Conditions, *SPE-182533-MS* (2016).
- [6] C. Klieber and M. Lemarenko, A calibration-free inversion algorithm for evaluating cement quality behind highly contrasting steel pipe, *IEEE Ultrasonics*, 7728565, (2016).
- [7] Van Kuijk, R., Zeroug, S., Froelich, B. Allouche, M., Bose, S., Miller, D., Le Calvez, J.-L., Schoepf, V., Pagnin, A. A novel ultrasonic cased-hole imager for enhanced cement evaluation. *International Petroleum Technology Conference*, Doha, Qatar, 10546 (2005).
- [8] Froelich, B. Multimode evaluation of cement behind steel pipe, *Acoustic 08 Paris*, 5023 (2008).