



Havindustritilsynet

Sement-bond logging, evaluering av skumsement

Report (Norwegian)

360NOR-PRJ-338-24 / 0

STUDY REPORT

Havtil – Well Integrity Logging Foam Cement 360NOR-PRJ-338-24

Study Report Information:

Table 1 Study Report Information

DATE	15. MAY, 2024
Our reference	360NOR-PRJ-338-24
Revision	Draft document structure
Author	Summer Gad, THREE60 Energy Norway
Reviewed	Matteo Loizzo, THREE60 Energy Norway
Recipient	Tor-Inge Handeland, HAVTIL

Revision History

Table 2 Revision History

PROPOSAL REVISION	REVISION DATE	DESCRIPTION OF CHANGE
0.0	15.5.2024	Draft document structure
0.1	27.10.2024	Draft Report
0.2	18.11.2024	Updated after a first round of comments
0.3	27.11.2024	Updated after further comments
1.0	10.12.2024	First release after stakeholder comments
1.1(Norwegian only)	25.02.2025	Replaced skummetsement with skum sement

Disclaimer: *The data forming the basis of this study has been collected through the joint effort of the Authors and THREE60 Energy Norway AS. The generic information in this report is the property of THREE60 Energy Norway and may not be reproduced or distributed in any matter without written permission. The Authors and THREE60 Energy Norway have gathered the data to their best knowledge, ability and in good faith, from sources believed to be reliable and accurate. The Authors and THREE60 Energy Norway have attempted to ensure the accuracy of the data, however, we make no representations or warranties as to the accuracy of completeness of the information reported. The Authors and THREE60 Energy Norway assume no liability or responsibility for any errors or omissions in the information or for any loss or damage resulting from the use of any information contained within this report.*



Innholdsfortegnelse

1	Sammendrag.....	1
2	Oppsummering.....	2
3	Innledning.....	4
3.1	Omfang og målsettinger	4
3.2	Tidslinje.....	5
4	Skumsement	6
4.1	Skumsement som materiale.....	6
4.2	Skumsementapplikasjoner	8
4.3	Akustisk logging av skumsement	10
4.4	Alternative teknikker for å kvalifisere skumsement.....	14
5	Global litteraturgjennomgang av skumsemen	16
6	Skumsement i NCS.....	18
6.1	Applikasjoner i NCS	18
6.2	Logging og barrierekvalifisering på NCS	18
7	Workshop presentasjoner og referater	32
7.1	Introduksjon	32
7.2	Presentasjoner	32
7.3	Breakout Sessions	35
7.4	Konklusjon.....	37
8	Anbefalinger og "Best Practices"	38
9	Referanser	39
10	Nomenklatur	40
11	Kommentarer fra klient.....	41



Subsurface



Wells



Engineering



Construction &
Commissioning



Operations

List of Figures

4.1	Sonic verktøyrespons	10
4.2	Ultralyde prinsipper og målinger	11
4.3	Akustiske egenskaper til forskjellige sementmaterialer	13
4.4	Akustiske egenskaper til forskjellige homogene væsker	14
5.1	Sementlogg respons for brønner 186 og 214	16
5.2	Sementlogg respons for brønner SW 80, 176 og 203	17
6.1	Prediktert responslogg for skumsement	21
6.2	Brønn 2 designet og simulert med skummet slurry-kvalitet	22
6.3	Brønn 3 designet og simulert med skummet slurry-kvalitet	23
6.4	Brønn 1 designet og simulert med slurry-tetthet.	24
6.5	Brønn 1 andel av forskjellige materialmodeller mot dybde (i meter).	25
6.6	Brønn 3 modellering av ultrasoniske målinger.	26
6.7	Brønn 1 VM-algoritmeresultater for mikroannulusåpning og andel faststoff/gass	29
6.8	Brønn 2 Mikroannulusåpning og andel faststoff/gass	31



Subsurface



Wells



Engineering



Construction &
Commissioning



Operations

List of Tables

3.1 Studietidslinje

5



Subsurface



Wells



Engineering



Construction &
Commissioning



Operations

1 Sammendrag

Det norske Havindustritilsynet (Havtil), ba Three60 gjennomføre en studie om bruk av sementevalueringslogging for å verifisere skum sement som barriereelement. Prosjektet startet 11. april 2024, og det ble holdt en workshop 19. september for å diskutere utfordringer og bli enige om veien videre.

Vi innhentet den begrensede dokumentasjonen som finnes i litteraturen og supplerte den med repossesserte sementevalueringslogger fra Norge. Under workshopen ble mer enn to tiårs erfaring delt av to operatører og tre serviceselskaper, som støttet opp om fire hovedkonklusjoner:

1. Aktivitetsnivået for bruk av skum sement forventes å øke i Norge, drevet av fordelene ved denne sementtypen og evnen til å implementere teknologien effektivt, trygt og rasjonelt. Spesielt ble styrkingen av alternative leverandører og forbedringen av programvare og prosedyrer for sementevaluering de siste fem årene trukket fram som viktige faktorer.
2. Siden skum sement først ble tatt i bruk i Norge i 2000, har den blitt brukt i over 500 produksjonsstrenger, noe som gjenspeiler dens pålitelighet og egnethet i denne regionen. Erfaring har vist at til tross for forekomsten av væske-mikroannuli – som er sammenlignbare med dem i vanlig (uskummet) sement – finnes det ikke bevis for langsomme gasslekkasjer gjennom disse feilene. Selv om sammenhengende vannlag kan fungere som kanaler for gassbobler og resultere i en svært lav lekkasjerate (rundt 1 tonn per år), tyder mangelen på faktiske lekkasjebevis på at vannlaget loggene viser, er innkapslet i skum sement.
3. Den faste loggterskelen som benyttes av enkelte serviceselskaper og operatører kan være misvisende, gitt mangelen på tegn til lekkasje gjennom skum sement. Problemene som oppstår under kvalifisering av ringromsment kan derfor skyldes urealistiske forventninger, snarere enn faktiske isolasjonsproblemer eller uvanlig oppførsel av skum sement. Standardisering av tolkningsprotokoller tilpasset skum sement er avgjørende for å overvinne denne utfordringen.
4. Samarbeidsprosjekter mellom industri og academia pågår for å studere skum sement over tid, inkludert eksperimenter som kombinerer gjennomstrømming (flooding) og knusing av sement, samt videreutvikling av numeriske (CFD) modeller for å simulere plassering av skum sementslurry.



2 Oppsummering

Denne rapporten beskriver en studie av skum sement som ble gjennomført av Three60 på vegne av Det Norske Havindustritilsynet (Havtil).

Prosjektet startet 11. april 2024 og var delt inn i to faser:

1. En innledende gjennomgang av skum sement som materiale, med detaljer om: bruksområder og begrensninger, plassering og barrierekvalifisering, samt gjeldende industripraksis i Norge og resten av verden.
2. En workshop avholdt 19. september, hvor operatører og serviceselskaper på norsk sokkel delte innsikt både rundt tekniske aspekter og markedsutsikter.

Litteraturgjennomgangen viste begrenset dokumentasjon på kvalifisering av skum sement som barriere: Bare fire SPE-publikasjoner diskuterer dette i særlig detalj, hvorav én fra ConocoPhillips i Norge. En gjennomgang av forskningen til Barbara Kutckos gruppe i NETL (National Energy Technology Lab, USA) bekreftet på samme måte at svært lite av resultatene deres omhandlet barrierekvalifisering: Hovedfokuset var forebygging av grunn gass-migrasjon i Mexicogolfen, hvor kvalitet på sementen ikke trenger å bli verifisert.

skum sement byr på flere fordeler for to hovedbruksområder:

- **Forebygging av migrasjon av grunn gass og vann:**

skum sement har en kompressibilitet som kompenserer for at sement krymper tidlig i herdefasen, og forhindrer dermed reduksjon i det hydrostatiske trykket. Denne anvendelsen oppstod i Mexicogolfen på begynnelsen av 2000-tallet og har også vært forsøkt i Norge. skum sement bidrar til brønnmekanisk integritet ved å redusere faren for «washout», og fungerer som et barriereelement i ringrommet mot grunn gass (og saltvann). Den er imidlertid ikke en del av barrieresystemet mot reservoarsonen og blir derfor ikke logget.

- **Reservoarisolering og barrierepålidelighet:**

skum sement er godt egnet til å isolere reservoaret og danne pålitelige barriereelementer, spesielt når reservoartrykket er redusert og borevinduet er smalt:

1. Densiteten kan skreddersys til å være nær boreslammets, noe som reduserer ECD (Equivalent Circulating Density) og dermed også forebygger tap.
2. Kompressibiliteten forhindrer væskemigrasjon, akkurat som i grunne gassseksjoner. Den øker også fortrenings effektiviteten ved at skummet slurry kan komprimeres og ekspandere når den fortrenses gjennom ringrommet.
3. skum sement har dessuten gunstige mekaniske egenskaper, blant annet høyere duktilitet og dermed bedre motstandsdyktighet mot splintring ved perforering. Selv om dette neppe har stor betydning på den 30-meterskalaen som gjelder for barriereelementer, er det en klar fordel for reservoarisolering.

På grunn av disse fordelene gjennomfører en spesifikk operatør i Norge de fleste barrierejobbene sine med skum av relativt lav kvalitet (rundt 10 % nitrogengass). skum sement har likevel flere utfordringer:

- **Kompleks design:** Å simulere plasseringen av komprimerbare væsker er et relativt nytt område, og viskositeten til skum sement er fortsatt dårlig forstått – og kan ikke måles i laboratoriet. I tillegg kan surfaktanten som stabiliserer skummet brytes ned av oljebasert boreslam, så man må unngå slik forurensning (for eksempel



ved å bruke spacere).

- **Begrensninger i laboratorietester:** Standardtester som fortykningstid og utvikling av trykkfasthet er vanskelig å gjenskape i laboratoriet og krever en representativ prøve av skummet slurry, noe som er utfordrende å oppnå under kontrollerte forhold.
- **Operasjonell kompleksitet:** Håndtering av nitrogentanker krever ekstra plass på dekk, og skumdannelsen må overvåkes nøye. Dersom vi forventer retur av væske eller gass, kan skumets kompressibilitet dessuten trigge varsler for brønnkontroll hvis returmengdene varierer under jobben. Av den grunn er grundige forberedelser, tydelig kommunikasjon og tilstrekkelig kompetanse hos skumingeniøren svært viktig for vellykket gjennomføring.
- **Loggtolkning og plasseringsverifisering:** Reduserte tetthetsforskjeller mellom boreslam og sement, kombinert med usikkerhet rundt slurryviskositet og ofte høy avvinkling på produksjonsstrenger, gir utfordringer når man skal sammenligne simuleringer av fortrenningsprosessen med faktiske data fra sementjobben. Noen operatører har brukt dreiemoment når foringsrør (liners) roteres for å oppdage skummet sementslurry i ringrommet, og sammen med returrater og overflatetrykk har det bidratt til å estimere sementdekning.
- **Variabel loggrespons:** De akustiske egenskapene til skum sement kan være lave like etter ferdigstillelse, noe som gjør den vanskelig å skille fra væsker, særlig ved væskefylte mikroannuli. Egenskapene til skum sement forbedres over tid, noe som reiser spørsmål om når det er mest hensiktsmessig å logge.

Kort barrierelengde etter plassering av skum sement, og tolkningsutfordringer i loggene, var viktige motivasjoner for denne studien.

Under workshopen ble det delt mer enn to tiår med erfaring fra to operatører og tre serviceselskaper, noe som støttet opp om fire hovedkonklusjoner:

1. **Aktivitetsnivået for skum sement forventes å øke i Norge**, drevet av fordelene ved denne sementtypen og av forbedret effektivitet, sikkerhet og gjennomføringsevne. Spesielt ble veksten i alternative leverandører og forbedringene i sementevalueringsprogramvare og protokoller de siste fem årene trukket frem som viktige faktorer.
2. **Siden skum sement først ble tatt i bruk i Norge i 2000**, har den blitt brukt i over 500 produksjonsstrenger. Det gjenspeiler sementens pålitelighet og egnethet i denne regionen. Til tross for at det kan oppstå væskefylte mikroannuli (tilsvarende dem man ser i vanlig sement), finnes det ikke bevis for sakte gasslekkasjer gjennom disse. Selv om forbundne vannlag noen ganger kan lede gassbobler i svært lave rater (rundt 1 tonn per år), tyder mangel på bevis på at vannlagene som observeres i loggene, er innkapslet i skum sement.
3. **Bekymringene rundt væskefylte mikroannuli** og mulig innvirkning på sakte gasslekkasjer med skum sement peker mot at enkelte operatørers og serviceselskapers faste loggterskel kan være misvisende. Å kvalifisere ringromssegmenten kan dermed være et spørsmål om urealistiske forventninger, snarere enn reelle isolasjonsproblemer eller uvanlig oppførsel fra skum sement. Standardisering av tolkningsprotokoller tilpasset skum sement er avgjørende for å løse dette.
4. **Forskning i samarbeid mellom industri og akademia pågår**, for å studere skum sement over tid, blant annet med forsøk på gjennomstrømning (flooding) og knusing av sement, samt utvikling av numeriske (CFD) modeller for å simulere plassering av skummet sementslurry.



3 Innledning

3.1 Omfang og målsettinger

Det Norske Havindustriilsynet, Havtil, forespurte Three60 om å gjennomføre en studie på analyse og evaluering av skumsement båndlogging. Studien ble gjennomført i tre hovedfaser:

Fase én: Samle informasjon om skumsementering:

- Anvendelser og begrensninger
- Plassering og barriere kvalifikasjon
- Nåværende beste praksis i industrien

Fase to: Tilrettelegge for en workshop sammen med Havtil, med operatører fra NCS og tjenesteselskaper for å få innsikt i både tekniske aspekter og markedsutsikter.

Fase tre: Dokumentere og rapportere konklusjonene og anbefalingene.

Målsettinger

Hovedmålet er å samle og dele informasjon om skumsementeringspraksis, spesifikt for å verifisere skumsementens effektivitet som et barriereelement. Ved å dele kunnskap og erfaringer fra NCS, har Havtil som mål å styrke industriens tillit til bruk av skumsement for robuste brønnbarrierer.

Bakgrunn og begrunnelse

Skumsement, som i økende grad brukes på NCS (spesielt i depleterte reservoarer) presenterer utfordringer i tolkning av logging, på grunn av reduksjon i akustisk impedans som følge av nitrogenblanding. Denne studien undersøker metoder for å tolke skumsementlogger og evaluere påliteligheten som barriere. Studien inkluderer kartlegging av metoder for logging, simuleringsverktøy og alternative tilnærminger brukt for verifisering. I tillegg inkluderer rapporten en gjennomgang av relevante studier, som SPE-publikasjoner, for å gi et grunnlag for beste praksis.

Viktige studietemaer

Studien vil ta opp:

- **Utfordringer i skumsement logging:** Forstå faktorer som gjør tolkning av skumsementlogger komplekst.
- **Logging teknologier og simuleringsverktøy:** Kartlegging av tilgjengelige logging og simuleringsverktøy for verifisering av skumsement på NCS.
- **Erfaringer fra leverandører og operatører:** Dokumentering av erfaringer fra store leverandører og operatører på NCS om skumsementplanlegging, kvalitetssikring og verifisering etter plassering.
- **Industriell litteraturgjennomgang:** Oppsummering av viktige erfaringer fra relevante studier og publikasjoner om skumsement.

Leveranser og Anbefalinger



Denne rapporten skisserer konklusjoner og "best practice" anbefalinger basert på innsamlet informasjon, leverandør- og operatørinnspill, samt relevant litteratur. Denne kunnskapsdelingen er ment å støtte aktører som vurderer skumsement som et alternativ til konvensjonell sement, og bidra til pålitelig verifisering av brønnbarrierer.

3.2 Tidslinje

Table 3.1 Studietidslinje

HVA	NÅR	HVEM
Oppstart	11. April	HAVTIL/THREE60
Datainnsamling	April-Juni	THREE60
Invitasjon til workshop	30. August	HAVTIL/THREE60
Forberedelser til workshop	August-September	THREE60
Workshop	19. september	THREE60
Rapportering QA/QC (Kvalitetssikring / Kvalitetskontroll)	September/Oktober	THREE60
Utkast til rapport	29. Oktober	THREE60
Sluttrapport	Desember	THREE60



4 Skumsement

4.1 Skumsement som materiale

skum sement er en grov dispersjon av en relativt tung basisslurry som bruker gass for å oppnå en betydelig lavere tetthet nede i brønnen; som regel ved å injisere nitrogen. Tettheten til den skummede slurryen justeres ved å variere nitrogengasskonsentrasjonen.

skumsement har vært mye brukt i oljebrønner siden 1979 og fortsetter å utvikle seg.

skum sement er mer økonomisk sammenlignet med lette sementsystemer som benytter mikrosfærer eller cenospheres, og den har et lavere karbonavtrykk enn både vanlig sement og andre lette sementsystemer. Dette innebærer at mindre sement og potensielt færre kjemikalier er nødvendig for å oppnå samme volum av sementslurry til en gitt jobb. Denne reduksjonen i materialer kan også innebære mindre miljøpåvirkning knyttet til produksjon, transport og bruk under sementoperasjoner. Samtidig kreves spesielt utstyr på brønnlokasjonen for å injisere nitrogen. Avhengig av nitrogenprosenten kan det argumenteres for at reduksjonen i forbruk av sement og kjemikalier veies opp av karbonavtrykket til det spesielle skumutstyret.



Viktige fordeler ved bruk av skum sement:

1. Skreddersydd tetthet:

Med et stort spenn i nedihullstetthet fra rundt 0,71 til 1,9 SG, påvirker gassen i liten grad sentrale egenskaper som fortykningstid. Systemets tetthet kan derfor justeres under sementjobben ved ganske enkelt å endre gasskonsentrasjonen. Dette er særlig viktig i formasjoner med lavt bruddpunktstrykk eller i utarmede reservoarer.

2. Bedre soneisolasjon:

Gassboblene i skumstrukturen øker sementens evne til å utvide seg og holde kontakt med brønnveggen, selv i ujevne eller utvaskede seksjoner. Denne egenskapen forbedrer soneisolasjonen og reduserer risikoen for væskekanaler.

3. Forbedret elastisitet og stresstoleranse:

skum sement har høyere elastisitet og bedre evne til å fordele spenninger enn konvensjonell sement. Dette hjelper den med å absorbere og motstå belastninger i brønnboret, slik som termisk ekspansjon eller gjentatte trykksvingninger. Dermed reduseres sjansen for at sementkappen svikter, og den opplever minimal permanent deformasjon.

4. Lavere sannsynlighet for gassstrøm i ringrom:

skum sement kan kontrollere vann- og gassstrømmer ved å opprettholde et høyere poretrykk i sementsøylen mens den går fra flytende til fast fase.

5. Effektiv fortrenkning av boreslam:

Den reduserte tettheten og økte viskositeten til skum sement kan forbedre fortrenkningen av boreslam, noe som gir mer effektiv fjerning av borevæske og bedre binding til fôringsrøret og formasjonen.



Utfordringer ved skum sement:

1. Skumstabilitet:

Å opprettholde skumstabilitet under pumping og herding er avgjørende. Svikt i skumintegriteten kan føre til tetthetsvariasjoner mellom bunnen og toppen av sementsøylen og potensielt skape utfordringer med brønnkontroll hvis designet ikke er tilstrekkelig.

2. Kompleks design og gjennomføring:

Skumming krever nøyaktig kontroll over slurrydesign, gassinjeksjon og forholdene i brønnen. Det krever spesialutstyr og kompetanse for å lykkes. Industrien er dessuten ikke i stand til å forutsi viskositeten til skum sement nøyaktig, blant annet fordi den er svært vanskelig å måle i laboratoriet. Inntil for omtrent 10 år siden fantes det ikke simuleringsverktøy som kunne håndtere pumping av komprimerbare væsker, noe som har gjort design og evaluering av skum sement mer krevende.

3. Logging og evaluering:

Å vurdere integritet og kvalitet på skum sement etter plassering er utfordrende. Tradisjonelle sementbondlogger kan være upålitelige på grunn av skumets heterogene natur, og dette kan føre til feiltolkning av kvaliteten på sementbindingen og effektiviteten av soneisolasjonen. I tillegg er den akustiske oppførselen (inkludert skumstabilitet) og utviklingen over tid fortsatt lite forstått og dokumentert. Avanserte loggingverktøy og tolkningsteknikker er nødvendige for å vurdere skum sement pålitelig, noe som øker kompleksiteten og kostnadene ved brønnevaluering.

4. Større avhengighet av god slamfjerning:

Med olje-/syntetbasert boreslam vil all forurensning føre til at surfaktanten, som stabiliserer gassboblene, tas opp i oljefasen. Dette gjør at boblene mister stabilitet og flytter seg, noe som undergraver hensikten med skum sement. Derfor må kontakt mellom sementslurry og OBM/SBM unngås.

5. Håndtering av skum sement i returstrømmen:

I tilfeller hvor man forventer retur av skum sement på overflaten, byr dette på unike operasjonelle utfordringer og særskilte krav til brønnkontroll. I motsetning til vanlig sement inneholder skum sement nitrogen eller annen gass, som gjør den svært komprimerbar. Denne kompressibiliteten kan føre til uforutsigbare svingninger i returvolumer og -trykk på overflaten, særlig hvis forholdene i brønnen endres under pumping. Når returene varierer uventet, kan det oppstå problemer som trykktopper eller plutselige reduksjoner i returstrømmen, hvilket kan true brønnstabiliteten. Slike svingninger krever ekstra overvåking og tiltak for å sikre brønnintegritet, ettersom selv små trykkendringer kan utgjøre risiko for innstrømming eller tap av væske. Spesielle rutiner for brønnkontroll er ofte nødvendige, inkludert sanntidsovervåking av trykk, gjennomstrømningsrater og returvolumer. På overflaten trengs egnet utstyr som separatorene og gasshåndteringssystemer for å håndtere eventuell utblødning av nitrogen og unngå ukontrollert utslipp av gass. I tillegg er god planlegging, kommunikasjon og koordinasjon mellom personell og skumingeniører avgjørende for å mestre operasjonen og opprettholde kontroll i løpet av sementeringsprosessen.

4.2 Skumsementapplikasjoner

Skummet sementering har vært benyttet i mer enn 40 år i oljebrønner. Opprinnelig ble den hovedsakelig brukt for å løse alvorlige tap av sirkulasjon, særlig i landbrønner, takket være muligheten for å oppnå ultralett sementsystem med tetthet under 1,32 SG og rask utvikling av trykkfasthet.



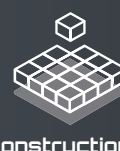
Subsurface



Wells



Engineering



Construction &
Commissioning



Operations

Teknikken ble senere utvidet til å omfatte **squeeze-sementering** av svake soner som ikke kunne bære tradisjonelle sementsøyler.

Deretter ble **skummet sementering** benyttet i situasjoner med grunn gass-/vannstrøm, spesielt under sementering av overflaterør i dypvannsmiljøer, som Mexicogolfen. Bruken ble så videreført til alle offshore-applikasjoner, ikke nødvendigvis begrenset til dypvann, samt til andre regioner i verden.

Videre benyttes skum sement i **HPHT-brønner** (High Pressure High Temperature) på grunn av den høye duktiliteten og robustheten mot temperatur- og trykkendringer gjennom brønnens levetid. Dette forhindrer dannelse av sprekker i sementkappen.

I de senere år har **skummet sementering** vært benyttet i mange krevende situasjoner, blant annet:

Deplerte reservoarer

- Er gunstig i situasjoner med lavt reservoartrykk og høy risiko for tap av sirkulasjon.
- Den reduserte tettheten til skum sement bidrar til å unngå formasjonssvikt, samtidig som den sikrer god soneisolasjon.

Dypvannsbrønner

- Nyttig ved boring i dypvann, der snevre trykkvinduer gjør det utfordrende å balansere formasjonstrykk under sementeringen.
- Skummet sementens skreddersydde tetthet gir bedre kontroll over brønntrykk, reduserer risikoen for brudd og sikrer vellykket sementplassering.
- Forhindrer vannstrøm ved sementering av overflaterør i dypvannsapplikasjoner, som i Mexicogolfen.

Brønner med høy avvinkling og horisontale brønner

- Reduserer den økte risikoen for sementsig eller dårlig fortrengning.
- skum sement har forbedret viskositet og kompressibilitet, noe som forbedrer slamfortrengning og sikrer et jevnt sementlag – avgjørende for brønnintegritet.

Svake eller oppsprukne formasjoner

- Reduserer det hydrostatiske trykket mot formasjonen, slik at risikoen for tap av sirkulasjon og skade på formasjonen minimeres.
- Sikrer vellykket sementering i svake eller naturlig oppsprukne formasjoner på grunn av skummets viskositet og kompressibilitet.

HPHT-brønner

- Benyttes for sin høye duktilitet, som reduserer faren for at sementen sprekker ved temperatur- og/eller trykkendringer gjennom brønnens levetid.



Opprettholdelse av hydrostatisk trykk

- Holder det hydrostatiske trykket over høyttrykkssoner for gass og vann under overgangen fra flytende til fast fase, og forhindrer gass- eller vanninnstrømning i sementsøylen (flow after cementing).

4.3 Akustisk logging av skumsement

4.3.1 Erfaring med ulike verktøy

Sementjobbevaluering gjennom akustisk loggtolkning er den mest brukte og effektive metoden for å evaluere sementjobber generelt. Å tolke den akustiske signalresponsen har som mål å finne en sammenheng mellom dette akustiske signalet og sementen i annulus, og dermed kvalifisere og muligens kvantifisere resultatene i form av sementkvalitet og defektgeometri. Resultatet er vanligvis et visuelt kart som viser om det er hard sement, en flytende blanding eller om det er tomt.

Det er to hovedkategorier av akustiske loggingsverktøy tilgjengelig i dag:

- **Cement Bond Log (CBL):** Måler dempingen av lavfrekvente akustiske (soniske) bølger som passerer gjennom røret og sementen for å vurdere kvaliteten på sementforbindelsen. Selv om det indirekte måler akustisk impedans, fungerer det primært ved å måle tilstedeværelsen av skjæringspunkt mellom foringsrør og det som er i ringrommet, dvs. det oppdager tilstedeværelsen av mikroannuli eller fravær av sement i ringrommet(også kalt "free pipe").
- **Pulse-Echo Ultrasoniske Bildeverktøy (f.eks. USIT):** Bruker høyfrekvente ultrasoniske pulser for å lage høyoppløselige bilder av sementskallet. Disse verktøyene er avhengige av akustiske impedansvariasjoner mellom røret, sementen og formasjonen for å generere bilder.

Fig. 4.1

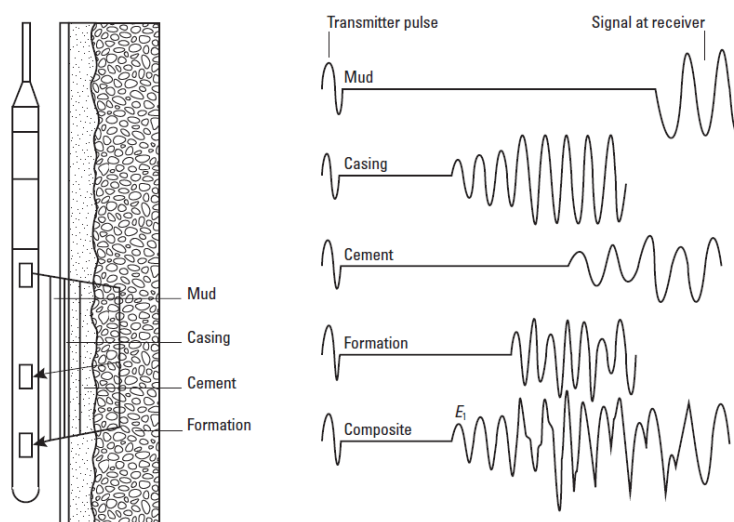


Fig. 4.1 Sonic verktøyrespons
Nelson, E. G. (2006). *Well Cementing, Second Edition*

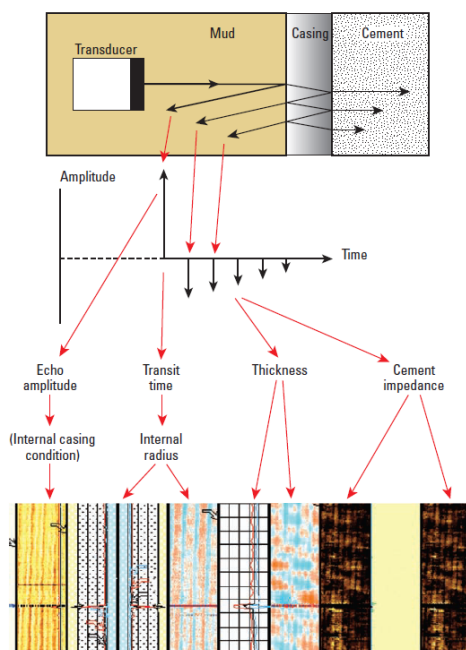


Fig. 4.2 Ultralyde prinsipper og målinger
Nelson, E. G. (2006). *Well Cementing, Second Edition*

Når det gjelder skumsement, som kjennetegnes ved sin lave tetthet og nitrogenkuler, resulterer det i unike akustiske egenskaper:

- **Lav akustisk impedans:** Impedansen kan være lavere enn vann, borevæske eller spacer væske, noen ganger nærmere en flytende blanding.
- **Høy iboende damping:** Akustiske bølger svekkes raskere når de passerer gjennom skumsement sammenlignet med konvensjonell sement.
- **Spredningseffekt:** Gassbobler i sementen forårsaker spredning av akustiske bølger, noe som fører til signaldistorsjon og dermed høy damping.

Dette presenterer en distinkt utfordring i brønnlogging og evaluering, da det er vanskelig å skille sementen fra borevæske, siden impedansen til skumsementen kan være lavere enn både vann, borevæske eller spacer væske.

Imidlertid er det to hovedfremskritt innen ultralyds fysikk som er tilgjengelige i dag og har forbedret evalueringen:

- **Bøyningsbølge-damping:** Ved å legge til en separat emitter og to mottakere, kan dempingen av et casing plate-modus - bøyningsmodusen - bestemmes. Denne nye høyoppløselige ultralydsmålingen, som er oppnådd med SLB Isolation Scanner og Baker Hughes INTeX, er uavhengig av den akustiske impedansen og kan kalibreres før jobben, og gir mer informasjon om annularmaterialer. SLB Isolation Scanner registrerer hele bøyningsbølgetoget, og gjør det mulig å oppdage akustiske reflektorer i annulus og måle annular bølgehastighet direkte.
- **Horisontal skjær-damping:** Denne nye ultralydsmålingen, introdusert av Baker Hughes i INTeX-verktøyet, eksiterer en ren skjærmodus av casingen ved bruk av elektromagnetiske transdusere. Ren skjær betyr at all signaldamping avhenger av binding til et materiale som kan overføre skjærbølger, som sement eller tykk mud.



Avslutningsvis gir valg av loggingverktøy kombinert med avanserte tolkingsmetoder pålitelig evaluering av skumsementkvalitet, og videre forskning og utvikling vil ytterligere forbedre evnen til å nøyaktig vurdere skumsement i brønnhull.

4.3.2 Usikkerheter og Begrensninger

Som forklart i forrige seksjon, har skumsementer spesielt lav impedans og medfører spesielle tolkingsproblemer. En enkel terskeltolkning kan være tvetydig, fordi flere forhold kan føre til at faste materialer har lav impedans når de måles ultralyd. Disse forholdene inkluderer genuin lav-impedans sement (f.eks. skum), dårlig binding (spesielt tørr mikroannulus) og mud kontaminasjon. Mens ren sement har en impedans på rundt 6 MRayl, kan lette sementer ha en impedans så lav som 2,5 MRayl, og dermed overlapper med væskeområdet.

Fig. 4.3 Tabellen illustrerer de akustiske egenskapene på tvers av forskjellige sementtyper, og viser at lavt densitets slurryer med lavt solid-volumfraksjon ofte har svært lav akustisk impedans, som kan variere betydelig de første dagene etter plassering. I kontrast viser høyere densitets slurryer mer stabilitet, med impedans som endres med mindre enn 20% mellom første og syvende dag Fig. 4.4 viser at egenskapene til annular væsker kan være høye nok til å overlapse med skumsementresponsen, noe som ytterligere kompliserer evalueringen.

Sementer modifisert med hule mikrosfærer eller nitrogen har en tendens til å ha eksepsjonelt lav akustisk impedans, noe som noen ganger gjør det utfordrende å skille dem fra vann i akustiske logger. Forbedringer i impedansmålinger observeres ofte over flere dager eller til og med uker ved tidsforsinkelseslogging, trolig på grunn av den naturlige utviklingen av akustiske egenskaper etter hvert som sementen herder.

Disse variasjonene er vanligvis knyttet til en overestimert av sirkulerende temperatur ved bunnhullet, noe som kan føre til overdreven slurryretardasjon. I tillegg kan det å ignorere temperaturvariasjoner langs en utvidet sementkolonne også føre til slike fluktuasjoner i impedansmålinger.



Slurry Type	Density (lbm/gal [kg/m ³])	Time (days)	Sound Velocity in Cement (m/s)	Acoustic Impedance (MRayl)	Change in Acoustic Impedance Over 1 Day (%)
Neat Class G	15.8 [1.89]	1	3,000	5.68	0
		2	3,250	6.16	8
		7	3,400	6.44	13
Class G + latex + hollow silica microspheres	11.2 [1.34]	1	1,650	2.21	0
		2	2,200	2.95	33
		7	2,500	3.36	52
Class G + soluble silicate extender	12.0 [1.44]	1	1,600	2.30	0
		2	1,750	2.52	9
		7	2,000	2.88	25
Class G + hollow silica microspheres + 4% CaCl ₂ (BWOC [†])	12.0 [1.44]	1	2,600	3.74	0
		2	2,800	4.03	8
		7	3,000	4.32	16
Class G + soluble silicate extender	13.3 [1.59]	1	1,750	2.79	0
		2	2,200	3.51	26
		7	2,500	3.99	43
Class G + latex	15.8 [1.89]	1	2,900	5.49	0
		2	3,150	5.97	9
		7	3,350	6.35	16
Class G + 18% NaCl (BWOW [‡])	16.1 [1.93]	1	2,850	5.50	0
		2	3,200	6.18	12
		7	3,375	6.51	18
Class G + hematite weighting agent	19.0 [2.28]	1	3,300	7.59	0
		2	3,400	7.74	2
		7	3,530	8.04	6
36% quality foam	10.0 [1.20]	7	2,300	2.76	— [§]
Conventional low-density system	12.51 [1.50]	7	2,000	3	—
Engineered-particle-size low-density system	10.0 [1.20]	7	2,900	3.48	—
Engineered-particle-size ultralow-density system	8.61 [1.03]	7	2,790	2.87	—

[†] By weight of cement

[‡] By weight of water

[§] Not available.

Fig. 4.3 Akustiske egenskaper til forskjellige sementmaterialer
Nelson, E. G. (2006). *Well Cementing, Second Edition*



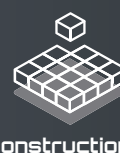
Subsurface



Wells



Engineering



Construction &
Commissioning



Operations

Material	Density (lbm/gal [kg/m ³])	Slowness (μs/ft)	Velocity ft/sec [m/sec]	Acoustic Impedance (MRayl)
Water	8.33 [998]	206	4,860 [1,482]	1.48
Water + 10% NaCl	8.98 [1,075]	193	5,180 [1,580]	1.70
Water + 25% NaCl	9.90 [1,186]	175	5,710 [1,740]	2.06
Water + 36% CaCl ₂	11.3 [1,350]	170	5,870 [1,790]	2.42
Water + KCl	9.18 [1,100]	189	5,280 [1,610]	1.77
Water + 58% CaBr ₂	15.2 [1,824]	179	5,580 [1,700]	3.10
Sea water	8.56 [1,025]	199	5,020 [1,531]	1.57
Kerosene	6.74 [808]	230	4,340 [1,324]	1.07
Diesel	7.09 [850]	221	4,530 [1,380]	1.17
Air at 15 psi, 32°F [0°C]	0.01 [1.3]	920	1,090 [331]	0.0004
Air at 3,000 psi, 212°F [100°C]	1.59 [190]	780	1,280 [390]	0.1

Fig. 4.4 Akustiske egenskaper til forskjellige homogene væsker
Nelson, E. G. (2006). *Well Cementing, Second Edition*

Fastfrie væsker viser konsekvente aktivitetsnivåer i logger, mens blandinger av faste stoffer med væsker eller gasser har en tendens til å produsere uregelmessig aktivitet. Når det gjelder skumsement, er det en blanding av gass og faste stoffer som viser betydelig variabilitet i impedansmålingene. En enkelt fase, som vann, gass eller borevæske, vil vise mindre variasjon i den beregnede impedansen. Ved å analysere den vertikale hastigheten på impedansforandring, når verktøyets posisjon tas i betraktning, kan man enkelt avgjøre om skumsement eller væske er til stede. Goodwin (1989) var en pioner i bruken av akustiske impedansvariasjoner for å hjelpe til med å skille faste stoffer fra væsker i annulus. Hovedprinsippet er at en væske eller gass i annulus har en konstant, jevnt lav impedans, mens et "lav-impedans" fast stoff vanligvis har en mer variabel målt impedans.

4.4 Alternative teknikker for å kvalifisere skumsement

Selv om det ikke finnes spesifikke krav for evaluering og kvalifisering av skumsement, finnes det generelle retningslinjer for akseptkriterier og evaluering av sementen i annulus. I denne seksjonen ble tre hovedretningslinjer sammenlignet:

1. NORSOK D-010 (Standards Norway):

- sementevaluering logger er obligatoriske for verifisering av dobbel annulus sementbarriere og verifisering av kypende shale-barrierer.
- For lukket hull-seksjoner med tilgjengelige logger kreves 1 eller 2 X 98 ft (30 m) med god sement.
- Hvis ingen logger er tilgjengelige, kreves 164 ft (50 m) med sement basert på forskyvningsberegninger.
- Loggene må gi azimuthal/segmentert data og må verifiseres av kvalifisert personell

2. BSEE (Bureau of Safety and Environmental Enforcement) - Gulf of Mexico:



- Sementevaluering logger er vanligvis påkrevd for å verifisere tilstedeværelsen og kvaliteten på sementen.
- Minst 100 ft med sement over den øverste hydrokarbonholdige sonen er påkrevd.
- Loggene bør kjøres etter at sementen har nådd en trykkstyrke på minst 500 psi.
- Hvis loggingsresultatene er uklare, kan ytterligere testing eller remedial sementering være nødvendig.

3. OEUK (Oil & Gas UK) Wellbore Decommissioning Guidelines:

- Hvis en logg er tilgjengelig, anses 100 ft med god sement som tilstrekkelig.
- Uten logger kreves 1000 ft med sement basert på teoretiske beregninger.
- I tillegg er det avgjørende å ha "tilstrekkelig tillit til mengden og kvaliteten på sementen i annulus."

Sammenligning av de tre retningslinjene:

1. **Obligatorisk logging:** NORSOK D-010 krever eksplisitt sementevaluering logger for visse situasjoner. BSEE krever vanligvis logger, mens OEUK tillater alternativer hvis logger ikke er tilgjengelige.
2. **Krav til sementlengde:** Alle de tre retningslinjene har lignende krav til lengden på god sement (100 ft med logger, opptil 1000 ft uten logger), men BSEE fokuserer på dekning over hydrokarbonsonen.
3. **Jobbprestasjon og diagrammer:** Mens alle retningslinjene vurderer jobbprestasjon, hydrostatisk løftetrykk og sementvolumberegninger, anses de vanligvis ikke som tilstrekkelige på egenhånd. Logger er foretrukket eller påkrevd for å verifisere sementplassering og kvalitet.
4. **Evaluerings kriterier:** NORSOK D-010 spesifiserer behovet for azimuthal data, mens OEUK legger vekt på "tilstrekkelig tillit" til sementmengde og kvalitet. BSEE fokuserer på å verifisere sementens tilstedeværelse og kvalitet.

Avslutningsvis, mens de fleste retningslinjer sterkt anbefaler eller krever sementlogging for verifisering, tillater noen alternative metoder, som å studere jobbprestasjon og sementtrykkdiagrammer med sammenligning av løftetrykk mellom de designede simulerte og de faktiske oppnådde pumpetrykkene, eller teoretiske beregninger når logger ikke er tilgjengelige. I tillegg, selv når logging ikke er eksplisitt obligatorisk, anses det generelt som beste praksis å bruke sementevalueringlogger når det er mulig for å verifisere integriteten til annular sement som et velbarrierer-element, spesielt i situasjoner med dobbel velbarriere.

Mens volumetrisk analyse og jobbprestasjon kan brukes for å få en indikasjon på den totale jobbprestasjonen, er det ikke mulig å oppnå kvalitativ sikkerhet om sementen i annulus. I tillegg er utfordringen med skumsement at dens tetthet nærmer seg den for borevæske (et krav når det er risiko for tap av sirkulasjon), og at den brukes i sterkt avbøyde brønner. Av disse grunnene kan ingen forskjell i overflate trykk brukes til å beregne toppen av sementen i annulus. Noen operatører har brukt dreiemomentmålinger mens de roterer foringen for å oppdage viskøs slurry som dreier rundt skoen. Dette, sammen med andre operative parametere (spesielt returvolumer), kan brukes til å estimere annular dekning.



5 Global litteraturgjennomgang av skumsemen

1. SPE 79912, K.Green, et al., 2003

- Eldfisk feltet(CoP), 10 brønner, 5"foring
- 1.83 SG grunslurry, skummet til 1,34-1,39 SG (27% FQ)
- "Selv om den gjennomsnittlige absolutte verdien av akustisk impedans for skumsement vanligvis er lik brønnsfluider eller gasser, er det fortsatt mulig å skille sementen ved hjelp av statistiske variasjonsteknikker. [...] Den statistiske variasjonsmetoden ble brukt, og resultatene var veldig gode"

2. SPE 199097, Jose Vela, et al., 2020

- Chichimene field (Ecopetrol, Colombia), 20 brønner, 7"foring
- 1.98 SG grunslurry, skummet to 1.62 SG
- "De fysiske egenskapene til skumsement har vist store fordeler for å oppnå god sonal isolasjon; høy tilsynelatende viskositet, lav tetthet-høy kompresjonsstyrkeforhold, utvidelse ga store merverdige fordeler for sementering av brønnene som ble presentert i denne artikkelen, hvor tilknyttede problemer som utvaskede soner, sirkulasjonstap og høyt frakoblede depletterte reservoar ble presentert".
- Følgende vises loggevurderingsresponsen for hvert av de ovennevnte jobbene for å støtte de operative resultatene (Fig. 4-A–B). Loggspor fra forskjellige loggingsselskaper og verktøy presenteres. Det kan sees at fullstendig sonal isolasjon for alle brønnene med utmerket binding til rør og formasjon ble bekreftet for hver påfølgende loggspor

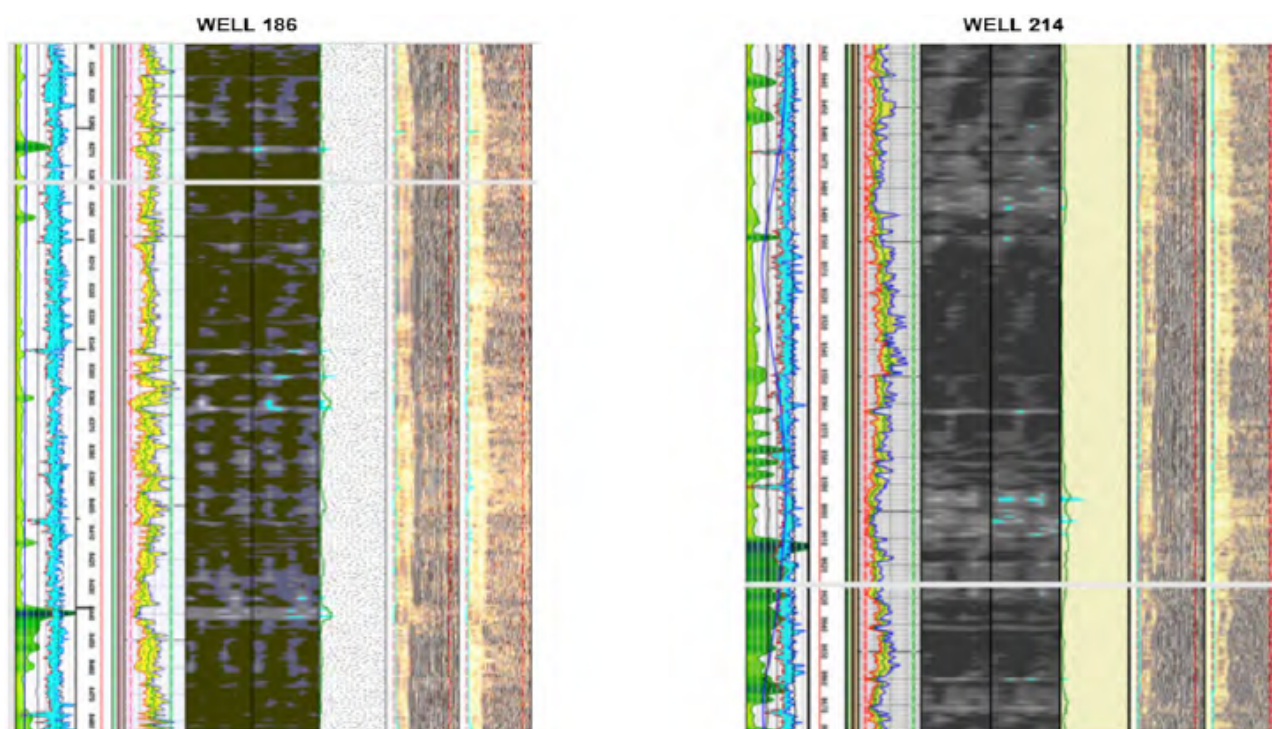


Fig. 5.1 Sementlogg respons for brønner 186 og 214
SPE 199097, Jose Vela, et al., 2020

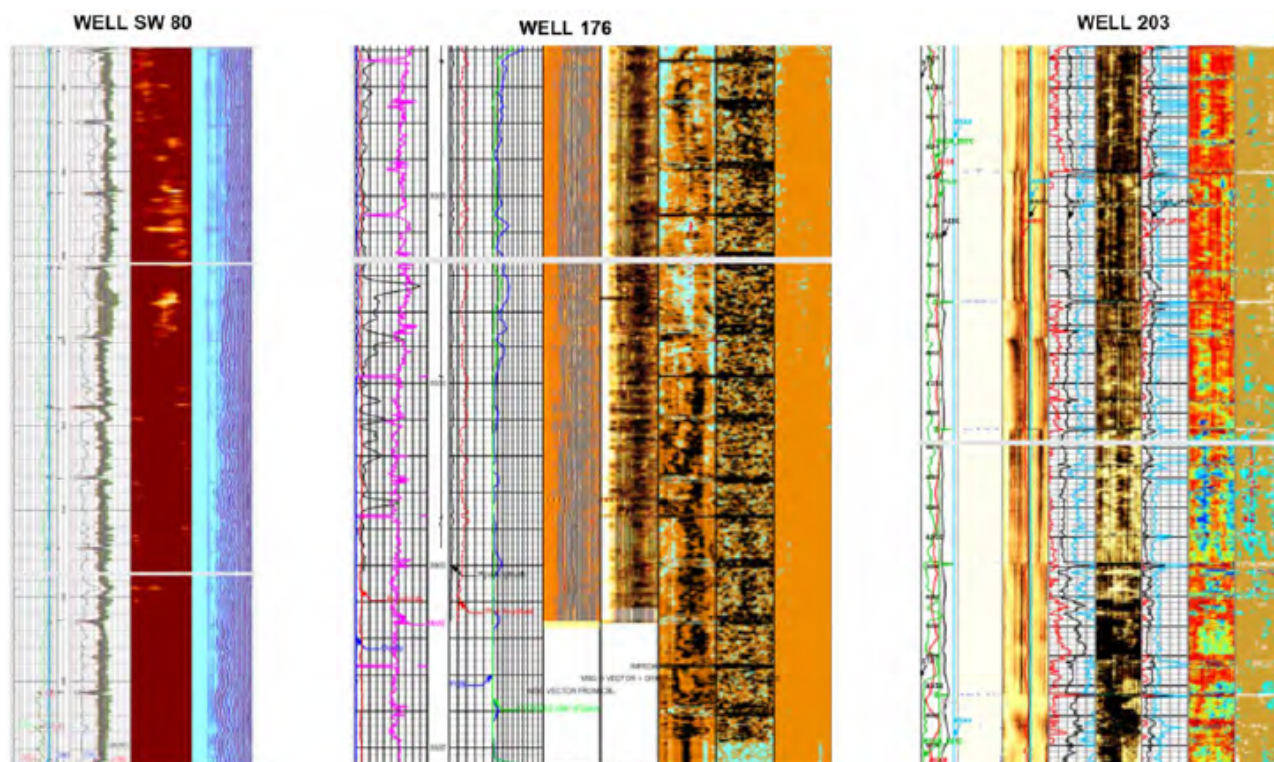
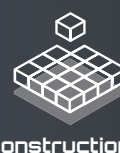


Fig. 5.2 Sementlogg respons for brønner SW 80, 176 og 203
SPE 199097, Jose Vela, et al., 2020

1. SPE 55649, Gary J. Frisch, et al., 1999
 - Halliburton
 - “Den nye [statistiske variasjonsprosessen] har blitt vellykket brukt på data fra flere tjenesteselskaper over hele verden”
2. SPE11980, Rod Bruckdorfer, et al., 1984
 - SLB
 - “Denne laboratoriestudien [...] bekrefter at CBL-loggen kan brukes til å vurdere kvaliteten på skumsementerte foringer ved å justere sementeringens tolkningstabell.”



6 Skumsement i NCS

6.1 Applikasjoner i NCS

På NCS har skumsement blitt brukt til to hovedapplikasjoner så langt:

1. Grunne gass/vann-toppsoner
2. For å sementere produksjonsrør i områder hvor det er liten forskjell mellom pore-/kollaps/trykk og frakturerings/trykk (dvs. smalt poretrykksvindu)

6.2 Logging og barrierekvalifisering på NCS

Et mål med skumsement-loggeprosjektet var å undersøke om vanskelighetene med å kvalifisere barriereelementer ved bruk av logger skyldes spesifikke egenskaper ved materialet som påvirker ultrasoniske og soniske målinger, eller om de heller er forårsaket av et misforhold mellom forventningene våre og skumsementens egenskaper.

For å bedre forstå årsakene til dette problemet, begynte vi med å utvikle en materialmodell som kan forutsi de akustiske egenskapene til skumsement og hvordan de utvikler seg over tid under en rekke plausible scenarier. Deretter brukte vi en Bayesiansk modellbasert inversjonsalgoritme, kalt VM, på de innsamlede ultrasoniske og soniske (dvs. CBL) dataene i 7 logger levert av en norsk operatør. Loggene, som består av Slb Isolation Scanner og tre ulike soniske verktøy[1], ble målt på forskjellige tidspunkt etter sementpumping, noe som ga oss bedre innsikt i materialets utvikling over tid. Et utvalg på tre brønner, nummerert 1 til 3, vil bli brukt i resten av dette kapittelet.

Tidsforsinkelsen mellom sementplassering og logging var 10 dager i brønn 1, 7 dager i brønn 2 og 9 år (3299 dager) i brønn 3.

VM-algoritmen benytter klassiske metoder for inversjonsproblemer for å rekonstruere materialegenskaper i annulus ved bruk av en serie direkte modeller, dvs. funksjoner som forutsier verktøymålinger basert på de ukjente materialegenskapene og binde-forholdene (godt bundet sement, væskemikroannulus og tørr mikroannulus).

En væskemikroannulus er et gap, vanligvis 50–300 μm tykt, som er fylt med en væske – vanligvis vann. Defekten oppstår mellom foringsrøret og sementen (eller mellom sementen og formasjonen, selv om sistnevnte kun kan identifiseres i logger etter omfattende bearbeiding) og skyldes enten en lekkasje når formasjonen skyver fra hverandre overflatene og trenger oppover, eller separasjon av blandingsvann i de tidlige fasene av sementens hydrering.

En tørr mikroannulus er på den annen side et mye tynnere gap ($<10 \mu\text{m}$), som er tomt og oppstår ved en lokal separasjon mellom foringsrør og sement; sementekspansjon kan forårsake dette under spesielle omstendigheter, men det vanligste scenariet er at foringsrøret krymper som følge av reduksjon i hydrostatisk trykk.

Logginversjon oppnås ved å sammenligne “evidensen” for hvert scenario på det punktet som gir best tilpasning (dvs. de parameterne som best samsvarer med målingene), samtidig som man tar hensyn til “handikappet” knyttet til antall parametere i hver material–bindingsmodell: en modell med to parametere vil alltid gi en bedre tilpasning enn en uten frie parametere, selv når det enklere scenariet er korrekt. SLG-kartet (solid–liquid–gas) som Slb Isolation Scanner-verktøyet beregner, er et eksempel på et svært enkelt inversjonsproblem.



VM-algoritmen beregner derfor et kart over materialegenskaper og binde-forhold for hver av de 36 punktene (6 for Baker-verktøy) på hver dybde. Denne første estimat-runden korrigeres så ved å fusjonere høyoppløsningskartet med CBL-resultatene, som gir én måling av sonisk demping som i praksis er et gjennomsnitt av forholdene rundt røret. Fordi CBL er svært følsom for binding, kan vi bruke den til å oppdatere evidensen for ulike modeller av binde-forhold slik at vi oppnår samsvar med den soniske dempingen. Denne estimat-korrigeringsmetoden gjør det mulig å gjenskape alle målingene og forbedrer nøyaktigheten i resultatene.

Materialmodell:

Akustiske egenskaper ved faste materialer inkluderer tetthet (ρ , målt i kg m^{-3}) og hastighetene til kompresjons- og skjærbølger (henholdsvis c_p og c_s , målt i m s^{-1}). Disse bølgehastighetene beskriver hvor fort en puls beveger seg: kompresjonsbølger innebærer små volumendringer i utbredelsesretningen (f.eks. når man banker på en vegg), mens skjærbølger overfører små formendringer i det planet som er vinkelrett på utbredelsesretningen (f.eks. når man høvler tre). De akustiske egenskapene henger sammen med elastiske moduler: for eksempel er forholdet mellom c_s og c_p lik $\sqrt{(1-2\nu)/2(1-\nu)}$, noe som viser at skjærbølger alltid er langsommere enn kompresjonsbølger. Forholdet kan variere fra $c_s=0$ for en væske ($\nu=0,5$) til $c_s=0,7c_p$ ($\nu=0$). Hastigheten til formasjonen, eller det inverse av hastigheten – kalt slowness, er en sentral petrofysisk egenskap som rutinemessig måles i logger.

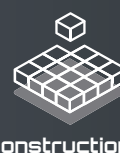
Oljesementsystemer er veldisiplinerte materialer: spesifikke sementsystemer har én frihetsgrad, noe som betyr at tetthet (ρ) og skjærbølgehastighet (c_s) kan beregnes ut fra materialets kompresjonsbølgehastighet (c_p). For å kunne beregne de akustiske egenskapene til skumsement, må vi også være i stand til å ta hensyn til to mulige scenarier som beskriver hvordan skummet utvikler

- En del av den opprinnelige nitrogenfraksjonen, som vi skal kalle ϕ_{sat} , kan fylles med saltlake fra formasjonen, noe som fører til en tyngre solid; denne hypotesen ble først formulert av Roy Middleton fra ConocoPhillips.
- Tomme porer kan potensielt bli komprimert av kryptende shale, noe som resulterer i en foam sement med færre nitrogenfylte bobler, dvs. med lavere foam kvalitet (FQ, volumfraksjonen av nitrogen på en gitt dybde). Hvis alle bobler kollapser, kan vi observere den opprinnelige basis-slamen.

For å fremskynde beregningene, erstattet vi den mikromekaniske materialmodellen med et "Neural Network" tilnærming, som gir ρ og c_s som en funksjon av c_p , fraksjonen av de opprinnelige nitrogenboblene fylt med vann (ϕ_{sat}), tettheten til base-slamen (ρ_{base}), og graden av hydrering av sementen (χ). Denne siste parameteren brukes til å modellere oppførselen til foam sement ved lavere grader av hydrering ($\chi \approx 50\%-60\%$) som observeres i tidligere logger.

Slb Isolation Scanner tar to uavhengige ultralydmålinger med en oppløsning på minst 36 piksler per dybde: den akustiske impedansen Z (som er produktet av tetthet ρ og kompresjonsbølgehastigheten c_p) og den fleksible dempingen α_g . Sistnevnte er en plateakustisk modus (dvs. en stabil superposisjon av kompresjons- og skjærbølger), som tilhører Lamb-bølgers klasse og også kalles A0 (antisymmetrisk Lamb-bølge av orden null) av Baker Hughes når de måler det ved hjelp av INTeX-verktøyet. Fleksibel demping har ikke en enkel definisjon som akustisk impedans, og må beregnes ved å søke etter en selvoppretholdende modus med en gitt propagasjonshastighet og demping.

Vår evne til å skille mellom forskjellige utviklingsscenarier hviler på at materialene har forskjellige signaturer på $Z-\alpha_g$ måleplanet. [Fig. 6.1](#) Viser de ultralydverktøyavlesningene som ble forutsett under tre scenarier: baseslam med varierende vanninnhold, skumsement med en fast base-slamtetthet, men varierende skumkvalitet; og for det samme materialet etter at alle boblene har blitt fylt med saltlake. Målingene beskriver responsen fra Slb Isolation Scanner,



samt Baker Hughes kombinasjon av INTeX (et seks-pad verktøy) og ULTeX (et verktøy med en roterende pulse-echo-transduser, lik Slb USIT eller Halliburton CAST). Kurvene viser at skumdiagenese endrer verktøyrespons - noe som har blitt observert gjentatte ganger i Norge - og at vannflom og poreknusing divergerer litt ved høyere impedanser.

[1] En av logstringsene inneholdt et eldre sonic-verktøy, DSLT, mens de andre 6 ble ervervet ved hjelp av de nyere MAST og ASLT. Disse array sonic-verktøyene har 5 mottaksstasjoner samt to sendere. Tilstedeværelsen av en serie mottakere gjør at vi kan måle demping direkte, mens gjennomsnittet av responsen til de to senderne kansellerer effekten av forskjellige transduseres følsomhet på målingen (det som kalles borehole-kompensert konfigurasjon, eller BHC).

[2] Nitrogeninkluderinger i sementmatrisen oppfører seg som hvilken som helst annen væske, inkludert vann i base-slam porøsitet: bølgehastigheter skiller ikke mellom gassfylte og væskefylte porer.



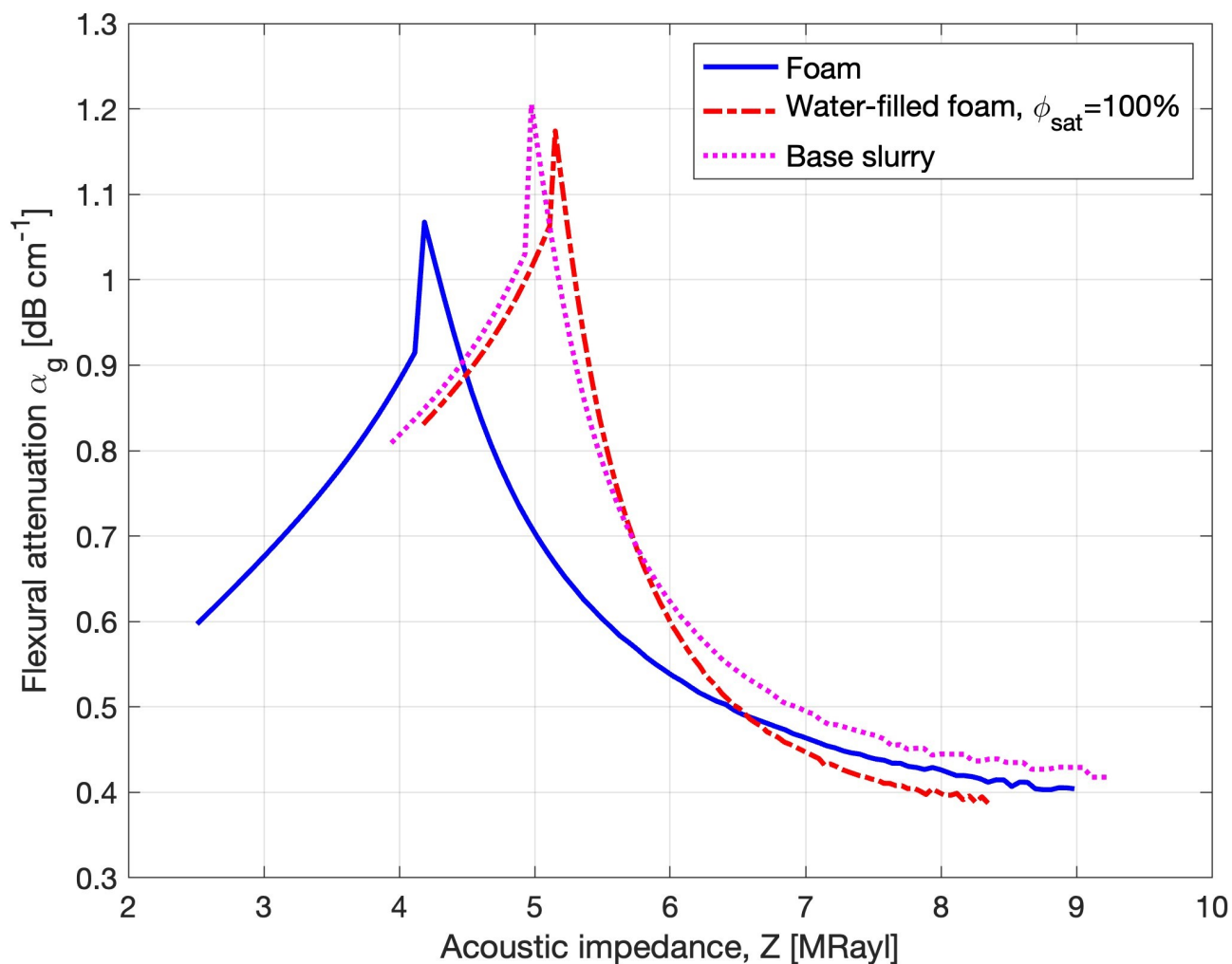


Fig. 6.1 Prediktert responslogg for skumsement

Prediksjon av loggrespons for skum sement under tre forutsetninger:

Opprinnelig sement, med nitrogen som fyller de opprinnelige boblene.

Vannfylt skum, hvor vannet fyller 100 % av boblene.

Grunnslurryen, som illustrerer effekten av mekanisk knusing av boblene.

Bøyningsdempning (flexural attenuation), målt av SLB Isolation Scanner og Baker Hughes INTeX, er beregnet for et 9" foringsrør (casing) med vekt 53,5 ppf og ferskvann som loggevæske i røret.

Utvikling av loggens respons over tid:

Vi har nå to verktøy tilgjengelig: en direkte modell for foam-respons, som lar oss beregne loggrespons basert på base-slamtetthet, foam-kvalitet og evolusjonsparametere (flom og knusing av bobler); samt en inversjonsramme, VM-algoritmen, som beregner de ukjente parameterne fra de kjente ultralyds- og sonic-målingene. Det første steget er å validere kjeden ved å sjekke om den kan rekonstruere foam-egenskapene korrekt i logger som er tatt rett etter plassering. Ved å fikse base-slamtettheten til designverdien (16,3 ppg, tilsvarende 1,95 SG), og hydratiseringsgraden til $\chi=68\%$, dens langsiktige grense, kan vi beregne skumkvalitet fra de ultralydsloggene: [Fig. 6.2](#) and [Fig. 6.3](#) Avdekker konsekvent FQ rundt 10%, verdien beregnet for trykk- og temperaturforholdene på bunnen av 10¾" liner for to forskjellige brønner. Denne innledende valideringen viser at 'fersk' skumsement oppfører seg som forventet, det vil si at ved oppløsningen til en ultralydsstråle (rundt 1 tomme eller 25,4 mm) fremstår materialet glatt og konsistent, uten gass- eller vannseparasjon.

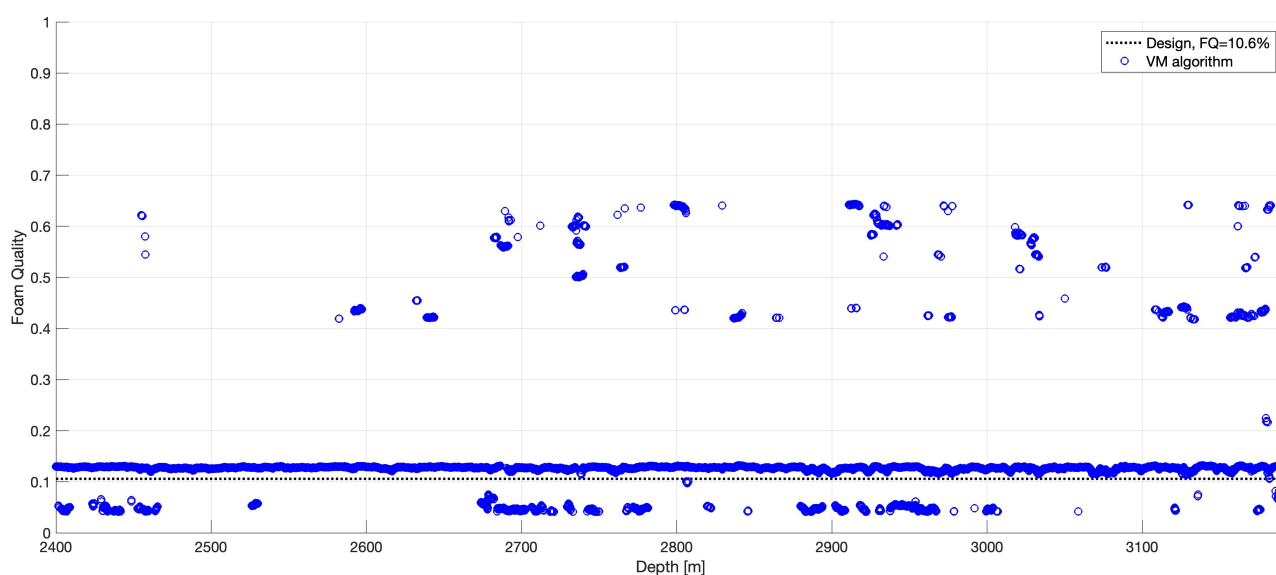


Fig. 6.2 Brønn 2 designet og simulert med skummet slurry-kvalitet

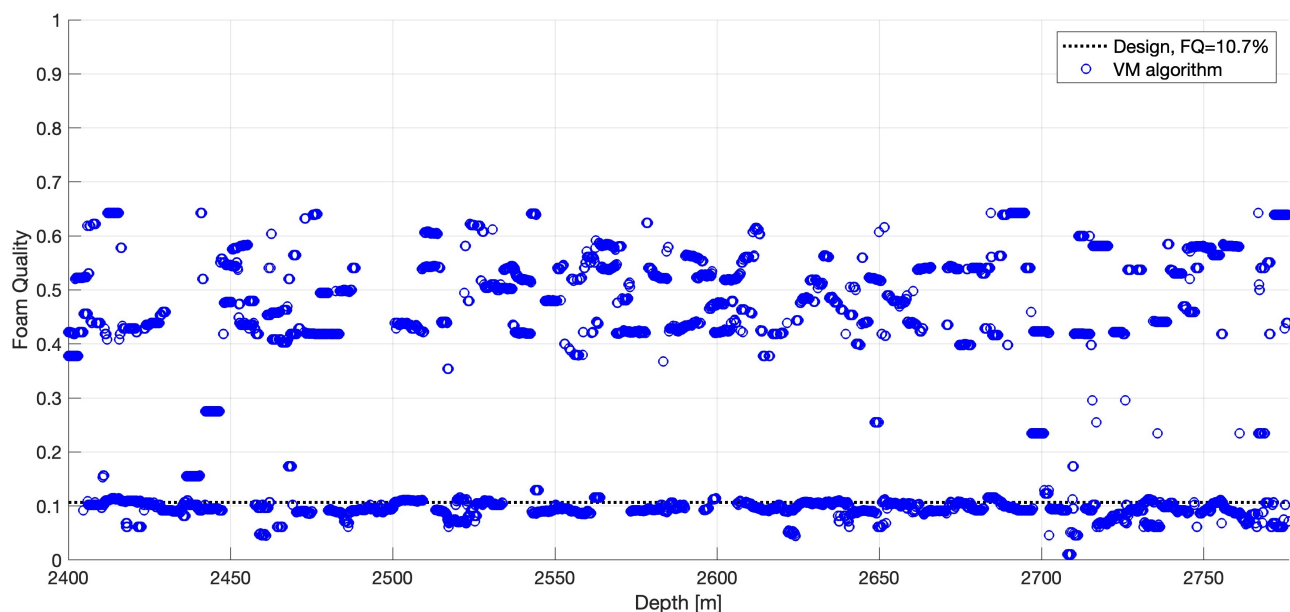


Fig. 6.3 Brønn 3 designet og simulert med skummet slurry-kvalitet

Toppen av fordelingen av sementtetthetsverdier i et 5-meters glidende vindu, beregnet med VM-algoritmen ved bruk av materialmodellen for skum sement.

Evnen til å rekonstruere egenskapene til materialene i annulus, spesielt tetthet og dermed skumkvalitet, er bekreftet av brønn 1: Fig. 6.4 Sammenligner resultatet av inversjoner ved bruk av modeller for skumsement og Class G-materialer. I dette tilfellet vil skumsementmodellen kunne beregne tettheten i annulus korrekt, siden basisslurryen er et spesialtilfelle med $FQ=0\%$. Faktisk beregner begge modellene korrekt designtettheten $\rho=1,95$ SG over basisslurryintervallet nærmere skoen, og fremhever forskjellen med det skummede midtseksjonen. Selv det uskummede laget nær toppen av sementen viser en litt annen oppførsel enn skummet under, med noe mer nøyaktige verdier beregnet under Class G-antagelsen.

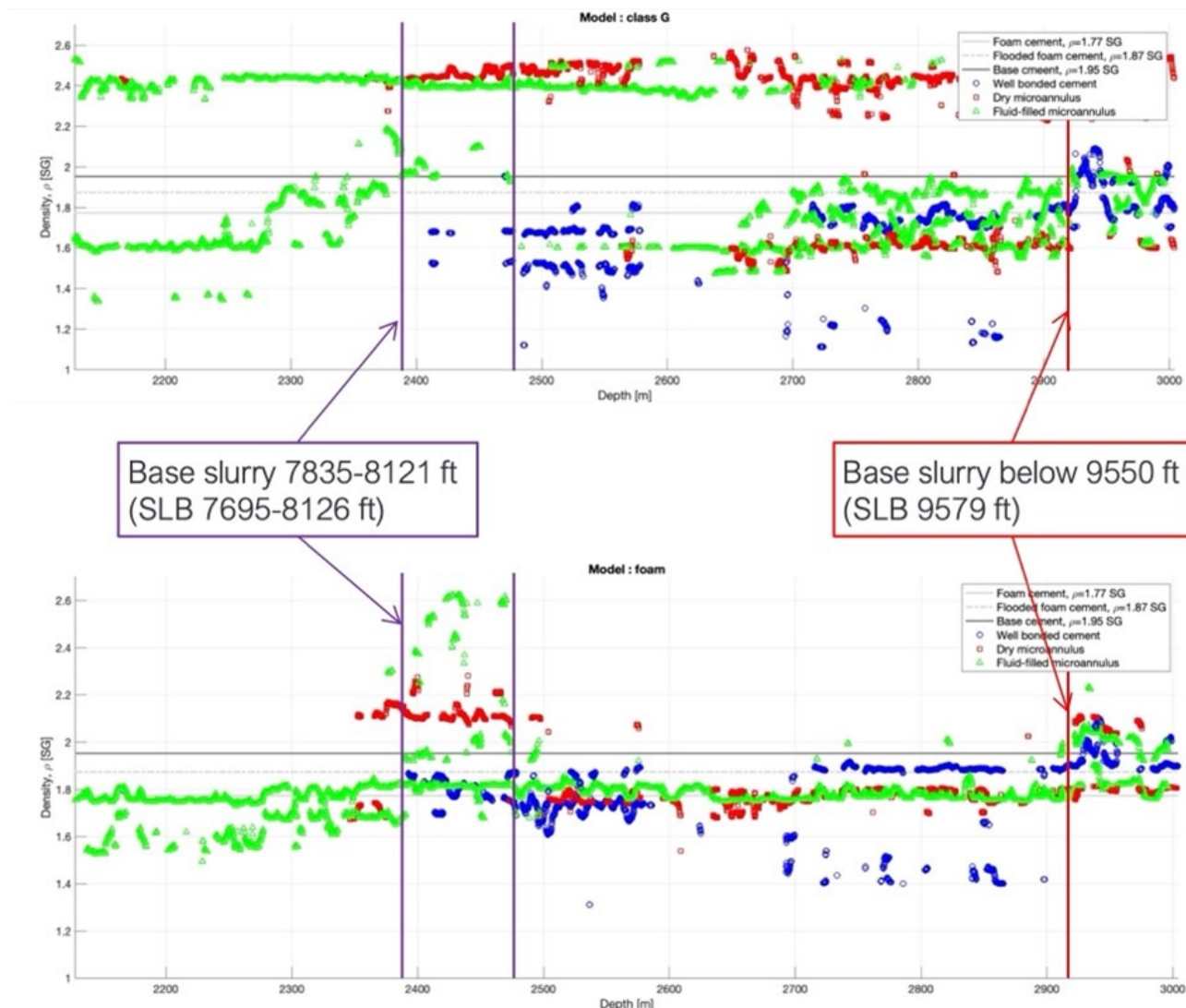


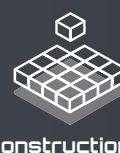
Fig. 6.4 Brønn 1 designet og simulert med slurry-tetthet.

Toppene i fordelingen av sementtetthetsverdier i et 5-meters glidende vindu, beregnet ved hjelp av VM-algoritmen med to forskjellige materialmodeller (baseslurry øverst og designet skum nederst). De vertikale linjene markerer intervaller med ulik oppførsel som tilsvarer to partier med baseslurry som ble pumpet henholdsvis foran og bak den skummede slurrien.

Konklusjonen er at skumsement på et tidlig stadie oppfører seg som forventet, med den planlagte skumkvaliteten tydelig bevart nede i brønnen og ingen tegn til boblesammenslåing eller faseseparasjon.

Norske operatører som er mest aktive i bruken av skum, har gjentatte ganger understreket hvordan diagenese – altså endringer i struktur og egenskaper i sementsystemet – er en forvirrende og vedvarende egenskap ved materialet.

Ved å teste ulike scenarier for materialutviklingen over tid, kan vi finne ut hvilket som best gjengir de ultrasoniske målingene, akustisk impedans (Z) og fleksural dempning (α_g). Dette steget med å velge materiale er ikke helt idiotsikkert: oppførselen til forskjellige materialer kan være lik, og målestøy kan forskyve tildelingen. I gjennomsnitt vil likevel den riktige modellen oftest bli valgt. Fig. 6.5 viser hvor stor andel av hver materialmodell som best kan forklare loggmålingene på hver dybde i brønn 1. Diagrammet øverst utelater punkter der VM-algoritmen indikerer en tørr mikroannulus, men disse er inkludert i diagrammet nederst: selv om det er rimelig å anta at større



nitrogenbobler ved foringsrøret kan fremstå som en tørr mikroannulus – og logger tyder på at de gjør det – har algoritmen en tendens til å knytte disse tynne, spredte gapene til skifermaterialmodellen, noe som er urealistisk. Den faktiske tilstedeværelsen av små, tomme (eller nitrogengassfylte) tynne gap er derfor fortsatt usikker. Selv om støy i målingene gjør at resultatet kan veksle mellom konkurrerende scenarier, ser det ut til at både porefylling av formasjon vann og sammenfall av porer finnes i samme brønn – i tillegg til den opprinnelige skumsementen.

Nitrogenseparasjon kan utelukkes som årsak til at noen punkter er klassifisert som usikummet klasse G, ettersom logger på et tidlig stadium konsekvent viser homogen skumkvalitet. Boblesammenslåing og nitrogenseparasjon, hvis det i det hele tatt forekommer, ville opphøre kort tid etter pumping når sementen begynner å sette seg: all senere forsvinning av bobler skyldes mest sannsynlig porekollaps.

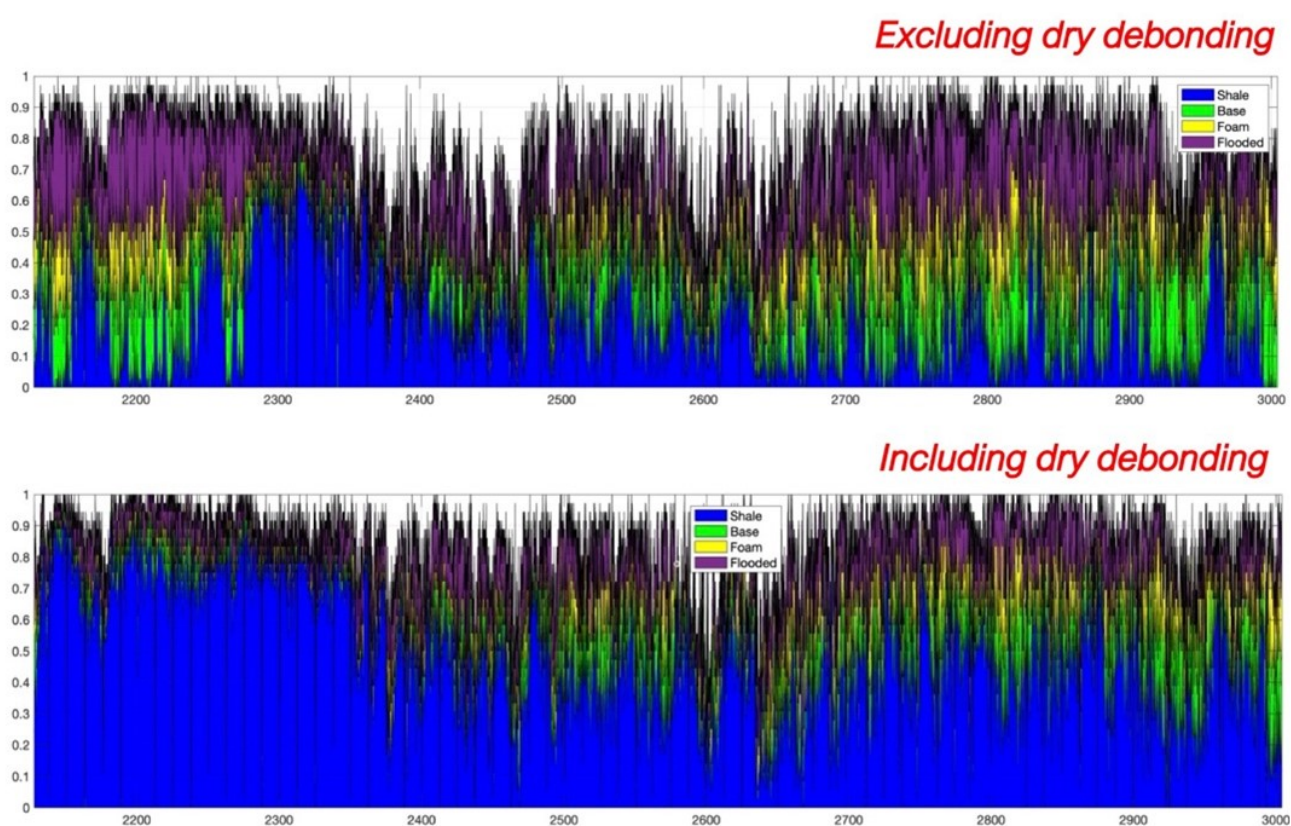
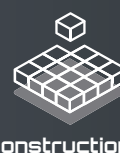


Fig. 6.5 Brønn 1 andel av forskjellige materialmodeller mot dybde (i meter).

For hver piksel velges modellen som gir best samsvar med de ultrasoniske målingene (akustisk impedans og bøyningdempning). Grafen øverst ekskluderer tørr frakobling som en av tilstandene testet av VM-algoritmen.

En studie av Brønn 3 har avdekket to interessante aspekter ved hvordan skumsement utvikler seg over tid. Fig. 6.6 viser at:

- Vannfylling ser ut til å være konsentrert i vertikale bånd, for eksempel i intervallet 2040–1860 m. Slike seksjoner, spesielt når overgangene er skarpe, indikerer formasjonssjikt-effekter, siden sementplasseringen skaper skarpe overganger rundt røret (på grunn av mud-kanalisering) og mye jevnere overganger langs dypet (på grunn av forurensning). Bånddannelsen stemmer med hypotesen om at tilgangen på formasjon vann styrer porfyllingen.



- Grunnsement (base cement) opptrer oftere på den høyeste siden av foringsrøret. Dette er ikke åpenbart, siden man kunne forvente høyere spenning på den lave siden av røret, der sementskjoldet er tynnere.

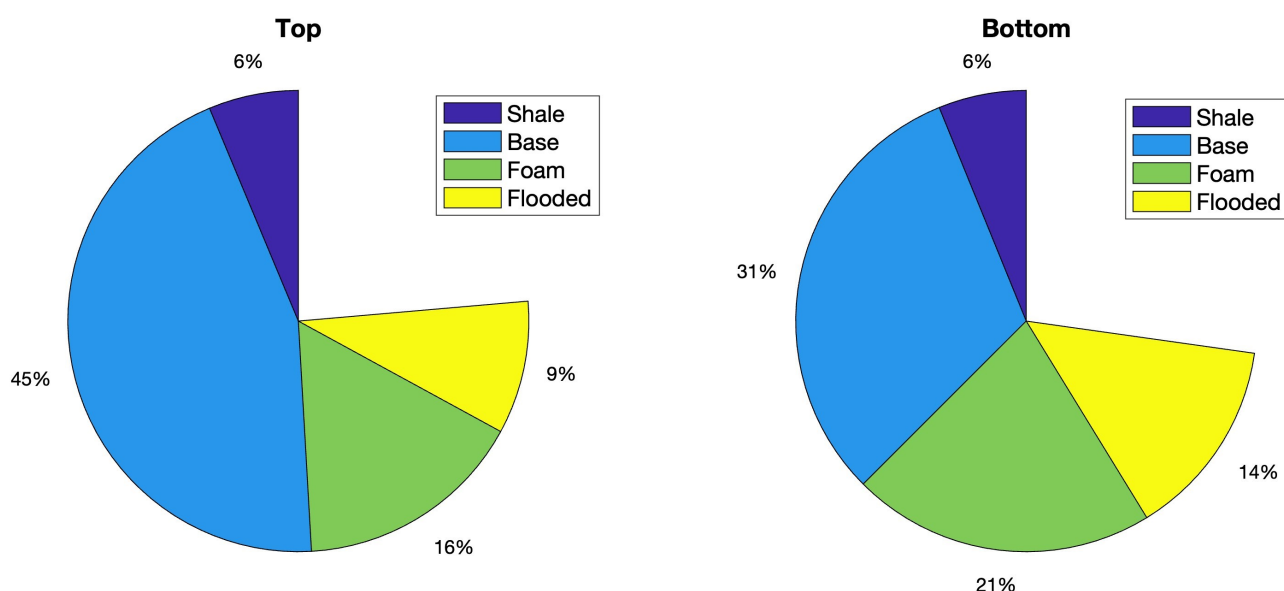
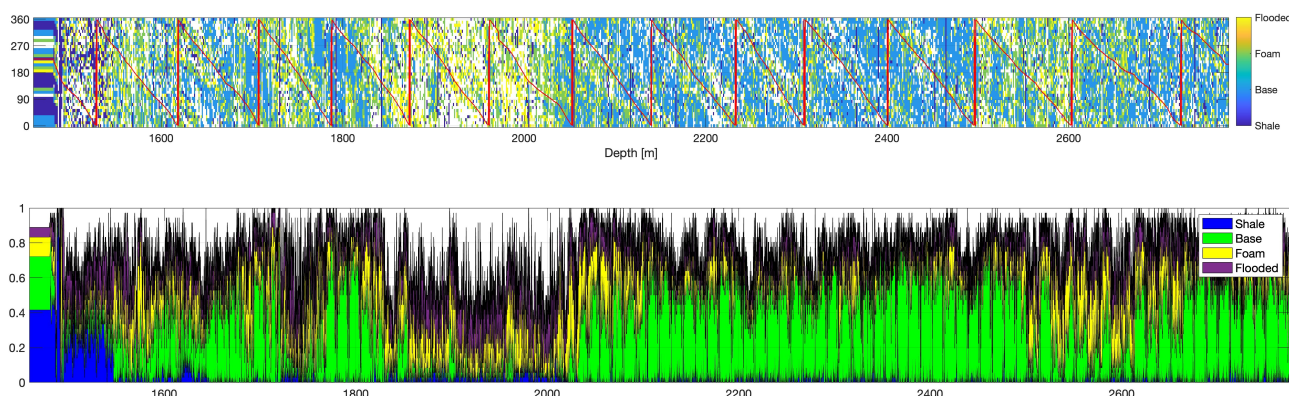


Fig. 6.6 Brønn 3 modellering av ultrasoniske målinger.

Kart over pikslene der hver modell gir best samsvar med de ultrasoniske målingene (akustisk impedans og bøyningdempning, øverst). Andel av de forskjellige materialmodellene mot dybde (i meter, midten). Andel av hver materialmodell for hele logget seksjon, beregnet ved bruk av 90° vinduer sentrert langs toppen og bunnen av foringsrøret (nederst).

Selv om de nøyaktige prosessene bak skumsement-diagenesen – spesielt porekollaps – ennå ikke er fullt utklarte, bekrefter denne loggstudien at skumets akustiske egenskaper øker betydelig med tiden, noe som gjør at materialet blir mer synlig på logger.

Siden elastiske egenskaper, Youngs modulus (E) og Poissons tall (ν), kan beregnes fra kompresjons- og skjærbølgheastighetene, kan vi konkludere med at sementen blir stivere (dvs. mindre elastisk) over tid. Hvis porene kollapser, vil også permeabiliteten minke – selv om en høy tetthet-sement med 10 % skumkvalitet ville ha en permeabilitet på rundt 10 nD (10^{-8} Darcy), tilnærmet lik grunnsementverdien.

Etter hvert som Youngs modulus øker, øker også uinnkapslet trykkfasthet og alle andre parametere som påvirker sementens ultimate mekaniske styrke. Konklusjonen er at den opprinnelige skumsementkvaliteten er den samme som forventet ut fra laboratorietester, og at den forbedres over tid. Logger egner seg derfor til å vurdere kvaliteten på barriereelementer.



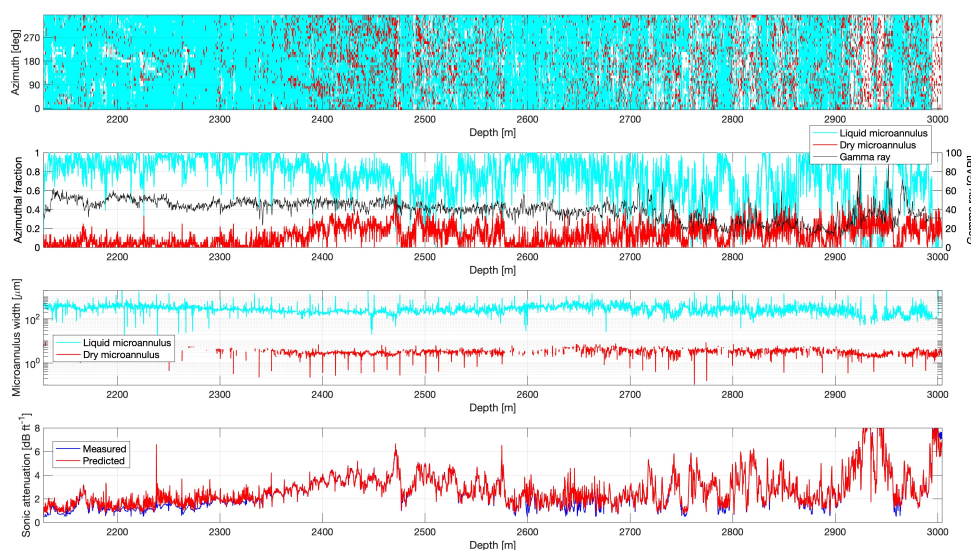
Skumsement-binding:

Det siste spørsmålet logganalysen tok opp, er om bindingen mellom foringsrør og sement er statistisk forskjellig mellom ikke-skummet og skummet klasse G-sement. "Binding" viser her til muligheten for at det finnes et væskelag på omtrent 100 μm , kalt et væskefylt mikroannulus, eller et mye tynnere ($<10 \mu\text{m}$) tomt gap skapt av foringsrørkrymping eller sementekspansjon – ofte kalt en tørr mikroannulus. Logger viser at skum – i likhet med standardsement – påvirkes av begge former for manglende binding. Dette er ikke uventet, og det er to grunner til det:

- I Norge brukes det rutinemessig en skumkvalitet (FQ) på omtrent 10 % for produksjonsstrengen, ettersom denne verdien er et godt kompromiss mellom lav tetthet og boblestabilitet. Den tynne vannfilmen, vanligvis under 100 μm tykk, som skiller seg fra sementmassen under herdingen og ofte ses i logger (selv om en tilfredsstillende forklaring ennå ikke er foreslått), kan fortsatt separeres fra de resterende 90 % av volumet som utgjøres av grunnsementen.
- Selv om de svært små nitrogenfylte boblene kanskje ikke bidrar med nok volum til merkbart å påvirke friseparasjon av vann under herdingen, kan de likevel fungere som "reservoarer" – spesielt når boblene ligger i overgangen mellom foringsrør og sement. Disse tynne vannlagene vil påvirke CBL-responsen og få VM-algoritmen til å klassifisere pikselet som et væskefylt mikroannulus. Dermed kan man få et utbredt, men usammenhengende, frikoplingsmønster: siden det kreves sammenheng for at vannlaget skal kunne fungere som en kanal for gassboble-migrasjon, vil isolerte bobler ikke påvirke sementens evne til å fungere som et effektivt barriereelement, selv mot gass. Tomme halvbobler langs foringsrør-sement-grensesnittet kan også forklare den hyppige og uventede forekomsten av tørre mikroannuli (dvs. tomme gap $<10 \mu\text{m}$).

Fig. 6.7 (Brønn 1) og Fig. 6.8 (Brønn 2) viser den hyppige forekomsten av mikroannuli, selv om det er rimelig tvil om defektenes sammenkobling. Den vertikale båndstrukturen i Fig. 6.8 viser spesielt at slik frikopling påvirkes av formasjon "creep", med intervaller preget av mye bedre binding – muligens påvirket av porekollaps.

Vi kan konkludere med at skumsement-binding i stor grad ligner det som observeres med klasse G-sement, selv om tilstedeværelsen av "tomme" porer i materialet kan føre til at defekter ved foringsrør-sement-grensesnittet blir frakoblet og derfor lite sannsynlig utvikler seg til en lekkasjebane.



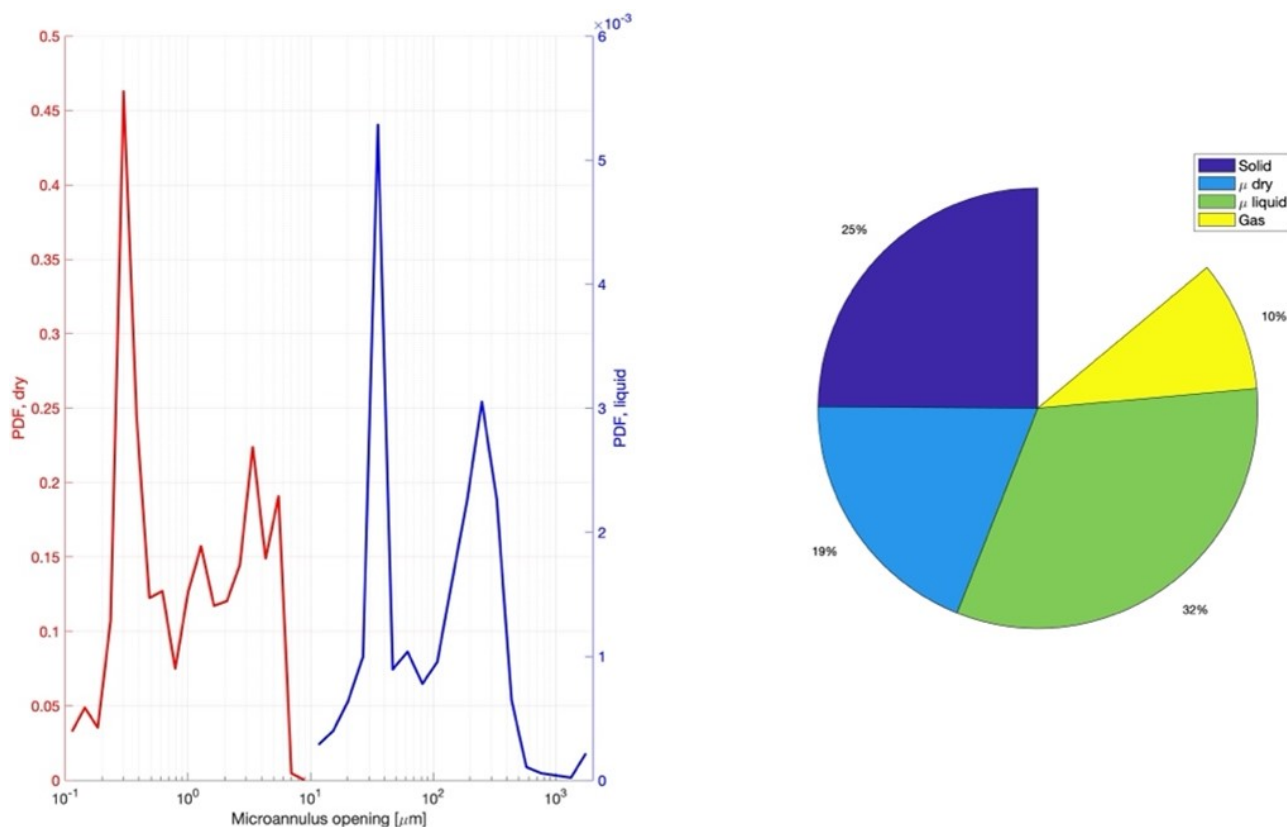
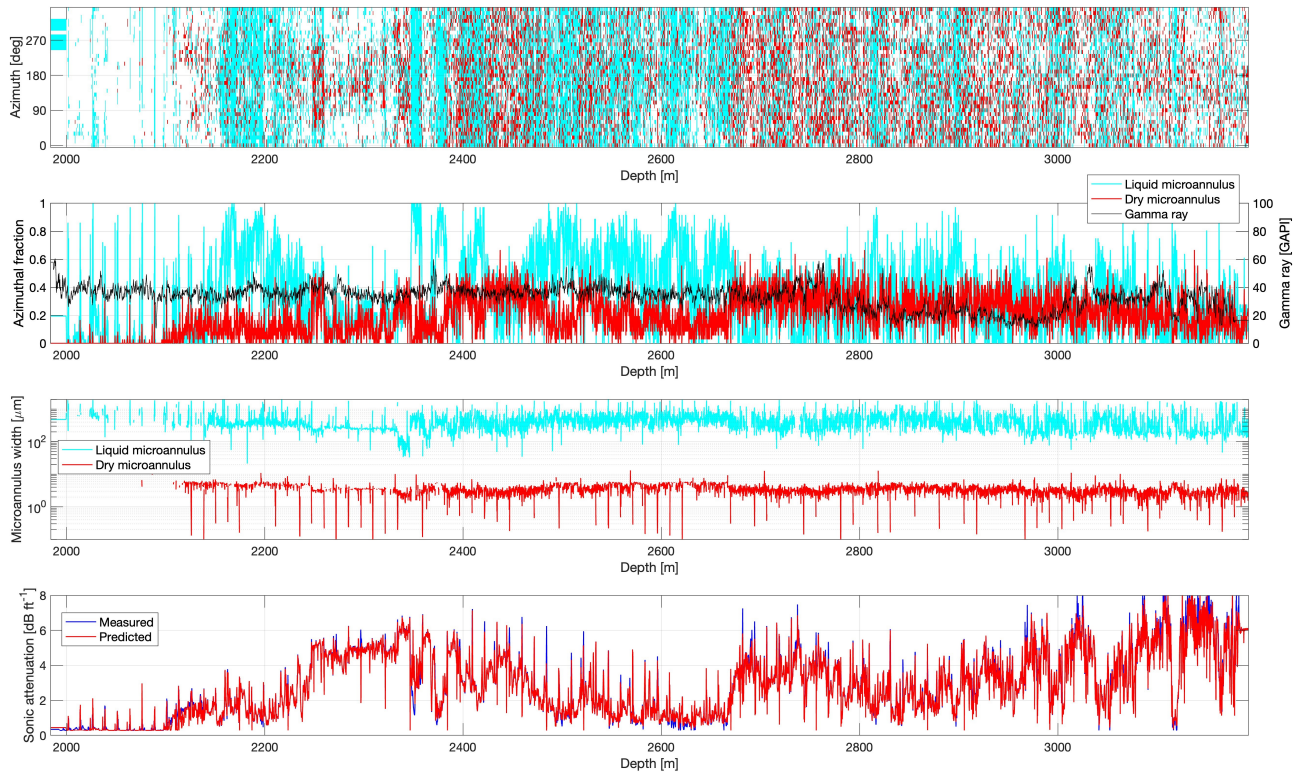


Fig. 6.7 Brønn 1 VM-algoritmeresultater for mikroannulusåpning og andel faststoff/gass
 VM-algoritmeresultater etter sonisk korreksjon, med antagelsen om at saltvann fyller mikroannulus:

Kart over distribusjon av væskefylt mikroannulus (blå) og tørr mikroannulus (rød) (øverst).
 Azimutdekning av tørr og væskefylt mikroannulus sammenlignet med gamma-ray (nest øverst).
 Gjennomsnittlig mikroannulusåpning (tredje fra toppen).
 Sammenligning mellom målt sonisk demping og verdier predikert basert på VM-algoritmeresultater (fjerde fra toppen).
 Langs bunnen vises:

Histogram over fordeling av mikroannulusåpning (til venstre).
 Andel punkter for hver material- og bindingstilstand (til høyre).
 Beregningene er utført ved bruk av materialmodellen for lead sement.



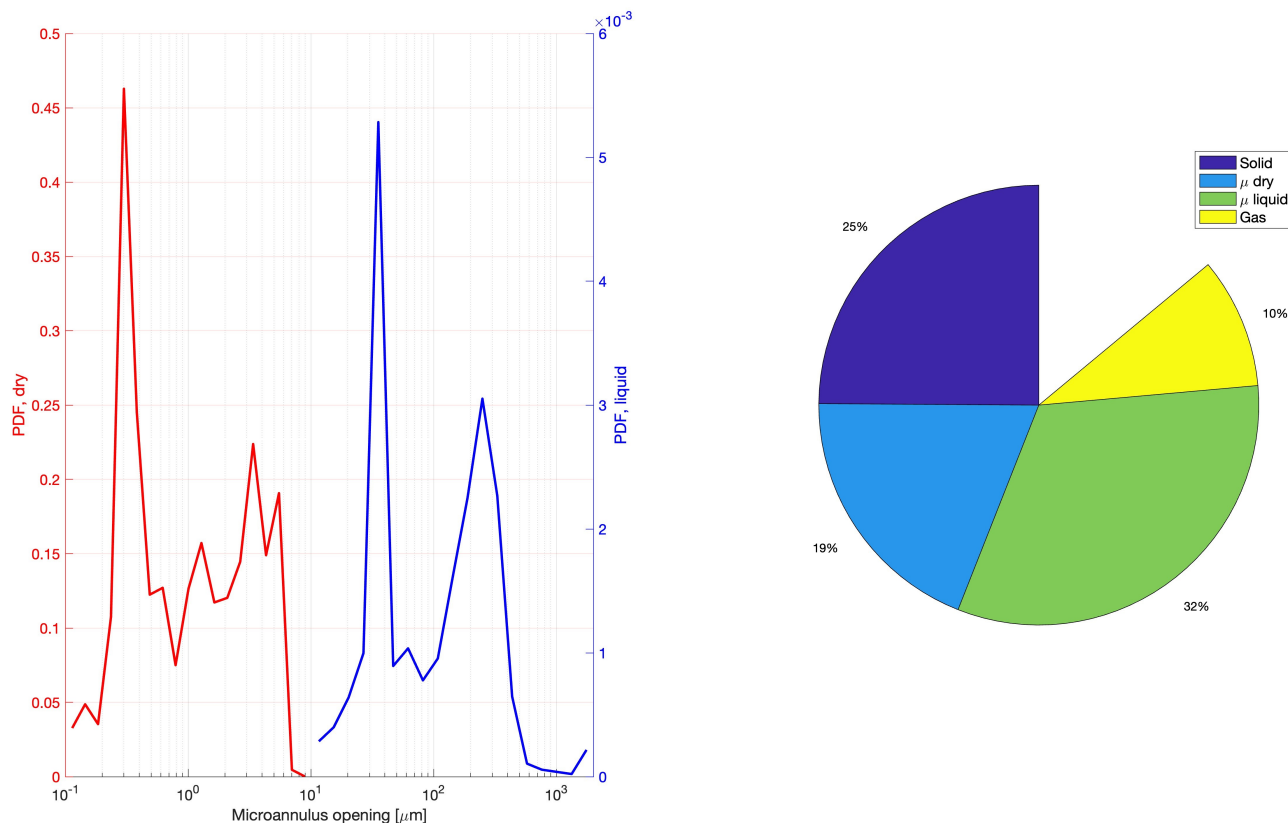


Fig. 6.8 Brønn 2 Mikroannulusåpning og andel faststoff/gass

VM-algoritmeresultater etter sonisk korreksjon, med antagelsen om at saltvann fyller mikroannulus:

Kart over distribusjon av væskefylt mikroannulus (blå) og tørr mikroannulus (rød) (øverst).

Azimutdekning av tørr og væskefylt mikroannulus sammenlignet med gamma-ray (nest øverst).

Gjennomsnittlig mikroannulusåpning (tredje fra toppen).

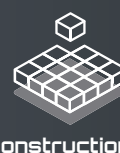
Sammenligning mellom målt sonisk demping og verdier predikert basert på VM-algoritmeresultater (fjerde fra toppen).

Langs bunnen vises:

Histogram over fordeling av mikroannulusåpning (til venstre).

Andel punkter for hver material- og bindingstilstand (til høyre).

Beregningene er utført ved bruk av materialmodellen for lead sement.



7 Workshop presentasjoner og referater

7.1 Introduksjon

19. september 2024 ble det arrangert en workshop på Havtil for å diskutere skumsementering og samle deltakernes synspunkter på sentrale aspekter knyttet til denne bruken. Representanter fra fire operatørselskaper (O1, O2, O3, O4) og tre leverandører (S1, S2 og S3) på norsk sokkel (NCS) var invitert.

O1, O2, S1, S2 og S3 delte sine lokale og globale erfaringer, med særlig fokus på de lokale utfordringene knyttet til skumsementeringsoperasjoner og -evaluering. Deretter holdt Three60 Energy en presentasjon om en litteraturgjennomgang av logging ved skumsementering.

Etter dette ble deltakerne delt inn i to diskusjonsgrupper for å kartlegge og få innspill om både dagens status og fremtiden for skumsementering. Notater fra presentasjonene og gruppediskusjonene er oppsummert i de følgende avsnittene.

7.2 Presentasjoner

O1, som har den mest omfattende erfaringen med bruk av skumsement som en barriereapplikasjon, presenterte en oversikt over sin historie med skumsementering samt pågående prosjekter, inkludert utvikling av Computational Fluid Dynamics (CFD) og laboratorieforsøk.

O2, med et mindre antall skumsementjobber i porteføljen, delte sine erfaringer og verdifulle bidrag.

Etter disse operatørpresentasjonene viste hver av de tre tjenesteleverandørene frem sine teknologier for skumsement-logging, sammen med tilhørende tolkningsmetoder og arbeidsmåter.

Til slutt presenterte Three60 et globalt overblikk samt en litteraturgjennomgang av skumsementeringsteknikker og -innovasjoner verden over.

Oppsummering av O1s presentasjon (omfattende erfaring på norsk sokkel):

Historisk bruk og anvendelser:

- Skumsement ble først benyttet på Ekofisk i 2000 og ble etter hvert hovedmetoden for soneisolering i reservoarforinger, takket være bedre soneisolering og fortrengningseffektivitet.
- Etter hvert som Ekofisk modnet og feltforholdene ble mer krevende, ble skumsement et nødvendig verktøy for produksjonsstreng-installasjoner, ettersom det sikret stabilitet under trangere trykkmarginer i formasjonen.
- Over 560 skumsementjobber er gjennomført av O1, noe som understreker skumsementens pålitelighet i utfordrende situasjoner.

Skumsement-evaluering og logging:

- **Tidspunkt for logging:** O1 viste at det ofte er gunstig å logge skumsement etter flere dager eller uker, ettersom de akustiske egenskapene utvikler seg med tiden. Dette ble dokumentert gjennom tidsserie-logger



som viste forbedrede målinger etter herding.

- **Verktøyvalg:** O1 benytter hovedsakelig Schlumbergers IBC-verktøy, supplert av Bakers INTeX- og ULTeX-kombinasjoner, noe som tydeliggjør behovet for høykvalitetsverktøy for å oppnå nøyaktige loggmålinger av skumsement.
- **Påvirkningsfaktorer:** Variasjoner i boblestørrelse, boblefordeling og formasjonens tilstand kan påvirke akustisk impedans (AI), og dermed nøyaktigheten i målingene. Tilgang på formasjonsvann over tid kan forbedre AI, fordi sementen får bedre kontakt med foringsrøret.

Utfordringer og faktorer som påvirker loggenøyaktighet:

- Skumsementens akustiske respons kan variere på grunn av densitet, mikroboble-akkumulasjon og ujevn binde-kvalitet, noe som kan føre til "mikroannuli" og tolkningsutfordringer.
- Laboratorie- og feltstudier viser at boblestørrelsen er betydelig mindre i feltapplikasjoner enn i laboratoriet, noe som tyder på at feltspesifikke parametere påvirker boblestørrelse og fordeling. Integriteten er imidlertid like god, eller bedre, enn boblene som produseres i laboratoriet.
- Tilleggsfaktorer som vann og produksjonstemperatur kan med tiden øke skumsementens trykkfasthet og forbedre akustisk impedans.

Fremtidige satsningsområder:

- Pågående arbeid retter seg mot en dypere forståelse av skumsementens oppførsel, blant annet gjennom CFD-analyser, videregående laboratorietesting og studier av brønnlevetid.
- Utvikling av standardiserte logge-metoder som tar hensyn til skumsementens unike egenskaper, er et prioritert område for å forbedre nøyaktigheten i barriereverifisering.

Oppsummering av O2s presentasjon (begrenset erfaring på norsk sokkel):

Historisk bruk og anvendelser:

- Skumsementering har vært lite brukt i O2s felt, med bare noen få jobber gjennomført mellom 2014 og 2024.

Skumsement-evaluering og logging:

- **Tidspunkt for logging:** Logging av skumsement gir ofte bedre resultater etter flere dager eller uker, siden de akustiske egenskapene utvikler seg over tid.
- **Verktøyvalg:** O2 har hovedsakelig brukt SLB IBC-verktøy og planlegger nå å prøve Bakers INTeX- og ULTeX-kombinasjoner for å kvalifisere disse til fremtidige jobber.
- **Påvirkningsfaktorer:** Slurrytetthet påvirker loggens nøyaktighet betydelig, der tynge slurrier er enklere å verifisere enn lettere.

Utfordringer og faktorer som påvirker loggenøyaktighet:

- Tidsforsinkelse mellom sementering og logging kan redusere nøyaktigheten.
- Hvilken type væske som er i brønnen under logging, påvirker også målingene.

Fremtidige satsningsområder:



- O2 planlegger flere skumsementjobber for å dra nytte av fordelene, og utvikling av standardiserte loggemetoder for skumsement er en nøkkelfaktor for å øke nøyaktigheten i barriereverifisering.

Oppsummering av S1s presentasjon:

S1 har den bredeste erfaringen med logging av skumsementjobber og arbeider sammen med O1 for å etablere en konsistent tilnærming til loggtolkning for skumsement. De publiserer snart noen artikler under tittelen "SPE-223648-MS." Nedenfor er hovedpunktene S1 presenterte:

Egenskaper og utfordringer ved lettsement:

- Lettsement, inkludert skumsement, har lav densitet og lav akustisk impedans, noe som gjør at tradisjonelle sementloggeverktøy kan ha utfordringer med å evaluere kvaliteten.
- Skumsementens unike egenskaper, slik som heterogenitet og tidsavhengig akustisk utvikling, krever mer avanserte evalueringsmetoder.

Teknologiske nyvinninger innen sementlogging:

- **Ultrasoniske verktøy:** S1 viste frem avanserte ultrasoniske verktøy som er utviklet for å imøtekomme utfordringene ved lavdensitetssement. Disse verktøyene kan analysere variasjoner i akustisk impedans og bedre oppdage kvaliteten på lettsement.
- **Tidsserie-logging (time-lapse):** Ble fremhevet som en kritisk metode for å fange opp skumsementens herdingsutvikling over dager eller uker, noe som gir mer presise evalueringer.
- **Avansert databehandling:** S1s egenutviklede tolkningsmodeller er spesialtilpasset de unike utfordringene innen lettsement og skumsement, og bedrer dermed påliteligheten i barriereverifisering.

Feltopplevelser og casestudier:

- S1 presenterte reelle data fra prosjekter med lettsement, og viste hvordan deres loggeteknologier kan skille lettsement fra væsker.
- Viktige innsikter inkluderte eksempler på vellykket identifisering av soneisolering og forbedret bindevurdering i utfordrende brønnmiljøer.

Oppsummering av S2s presentasjon:

I følge interne statistikker har S2 det høyeste antall pumpede sementjobber på norsk sokkel: 235 jobber hvor sement var en del av barriere-systemet (148 for mellomstreng) av totalt 1058 jobber.

S2 har utarbeidet lokale retningslinjer for laboratorietesting, med mål om å etterligne skumproduksjonen og holde prøvene under trykk for å måle akustisk impedans i en ultrasonisk analyser.

Utfordringer med logging av skumsement:

- **Lav akustisk impedans:** Skumsementens impedans kan ligge nær vann, noe som gjør det vanskelig å skille de to.
- **Tidsavhengige egenskaper:** De akustiske egenskapene forbedres over tid, så tidspunktet for logging er kritisk.



- **Verktøysensitivitet:** Konvensjonelle verktøy kan feiltolke resultatene på grunn av høy demping og spredning av signalet forårsaket av nitrogenbobler.

Evalueringsteknikker:

- **Tidsserie-logging:** Gjentatte logger gir bedre målinger fordi de tar hensyn til skumsementens endringer over tid.
- **Avanserte verktøy:** Bruk av multitransducer ultrasoniske verktøy og analyse av bøyebølger (flexural waves) er nye metoder som kan skille fast stoff fra væske.
- **Simulering og modellering:** Datamodeller benyttes i økende grad for å forutsi kvaliteten på sementplasseringen og for å optimalisere verktøyparametere.

Erfaring fra bransjen:

- Operatører og tjenesteleverandører delte casestudier som viste vellykket bruk av skumsement og deres tilnærminger til logging og tolkning.
- Eksempel på verktøy: SLB IBC-verktøy og Baker Hughes' INTeX og ULTeX ble trukket frem for sine kapabiliteter.

Oppsummering av S3s presentasjon:

- **INTeX-verktøyet:** INTeX-verktøyet egner seg for logging av skumsement. Det leverer horisontal skjærbølge i tillegg til bøyebølger (flexural waves), noe som kan bidra til å bestemme bredden på eventuelle mikroannuli.
> Verktøyet er allerede kvalifisert for O1 og vil snart kvalifiseres for O2.
- **Skjærmodulmåling:** Hvis skjærmodulen til sementen blir målt i laboratoriet, kan det forbedre nøyaktigheten i loggtolkning.

7.3 Breakout Sessions

Etter presentasjonen ble deltakerne delt inn i to grupper for å samle erfaringer og tilbakemeldinger. Nedenfor følger en oppsummering av de viktigste punktene fra sesjonen:

1. Anvendelse av skumsementering på norsk sokkel (NCS):

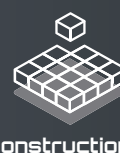
1. Bruken av skumsementering på norsk sokkel er uunngåelig, særlig med tanke på den dokumenterte historikken, spesielt i visse felt hos O1, og det er planlagt flere fremtidige bruksområder i andre felt.
2. Det er enighet om at skumsementering ikke kan erstattes, i lys av utfordringene som løses sammenlignet med konvensjonell sement, og det er derfor uten tvil et fremtidig bruksområde på norsk sokkel.

2. Forbedring av loggtolkning for skumsement:

1. Det er rom for å forbedre tolkningen av logger ved skumsementering, noe som kan oppnås gjennom økt publisering og samarbeid mellom ulike aktører.
2. I tilfeller der skumsement fungerer som barriere, er det operatørens ansvar å verifisere tolkningen med støtte fra tjenesteleverandørenes erfaring.

3. Mulighet for kvalifikasjonsmatrise:

1. En skreddersydd kvalifikasjonsmatrise for skumsementjobber kan kanskje redusere behovet for logging



i alle brønner, spesielt der det allerede finnes en stor database med lignende jobber og når man opererer med enkelt/dobbelt barrierekonsept.

4. **Bevis for lekkasjer:**

1. Logger viser ingen tegn til væskemigrasjon over topp sement (TOC) i fôringsrør.
2. Det har muligens vært strømning i et felt hos O3, men dette er svært usikkert, og jobben ble ikke utført optimalt.
3. Noen plattformbrønner har blitt sementert med skum uten at det er rapportert problemer.
4. S2 påpeker at noe nitrogenstrømning gjennom permeabilitet kan forventes i startfasen.

5. **Logger og tolkning:**

1. Operatørene stoler ofte på tjenesteleverandørene. I 2005 oppstod en uønsket sidestyring (sidetrack).
2. I dag kan man logge i tung boreslam: O2 påpekte at teknologien er forbedret (PowerEcho-sendere i SLBs IsoScanner) og tolkning internt (Techlog) har erstattet eldre PDF-baserte analyser. Dette markerte et klart sprang i logging og tolkning rundt 2014–2018, noe som igjen har ført til større vilje til å bruke skumsement.
3. Kompetanse innen tolkning hos tjenesteselskapene er en stor utfordring, og det finnes ingen standardisering.

6. **Positive og negative utfordringer:**

1. Reologi i brønnen er i stor grad ukjent (vanskelig å måle og modellere), men dette er mindre viktig siden de fleste skumsementjobber pumpes med omtrent 10 % skumkvalitet (nitrogenvolumfraksjon).
2. Det er svært kostbart å teste reologi — men har det reelt sett betydning?
3. Trykk- og strømningsrateverdier for å vurdere jobbkvalitet er vanskelige å benytte (særlig for å matche densitet), men dreiemomentsrespons (torque) under rotering av fôringsrør kan gi en pekepinn på plasseringen.
4. Lite overskuddsvolum pumpes fordi det er komplekst og krever spesielle sikkerhetstiltak for å håndtere nitrogen på overflaten; overskuddet må gå via en enkel gassavskiller (“poor boy degasser”).
5. Valg av overflateaktivt stoff (surfactant) i spacer og i grunnsementen er svært viktig: dårlig mud-fjerning kan føre til at skummet blandes med boreslammet, og da kan surfaktanten som stabiliserer boblene tas opp i oljebasert eller syntetisk boreslam, slik at skummet destabiliseres.
6. Begrenset plass på dekk er et problem på norsk sokkel, spesielt når man bruker nitrogenflasker i stedet for flytende nitrogen (N₂). Prosessen er enklere, men krever større plass ved større jobber. En permanent installasjon av N₂-linjer kan redusere transportbehovet og risiko, og kunne benyttes av alle tjenesteleverandører. Likevel er komprimert nitrogen, slik det brukes i Norge, mer praktisk enn flytende nitrogen som benyttes andre steder i verden.
7. Fri fall (“u-tube”) er vanskelig å kontrollere og kan forveksles med en brønnkontrollsituasjon: skumingeniøren må ha tett samarbeid med borepersonalet for å forklare hva som skjer og bli enige om tilpassede prosedyrer.
8. Markedet er fortsatt skjevt fordelt, med 50–70 jobber per år hos S2, mot 12 jobber over ~5 år hos S1.
9. Skumsement er solid etablert for fremtiden på norsk sokkel, etter en nylig renessanse. Dette gjelder både for riserless-operasjoner (grunne gass-/vannsoner og svake formasjoner) og som en brønnbarriere.
10. Operatørselskapet bør opprettholde intern kompetanse på loggtolkning for å sikre riktig vurdering og dermed kvalifisering som barriere.



11. Laborietesting – et svakt punkt: Vi vet at skumsement fungerer, men det er svært vanskelig å produsere realistisk skum i laboriet og teste dette. Det finnes muligheter for standardisering (f.eks. reologiverdier for bruk i modellering), spesielt siden API-testkravene kan forbedres.
12. Behov for standardisering av logging og tolkning: En standardisering på tvers av tjenesteselskaper og operatører kan bidra til en mer konsistent tilnærming, samt bedre og mer pålitelig barriere kvalifisering.

7.4 Konklusjon

Workshopen understreket skumsementens verdi for soneisolering og fremhevet samtidig kompleksiteten ved å vurdere dens integritet.

O1s tilnærming med å kombinere høykvalitets loggeverktøy, utsatt logging for bedre resultater samt avanserte modellerings- og testmetoder gir et solid rammeverk for bruk av skumsement i krevende brønnmiljøer.

Hovedmomenter:

- Pågående samarbeid mellom industri og akademia om materialeoppførsel og avanserte loggeteknikker for å håndtere de unike utfordringene lettsement byr på.
- Anbefalinger for Lightweight Cement Evaluation:
- Innføring av avanserte verktøy og tolkningsmodeller for å bryte på begrensningene ved tradisjonelle metoder. Økt bruk av tidsserie-logging for bedre vurdering av lettsementens egenskaper.
- Samarbeid mellom aktørene i industrien for å utvikle standardiserte evalueringsprotokoller for lett- og skumsement.
- Samarbeid mellom operatører og tjenesteleverandører for å forbedre konsistensen i tolkningen.
- Utvikling av konsistente, standardiserte metoder for logging av skumsement. Kontrasten i logger mellom sement og boreslam vil øke over tid, så tolkningsprotokoller bør ta hensyn til denne materialutviklingen og den lave sannsynligheten for at væskefylte mikroannuli som sees i logger, er lekkasjeveier.
- Bedre integrering av avansert modellering og simuleringstøytø i planlegging og evaluering.



8 Anbefalinger og "Best Practices"

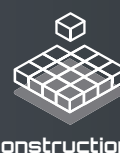
Det pågår forskningsprosjekter som benytter avanserte Computational Fluid Dynamic (CFD)-modeller for å simulere plassering av skum sement (foam cement) med høy nøyaktighet. Disse modellene tar imidlertid lang tid å kjøre, og oppsett av modellen krever spesifikk kompetanse og erfaring. Arbeid med utvikling og utrulling av testutstyr og metoder i laboratoriet kan gi mer pålitelig informasjon om viskositeten til skum sement, men per i dag brukes i stedet verdier målt fra grunndatablandingen. Selv om evnen vår til å modellere strømmingen av skum sement forbedres, blir de fleste skummede sementjobber utført i avvinklede brønner og med små tetthetsforskjeller mellom boreslam, preflushes og sementslurry. Dette betyr at å studere plasseringstrykk alene ikke kan avsløre toppen av sement. Ved å integrere alle tilgjengelige registreringer, som returmengder og dreiemoment når en foringsrør (liner) roteres, kan man lettere anslå sementdekningen ved slutten av plasseringen.

For å kvalifisere enkeltbarriereelementer krever NORSOK D-010, paragraf C.22.D.2.b at «faktiske parametere [skal] sammenlignes med simuleringer ved bruk av industrigodkjent programvare for å ta hensyn til brønndesign, væskeegenskaper og friksjonsbidrag». Returmengder er den beste indikasjonen på tap, mens dreiemoment har potensial til å direkte avsløre lengden av sementslurrien i ringrommet (som kan bli påvirket av et overdimensjonert hull). Jobbparametere kan dermed komplettere overflatetrykket for å bestemme toppen av sement, selv om kravet til simuleringsprogramvare for å forutsi observerte variabler betyr at kvalifisering med «fortrengningsberegninger» for tiden er utfordrende.

Logging forblir derfor en aktuell metode for å kvalifisere skum sement som en barriere, og en som er påkrevd når man har flere barriereelementer i samme streng.

Anbefalinger for evaluering av lettvektsement:

1. Ta i bruk avanserte loggingverktøy og tolkningsmetoder for å overvinne begrensninger ved tradisjonelle metoder.
2. Øk bruken av tidsserie-logging for å fange endringer i de akustiske egenskapene til skum sement over tid. Denne forbedringen og den resulterende høyere kontrasten og bedre synlighet av sement på logger bør dokumenteres for hvert felt og innarbeides i tolkningsprotokoller for fersk skum sement, slik at en tidlig evaluering gir samme konklusjon som en sen.
3. Opprett et industridekkende team, inkludert operatører og servicebedrifter, for å utvikle en standardisert kvalifiseringsprosess. Tettere og åpen samarbeid vil muliggjøre benchmarking av metoder og resultater, og sikre konsistent tolkning, spesielt for å bekrefte om væskefylte mikroannuli er en lekkasjekanal for skum sement eller kan legges til barriereintervallene.
4. Sørg for at opplæring er tilgjengelig, slik at alle interessenter (både land- og offshoreansatte, samt myndigheter) forstår fordelene og særegenhetene ved skum sement, særlig den uvanlige oppførselen under plassering, som kan skape forvirring med hensyn til brønnkontroll.
5. Integrer avanserte modellerings- og simuleringsverktøy i planleggings- og evalueringsprosesser.



9 Referanser

Referanser:

- Nelson, E.B., and Guillot, D. (2006). *Well Cementing, Second Edition*. Sugar Land TX: SCHLUMBERGER.
- Norway, S. (2021). Well integrity in drilling and well operations, Rev.5, Jan 2021, NORSOK D-010:2021. Oslo: Standards Norway.
- Chervon Texaco and BP cement manual Rev 01/2002

Publiseringer:

- Chmilowski, W., and Kondratoff, L.B.: "Foamed cement for Squeeze Cementing Low-Pressure Highly Permeable Reservoirs: Design and Evaluation," SPE Drilling Engineering (December 1992), 7, (4), 284–290; also presented as paper SPE 20425 at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, (September 23–26, 1990).
- Davies, D.R., Hartog, J.J., and Cobbett, J.S.: "Foamed Cement—A Cement with Many Applications," paper SPE 9598 presented at the SPE Middle East Oil
- McElfresh, P. M., and Go Boncan, V. C.: "Applications of Foam Cement," paper SPE 11203 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA (September 26–29, 1982).
- Rickard, W.M.: "Foam Cement for Geothermal Wells," *Transactions of the Geothermal Resources Council* (1985) 9, Part 1, 147–152.



10 Nomenklatur

α_g , bøyningsdempning [dB cm^{-1}]

α_s , lyddempning [dB ft^{-1}]

ν , Poissons forhold

ρ , tetthet [kg m^{-3} eller SG]

ϕ_{sat} , andel av boblevolumet som er mettet med vann

χ , hydratiseringsgrad

c_p , kompresjonsbølgehastighet [m s^{-1}]

c_s , skjærbølgehastighet [m s^{-1}]

ASLT (Array Sonic Logging Tool), Schlumberger (Slb) sonic-verktøy for å måle CBL

BHC (borehole compensated), Teknikk med to separate sendere for å måle lyddempning uavhengig av transdusernes følsomhet

CAST, Halliburton sitt ultrasoniske pulsekko-verktøy for å måle akustisk impedans

CBL (Cement Bond Log), En standard lydbasert (lavfrekvent) metode for sementevaluering

DSLTL (Digital Sonic Logging Tool), En tidligere generasjon Slb sonic-verktøy for å måle CBL

E, Youngs modul [Pa]

FQ, skumkvalitet (Foam Quality), (Volum nitrogen per enhetsvolum av skummet slurry)

INTeX, Baker Hughes sitt ultrasoniske puteverktøy for å måle bøynings- og horisontal skjærdempning

MAST (Multimode Array Sonic Tool), Slb sonic-verktøy for å måle CBL

NCS (Norwegian Continental Shelf), Norsk kontinentalsokkel

ULTeX, Baker Hughes sitt ultrasoniske pulsekko-verktøy for å måle akustisk impedans

USIT, Schlumberger sitt ultrasoniske pulsekko-verktøy for å måle akustisk impedans

VDL (Variable Density Log), En visuell framstilling av stablede bølgeformer registrert av 5 ft-mottakeren på CBL-verktøy

VM-algoritmen, En Bayesiansk, modellbasert inversjonsalgoritme for å beregne materiale i ringrom og binding basert på ultrasoniske og soniske målinger

Z, akustisk impedans (AI) [Rayl]



11 Kommentarer fra klient



Subsurface



Wells



Engineering



Construction &
Commissioning



Operations



Better Energy Together

