

BORING – INTRODUKSJON

Boring tar for seg utstyr og metoder som vanligvis brukes for å bore hull ned til olje og/eller gassreservoarer, samt utstyr og metoder for å sikre brønnen og gjøre den klar for produksjon. Senere bruk av brønnen, inkludert setting av produksjonsrør med utstyr, hører til under produksjonsteknologi. Perforering, å skyte hull gjennom foringsrør og innover i bergarten rundt brønnen, blir forelest og er pensum i boring (det hører vanligvis til under produksjon).

Kompendiet du finner her er en introduksjon til boring, mest beskrivelse av utstyr og prosesser med illustrasjoner. Noen få regneeksempler er med, disse er pensum, men stoffet er også behandlet i hovedkompendiet Boring som fås kjøpt på IN VIVO (under biblioteket). Dette er for stort til å legges ut her. Hovedkompendiet behandler grundigere en del utstyr og prosesser, og viser hvordan beregninger kan utføres. Det er disse beregningene som hovedsakelig kreves til eksamen, men det anbefales på det sterkeste å lese introduksjonskompendiet og studere illustrasjonene, det vil lette forståelsen av hva som foregår under boring, noe som igjen vil gjøre det lettere å sette opp beregninger og å bruke formler korrekt.

Hovedkompendiet inneholder også regneoppgaver med fasit, samt tidligere års eksamener med fasit. De siste års eksamener er ikke med, noen av disse vil bli delt ut (med fasit) underveis. Nødvendige tabeller for beregninger vil også bli delt ut underveis.

NB! Introduksjonskompendiet er delt i to og ligger i mappene BORING-A og BORING-B under hovedmappa Boring. Dette for å lette utskrift.

OVERSIKT OVER OMRÅDER SOM BLIR BEHANDLET I BORING-B

BOREPROSESSEN	Brønntyper	Vertikale brønner – Avviksbrønner Horisontale brønner Oppmåling av brønnbanen
SIKRING AV BRØNNEN	Trykkforhold	Overlagringstrykk Horisontale spenninger – frakturering Poretrykk Begrensning av trykk i brønnen
	Brønnsikringsrør	Konduktor – foringsrør – liner
	Sementering	Funksjon til sement Plassering av sementpasta* Begrensning på sementeringshøyder
TRYKK-KONTROLL	Kick – Blowout	BOP – Blow Out Preventer – oppbygging Grunner til kick Stansing av kick – utsirkulering
PERFORERING		Ladninger – oppbygging og virkemåte Perforeringsmønster Rensing av perforeringer

*Sementpasta er navn på sement blandet opp med vann, før den størkner

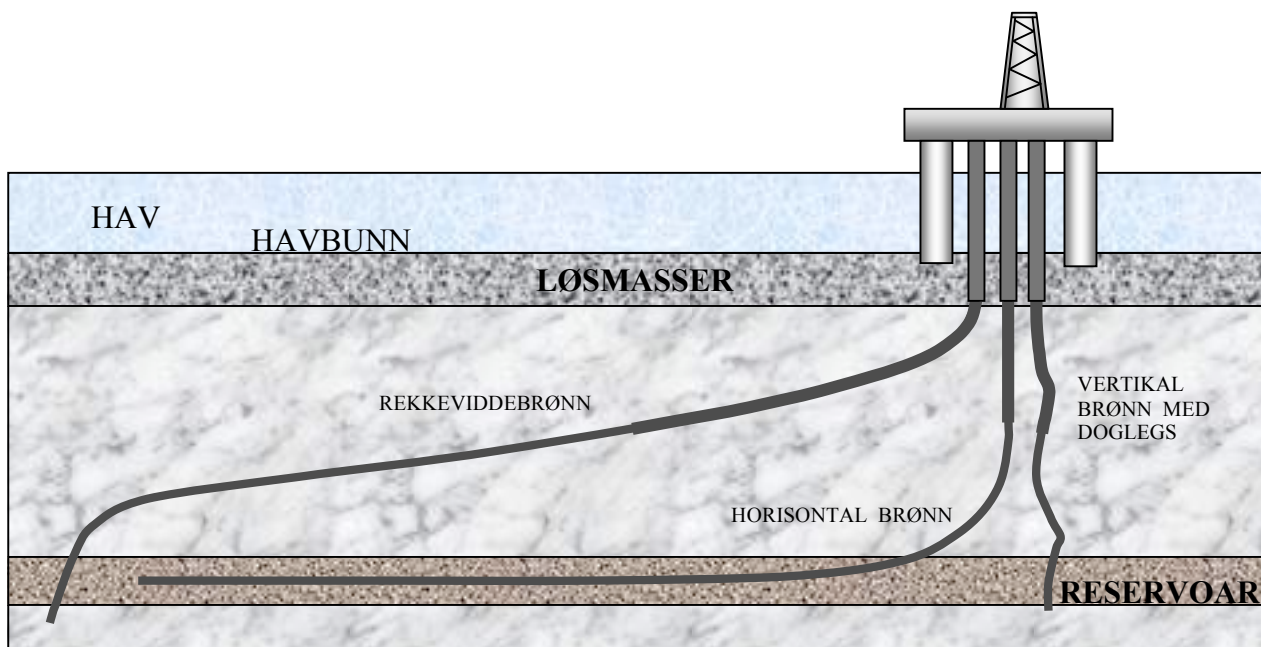
Brønntyper – brønnbaner

Alle de første brønnene var vertikale, eller var ment å være det. Men hvor det ble boret ned gjennom skråttstilte lag med betydelig variasjon i hardhet mellom lagene hadde borekrona en tendens til å skjene ut sideveis i de mykere lagene og etter hvert følge skråningen på lagene. En oppdaget derfor at det gikk an å bore ikke-vertikale brønner, ofte kalt avviksbrønner.

Nå ønsket en ikke dette i utgangspunktet, blant annet ble jo brønnen lengre for å komme ned til ønsket dybde. Et begynnende avvik kunne en da korrigere tilbake til vertikal retning ved å bruke whipstock (den ble funnet opp ganske tidlig). Selv om brønnen da stort sett ble vertikal kunne brønnbanen da ha betydelige knekk der den passerte skrå lag og hvor whipstock var blitt satt. Disse knekkene kalles doglegs, og graden av dogleg er målt som antall grader avviket forandrer seg langs 30 fot av brønnbanen (ca. 10 m).

En dogleg på mer enn 5 grader per 30 fot er lite ønskelig da borestrengen bøyes så mye at den kan svekkes. Når den roterer vil strengen bøyes fram og tilbake, en gang for hver omdreining, og en kan få tretthetsbrudd i stålet. I tillegg kan det bli vanskelig å få de stivere foringsrørene ned gjennom en slik dogleg. Borestrengen vil også klemmes mot hullveggen, noe som gir økt slitasje, samt at strengen kan grave seg inn i formasjonen og lage en spalte som er for trang for vektrørene og borekrona. Denne spalten kalles key-hole. Når strengen dras opp kan vektrørene eller borekrona kile seg fast der.

Merk at med avvik mener en alltid avvik fra vertikal retning, avviksvinkelen er derfor vinkelen mellom brønnbanen og den vertikale retningen. Og på grunn av at en trodde en alltid boret rett ned betyr dybden av brønnen fremdeles lengden av borestrengen. Den virkelige dybden kalles sann vertikal dybde (true vertical depth).



Figur 16 Forskjellige typer brønnbaner vist skjematisk.

Da en begynte å produsere fra plattformer ute i sjøen ble det viktig å kunne bore avviksbrønner, det gjorde det mulig å bore mange brønner til forskjellige deler av reservoaret fra samme plattform. Disse brønnen kalles også rekkevidde brønner, da hensikten med dem er å

rekke så langt bort fra plattformen som mulig. De har gjerne S-form, da en fremdeles ville gå mer vertikalt gjennom reservoaret, som en pleide med en vertikal brønn, se Fig. 16.

Med etter hvert bedre styringsmuligheter for boreretning og måleutstyr nede i strengen ble det mulig å bore mer presist, og en begynte å legge brønner langs reservoarlagene, såkalte horisontale brønner. En fikk da med samme brønn produsert fra en mye større del av reservoaret, slik at en slapp å bore så mange brønner. Selv om en slik horisontal brønn blir lengre og krever mer (dyrt) utstyr ble dette ofte billigere. I alle fall fra plattform hvor boretiden betyr mye mer enn på land (plattformleie, dyrere bemanning osv.), og hvor en i alle fall ville ha boret rekkeviddebrønner for å nå fjerne deler av reservoaret.

For å finne brønnbanen til en brønn måles nede i brønnen, for minst hver 100 m (lovbestemt på norsk sokkel), avviksvinkel og retningen (kompassretningen) brønnen går i. Dette kan gjøres ved å dra opp borestrengen og senke ned måleutstyr på kabel (wireline), eller ved hjelp av måleinstrumenter montert i BHA. For å øke nøyaktigheten på disse retningsmålingene stanses all boring så strengen står i ro (slampumpa stanses så slammotoren ikke roterer, og top drive stoppes så borestrengen ikke roterer). Ut fra disse målingene, og at en vet dybden (borestrengslengden) ved hver måling, kan posisjon av hvert målepunkt beregnes. Dermed kan brønnbanen finnes. Ofte vil en prøve å bore etter en på forhånd planlagt brønnbane, disse målingene vil da vise hvor godt en klarer å følge den planlagte banen.

SIKRING AV BRØNNEN

Trykkforhold i og rundt brønnen

Nede i formasjonen er det fire trykk og spenninger som er viktige:

1. Overlagringstrykk P_O ; dette skyldes vekten av all masse over punktet hvor en måler overlagringstrykket, havvann, bergarter og fluid i eventuelle porer. Det er mer korrekt å kalle det en materialspenning i formasjonen, med vertikal retning.
2. Horisontale spenninger P_H , disse skyldes primært overlagringstrykket. Vekten av alt over gjør at formasjonen prøver å ekspandere horisontalt, men det kan den ikke og det blir en horisontal kompresjonsspenning som vanligvis er noe mindre enn den vertikale. Hvor stor denne horisontale spenningen blir avhenger av material-egenskapene til bergarten. Omtrentlige verdier for forskjellige bergarter er:

	<i>Fraktureringstrykk</i>	<i>Poretrykk</i>
Salt:	$P_H = 1.00 P_O$	Salt har ikke porer
Leirskifer:	$P_H = 0.80 P_O$	$0.4 P_O - 0.8 P_O$
Sandstein:	$P_H = 0.60 P_O$	$0.4 P_O$
Kalk:	$P_H = 0.51 P_O$	$0.4 P_O$

I tillegg til dette har en mulige bevegelser i jordskorpa, som horisontale forskyvninger, forkastninger, osv. Dette kan også gi horisontale spenninger, både positive og negative, i tillegg til de som skyldes vekt, og de kan dermed både øke og redusere verdiene gitt ovenfor. Disse tilleggsspenningene er oftest retningsbestemte, slik at de horisontale spenningene varierer med retningen. Det kan vises at vi da har en minste og en største horisontal spenning som alltid står vinkelrett på hverandre. I alle andre retninger varierer horisontal spenning jevnt mellom disse to verdiene.

3. Fraktureringstrykket P_F er lik den minste av spenningene i formasjonen. Når trykket i brønnen overstiger den minste spenningen presses sprekker i formasjonen åpen og slammet i brønnen strømmer inn. Når en av de horisontale spenningene er minst åpnes sprekken i horisontal retning, selve sprekken er da vertikal. Hvis det ikke er sprekker må det et lite ekstra overtrykk til for å rive opp formasjonen, men det er vanligvis lite: $P_F = P_{Hmin} + \Delta P_R$, hvor ΔP_R er trykket som skal til for å rive av formasjonen. En slamkake kan også bidra til å øke fraktureringstrykket litt.
4. Poretrykket P_P er trykket av fluid (vann, olje og/eller gass) i et eventuelt poresystem i formasjonen, det aller meste er vann. I permeable formasjoner, som sandstein og kalk, vil alle trykkforskjeller som ikke skyldes statiske trykkforskjeller på grunn av høydeforskjeller jevnes raskt ut. I slike reservoarer er det som oftest noen steder forbindelse til overflaten. Poretrykket er da stort sett det samme som i en kontinuerlig vannsøyle til overflaten, med vann av samme tetthet som i formasjonen. Dette kalles normalt poretrykk. Vanntettheten varierer med sted og dybde. Vann løser opp salt i formasjonen, og dess dypere og varmere det er, dess mer salt kan løses opp. Vannet, som kalles formasjons-vann, vil da stort sett ha økende tetthet med dybden.

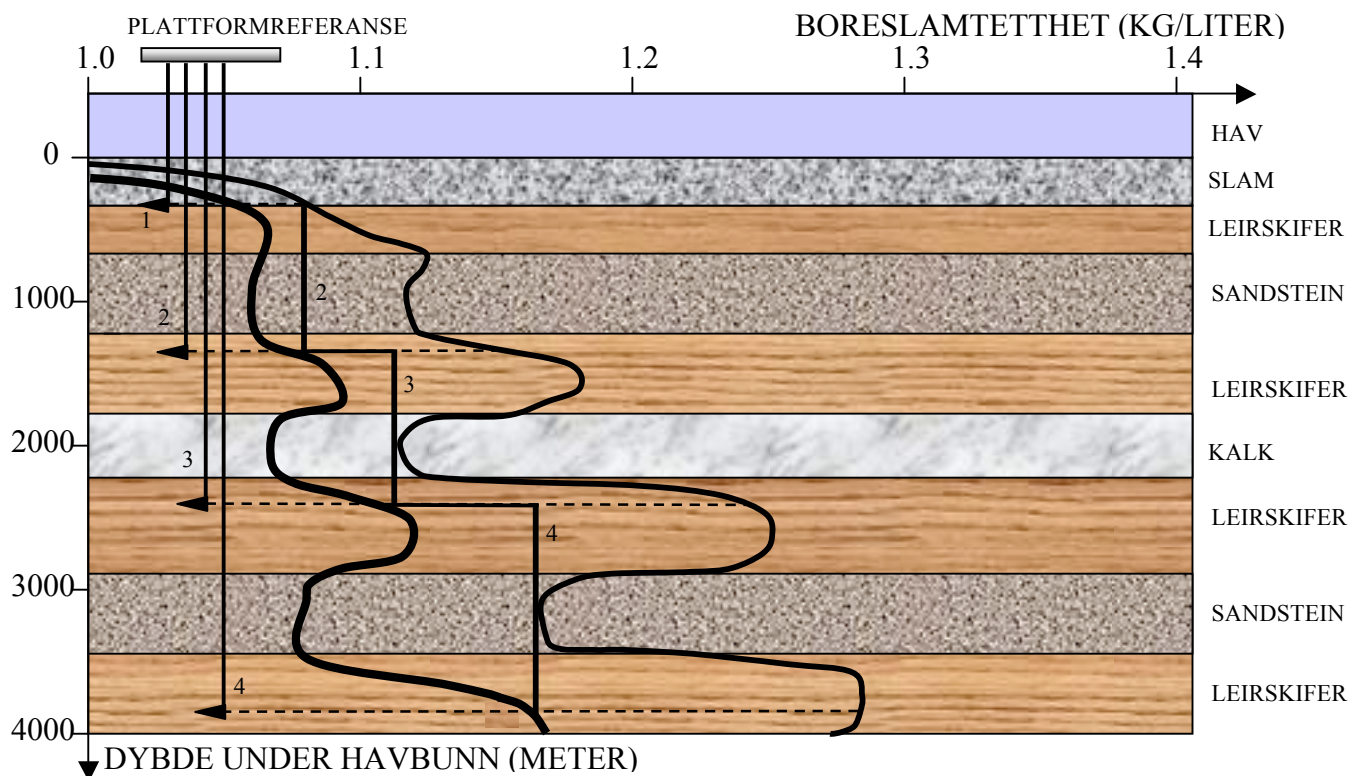
For tette formasjoner, som leirskifer, er det et poresystem med vann, men permeabiliteten er så liten at trykkforskjeller kan ta mange hundre millioner år på å jevne seg ut. Når poresystemet komprimeres over geologiske tider ved at nye masser lagres oppå formasjonen, slipper ikke overskuddsvann ut, og poretrykket kan øke til opp mot fraktureringstrykket. I leirskifer kan derfor poretrykket være hva som helst mellom poretrykket i reservoarbergart i samme dybde og fraktureringstrykket. I et lag med leirskifer, med reservoarbergarter over og under, er poretrykket i forhold til normaltrykket gjerne størst midt i laget, og avtar ned mot normaltrykket der leirskiferen grenser til reservoarbergartene.

Av disse trykkene er det de to siste som har størst betydning ved boring. Ved vanlig boring må trykket i den usikrede delen av brønnen, som er gitt av dybde og tetthet av boreslam, overalt ligge mellom poretrykket og fraktureringstrykket. Med sikret menes her at det er satt foringsrør. Ved frakturering tapes boreslam inn i sprekker, og volumstrøm opp annulus reduseres. Det reduserer eller stanser helt transportkapasitet av borekaks. I tillegg er boreslam dyrt, alt som tapes må erstattes med nytt slam. Dette er en helt uholdbar situasjon. Når brønntrykket er mindre enn poretrykket strømmer det reservoarfluid inn i brønnen. Det gjør slam i annulus lettere, noe som senker trykket og øker innstrømningen. Dette fører til at en helt kan miste kontrollen og få en utblåsing.

Nå er det i områder med leirskifer at poretrykket er høyest. Her får en ikke særlig innstrømming av formasjonsfluid, da formasjonen er for tett til det. Men hvis poretrykket er høyere enn brønntrykket kan leirskiferen sprenges ut av overtrykket i den og rase inn i brønnen. Det må også unngås.

Når en borer vil det bli vanskeligere å unngå disse problemene etter hvert som den usikrede (åpne) brønnseksjonen blir lengre, og til slutt umulig. Et boreslam som er tungt nok til at det overalt gir høyere trykk enn poretrykket vil samtidig være så tungt at det minst ett sted gir frakturering. En må da stanse boringen og sette foringsrør, dermed er brønnen sikret i hele den utborete lengden. En kan nå fortsette boring med en mindre borekrone, den må kunne gå ned gjennom det sist satte foringsrøret. Når denne situasjonen igjen oppstår må nytt foringsrør settes, osv.

For å lette valg av boreslamtetthet plottes gjerne poretrykk og fraktureringstrykk som funksjon av dybden (vertikal akse), hvor horisontal akse gir tetthet av slam som gir disse trykkene. Figur 17 viser et slikt plott. Siden toppen av slamsøylen er på pumpedeckket vil plottet være avhengig av hvor dypt havet er, og hvor høyt pumpedeckket er over havoverflaten. Så hvis en fjerner plattformen og setter en ny der med en annen høyde må en lage et nytt plott.



Figur 17 Poretrykk og fraktureringstrykk som funksjon av dybde under havbunn. Trykkene er vist indirekte, som tetthet av boreslam i brønnen som gir det aktuelle trykket. Boreslam i brønnen må ha en tetthet som gjennom hele den åpne brønnseksjonen, når det ikke står foringsrør der, ligger mellom de to kurvene. Dette gjelder ikke ledeforingen som slås ned eller bores med vann som ikke returneres til plattform. Mulig valg av boreslamtetthet som gir maksimum dybde for hvert rør er vist, samt i hvilke dybder brønnsikringsrør da kan settes (dybde av hvert rør er vist med en vertikale strek avsluttet med en liggende trekant, spissen viser dybden).

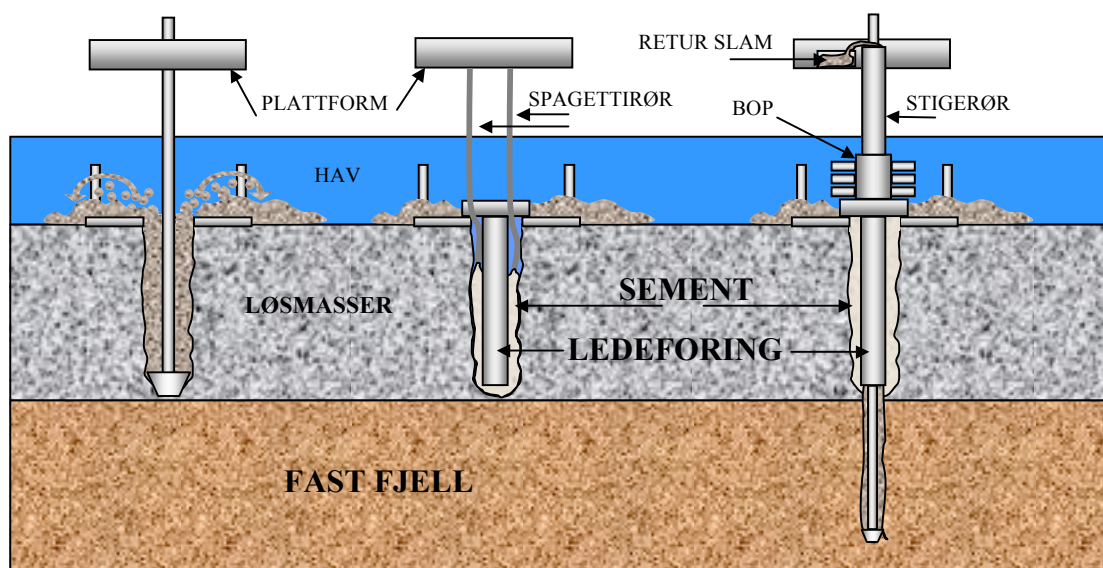
Brønnsikringsrør – ledeforing, foringsrør og liner

Brønnsikringsrørene settes i utborede brønnseksjoner (med konstant diameter) for å sikre brønnen, og å kunne isolere reservoarer fra hverandre og fra overflaten. Nødvendighet av sikring mot frakturering og innstrømning er diskutert i forrige seksjon. En åpen brønn som krysser to eller flere reservoarer vil lage forbindelse mellom disse og gjøre det mulig for fluid i ett reservoar å strømme inn i et annet. Dette er spesielt uheldig hvis det er reservoarer med olje eller gass. En god del av det som strømmer fra ett reservoar til et annet vil tapes og bli umulig å utvinne (her må en inn på reservoarteknikk for å forklare dette). Gass og olje som

strømmer opp i brønnen vil også kunne trenge ut rundt brønnehodet (hvis det står på havbunnen), dette er en nødt til å unngå.

Hvis det bare settes ned et rør i brønnen vil det fremdeles være mulig for fluid å strømme i ringrommet mellom røret og brønnveggen. For å sikre mot slik strømning sementeres brønnsikringsrørene fast, enten helt eller delvis. Denne sementeringen støtter også opp brønnsikringsrøret, men det er ikke hovedgrunnen til sementering.

Det er tre forskjellige navn på brønnsikringsrørene, ledeforing, foringsrør og liner. Disse har i prinsippet helt lik konstruksjon, navnene gjenspeiler rekkefølge, dimensjon (ytre diameter) og opphenging (liner). Foringsrør er brønnsikringsrør med diameter 20" (tommer) eller mindre, og som henger fra brønnehodet. Liner er et foringsrør som henger fra bunnen av et annet (større) foringsrør, dette reduserer mengde stål som brukes til å sikre brønnen. Det første brønnsikringsrøret som settes kalles ledeforing, i Nordsjøen er det også ofte større enn 20", gjerne 30". Figur 18 viser typisk boring og sementering av de første brønnsikringsrørene fra en flyttbar plattform.



Boring med 36" borekrone med sjøvann som boreslam, uten retur til plattform.

Ledeforing satt ned og festet i monterte rørholder. Sementering med spagettirør

BOP og stigerør montert, videre boring med 26" borekrone

Figur 18 Boring og plassering av ledeforing i brønnen fra flyttbar plattform, samt videre boring av neste seksjon av brønnen. Sementering av ledeforing med spagettirør er også antydnet.

Det første hullet, til ledeforing, er praktisk talt umulig å bore med retur av slam til plattformen. Den øverste delen av havbunnen er løsmasser (typisk 200 – 300 m) med både poretrykk og fraktureringstrykk omtrent lik trykket av sjøvann ned til hulldybden. Da plattformen er høyere enn havoverflaten gir en retur opp til plattformen et trykk som er høyere selv om en bruker rent vann. Det er to løsninger. Fra fast plattform slås (pæles) ledeforingen ned i løsmassene. En sikrer dermed brønnen *før* boringen starter, samt at en slipper sementering av ledeforingen. En borer så ut løsmassene inni ledeforingen med retur opp til plattformen. Fra flyttbar plattform bores typisk et 36" hull uten retur av boreslam. Som slam brukes sjøvann, slik at havet ikke forurenses, se Fig. 18. Med retur rett opp i havet blir

trykket i brønnen sjø vannstrykket i hele hullet, pluss friksjonstrykket, men det er ubetydelig. Utboret masse avsettes på havbunnen rundt hullet. Så settes ledeforing, festes til brønnehodet som her står på havbunnen, og sementeres fast ved å dumpe sement direkte i annulus ved hjelp av mindre rør (spagettirør).

Videre boring er identisk for fast og flyttbar plattform. Neste hullstrekning bores typisk med 26" borekrone, typisk i fjell ned til 600 – 800 m dybde. Før boring startes settes BOP på brønnehodet. Her brukes boreslam med tilsetning (vektstoff og leire/polymer) med retur til plattformen. På fast plattform skjer retur i ledeforingen, på flyttbar gjennom stigerøret som settes fra BOP på havbunnen og opp til plattformen. Mellom BOP og stigerør er det en fleksibel kobling slik at plattformen kan drive av noe uten stigerøret blir bøyd/knekket. Hvis uvær gjør det umulig å holde plattformen over brønnen trekkes borestrengen, BOP stenger brønnen, og stigerøret kobles fra BOP slik at det blir med plattformen.

Når en setter ned foringsrør eller liner er det skrudd fast en foringsrørsko i bunnen av røret. Den er avrundet slik at røret lettere glir forbi kanter og andre ujevnheter i hullveg-gen. Ved videre boring må en bore gjennom denne skoen. Den er derfor lagd av et materiale som en standard borekrone lett kan bore gjennom, for eksempel aluminium eller hardgummi.

I bunnen av skoen er det en enveisventil som slipper væske i foringsrøret ut hvis trykket inni røret er større enn på utsiden, men ikke andre veien. Dette gjør at en kan sette ned foringsrør uten å ha det fullt med boreslam, dermed blir det ikke så tungt å håndtere. Når en senker foringsrøret vil boreslam som fortrenge strømme ut på toppen, rundt dette foringsrøret, og ned i slamsystemet (som ved boring). Hvis en vil ha slam inni røret må det pumpes inn etter hvert som en skrur på nye rørs lengder og senker røret.

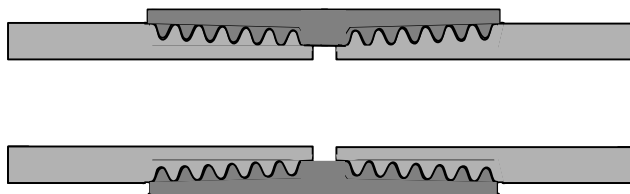
Foringsrørene produseres med et bredt utvalg av veggtykkelser og stålkaliteter for hver dimensjon (ytre diameter). De fleste er såpass tynnveggede at de flyter i boreslam hvis de ikke delvis fylles med slam. De med tykkeste vegg kan synke uten boreslam i røret. Uansett må en passe på, hvis nødvendig, at det må være så mye slam i røret at det ikke kollapser fordi overtrykket på utsiden blir for stort.

For eksempel, for 20" foringsrør med veggtykkelse på 11.1 mm må en fylle litt mer enn 40% av røret med slam for at det skal synke når slamtettheten er 1100 kg/m^3 . Men for dette røret er kollapstrykket bare 36 bar ($3\,600\,000 \text{ Pa}$), så med en sikkerhetsfaktor mot kollaps på for eksempel 1.3 må overflaten av slam inne i røret ikke stå dypere enn $h = (P_Y/1.3)/(\rho_m g) = (3\,600\,000/1.3)/(1100 \cdot 9.81) \text{ m} = 256.6 \text{ m}$ under pumpedekket. Hvis 60% av rørlengden er fylt med luft (40% med slam) blir dette en total lengde av foringsrøret på $256.6\text{m}/0.6 = 428 \text{ m}$, fra plattformen og ned. Skal det dypere må det fylles mer slam i røret enn 40% av lengden. (Typisk dybde for 20" foringsrør er 700 m).

Nå er det godt mulig at brønnen ikke er vertikal og helt rett. For avviksbrønner og brønner med doglegs vil foringsrøret klemme mot veggen i brønnen. Dette gir friksjon, og siden heisespillet ikke kan klemme røret ned må en fylle i mer slam til røret blir så tungt i boreslam at det glir ned av egen vekt. Heisespillet holder da igjen hvis det skulle gli lettere igjen.

Foringsrørene produseres, som rørene i borestrengen, i lengder på ca. 10 m. Når en streng med foringsrør senkes ned, forlenges strengen ved å koble på nye rørlengder enkeltvis. Standard kobling er koniske gjenger slått utvendig i selve rørgodset i begge ender. Sammenkoblingen skjer ved hjelp av en muffe, som vist i Fig. 19. Gjengene vist her er API

standard med avrundede gjenger. Denne koblingen er alltid svakere for strekk enn selve røret, den tåler gjerne 60 – 70 % av det røret tåler. Merk at for hver kobling er det nå dobbelt sett med gjenger, dette øker muligheten for lekkasje.



Figur 19 API kobling for foringsrør, med avrundede gjenger. Gjengene er dreid rett inn i selve røret, slik at en slipper å sveise på en koblingsboks. En muffe med innvendige gjenger kobler rørene sammen. Det finnes også koblinger med firkantede gjenger eller andre spesialgjenger, disse er sterkere.

Det finnes imidlertid koblinger med firkantgjenger eller andre typer spesialgjenger som tåler omtrent det samme som røret selv, disse er noe dyrere, men brukes så å si alltid i Nordsjøen. Noen av disse spesialkoblingene bruker ikke muffe, men har koblingsboks sveist på ene enden av røret. Dermed får en bare ett sett med gjenger, som for borerørene. Dette blir betydelig dyrere. Uansett koblingstype er det alltid (minst) samme indre diameter i koblingen som i røret ellers for å unngå at muffe eller koblingsbokser på neste rør hefter seg fast på innsiden av røret.

Typiske foringsrør dimensjoner og dybder brukt i Nordsjøen, samt dimensjon på borekroner som blir brukt til å bore hull for røret er vist i tabellen under. Føringerne her er at borekrona må være liten nok til å gå ned gjennom sist satte rør, samt så mye større enn neste rør at det er mulig å pumpe sement inn i ringrommet mellom boret hull og neste rør. Er ringrommet for trangt blir friksjonstrykkfallet i sementslurrien for stort, dette kan frakturere formasjonen.

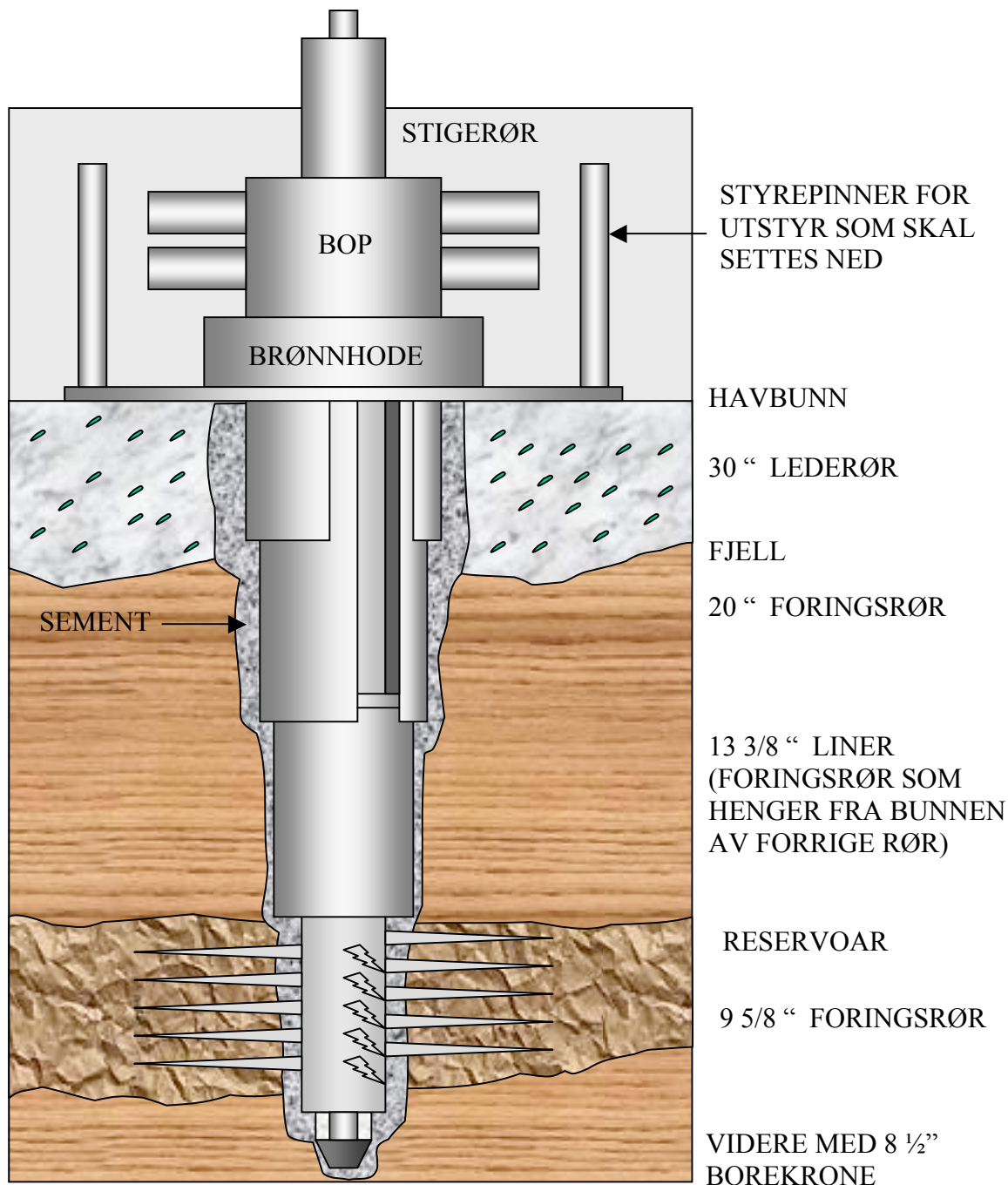
Hulld.	Rørdiam.	Veggtk. mm	Masse (kg pr. m.)	Dybde (m)	Navn
36"	30"	12.7 – 25.4	234.6 – 461.3	200 – 300	Ledeforing
26"	20"	11.1 – 16.1	139.9 – 197.9	600 – 800	Forankringsforing
17 ⁵ / ₈ "	13 ³ / ₈ "	8.4 – 13.1	71.5 – 107.1	Varierende	Mellomforing
12"	9 ⁵ / ₈ "	7.9 – 19.1	48.0 – 106.8	Varierende	Bunnforing
8 ¹ / ₂ "	7"	5.9 – 16.3	25.3 – 65.4	Varierende	Reserve

Tabell over vanlig brukte rør for å sikre brønnen, samt vanlig område for dybde. For hvert rør er de mest brukte veggtykkelsene vist, samt masse per meter som dette gir. Merk at bare variasjonsområde for veggtykkelse og masse er gitt, det finnes mange dimensjoner mellom de ytterpunktene som er vist. Også vanlig borekronediameter for boring av hull til foringsrøret er vist (første kolonne). Vanligvis vil en prøve å komme ned til reservoaret med 9⁵/₈" foring slik at en kan bruke 7" produksjonsrør.

Resultatet av å sette foringsrør på dette viset er vist i Fig. 20. Her er de ytterste rørene skåret opp for å vise at rør nummer tre er hengt av i bunnen av forrige rør, ikke fra brønnehodet. Det er dermed en liner. En rørsesjon som henger fra forrige rør kalles liner, selv om den er satt sammen av vanlige foringsrør. Det innerste røret henger fra brønnehodet og er dermed et foringsrør.

Det er ganske vanlig at siste sikringsrør henger fra toppen av brønnen, dette gjør brønnen sikrere mot lekkasje. Tidligere rør har borestrengen gått gjennom, dermed er de blitt utsatt for slitasje mot denne, noe som øker muligheten for lekkasje. Etter at et brønnsikringsrør er satt

ned blir det trykktestet, men det er mest for å se at koblingene er tette. Slitasje under boring blir det utsatt for senere, etter trykktesten, når det er sementert fast og det bores videre. Det finnes metoder til å reparere foringsrør som lekker.



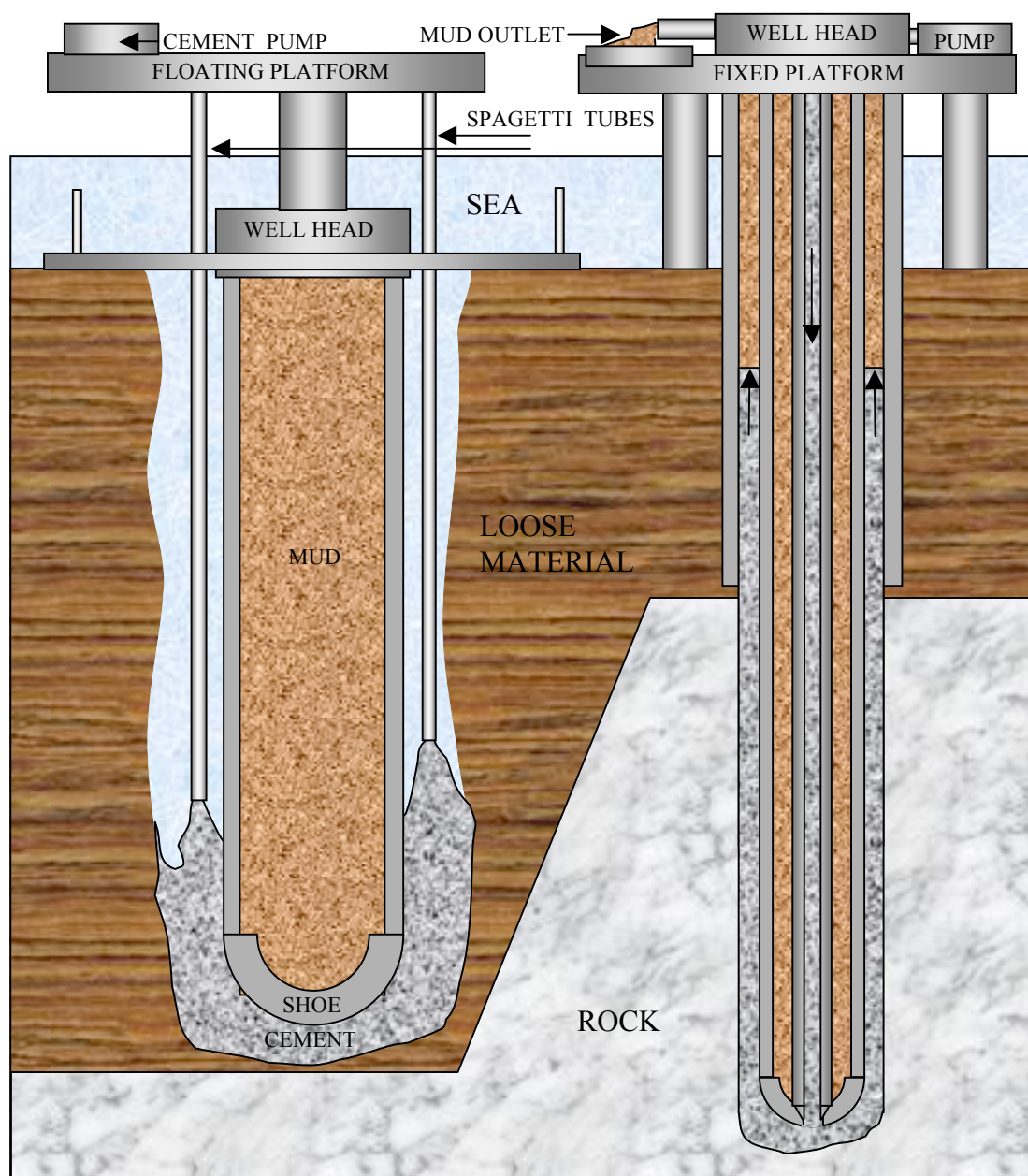
Figur 20 Ferdig satte brønnsikringsrør; ledeforing, foringsrør, liner og innerst foringsrør. Det siste er perforert inn i et reservoar. Det er muligens produsert ferdig siden man nå er i ferd med å bore videre, kanskje til et annet reservoar som ligger dypere. Merk at siden brønnhodet står på havbunnen har en her sannsynligvis produsert til flyttbar plattform eller til et produksjonsskip. Alle høyder under havbunnen er naturligvis sterkt redusert i forhold til diametrene. De to øverste rørene er tenkt skåret opp for å vise topp liner og sist satte foringsrør.

Brønnsikringsrørene må være sterke nok til ikke ødelegges under kritiske situasjoner som kan oppstå, både for overtrykk inni (sprengningstrykk), overtrykk på utsiden (kollapstrykk), strekk (avrivning), og aksiell kompresjon (bukling). Nå er både ytre diameter og lengde bestemt av andre forhold, som diskutert tidligere. De gjenstående beregningene bestemmer veggtykkelse og stålkvalitet for å sikre at de tåler belastningene de kan utsettes for. Dette kalles dimensjonsberegninger. De verste belastningene de med rimelighet kan utsettes for kalles de dimensjonerende belastningene. For foringsrør er det gjerne:

- Sprengningstrykk. Under boring videre treffes et reservoar med gass under høyt trykk. Den strømmer inn i foringsrøret og fortrenger boreslam ned og inn i reservoaret, slik at det bare blir gass i røret. Nå begrenses trykket av fraktureringstrykket under foringsrøret, hvis gasstrykket er større enn dette lekker gassen ut i sprekker som dannes ved frakturering. Siden gass er lett får en ikke særlig trykkfall opp røret, dermed får en i verste fall et trykk inne i røret som er lik fraktureringstrykket. På toppen er trykket på utsiden null, dermed: Røret må tåle et sprengningstrykk lik fraktureringstrykket i formasjonen under bunnen av røret.
- Kollapstrykk. Under videre boring treffes en lavtrykkssone. Boreslam i sikringsrøret renner ut der. Det er vanlig å regne at overflaten av slam i verste fall kan synke ned 40% av hele rørlengden. Som verste fall regner en også med at sementeringen har vært mislykket slik at på utsiden av røret står det boreslam. I en dybde på 40% av rørlengden har en da null trykk på innsiden og trykket av en slamsøyle på 40% av rørlengden på utsiden, dette gir verste kollapstrykk.
- Aksielt strekk. Dette er i første omgang vekten av røret. Hvis sementeringen har vært mislykket står røret i slam som over tid kan degenerere, vekstoffet ramler ut og væsken rundt røret får tettheten til vann, eller olje. Oppdriften blir dermed redusert. Aksielt strekk beregnes som for borestrengen, med oppdrift i vann eller olje hvis en har oljebasert boreslam. Største aksielle belastning blir likevel som oftest under sementering, med foringsrøret delvis fylt med sementslurry under nedpumping, før den trenger ut i annulus. Oppdriften er da i slam som ikke er degenerert (det har det ved sementering ikke vært tid til), og med vekten av sement i røret minus vekten av slam som slurryen har fortrent i tillegg til vekten av røret selv, beregnet med oppdrift i slam.
- Aksiell kompresjon. Før brønnen brukes vil det vanligvis være bare strekk i røret, ikke kompresjon. Med ved produksjon vil de varme reservoarfluidene (olje/gass) som strømmer opp gradvis varme opp foringsrøret, dermed vil det utvide seg termisk, og vi kan få aksiell kompresjon. For å beregne dette må en kjenne reservoartemperaturen og helst termisk ledningsevne for formasjonen for nøyaktig beregning.
- Bøyebelastning. Der røret passerer en dogleg vil det tvinges til å bøye seg, dette gir både ekstra aksielt strekk og aksiell kompresjon i rørveggen, i tillegg til de andre belastningene. For å beregne dette må en kjenne brønnbanen.

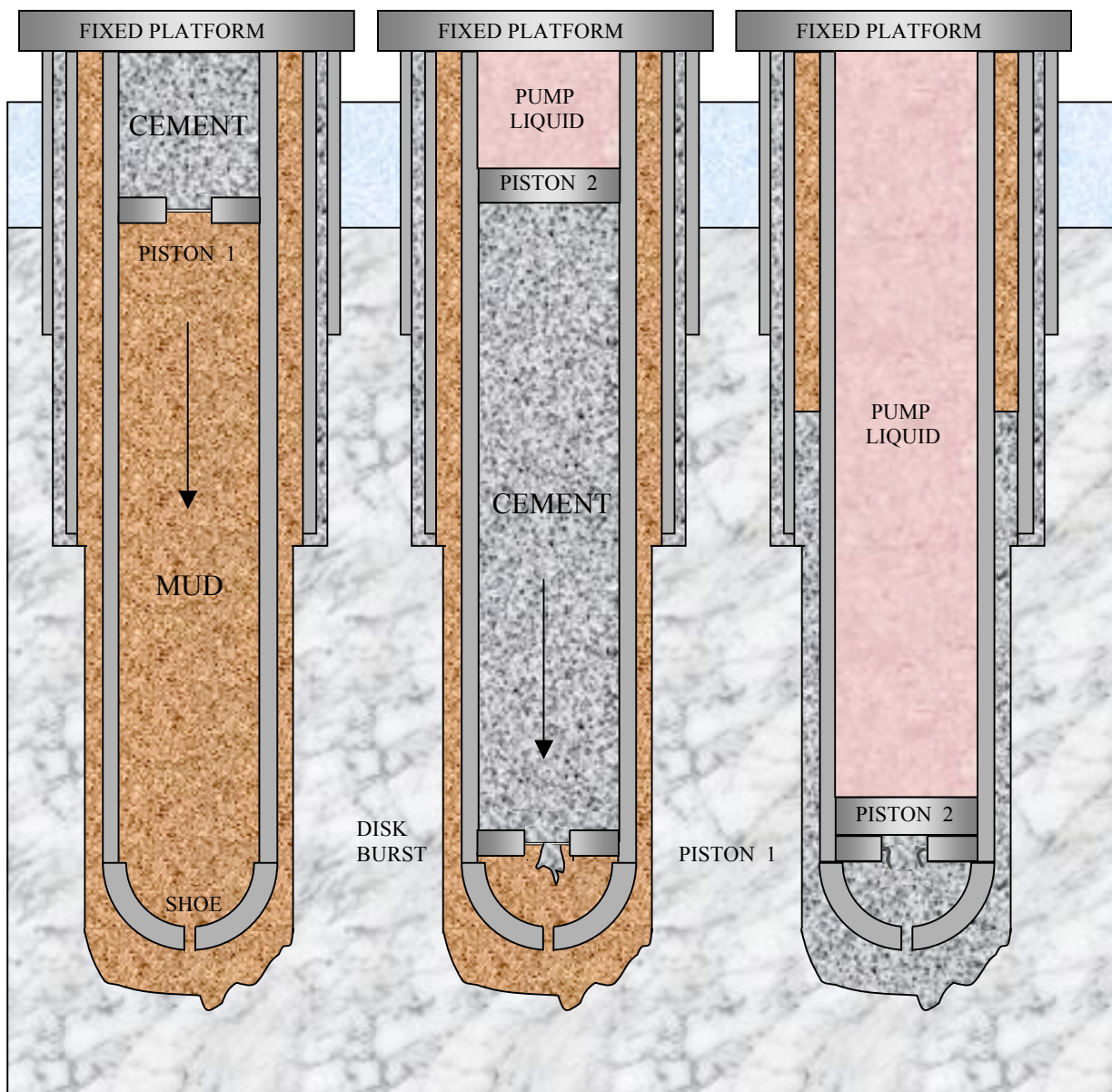
Sementering av ledeforing er delvis vist skjematisk i Fig. 18. Figur 21 viser dette tydeligere, samt for neste sikringsrør som ofte er et 20" foringsrør. For slike store foringsrør brukes en "stinger", et borerør settes ned i foringsrøret og ned i en kobling i foringsrørskoene. Sementslurryen pumpes ned borerøret, gjennom enveisventilen i skoen og ut i ringrommet rundt foringsrøret hvor den stiger opp og (ideelt) fortrenger boreslammet der. Sementslurryen har gjerne større tetthet enn slam rundt røret, slik at slam holder seg over slurryen. Når nok

sement er pumpet ned fortsettes pumpingen med slam. Den skyver all slurry ned og ut i annulus før pumping stanses, borestrengen trekkes opp, og sementen får stå i ro og stivne og herde før boring fortsetter (med mindre borekrone). Merk at sementslurryen ikke kan renne tilbake og inn i foringsrøret på grunn av enveisventilen i bunnen av foringsrørsskoen.



Figur 21 Sementering av ledeforing med spagettirør fra flytende plattform, og av 20" foringsrør fra fast plattform hvor ledeforingen er banket ned i havbunnen. Sementslurryen pumpes ned i en "stinger", ofte en borestreng med en kobling nederst som fester seg i foringsrørsskoen, gjennom enveisventilen i skoens og ut og opp i annulus mellom 20" foringsrør og hullveggen og lenger opp 30" ledeforing. Borestrengen settes ned etter at 20" foringsrør er satt ned og fylt med boreslam. I figuren er sementslurryen på vei oppover, den pumpes helt opp til brønnehodet. Etter at sementen er plassert trekkes borestrengen opp, enveisventil i skoens hindrer sementslurryen i å strømme tilbake og inn i foringsrøret. Tilsvarende operasjon utføres fra flytende plattform.

For de mindre foringsrørene pumpes sementslurryen ned gjennom selve røret, ut enveisventilen i bunnen, og opp annulus. Siden foringsrøret er fylt med boreslam må sementen fortrenge slammet nedover inni i røret. Dette er ustabil, da slurryen er tyngre enn boreslammet og de to væskene vil blande seg. En setter derfor et stempel på toppen av boreslammet, det skiller slam og slurry. En setter også et stempel på toppen av sementen for å kunne pumpe den helt ned og ut i annulus uten å få blanding. Over dette stemplet pumper en ned slam eller en annen væske (pumpevæske). Dette er vist skjematisk i Fig. 22.



Figur 22 Tre trinn i sentering av mindre diameter foringsrør. Trinn 1: Stempel 1 er satt ned på slamoverflaten og sementslurry pumpes ned. Trinn 2: All sementslurry er pumpet inn, stempel 2 er satt på toppen av sementen, og pumpevæske (slam) pumpes inn. Stempel 1 når bunn og fortsatt pumping øker trykket til metallplate bister. Trinn 3: Fortsatt pumping av pumpevæske skyver sementslurry ut av foringsrør og opp på utsiden til ønsket senteringshøyde. Prosessen stanser når stempel 2 når bunnen og ikke kommer lenger, trykket i foringsrøret øker da fort og indikerer stans i pumping.

Det underste stemplet har en åpning tettet med en tynn metallplate som brister når dette stemplet når bunnen og ikke kommer lenger. Fortsatt pumping inn i et nå konstant volum vil øke trykket til plata gir seg, og sementslurryen kan strømme gjennom denne åpningen og videre gjennom enveisventilen. Det øverste stemplet stanser pumpevæska slik at en er sikret at den ikke pumpes ut i annulus, under sementen.

De to stemplene er også av et borbart materiale (aluminium eller hardgummi), for ved videre boring må det nå bores gjennom de to stemplene i tillegg til foringsrørskoen og sementen i bunnen.

Det største problemet ved sementering er å få fjernet både slam og slamkake i ringrommet rundt foringsrøret, slik at det blir god kontakt mellom formasjonen og sementen, og sementen fyller hele ringrommet. For å få fjernet slamkaka pumpes det gjerne et tynnere slam som kan løse opp eventuell slamkake før sementering. Den kan også skrapes vekk ved at det monteres børster og lignende utenpå foringsrøret. Ved at foringsrøret beveges opp og ned og/eller roteres før sementeringen kan mye av slamkaka fjernes mekanisk.

Selv om slurryen er tyngre enn boreslam vil en få noe blanding mellom disse væskene når slurryen skyver slammet opp i annulus. Begge er kompliserte væsker med masse tilsetningsstoffer som ofte kan reagere uheldig med hverandre (for eksempel kan det føre til at sementen størkner for fort). For å slippe å modifisere sementblandinga med hensyn på dette pumpes det ofte en skillevæske eller forvask mellom de to, som ikke reagerer med noen av dem.

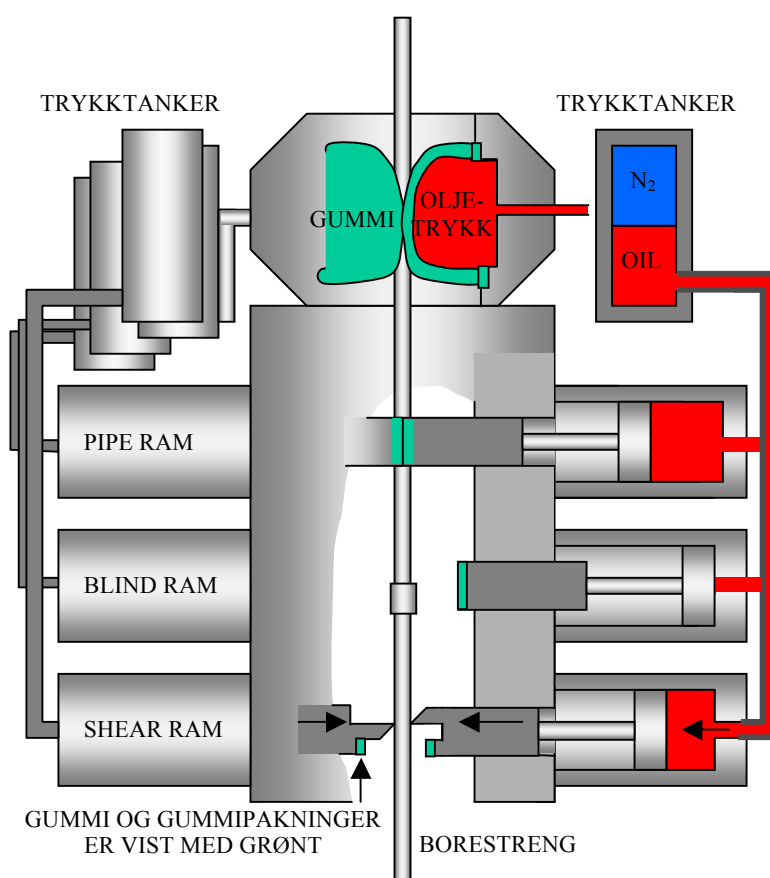
Et annet problem med sementering er at ren sementslurry har så høy tetthet ($1500 - 1600 \text{ kg/m}^3$) at en kan få frakturering i formasjonen mot ringrommet når sementen pumpes opp til ønsket høyde. En kan da gjøre sementslurryen lettere ved å tilsette bentonitt (leire). Den binder en god del vann slik at mer vann kan blandes i, dermed blir sementslurryen lettere. Men den blir også svakere. Det finnes andre tilsetningsstoffer, for eksempel Gilsonitt, et mineral med nesten samme tetthet som vann. Det fungerer som sand og gjør ikke sementen særlig svakere når det ikke er alt for mye av det. Et annet alternativ er å tilsette gass, for eksempel nitrogen, slik at det er masse små gassbobler i sementen, noe som gir en betydelig mindre tetthet.

For de to første brønnsikringsrørene, ledeforing og 20" foringsrør, sementeres det helt opp. For de senere foringsrørene klarer det seg å sementere godt over bunnen av forrige foringsrør, 200 – 300 m er vanlig. Hvis dette ikke går uten frakturering må det sementeres i to eller flere omganger. Hvis det er lengre strekninger med tett formasjon, som leirskifer, kan en også la være å sementere der.

Etter sementering kan en måle om sementeringen er god ved hjelp av ultralyd hvor en måler refleksjon av lydimpulser fra en sender. Prinsippet er at alle forandringer i tetthet gir refleksjon, større dess større tetthetsforskjellen er. Sement mot formasjonen gir svak refleksjon, men er det en slamkake imellom får en to kraftige refleksjoner. Er sementeringen dårlig kan det rettes på ved å frese hull i foringsrøret og presse inn sement under høyt trykk, ofte så høyt at det frakturerer formasjonen og sement presses inn i sprekkene. Fordelen er at da presses slamkaka inn først så en blir kvitt den. Dette kalles reparasjonssementering, eller sekundær sementering, eller trykksementering (squeeze cementing).

TRYKK – KONTROLL

Under boring kan det hende at poretrykket er høyere enn beregnet eller estimert, eller at trykket i brønnen blir lavere enn ønsket. Med høyere poretrykk enn brønntrykk vil det da strømme inn reservoarfluid. Disse er lettere enn boreslam, og ved at de fyller en del av annulus vil de redusere gjennomsnittlig tetthet der så statisk trykk i bunnen av brønnen synker. Men da strømmer det inn fortere, og tettheten i annulus synker raskere. Dette kalles en "kick". Dette kan fort komme ut av kontroll og en får en full blowout hvor reservoarfluid strømmer rett opp annulus og ut på pumpedeckket, og kan bli antent av en gnist eller noe annet. Resultatet er da katastrofalt. For å unngå dette er det under boring (unntatt er boring av hull til ledeforinga) alltid montert en BOP (Blow Out Preventer) på brønnehodet som kan stenge annulus rundt borestrengen, inni foringsrøret (når foringsrør er satt og sementert skal det ikke kunne komme opp noe i annulus rundt foringsrøret).



Figur 23

Skisse av BOP (Blow Out Preventer). "Pipe ram" tetter rundt borestrengen, det er vanligvis mer enn ett sett. "Blind ram" tetter hele brønnen når det ikke er borestreng i brønnen. "Shear ram" kapper borestrengen, nedre del av strengen trekker seg sammen og forvinner nedover slik at hele brønnen kan tettes under knivene, som med "blind ram". Skissen viser BOP under operasjon, øverste generelle tettesystem (gummikappe klemt sammen om strengen, dette gjøres først) er aktivisert, også "pipe ram" er utløst. Dette har ikke gitt god tetting, så nå er knivene aktivisert og er akkurat i ferd med å starte kapping av strengen. Energi for å utføre disse operasjonene er lagret i en rekke trykktanker med komprimert nitrogen. Når utløpsventil åpnes vil nitrogenet presse ut hydraulikkolje under høyt trykk og skyve inn stemplet den er koblet til.

BOP består av en stabel av forskjellige lukkemekanismer, derfor kalles den også BOP stack (= stabel). Øverst sitter en gummikappe som når det settes trykk på den sveller innover og klemmer om borestrengen. Det er den første som utløses hvis man oppdager at en kick er på gang. Men den tåler ikke så høyt trykk som de andre lukkemekanismene som på de kraftigste BOP stackene kan holde mot trykk på 1000 bar (15 000 psi). Disse er skiver (rams) som skyves inn av hydrauliske stempel, med gummipakninger hvor de møtes og klemmer mot hverandre. De glir i spor med pakninger så det blir tett rundt hele skiva. Hver skive har en utsparing i fronten som passer rundt halve borestrengen, slik at de tetter rundt den også. En bør ha to sett av slike, hvis en kobling tilfeldigvis står rett ut for den ene vil den andre fungere. Uansett er det sikrere med to. Hvis en ikke får tettet med disse må en bruke et sett med skjærskiver (shear rams) som kapper strengen og tetter mot hverandre. Da borestrengen er i strekk vil den nederste delen trekke seg sammen og gli ned et stykke, vekk fra skjærskivene. Hvis det ikke er en borestreng i hullet bruker en to skiver med rett front som bare tetter mot hverandre (blind rams). Det er altså minst fire sett med slike skiver eller rams. Det kan være flere, for å kunne tette om vektrørene også (minst ett sett med rams), og hvis en bruker borerør med forskjellig diameter (sjelden).

Når en har fått tettet annulus og stanset kicken kan en gjøre brønnen operativ igjen ved å pumpe ned et tyngre boreslam gjennom borestrengen (drepeclam). Det vil da fortrenge andre fluid i brønnen opp annulus og ut en spesialventil nederst på BOP (under lukkemekanismene). Dette boreslammet må være så tungt at når det fyller hele brønnen er trykket høyere enn reservoartrykket. Dermed kan BOP åpnes og boringen kan fortsette med det tyngre boreslammet. Det er denne prosessen vi skal se nærmere på her.

De to vanligste metodene en bruker kalles ”drillers method” og ”wait and weigh”. I den første fjerner en først innstrømmet reservoarfluid i annulus ved å fortsette å pumpe med slammet som en pumpet med når en fikk kicken. En åpner da ventilen nederst på BOP slik at det som finnes i annulus av slam og reservoarfluid kan strømme ut der. Mens en gjør dette kan drepeclam blandes opp. Under denne prosessen må ikke denne ventilen åpnes mer enn at trykkfallet over den trange ventilåpningen gir høyt nok trykk på toppen av annulus til at trykket i bunnen er høyere enn reservoartrykket, ellers vil mer reservoarfluid strømme inn. I denne fasen er gjerne pumperaten atskillig mindre enn under boring. Dette er fordi en skal få tid til å regulere på utløpsventilen. Når annulus er tømt for reservoarfluid stenges ventilen og slampumpa stanses.

Når pumpingen starter er BOP utløpsventil stengt. Trykket på toppen, inne i borestrengen, vil da raskt øke til en ny verdi som er tidligere statiske trykk pluss friksjonstrykkfallet inne i borestrengen, pluss trykkfallet over dysene i borekrona. Etter denne raske økningen vil trykket begynne å stige langsommere fordi en pumper inn i et lukket volum. Den noe langsommere trykkøkningen en nå ser skyldes at trykket øker i annulus. Det er ønskelig at trykket i annulus holdes litt høyere enn reservoartrykket under utsirkulering, dette ekstra trykket er en sikkerhetsmargin under utsirkuleringen.

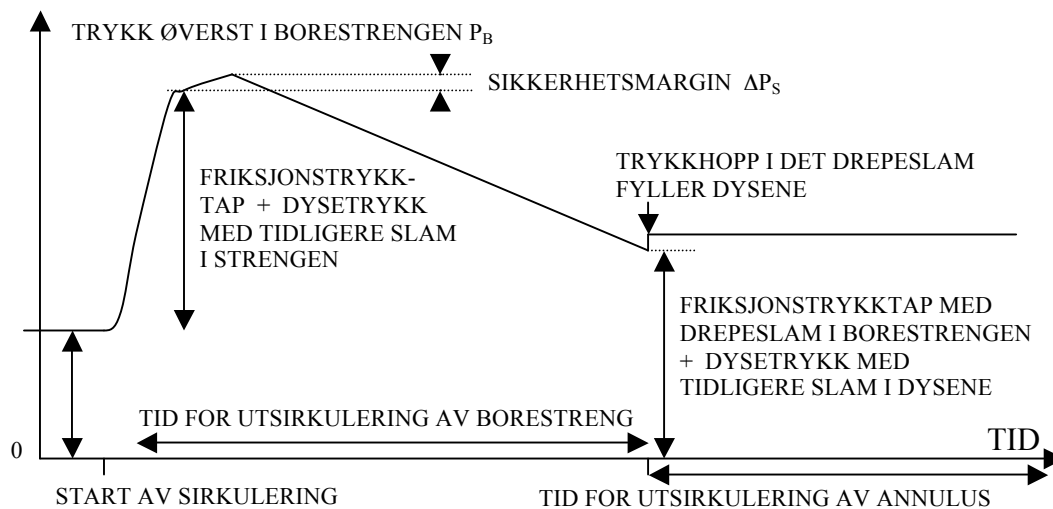
Når ønsket sikkerhetsmargin er nådd åpnes BOPventilen noe, åpningen reguleres så trykket i borestrengen (på toppen) holdes mest mulig konstant fra nå av, altså lik statisk trykk etter stenging av BOP, pluss friksjonstrykkfall i strengen, pluss dysetrykkfall, og pluss sikkerhetsmargin. Trykket i bunnen er da lik reservoartrykk pluss sikkerhetsmargin. Reguleringen består i at hvis trykket stiger åpnes utløpsventil mer, synker det stenges den mer. Det er i praksis umulig å holde konstant trykk på toppen under utsirkulering, det vil

fluktuere omkring ønsket verdi. Hvis det synker mer enn valgt sikkerhetsmargin vil trykket nede i brønnen synke under reservoartrykket, og ny innstrømning av reservoarfluid starter.

Det er tre viktige indikasjoner på at annulus er tømt for reservoarfluid:

1. En beregner volum av annulus og regner ut tiden en må pumpe for å pumpe ned dette volumet, og legger gjerne til noe ekstra tid for sikkerhets skyld. Når denne tiden har gått skal brønnen være tømt (pumpetid = volum/volumrate).
2. Når returnerende boreslam ikke lenger inneholder gassbobler og/eller oljeklatter, samt at målinger viser samme tetthet, viskositet og saltinnhold som i nedpumpet boreslam.
3. Når slampumpa slås av og utløpsventil lukkes, fremdeles med BOP stengt, er nå trykket på toppen av annulus det samme som trykket på toppen, inne i borestrengen. Merk at når det pumpes vil trykket i borestrengen være atskillig større enn i annulus.

Nå når brønnen igjen er stengt kobles innløpet på slampumpa over til tanken med drepeslam og pumping starter opp igjen, BOPventilen åpnes nok til at passe trykk i bunnen holdes (reservoartrykket pluss valgt sikkerhetsmargin), og en pumper til alt tidligere slam er sirkulert ut og hele brønnen er fylt med drepeslam. Under denne fase 2 er det mer komplisert å regulere trykket på toppen av borestrengen for å holde konstant trykk i brønnen. Etter hvert som drepeslam fyller borestrengen inni får en høyere statisk trykk på grunn av det tyngre drepeslammet, samt at friksjonstrykkfallet forandrer seg (ikke dysetrykkfallet, det skjer først når hele strengen er fylt med drepeslam og når dysene i bunnen).



Figur 24 Skjema for regulering av trykket øverst i borestrengen ved utsirkulering av tidligere slam (og eventuelt innstrømmet reservoarfluid) med drepeslam. Merk at tetthet til drepeslam er slik at ved stans pumping vil trykket på toppen være null med drepeslam i brønnen, idet trykket i bunnen da er lik reservoartrykket pluss sikkerhetsmarginen.

Med konstant pumperate vil friksjonstrykkfallet øke på grunn av drepeslammets høyere tetthet, hvis da viskositeten ikke er betydelig mindre enn i det tidligere slamm. Men økt statisk trykk av slamsøylen vil (vanligvis) dominere, og gir at trykket på toppen synker når det er konstant trykk i bunnen. Husk at trykket på toppen er trykket i bunnen minus statisk trykk av slamsøylen, og pluss friksjonstrykkfallet. En må på forhånd beregne denne trykkforand-

ringen, samt beregne hvor lang tid drepeslam bruker for å fylle strengen. En regulerer slik at trykket på toppen synker jevnt og når beregnet sluttverdi ved beregnet tid på å fylle borestrengen. Hvis en har beregnet tiden korrekt vil en da se at trykket på toppen plutselig øker litt på grunn av at trykkfallet i dysene øker når drepeslam fyller dem. Denne trykkøkningen reguleres ikke vekk, for den skyldes ikke trykkforandring i bunnen. Nå holder en dette trykket konstant under resten av utsirkuleringen hvor drepeslam fyller også annulus.

En avslutter pumping når det har gått lang nok tid til at hele brønnen er fylt med drepeslam, dette sjekkes ved å forsikre seg om at drepeslam begynner å strømme ut av BOPventilen, for eksempel ved å måle at tetthet og viskositet av returnert slam nå er det samme som for drepeslammet. Når en nå stenger slampumpa skal trykket både i topp borestreng og topp annulus synke til null. Drepeslammet som nå fyller brønnen skal jo være tungt nok til det alene er nok til å holde reservoartrykk (pluss sikkerhetsmargin) i bunnen, uten hjelp av ekstra trykk på toppen. Brønnen er da drept. BOP kan nå åpnes og boringen kan fortsette med drepeslam. Fra nå av kalles det ikke lenger drepeslam, det er jo bare vanlig boreslam med korrekt tetthet.

Ved metoden "wait and weigh" venter en med utsirkulering av reservoarfluid til en har fått blandet opp drepeslammet, dette kalles å veie opp slammet, derav navnet "vent og veie-metoden". Bakdelen med denne metoden er at gass og olje stiger i annulus fordi det er lettere enn slammet. Reservoarfluiden blir da utsatt for mindre trykk, gass ekspanderer og olje avgir gass. Gjennomsnittlig tetthet i annulus avtar og trykket på toppen av annulus øker. Dette skjer også når en sirkulerer ut reservoarfluid, men da går det fortere og annulus blir utsatt for høyt trykk i kortere tid. Fordelen er at en slipper å sirkulere ut brønnen to ganger, og enhver utsirkulering gir mulighet for feilregulering med innstrømning av mer reservoarfluid som resultat.

Utsirkulering skjer på nøyaktig samme måte som ved utsirkulering med drepeslam i fase 2 i den forrige metoden. At en nå har reservoarfluid i annulus spiller ingen rolle for reguleringen, da en ikke regulerer etter trykket i annulus. En annen fordel er at siden det nå er tyngre boreslam i annulus vil ikke trykkøkningen der, som når sitt maksimum idet innstrømmet reservoarfluid nærmer seg toppen av annulus, være fullt så stor som med utsirkulering med tidligere, lettere slam (fase 1 i "drillers method").

Indikasjonene på at brønnen er utsirkulert er de samme som for første metode, bortsett fra at tid for utsirkulering blir noe lengre. Nå må jo også borestrengen fylles med drepeslam i tillegg til annulus.

Hvis en ikke får stanset en kick og får utstrømning av gass som fort dekker hele plattformen, vil den sannsynligvis bli antent av et eller annet, en gnist kan være nok. Etter den eksplosjonen en da får med påfølgende brann i gassen og eventuelt oljen som strømmer opp blir det ikke mye brukbart igjen av plattformen. På grunn av varmen og kaoset av forvridde stålkonstruksjoner er den ikke særlig brukbar som base for slukningsoperasjoner. I verste fall synker hele plattformen og dekker det som er igjen av brønnsystemet med skrot. Det blir da vanskelig å komme til brønnåpningen på havbunnen. I aller verste fall mistes kontrollen over allerede produserende brønner som da vil bidra med sin produksjon av olje og/eller gass.

Den sikreste metoden til å få kontroll igjen over en slik løpsk brønn er å bore en drepebrønn. Dette gjøres fra en flyteplattform i trygg avstand fra flammene. Nå må det bores nøyaktig, for en tar sikte på å treffe blow out brønnen nede i reservoaret. En beregner ønsket brønnbane for

dette og borer etter denne. Usikkerheten i posisjonsbestemmelse av brønnbanen ligger med dagens instrumenter på typisk rundt 30 meter. Heldigvis er det nær nok til at en godt hører lyden av olje/gass som strømmer opp i brønnen som står og blåser med fullt reservoartrykk uten særlig mottrykk på toppen. En slik kraftig fluidstrøm bråker mye. En bruker da lytteutstyr til å styre boringen av drepebrønnen.

Det er ingen fare om en borer inn i den andre brønnen, slammene en bruker er tungt nok til at trykket nede i drepebrønnen er høyere enn reservoartrykket. Vanligvis bommer en med en meter eller to. Steinveggen mellom de to brønnene er da ikke sterkere enn at hvis en pumper opp trykket i drepebrønnen så vil veggen breste og en kan pumpe drepeslam inn i bunnen av den løpske brønnen. Dette vil til å begynne med blandes med reservoarfluid og blåses opp, men gjennomsnittstettheten i brønnen øker og friksjonstrykkfallet øker fordi nå strømmer mer væske opp brønnen. Dette øker trykket i bunnen og strømningsrate av olje/gass fra reservoaret avtar. Dermed blir større andel av fluid i brønnen drepeslam og trykket i bunnen øker mer. Denne prosessen fortsetter til innstrømning fra reservoaret stanser opp og nedpumpet drepeslam fyller hele brønnen. Den er nå drept og stabil.

Problemet her er at det er usikkert hvor lenge en må pumpe før brønnen er drept, en risikerer å gå tom for drepeslam. Det kan da være bedre å gå over til å pumpe sjøvann, pumper en fort nok (høyt nok friksjonstrykkfall opp brønnen) vil dette også etter hvert stanse innstrømning fra reservoaret og brønnen fylles med sjøvann. Men brønnen er ikke drept, hvis en stanser pumpingen vil friksjonstrykkfallet opp brønnen forsvinne, sjøvann alene er sjelden tungt nok til å gi reservoartrykk (helst litt mer) i bunnen, og dermed starter en ny utblåsning. En må ha drepeslam klart og gå over til å pumpe det når utblåsningen stanser. Nå trenger en bare nok drepeslam til å fylle den løpske brønnen, da er den drept og under kontroll.

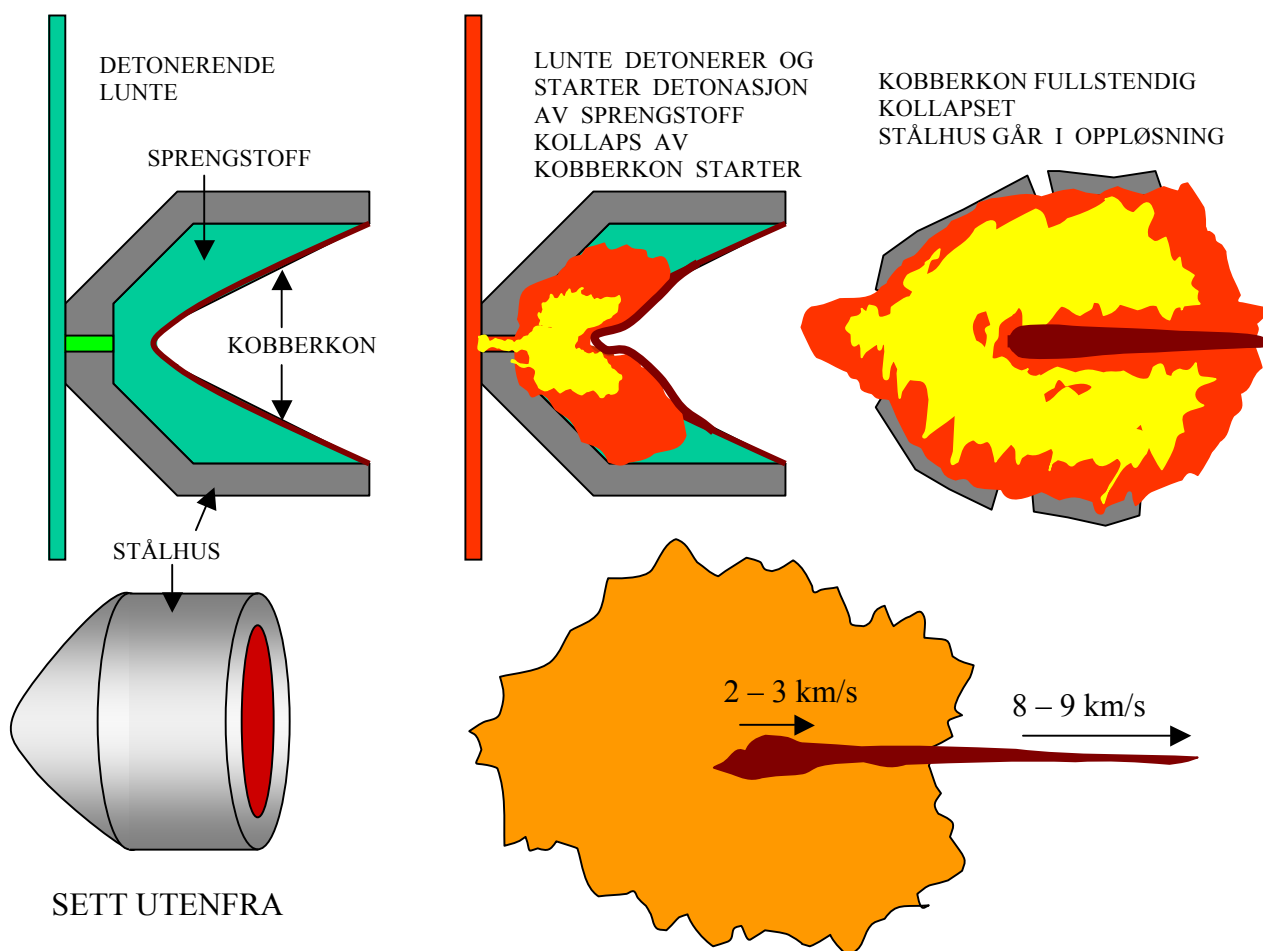
PERFORERING

En kan bore ned til reservoaret, sette foringsrør, og så bore gjennom reservoaret og avsluttet boreoperasjonen med det. Eventuelt bore ned til reservoaret og gjennom det, så sette foringsrør ned til reservoaret. En har da en brønn med åpent hull i reservoarsonen, olje og gass kan strømme inn i brønnen fra hele brønnveggen og opp brønnen hvor det i Nordsjøen alltid er satt et produksjonsrør med pakning før produksjon starter. Men som oftest settes foringsrør ned gjennom reservoaret også. For å få forbindelse med reservoaret skytes det en hel rekke hull i foringsrøret og innover i formasjonen. Dette kalles perforering. Grunnen til at dette foretrekkes er flere:

- En kan velge hvor en vil skyte hull, slik at en kan produsere fra utvalgte områder i reservoaret. Med åpent hull produseres det over hele reservoarhøyden, noe som kan gi uønsket gassproduksjon eller vannproduksjon, dette diskuteres i produksjonsteknologi.
- En kan regulere produksjonen fra forskjellige lag eller soner i brønnen ved å skyte få hull i områder med naturlig høy produksjon (høypermeable lag) og dermed (ofte) tidlig vanngjennombrudd, samt skyte mange hull i soner med naturlig lav produksjon (lavpermeable lag) og dermed liten sannsynlighet for tidlig vanngjennombrudd.
- Over tid kan enkelte soner (lag) i reservoaret som produserte olje få vanngjennombrudd og begynne å produsere mye vann. Perforeringene her kan da sementeres igjen slik at vannproduksjon reduseres. Eventuelt kan en i oljebrønn få uønsket gassproduksjon som kan reduseres på tilsvarende måte.

- En kan over tid åpne for produksjon fra soner som tidlig i produksjonen ikke ble perforert, men som etter hvert blir vurdert til å være lønnsomme, ved å re-perforere brønnen, skyte nye hull.
- Under boring gjennom reservoaret vil boreslam trenge ut i formasjonen og delvis tette porer. Det fører til sterkt reduksjon av permeabiliteten i reservoarbergarten rett rundt brønnen, typisk rundt en halv meter utover fra brønnveggen, og dermed til sterk reduksjon av produksjonsraten. Ved perforering kan en skyte hull gjennom dette skadede området og inn i uforurenset bergart. Dette vil kunne øke produksjonsraten opp mot det en ville hatt i en åpen brønn uten inntrengning av boreslam.

Tidligere skjøt en hull med kuler fra et lite kanonløp (dette måtte være kort nok til å kunne stå på tvers i brønnen). Nå bruker en rettede ladninger, egentlig et våpen som ble utviklet av militæret for å skyte hull i panseret på tanks. Det er en liten ladning omgitt av et solid stålhus unntatt i fronten hvor det er en tynn, svak vegg av sammenpresset metallpulver, oftest kobber. Denne er formet som en kjegle som stikker innover i ladningen. Størrelsen på stålhuset er 4 – 5 cm i diameter i alle retninger.



Figur 25 Tidssekvens av detonering av rettet ladning. Resultatet er en tynn kobberstråle som slynges ut med høy hastighet. Temperaturen på denne strålen er 200 – 300 grader Celcius. Kobberkonden er ofte laget av presset kobberpulver. Andre metaller kan også brukes, men kobber har vært vanligst. Det som er i veien for kobberstrålen presses hovedsakelig til side av trykket som genereres når strålen bremses, opp til 8 millioner bar hvis strålen stanses helt.

Ved detonering holder stålhuset lenge nok til at trykket fokuseres mot utsiden av kobberkjeglen som dermed kolliderer inn mot aksene hvor den bare kommer videre rett fremover. Trykket fra eksplosjonsgassene presser kobberet fram og inn mot aksene så det skvises framover i en tynn stråle med hastighet i fronten opp mot 10 km/sekund. Kobberstrålen ender bakover i en noe videre klatt med kobber som har en hastighet på ”bare” 2 – 3 km/sekund. Dette går så fort at kobberet ikke rekker å bli varmet opp noe særlig, typisk temperatur på kobberstrålen er 200 – 300 grader Celsius (det er en vanlig forestilling at dette gir en intens varm stråle som brenner hull, dette er fullstendig feil). Da fronten av strålen går fortere enn lenger bak tøyser den seg og blir lengre etter hvert, treffer den noe vil fronten bremses og etter hvert tas igjen av kobber lenger bak.

Hvis denne kobberstrålen stanses (med 10 km/s) utvikles det et trykk på omtrent 8 millioner bar. Stål har en flytgrense på opp mot 12000 bar, noe som her blir fullstendig ubetydelig, det flyter unna som om det var en væske. For å beregne hvordan strålen trenger gjennom stål er det faktisk bare ståltettheten som betyr noe, styrken har nesten ingen som helst betydning. En slik stråle går lett rett gjennom over en meter med massivt stål. Tilsvarende effekt har den naturligvis på andre materialer, bortsett fra ett forhold. Det er viktig at kobberstrålen holder seg samlet på en rett linje, hvis den brytes opp og spres som dråper som går i litt forskjellige retninger vil hver dråpe stanses mye fortere.

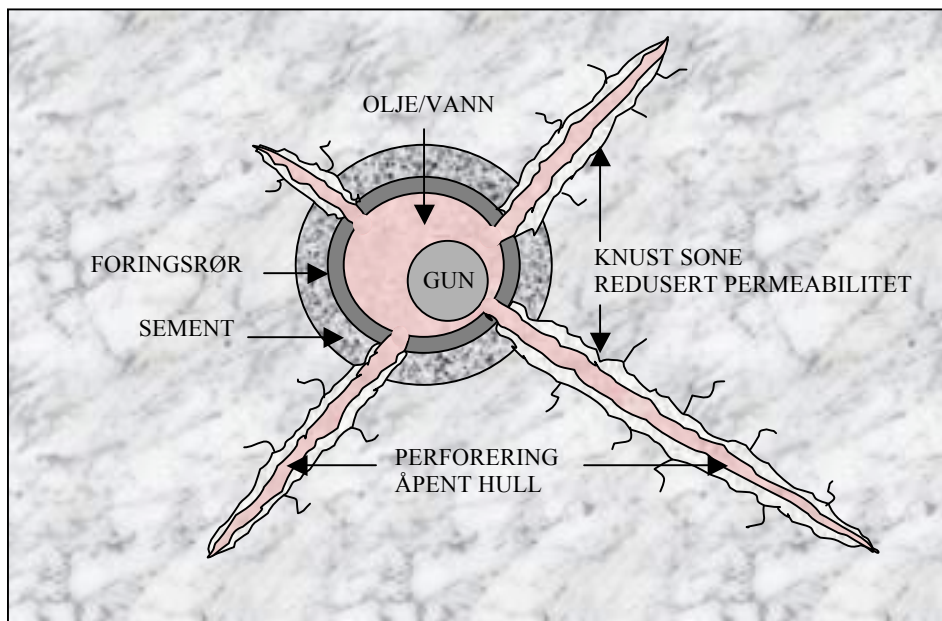
Uheldigvis (for perforering) er både olje og bergarter av den type materialer som evner å bryte opp strålen til en viss grad. Olje ved at det dannes små dampbobler som raskt kolliderer og i den prosessen danner et enormt trykk som kan skyve deler av strålen ut av kurs, bergarter ved at de knuses og sprekker opp ujevnt. Stål derimot flyter jevnt unna. Faktisk er noen keramiske materialer 5-6 ganger så effektive som stål til å stanse en slik rettet ladning, det er da også blitt panseret i moderne tanks. Dieselolje er 14 ganger så effektivt som stål, israelske tanks kjører rundt med dieselolje som panser. På tross av dette skyter de kraftigste ladningene som brukes til perforering rundt en meter inn i bergarten rundt brønnen. Hullet blir omtrent 1 cm i diameter.

Noen ganger er det ønskelig med større diameter på hullet, for eksempel når en pakker grov sand (grus) rundt produksjonsrøret i reservoaret for å hindre innstrømming av finere sand fra reservoarbergarten (gravel pack). Med større perforeringsåpning er det lettere å pakke grus inn i perforeringene slik at de ikke fylles med reservoarsand. Dette får en til ved å lage kobberkonen i den rettede ladningen flatere, ikke så spiss. Kobberstrålen blir da tykkere, men får ikke så høy hastighet, så perforeringen blir ikke så lang.

Det skytes vanligvis fra 2 til 10 hull per meter brønn i områder som perforeres. For å få jevnere innstrømming inn mot brønnen skytes gjerne hullene i forskjellige retninger, det vanlige er 180, 120 eller 90 grader mellom de forskjellige skuddretningene. Det gir en betydelig høyere produksjon med samme antall perforeringer å gå fra alle skudd i samme retning til 180 grader mellom dem, noe bedre ved å gå videre til 120 grader, og ubetydelig bedre ved å gå til 90 grader.

Når en perforering er skutt vil det være noe knust fjell rett rundt perforeringen, videre utover noe oppsprukket og sammenpresset fjell hvor porestrukturen har delvis kollapset med redusert permeabilitet som resultat. Tykkelsen på disse områdene er av størrelsesorden centimeter. Det er ønskelig å fjerne disse for at olje og gass skal strømme lettere inn. Dette kan gjøres ved å pumpe syre ned og inn i perforeringene (syrebehandling), eller ved hydraulisk opprensning. Det siste kan best oppnås ved å holde et lavt trykk i brønnen under

perforeringen, atskillig lavere enn poretrykket i reservoaret. Når perforeringene skytes ut får en hele trykkforskjellen mellom reservoaret og brønnen over veggen i perforeringen og dermed en svært høy strømningsrate som tar med seg løse steinbiter. Poretrykket i reservoaret rett rundt perforeringene faller deretter hurtig. For å opprettholde strømning må det strømme reservoarfluid fra lenger ute i reservoaret og inn mot brønnen. Største delen av trykkfallet mellom reservoaret og brønnen blir da fra ute i reservoaret og inn mot brønnen, ikke over veggene i perforeringene. Opprensingseffekten avtar derfor hurtig. Skyter en senere nye perforeringer vil det ikke være mulig å få dette trykksjokket. En må da bruke en annen opprensingsmetode, som syrebehandling. For hydraulisk opprensing er det derfor viktig at alle perforeringene skytes samtidig.



Figur 26 Perforering hvor ladningene ikke er sentrert i brønnen, men ligger mot den ene siden, 90 graders perforering er benyttet. Ladningene som må skyte lengst gjennom væska i brønnen mister mye energi og trenger ikke så langt inn i reservoaret. Merk at ladningene ligger over hverandre så perforeringene er ikke i samme plan. Før perforering kan brønnen være fylt med vann eller olje, begge vanligvis med tilsetningstoffer (slam). Etter perforering har det strømmet reservoarfluid inn i brønnen hvis det ble skutt med undertrykk i brønnen for hydraulisk opprensing av perforeringene.

Ladningene senkes ned i brønnen enten montert inne i et rør eller fritt hengende mellom to metallstenger. Den første metoden (tubing conveyed) beskytter ladningene bedre, men krever større diameter. Den brukes ofte før produksjonsrør er satt ned, gjerne skrudd fast i bunnen av produksjonsrøret slik at en kan sette ned produksjonsrøret og skyte perforeringer i en operasjon. Den andre metoden brukes ofte etter at produksjonsrør er satt ned, hvor ladningene må føres ned gjennom produksjonsrøret, som har atskillig mindre indre diameter enn selve brønnen.

Når ladningene går av sprenges stålhusene og opphengsmekanismen i biter som ramler ned i bunnen av brønnen. En borer gjerne brønnen noe under nederste del av reservoaret slik at bitene blir liggende under reservoaret og ikke hindrer produksjonen.