



Society of Petroleum Engineers

SPE-210377-MS

Bahnbrechende Anwendung von Plasmaspritzschichten zur Verbesserung der Erosionsbeständigkeit von stabbasierten Spaltsieben

Wei Jian Yeap, Qi Zheng Lee, Anie Jelie, Nurfatina Adibah M Habib, Sulaiman Sidek, Zulkifli M Zin, Hazrina Abdul Rahman, Nicholas Foo Kwang Hui, Nik Zarina Suryana Nik Khansani, Khairul Nizam Idris, und Bahrom Madon, PETRONAS Carigali Sdn. Bhd.; Mohd Najib Mustafa und Nur Baizura Zainal Abidin, NeuDimension Sdn. Bhd.; Aleksandr Kovalov, Con-slot SCREENS GmbH

Copyright 2022, Gesellschaft der Erdölingenieure DOI 10.2118/210377-MS

Dieses Papier wurde für die Präsentation auf der SPE Annual Technical Conference and Exhibition 2022 in Houston, Texas, USA, vom 3. bis 5. Oktober 2022 vorbereitet.

Dieses Papier wurde von einem SPE-Programmkomitee zur Präsentation ausgewählt, nachdem die Informationen in einem von dem/den Autor(en) eingereichten Abstract geprüft worden waren. Der Inhalt des Papiers wurde nicht von der Society of Petroleum Engineers geprüft und kann von dem/den Autor(en) korrigiert werden. Das Material spiegelt nicht notwendigerweise die Position der Society of Petroleum Engineers, ihrer Führungskräfte oder Mitglieder wider. Die elektronische Vervielfältigung, Verbreitung oder Speicherung von Teilen dieses Dokuments ist ohne die schriftliche Zustimmung der Society of Petroleum Engineers verboten. Die Erlaubnis zur Vervielfältigung in gedruckter Form ist auf eine Zusammenfassung von höchstens 300 Wörtern beschränkt; Abbildungen dürfen nicht kopiert werden. Die Zusammenfassung muss einen auffälligen Hinweis auf das Urheberrecht der SPE enthalten.

Abstrakt

Die Steuerung der Sandproduktion ist ein häufiges Problem und eine der schwierigsten Herausforderungen in der Öl- und Gasindustrie. Es gibt verschiedene Techniken zur Kontrolle der Sandproduktion, wie z. B. Bohrlochsandsiebe. Mehr als die Hälfte der Bohrungen in malaysischen Feldern sind mit einer primären Sandkontrolle im Bohrloch ausgestattet oder erfordern eine Sandkontrolle während ihrer gesamten Lebensdauer. Erschwerend kommt hinzu, dass die meisten installierten primären Sandkontrollen nach einem längeren Produktionszeitraum versagen, weil der Druckabfall im bohrlochnahen Bereich zu hoch ist und das Sieb dadurch die Fähigkeit verliert, die Sandpartikel der Formation zurückzuhalten. Es gibt vier (4) gängige Mechanismen, die zum Versagen des Siebs führen können: Verstopfung, Korrosion, Erosion und mechanische Verformung. Erosion tritt auf, wenn die Formationspartikel mit hoher Geschwindigkeit oder durch kontinuierliche Förderung durch die Sieböffnungen auf die Oberfläche des Siebs treffen. Die Betreiber sind oft gezwungen, sich auf durchlaufende Metallsandfilter zu verlassen, um die stillgelegten Bohrlöcher wieder in Produktion zu bringen. Die meisten Metallsandsiebe leiden jedoch unter dem Problem der Nachhaltigkeit aufgrund von übermäßiger Erosion, insbesondere bei Gasbohrungen. Die meisten Betreiber haben ihr Augenmerk darauf gerichtet, die Lebensdauer des Siebs gegen Erosion zu maximieren. Dies führte zur Entwicklung eines neuartigen Sandfilters, bei dem eine erfinderische Beschichtung aus einer Keramik- oder Hartmetallamalgalierung durch Plasmaspritztechnik auf das Sieb (d. h. auf die der Formation zugewandten Außenflächen) aufgebracht wurde, um seine Widerstandsfähigkeit gegen schwere erosive Umgebungsbedingungen zu verstärken. Es wurde ein umfangreiches Entwicklungs- und Verifizierungsprogramm durchgeführt, um über 50 mögliche Beschichtungskombinationen auszuwählen, die vorgegebene Schlitzgröße zu garantieren, die Korrosionsbeständigkeit zu bewerten und die mechanische Integrität von Beschichtung und Sieb zu prüfen. Die Technologie wurde in Feld A, vor der Insel Borneo, aufgrund ihrer überlegenen Haltbarkeit und Widerstandsfähigkeit im Vergleich zu metallischen Sandfiltern als Sandkontrollmaßnahme in Betracht gezogen und eingesetzt.

Der Betreiber hatte eine umfangreiche Technologiesuche durchgeführt, um neue erosionsbeständige

He
ru
nt
er
gel
ad
en
vo
n
htt
p://
o
ne
pe
tro
.or
g/
S
P
E
AT
C
E/
pr
oc
ee
din
gs
-
pd
f/2
2A
T
C
E/
2-
22
AT
C
E/
DO
21
SO
24
RO
06
/3
00
14
63
/sp
e-
21
03
77
-
m
s.p
df
du
rc
h
ein
en
Nu
tze
r
vo
n
Ex
xo
n
M
obi
l
Up
str
eam
Re
se
arch
Co
.
a
m
27
.
Se
pt
e
m
ber
20

Sandfilter für Gasbohrungen zu identifizieren. Im Rahmen des Gesamtprojekts wurde von den Servicepartnern eine Testanlage gebaut, die aus einer Durchflussschleife besteht, um beschleunigte erosive Bedingungen im Bohrloch mit einer Kombination aus hoher Durchflussrate und volumengesteuerten Partikeln zu simulieren, die in einem Beschleunigungsrohr zusammengeführt werden. Die Siebe wurden 60 Stunden lang bei einer maximalen Geschwindigkeit von 18 m/s während der Flüssigkeitszufuhr getestet.

Erosionstest und 48 Stunden lang bei einer Höchstgeschwindigkeit von 80 m/s während des Gaserosionstests. Vor und nach dem Erosionstest wurden strenge Analysen durchgeführt, die sich u. a. auf optische Kriterien, Massenverlust und Sandrückhaltetests (SRT) konzentrierten, um die Funktionalität zu überprüfen und die Leistungsvorhersage vor der tatsächlichen Anwendung vor Ort zu validieren. Außerdem wurden Geschwindigkeitsberechnungen mit firmeneigener und kommerzieller Software durchgeführt, um die Auslegungsgrenze zu bestimmen, die Zielgasrate für die Pilotbohrungen festzulegen und das Bohrloch-Entladeverfahren als Anleitung für das Offshore-Personal zu etablieren. Pilotfeldversuche wurden konzipiert, um die Installation des Filters, die Risikominderung und die nachhaltige Produktion zu demonstrieren. Ein Dual-Pot-Sandfilter (DPSF) und ein Online-Sandprobennehmer (OSS) wurden als zusätzliche Sicherheiten eingesetzt, um die Integrität der Oberseite zu gewährleisten, die Sandproduktion an der Oberfläche genau zu überwachen und alle Sandkörner aufzufangen, die größer sind als die Größe des Siebschlitzes während der Entladungssequenz des Bohrlochs.

Bei näherer Betrachtung beider Erosionstests zeigte sich bei den beschichteten Siebmustern kein signifikanter Verschleiß oder eine Verbreiterung der Schlitze, während die unbeschichteten Siebmuster eine starke Erosion aufwiesen, bei der sich die Schlitzgröße an einigen Stellen mehr als verdoppelte. Die beschichteten Siebmuster weisen vor und nach den Erosionstests die gleichen Sandrückhaltefähigkeiten auf, während das unbeschichtete Siebmuster, das den gleichen Bedingungen ausgesetzt war, seine Sandrückhaltefähigkeit verlor. Während des Feldversuchs wurde das Sieb mit Hilfe von Nippelstopfen über eine Slickline erfolgreich installiert, um die stillgelegten Bohrlöcher wieder in Produktion zu bringen, und zwar zu geringeren Gesamtkosten, ohne HSE-Probleme und mit einer Produktionssteigerung über das ursprüngliche Ziel hinaus. Die tatsächlichen Feldergebnisse, die durch die hier vorgestellten umfangreichen Labortests unterstützt werden, zeigen den inhärenten Vorteil von Plasmaspritzbeschichtungen, die die mechanische Integrität und Haltbarkeit von Sandfiltern in stark erosiven Umgebungen gewährleisten. Es werden Abrissanalysen durchgeführt, um die Leistungsvorhersage zu untersuchen, die Erosionsbeständigkeit der Sandfilter-Bodenlochbaugruppen (BHA) zu bestätigen und die Ergebnisse für zukünftige Verbesserungen zu dokumentieren.

Einführung

Bei den meisten Sandsteinvorkommen stellt die Sandproduktion für die meisten Betreiber eine erhebliche Gefahr dar, außer bei konsolidiertem Sandstein mit hoher Festigkeit. Bei schwachen oder nicht verfestigten Sandsteinformationen besteht die Gefahr, dass die Lagerstätte selbst bei geringen Absenkraten in den Produktionsphasen Sand produziert. Erschwerend kommt hinzu, dass Sand in erheblichen und unkontrollierbaren Mengen produziert werden kann, was zu schwerwiegenden Komplikationen führen kann, wie z. B. einer eingeschränkten Förderung, dem Verlust des Bohrlochs aufgrund von Sandverfüllung im Bohrloch und/oder übermäßiger Erosion und/oder Wartungsarbeiten an der Bohrloch- und Oberflächenausrüstung. Die Sandproduktion wird in der Regel auf ein Versagen des Gesteins oder der Formation zurückgeführt, wozu mehrere Faktoren beitragen können. Die Verringerung des Porendrucks aufgrund der Verarmung kann zu einem Versagen des Gesteins aufgrund von Änderungen der Gesteinsspannungen führen. Unkontrollierte Absenkungen, die über den kritischen Absenkungsdruck hinausgehen, können zu einer unerwünschten Sandproduktion führen. Daher verfolgen die meisten Betreiber die Strategie, die Produktion oder die Absenkung an der Sandfläche zu begrenzen, um eine Sandproduktion zu vermeiden. Sandproduktion kann auch in Lagerstätten mit hoher Flüssigkeitsviskosität aufgrund von viskosen Widerstandskräften auftreten. Änderungen der Fließphasen, wie z. B. eine Erhöhung der Wasserproduktionsrate, können zu einer Sandproduktion führen, da die Widerstandskräfte zur Mobilisierung von Sandkörnern zunehmen. Viele Literaturstellen haben durch gemeinsame Feldbeobachtungen gezeigt, dass der Beginn der Sandproduktion oft mit einem Wasserdurchbruch einhergeht (Veeken et al., 1991; Bruno et al., 1996). Daher ist der Einsatz einer Sandkontrolle für die meisten schwachen oder unverfestigten Sandsteine unvermeidlich, da in den späteren Phasen der

Feldesentwicklung mit einer Wasserproduktion zu rechnen ist, insbesondere wenn eine Wasserinjektion als verbesserte Ölgewinnung (IOR) geplant ist. Um die Sandproduktion im Bohrloch einzudämmen, wenden die meisten Betreiber Sandkontrolltechniken an, die sowohl passive als auch aktive Sandkontrolltechniken umfassen. Zu den passiven Sandkontrollmethoden gehören Absenkungssteuerung, orientierte Perforation und selektive Perforation, während zu den aktiven Sandkontrolltechniken die Installation und Fertigstellung von Sandkontrollmaßnahmen im Bohrloch an der Sandoberfläche gehören, wie z. B. freistehende Sandfilter, erweiterbare Sandfilter, Kiespackungen, Frac-and-Pack und chemische Konsolidierung. Passive Sandkontrollmaßnahmen sind in der Regel mit einer strengen Sandüberwachung an der Oberfläche verbunden, da sie nicht über Barrieren zur Kontrolle der Sandproduktion im Bohrloch verfügen. Andererseits sind für die primäre Sandkontrolle umfassende Studien erforderlich

Auswahl, die oft auf mehreren Kriterien wie Partikelgrößenverteilung, Sortierkoeffizient, Gleichmäßigkeitskoeffizient, Lagerstättenflüssigkeit und -eigenschaften usw. beruht. Eine ungeeignete Auswahl der Sandkontrolle, eine fehlerhafte Installation und ein unsachgemäßes Bean-up-Verfahren können zu Fehlern bei der aktiven Sandkontrolle führen, was eine starke Sandproduktion zur Folge hat, die die Integrität der Produktionsanlagen gefährden und zu einem Bean-down oder Shut-in der Bohrung führen kann. In Fällen, in denen die primäre Sandkontrolle versagt, entscheiden sich die meisten Betreiber für eine Sandkontrolle durch Rohrleitungen, da dies als wirtschaftlicher angesehen wird, da die Notwendigkeit einer Bohrlochüberarbeitung entfällt.

Thru-Tubing-Sandkontrolltechniken werden häufig bei marginalen Bohrlöchern mit begrenzten Reserven oder bei bestehenden Bohrlöchern mit Sandproduktion eingesetzt, bei denen eine Überarbeitung oder ein Sidetrack nicht kosteneffizient ist. In den vergangenen Jahrzehnten wurden Methoden zur Sandkontrolle durch das Verlegen von Rohren mit eher gemischtem Erfolg angewandt. In kleineren Rohren herrscht aufgrund der höheren Fließgeschwindigkeit eine stark erosive Umgebung, was den Einsatz von Sandkontrolltechniken in Rohren noch schwieriger macht. Metallische Durchlaufsiebe werden häufig wegen ihrer einfachen Installation und niedrigeren Kosten bevorzugt. Dennoch leiden solche Metallsiebe unter Zuverlässigkeits- und Nachhaltigkeitsproblemen aufgrund von Verstopfung oder Erosion, was die Betreiber in der Regel zu häufigen Eingriffen in das Bohrloch zwingt, um das Sieb auszutauschen. Zahlreiche Studien haben ergeben, dass das Versagen von metallischen Sandfiltern mit Durchgangsrohren in der Regel auf ihre Erosionsanfälligkeit zurückzuführen ist (Sidek et al., 2017).

Da metallische Siebe anfällig für Erosion sind, wurden intensive Anstrengungen unternommen, um Materialien mit höherer Beständigkeit für die Herstellung von Sieben zu finden und auszuwählen. Dies führte zur Reifung der Verwendung von plasmagespritzten beschichteten Sieben als direkter Ersatz für metallische Materialien mit dem Ziel, stark erosiven Umgebungen standzuhalten. Die Wahl fiel auf keramikbeschichtete (plasmagespritzte) stabförmige Siebe, die mit Draht umwickelt sind, da sie mehrere Vorteile bieten. Erstens bieten die keramisch beschichteten Siebe eine bessere Erosionsbeständigkeit in stark erosiven Umgebungen in Gasbohrlochern. Außerdem fördert das stabbasierte Design (aufgrund des fehlenden Grundrohrs) eine bessere hydraulische Effizienz, indem es die Fließgeschwindigkeit reduziert und Hotspots durch eine Vergrößerung der gesamten Einlassfläche für die Strömung eliminiert.

Plasma-Sprühbeschichtungen

Das thermische Spritzen wird zur Beschichtung der Drahtkeilsiebe auf Stabbasis eingesetzt, wobei ein heißer Plasmastrahl verwendet wird, um pulverförmige Materialien zu schmelzen und auf eine feste Oberfläche aufzutragen. Die geschmolzenen Partikel härten dann auf der Oberfläche aus und bilden eine harte Beschichtung mit geringer Porosität. Zwischen den Grundwerkstoffen und der Beschichtung findet keine chemische Reaktion statt, da die Haftung der Beschichtung rein mechanisch ist.

Um ein mit Draht umwickeltes Sieb mit Plasmaspritzschichten zu beschichten, sind mehrere Schritte erforderlich. Zunächst wird das Sieb sandgestrahlt, um eine definierte Oberflächenrauigkeit zu erzielen, mit dem Ziel, die mechanische Verbindung zwischen den beiden Verbundwerkstoffen zu verbessern. Anschließend wird durch thermisches Spritzen eine dünne Haftschrift aufgebracht, die als Zwischenschicht dient, um die Haftung der Funktionsschicht weiter zu verbessern. Die erosionsbeständige Hauptschicht, die aus einer Keramik- oder Hartmetallamalgalierung besteht, wird dann mit demselben thermischen Spritzverfahren aufgebracht. Zum Schluss wird eine flüssige Versiegelung aufgetragen, die anschließend durch thermische Behandlung gehärtet wird, um die Poren der gespritzten Schichten zu füllen und so die Korrosionsbeständigkeit des Verbundwerkstoffs enorm zu verbessern. Abb. 1 zeigt schematisch die Beschichtungsschritte, Schichten und das Endprodukt (Ochmann et al., 2021).

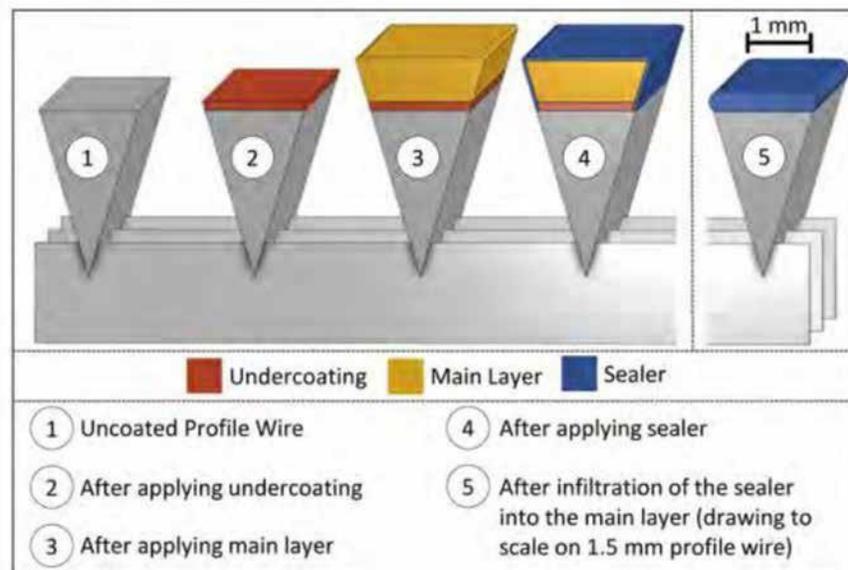


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Beschichtungsschritte, der Beschichtungsschichten und des Endprodukts.

Die Beschichtung verändert die Geometrie der Schlitze, da sie die Schlitzgröße leicht verringert und eine weniger scharfe Schlitzöffnung erzeugt. Die gewünschten Schlitzbreiten der Endprodukte werden also durch Anpassung der genauen Prozessparameter des thermischen Spritzens hergestellt, wobei die richtige Ausgangsschlitzbreite der drahtumwickelten Siebe gewählt wird.

Zur Durchführung von Erosionstests im Labor als Teil des Technologieauswahlverfahrens wurde vom Servicepartner eine Testanlage gebaut, die aus einer Strömungsschleife besteht, die zur Simulation beschleunigter Erosionsbedingungen im Bohrloch mit einer Kombination aus hoher Durchflussrate und volumengesteuerten Partikeln, die in einem Beschleunigungsrohr zusammenfließen, entwickelt wurde. Die Siebe wurden 60 Stunden lang bei einer maximalen Geschwindigkeit von 18 m/s im Flüssigkeits-Erosionstest und 48 Stunden lang bei einer maximalen Geschwindigkeit von 80 m/s im Gas-Erosionstest getestet. Es wurden strenge Analysen durchgeführt, um die Funktionstüchtigkeit zu überprüfen und die Leistungsvorhersage vor dem tatsächlichen Einsatz vor Ort zu bestätigen. Eine genaue Inspektion beider Erosionstests zeigte, dass es bei den beschichteten Siebmustern keine signifikante Abnutzung oder Schlitzvergrößerung gab, verglichen mit den unbeschichteten Siebmustern, die eine starke Erosion mit einer Schlitzvergrößerung aufwiesen, die an einigen Stellen mehr als doppelt so groß war. Die beschichteten Siebmuster weisen vor und nach den Erosionstests die gleichen Sandrückhaltefähigkeiten auf, während das unbeschichtete Siebmuster, das den gleichen Bedingungen ausgesetzt war, seine Sandrückhaltefähigkeit verlor.

Screening und Auswahl von Kandidaten für Pilotversuche

Feld A befindet sich etwa 140 km nordwestlich von Bintulu, Sarawak in Malaysia. Im Zuge der Explorationsarbeiten in den Jahren 1969 und 1970 wurde es zunächst als gestapeltes klastisches Reservoir mit einer Fläche von etwa 600 km² entdeckt. Das Feld besteht aus einer abwechselnden Sand-Schiefer-Sequenz mit gasführenden Intervallen, in denen das Gas in zwei Echolon-Antiklinen mit NE-SW-Faltenachsen eingeschlossen ist. Der Antriebsmechanismus für Feld A ist ein Erschöpfungsantrieb mit schwacher Aquiferunterstützung. Die Verunreinigung ist gering, da das Feld seit der ersten Gasproduktion weniger als 2 Mol-% CO₂ und 0,5 ppm H₂S-Gehalt produziert hat. [Abbildung 2](#) zeigt die Lage und den geologischen Querschnitt der Lagerstättenstruktur von Feld A.

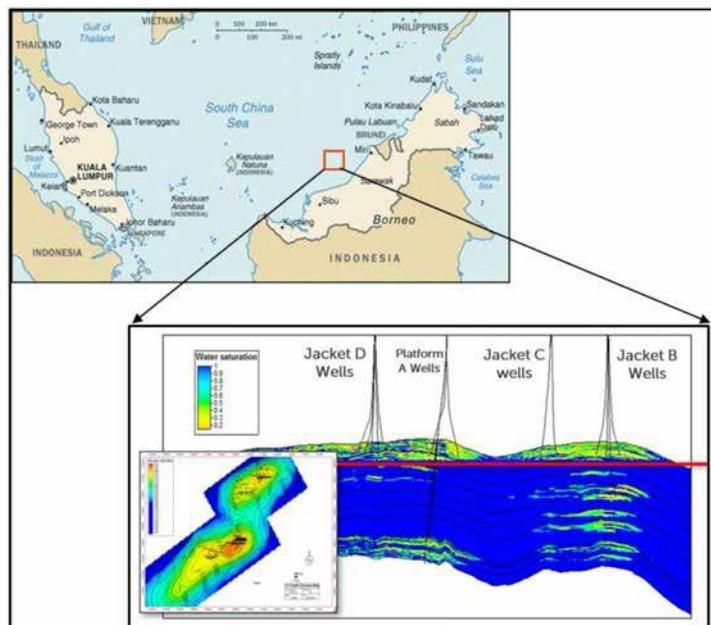


Abbildung 2 - Lage und geologischer Querschnitt der Lagerstättenstruktur für Feld A

Das Bohrloch X wurde als einer der Pilotkandidaten für die keramikbeschichteten Stabsiebe mit Drahtumwicklung ausgewählt. Bei der Bohrung X handelt es sich um eine trockene Gasbohrung mit einem technischen Potenzial von etwa 20 MMscf/d, die jedoch drei Jahre lang wegen Sandproduktion und des Fehlens einer ausgereiften erosionsbeständigen Siebtechnik für die Reaktivierung der Bohrung stillgelegt war. Das Bohrloch wurde zunächst im Juli 2005 mit einer horizontalen Open-Hole-Gravel-Packung (OHGP) fertiggestellt, die erste Gasproduktion erfolgte im Mai 2006. Nach jahrelanger Förderung unter Erschöpfungsbedingungen sank der Lagerstättendruck jedoch erheblich. Die Verringerung des Lagerstättendrucks führte zu Veränderungen der Gesteinsspannungen und verringerte den kritischen Absenkdruck. Probleme bei der Sandproduktion wurden offensichtlich und entwickelten sich zu einer der größten Herausforderungen für das Feldmanagement. Das Bohrloch X litt unter dem Versagen der primären Sandkontrolle im Bohrloch, wobei eine beträchtliche Menge Sand (mit Stützmitteln) produziert und im Bohrlochkopf-Desander-Akkumulator (2 Fässer) aufgefangen wurde, bevor dieser im August 2018 geschlossen wurde. [Abbildung 3](#) zeigt den Sand, der nach der Spülung des Bohrlochkopf-Entsanders im August 2018 gesammelt wurde. Der keramikbeschichtete, stangenbasierte, drahtumwickelte Schirm (2 Muffen von je 15 Fuß) wurde dann Mitte September 2020 mit einem Slickline-Paket erfolgreich installiert und der Schirm wurde mit einem nipless Plug über dem Perforationsintervall aufgehängt.



Abbildung 3: Bei der Spülung des Desanders im August 2018 wurde eine beträchtliche Menge Sand mit Stützmitteln (2 Fässer) gesammelt.

Zum besseren Verständnis und zur Definition der Betriebsgrenze von keramikbeschichteten Drahtsieben wurden eine Studie zur Erosionsgeschwindigkeit im Bohrloch und eine Modellierung durchgeführt. Sowohl die ringförmige Geschwindigkeit (zwischen den Sieben und dem Rohr) als auch die

Geschwindigkeit innerhalb des Grundrohrs der Siebe wurden untersucht und geprüft. Die Ringgeschwindigkeit wurde anhand der äquivalenten hydraulischen Fläche und der Korrelationen der Mehrphasenströmung berechnet. Es wurde erwartet, dass die Ringgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit im Grundrohr hoch sein würden, da Bohrloch X mit einer hohen Gasrate produzierte. Daher wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Auswirkungen der Gasdurchflussrate auf die Geschwindigkeit zu untersuchen. Zur Begrenzung der Ringraumgeschwindigkeit auf 40 ft/s

(auf der Grundlage interner Richtlinien und Empfehlungen) und der Erosionsrate auf der Grundlage der Auslegungsgrenze des Siebs wurde das Bohrloch bei einer Gasdurchflussrate von 10 MMscf/d verschlossen. Die Siebe werden nach dem dreimonatigen Pilotversuch entnommen und ersetzt. Um die Erosion der Siebe zu untersuchen, wird eine Abrissuntersuchung durchgeführt.

Pilotversuch eines stäbchenbasierten Spaltsiebs mit

Plasmaspritzbeschichtung Nach der erfolgreichen Installation des Siebs über die Slickline wurde ein temporäres Oberflächensicherungspaket an die Küste verlegt, um Barrieren zu errichten und die Produktionsanlagen für eine eventuelle Sandproduktion zu sichern, da der erste Sand In der Anfangsphase des Rückflusses aus dem Bohrloch wurde ein Aufschwemmen erwartet. Der Dual-Pot-Sandfilter (DPSF) wurde an der stromabwärts des bestehenden Bohrlochkopf-Entsanders an der Fließleitung unter Verwendung einer provisorischen Verrohrung. Da der Bohrlochkopf-Entsander so ausgelegt ist, dass er den Sand bei einer Mindestdurchflussrate von 10 MMscf/d effektiv bis zu einer Partikelgröße von 10 bis 20 Mikron filtern kann, wird ein mit 50-Mikron-Filtern ausgestatteter Doppelpot-Sandfilter als sekundäre Barriere für die Entfernung des geförderten Sandes während der allmählichen Bean-up-Phase dienen ([Abbildung 4](#)).



Abbildung 4: Der Sandfilter mit zwei Töpfen wurde mobilisiert und mit Hilfe von temporären Rohrleitungen als Teil des temporären Oberflächen-Sicherungspakets während des anfänglichen Bohrloch-Flusses an der Flussleitung angeschlossen.

Um die Sandproduktion sofort zu erkennen, wurde die Signalantwort der vorhandenen permanenten akustischen Sandsensoren genau überwacht. Darüber hinaus wurde ein Online-Sandprobennehmer vor Ort eingesetzt, um die Sanderkennung und -quantifizierung zu ermöglichen, da sich die Technologie zur Entnahme von Sandproben in Gasbohrungen in den letzten Jahren weiterentwickelt hat. Der Online-Sandprobennehmer wurde zur Entnahme von physischen Sandproben aus der Fließleitung durch Anschluss an die Probenahmestelle eingesetzt. [Abbildung 5](#) zeigt den Aufbau des Online-Sandprobennehmers (OSS) im Bohrlochkopfbereich (stromaufwärts des Bohrlochkopf-Desanders) mit Anschluss an die Probenahmestelle.



Abbildung 5 - Einrichtung eines Online-Sandprobennehmers (OSS) im Bohrlochkopfbereich (stromaufwärts des Bohrlochkopf-Desanders) zur Entnahme physischer Sandproben aus der Fließleitung durch Anschluss an die Probenahmestelle.

Der Probenehmer wurde zunächst an die Probenahmestelle stromabwärts der Doppeltopf-Sandfilter angeschlossen, um sicherzustellen, dass keine Sandverschleppung stromabwärts zur Produktionsanlage stattfindet. Er wurde dann stromaufwärts des Entsanders am Bohrlochkopf verlegt, um alle Sandkörner aufzufangen, die größer sind als die Größe des Siebschlitzes während der Entleerungssequenz des Bohrlochs, um die Effizienz des Bohrlochsiebs bei der Kontrolle der Sandproduktion im Bohrloch weiter zu bewerten. [Abbildung 6](#) zeigt ein schematisches Diagramm des Flowback-Setups für Bohrloch X, das einen Dual-Pot-Sandfilter und einen Online-Sandprobenehmer als Teil des temporären Oberflächen-Sicherungs Pakets umfasst.

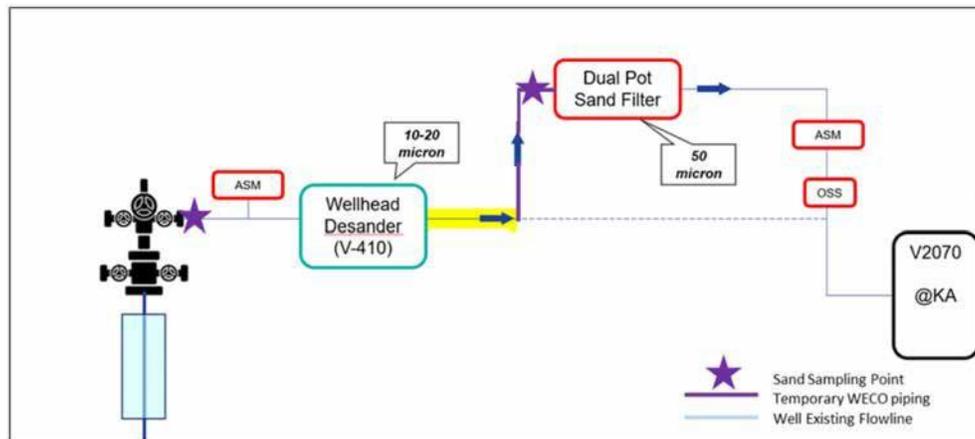


Abbildung 6 - Schematisches Diagramm der Bohrlochrückflusseinrichtung mit Dual-Pot-Sandfilter (DPSF), Online-Sandprobenehmer (OSS) und akustischem Sandmonitoring (ASM) zur Sicherung der oberirdischen Anlagen.

Das Bohrloch X wurde am ^{26.} Juli 2021 bei der kleinsten Öffnungsgröße des Durchflussregelventils (FCV) für einen Durchfluss von 7 MMscf/d geöffnet und drei Tage lang genau auf Sandproduktion überwacht. In der Anfangsphase des Rückflusses wurde nur minimaler Sand aus dem Doppeltopf-Sandfilter zurückgewonnen, da möglicherweise noch Reste von Sand im Bohrloch oder in der Förderleitung vorhanden waren. Bohrloch X wurde dann schrittweise hochgefahren, um die Zielrate von 10 MMscf/d zu erreichen. In der folgenden [Tabelle 1](#) sind die FCV-Größe, die Gasdurchflussrate, die am DPSF aufgefangene Sandmenge und die geschätzte Sandmenge während des gesamten Überwachungszeitraums aufgeführt.

Tabelle 1-FCV-Größe, Gasdurchflussrate, am DPSF gesammelte Sandmenge und geschätzte Sandmenge während des einwöchigen Überwachungszeitraums.

Datum	Maximale FCV-Größe (%)	Gasdurchsatz (MMscf/d)	Bei DPSF gesammelter Sand (kg)	Geschätzte Sandmenge (ppMMscf)
26-Jul	2.5	7	0.02	0.038
27-Jul	2.7	7	0.02	0.029
28-Jul	2.9	7	0.01	0.012
29-Jul	6.7	8	0.02	0.026
31-Jul	12.8	10	0.03	0.035
1-Aug	12.8	10	0.01	0.015

Die Sandproben wurden mit dem Online-Sandprobenehmer entnommen, der sich stromaufwärts des Entsanders am Bohrlochkopf befindet. Die gesammelten Sandproben ([Abbildung 7](#)) wurden zur Laserpartikelgrößenanalyse (LPSA) an laborarty geschickt, um die Partikelgrößenverteilung (PSD) zu bestimmen und die Filtereffizienz und -integrität des Filters zu ermitteln. Die PSD der gesammelten

Sandproben zeigte, dass das Bohrlchsieb als wirksame Sandkontrolle funktioniert, da der an der Oberfläche produzierte Sand innerhalb der Größentoleranz des Siebschlitzes lag. Die Flowback-Kampagne mit temporärem Oberflächen-Sicherungspaket wurde nach einer einwöchigen Überwachungsphase abgeschlossen. Das Bohrloch X wurde erst dann für den Durchfluss in die Produktionsanlage durch den permanenten Bohrlochkopf-Desander geöffnet, nachdem das Doppeltopf-Sandfilterpaket abgebaut und die Durchflussleitung des Bohrlochs wiederhergestellt worden war. Der Rückbau der Siebe ist für die Zeit nach

drei Monate Pilotversuch. Es wird eine Abrissuntersuchung durchgeführt, um etwaige Erosionen festzustellen, die die Wirksamkeit des Siebs beeinträchtigen könnten.

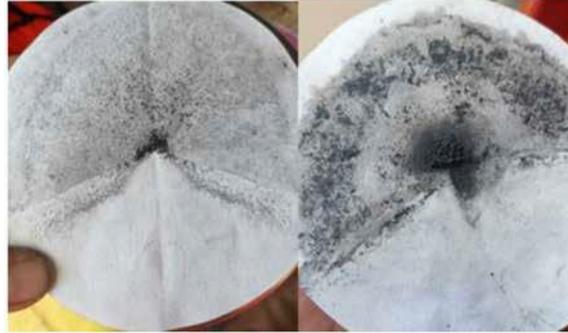


Abbildung 7: Sandprobe aus der Online-Sandprobe (OSS), die sich stromaufwärts des Entsanders am Bohrlochkopf befindet, nachdem sie abgelassen und mit Filterpapier gefiltert wurde.

Schlussfolgerung und Empfehlung

1. Keramisch beschichtete (plasmagespritzte) stabförmige Siebe mit Drahtumwicklung bieten eine bessere Erosionsbeständigkeit in stark erosiven Umgebungen in Gasbohrlöchern. Seine Anwendung hat sich nach dem weltweit ersten Pilotversuch als erfolgreich erwiesen.
2. In dem Szenario, in dem die Siebe nur begrenzt hoch über dem Perforationsintervall installiert werden können, wird dringend empfohlen, bei der künftigen Anwendung von Sandfiltern mit Durchgangsrohren Studien über die Geschwindigkeit im Bohrloch (Ringraum und Grundrohr) durchzuführen, um sicherzustellen, dass die Erosionsgeschwindigkeit innerhalb der zulässigen Grenzen liegt. Eine solche Studie wird dazu beitragen, die maximale Durchflussrate auf der Grundlage der Auslegungsgrenze des Siebs zu ermitteln.
3. Ein temporäres Oberflächensicherungspaket, das aus einem Doppeltopf-Sandfilter als Sandentfernungssystem zusammen mit Sandüberwachungsgeräten wie akustischen Sandsensoren und Online-Sandprobennehmern besteht, wird während des anfänglichen Bohrlochrückflusses dringend empfohlen, um die Produktionsanlage vor anfänglichen Sandaufschwemmungen während des Entladens zu schützen und angemessene Proben für die Bewertung der Siebfiltrationseffizienz zu sammeln.
4. Eine umsichtige Vorgehensweise bei der Öffnung des Bohrlochs und der Bean-up-Prozedur ist entscheidend, um Sandstöße zu vermeiden, die die Integrität der Siebe gefährden und zum Ausfall der Siebe führen können. Bei Bohrlöchern mit Durchgangsrohrsieben sollte ausreichend Zeit gegeben werden, um mit einer geringeren Rate und einer geringeren Drosselgröße zu fließen, bevor das Bean-up durchgeführt wird, um die Zielrate zu erreichen.
5. Keramisch beschichtete (plasmagespritzte) stäbchenförmige, drahtumwickelte Siebe werden nach dreimonatiger Überwachung entnommen. Es wird eine Abrissinspektion durchgeführt, um etwaige Erosionsmuster zu erkennen, die zu einer weiteren Verbesserung der Konstruktion führen können. Keramisch beschichtete Drahtsiebe werden in zwei weiteren Bohrlochern desselben Feldes installiert, um im Rahmen des Pilotprogramms die Betriebsgrenzen und die Langlebigkeit der Siebe zu ermitteln.

Danksagung

Die Autoren danken der Geschäftsführung von Petroliaam National Berhad (PETRONAS), PETRONAS Carigali Sdn. Bhd, NeuDimension Sdn. Bhd, Con-slot SCREENS GmbH, MUW Screentec GmbH und der TU Bergakademie Freiberg für die Genehmigung zur Veröffentlichung dieser Arbeit. Besonderer Dank gilt den Mitgliedern des Projektteams für ihren vollen Einsatz und ihre Unterstützung bei diesem

Projekt.

Nomenklatur

ASM =Akustische Sandüberwachung

CO₂ =Kohlenstoffdioxid

DPSF =Doppeltopf-Sandfilter

FCV =Durchflussregelventil
 ft/s =Fuß/Sekunde
 H₂ S =Schwefelwasserstoff
 HSE =Gesundheit, Sicherheit und Umwelt
 IOR =Verbesserte Ölgewinnung
 LPSA =Laser-Partikelgrößenanalyse
 m/s = Meter/Sekunde
 OHGP =Open-hole gravel pack
 ppm =Parts per million
 ppMMscf =Pfund pro Million Standardkubikfuß PSD
 =Partikelgrößenverteilung
 scfd =Standard-Kubikfuß pro Tag
 SRT =Sandretentionstest

Referenzen

- Bruno, M. S., Bovberg, C. A. & Meyer, R. F. 1996. Einige Einflüsse der Sättigung und des Flüssigkeitsstroms auf die Sandproduktion: Labor- und Diskrete-Elemente-Modell-Untersuchung. SPE 36534-MS. Vortrag auf der SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA.
- Ochmann L, Amro MM, Gronde B, Fischer G, Weber S und Dirk M. 2021. Entwicklung von plasmagespritzten Beschichtungen zur Verbesserung der Erosionsbeständigkeit von drahtumwickelten Sieben. IPTC-21158-MS
- Sidek, S., Hui Lian, K.G., Ching, Y.B., Trjanganung, K., Madon, B. und Yusop, Z., PETRONAS Carigali Sdn. Bhd. Gundemoni, B.R., Jackson, R. und Barth, P., 3M Technical Ceramics. 2017. Erste erfolgreiche Anwendung eines keramischen Sandsiebs in einem reifenden Ölfeld, Offshore Ostmalaysia. SPE-22792-MS.
- Veeken, C.A.M., Davies, D.R., Kenter, C.J. und Kooijman, A.P., Shell Research B.V. 1991. Sand Production Prediction Review: Developing an Integrated Approach. SPE-22792-MS. Präsentiert auf der 66. jährlichen technischen Konferenz und Ausstellung der SPE.