

Sikkerhetssystemer for brønnkontroll og deteksjon av brønnsparke

Harald Foldnes Justad

Master i teknisk kybernetikk

Innlevert: Juli 2012

Hovedveileder: Tor Engebret Onshus, ITK

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for teknisk kybernetikk

Problemstilling

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige
universitet

Fakultet for informasjonsteknologi,
matematikk og elektroteknikk
Institutt for teknisk kybernetikk



MASTEROPPGAVE

Kandidatens navn: Harald Foldnes Justad

Fag: Teknisk Kybernetikk

Oppgavens tittel (norsk): Sikkerhetssystemer for brønnkontroll og deteksjon av brønnsparke

Oppgavens tittel (engelsk): Safety Systems for Well Control and Detection of Kicks

Oppgavens tekst:

I moderne petroleumsvirksomhet brukes sofistikert teknologi for å bore brønner. Systemer for deteksjon av brønnsparke har derimot store mangler. En rekke alvorlige ulykker internasjonalt, men også på norsk sektor, kunne vært unngått med bedre utstyr for brønnovervåkning. Denne oppgaven ser på mulige forbedringstiltak på dagens systemer for brønnovervåkning og deteksjon av brønnsparke.

Oppgaven gitt: 9. januar 2012

Besvarelsen leveres innen: 9. juli 2012

Utført ved Institutt for teknisk kybernetikk

Veileder:

Trondheim, 9. januar 2012

Tor Onshus
Faglærer

Sammendrag

Da Deepwater Horizon den 20. april 2010 eksploderte og sank, hadde man ikke så mange alternativer for å stoppe utblåsing og begrense miljøskadene. Når man heller ikke greide å stenge utblåsningsikringen med ROV-intervensjon, var det i realiteten bare mulig å bore en eller flere avlastningsbrønner. Denne prosessen er så tidkrevende at det var uholdbart i Mexicogulven sommermånedene 2010, og det vil være ennå mer uholdbart i fremtiden. I 87 dager strømmet olje ukontrollert ut av brønnen, og nærmere fem millioner fat lekket ut til sjø. President Obama erklærte ulykken for den største miljøkatastrofen som USA noensinne hadde stått ovenfor. Granskinger av ulykken har vist at sikkerhetskulturen i petroleumsvirksomheten må økes. I Norge har ulykken ført større oppmerksomhet rundt ulykker og hendelser i norsk petroleumsvirksomhet og krav til et strengere sikkerhetsregime på norsk sokkel. Man må møte mulighetene for læring etter Deepwater Horizon-ulykken for å få til et sikkerhetsmessig satsing og et løft for norsk petroleumsvirksomhet.

Oljeindustrien er en kompleks bransje som bruker mye sofistikert teknologi. Mye tyder derimot på at bransjen har hatt altfor lite fokus på å utvikle å ta i bruk sofistikert utstyr for overvåkning og deteksjon av brønnspar. En rekke alvorlige ulykker internasjonalt, men også på norsk sektor, kunne vært unngått med riktig utstyr for brønnovervåkning. Denne oppgaven ser derfor på mulige forbedringstiltak på dagens sikkerhetssystemer for brønnkontroll og deteksjon av brønnspar.

Granskinger i etterkant av brønnkontrollhendelser har vist at indikasjoner og faresignaler på brønnspar ofte er tilstede, selv om de ikke blir oppdaget. Denne oppgaven foreslår derfor at man bør gå over til systemer for brønnkontroll med mer automatisert regulering. Trykkstyrt boring tilbyr et automatisk reguleringssystem, men har sikkerhetsmessige utfordringer. Et godt deteksjonssystem må ta hensyn til tidlige indikasjoner, overvåke delta-strømning og føre volumkontroll av slamtanken. For å opprettholde tilliten til deteksjonssystemet må grenseverdiene settes store nok til å unngå falske alarmer, men samtidig være så sensitivt at det detekterer et faktisk brønnspar.

Effektiv aktivering av sekundærbarriere (BOP) er tidskritisk. Ved et system som gir mange falske alarmer vil det spesielt på felt med små trykkmarginer være problematisk å stenge utblåsningsikringen ofte, da dette gir trykkoppbygning som gjør at strukturen i formasjonen kan bli ødelagt. Man bør derfor ta i bruk et detektorsystem som gjør bruk av prediktive metoder. Den Bayesiansk detektoren er en slik metode. Deteksjonssystemet justerer automatisk sensitiviteten etter støynivået, og det vil være mulig å modellere situasjoner som ellers ville gitt falsk alarm. Sannsynlighetsloggen som presenteres, gjør at man med stor sikkerhet kan fastslå et brønnspar. I siste instans vil overvåking av nivået i slamtankene være den sikreste måten å oppdage et brønnspar på. Ved en rask økning der, bør derfor detektorsystemet sørge for en automatisk nedstenging av utblåsingssikringen.

Abstract

On April 20, 2010, an explosion aboard the Deepwater Horizon in the Gulf of Mexico sank the oil rig and created a leak. When ROV intervention failed to seal the wellbore, the only real option to stop the blowout was by drilling a relief well. Unfortunately, this process is very time-consuming and dissatisfactory. Finally, after 87 days had elapsed since the blowout and almost 5 millions barrels of oil had gushed into the sea one succeeded to stop the well flow. President Obama proclaimed it the worst environment disaster ever faced in the U.S. Investigations after the accident has concluded an unsatisfactory security culture in the industry. The investigations needs to contribute towards lessons learned and provide recommendations for the industry in order to reduce the likelihood of a similar accident to occur in the Norwegian petroleum activity.

The petroleum industry is a complex business that uses a lot of sophisticated technology. However, there are many indications that industry has had far too little focus on developing and adoption of sophisticated equipment for monitoring and detection of gas kicks. A number of serious accidents internationally, but also in the Norwegian sector, could have been avoided with proper equipment for well monitoring. This paper studied the possible improvements of todays safety systems for well control and detection of gas kicks.

Afterwards investigations of well control incidents have shown that the indications and warning signs of gas kicks are often presented, though they are not detected. This paper suggests that one should go over to the well control systems with more automated control systems. Pressure controlled drilling, offers an automatic control system but has safety challenges. A good detection system must take into account the early indications, monitor the Delta flow and control volume of the sludge tank. To maintain confidence in the detection system, the limit values must be large enough to avoid false alarms, at the same time be sensitive enough to detect actual gas kicks. Effective activation of the secondary barrier (BOP) is time-critical. In a system that gives many false alarms, especially on fields with little pressure margins it will be difficult to close the BOP often, as

such pressure build-up can damage the structure of reservoir. One should therefore apply a detector system that utilizes the predictive methods. The Bayesian detector is such method. Detection system automatically adjusts sensitivity according to noise level, and it will be possible to model situations that otherwise would have given a false alarm. The probability log which is presented, does that one with high certainty can determine a gas kicks. Ultimately, monitoring the level of the mud tank is the most secure way to detect a gas kick. With a rapid increase of level detector system should provide an automatic shutdown of the blowout preventer.

Konklusjon

I moderne petroleumsvirksomhet brukes sofistikert teknologi for å bore brønner. Systemer for deteksjon av brønnsparke har derimot store mangler. En rekke alvorlige ulykker internasjonalt, men også på norsk sektor, kunne vært unngått med bedre utstyr for brønnovervåkning og deteksjon av brønnsparke.

Det er avgjørende å oppdage tegn på brønnsparke så tidlig som mulig for å effektivt kunne aktivere en sekundærbarriere. Mangelfull overvåkning var sentrale faktorer både på Deepwater Horizon, Snorre A og Gullfaks C. Forståelsen for en helhetlig strategi for barrierestyring, herunder anvendelse av prinsippet om to uavhengige og testede brønnovervåkingsbarrierer må økes. Petroleumbransjen bør fokusere på å ta i bruk og utvikle operasjonelle verktøy som brønnovervåkingsbarriereskisser, med alarmer, slik at aktørene får enkle visuelle midler, med beskrivelse av overvåkingsmetode for hvert enkelt definert barriereelement (Ref-1, s. 66).

Svikt i evnen til å analysere og forstå risiko er en gjenganger som medvirkende årsak til ulykker. Granskninger i etterkant av brønnovervåkingshendelser viser at indikasjoner og faresignaler på brønnsparke ofte er tilstede, selv om de ikke blir oppdaget. Med dagens system er man i stor grad avhengig av at boremannskapet er i stand til å tolke å forstå faresignalene riktig. De må tolke indikasjoner på brønnsparke korrekt, men også foreta riktig manuell aksjon for å stenge inne brønnen. Det er derfor essensielt at personell blir satt i stand til å være årvåkne nok i forhold til muligheten for tap av brønnovervåkning. OLF sitt prosjekt etter Deepwater Horizon-katastrofen foreslår tre anbefalinger angående kompetanseutvikling (Ref-1, s. 145):

- *Etablere minimumskrav til teknisk utdanning og kompetansevurdering for nøkkelpersonell og ledere involvert i dypvannsboring og brønnovervåkingsoperasjoner*
- *Utvikle og iverksette høyere brønnovervåkingskontrollutdanning for dypvannsboring og ytterligere krav til eksisterende utdanningsstandarder og sertifikat innen brønnovervåkning*
- *Utvikle og iverksette trenings- og kvalifikasjonsprosesser for personell ansvarlig for operasjoner, vedlikehold og modifikasjoner på brønnsystemer*

Aktivering av sekundærbarriere (BOP) er tidskrittisk. Manuell tolking av indikasjoner og overflatemålinger er tidkrevende, og et faktisk brønnsparke kan derfor allerede før operatørene får aktivisert utblåsingssikringen ha fortrent mesteparten av boreslammet fra ringrommet. Dersom en får store mengder gass over BOPen vil denne utvide seg dramatisk og på sin vei oppover føre med seg store mengder borevæske ved høye rater. Ideelt bør derfor et brønnsparke oppdages og stenges inne før det når utblåsingssikringen slik at hydrokarboner hindres i å strømme til overflaten. Faresignaler på brønnsparke blir ofte oversett av boremannskapet. Man bør derfor gå over til systemer for brønnskontroll med mer automatisert regulering.

Trykkstyrt boring tilbyr et automatisk reguleringssystem. Hovedindikatoren for deteksjon av brønnsparke er trykkvariasjon i strupeventilen. Automatisk regulering av strupeventilen vil føre til at man oppnår kontroll over uønsket innstrømmet gass/formasjonsvæske på et tidligere tidspunkt enn man ville gjort ved konvensjonelle inne-stengningsrutiner (Ref-14, s. 23). Selv om trykkstyrt boring gir fordeler ved å automatisere deler av brønnsborings-operasjonene, vil det være store sikkerhetsmessige utfordringer. Den statiske vekten av borevæsken reguleres slik at den er på grensen, eller lavere enn poretrykket. Den sikkerhetsmessige utfordringen knyttet til brønnskontroll vil være at det hydrostatiske trykket fra boremediet ikke lenger er den primære brønnskontrollmekanismen. Altså har man ikke lenger to uavhengige barrierer, primær og sekundær, men en barriere. Dette vil være sikkerhetsmessig uholdbart, og kompensere tiltak må finnes for å ha sikkerhet like god som ved to uavhengige barrierer (Ref-1, s. 51).

Det Norske Veritas (Ref-11) sine undersøkelser etter Deepwater Horizonulykken avdekket at de voldsomme kreftene fra brønnsstrømmen førte til at borestrengen ble deformert og bøyd og dermed forhindret kutteventilen (blind shear ram) på utblåsingssikringen fra å fungere etter intensjonen. Man klarte derfor ikke å stenge inne brønnen. Sintef sin granskning av ulykken konkluderer med at det bør vurderes å kreve utblåsingssikring med doble kutteventiler for å oppnå høyere pålitelighet, og redusert risiko knyttet til kritiske bore- og brønnsoperasjoner (Ref-1, s. 191).

Et mulig kompensierende tiltak for å øke sikkerheten ved trykkstyrte boreoperasjoner kan da være å pålegge bransjen å bruke utblåsningsikring med krav om to uavhengig kutteventiler.

Sikkerhetsbarrierer knyttet til boring og brønn har ofte forholdsvis detaljerte funksjonelle krav, men er mangelfulle om hvor god en barrierene skal være. Forskrifter og standarder (som IEC 61508, IEC 61511, OLF 07011, osv.) fokuserer på behovet for å følge opp påliteligheten av barrierene i drift, men det kan være utfordrende å verifisere den operasjonelle påliteligheten av for eksempel BOP-systemene, da innsamling av feildata i liten grad er systematisert. Deepwater Horizon ulykken har vist oss at tydeligere ytelseskrav må etableres, inkludert pålitelighetskrav til BOP. Bakgrunnen for ytelseskravene må dokumenteres i forhold til anerkjente standarder på området, slik som OLF 070 eller IEC 61508 (Ref-1, s. 79)(Ref-2, s. 39).

Et godt deteksjonssystem for brønnsparke må sees i sammenheng med antall falske alarmer. En utfordring for deteksjon, er at tidlige indikasjoner man får på at et brønnsparke er under utvikling som for eksempel økning i borehastigheten og tap i vekt av borestrengen, ofte bare kan være en konsekvens av helt vanlige borehendelser. Det vil derfor være lite hensiktsmessig å gi full alarm for brønnsparke ved disse hendelsene, da dette vil gi redusert tiltro til deteksjonssystemet. Det bør derfor vurderes å innføre et skaleringsystem (Ref-26, s. 41) for alarmer. Altså kan deteksjonssystemet gi en type alarm for indikasjoner på brønnsparke, der det gis grunn til å være på vakt og overvåke om det kommer flere faresignaler. Og så en mer alvorlig og sikker alarm, når man får tilgang til flere målinger og tilstrekkelig informasjon om at det faktisk er et brønnsparke.

Volumkontroll av slamtankene og overvåkning av differanse i inn/ut-strømmet boreslam vil gi deteksjonssystemet sikrere indikasjoner for overvåkning av brønnsparke. En plutselig økning av returstrømmen fra brønnen er en sikker indikator, men også her kan det bare være vanlige borehendelser. Eksempelvis vil forskyvninger på grunn av bølger gi en ujevn strømningsrate på en flytende borerigg. Dette kan gi falske alarmer. For å løse dette anbefales det derfor å ta i bruk et deteksjonssystem som benytter prediktive metoder.

Et system som tar i bruk prediktive metoder er den Bayesianske detektoren. Ved å modellere og predikere hvordan både vanlige og uvanlige borehendelser vil gi variasjoner i returstrøm ut av brønnen, differanse i inn/-ut-strømmet boreslam og til også å omfatte væsknivå i slamtanken, vil man få en detektor som reduserer antall falske alarmer. Et modellsamsvarende Bayesiansk sannsynlighets rammeverk gjør at man får et deteksjonssystem hvor sensitiviteten automatisk justeres etter støynivået på målingene. Hvis strømningsdataene mest sannsynlig samsvarer med en normal rigghendelse gis ingen alarm, mens hvis man får en situasjon som med stor sannsynlighet er et brønnsпарк blir det gitt alarm. Dette gjør at man får et deteksjonssystem der falske alarmer unngås, og tilliten til alarmsystemet opprettholdes (Ref-22).

Etterhvert som forskning og utvikling gjør det mulig å foreta bedre målinger av det som skjer nede i brønnen, bør det vurderes en utvidelse av det prediktive deteksjonssystemet til også å inkludere trykk. Ved å utvikle modeller for trykkbalansen i brønnen ved brønnehendelser får man et deteksjonssystem som kan angi sannsynligheten for brønnsпарк med enda større sikkerhet.

Det vil være dynamiske forhold i reservoarene, og de vil variere fra brønn til brønn. Å lage et deteksjonssystem som bruker prediktive metoder, vil kreve en del arbeid. Å lage universale modeller, som gjelder for forskjellige reservoarer, vil være en utfordring. En mulig løsning kan da være å benytte en skaleringskonstant, for å tilpasse modellene de varierende reservoarforholdene.

For å avgjøre om man har en situasjon der uønsket gass/formasjonsvæske strømmer inn i brønnen, er det viktig å ha tilgang til målinger av normale borehendelser, slik at man kan sammenligne dataene. Ved å måle og dokumenterer disse prosessene har man "fingeravtrykket" (Fingerprinting) til neste gang man skal utføre brønnooperasjonene. Ved mistanke om kick kan man sammenligne avvik fra fingeravtrykkene for å avgjøre om man faktisk har et reelt brønnsпарк (Ref-14, s. 22).

En rekke alvorlige ulykker kunne vært unngått med bedre utstyr for brønnovervåkning. En viktig kilde til læring er å ha målinger av normale og unormale borehendelser. Det bør derfor vurderes å pålegge bransjen å logge fingeravtrykkene av borehendelser.

Da Deepwater Horizon eksploderte og sank gikk mye brønninformasjon tapt, og en rekke spørsmål er ubesvart om hva som skjedde på boreinnretningen i minuttene før katastrofen. For eksempel kunne logging av kameraovervåkning fra boredekket, vært med å bidra til å få avdekket hvorfor boremannskapet ikke oppdaget signaler om brønnsparke. En mulig løsning er å innføre logging til en "svart boks", som i luftfart, for å sikre informasjon som kan bidra til læring etter ulykker.

Granskinger i etterkant av referansehendelsene har vist at indikasjoner og faresignaler på brønnsparke ofte er tilstede, selv om de ikke blir oppdaget av boremannskapet. I siste instans vil overvåking av nivået i slamtankene være den sikreste måten å oppdage et brønnsparke på. Ved en rask økning der, anbefales det derfor å innføre et detektorsystem som sørger for en automatisk nedstenging av utblåsingssikringen.

Forord

Denne masteroppgaven markerer en avslutning på mitt masterstudium i Teknisk Kybernetikk ved NTNU. Jeg vil takke min veileder professor Tor Onshus ved institutt for Teknisk Kybernetikk, NTNU, for veiledning og mange gode innspill på oppgaven.

Jeg vil også takke mine medstudenter i andre etasje på instituttet for å ha bidratt med oppmuntring og til et godt miljø.

Trondheim, 9. juli 2012. Harald Foldnes Justad



Innhold

1	Innledning	17
2	Referansehendelser	19
2.1	Deepwater Horizon	20
2.2	Utblåsning på Snorre A	24
2.3	Brønnkontrollhendelse på Gullfaks C	27
3	Barriereelementer	29
3.1	Primærbarriere	30
3.2	Sekundærbarriere	32
3.3	Brønnkontroll	33
4	Brønnspar	35
4.1	Forutsetninger	35
4.2	Trykkmarginer	37
5	Deteksjon av brønnspar	39
5.1	Grunner for kick	39
5.2	Indikatorer	42
5.3	Utstyr for deteksjon	45
5.3.1	Flowmeter	45
5.3.2	Nivåmåling av slamtankene	46
5.3.3	Coriolis massestrømsmåler	49
5.3.4	Måling av ringromstrykk under boring (APWD-Tool)	50
5.4	Fingeravtrykk	51
6	Metoder	53
6.1	Delta-strøm indikator	54
6.2	Akustiske systemer	56
6.3	Trykkstyrt boring	58
6.3.1	Trykkbalansert boring (Managed Pressure Drilling-MPD)	59
6.3.2	Underbalansert boring (Underbalanced Drilling-UBD)	61
6.3.3	Regulering	63
6.4	Bayesiansk deteksjons-metode	66
7	Diskusjon	75
8	Videre arbeide	85

9 Referanser	87
10 Vedlegg: Sentrale ord og uttrykk	91

1 Innledning

Denne oppgaven bygger videre på arbeidet som ble gjort i prosjekt-oppgaven (Ref-2) som ble avslutte 20. desember 2011. Den omhandlet Deepwater Horizon-katastrofen og så på hva som gikk galt, og hvordan den kunne vært unngått. Dype brønner på dypt vann stiller store krav til planlegging og operasjon, og forholdene i undergrunnen ved Macondo-feltet har mange likhetstrekk med de man finner på norsk sektor.

Det ble derfor videre sett på om en tilsvarende hendelse kunne skjedd i Norge. På norsk sokkel står man overfor tilsvarende utfordringer og risikoforhold som tilfellet var på Deepwater Horizon. For å unngå en tilsvarende hendelse må mulighetene for læring etter Deepwater Horizon-ulykken møtes med en sikkerhetsmessig satsing og et løft for norsk petroleumsvirksomhet.

Svikt i evnen til å analysere og forstå risiko er en gjenganger som medvirkende årsak til ulykker. Granskninger i etterkant av ulykken avdekket så systematiske feil i risikostyring, at det ble sådd tvil om sikkerhetskulturen i hele industrien. Videre tyder mye på at systemene som bransjen benytter for deteksjon av brønnsparke ikke holder mål.

Denne oppgaven ser derfor på utstyr for brønnkontroll. En utfordring knyttet til brønnkontroll er at det er krevende å forstå hva som skjer nede i brønnen. Oppe på innretningen har man utstyr og omgivelser som kan tas og føles på, mens det ikke vil være mulig flere kilometer nede i bakken. Det vil være utfordrende å få gode målinger av det som skjer nede i brønnen. Oppgaven tar derfor for seg hvilke muligheter som finnes for å gjøre gode målinger av det som skjer nede i brønnen.

Videre tar den for seg hvilke systemer for deteksjon som finnes, og ser på mulige forbedringstiltak på dagens sikkerhetssystemer for brønnkontroll og deteksjon av brønnsparke.

2 Referansehendelser

Oljeindustrien er en kompleks bransje som bruker mye sofistikert teknologi. Mye tyder derimot på at bransjen har hatt altfor lite fokus på å utvikle å ta i bruk sofistikert utstyr for overvåkning og deteksjon av brønnsparke. Ved indikasjoner på brønnsparke er aktivering av sekundærbarriere(BOP) tidskritisk. Riktig utstyr for brønnovervåkning er avgjørende for at operatørene skal kunne gjøre riktige vurderinger, og ha et godt grunnlag for iverksettelse av riktige tiltak.

En rekke alvorlige ulykker internasjonalt, men også på norsk sektor, kunne vært unngått med riktig utstyr for brønnovervåkning. Dette kapittelet tar for seg de viktigste funnene fra Deepwater Horizon-ulykken, men ser også på hendelser på norsk sektor. Enhver ulykke er unik. Det er derimot ingen tvil om at man på norsk sokkel står overfor tilsvarende utfordringer og risikoforhold som tilfellet var på Deepwater Horizon i Mexicogulfen. Det er små marginer som har skilt oss fra svært alvorlige utblåsninger. Snorre A-hendelsen i 2004 og Gullfaks C-hendelsen i 2010 viser at ting kan gå galt også på norsk sokkel (Ref-2, s. 6).

Deepwater Horison-ulykken har vist at sikkerhetskulturen i petroleumsvirksomheten må økes. I Norge har ulykken ført til økt oppmerksomhet om åpning av nordområdene, større oppmerksomhet rundt ulykker og hendelser i norsk petroleumsvirksomhet og krav til et strengere sikkerhetsregime på norsk sokkel. Man må møte mulighetene for læring etter Deepwater Horizon-ulykken for å få til et sikkerhetsmessig satsing og et løft for norsk petroleumsvirksomhet (Ref-2, s. 6).

2.1 Deepwater Horizon

Den 20. april 2010 inntraff en olje- og gassutblåsning på den flyttbare boreinnretningen Deepwater Horizon på Macondofeltet, utenfor kysten av Louisiana i Mexicogulfen. Hendelsen utviklet seg til en katastrofe da påfølgende eksplosjon og brann på innretningen medførte at elleve personer omkom, og flere fikk alvorlige skader. Innretningen sank etter to døgn, og i 87 dager strømmet olje ukontrollert ut av brønnen. Det ble gjort desperate forsøk på å tette brønnen og til slutt lykkes man å stoppe lekkasjen ved hjelp av avlastningsboring. Da var nærmere fem millioner fat olje lekket ut til sjø. President Obama erklærte ulykken for den største miljøkatastrofen som USA noensinne hadde stått ovenfor (Ref-3, s. 173)(Ref-2, s. 6).



Figur 2.1: Deepwater Horizon-ulykken (Kilde: Getty Images).

Utblåsingen skjedde under forberedelse til en midlertidig forlating av Macondo-brønnen. Prosedyre for midlertidig forlating innebærer å sette en sementplugg i bunnen av brønnen, for så å erstatte borevæsken i stigerøret med sjøvann, før det tilslutt settes en øvre sementplugg. Denne operasjonen medfører stor risiko da BOPen vil stå åpen, og brønnen vil komme i underbalanse når borevæske blir erstattet med sjøvann. Man kunne da få innstrømning av hydrokarboner i brønnen, eller et brønnsпарк, hvis sementpluggen i bunnen ikke holdt som barriere. Noe den heller ikke gjorde (Ref-1).

Det var hektisk aktivitet ombord på Deepwater Horizon da operasjonen med å fortrenge borevæske fra stigerøret startet. Dette kan ha vært medvirkende årsak til at flere indikasjoner på at noe var galt ble oversett. Operasjonen ble utført uten volumkontroll av væsken som kom ut av brønnen og selv om trykkmålerene viste unormale verdier, ble det ikke foretatt verken visuell sjekk av boreveske eller gjort forsøk på å stenge inn brønnen som følge av dette. Sannsynligheten for effektivt å kunne aktivere en sekundærbarriere(BOP) er tidskritisk. Dersom en får store mengder gass over BOPen vil denne utvide seg dramatisk og på sin vei oppover føre med seg store mengder borevæske ved høye rater (Ref-4, s. 194). Det er derfor viktig å oppdage tegn på en unormal situasjon så tidlig som mulig. Dessverre klarte ikke mannskapet å oppfatte at olje og gass startet å strømme inn i brønnen. Brønnstrømmen passerte utblåsningssikringen – BOPen – på havbunnen og ekspanderte videre raskt på sin ferd opp gjennom stigerøret mot innretningen. Indikasjoner på innstrømning var merkbare omtrent i 45 minutter, men det var først etter at borevæsken veltet ut over boredekket det ble det fastslått at et brønnsпарк ("kick") var på gang. Når de endelig reagerte, forsøkte de å stenge BOPen, men BOPen klarte ikke å stenge for den kraftige brønnstrømmen og utblåsningen fortsatte (Ref-1).

Så hvorfor oppdaget ikke boremannskapet signaler om brønnsparke? Granskninger har i etterkant avdekket flere årsaksforhold, og kommet med anbefalinger. I ettertid er det lett å slå fast at personellet ikke har vært årvåkne nok i forhold til muligheten for tap av brønnkontroll i endelig fortrenghet av borevæske. Brønnsparke er vanligvis ikke forbundet med den midlertidige forlatingsfasen, og tiltro til barrierer – spesielt testede barrierer – kan skape en overdrevet tillit til brønnens samlede sikkerhet. Dessuten er man på slutten av en brønnaktivitet ofte tilbøyelig til å være så raske som mulig og kan dermed tape fokus. Summen av disse faktorene kan ha redusert årvåkenheten mot uregelmessigheter i data, forsinket reaksjoner og medvirket til svikt i å utføre rutinemessig overvåking (Ref-1).

Utstyr for brønnovervåking på Deepwater Horizon var utilstrekkelig. Informasjon fra skjermbilder avhang ikke bare av at riktig person så på riktige data til riktig tid, men også at personen forsto og tolket informasjonen korrekt. Mange av signalene på brønnsparke kan ha blitt oversett dersom personellet var distraheret eller ikke var helt oppmerksomme. I forbindelse med brønnovervåking måtte riggmansskapet utføre grunnleggende beregninger for hånd i stedet for å ha automatiserte systemer, for eksempel netto strømning fra brønnen. Dypvannsoperatører anvender usedvanlig sofistikert teknologi for å bore brønner, men ombord på Deepwater Horizon var det verken utviklet eller installert tilsvarende sofistikert teknologi til beskyttelse mot en utblåsning (Ref-1).

Det er klart i etterkant at forståelsen for en helhetlig strategi for barrierestyring, herunder anvendelse av prinsippet om to uavhengige og testede brønnbarrierer, samt overvåking av disse må økes. Det må tas i bruk eller utvikles operasjonelle verktøy (for eksempel brønnbarriereskisser) som kan gi aktørene enkle visuelle midler, med beskrivelse av overvåkningsmetode for hvert enkelt definert barriereelement (Ref-1).

Videre ble det i flere av granskningene uttrykt forbauselse over utilstrekkeligheten ved instrumenter og sensorer for deteksjon av brønns-
park på Deepwater Horizon. Eksempelvis ble det etterlyst mer bruk
av kamera, og det var heller ikke utstyr dedikert for å identifisere
hydrokarboner i borehullet under aktiviteter utenom boring. Slike
sensorer kunne bli utviklet og installert i BOP eller på brønnehodet
for å detektere gass eller andre hydrokarboner før de kom inn i stige-
røret. Riggmannskapet kunne hatt nytte av systemer som benytter
automatisk alarm, tilsvarende som i luftfart, for å fange oppmerksom-
het om mulige indikasjoner på brønns-
park. Slike system burde også
informere mudloggere om kritiske hendelser. På Deepwater Horizon
var mudloggere avhengig av direkte kommunikasjon eller gjetning for
å forstå hva som hendte andre steder på innretningen (Ref-1).

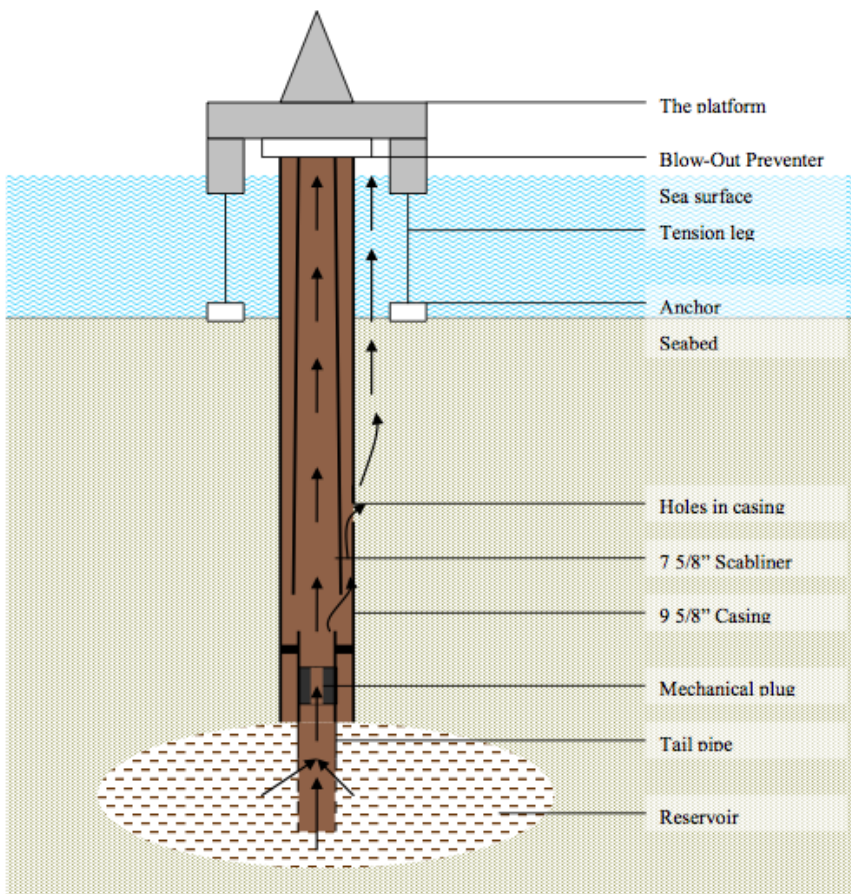
2.2 Utblåsning på Snorre A



Figur 2.2 Snorre A-plattformen (Kilde: Ref-1, s 50).

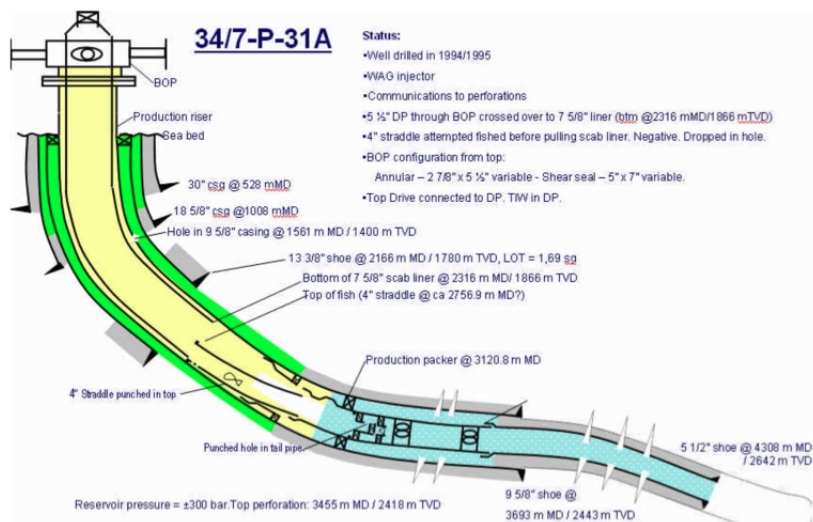
I nordsjøen den 28. november 2004 skjedde det en hendelse på Snorre A-plattformen som hadde storulykkespotensial. Man opplevde en gassutblåsning på havbunnen med påfølgende gass under innretningen. Ingen personer kom fysisk til skade, men det var bare snarrådig innsats fra personell som gjorde at hendelsen ikke ble mer omfattende (Ref-5). Undersøkelser i etterkant avdekket flere store kratre ved brønnrammen, og statoil estimerte strømningsraten under utblåsningen til å være 20-30 kg/s. Tre måneder etter hendelsen var produksjonen av olje fortsatt ikke normalisert (Ref-1, s. 48)(Ref-2, s. 33).

Under en deloperasjon (slissegjenvinning) som skulle klargjøre for boring av et sidesteg, skulle man trekke en 7 5/8" scab-liner. Operasjonen medførte at det ble trukket gass inn i brønnen og utløste den ukontrollerte utblåsningen (Ref-6). Gassen trengte gjennom skader i 9 5/8" føringsrør i 1561 m dybde og gjennom en skade i 13 3/8" føringsrør i 510 m dybde målt fra boredekket, og strømmet opp fra havbunnen (Ref-1, s. 49)(Ref-2, s. 34).



Figur 2.3: Illustrasjon (Kilde: Ref-6).

BOP sin funksjonalitet var sterkt redusert pga trekking av "scab-liner" gjennom BOP. Man hadde da ikke mulighet til å lukke denne. Sentrale barrierer var ikke trykktestet. Blant annet ble det ikke gjennomført trykktest av ny sekundærbarriere når man valgte å trekke "scab-liner" gjennom BOP. Det var fra tidligere kjent at sekundærbarriere etter testing i desember 2003, kun var spesifisert til et trykk på 94 bar. Reservoartrykket var på 325 bar. Hadde det vært ugunstig vær under hendelsen kunne det dannet seg en gassky med potensial til å komme i kontakt med en tennkilde på innretningen. Man kunne fått antenning av gass, en vedvarende brann og mulig eskalering av brannforløp til stigerør. Da man til slutt klarte å gjenvinne kontrollen over brønnen, stod man igjen med 8-10 m³ sjøvann blandet med vektmateriale i tankene. Skip med borevæske kunne ikke komme til plattformen pga. eksplosjonsfare (Ref-1, s. 49)(Ref-2, s. 35).



Figur 2.4: Skisse av brønn 34/7-P-31A (Kilde: Ref-5, s. 11).

2.3 Brønnkontrollhendelse på Gullfaks C



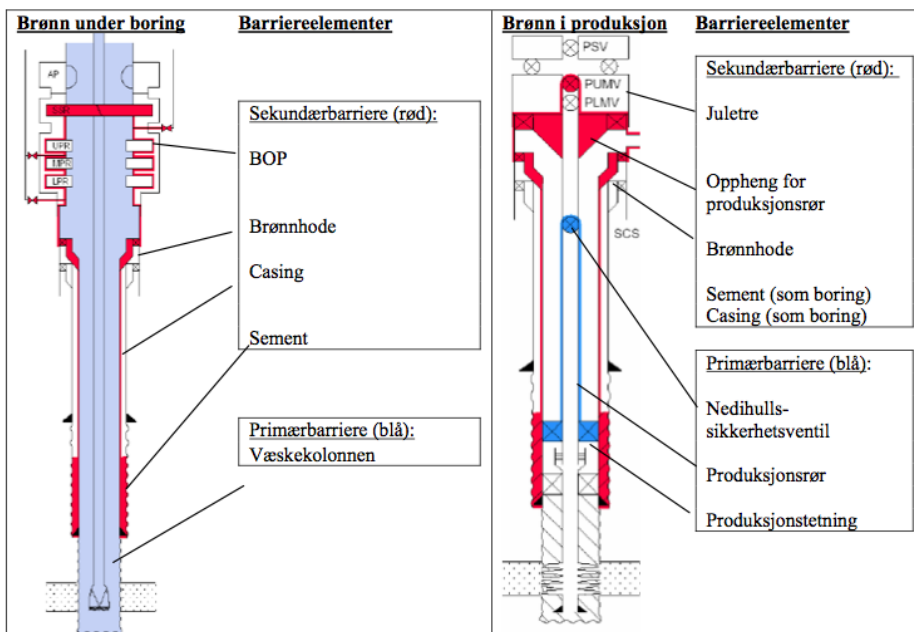
Figur 2.5: Gullfaks C-plattformen (Kilde: Ref-1, s. 52).

19. mai 2010 mistet man kontroll over brønnen på Gullfaks C. Dette medførte gassutslipp på plattformen og et potensial for undergrunnsutblåsning (Ref-7). Også her skulle man utføre såkalt slissegjenvinning som involverer at man går inn i gammel brønn-infrastruktur. Gullfaksfeltet har små trykkmarginer mellom poretrykk og oppsprekkingstrykk, noe som vanskeliggjør boring på feltet. Statoil opplevde flere hendelser med ustabilitet under boring av brønnen, og på bakgrunn av målt styrke i formasjonen ble det besluttet å bore siste del av brønnen ved hjelp av såkalt trykkbalansert bore-teknologi (MPD). I forbindelse med MPD vil man ha felles barriereelementer om den statiske vekten av borevæsken er lavere enn poretrykket. Altså har man ikke lenger to uavhengige barrierer, primær og sekundær, men en barriere. Det er derfor krav om at man skal ha gjennomført risikovurdering av dette, samt funnet kompensierende tiltak for å ha en sikkerhet like god som ved to uavhengige barrierer. Det ble ikke gjennomført noen risikoanalyse i forhold til å bruke trykkbalansert boring, og man endte opp med tap av brønnkontroll (Ref-1, s. 51)(Ref-2, s. 36).

I forbindelse med den avsluttende sirkulering og opprensning av hullseksjonen oppsto det hull i 13 3/8" foringsrør, med påfølgende tap av borevæske (slam) til formasjon. Foringsrøret var et felles barriereelement, og hullet medførte derfor at begge brønnbarrierer var brutt. Tap av baktrykk medførte innstrømning fra eksponerte reservoar inn i brønnen, inntil det oppsto en avpakking av løsmasser eller borekaks som tettet brønnen ved 9 5/8" sko. Tilfeldigheter gjorde at denne avpakkingen begrenset videre innstrømning av hydrokarboner til brønnen. Det første døgnet hadde både mannskapet på plattformen og landorganisasjonen store problemer med å forstå og håndtere den komplekse hendelsen. Normaliseringsarbeidet pågikk i nesten to måneder før brønnbarrierene var gjenopprettet (Ref-7)(Ref-1, s. 51)(Ref-2, s. 37).

3 Barriereelementer

Det kreves to uavhengige tekniske barrierer mellom brønn (reservoar) og eksterne omgivelser under utføring av bore- og brønnaktiviteter (Ref-9). Dette kalles hhv for primærbarrieren og sekundærbarrieren. For at en utblåsning skal kunne skje må derfor begge barrierefunksjonene svikte(Ref-8, s. 27).



Figur 3.1: Barrierskjema vist for en brønn under hhv. boring og produksjon (Ref-9).

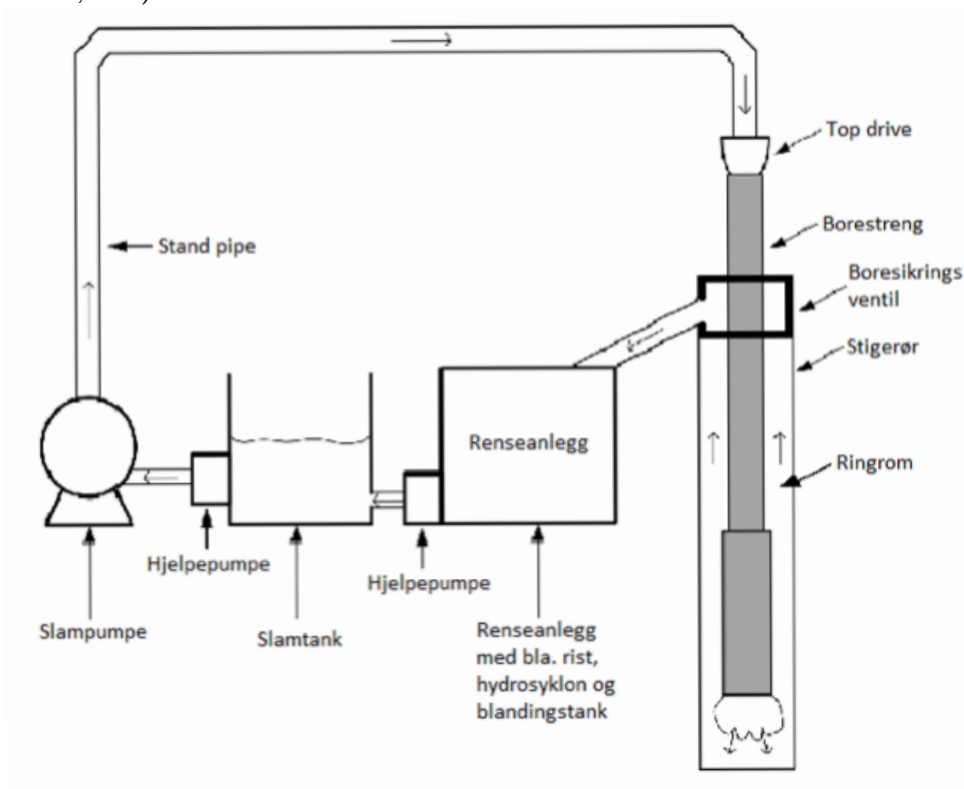
3.1 Primærbarriere

Primærbarrieren under boring dannes gjennom et hydrostatisk trykk av vekten til væskekolonnen (blå farge). Den tunge borevæsken blir iblandet borekaks, som så sirkuleres ut av brønnen. En typisk årsak til svikt i primærbarrieren er for lav egenvekt på borevæsken som kan medføre uønsket innstrømning i brønnen (brønnsparke). Andre årsaker kan være svikt i boreteknisk utstyr, slamsystemer, pumper og annet utstyr på selve innretningen. I verste fall kan dette medføre tap av brønnskontroll under boring (Ref-8, s. 27).

Slamsystemet sørger for sirkulasjon i brønnen. Boreslammets viktigste egenskaper er (Ref-12, s. 7):

- *Stabilisere trykket i borebrønnen*
- *Spyle bort borekaks fra bunn av brønn*
- *Transportere borekaks til overflaten*
- *Rense, avkjøle og smøre borekrona*
- *Beskytte borestreng og koplinger mot korrosjon*
- *Gi smøring til borestrengen*

Sammensetningen av borevæsken reguleres etter hvilke egenskaper slammet skal ha under boreprosessen. Den består av olje, vann og kjemikalier og pumpes med et sirkulasjonstrykk ned gjennom borestrengen og ut gjennom borekronen i bunnen av brønnen. Returen av slam skjer i ringrommet (annulus), mellom borestreng og foringsrør. På overflaten blir boreslammet behandlet i separator for borevæske, før den til slutt havner i mud-tanken og resirkuleres for videre bruk (Ref-12, s. 7).



Figur 3.2: Slamsystem (Ref-12, s. 8).

3.2 Sekundærbarriere

Sekundærbarrieren under boring dannes av utblåsningssikringen (BOP), foringsrørene i brønnen, sementen som fester og tetter mellom foringsrør og formasjon, samt brønnehode og stigerør. Typisk årsak til at sekundærbarrieren svikter er at ventilene i BOP'en ikke stenger utstrømningen som forutsatt, svikt av foringsrør, sement, pakninger, eller komponenter/instrumentering som settes ned i brønnen. Under Deepwater Horizon-ulykken var svikt i sekundærbarrieren medvirkende årsak til katastrofens omfang, da kutteventilen (BSR) på BOPen ikke klarte å stenge inne den voldsomme strømmen av gass/formasjonsvæske (Ref-3, s. 114)(Ref-8, s. 27).

Sannsynligheten for at det kan skje ukontrollert utblåsning ved bore- og brønnaktiviteter påvirkes av forhold knyttet til kontroll med primær- og sekundærbarrieren. Viktige påvirkningsfaktorer er oljetype, sammensetningen av olje- og gass, reservoarforhold (poretrykk, oppsprekkingstrykk, porøsitet av bergartene, osv.), vanddyp og påliteligheten av utstyret man bruker. For eksempel vil en større andel gass innblandet i oljen kombinert med et større vanddyp gi økt sannsynlighet for utblåsning (Ref-8, s. 27).

3.3 Brønnkontroll

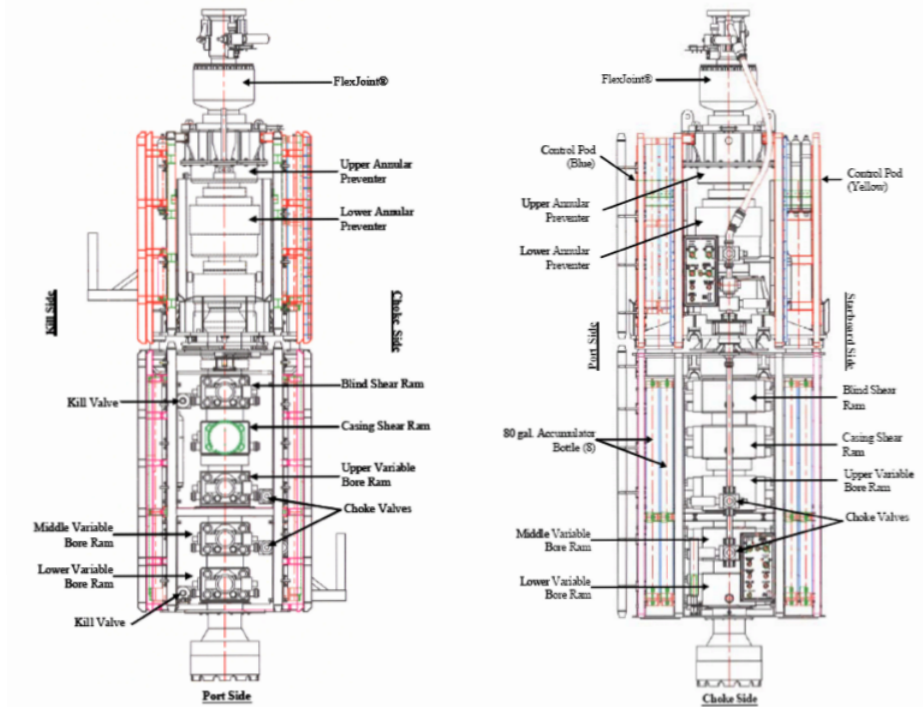
Riktig utstyr for brønnovervåkning er avgjørende for at operatørene skal kunne ta riktige aksjoner, på et godt grunnlag. Feil operasjon kan i verste fall føre til utblåsing (Ref-10). Under boring inntreffer en brønnkontrollsituasjon ved at formasjonsvæske utilsiktet strømmer inn i brønnen fra reservoaret (olje, gass, vann). System for brønnkontroll skal i en slik situasjon (Ref-8, s. 28):

- *Detektere innstrømning (brønnsparke) tidlig*
- *Stenge inn brønnen*
- *Sirkulere ut formasjonsvæsken under trykk*
- *Trekke borestreng under trykk*
- *Eventuelt lede innstrømningsvæsken bort fra innretningen*

Brønnkontroll forutsetter høy pålitelighet av de tekniske systemer, men under situasjoner der et brønnsparke er under utvikling kreves det også at operatøren har god innsikt i de gitte brønnebetingelsene. For å forhindre utblåsing må operatøren foreta riktig manuell inngripen. En mulig feilhandling knytter seg til særlig to forhold (Ref-8, s. 28):

- *Mangelfull tidlig kikkdeteksjon (for eksempel feil analyse av brønndata under operasjon)*
- *Feilhandling i forhold til prosedyre for håndtering av brønnsparke*

Ved et eventuelt brønnsparke må brønnen sikres gjennom å raskt og effektivt lukke utblåsningssikringsventilen (BOP), og på den måten forhindre en ukontrollert utblåsning (blow out). BOPen består av flere typer avstengningsventiler med forskjellige funksjoner. Den viktigste er kutte- og stengeventiler (blind shear ram), som både kutter rør som stikker ned i brønnen og stenger brønnen inne slik at hydrokarboner ikke kan strømme fritt til overflaten. Forskjellige ventiler på BOPen gjør at man deretter på en kontrollert måte kan sirkulere ut trykk som formasjonsvæsken skaper, og gjenvinne hydrostatisk kontroll gjennom å pumpe inn tung boreveske (brønnkontrolloperasjon)(Ref-8, s. 28).



Figur 3.3: Deepwater Horizon BOP sett fra to perspektiver (Ref-11, s. 15 og 16).

4 Brønnsparke

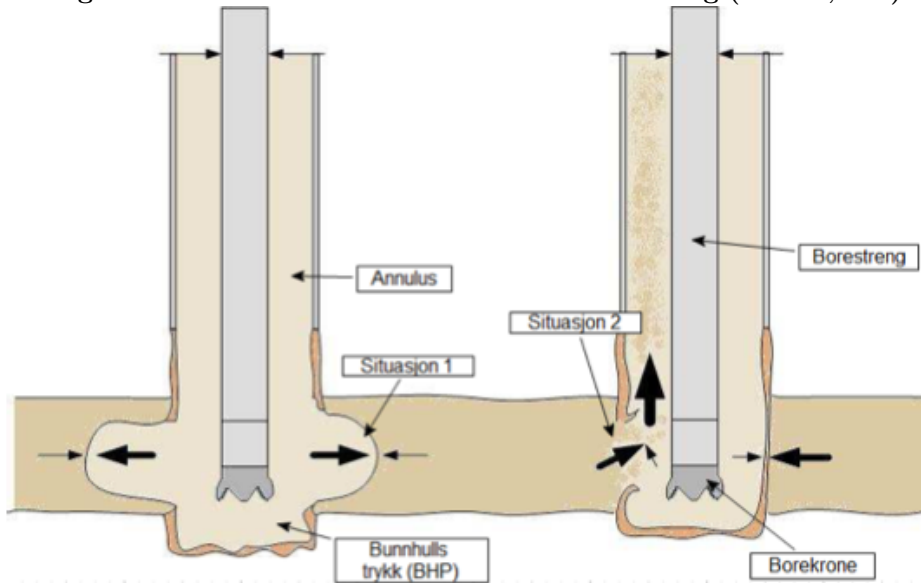
Sikker boring handler om å kunne håndtere dynamiske trykkforhold i brønnen og raskt å kunne kapsle inn hydrokarboner når ustabile brønnforhold oppstår. Et brønnsparke er definert som en uønsket innstrømning av gass/formasjonsvæske inn i brønnen. Hvis man ikke får kontroll over ustabile brønnforhold kan man få en utblåsning der både borerigg, miljø og mannskap blir satt i fare. Normal prosedyre for å håndtere et brønnsparke er å stenge inne brønnen med BOPen. Man får da en trykkoppbygging hvor hydrostatisk kontroll gjenvinnes ved å pumpe inn tung boreveske, for så å sirkulere ut formasjonsvæsken gjennom strupelinjen (choke) (Ref-13, s. 134).

4.1 Forutsetninger

Det er tre forutsetninger for at et brønnsparke (kick) skal kunne inntruffe. Bunnhullstrykket må være mindre enn poretrykket, formasjonen må ha tilstrekkelig permeabilitet, og gass/formasjonsvæske må ha tilstrekkelig lav viskositet slik at den kan strømme med høy rate (Ref-13, s. 134). Det maksimale volumet av innstrømmet formasjonsvæske som trygt kan stenges inne og sirkuleres ut av brønnen uten å få oppsprekking av formasjonen er definert som brønnsparke-toleransen (Ref-14, s. 21).

Under boring er det spesielt to situasjoner hvor tap av trykkbalansen i brønnen kan lede til ukontrollert utblåsning. Den første er at trykket i brønnen blir større enn fra den omkringliggende formasjonen. Sirkulasjonen av boreslammet kan da tapes ut i formasjonen da overtrykket fører til at slammet finner andre veier ut av brønnen enn å følge ringrommet opp mot boreriggen. Tap av brønnsirkulasjon vil føre til tap av trykk, og dette bidrar til lavt nivå av boreslam i ringrommet. Det er stor risiko for brønnsparke hvis man samtidig kommer inn i gasslommer med store overtrykk, og tap av brønnskontroll kan i verste fall føre til en ukontrollert utblåsning (Ref-12, s. 4).

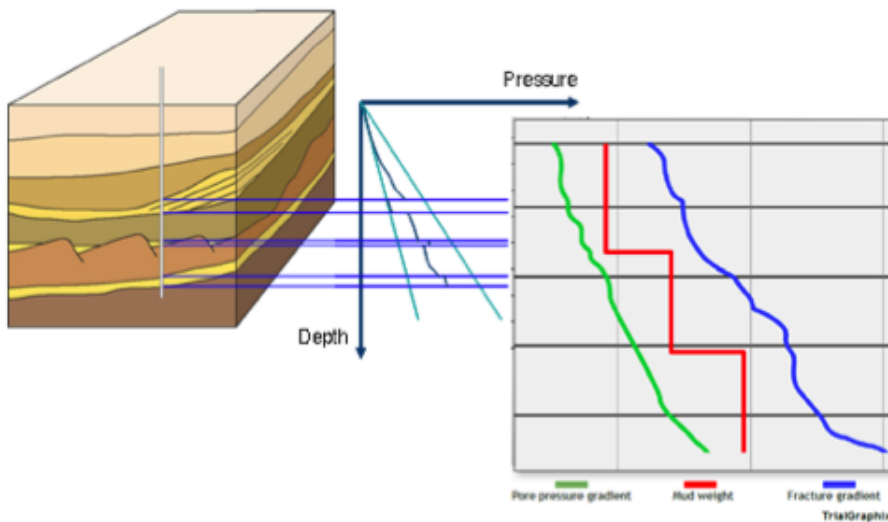
Den andre situasjonen er at man får underbalanse ved at trykket i brønnen bli mindre enn trykket fra formasjonen. Dette kan for eksempel komme av at boreslammets tetthet er for lav, og det hydrostatiske trykket av vekten til væskekolonnen blir derfor for liten. Væske og gass vil da strøme fra formasjonen, inn i ringrommet, og føre til ubalanse. Dersom ikke operatørene oppfatter brønnspark situasjonen og ikke iverksetter riktig innlukningsmetode av utblåsnings-sikringen kan resultatet bli en ukontrollert utblåsning (Ref-12, s. 4).



Figur 4.1: Situasjoner som kan lede til brønnspark u/boring (Ref-12, s. 4).

4.2 Trykkmarginer

Brønnsparke kan oppstå under boring, men også i seinere faser slik som tilfellet var på Deepwater Horizon. Som regel er brønnskroll under ferdigstilling eller vedlikehold en enklere oppgave da man har eliminert formasjonsoppsprekking fra bildet (Ref-13, s. 134). Å ha kontroll på poretrykk og formasjonens oppsprekkingstrykk under boring er en stor utfordring. Spesielt kan dypvannsboring føre til økt sannsynlighet for brønnsparke. I hovedsak skyldes dette den vesentlig mindre forskjellen mellom poretrykk og oppsprekkingstrykk som ofte finne i dypvannsreservoarer. Videre vil andre forhold som spiller inn være den generelt større hyppigheten av grunn gass- og/eller vannsoner man kan forvente å finne i dypvannsreservoarer, og at boring på dypvannsfelt må skje med en lavere risermargin enn for grunnere havdyp grunnet behovet for en lavere egenvekt av boreslammet (Ref-8, s. 28).



Figur 4.2: Trykkmarginer som funksjon av brønndyp (Illustrasjon: SINTEF / TrialGraphics).

Trykkene i undergrunnen vil utvikle seg og man må bruke vekten av boreveske til å regulere slik at man holder seg innenfor marginene til poretrykk og formasjonens oppsprekkingstrykk. Dersom man borer seg ut av disse trykkmarginene må det settes et foringsrør for å unngå en ustabil brønnsituasjon (Ref-1, s. 211).

5 Deteksjon av brønnsparke

Oljereservoarene kan ligge flere tusen meter under havbunnen og situasjoner der uønsket gass/formasjonsvæske strømmer inn i brønnen kan være vanskelig å oppdage. Det er derfor avgjørende at boreoperatørene har evne å kunne analysere og forstå risiko. Riktig aksjon og aktivering av sekundærbarriere(BOP) er tidskritisk. Boremannskapet må være istand til å tolke indikasjoner, og ha riktig utstyr for deteksjon av brønnsparke.

5.1 Grunner for kicke

Det er flere brønnoperasjoner som medfører fare for brønnsparke (Ref-13, s. 135):

- *Boring*
- *Logging*
- *Brønnrengjøring (Fishing)*
- *Setting av føringsrør (Running casing)*
- *Sementeringsoperasjoner*
- *Til- og frakobling av rør*
- *Installasjon av utblåsningsikring (BOP)*

Et brønnsparck kan oppstå på grunn av (Ref-13, s. 135):

- *For lav egenvekt på borevæsken*
 - *Lav tetthet på slam under bore- eller ferdigstillingsoperasjoner*
 - * *For stor reduksjon av borevæskens egenvekt*
 - * *Boring inn i unormale trykkformasjoner*
 - * *Temperaturekspansjon av borevæske*
 - *For mye gass trenger inn og iblandes boreslammet (gas cuttings)*
- *Reduksjon av høyden til væskekolonnen*
 - *Tap av sirkulasjon pga for høy slamvekt (formasjonsoppsprekking)*
 - *Surge/swabtrykk som følge av bevegelse i borestreng (swabbing)*
 - *Trykktap når man drar borestrengen (tripping)*
- *Store trykkforandringer ved rørbevegelser pga friksjon*
- *Uønsket inntrengning i en produserende brønn under boring (trykkforskjeller)*
- *Sement hydrering (ødelegger/bryter ned sementeringen)*

Det klassiske brønnskontrollproblemet er å detektere og håndtere (fortreng) et brønnsparck som oppstår på grunn av utilstrekkelig mudvekt. Under boring vil trykket i et vilkårlig punkt i ringrommet være gitt av summen til det hydrostatiske trykket av vekten til væskekolonnen, og friksjonstrykkfallet som skapes ved sirkulasjon av brønnevæske i ringrommet over den aktuelle dybden (Ref-13, s. 134).

For å regulere den sirkulerende borevæskens tetthet brukes en mudvekt ekvivalent som kalles Equivalent circulating density (ECD). Dette er et uttrykk for en tenkt (fiktiv) slamdensitet, som vil gi et tilhørende hydrostatisk trykk på bunnen. Den beregnes ved (Ref-15):

$$ECD = d + P/0.052 * D \quad (5.1)$$

Hvor:

- d = mud vekt (ppg)
- D = Vertikal dybde (ft)
- P = Trykkfall (psi) i ringrom mellom dybde D og overflate

Utilstrekkelig ECD, der det viser seg at det faktiske poretrykket i brønnen er høyere enn antatt og at man derfor har for lav egenvekt på boreslammet, er hovedgrunnen for brønnsparke under boring. Spesielt ved boring i reservoarer med liten forskjell mellom poretrykk og oppsprekkingstrykk vil riktig beregning av ECD være essensielt for å unngå kick og tapt sirkulasjon (Ref-13, s. 135).

5.2 Indikatorer

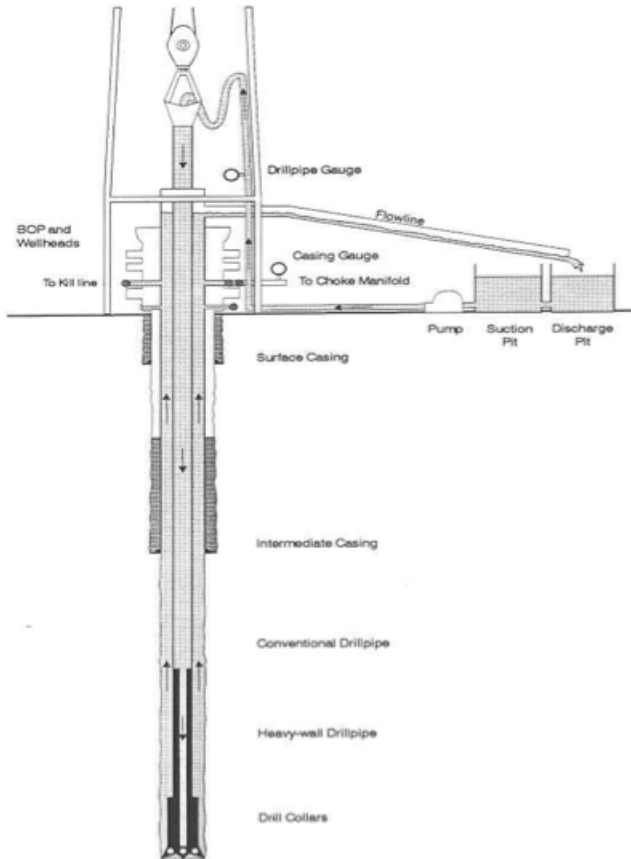
Tidlig deteksjon av brønnsark er tidskritisk for å effektivt kunne aktivisere sekundærbarrieren (BOP). Det kan være forskjellen på en situasjon som kan håndteres, og en situasjon der brønnen kommer ut av kontroll. Typiske faresignaler og brønnsarkindikatorer er (Ref-13, s. 135)(Ref-14, s. 21):

- *Økning av boreraten (pga porøs formasjon)*
- *Økning av volumstrøm*
- *Redusert sirkulasjonstrykk*
- *Økning av pumpehastigheten*
- *Endring i oppsamlingskar for boreveske på innretningen (pit gain)*
- *Gass i boreslammet (Gas cut mud)*
- *Borehull tar mindre mud en beregnet*
- *Strømning fra brønnen med pumpene av*
- *Redusert bunnhullstrykk (BHP)*
- *Tap i vekt av borestrengen*
- *Trykkoppbygging i ringrom*

Under boring er ofte det at man opplever en økning i borehastigheten (Drilling break) den første indikasjonen man får på at et brønnsark er under utvikling. Formasjon med høy permeabilitet og som er porøs vil være lettere å bore i en annen formasjon. Dessuten vil innstrømmet formasjonsvæske fungere som en effektiv renske mekanisme og ha en tendens til å redusere trykket like over borekrona, og på den måten bidra til at borekrona borer raskere. En økning i borehastigheten kan jo bare være en forandring i formasjonen man borer i, og vil ikke være en sikker indikasjon på at man har med et brønnsark å gjøre. Det er derimot grunn til å være på vakt og man må videre se etter flere signaler for å fastslå om man har å gjøre med et brønnsark. Normal prosedyre er da å stoppe boringen og foreta en strømnings sjekk (Flow check)(Ref-13, s. 135).

Rett etter at man har hatt en innstrømning av formasjonsvæske i brønnen vil man oppleve en reduksjon i bunnhullstrykket (BHP). Grunnen til dette er at energien fra formasjonsvæsken som strømmer inn i brønnen gir ekstra løft til boreveskesøylen i ringrommet. Effekten av dette vil lede til økning i pumpehastighet, og ett fall i pumpetrykk. Reduksjonen i bunnhullstrykket vil også gi utslag som tap av oppdrift på vektindikatoren til borestrengen (Ref-13, s. 135).

Tung boreveske sirkuleres kontinuerlig for å holde brønnen under hydrostatisk kontroll. Mens man borer må man kontinuerlig erstatte hullvolumet som genereres av borekrona og tap til formasjon med tung boreveske. Over en kort periode kan man derimot betrakte normal sirkulasjon som en prosess med stasjonær strømning (steady-state process). Altså det som går inn, kommer ut. Når ustabile brønnforhold oppstår som følge av ett brønnspar vil en viktig indikator derfor være at man får en økning i retur strømmen fra brønnen (Ref-13, s. 136).



Figur 5.1: Sirkulering av boreveske under boring (Ref-13, s. 135).

Borevesken pumpes fra mudtanken (suction pit) og videre gjennom høytrykks overflate rør, swivel/kelly, og inn i borestrengen. Borevesken går ned borestrengen og videre ut borekrona, og tilbake opp gjennom ringrommet, før den returneres til mudtanken gjennom separator for borevæske. En økning i returstrømmen vil igjen føre til at man får en rask økning i mud-tankvolumet. Denne volumøkningen kan antas å være lik nedhulls formasjonsvæske, og vil være en sikker indikator på at man har med et brønnsparke å gjøre (Ref-13, s. 136).

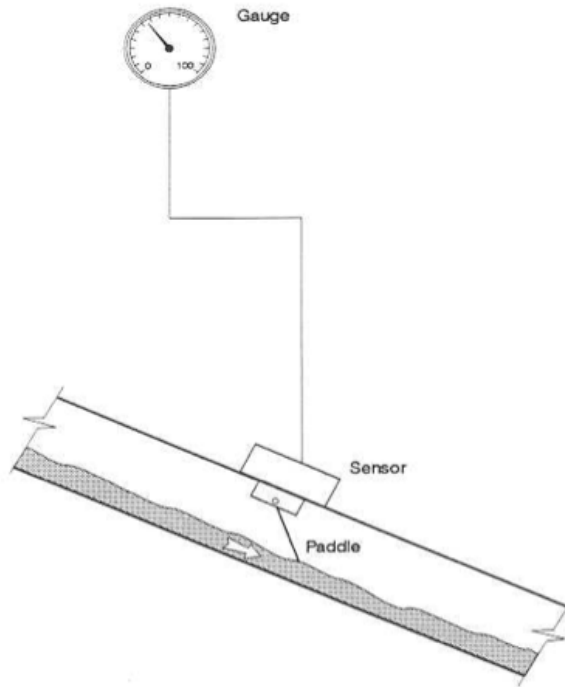
I siste instans vil den sikreste kickindikatoren være en strømningstest. Da stenger man av pumpene, og observerer om det skjer en økning av boreveskevolumet i oppsamlingskarene på innretningen (pit gain). Oppsamlingskarene er viktig å overvåke, men tiden det tar å slå av pumpene og foreta en strømningstest kan gi brønnsparke tid til å øke i størrelse (Ref-13, s. 136). En utfordring med indikasjonene på brønnsparke er at man kan få mange signaler, men det vil være usikkerhet på om det faktisk er et kick. Når man får sikre indikasjoner er det ofte for seint. Ideelt vil man oppdage et brønnsparke før det når utblåsningsikringen slik at operatøren kan stenge brønnen inne, og hindre hydrokarboner å strømme fritt til overflaten.

5.3 Utstyr for deteksjon

For å unngå at et brønnsparke utvikler seg til en ukontrollert utblåsning er det viktig å benytte utstyr som kan gi tidlige indikasjoner på at et kick er under utvikling.

5.3.1 Flowmeter

En gammel, men pålitelig måte å overvåke en brønn på er å utnytte at et brønnsparke bryter balansen mellom strømning inn og ut av brønnen. Det er derfor viktig å overvåke returstrømmen fra brønnen. Et flowmeter installeres på returlinjen, og har en mekanisk måle-flap (paddle) som åpner og stenger som respons på gjennomstrømning. En sensor registrerer posisjonen, og et elektrisk eller pneumatisk signal videresendes til boredekket hvor signalet digitaliseres. Målingen gir operatøren kontinuerlig informasjon om returstrømmen der 90% utslag fra referanseposisjonen angir maks strømning. Når ønsket pumpehastighet er oppnådd, kan man sette høy/lav alarmer for å gi signal på brønnsparke eller tapt sirkulasjon (Ref-13, s. 136).



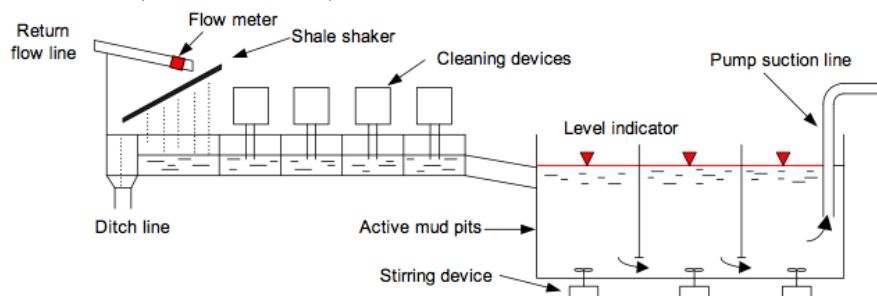
Figur 5.2: Flowmeter for måling av returstrøm (Ref-13, s. 136).

5.3.2 Nivåmåling av slamtankene

En essensiell komponent for brønnovervåking er å ha volumkontroll i slamtankene. Et PVT-system (pit volume totalizer) kan brukes for å overvåke nivåforandringer. Returstrømmen fra brønnen, vil etter rensing føres tilbake til de samme tankene som de pumpes fra, og inn i brønnen igjen. Under boring vil derfor nivået være tilnærmet konstant. Ettersom man borer seg dypere og brønnvolumet øker, vil det skje en jevn reduksjon i slammivået, men denne reduksjonen er forutsigbar og kan beregnes (Ref-16, s. 44).

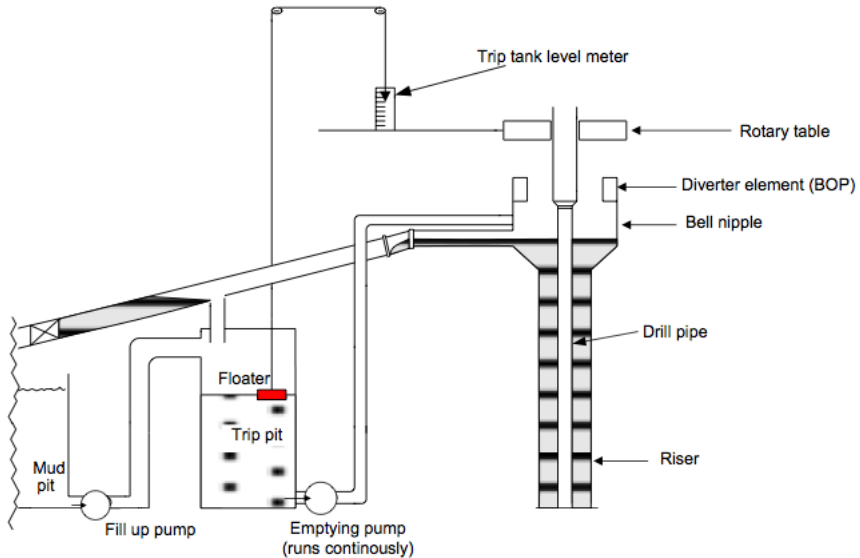
Dersom det oppstår en situasjon med underbalanse, og formasjonsvæske strømmer inn i brønnen, vil en del av slammet i brønnen bli skyvd ut. Det vil altså bli en økning i returstrømmen fra brønnen, kontra det som pumpes ned gjennom borestrengen. Dette gir en viss økning av nivået i slamtankene, da det fortrengte slammet i brønnen blir presset til overflaten. Da overflaten til slamtankene er relativt stor, kreves det at væsknivået kan måles med centimeters nøyaktighet, for å kunne fange opp endringer i volumet på noen hundre liter. Dette kan måles med instrumenter basert på elektromagnetiske prinsipper som flottører i tankene, eller på akustiske målinger av væskeoverflaten (Ref-16, s. 44).

Signal fra sensorene sendes til boredekket og digitaliseres slik at man kan lese av volum i barrels (1 oil bbl = 0.158987294928 m³) eller kubikkmeter (m³). Den kontinuerlige overvåkingen gjør det mulig å sette alarm hvis det skjer store forandringer i nivået. For å unngå falske alarmer bør borer varsles før man utfører operasjoner som fører til forandringer i mudvolumet, og dermed kan mistolkes som et brønnsparke (Ref-13, s. 136).



Figur 5.3: Deteksjon av brønnsparke ved å ha volumkontroll i mudtank (Ref-17, s. 42).

Under tripping, vil variasjonen i mudvolum overvåkes i en egen tripp-tank.

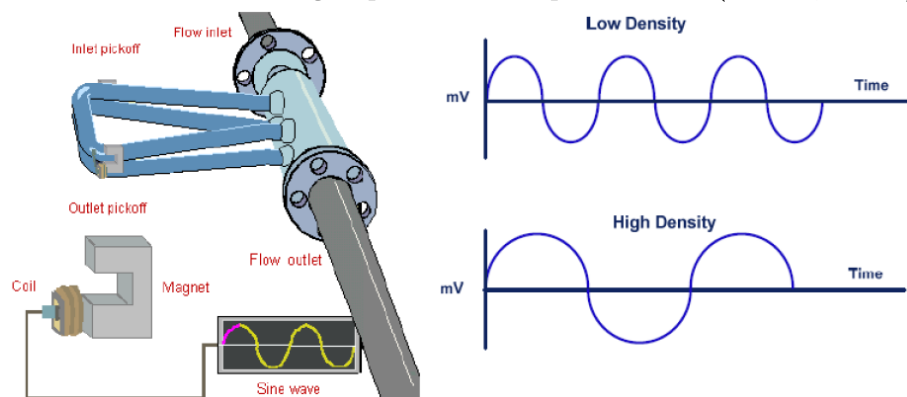


Figur 5.4: Deteksjon av brønnsparke ved å ha volumkontroll i tripp-tank (Ref-17, s. 42).

Nivåøkning i slamtankene vil være et sikkert tegn på at noe er galt med trykbalansen. Måling av nivået vil derfor være en av de viktigste og mest pålitelige parametrene man har for overvåking av trykbalansen i brønnen (Ref-16, s. 45).

5.3.3 Coriolis massestrømsmåler

Fordelen med Coriolis massestrømsmåler er at den fortsatt gir pålitelige målinger, selv om borevæsken inneholder borekaks. Den kan måle masse, volum, tetthet og temperatur. Ved å måle oscillasjoner fra et målerør, og ved å ta tiden det tar for en oscillasjon kan man få eksakte målinger på for eksempel tetthet (Ref-14, s. 19).

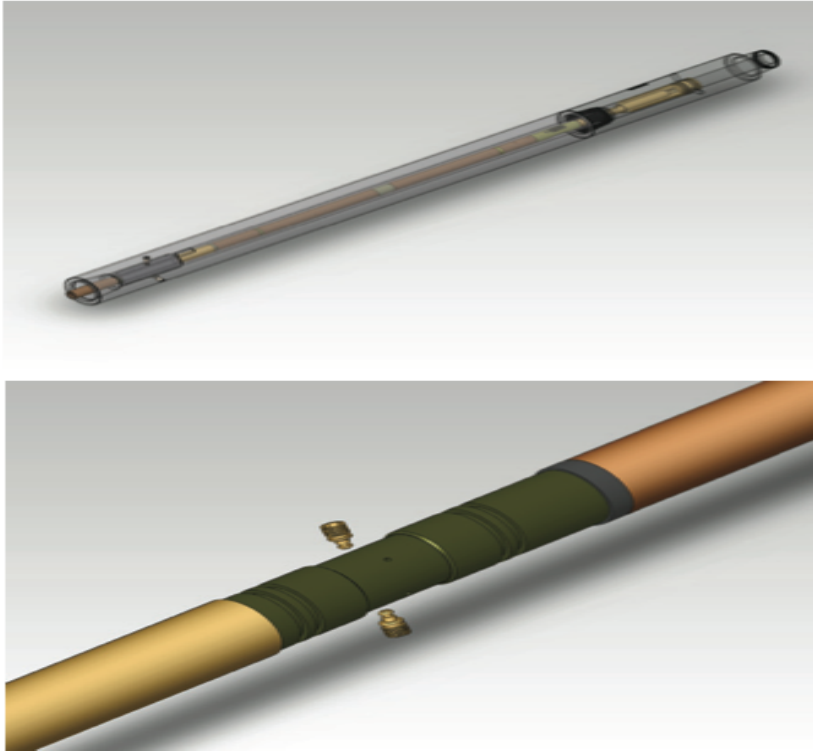


Figur 5.5: Coriolis massestrømsmåler med oscillasjons periode (Ref-14, s. 20).

Coriolis massestrømsmåler er en målemetode som blir mer og mer benyttet av oljeindustrien for god overvåking av sirkulasjonssystemet. I kombinasjon med et reguleringsystem vil man kunne detektere mudtap med en sensitivitet på mindre en 0.5 bbl (Ref-14, s. 19).

5.3.4 Måling av ringromstrykk under boring (APWD-Tool)

I nyere tid er det blitt forsket på å utvikle verktøy for trykkmåling under boreoperasjoner (Annular-Pressure-While-Drilling). APWD-sensorer gjør det lettere for boreoperatørene å foreta kontinuerlig sanntidsovervåkning av trykket i ringrommet. Under boring med små trykkmarginer trengs et riktig beslutningsgrunnlag for å kunne ta raske og gode beslutninger slik at bunnhullstrykket holdes innenfor trygge operasjonsgrenser. Det vil også være mulig å oppdage et potensielt brønnsparke tidligere enn når man bare kan benytte overflatemålinger. Et problem med APWD-utstyr er at ringromstrykket bare kan måles mens riggpumpene er på, da de bruker mud puls telemetri for å fungere (Ref-18).



Figur 5.6: APWD-sensor for måling av ringromstrykk (Ref-19, s. 20).

5.4 Fingeravtrykk

For å avgjøre om man har en situasjon der uønsket gass/formasjonsvæske strømmer inn i brønnen, er det viktig å ha tilgang til sammenligningsdata og målinger for normale forandringer i bunnhullstrykket og overflate mud volumer. Ved å måle og dokumenterer disse prosessene har man “fingeravtrykket” (Fingerprinting) til neste gang man skal utføre brønnoperasjonene. Ved mistanke om kick kan man sammenligne avvik fra fingeravtrykkene for å avgjøre om man faktisk har et reelt brønnsparke. Eksempler på måledata kan være (Ref-14, s. 22):

- *Surge/swabtrykk under stopp i sirkulasjonen*
- *Mud kompresjonsfaktor*
- *Borestrengens rotasjonseffekt på ECD*
- *Hvordan en flyteriggs bevegelse påvirker målingene*
- *Responstider*
- *Mud ekspansjonsfaktor pga temperatur*
- *Returstrøm under til/fra-koblinger eller med pumper av*
- *Trykkoppbygning ved stengt utblåsingssikring (shut-in)*
- *Gass målinger i slamtankene*
- *Differanse i inn/ut-strømmet boreslam*

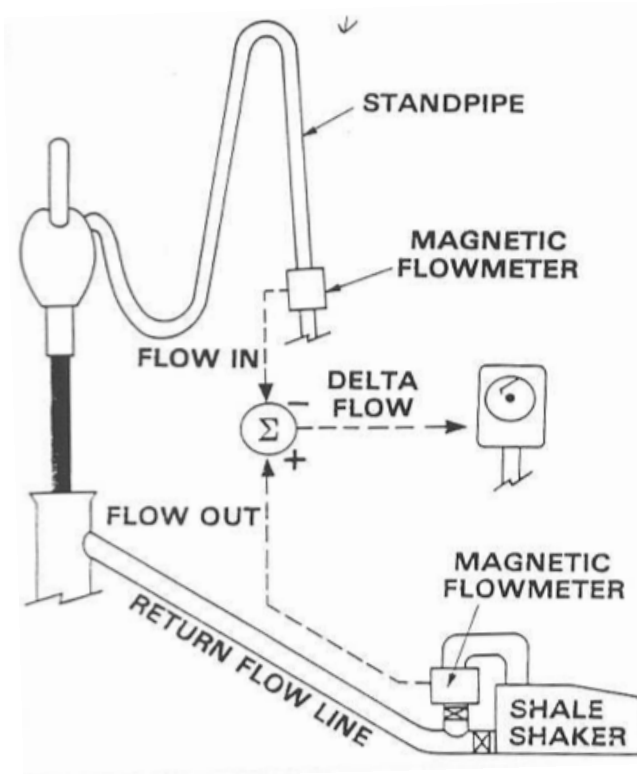
6 Metoder

Den sikreste indikatoren på brønnsparke er en plutselig økning av returstrømmen fra brønnen. Det er derfor viktig å overvåke returstrømmen og å føre volumkontroll av slamtankene. Til måling av returstrøm benyttes ofte et flowmeter, mens et PVT-system (pit volume totalizer) kan brukes for å overvåke nivåforandringer i slamtankene. Prosedyren er da å slå av pumpene, og overvåke om man har strømming fra brønnen med nedstengt sirkulasjonssystem. En utfordring knyttet til dette er at det tar tid, og vil gi brønnsparke tid til å vokse i størrelse (Ref-13, s. 136).

Videre kan viktige faresignaler på kick være at borevæsken som kommer i retur blir saltholdig eller inneholder gass. Visuell overflatekontroll av disse forurensningene er ofte for seint, da et faktisk brønnsparke allerede kan ha fortrenget mesteparten av boreslammet fra ringrommet og situasjonen utvikles til en ukontrollert utblåsning. Det har derfor blitt forsøkt å utvikle andre systemer for overvåking av trykklansen i brønnen slik at man kan oppdage et potensielt brønnsparke på et tidligere tidspunkt (Ref-13, s. 136).

6.1 Delta-strøm indikator

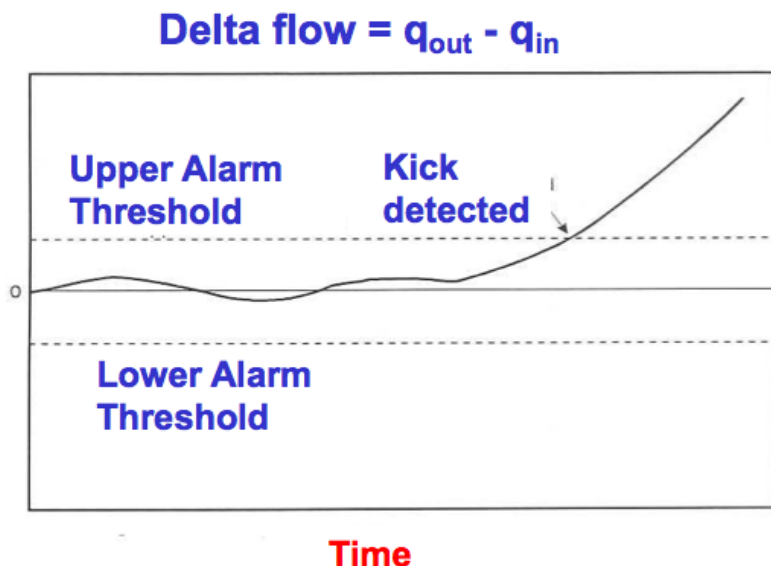
En pålitelig metode for tidlig deteksjon av brønnsparke er delta-strøm metoden.



Figur 6.1: Delta-strøm metode for tidlig indikasjon på brønnsparke (Ref-13, s. 138).

Under boring kan man innhente nøyaktige målinger av pumpe hastigheten og returstrømmen fra brønnen. Under normal sirkulasjon skal de to strømmene være like, og stor differanse vil derfor indikere at man har innstrømning i brønnen eller tapt sirkulasjon. Høy/Lavgrenser med tilhørende alarmer må settes slik at man unngår gjentagende falske alarmer, men også lavt nok til å fungere som et nyttig verktøy for tidlig deteksjon av brønnsparke (Ref-13, s. 138).

Delta flow indicator



Figur 6.2: Delta-strøm metode med grenser og tilhørende alarmer ved brønns-park (Ref-13, s. 138).

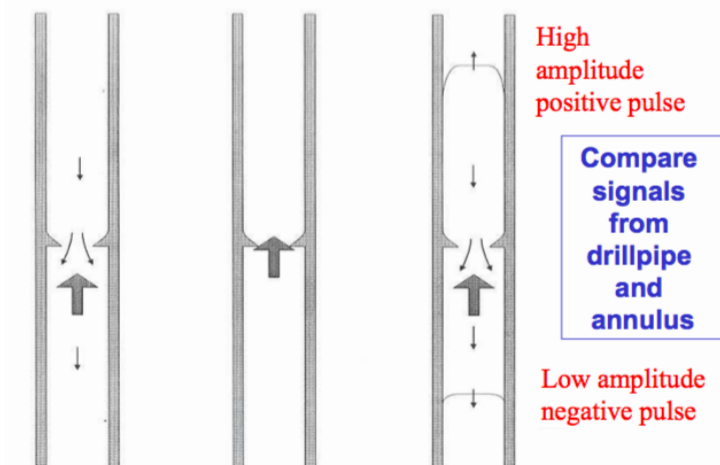
Grenser som er mye brukt i industrien er på størrelsesorden ± 25 gal/min (1 US gallon/min = 3.78541178 l/min). Det blir en avveining mellom systemets sensitivitet og antall falske alarmer som blir gitt. Positive/negative-strømningstransienter på grunn av rørbevegelser, eller forandring av pumpehastighet vil kunne gi falske alarmer hvis ikke systemet er stilt på vent (standby mode). På en flytende rigg vil systemet ha ytterligere utfordringer knyttet til å takle ujevn returstrøm, da bølger skaper forskyvninger. Nyere systemer er utviklet med en mer avansert programvarepakke for å forutse disse transientene, og man kan få en automatisk skift til ventetilstand når for eksempel pumpehastigheten forandrer seg, eller at posisjonsensorer på vinsjer indikerer en hurtig rørbevegelse (Ref-13, s. 139).

6.2 Akustiske systemer

Systemer som bygger på mud puls telemetri (som APWD) gir en fordel i tidlig deteksjon av brønnspark, spesielt når det kommer til gass. Ett problem ved de konvensjonelle systemene er at de ikke fanger opp gass som kommer inn i brønnen og løser seg opp i den sirkulerende borevæsken. Det er utviklet en rekke måling-under-boring verktøy (MWD-tool). De bygger på akustiske målinger på den sirkulerende borevæsken, og effekten gass har på egenskapene til de akustiske bølgetransmisjonene i mediet. Systemene utnytter at gass i mud vil føre til redusert hastighet på den akustiske bølgen som beveger seg. Videre kan man utnytte at gass vil redusere signal styrken eller amplituden av en oscillerende bølge sammenlignet med hva tilfellet er i ren mud (Ref-13, s. 137).

Mud-puls telemetri verktøy tar målinger nedhulls og konverterer dataene til binære signaler. Informasjonen transporteres gjennom mud kolonnen i form av positive, negative, eller kontinuerlige trykkbølge pulser (Ref-13, s. 137).

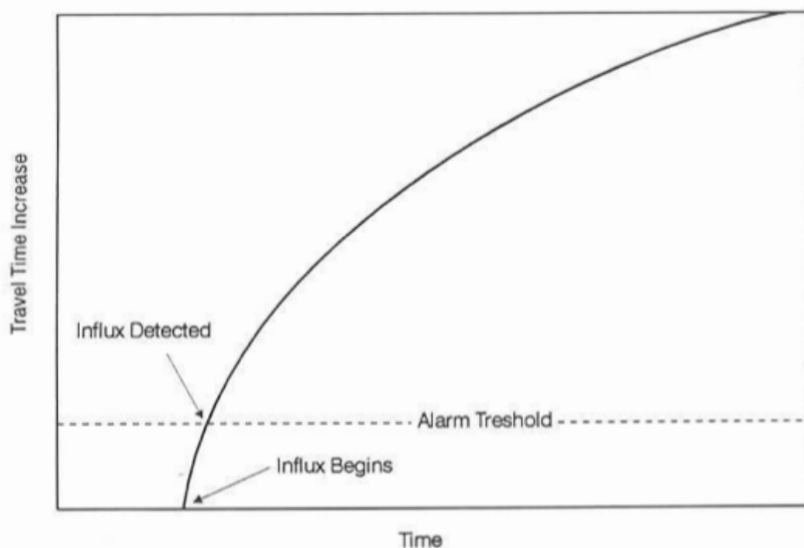
Mud pulse telemetry - pressure pulses detected at the surface



Figur 6.3: Trykkbølger skapes av et MWD-verktøy (Ref-13, s. 137).

Positive bølgeformer skapes av en poppet-ventil mot et fast sete. Trykkbølger beveger seg opp borestrengen i en hastighet som er avhengig av borevæskens kompressibilitet og tetthet. Samtidig produseres en negativ puls av mye lavere intensitet, som beveger seg opp ringrommet. Oppe på boreinnretningen er det montert transdusere på inn/ut-strømningslinjer som mottar og videresender rådataene til en datamaskin som filtrerer vekk støy, og behandler dataene videre. Bevegelsestiden og dempingskarakteristikkene til begge sider skal samsvare hvis transmisjonsmediet er det samme. Systemet gir alarm hvis en forhåndsinnstilt grenseverdi brytes (Ref-13, s. 137).

Acoustic kick detection



Figur 6.4: Deteksjon av gass basert på forandring i akustisk bevegelsestid gjennom sirkulasjonssystemet (Ref-13, s. 138).

6.3 Trykkstyrt boring

Nye teknologier som trykkbalansert boring og underbalansert boring har i de senere årene blitt utviklet for å øke utvinningsgraden på eksisterende felt, og for å få tilgang til vanskelige felt med små trykkmarginer mellom poretrykk og oppsprekkingstrykk. Ved vanlig overbalansert boring kontrolleres brønntrykket ved at det pumpes boreslam ned gjennom borestrengen og ned til borekronen. Slammet passerer borekronen og på sin vei opp gjennom ringrommet (annulus), transporteres også sand og grus (borekaks) fra selve boreprosessen sammen med boreslammet. Hydrokarboner hindres i å trenge inn i brønnen ved at vekten til boreslammet som sirkuleres skaper et betydelig høyere trykk i borehullet enn i selve reservoaret. Dette medfører også at det vil være fare for å boreslammet vil bli presset ut av borehullet til omkringliggende strukturer, noe som gjør at sirkulasjonen synker og at strukturen i formasjonen blir ødelagt. Dette gjør at etter hvert som utvinningsgraden stiger på et felt vil det bli større utfordringer knyttet til å fortsette boringen (Ref-20)(Ref-12, s. 9).

Trykkbalansert boring og underbalansert boring er med på å effektivisere oljeboring, ved å automatisere brønnborings-operasjoner. Disse nye teknologiene gjør det mulig å fortsette å bore produksjons- og injeksjonsbrønner på felt med små trykkmarginer, og har som hovedfokus å ha full kontroll på trykket nedhulls i borebrønnen. I et reservoar der det har vært produsert over lang tid, kan trykket bli uforutsigbart, og variere fra sone til sone. Det vil derfor være en del utfordringer knyttet til å benytte trykkstyrt boring, da teknologien medfører mindre overtrykk fra boreslammet. For å kunne styre og korrigere trykket i borehullet holdes boreslammet inne i et lukket system som kontrolleres ved hjelp av en strupeventil (choke) på toppen av brønnen. På den måten kan man styre trykket slik at strukturen ikke skades, og samtidig hindrer innstrømning av hydrokarboner til brønnen. (Ref-20)(Ref-10, s. 10).

6.3.1 Trykbalansert boring (Managed Pressure Drilling-MPD)

Ved å benytte trykbalansert boring kan man få tilgang til vanskelige felt med små trykmarginer mellom poretrykk og oppsprekkingstrykk. Metoden har også potensiale for å tidlig deteksjon av brønnsparke. Ved konvensjonell boring vil bunnhullstrykket (BHP) være summen av det hydrostatiske trykket av vekten til væskekolonnen ($MW = \text{mud weight}$), og friksjonstrykkfallet ($AFP = \text{annulus friction pressure}$) som skapes ved sirkulasjon av brønnvæske i ringrommet over den aktuelle dybden (Ref-14, s. 1).

$$BHP_{DYN} = MW + AFP \quad (6.1)$$

Under til/fra-koblinger vil det ikke være sirkulasjon og man vil ha statiske forhold . AFP vil derfor være tilnærmet null (Ref-14, s. 1):

$$BHP_{STAT} = MW \quad (6.2)$$

Ved et åpent konvensjonelt overbalansert boresystem vil de eneste mulighetene for justering av bunnhullstrykket være å endre på tettheten til boreslammet, eller å endre pumperaten gjennom borestrengen. Når man starter og stopper pumpene ved rørkoblinger skapes trykkforandringer som kan skape problemer under boring på felt med små trykmarginer mellom poretrykk og oppsprekkingstrykk. Trykbalansert boring introduserer en ny variabel for å kontrollere bunnhullstrykket. I tillegg til mudvekt og ringroms friksjonstrykk, styres bunnhullstrykket dynamisk ved hjelp av baktrykk ($BP = \text{backpressure}$). Vekten av boreslammet kan faktisk være lavere enn poretrykket, men overbalanse mot reservoaret sikres til enhver tid ved å styre baktrykket i en lukket returlinje ved hjelp av en strupeventil (choke). Altså vil kontinuerlig sirkulasjon over chokeventil være viktig for trykkkontroll i MPD, og bunnhullstrykket blir da (Ref-14, s. 1):

$$BHP_{DYN} = MW + AFP + BP \quad (6.3)$$

Under sirkulasjon vil baktrykket være lavt og tilnærmet null, mens ved statiske forhold med pumper av under rørkoblinger vil det brukes mer baktrykk for å kompensere for tap av AFP (Ref-14, s. 1):

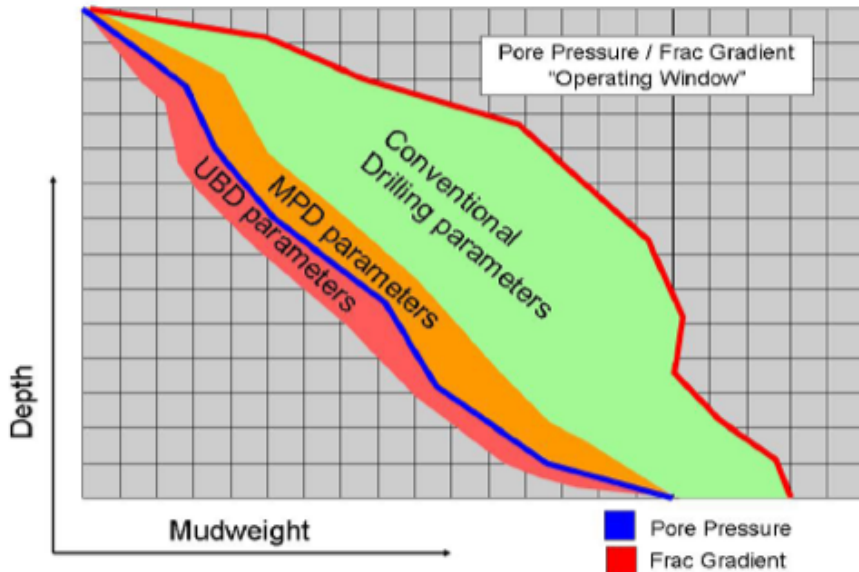
$$BHP_{STAT} = MW + BP \quad (6.4)$$

Dette gjør det mulig å opprettholde ett tilnærmet konstant bunnhullstrykk (BHP) under hele boreoperasjonen, noe som vil være veldig gunstig under operasjoner der små trykkvariasjoner kan føre til innstrømning eller oppsprekking av formasjonen. I motsetning til konvensjonell boring som benytter et åpent-til-atmosfære system, vil man med trykkbalansert boring holde boreslammet inne i et lukket sirkulasjons-system for kunne styre og korrigere trykket i brønnen. Et lukket system og god volumkontroll gir raskere tilbakemeldinger fra brønnen, for eksempel med hensyn til tap eller influx. Ved å holde bunnhullstrykket litt overbalansert, eller så nært balansert som mulig, gjør denne teknologien det mulig å bore seksjoner med små marginer og respondere raskt hvis pore- eller fraktureringstrykk avviker fra prognoser (Ref-14, s. 1-2).

6.3.2 Underbalansert boring (Underbalanced Drilling-UBD)

Operasjoner med underbalansert boring skiller seg fra trykbalansert boring ved at man med hensikt har et bunnhullstrykk som er lavere enn poretrykket til formasjonen. Denne teknologien tas i bruk når strukturen er blitt for ustabil for trykbalansert boring. Fordelen med å underbalansere trykket i brønnen er at risikoen for å skade strukturen bli minimalisert, man får høyere borehastighet (ROP), og sannsynligheten for tapt sirkulasjon reduseres. Da bunnhullstrykket er lavere enn poretrykket, vil innstrømning av gass/formasjonsvæske til brønnen fra reservoaret være en tilsiktet del av operasjonen. Formasjonsvæske sirkulerer sammen med boreslammet, og underbalansert boreoperasjoner må ha utstyr på for å skille ut slammet fra formasjonsvesken når det kommer til overflaten. Et lukket sirkulasjonssystem hindrer formasjonsvæsken fra å komme i kontakt med mennesker og potensielle tenkilder (Ref-14, s. 2).

Da underbalansert boring medfører at bunnhullstrykket vil være lavere en formasjonstrykket vil den sikkerhetsmessige utfordringen knyttet til brønnkontroll være at det hydrostatiske trykket fra boremediet ikke lenger er den primære brønnkontrollmekanismen. Altså har man ikke lenger to uavhengige barrierer, primær og sekundær, men en barriere. Andre utfordringer er sikkerhetsproblemer knyttet til giftig gass i høytrykks-miljø, økte kostnader, og til havs er det ikke uproblematisk å ha en åpen fakkell for å brenne av hydrokarboner samtidig som man tar opp innstrømmet gass/formasjonsveske til overflaten (Ref-14, s. 2).



Figur 6.5: Trykkgradienter for UBD, MPD og konvensjonellboring (Ref-14, s. 3).

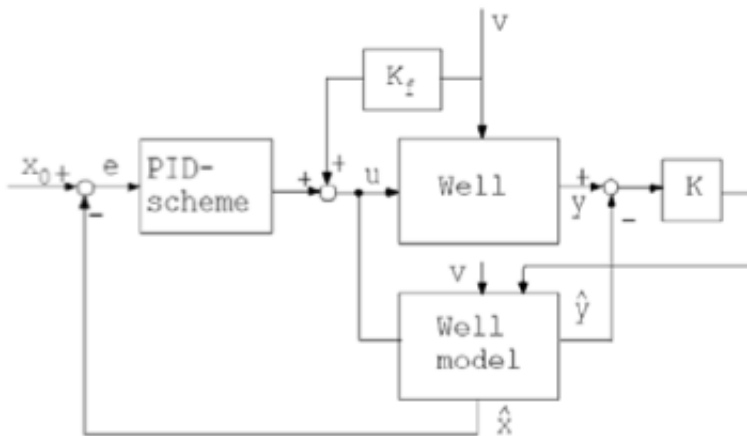
Den største forskjellen på underbalansert og trykbalansert-boring, er at man med underbalansert boring tilsiktet leder innstrømmet formasjonsvæske opp til overflaten. Dette gjør man ikke med trykbalansert boring. Underbalansert og trykbalansert-boring kan brukes på felt med små trykkmarginer mellom poretrykk og oppsprekkingstrykk hvor det vil være umulig å bruke konvensjonell boring. Underbalansert boring brukes i hovedsak for å redusere skade på formasjonen og for å øke utvinningsgraden, mens trykbalansert boring brukes for løse rene boretekniske utfordringer og for å bore mer effektivt (Ref-14, s. 2).

6.3.3 Regulering

Ved trykkstyrt boring vil trykkvariasjon i strupeventilen (choke) være hoved-indikatoren for å detektere et brønnspark. En regulator brukes for automatisk kontroll av åpningen på stupeventilen. Mulige regulatorer kan være:

PID

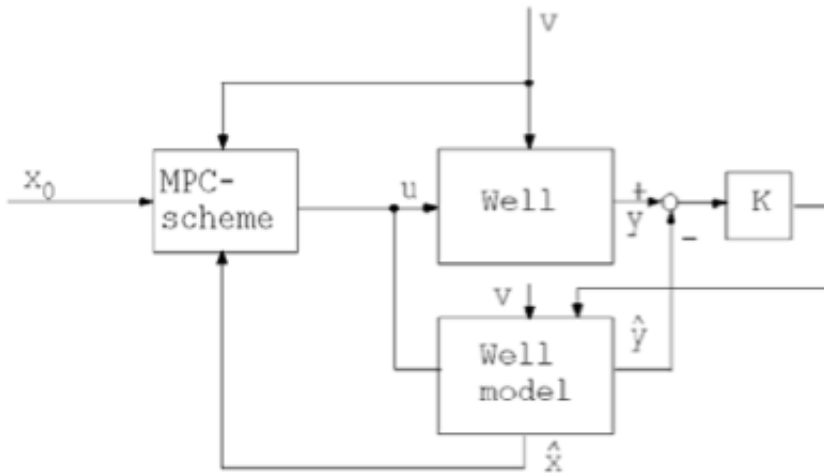
PID-regulatorer (Proportional-Integral-Derivative) er en vanlig regulator for lineære systemer. En utfordring ved bruk av PID-regulator er at boring er ulineær prosess, og regulatoren må derfor tilpasses for å oppnå en automatisk styring av strupeventilen. Videre kan det være problematisk å fastslå korrekte kontrollparametere, og dersom det oppstår parameterendringer (feks. temperatur) i reguleringsløyfen må enten regulatoren stilles inn på nytt (re-tunes) eller så må det implementeres en eller annen form for adaptivitet, som innebærer automatisk justering av regulatorparametrene ved parameterendring (Ref-14, s. 11).



Figur 6.6: PID-regulering for automatisk styring av strupeventilen (Ref-21 s. 2).

MPC

En mer avansert regulator er MPC (Model Predictive Control). Den er ulineære og benytter en modell for prediksjon av systemets fremtidige oppførsel. Modellen lages slik at den beskriver oppførselen til den ulineære tofase veskestrømmen i brønnen. En algoritme prøver å minimere feilen mellom setpunkt og fremtidig predikert måling. De optimale regulerings-innstillingene velges ut fra algoritmens resultater. Fordelen med MPC er at den er ulineær, og den må dessuten ikke stilles inn på nytt hver gang det oppstår parameterendringer. Dette vil være tids- og kostnadsbesparende (Ref-14, s. 11)



Figur 6.7: MPC-regulering for automatisk styring av strupeventilen (Ref-21, s. 3).

Ved å benytte trykkstyrt boring vil man i tillegg til å ha bedre kontroll på bunnhullstrykket, kunne oppnå en tidligere deteksjon av brønns-
park. Hoved-indikatoren for deteksjon er trykkvariasjon i strupeven-
tilen. For å unngå en situasjon som kan lede til ukontrollert utblåsning
er deteksjon og innstenging ved brønns-
park tidskritisk. Innstengings-
prosedyrene ved automatisk regulering av strupeventilen gjør at man
oppnår kontroll over uønsket innstrømmet gass/formasjons-væske på
et tidligere tidspunkt enn man ville gjort ved konvensjonelle inne-
stengningsrutiner. Dermed vil størrelsen på brønns-
parket reduseres. Ved en situasjon med utilsiktet innstrømning av forma-
sjonsvæske til brønnen vil strømningsraten gjennom strupeventilen øke. Dette le-
der til økt friksjonstrykk, som igjen leder til økt bunnhullstrykk. Det
automatiske reguleringssystemet vil da øke åpningen på strupeventi-
len for å holde bunnhullstrykket konstant. Man får da en ytterligere
økning i innstrømmet formasjonsvæske, og en ytterligere økning av
strømningsraten gjennom strupeventilen. Reguleringssystemet vil da
gjenkjenne dette som et brønns-
park og regulere åpningen på strupe-
ventilen tilbake til forrige setpunkt. Bunnhullstrykket vil da øke og
innstrømningen vil reduseres. Fortsetter den uønskede innstrømning-
en kan strupeventilen lukkes videre (Ref-14, s. 23).

Vanlige innstengningsprosedyrer under brønns-
park er å stenge av
pumper, for så å foreta en strømningsjekk. Hvis man opplever økning
av volumet i slamtanken med pumpene av, vil man videre iverkset-
te tiltak for å stenge inne brønnen. Denne strømnings-
testen tar tid
og vil tillate brønns-
parket å øke i størrelse, som igjen vil resultere i
større trykkoppbygning. Ved å benytte trykkkontrollert boring oppnår
man mindre variasjon i bunnhullstrykket ved ett brønns-
park. Pum-
pene vil aldri være avstengt og man vil derfor få mindre innstrømmet
formasjonsvæske i brønnen (Ref-14, s. 23).

6.4 Bayesiansk deteksjons-metode

Prediktive metoder gjør bruk av modellering for å beskrive bore-slammets strømming gjennom systemet ved forskjellige aktiviteter. Hensikten med dette er blant annet å redusere antall falske alarmer. Ved å modellere sirkulasjonssystemet forsøker man å predikere målinger av returstrøm ut av brønnen, og differansen av inn/ut-strømmet boreslam. Hvis det er mulig å lage nøyaktige modeller kan man sammenligne de beregnede prediksjonene med de faktiske målingene for å fastslå om differansen skyldes et brønnspar (Ref-22, s. 2).

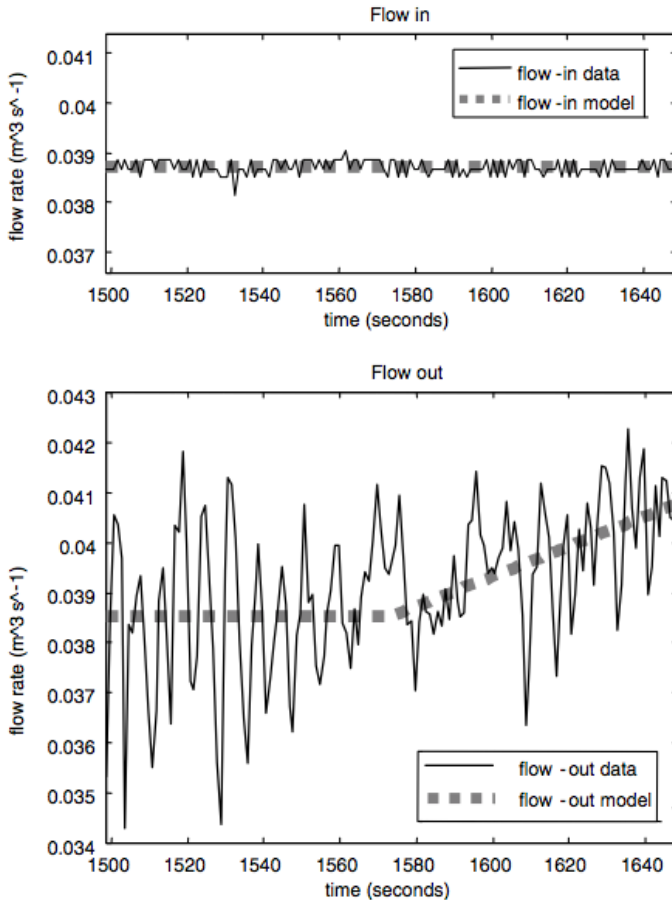
Måling av retur- og delta-strøm er en hyppig brukt metode av industrien for sikker deteksjon av brønnspar. For å måle innstrømmet boreveske benyttes ofte sensorer som måler pumpeslag, mens man benytter flowmeter for retur-strøm. En utfordring ved bruk av strømningsdata er at målemetodene resulterer i en del målestøy. Videre vil det også spesielt på dypvannsrigger være ytterligere utfordringer knyttet til bruk av strømningsdata for deteksjon av brønnspar. Bølger vil føre til forskyvninger slik at returstrømmen blir ujevn, noe som igjen kan resultere i at grenseverdier brytes og man får uønskede alarmer (Ref-22, s. 1).

For å ha muligheten til å ta gode beslutninger basert på strømningsdata med mye støy, er det i nyere tid utviklet en metode basert på et Bayesiansk sannsynlighets rammeverk. Brønnspar av varierende type moduleres eksplisitt som tidsserier av strømningsdata, uten å involvere grenseverdier. Som en naturlig konsekvens av matematikken ved Bayes regel vil rammeverket effektivt kompensere for variasjon av støy i strømningsdata, og justere sensitiviteten for alarm tilsvarende. For mer generell Bayesiansk analyse se Ref-23. Videre kan andre aktiviteter og situasjoner som kan gi falske alarmer modelleres eksplisitt. Ved å utvide settet av modeller til å involvere for eksempel rør-koblinger eller tapt sirkulasjon kan antall falske alarmer man får på grunn av tvetydige strømningsdata reduseres (Ref-22, s. 1).

Hovedkomponentene i den Bayesianske kickdetektoren er et *modell set*, og et modelsamsvarende (Bayesiansk) sannsynlighets *rammeverk*. Modellene innlemmer tidligere informasjon man har om vanlige og uvanlige borehendelser. Det Bayesianske rammeverket trekker slutninger fra strømningsdataene om hvilke av modellene som med høyest sannsynlighet samsvarer med dataene. Hvis dataene mest sannsynlig samsvarer med en normal rigghendelse gis ingen alarm, mens hvis man får en situasjon som med stor sannsynlighet er et brønnsparke blir det gitt alarm (Ref-22, s. 2).

Detektoren må altså ha et omfattende set av modeller for strømningsdataene vi er interessert i. Hver enkelt modell i settet representerer en tidsserie, som beskriver signaturen til en enkelt borehendelse. Det kan være beskrivelse av forskjellige typer brønnsparke, men også andre normale borehendelser som kan gi falske alarmer hvis de ikke er modellert eksplisitt. Detektoren bruker data buffer med glidende vindu (sliding window) for fastslå om strømningsdataene samsvarer med en gitt modell. For å sammenligne modellene med strømningsdataene brukes Bayes regel. Dette er en matematisk beskrivelse av betinget sannsynlighet, som brukes til å fastslå relativ sannsynlighet for modellene i lys av strømningsdataene. I sanntid bruker detektoren Bayes regel for sammenligning av virkelig data i vinduet med hver enkelt modell. Deretter normaliseres de relative sannsynlighetene slik at summen av alle sannsynlighetene blir lik *en*. Alle modeller man har av en gitt brønnaktivitet eller situasjon deles inn i familier. For eksempel vil man ved å summere sannsynligheten til alle modellene man har for brønnsparke, kunne fastslå den overordnede sannsynligheten for denne familien. Dette presenteres for operatøren i en sannsynlighets logg. Hvis sannsynligheten for brønnsparke overskrider 0.9 (90%) vil det bli gitt alarm, og operatøren kan bruke loggen til kicksannsynligheten som grunnlag for riktig aksjon (Ref-22, s. 2-3).

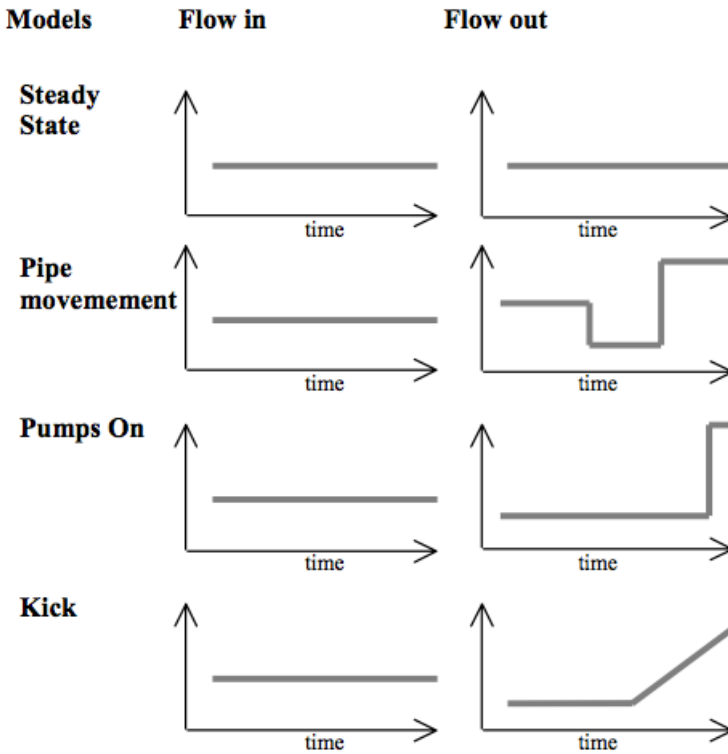
For en effektiv detektor er det avgjørende å designe gode modeller. For å utføre Bayesiansk analyse trengs et omfattende set av modeller slik at man kan skille mellom faktisk brønnsparke og hendelser som ligner på brønnsparke. Modellene vil ikke være en eksakt beskrivelse av systemet, men vil fange opp den underliggende signaturen som er felles for ulike forekomster av samme borehendelse (Ref-22, s. 3).



Figur 6.8: Strømningsdata med modell av brønnsпарк (Ref-22, s. 3).

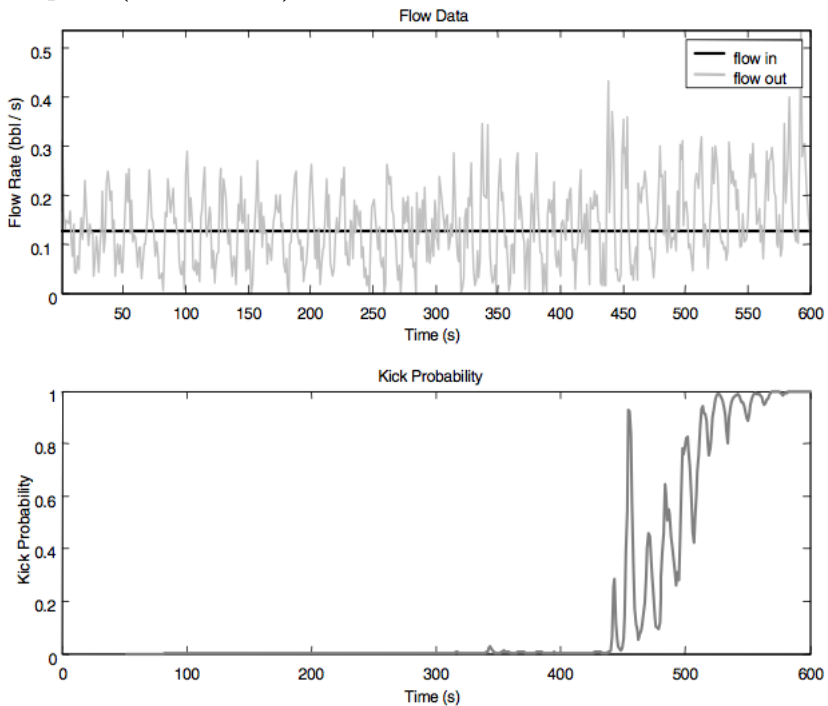
Detektoren har eksplisitte modeller for både innstrømmet boreveske og for returstrømmen. Altså må hver modell ha et par av signaturer, en for hver kanal. Et brønnsпарк under boring med stasjonær strømming og med konstant penetrasjonshastighet (ROP), vil ha form som en rampe da gass vil ekspandere lineært med tiden på sin vei opp mot boreinnretningen gjennom ringrommet. Brønnsпарк av varierende alvorlighetsgrad kan representeres ved forskjellige rater på rampen (Ref-22, s. 3).

Andre hendelser som forandring i strømningsraten, igangsetting av pumper og rørbevegelser må modelleres eksplisitt for å unngå at de gir falske alarmer. Ved oppstart av pumper får man en sterk økning i innstrømmet boreslam, mens returstrømmen fortsatt vil være stabil. Rørbevegelser nedover gir en økning av returstrømmen og uten god modellering kan dette lett forveksles med signaturen til et brønns-park. Typisk vil forskyvninger i rør som følge av bølger gi en modell der vi først får en mindre returstrøm når vi får et løft, med påfølgende økning av returstrømmen når rørene senkes (Ref-22, s. 3-4).



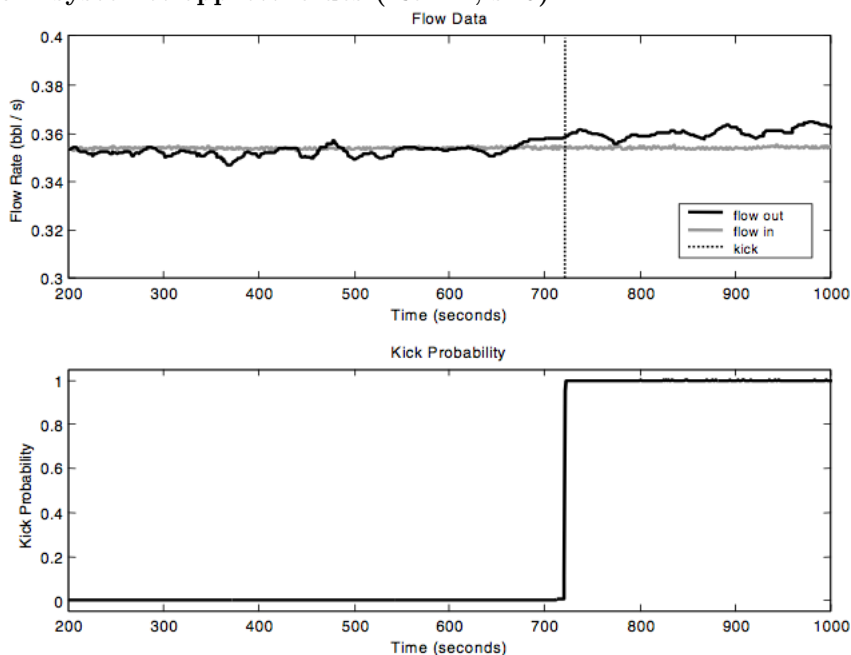
Figur 6.9: Modeller av borehendelser (Ref-22, s. 4).

En viktig fordel med det Bayesiansk sannsynlighets rammeverket er at den statistiske tilnærmingen takler problemer med støy. Detektoren justerer automatisk sensitiviteten etter støynivået. For at det skal gis alarm må strømningsdataene passe en modell for brønns- park med mye høyere sannsynlighet en de passer modeller som ikke er brønns- park. Situasjoner der støynivået er høyere enn forskjellen mellom stasjonær strømming og modellene for brønns- park, gir ingen alarm. Strømningsdataene må samsvare med modellene man har for brønns- park (Ref-22, s. 6).



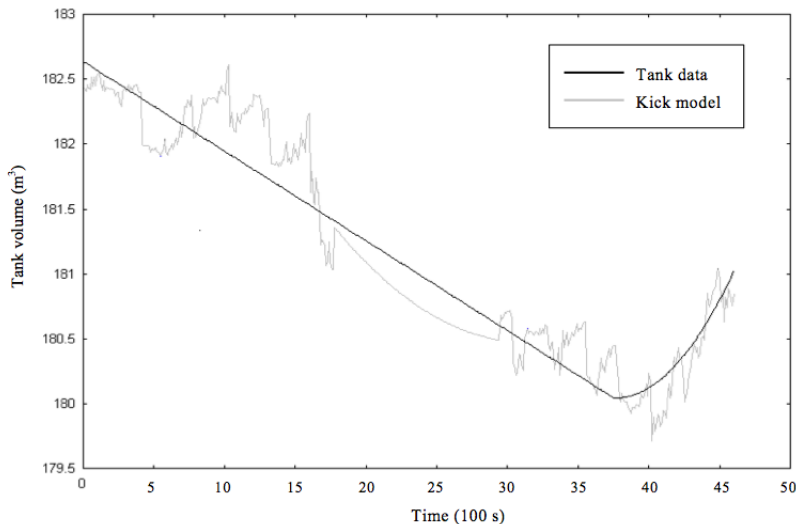
Figur 6.10: Detektor gir alarm under situasjon med mye støy (ca. 3bbl inn- strømmet) (Ref-22, s. 9).

Ved lavt støynivå trenges det bare små mengder brønnsparkdata før forskjellen i sannsynlighet mellom modeller for brønnspark og stasjonær strømning er nok for å gi alarm. Ved høyt støynivå vil modeller for små brønnspark ha utilstrekkelig sannsynlighet sammenlignet med stasjonær strømning, mens hvis man får tilstrekkelig brønnsparkdata kan kickmodeller for større volum gi alarm. Altså senkes sensitiviteten i situasjoner med mye støy, falske alarmer unngås, og tilliten til alarmsystemet opprettholdes (Ref-22, s. 6).



Figur 6.11: Detektor gir alarm under situasjon med lite støy (ca. 0,2 bbl innstrømmet) (Ref-22, s. 9).

I siste instans vil overvåking av pit gain være den sikreste måten å oppdage et brønnsparke på. Det kan være vanskelig å fange opp situasjoner der gass/formasjonsvæske strømmer veldig sakte inn i brønnen, når man benytter måling av retur- og delta-strøm. Dette kan derimot fanges opp ved volumkontroll av slamtankene, og dektoren bør derfor utvides. Til overvåking av slamtankene brukes den samme modellsamsvarende Bayesianske sannsynlighetsmetoden, men med andre signaturer. Boring med stasjonær strømming gir et lineært fall i tankvolumet da borestrengen fylles med boreslam. Modellene for overvåking av brønnsparke i slamtankene blir annerledes da et brønnsparke gir en lineær økning i strømming fra brønnen. Dette integreres til en kvadratisk økning av volumet i tanken. Altså vil en typisk modell for brønnsparke i en tank ha en lineært synkende rampe etterfulgt av en kvadratisk økning (Ref-22, s. 4).



Figur 6.12: Tank data av brønnsparke med tilhørende modell (Ref-22, s. 7).

Den Bayesiansk deteksjons-metoden gjør det mulig å foreta sanntids overvåkning og deteksjon av brønnsparke under boring. Den gir fordelene ved at den automatisk justerer sensitiviteten etter støynivået, og det vil være mulig å modellere situasjoner som ellers ville gitt falsk alarm. Sannsynlighetsloggen som presenteres for operatøren gjør det mulig å ta riktige aksjoner på et godt grunnlag (Ref-22, s. 6).

7 Diskusjon

Denne diskusjonen bygger på ovennevnte teori, og ser på mulige forbedringstiltak på dagens systemer for brønnovervåkning og deteksjon av brønnsparke.

"Tenk på en borerigg som leter etter olje som en fyrstikkeske. Tenk deg videre at fyrstikkesken er plassert på toppen av et toetasjes hus, hvor andre etasje nå er fylt med vann og første etasje med stein, sand og kanskje en del salt. Det å treffe olje-reservoaret blir da som å treffe en mynt på golvet i førsteetasjen med et borerør så tynt som et hårstrå" (Ref-25).

For å utøve god brønnkontroll er det avgjørende å ha evne til å kunne analysere og forstå risiko. En utfordring knyttet til brønnkontroll er at det er krevende å forstå hva som skjer nede i brønnen. Oppe på innretningen har man utstyr og omgivelser som kan tas og føles på, mens det ikke vil være mulig flere kilometer nede i bakken. Videre vil det også være utfordrende å få gode målinger av det som skjer nede i brønnen. Det er vanskelig designe måleinstrumenter som er robuste nok til å takle de ekstreme trykk- og temperatur-påkjenningene de vil bli utsatt for.

Man er derfor avhengig av overflatemålinger for å forstå det som skjer nede i brønnen. Vanlig målinger er da volumkontroll av slamtanker og raten av boreslam inn/ut av brønnen. Med dagens system er man i stor grad avhengig av at boremannskapet er i stand til å tolke å forstå informasjonen de får fra overflatemålingene. Det er en rekke normale borehendelser som kan forveksles med et brønnsparke, og det er derfor utfordrende for operatørene å tolke faresignalene riktig. I en situasjon med underbalanse er man altså i stor grad avhengig av manuell inngripen av borepersonell for å gjenvinne hydrostatisk kontroll. De må tolke indikasjoner på brønnsparke korrekt, men også foreta riktig manuell aksjon for å stenge inne brønnen.

Jo lengre tid det tar før man stenger inne brønnen under et kick, jo større er sannsynligheten for at det utvikles til en ukontrollert utblåsning. Aktivisering av sekundærbarriere (BOP) er derfor tidskritisk. Manuell tolking av indikasjoner og overflatemålinger er tidkrevende, og et faktisk brønnsparc kan derfor allerede før operatørene får aktivisert utblåsningssikringen ha fortrenget mesteparten av boreslammet fra ringrommet. Dersom en får store mengder gass over BOPen vil denne utvide seg dramatisk og på sin vei oppover føre med seg store mengder borevæske ved høye rater. Noe som ytterligere kompliserer brønnkontrollen for operatørene, er at det vil være dynamiske forhold i reservoarene, og de vil variere fra brønn til brønn. Dette gjelder forhold som trykk, temperatur, dybde, poretrykk og formasjonens oppsprekkingstrykk. For eksempel har gassen på Kristin-feltet (Ref-14, s. 29) i Nordsjøen en ekspansjonsfaktor på ca. 305, noe som betyr at en innstrømning på 1 m³ i brønnen vil ekspandere til 305 m³ på overflaten. Ideelt bør derfor et brønnsparc oppdages og stenges inne før det når utblåsningssikringen slik at hydrokarboner hindres i å strømme til overflaten.

Granskinger av referansehendelsene har vist at indikasjoner og fare-signaler på brønnsparc ofte blir oversett av boremannskapet. Grunner for det kan være manglende oppmerksomhet, forståelse eller at det er hektisk aktivitet ombord på en borerigg og boremannskapet derfor blir distraheret av andre aktiviteter. Det er derfor mye som taler for at man bør gå over til systemer for brønnkontroll med mer automatisert regulering.

Trykkstyrt boring tilbyr et automatisk reguleringssystem. Ved å benytte en ekstra variabel (baktrykk) kontrolleres bunnhullstrykket, og holdes stabilt. Et lukket sirkulasjons-system gjør at man får god volumkontroll med rask tilbakemelding fra brønnen med hensyn til tap eller influx. Hoved-indikatoren for deteksjon av brønnsparc er trykk-variasjon i strupeventilen. Ved utilsiktet innstrømning av formasjonsvæske til brønnen vil strømningsraten gjennom strupeventilen øke. Dette leder til økt friksjonstrykk, som igjen leder til økt bunnhullstrykk. Det automatiske reguleringssystemet vil da øke åpningen på strupeventilen for å holde bunnhullstrykket konstant. Man får da en ytterligere økning i innstrømmet formasjonsvæske, og en ytterligere

økning av strømningsraten gjennom strupeventilen. Regulerings-systemet vil da gjenkjenne dette som et brønnsparke og regulere åpningen på strupeventilen tilbake til forrige setpunkt. Bunnhullstrykket vil da øke og innstrømningen vil reduseres. Fortsetter den uønskede innstrømningen lukkes strupeventilen videre. Automatisk regulering av strupeventilen vil altså føre til at man oppnår kontroll over uønsket innstrømmet gass/formasjons-væske på et tidligere tidspunkt enn man ville gjort ved konvensjonelle innestengningsrutiner (Ref-14, s. 23).

Å bruke strupeventilen til å utøve baktrykk for å stoppe en uønsket innstrømning, vil være raskere en å stenge utblåsingssikringen. Ved konvensjonell boring vil det ta tid før boremannskapet oppfatter signaler på brønnsparke, og før operatøren foretar manuell aksjon ved å aktivere sekundærbarriæren (BOP). Trykkstyrt boring med automatisk regulering av strupeventilen eliminerer altså den menneskelige forsinkelsesfaktoren, og dermed vil størrelsen på et eventuelt brønnsparke reduseres. Videre håndterer trykkstyrt boring små innstrømninger, da de automatisk sirkuleres ut under boring, og man vil derfor ikke trenge å stenge inne brønnen. Dette er med på å reduserer sannsynligheten for at det oppstår større brønnsparke (Ref-14, s. 60).

Det vil likevel en del utfordringer knyttet til bruk av trykkstyrt boring. Målinger av ringromstrykk (APWD-sensor) er bare mulig under sirkulasjon, med riggpumpene på. Grunnen til dette er at de bruker mud puls telemetri for å fungere. Under boring vil sanntidsovervåking av trykket i ringrommet gjøre det lettere for boreoperatørene å overvåke brønnen, men målingene vil ha en tidsforsinkelse avhengig av brønnens dybde og riggpumpenes rate. Hoved-indikatoren for deteksjon av brønnsparke er trykkvariasjon i strupeventilen. Trykkstyrt boring er avhengig av at reguleringssystemet (MPC/PID) fungerer skikkelig. Hvis det oppstår feil vil det vanskeliggjøre tidlig deteksjon av brønnsparke. Man er derfor avhengig av å ha konventionelle systemer for kickdeteksjon i bakhånd. Dette kan være volumkontroll av slamtanker og måling av deltastrømning, med tilhørende høy/lav-alarmer (Ref-14, s. 58).

Hvis strupeventilen slutter å fungere, kan baktrykket forsvinne. Dette kan lede til underbalanse i brønnen. For å minske sannsynligheten for dette, kreves det bruk av to parallelle strupeventiler. Videre kan det oppstå situasjoner med plugging av strupeventilen (feks. borekaks). Dette gir trykkoppybygning, og kan trigge falske alarmer. Sammenlignet med et åpent konvensjonelt overbalansert boresystem, vil en falsk alarm under trykkbalansert boring være mindre alvorlig. Dette skyldes at boringen fortsettes samtidig som brønnsparket sirkuleres ut. Ved konvensjonell boring må sirkulasjonen stoppes, og utblåsnings-sikringen stenges (Ref-14, s. 58).

Selv om trykkstyrt boring gir fordeler ved å automatisere deler av brønnborings-operasjonene, vil det være store sikkerhetsmessige utfordringer. Ved trykkstyrt boring sikres overbalanse mot reservoaret ved å regulere baktrykket i en lukket returlinje ved hjelp av en strupeventil (choke). Den statiske vekten av borevæsken reguleres slik at den er på grensen, eller lavere enn poretrykket. Brønnkontrollhendelsen på Gullfaks C viser at dette medfører stor risiko. Den sikkerhetsmessige utfordringen knyttet til brønnkontroll vil være at det hydrostatiske trykket fra boremediet ikke lenger er den primære brønnkontrollmekanismen. Altså har man ikke lenger to uavhengige barrierer, primær og sekundær, men en barriere. Dette vil være sikkerhetsmessig uholdbart, og kompensere tiltak må finnes for å ha sikkerhet like god som ved to uavhengige barrierer (Ref-1, s. 51).

Granskninger av Deepwater Horizon-ulykken har avdekket svakheter ved kutteventilen (BSR) på utblåsningsikringen (BOP). Kutteventilen er designet for å kutte borestrengen og deretter forbli låst i lukket posisjon uavhengig av hydraulikksystemet etter aktivering. Det Norske Veritas (Ref-11) sine undersøkelser konkluderte med at når brønnstrømmen passerte utblåsningsikringen – BOPen – på havbunnen og ekspanderte videre raskt på sin ferd opp gjennom stigerøret mot innretningen, førte de voldsomme kreftene til at borestrengen ble deformert og bøyd og dermed forhindret kutteventilen fra å fungere. Sintef sin granskning av ulykken konkluderer med at det bør vurderes å kreve utblåsningsikring med doble kutteventiler for å oppnå høyere pålitelighet, og redusert risiko knyttet til kritiske bore- og brønnoperasjoner (Ref-1, s. 191).

Et mulig kompenserende tiltak for å øke sikkerheten ved trykkstyrte boreoperasjoner kan da være å pålegge bransjen å bruke utblåsnings-ikring med krav om to uavhengig kutteventiler.

Mange av dagens systemer gjør krav på å kunne detektere brønns- park med sensitivitet ned til 1bbl, men et godt deteksjonssystem må sees i sammenheng med antall falske alarmer. Ved å ha et system som er for sensitivt, blir det gitt alarm ved situasjoner som ikke er brønns- park, noe som fører til tap av tiltro til systemet. Å ha tiltro til alarm-systemer er avgjørende i en virkelig krisesituasjon. For eksem- pel har granskinger (Ref-24) i etterkant av at et Air France-fly styrtet i Atlanterhavet 1. juni 2009 på vei fra Rio de Janeiro til Paris, vist at pilotene ikke greide å reagere riktig til tross for at de fikk rundt 75 advarsler om at flyet steilet («stall»). Alle de 228 menneskene om bord omkom.

Granskinger i etterkant av referansehendelsene har vist at indikasjo- ner og faresignaler på brønns- park ofte er tilstede, selv om de ikke blir oppdaget. Mulige indikasjoner man får på at et brønns- park er under utvikling kan være økning i borehastigheten, økning i pumpe- hastighet, fall i pumpetrykk og tap i vekt av borestrengen. Disse indikatorene er fullt mulig å måle med dagens systemer. En utford- ring er at selv om det er grunn til å være på vakt, kan helt vanlige borehendelser ofte gi de samme indikasjonene. Det vil derfor være lite hensiktsmessig å gi full alarm for brønns- park ved disse hendelsene, da dette vil gi redusert tiltro til deteksjonssystemet. Det bør derfor vur- deres å innføre et skaleringsystem (Ref-26, s. 41) for alarmer. Altså en type alarm for indikasjoner på brønns- park, der det gis grunn til å være på vakt og overvåke om det kommer flere faresignaler. Når man får tilgang til flere målinger og tilstrekkelig informasjon om at det faktisk er et brønns- park, kan deteksjonssystemet gi en mer alvorlig og sikker kickalarm.

Volumkontroll av slamtankene og overvåkning av delta-strøm vil gi deteksjonssystemet sikrere indikasjoner for overvåkning av brønns-
park. En plutselig økning av returstrømmen fra brønnen er en sikker
indikator, men det vil også med disse metodene være en del utford-
ringer knyttet til deteksjon. På en flytende borerigg vil forskyvninger
på grunn av bølger gi en ujevn returstrøm. Videre vil for eksempel
igangsetting av pumper og rørbevegelser være vanlige borehendelser
som gir forandring i strømningsraten. Dette kan deteksjonssystemet
forveksle med brønns-
park og gi falske alarmer. Utfordringen er altså
at grenseverdiene må settes slik at systemet takler den variasjonen
man får i returstrømmen av vanlige borehendelser, mens det samtidig
må være så sensitivt at det fanger opp og gir alarm når et virkelig
brønns-
park inntreffer.

For å opprettholde tilliten til deteksjonssystemet blir det altså en av-
veining mellom sensitivitet, og å sette grenseverdiene store nok til
å unngå falske alarmer. Dette kan gjøre systemet tregt. Et eventu-
elt brønns-
park kan dermed få tid til å vokse i størrelse, og fortrenge
mesteparten av boreslammet fra ringrommet. Situasjonen kan der-
med utvikle seg til en ukontrollert utblåsning. Utviklingen av forbed-
rede metoder (feks. akustiske systemer) for overvåkning, og mer nøy-
aktige målesystemer (feks. coriolis massestrømsmåler) vil likevel gjøre
det mulig å fange opp indikasjoner for tidlig deteksjon av brønns-
park. Dersom det oppstår en situasjon med underbalanse, og forma-
sjonsvæske strømmer inn i brønnen, vil en del av slammet i brønnen
bli skyvd ut. Det vil altså bli en økning i returstrømmen fra brøn-
nen, kontra det som pumpes ned gjennom borestrengen. Dette gir
en viss økning av nivået i slamtankene, da det fortrenkte slammet
i brønnen blir presset til overflaten. Ved nøyaktige målinger vil det
være mulig for deteksjonssystemet å fange opp dette før innstrømmet
gass/formasjonsvæske når utblåsningsikringen, brønnen kan stenges
inne, og brønns-
parket kan sirkuleres ut på en trygg måte slik at hydro-
statisk kontroll gjenvinnes.

For å utvide deteksjonssystemet videre kan man ta i bruk prediktive metoder. De gjør bruk av modellering for å beskrive boreslammets strømning gjennom systemet. Ved å modellere og predikere hvordan både vanlige og uvanlige borehendelser vil gi variasjoner i returstrøm ut av brønnen, og differanse i inn/-ut-strømmet boreslam, vil man få en detektor hvor antall falske alarmer ytterligere blir redusert. For en effektiv detektor er det avgjørende å designe gode modeller. Modellene vil ikke være en eksakt beskrivelse av systemet, men vil fange opp den underliggende signaturen til ulike borehendelser.

Et system som tar i bruk prediktive metoder er den Bayesianske dektoren. Ved å benytte et modellsamsvarende Bayesiansk sannsynlighets rammeverk, vil man få et deteksjonssystem hvor sensitiviteten automatisk justeres etter støynivået på målingene. Brønnsparke av varierende type moduleres eksplisitt som tidsserier av strømningsdata, uten å involvere grenseverdier. Videre utvides settet av modeller til å involvere andre aktiviteter og situasjoner som kan trigge falske alarmer på grunn av tvetydige strømningsdata (Ref-22).

Modellene innlemmer tidligere informasjon man har om vanlige og uvanlige borehendelser. Hvis dataene mest sannsynlig samsvarer med en normal rigghendelse gis ingen alarm, mens hvis man får en situasjon som med stor sannsynlighet er et brønnsparke blir det gitt alarm. Detektoren må altså ha et omfattende set av modeller. Betinget sannsynlighet (Bayes regel) brukes til å fastslå relativ sannsynlighet for modellene i lys av strømningsdataene. Deteksjonssystemet bruker Bayes regel for en sanntids sammenligning av virkelige målinger, mot hver enkelt modell. Deretter normaliseres de relative sannsynlighetene slik at summen av alle sannsynlighetene blir lik *en*. Alle modeller man har av en gitt brønnaktivitet eller situasjon deles inn i familier. For eksempel vil man ved å summere sannsynligheten til alle modellene man har for brønnsparke, kunne fastslå den overordnede sannsynligheten for denne familien. Dette presenteres for operatøren i en sannsynlighets logg. Hvis sannsynligheten for brønnsparke overskrider 0.9 (90%) vil det bli gitt alarm, og operatøren kan bruke loggen til kicksannsynligheten som grunnlag for riktig aksjon (Ref-22).

En viktig fordel med det Bayesiansk sannsynlighets rammeverket er at den statistiske tilnærmingen gjør at detektorsystemet takler problemer med støy. Detektoren justerer automatisk sensitiviteten etter støynivået. For at det skal gis alarm må strømningsdataene passe en modell for brønnsparke med mye høyere sannsynlighet enn de passer modeller som ikke er brønnsparke. Situasjoner der støynivået er høyere enn forskjellen mellom stasjonær strømming og modellene for brønnsparke, gir ingen alarm. Strømningsdataene må samsvare med modellene man har for brønnsparke. Altså har man et detektorsystem der sensitiviteten justeres i forhold til støynivået, falske alarmer unngås, og tilliten til alarmsystemet opprettholdes (Ref-22, s. 6).

For å ytterligere oppdatere detektorsystemet slik at det kan angi sannsynlighet for brønnsparke med enda mer sikkerhet, utvides systemet til også inkludere volumkontroll av slamtankene. Modellene for overvåking av brønnsparke i slamtankene må da ha annerledes signatur, en kickmodellene for delta-strømming. Boring med stasjonær strømming gir et lineært fall i tankvolumet da borestrengen fylles med boreslam. Et brønnsparke vil gir en lineær økning i strømming fra brønnen, og dette integreres til en kvadratisk økning av volumet i tanken. Altså vil en typisk modell for brønnsparke i en tank ha en lineært synkende rampe etterfulgt av en kvadratisk økning (Ref-22).

Etterhvert som forskning og utvikling gjør det mulig å foreta bedre målinger av det som skjer nede i brønnen, bør det vurderes en videre utvidelse av detektorsystemet. Modellfamilien for brønnsparke og andre borehendelser, kan utvides til også å inkludere trykk. En utfordring for overvåking av trykkbalansen i brønnen, er å designe måleinstrumenter som er robuste nok til å takle de ekstreme trykk- og temperatur-påkjenningene de vil bli utsatt for. Et mulig måleverktoy er APWD-sensorer som bruker mud puls telemetri, men sanntidsovervåking vanskeliggjøres av målestøy og tidsforsinkelse. Bunnhullstrykket påvirkes av mange faktorer. Det kan være temperatur, bore- og rotasjonshastigheten eller vekten av boreslammet. Det forskes på å utvikle teknologi for å estimere bunnhullstrykket, basert på målingene man har tilgjengelig. En utfordring er at målingene kan være unøyaktige, og derfor vil det ikke være en triviell sak å estimere et eksakt bunnhullstrykk.

Det vil være dynamiske forhold i reservoarene, og de vil variere fra brønn til brønn. De ligger i forskjellig dybde, med forskjellig trykk, temperatur, poretrykk og oppsprekkingstrykk. Å lage et deteksjonssystem som bruker prediktive metoder, vil kreve en del arbeid. For en effektiv detektor må man designe gode modeller. Å lage universale modeller, som gjelder for forskjellige reservoarer, vil være en utfordring. Da modellene ikke vil være en eksakt beskrivelse av systemet, men tar sikte på å fange opp den underliggende signaturen til ulike borehendelser, vil de likevel være en del likhetstrekk. En mulig løsning kan da være å benytte en skaleringskonstant, for å tilpasse modellene de varierende reservoarforholdene.

For å avgjøre om man har en situasjon der uønsket gass/formasjonsvæske strømmer inn i brønnen, er det viktig å ha tilgang til målinger av normale borehendelser, slik at man kan sammenligne dataene. Ved å måle og dokumenterer disse prosessene har man "fingeravtrykket" (Fingerprinting) til neste gang man skal utføre brønnoperasjonene. Ved mistanke om kick kan man sammenligne avvik fra fingeravtrykkene for å avgjøre om man faktisk har et reelt brønnsparke (Ref-14, s. 22).

En rekke alvorlige ulykker kunne vært unngått med bedre utstyr for brønnovervåking. Granskninger i etterkant av Deepwater Horizon-ulykken, har påvist svikt i evnen til å analysere og forstå risiko. Presidentkommisjonen (Ref-3) konkluderer i svært kritiske ordelag med at "de umiddelbare årsakene til Macondo-utblåsningen kan spores til en serie av identifiserbare feil gjort av BP, Halliburton og Transocean som avdekker så systematiske feil i risikostyring at det sår tvil om sikkerhetskulturen i hele industrien". Også på norsk sektor viser brønnkontrollhendelsene på Snorre-A og Gullfaks-C, at det er små marginer som har skilt oss fra svært alvorlige utblåsninger. Har Statoil evne til å analysere og forstå risiko? Har Statoil evne til å lære av brønnkontrollhendelsene? Granskninger (Ref-27) viser at det kan være betimelige spørsmål. Man vil alltid ha en målkonflikt mellom kostnadseffektivitet og sikkerhet. Det kan synes som om oljebransjen gjør som mange andre bransjer. De gjør det de må, men heller ikke mer. Det bør derfor vurderes å pålegge bransjen å logge fingeravtrykkene av vanlige og uvanlige borehendelser.

En viktig kilde til læring etter brønnkontrollhendelser, er å ha tilgang til logget måle-data (fingeravtrykk). Deepwater Horizon-ulykken utviklet seg til en katastrofe da eksplosjon og brann på innretningen medførte tap av menneskeliv, alvorlige personskader, store oljeutslipp og kostnader. Når innretningen sank i havet gikk mye brønninformasjon tapt, og en rekke spørsmål er ubesvart om hva som skjedde på Deepwater Horizon i minuttene før katastrofen. For eksempel kunne logging av kameraovervåking fra boredekket, vært med å bidra til å få avdekket hvorfor boremannskapet ikke oppdaget signaler om brønnspar. En mulig løsning er å innføre logging til en "svart boks", som i luftfart, for å sikre informasjon som kan bidra til læring etter ulykker.

Granskinger i etterkant av referansehendelsene har vist at indikasjoner og faresignaler på brønnspar ofte er tilstede, selv om de ikke blir oppdaget. Man bør derfor gå over til systemer for brønnkontroll med mer automatisert regulering. Trykkstyrt boring tilbyr et automatisk reguleringssystem, men har sikkerhetsmessige utfordringer. Et godt deteksjonssystem må ta hensyn til tidlige indikasjoner, overvåke delta-strømning og føre volumkontroll av slamtanken. For å opprettholde tilliten til deteksjonssystemet må grenseverdiene settes store nok til å unngå falske alarmer, men samtidig være så sensitivt at det detekterer et faktisk brønnspar. Effektiv aktivering av sekundærbarriere (BOP) er tidskritisk. Ved et system som gir mange falske alarmer vil det spesielt på felt med små trykkmarginer være problematisk å stenge utblåsningsikringen ofte, da dette gir trykkoppbygning som gjør at strukturen i formasjonen kan bli ødelagt. Man bør derfor ta i bruk et detektorsystem som gjør bruk av prediktive metoder. Den Bayesianske detektoren er en slik metode. Deteksjonssystemet justerer automatisk sensitiviteten etter støynivået, og det vil være mulig å modellere situasjoner som ellers ville gitt falsk alarm. Sannsynlighetsloggen som presenteres, gjør at man med stor sikkerhet kan fastslå et brønnspar. I siste instans vil overvåking av nivået i slamtankene være den sikreste måten å oppdage et brønnspar på. Ved en rask økning der, bør derfor detektorsystemet sørge for en automatisk nedstenging av utblåsingssikringen.

8 Videre arbeide

Å lage et deteksjonssystem som bruker prediktive metoder, vil kreve en del arbeid. For en effektiv detektor må man designe gode modeller. Dessverre var det ikke mulig å få tak i brønnsparke-data til denne oppgaven. Et naturlig videre arbeide vil derfor være å samle inn data for de forskjellige brønnoperasjonene (inkludert kick), og se om det er mulig å designe modeller som fanger opp den underliggende signaturen til de ulike borehendelser.

9 Referanser

Ref-1

Sintef rapport, Deepwater Horizon-ulykken: Årsaker, lærepunkter og forbedringstiltak for norsk sokkel, (Mai 2011).

Ref-2

Prosjektoppgave, Deepwater Horizon-ulykken: Hva gikk galt, og hvordan kunne det vært unngått. Kunne det skjedd i Norge?, (Harald Foldnes Justad, Desember 2011).

Ref-3

National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling: Deepwater. The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling. Report to the President ("Presidentkommisjonens rapport"; 11.01.11).

Ref-4

Chief Counsel's Report 2011 (tilleggsrapport til "Presidentkommisjonens rapport") (17.02.11).

Ref-5

Petroleumstilsynet: Granskning av gassutblåsning på Snorre A, brønn 34/7-P31 A 28.11.2004.

Ref-6

Statoil/Studio Apertura: Årsaksanalyse etter Snorre A-hendelsen 28.11.2004 (31.10.05).

Ref-7

Petroleumstilsynet: Tilsynsaktivitet med Statoils planlegging av brønn 34/10-C-06A (Gullfaks C).

Ref-8

Sintef rapport, Vurdering av risiko for akutte utslipp i Norskehavet, (30.01.08).

Ref-9

NORSOK standard D-010: Well Integrity in Drilling and Well Operations (2004).

Ref-10

Skalle P., Pressure Control. 2004, NTNU Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics.

Ref-11

Det Norske Veritas: Final Report for United States Department of the Interior. Forensic Examination of Deepwater Horizon Blowout Preventer (20.03.11).

Ref-12

Magnus Tveit Torsvik, Masteroppgave, Laboratoriemodell av boreprosess. Bygging, instrumentering, igangkjøring og regulering (2011).

Ref-13

Advanced Well Control - David Watson, Terry Brittenham, Preston L. Moore, Society of Petroleum Engineers (U.S.) (2003).

Ref-14

Trygve Birkeland, Masteroppgave, Automated Well Control Using MPD Approach (2009).

Ref-15

<http://www.glossary.oilfield.slb.com/>

Ref-16

Brønnkontroll - Svein Halle (1997).

Ref-17

Pressure Control During Oil Well Drilling - Pål Skalle (2011).

Ref-18

<http://www.oilfieldguidance.com/productcatalog/images/products/001-0070-01.pdf>

Ref-19

pulsedirectional.com/documents/pdt_apwd.pdf

Ref-20

[www.npd.no/global/Norsk/3-Publikasjoner/Norsk sokkel/PDF/10 Nye boemetoder.pdf](http://www.npd.no/global/Norsk/3-Publikasjoner/Norsk_sokkel/PDF/10_Nye_boemetoder.pdf)

Ref-21

Iversen, F., Gravdal, J.E., Dvergsnes, E.W., Nygaard, G., Gjeraldstveit, H., Carlsen, L.A., Low, E., Munro, C., and Torvund, S.: "Feasibility study of managed-pressure drilling with automatic choke control in depleted HP/HT field," Paper SPE 102842 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, U.S.A., 24-27 September 2006.

Ref-22

Early Kick Detection for Deepwater Drilling: New Probabilistic Methods Applied in the Field - David Hargreaves, Stuart Jardine, Ben Jeffryes, SPE, Schlumberger, (2001).

Ref-23

Bayesian Statistic, A Review - D. V Lindley, SIAM Regional conference series in Applied Mathematics, (1972).

Ref-24

<http://www.aftenposten.no/nyheter/uriks/Britisk-ekspert-Flydesignet-kan-ha-medvirket-til-Air-France-ulykken-6817692.html>

Ref-25

"The Economist, Technology Quarterly, Q1, 2010" ; <http://www.economist.com/node/15582301>

Ref-26

Sintef: Brønnkontrollhendelser i norsk petroleumsvirksomhet – årsaksforhold og tiltak (2011).

Ref-27

Rapport IRIS: Læring av hendelser i Statoil - En studie av bakenforliggende årsaker til hendelsen på Gullfaks C og av Statoils læringsevne (2011).

10 Vedlegg: Sentrale ord og uttrykk

Definisjoner av en del sentrale ord og uttrykk som går igjen i rapporten. Hvis ikke presisert nærmere er definisjonene hentet fra Petroleumstilsynets nettsider (<http://www.ptil.no/ord-og-uttrykk/-category38.html>).

Barrierer

En barriere kan betraktes som en funksjon som forhindrer et konkret hendelsesforløp i å inntreffe, eller som påvirker et hendelsesforløp i en tilsiktet retning ved å begrense skader og/eller tap.

Med funksjon menes oppgaven eller rollen til barrieren. Eksempler på typiske barrierefunksjoner er: forhindre lekkasje, begrense lekkasjemengde, forhindre antenning.

For å realisere en barrierefunksjon må det være på plass tekniske, operasjonelle og organisatoriske barriereelementer. Summen av tekniske, operasjonelle og organisatoriske forhold er avgjørende for om barrierene fungerer og er effektive til enhver tid. Personellet, utstyret eller systemene som utfører eller ivaretar en barrierefunksjon kalles barriere- elementer.

Borestreng

Stålrør mellom borekronen og drivenheten på boreinnretningen. Strengen består av rørlengder som er skrudd sammen. Hver lengde er vanligvis rundt 10 meter. Røret roterer og er også ledningsrør for det tilførte bore- slamm under boreoperasjonen.

Borevæske

Væske som brukes til å smøre og kjøle borekronen, forhindre at veggene i brønnen kollapser, holde strømmen av olje eller gass under kontroll og transportere grunnmassene til overflaten. Væsken som brukes, er en blanding av vann eller olje, leire og kjemikalier.

Brønn

Hull som bores for å finne eller avgrense en petroleumforekomst og/eller for å produsere petroleum eller vann til injeksjonsformål, injisere gass, vann eller

annet medium, eller kartlegge eller overvåke brønn- parametere. En brønn kan bestå av en eller flere brønnbaner og kan ha ett eller flere endepunkt.

Brønnbarrierer

I denne rapporten brukt om de tekniske barriereelementene som skal forhindre utilsiktet innstrømning av formasjonsfluid i brønnen ("brønnsparke" – se under) og utstrømning til det ytre miljøet ("utblåsning" – se under).

Brønnsparke

Med brønnsparke menes innstrømning av formasjonsfluid i brønnen, hvor en får trykkoppbygging ved stengt BOP, etter positiv strømmingssjekk.

Entreprenør

I denne rapporten brukt om selskap som utfører arbeid på oppdrag fra et operatørselskap (se under). For eksempel var Transocean boreentreprenør på oppdrag fra BP.

Flyttbar innretning

Innretning

som er registrert i et nasjonalt skipsregister (flagget innretning) og dermed må følge et maritimt driftskonsept inkludert klassing, for eksempel boreinnretning og brønnintervensjonsinnretning.

Operatørselskap (operatør)

Selskap som har rett til å lete etter olje og gass i en blokk og bygge ut et felt for produksjon ved et kommer- sielt funn. Operatøren opptrer gjerne på vegne av et partnerskap av selskaper.

Poretrykk

Lokale trykkforhold i reservoaret som kan bestemmes ut fra seismikk.

Ringrom (annulus)

Rommet mellom de ulike foringsrørene som beskytter en petroleumsbrønn fra berggrunnen, mellom føringsrør og produksjonsrør og mellom borestrengen og foringsrør.

ROV (Remote Operated Vehicle)

Fjernstyrt farkost til bruk under utførelse av undervannsaktiviteter eller inspeksjoner.

Risermargin

Risermargin er et uttrykk for den økte (Δ) egenvekten på borevæsken som er nødvendig for å kompensere for tapt hydrostatisk trykk fra stigerør, målt fra brønnhodet ved havbunnen og opp til boreriggen, ved et eventuelt behov for å kople fra stigerøret ved brønnhodet i en krisesituasjon.

Oppsprekkingstrykk

Hydrostatisk trykk i brønnen som medfører at formasjonen sprekker opp og fører til en ustabil brønn og mulig innstrømming (brønnsparke).

Storulykke

En akutt hendelse, for eksempel et større utslipp, en brann eller eksplosjon, som umiddelbart eller seinere medfører flere alvorlige personskader og/eller tap av menneskeliv, alvorlig skade på miljøet og/eller tap av større økonomiske verdier.

Utblåsning

Med utblåsning menes formasjonsfluid som strømmer ut av brønnen eller mellom formasjonslagene etter at alle definerte tekniske brønnbarrierer eller operasjon av disse har sviktet.