

# BORING – INTRODUKSJON

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

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

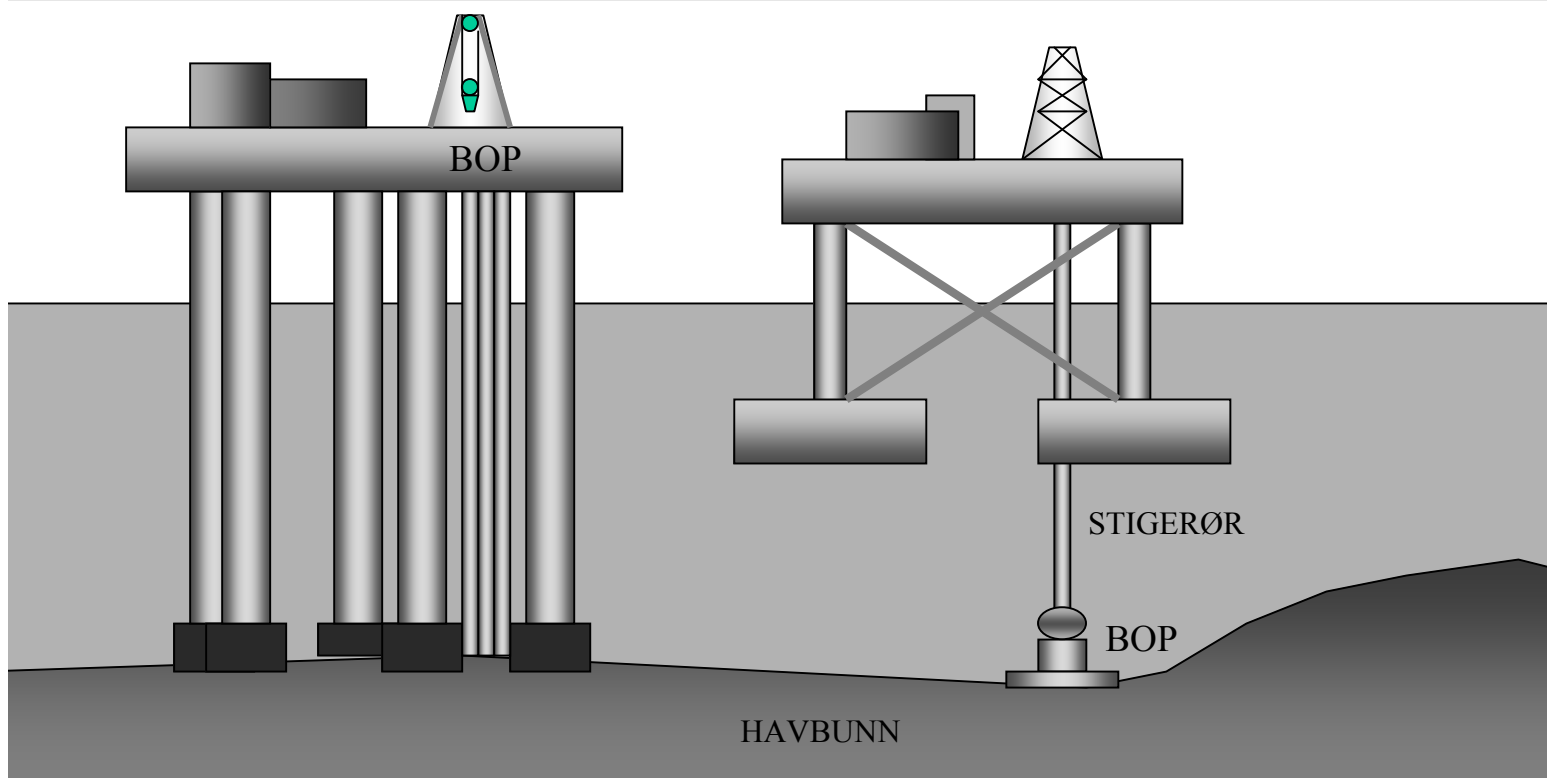
Hovedkompendiet inneholder også regneoppgaver med fasit, samt tidligere års eksamener med fasit. De siste års eksamener er ikke med, noen av disse vil bli delt ut (med fasit) underveis. Nødvendige tabeller for beregninger vil også bli delt ut underveis.

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

**NB2!** Det vil bli noen forandringer og tillegg i dette kompendiet underveis, spesielt er ikke BORING-B helt ferdig.

## OVERSIKT OVER OMRÅDER SOM BLIR BEHANDLET I BORING-A

BOREPROSESSEN	Overflateutstyr	Boretårn Heisemekanismer Rotasjonsmekanismer Slambehandlings og pumpeanlegg
	Boreslam	Funksjon – Egenskaper Strømning av boreslam
	Borestreng	Borerør – Vektrør Måleutstyr i borestreng (i BHA) Utstyr for å løsne fastkjørt borestreng Slammotor Retningsstyremekanismer for borekrona Borekroner Hydraulisk beregning - Trykk i brønnen



**Figur 1** Skisse av fast plattform (produksjonsplattform) og flyttbar plattform. Merk ulik plassering av BOP og brønnhodet, som i begge tilfeller står rett under BOP.

## BOREPROSESSEN

### Plattformtyper

For boring er det to hovedtyper av plattformer, flyttbare og faste. De faste brukes bare når en borer brønner for å produsere et olje/gass-felt. Disse kalles da også produksjonsplattformer. De står permanent på havbunnen og blir (helst) demontert eller hugget opp når feltet er ferdig produsert. Da en produksjonsplattform i praksis alltid har flere brønner står boredekk med boretårn på skinner (skid) så denne enheten kan flyttes nok til å bore alle planlagte brønner. Brønnene står tett sammen ned til et stykke under havbunnen, for så å bøye ut i forskjellige retninger, mest for å nå til forskjellige deler av reservoaret eller til forskjellige reservoarer, men også for å redusere risikoen for at en ny brønn bores inn i en annen brønn.

Flyttbare plattformer (eller boreskip) brukes alltid ved boring av letebrønner. Disse brønnene bores for å se om det er produserbar gass eller olje i et reservoar. Etter at dette er gjort blir letebrønner som oftest plugges igjen med sement og alt metall et stykke ned under havbunnen blir fjernet (brønnhode og foringsrør). Flyttbare plattformer kan også brukes ved boring av produksjonsbrønnene til en fast produksjonsplattform. En slipper da å utstyre den faste plattformen med fullt boreutstyr. For utvinning av mindre felt kan en også bruke en flyttbar plattform både til å bore produksjonsbrønner og til å produsere fra disse.

Satelittbrønner bores også fra flyttbare plattformer. Dette er produksjonsbrønner med brønnhodet på havbunnen. Ved produksjon går strømmen av olje/gass fra brønnhodet i rørledning som ligger på havbunnen og bort til en fast produksjonsplattform i nærheten.

### Overflateutstyr - heiseutstyr

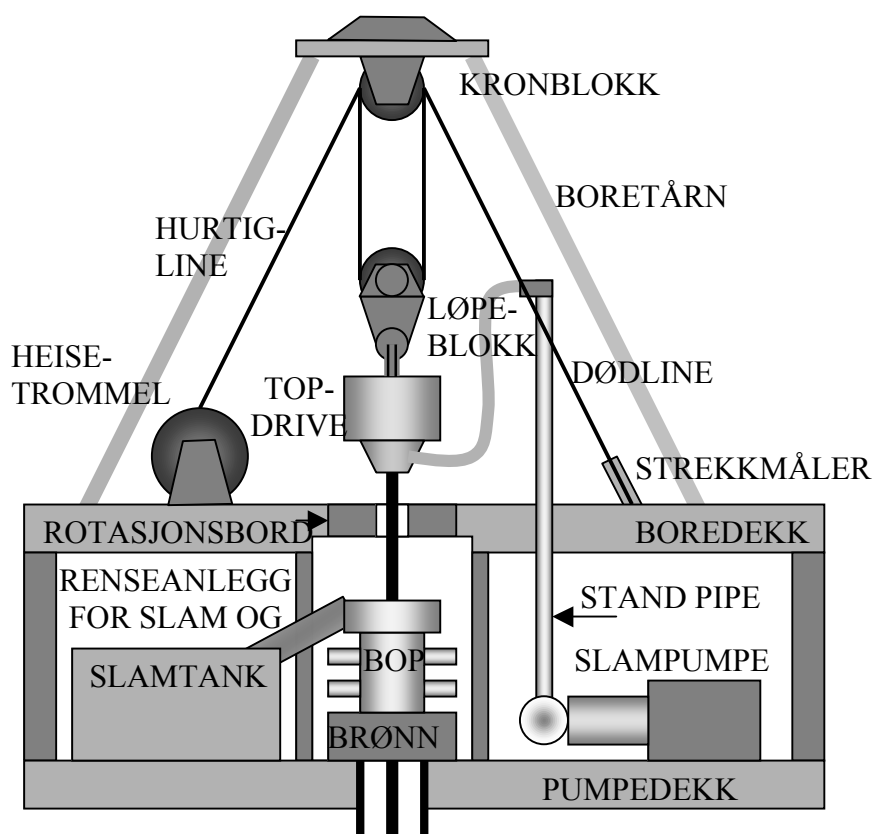
For tradisjonell boring brukes et boretårn (derrick), typisk omtrent 60 m høyt. På en plattform står boretårnet på boredekket. Alt utstyr for håndtering og lagring av borestrengen er i, på og over boredekket. Under boredekket er pumpedekket, hvor alt utstyr for blanding, rensing, lagring og pumping av boreslam befinner seg. På faste plattformer står også brønnhodet og sikkerhetsutstyr som BOP (Blow Out Preventer) på pumpedekket. Avstanden mellom boredekk og pumpedekk er omtrent 5 m. På land er det et tilsvarende arrangement, men pumpeutstyr og brønnhode står da gjerne rett på bakken.

Flyttbare plattformer (eller boreskip) er som de faste bortsett fra at her står brønnhodet og BOP på havbunnen. Det går da et stigerør fra toppen av BOP opp til pumpedekket. Dette er nødvendig for å få returnert boreslam til pumpedekket. Mellom BOP og stigerøret er det en fleksibel kobling (kuleledd) slik at plattformen kan drive av litt uten å gi for stor bøyning av stigerøret. Ved stor avdrift, som kan skje ved storm eller feil ved posisjoneringssystem, kan stigerøret kobles fra BOP så koblingen eller stigerøret ikke ødelegges. Før frakobling vil da BOP aktiviseres og stenge brønnen, også om en ikke rekker å trekke ut borestrengen. Dette er den viktigste grunnen til at brønnhodet og BOP står på havbunnen når flyttbar plattform eller boreskip brukes.

I boretårnet heises borestreng og annet utstyr opp og ned med blokk og talje. Fra kabeltrommel som står på boredekket mellom to av beina på boretårnet går heisekabel opp til kronblokk som henger i toppen av tårnet, over første trinse og deretter ned til løpeblokk og opp igjen, fra 5 til 7 ganger. Til slutt går kabelen over siste trinse i kronblokk og ned til bunnen av ett av tårnbeina på motsatt side av kabeltrommelen. Her er den festet til en kraftindikator som viser strekket i kabelen, festepunktet kalles dødankeret.

Kabelstrekket fra heisetrommel til kronblokk beveger seg hurtigst ved heising og kalles hurtiglina (fast line). Kabelstrekket fra kronblokk og ned til dødankeret beveger seg ikke og kalles dødlina (dead line). Løpeblokk har altså 5 til 7 trinser og henger i 10 til 14 kabler, kronblokk har en trinse mer enn løpeblokk. Med 7 trinser i løpeblokk og uten friksjon ville da strekket i kabelen bli 1/14 av lasten, som er vekt av løpeblokk og heiseutstyr samt borestreng eller det utstyret som heises.

Selv om friksjonen i hver trinse er liten (rullelager) gir det store antallet trinser likevel en betydelig samlet friksjon. Med 7 trinser blir ved heising opp strekket i hurtiglina rundt 1/10 av lasten, i dødlina blir strekket rundt 1/18 av lasten. Ved heising ned er det motsatt, strekket i hurtiglina er omtrent 1/18 og i dødlina omtrent 1/10 av lasten. Måling av strekk i dødlina gir derfor en lastmåling som bør skaleres avhengig av om en heiser opp eller ned. Det nøyaktigste er å måle lasten med en lastmåler montert i heiseutstyret, noe som etter hvert er blitt mulig. Ved boring måler en ofte også dreiemomentet på borestrengen, blir det for stort kan strengen vrís av. En typisk borestreng tåler rundt 30 kNm (kiloNewtonmeter: på en arm på en meter vinkelrett ut fra borerøret kan en ytterst henge på 3 tonn).



Figur 2 Skisse av utstyr på pumpedekk og boredekk. Renseanlegg for returnert boreslam er ikke vist i detalj. Motorer som driver slampumpe, rotasjonsbord og heispill er heller ikke vist. BOP står direkte på brønnet.

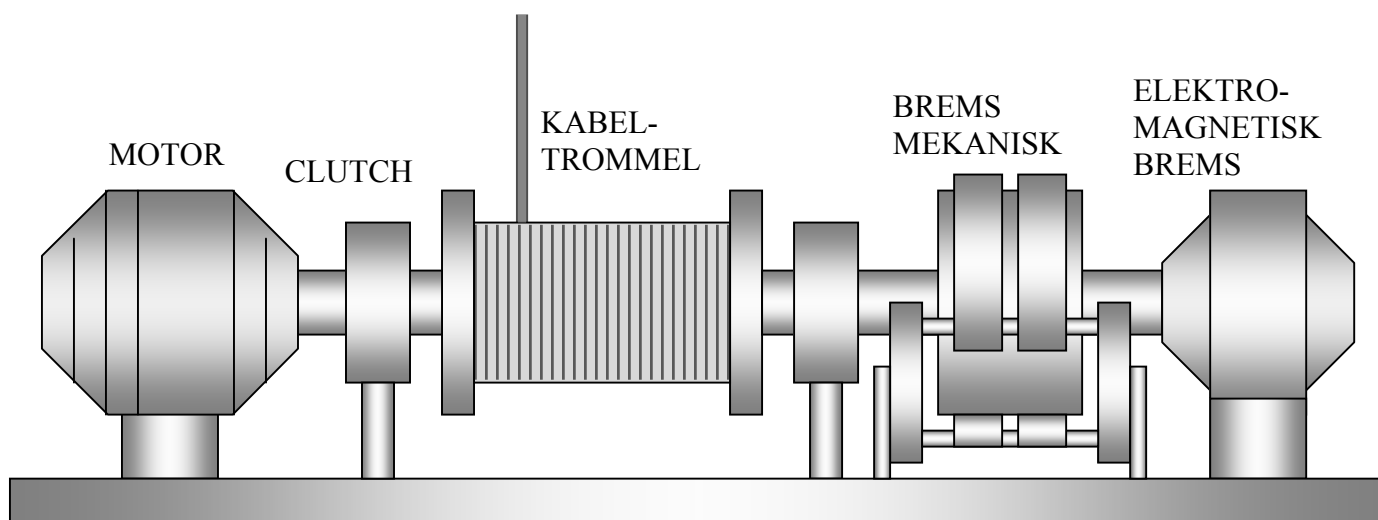
Heisekabelen må altså, med 7 trinser i løpeblokka, tåle et strekk som er 1/10 av maksimum last som kan løftes, rundt 300 tonn. En borestreng vil aldri veie så mye, men en BOP og lange seksjoner av store foringsrør kan komme i nærheten av denne vekten.

Heisetrommelen drives av en kraftig motor, via utveksling og en clutch. Denne frikobler motor når last senkes, kraftige bremses holder da igjen lasten. Under bremsing av last som senkes omdannes potensiell energi i tyngdefeltet til varme. For en last på 300 tonn som senkes med en konstant hastighet på 1 m/s er varmeproduksjonen i bremsen gitt av:

$$\text{Energirate} = \text{Vekt} \times \text{hastighet} = 300000 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s} \times 1 \text{ m/s} = 2943000 \text{ W} = 2943 \text{ kW}.$$

Dette svarer til 2000 panelovner som står på for fullt, og vil koke opp 100 liter vann i løpet av 17 sekunder. Denne energien må ledes vekk fra bremsene ellers vil de brenne opp på kort tid, dette gjøres med vannkjøling.

Det er minst to typer bremses koblet til heisetrommelen, en elektromagnetisk brems og en mekanisk trommelbrems. Den elektromagnetiske er en dynamo som produserer strøm når den roteres. Mesteparten av bremseenergien (ca. 90%) ledes vekk som strøm og dumpes i store motstander. Alternativt (enkler) brukes et massivt anker hvor strømmen som genereres varmer opp ankeret, det krever kraftig vannkjøling av bremsen. Bremseeffekten styres av magnetfeltet i statoren, elektromagneter som står rundt ankeret. Regulering av strømmen (fra plattformens strømmett) gjennom disse magnetene regulerer bremseeffekten.



Figur 3 Skisse av kabeltrommel på boredekk, med motor og bremsesystem. På mekanisk trommelbrems er bremsbåndene vist. Kjølesystemet for bremsene, hvor vann pumpes gjennom bremsetrommel og gjennom elektromagnetisk brems er ikke vist. I virkeligheten er det et nedgiringsystem mellom motor og kabeltrommel. Vanlig motorytelse er 1000 HK = 750 kW.

For en gitt innstilling av elektromagnetisk brems er bremskraften proporsjonal med omdreiningshastigheten på kabeltrommelen. Selv om maksimum bremseseffekt er satt på vil derfor bremskraften gå mot null når trommelen stanser opp. Ved lav senkehastighet av last må derfor mekanisk brems overta. Her er bremskraften tilnærmet konstant, uavhengig av trommelhastigheten, og mekanisk brems kan holde lasten. Men mekanisk brems tåler ikke så høy varmeutvikling som elektromagnetisk brems, da brenner bremsbåndene opp.

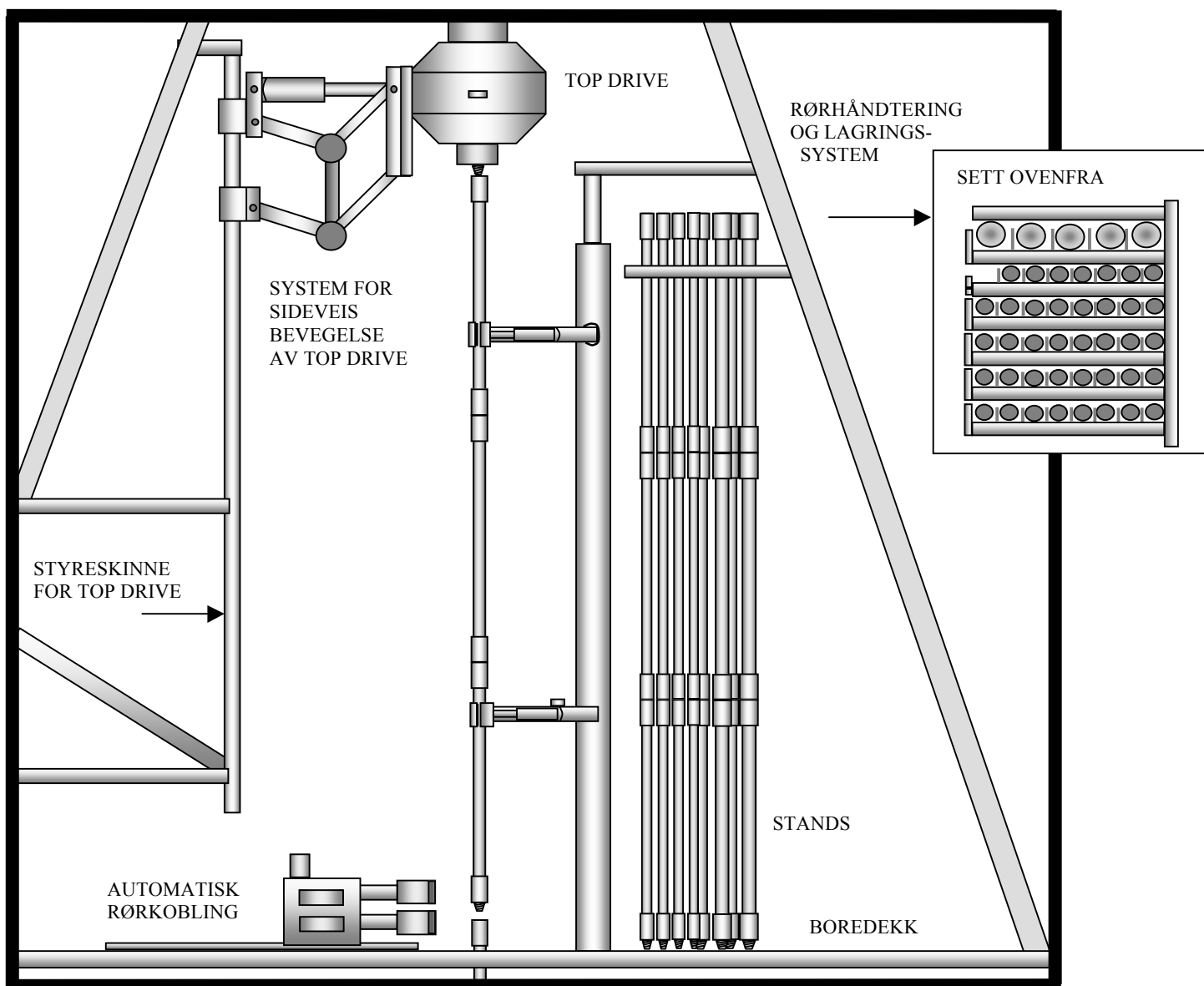
### Overflateutstyr – rotasjonsutstyr og rørbehandlingsutstyr

Borestrengen roteres enten med top drive som er en motor koblet direkte til toppen av borestrengen, eller med rotasjonsbordet. Toppes av rotasjonsbordet er i flukt med boredekket, er rundt og lagret opp på rullelager. Det drives rundt av en elektrisk motor. Som for heisespill er standard motorytelse 1000 HK = 750 kW. Bruk av rotasjonsbord til boring er nærmest utdatert og beskrives i Appendiks. Men det kan ennå brukes til å rotere foringsrør hvis det er ønskelig (se seksjonen om foringsrør).

Øverste seksjon av borestrengen er koblet til undersiden av top drive motoren som igjen henger i løpeblokka. Gjennom denne koblinga pumpes slam fra slampumpa ned inni borestrengen via en rotasjonskobling, en fleksibel slange og et rør som går fra slampumpa og ca. 15 meter opp over boredekket (stand pipe), se Fig. 2.

Hvert av borerørene er rundt 10 m lange (30 fot). Første gang de brukes kobles de sammen enkeltvis, men senere står de lagret vertikalt på boredekket, sammenkoblet tre og tre, se Fig. 4. En slik borestrengsseksjon av tre borerør kalles en stand og har en lengde på omtrent 30 meter. Fordelen med dette er at en slipper å koble og dekkoble så mange ganger når en borer og tripper. Under boring må en av og til trekke borestrengen ut av brønnen for ettersyn, skifte

av borekrone, etc. Denne operasjonen, samt å sette borestrengen ned igjen kalles tripping. En tripper ut når en trekker borestrengen opp, tripper inn når den settes ned igjen. Under tripping pumpes ikke boreslam, og strengen roteres ikke.



Figur 4 Skjematisk tegning av rørhåndteringssystem, sammenkobling av rør, samt lagring av stands (sammenkoblede rør, som oftest tre). Styreskinne for top drive er for at denne ikke skal rotere når den roterer borestrengen. Styreskinna bærer ingen vekt da top drive henger i løpeblokka (som her er over billedkanten). Kabeltrommel og tilførsel av boreslam via stand pipe og slange er ikke vist. Ved boring av dype brønner kan det være lagret godt over hundre stands, langt flere enn vist her. Merk at også vektør lagres som stands, se lagersystem sett ovenfra i figuren.

Ved boring forlenges borestrengen ved følgende operasjoner:

Etter å ha boret ned til bare topp av borestrengen er over rotasjonsbordet:

- Borekrona løftes opp fra bunnen, rotasjonen og slampumping stanses.

- Det settes ned stålkiler (slips) i hullet i rotasjonsbordet, rundt borestrengen under øverste kobling. Løpeblokka senkes litt, kilene klemmer mot borerøret og holder vekten av borestrengen.
- Kobling mellom borestreng og top drive løsnes, og denne heises opp ca. 30 meter.
- Hydrauliske armer tar en stand i lageret av stands som står på boredekket, og svinger den inn under top drive.
- Top drive kobles til denne standen, som igjen kobles til toppen av borestrengen som nå er forlenget med en stand.
- Borestrengen løftes litt så vekten av strengen bæres av løpeblokka. Kilene løsner og fjernes.
- Pumping av boreslam og rotasjon av borestrengen startes opp, borestrengen senkes til borekrona berører bunnen av brønnen og boringa kan fortsette.
- Etter å ha boret lengden av en stand (ca. 30 m) er toppen av borestrengen igjen rett over boredekket og operasjonene beskrevet over gjentas.

Sekvensen av operasjoner beskrevet ovenfor gir at for hver 30 meter en borer må en skru opp en kobling og skru til to, samt sette og ta vekk kiler (for å holde borestrengen) en gang. Ved bruk av rotasjonsbord må en for hver 30 meter skru opp tre koblinger og skru til seks, idet bare ett borerør om gangen adderes til borestrengen.

Ved tripping gjøres delvis de samme operasjonene, men siden pumping og rotasjon ikke utføres trenger en ikke skru fast toppen av borestrengen opp i rotasjonskoblinga under topp drive. Under top drive henger en da en klave som lukkes om koblingsboksen på toppen av borestrengen og løfter denne. Dermed trenger en bare skru opp eller til en kobling for hver stand som fjernes eller adderes til borestrengen. Dette kan en også gjøre selv om rotasjonsbordet brukes under boring, da en ikke trenger å bruke kelly-røret når strengen ikke roteres.

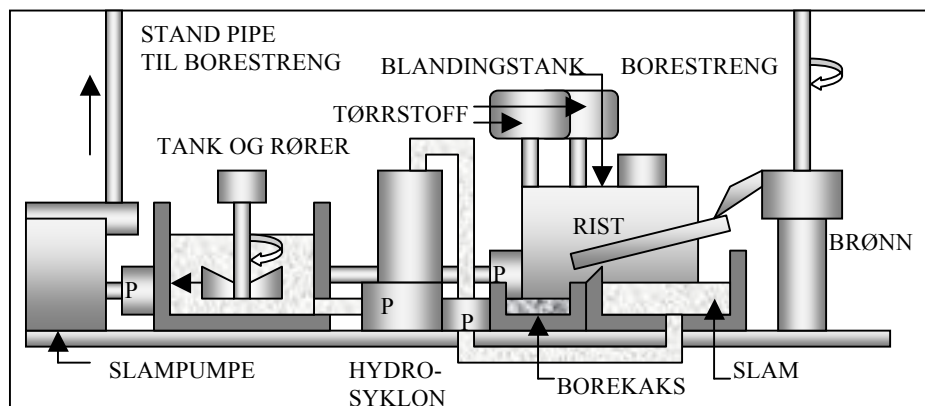
### **Overflateutstyr - slambehandlingsutstyr**

Før og under boring blandes det opp boreslam som pumpes ned inne i borestrengen, ut gjennom dyser i borekrona, og strømmer opp igjen på utsiden av borestrengen, i ringrommet (annulus) mellom borestrengen og brønnveggen. Returnert boreslam blir rensed og brukt om igjen, men etter som brønnen bores dypere trengs det stadig mer slam for å fylle den.

Slamsystemet på pumpedekket (under boredekket) består av blande og lagringstanker for boreslam, rensesystem for boreslam, og en eller flere slampumper (hovedpumper) som pumper boreslam ned inne i borestrengen under høyt trykk. I tillegg er det lavtrykkspumper som pumper boreslam mellom tankene og til hovedpumpa, samt rører som holder slammet i slamtankene i bevegelse for at ikke faste partikler skal synke ned til bunnen, se Fig. 5.

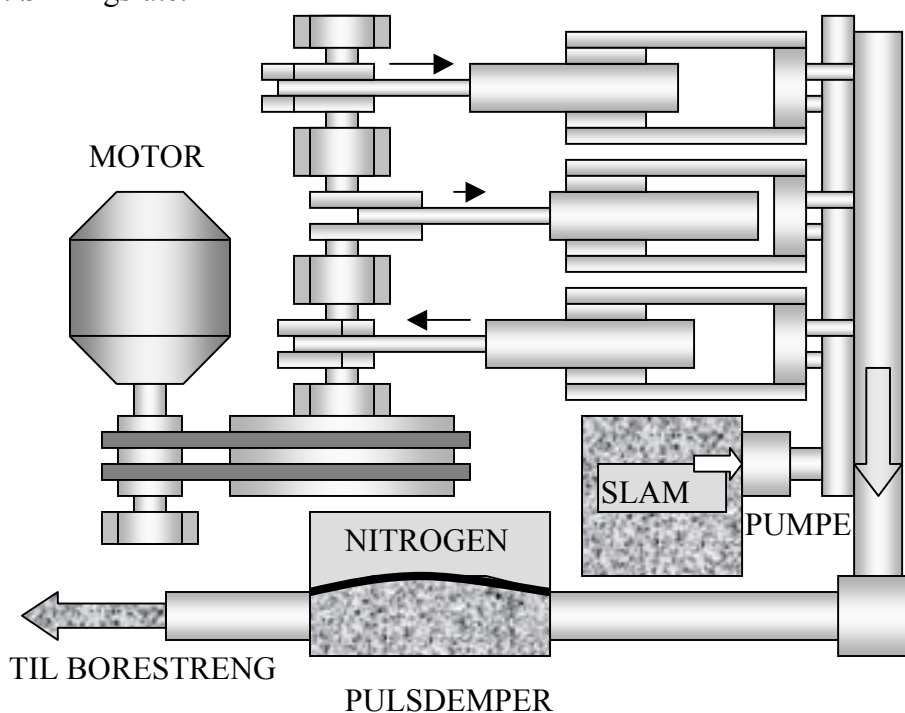
Slam som strømmer opp i ringrommet i brønnen renner fra toppen av brønnen og ned til en skrå rist som vibreres (shaker). Boreslam renner igjennom, samles opp og pumpes videre til slamtank eller til sekundært rensesystem. De fleste utborete steinbitene som blir transportert opp av brønnen med boreslammet blir liggende igjen oppå rista der de sklir ned på grunn av vibreringen, faller ned i en renne og blir transportert vekk. De minste bitene kan falle igjennom, disse kan da bli fjernet i det sekundære rensesystemet. Det kan bestå av sentrifuge, hydrosyklon eller andre apparater som kan fjerne små, faste partikler fra væske. Også gass og væsker som ikke er blandbare med boreslammet kan fjernes her. Ofte er det et eget avgassingsanlegg som fjerner gass fra returnert boreslam.

Nede i brønnen kan boreslam ha blitt tilført partikler som er for små til å bli fjernet med rensesystemet, salter, olje, gass eller vann. Det kan da bli nødvendig å tilsette stoffer som kompenserer for dette, slik at boreslammet fortsatt egner seg for bruk. Dette beskrives nærmere i avsnittet om boreslam.



Figur 5 Skjematisk tegning av slamsystemet. Enheter merket "P" er hjelpepumper. Hydrosyklon er en av flere muligheter for sekundært rensesystem for returnert boreslam. Tankene merket tørrstoff inneholder stoffer som vanligvis blandes ut med vann og/eller olje for å lage boreslam.

Fra lagringstank pumpes boreslam med en lavtrykks hjelpepumpe til en triaksial stempel-pumpe med tre enkeltvirkende stempel. Konstruksjonen er vist i Fig. 6. De tre stemplene drives av en felles veivaksel, faseforskjøvet 120 grader i forhold til hverandre. Dette gir maksimalt jevn slamstrøm ut av pumpa (for mindre enn 5 stempel). Variasjonen av volumstrøm ut er ca. 13.4 % ((maks strøm – min strøm)/maks strøm). For å redusere variasjonen i volumstrøm og trykk enda mer er det ofte montert en pulsdemper på utløpet, se figuren. Dette er en beholder hvor et stempel eller en gummimembran skiller boreslam fra et større volum av en komprimert gass (nitrogen). Elastisiteten i gassen demper ut variasjoner i trykk og strømningsrate.



Figur 6 Triaksial slampumpe med pulsdemper.



Merk at stemplene har mindre diametre enn sylindrene, på engelsk kalles de da ”plunger” i stedet for ”piston”. Tettingen rundt et stempel får en med en foring, montert slik at toppen av stemplet alltid er utenfor foringen, selv når stemplet er trukket helt tilbake. Denne konstruksjonen reduserer muligheten for at det kommer partikler (vektstoff i boreslammet) inn mellom stemplet og foringen. Om så skulle skje og overflatene her blir skrapet opp, noe som kan ødelegge tettingen, kan både foring og stempel skiftes ut. Selve sylinderveggen vil aldri bli skrapet opp.

En slik slampumpe er gjerne utstyrt med 4 – 5 sett med stempel og tilhørende foringer, hvert sett med forskjellig diameter på stemplet. Et vanlig utvalg av diametre kan være 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 og 7.5 tommer. Med en gitt maksimal skyvkraft på hvert stempel er da maksimalt trykk som pumpa kan levere gitt av denne skyvkraften dividert på stemplets tverrsnittareal  $A$ . Ved å skifte til et mindre stempel vil derfor pumpa levere et høyere trykk  $P_p$ . Men til gjengjeld vil volumraten  $Q$  gå ned, den er proporsjonal med stemplets tverrsnittareal  $A$ .

Volumraten kan beregnes når en kjenner antall omdreininger  $n$  per tidsenhet, stempelarealet  $A = (\pi/4)D^2$ , samt slaglengden  $L$  (hvor langt hvert stempel beveger seg fram og tilbake i sylindren). Siden hver sylinder tømmes (ufullstendig) en gang for hver omdreining får en for tre sylindre:

$$Q = 3(\pi/4)D^2Ln$$

Dette kalles ideell volumrate, da en her ikke tar hensyn til følgende:

- Når stemplet går tilbake og sylindren fylles fra slamtank er trykket i sylindren lavt, ned til atmosfæretrykk.
- Når stemplet går fram (inn i sylindren) må det først komprimere slammet til trykket i sylindren blir minst lik utgangstrykket til slampumpa (gjerner flere hundre bar) før utgangsventil åpner seg og slammet kan strømme ut i røret som fører slam til borestrengen (se Fig. 6).
- I tillegg er det et lite dødvolume både i inngangsventil og utgangsventil som må fylles før slam presses ut av sylindren.
- Dette gjør at stemplet må bevege seg fram et lite stykke før selve arbeidslaget starter, omtrent 3 % av slaglengden er vanlig. Effektiv slaglengde blir da omtrent 97 % av den ideelle. Denne størrelsen kalles volumeffektiviteten  $\eta_v$  av pumpa.

Volumeffektiviteten varierer med stempeldiameter og arbeidstrykk for pumpa, men for enkelhets skyld brukes gjerne en fast gjennomsnittsverdi, 0.97 er vanlig. For en typisk slampumpe med stempeldiameter på 7 tommer, slaglengde på 10 tommer, og med 120 omdreininger på veivakselen per minutt, får en for eksempel volumraten:

$$Q = \eta_v 3(\pi/4)D^2Ln = 0.97 * 3(\pi/4)7^2 * 10 * 120 = 134387.9 \text{ kubikktommer/min} = 2202.2 \text{ l/min}$$

Nå måler en vanligvis volumrate slam i liter per minutt. Siden en tomme er 0.0254 m, vil en kubikktomme være  $(0.0254)^3$  kubikkmeter. Nå er 1 m<sup>3</sup> lik 1000 liter, så ved å multiplisere første svar (kubikktommer/min) med  $(0.0254)^3 * 1000 = 0.254^3 = 0.016387$ , får en svaret i liter per minutt, som vist over. For effektberegninger er det enklest å bruke SI-enheter, som for volumstrøm er kubikkmeter per sekund. Svaret over må da divideres med 60000, 60 for antall sekunder i et minutt, og 1000 for antall liter i en kubikkmeter. Dette gir  $Q = 0.03670 \text{ m}^3/\text{sek}$ .

For å regne ut maksimalt trykk som pumpa kan gi i dette tilfellet kunne en ut fra kjent dreiemoment på motor prøve å regne ut maksimal trykk-kraft på hvert stempel. Men det er enklere

å bruke energieffektbetraktninger (effekt er energi per tidsenhet). En må da kjenne total energioverføringseffektivitet  $\eta$  fra elektrisk effekt inn til motor, til effekt tilført slamstrømmen ut fra pumpa. Effekt i væskestrøm kalles hydraulisk effekt og er gitt av trykk  $P$  i væskestrøm ganget volumraten  $Q$ . Overføringseffektiviteten er typisk rundt 0.6 til 0.7, og med typisk drivmotor på 1000 kW elektrisk effekt får en, med  $\eta = 0.6$ :

$$\text{Hydraulisk effekt} = P_p Q = \eta * \text{Elektrisk effekt} = 0.6 * 1000 \text{ kW} = 600 \text{ kW}$$

For pumpa brukt som eksempel ovenfor gir dette:

$$P_p = (\eta * \text{Elektrisk effekt}) / Q = (600 * 1000 \text{ W}) / 0.0367 \text{ m}^3/\text{sek} = 16\,349\,000 \text{ N/m}^2 = 163.49 \text{ bar}$$

Merk at vi nå får trykket i SI-enheten Pascal (=  $\text{N/m}^2$ ), som vi gjør om til bar helt til slutt. Merk også at effekt må gjøres om til SI-enheten W (Watt) i beregningen. Denne type effektberegning brukes i mange sammenhenger for å finne output av et system, her er output trykk. Regelen er at alle størrelser må gjøres om til SI-enheter i slike formler, da slipper en omregningsfaktorer.

Det er her viktig å merke seg at for en gitt stempeldiameter kan en få lavere volumstrøm ved å regulere ned omdreiningshastigheten på motoren. Men da synker effekten den leverer tilsvarende, slik at maksimalt levert trykk ikke øker. Så selv om en bruker pumpa med en lavere omdreiningsrate enn den maksimale (mindre volumstrøm) skal maksimalt trykk beregnes ved å bruke maksimal oppgitt omdreiningsrate (maksimal volumstrøm) og maksimal oppgitt elektrisk effekt for motor.

Det eneste en kan gjøre for å øke pumpetrykket ut over det beregnet ovenfor, er å skifte foringer og stempel til mindre diameter. Eneste forandring i beregningene ovenfor er da stempeldiameter  $D$ . Dermed kan en finne maksimal volumstrøm og trykk for den nye stempeldiameter  $D_{ny}$  av:

$$Q_{ny} = (D_{ny}/D)^2 Q \qquad P_{ny} = (D/D_{ny})^2 P$$

Hvis en i eksemplet ovenfor skifter til stempel med 5.5 ” (tommer), får en  $Q_{ny} = (5.5/7)^2 Q = 0.61735 * 2202.2 \text{ l/min} = 1359.5 \text{ l/min}$ , og  $P_{ny} = (7/5.5)^2 P = 1.6198 * 163.49 \text{ bar} = 264.82 \text{ bar}$ .

## Boreslam

Lagring, pumping og rensing av returnert boreslam er beskrevet i avsnittet foran. Sammensetningen av boreslam er blitt ganske komplisert etter som flere og flere krav er blitt satt. I utgangspunktet er boreslam vann (vannbasert boreslam) eller olje (oljebasert boreslam) som er tilsatt en hel rekke forskjellige stoffer, de fleste er faste stoffer som er malt opp til pulver. Størrelsen som pulverkornene har kan ha stor betydning for funksjonen. De viktigste kravene til boreslam, samt hvilke tilsetningsstoffer som brukes for å oppfylle disse kravene, er:

KRAV	TILSETNING
- Tetthet som gir ønsket trykk i brønnen	Barytt – mineral med tetthet $4230 \text{ kg/m}^3$ . Generelt ønskes høyere tetthet enn vann, tilsetning kalles vektstoff, alltid finmalt
- Rense borekaks fra bunnen	Ingen tilsetning, dyser sørger for dette

- Transportere opp borekaks	Stoffer som øker viskositeten og gir gel-egenskaper, vanligst er polymerer og bentonitt (leire), tetthet 2600 kg/m <sup>3</sup>
- Holde borekaks svevende ved sirkulasjonsstans (pumpestans)	Stoffer som gir gel-egenskaper som polymerer og bentonitt
- Kjøle borekrona	Ingen tilsetning, vannet/oljen gir kjøling
- Danne filterkake på hullveggen for å hindre boreslam i å trenge inn i porøse formasjoner (reservoarbergarter)	Lettere mineraler malt til korn som er store nok til å tette poreåpningene og dermed hindre mindre partikler (vektstoff) i å trenge inn
- Stabilisere hullveggen	Salt og andre stoffer som hindrer svelling og oppløsning (av hovedsaklig leire og leirskifer)
- Smøre borestrengen	Olje, tilsettes vannbasert boreslam
- Hindre korrosjon av utstyr	Forskjellige korrosjonsinhibitorer
- Hindre bakterievekst i brønnen	Stoffer som hindrer bakterievekst
- Unngå kjemiske reaksjoner med sement ved sementering	Diverse, sementen kan også tilsettes stoffer for å hindre dette
- Lede slampulssignaler	Bør ikke være gassbobler i boreslam
- Leverer hydraulisk energi til utstyr	Fordel med så små partikler som mulig i boreslam og at de ikke består av harde mineraler, for å redusere slitasje på turbiner, slammotorer osv.
- Opprinnelig fordeling av vann og olje må holdes stabil	Tensider (såpestoffer) legger seg i skilleflaten mellom olje og vann og stabiliserer denne
- Lette fjerning av borekaks og gass	Lettere ved lav viskositet, reduser leirinnhold

Vektstoff som tilsettes boreslam er et tungt mineral og de små kornene det er malt opp i synker i slammet. Men ved å ha små nok korn er synkhastigheten liten. Kornstørrelsen er gjerne 10 – 100 µm (0.01 – 0.1 mm). Synkhastigheten er da liten nok til at naturlig omrøring når slam pumpes gjennom brønnsystemet, ned inne i borestrengen og opp på utsiden av den, holder vektstoffet jevnt fordelt i boreslammet. Men står slammet i ro, som i en lagringstank, vil vektstoffet etter hvert synke ned til bunnen. Derfor er det montert rører i disse tankene som hele tiden holder slammet i bevegelse, se Fig. 5.

Uheldigvis er denne kornstørrelsen liten nok til at vektstoff blir med inn i porene i reservoarbergarter hvis boreslam strømmer inn i porene. Kornene setter seg fast der porene er trangest og tetter disse. Dette reduserer sterkt mengde olje og gass som kan produseres. Ved tradisjonell boring må en ha høyere trykk i brønnen enn i reservoarbergarter (porøse bergarter), ellers vil reservoarfluid strømme inn i brønnen under boring, og en risikerer å få en utblåsing.

For å redusere innstrømning av boreslam er det tilsatt lette mineraler hvor kornene kan være større uten å synke for fort. Disse kornene er store nok til å tette poreåpningene, de legger seg som lokk over disse uten å trenge inn i formasjonen. Nå blir det ikke helt tett, men åpningene inn blir små nok til å stanse mesteparten av vektpartiklene. Spesielt væska i boreslammet

fortsetter å strømme inn til en viss grad, og dette fører til en konsentrasjon av partiklene i slammet mot hullveggen, denne fortykningen av slam mot hullveggen kalles en slamkake. Teknisk kalles denne prosessen for filtrering.

Leire er tradisjonelt brukt for å øke viskositeten i boreslam. Leire består av små plater som bindes sammen av elektriske ladninger på platene. I vann, hvor vannmolekylene er dipoler, brytes denne forbindelsen og leira løses opp i vannet. Men platene har fremdeles en tendens til å feste seg til hverandre, nå mest på kantene. Dermed danner de lange kjeder, og disse hindrer strømming av vann og øker viskositeten. En bruker helst de leirtypene som lettest danner slike kjeder, en fellesbetegnelse på disse er bentonitt. En trenger da ikke tilsette så mye leire. For å øke viskositeten av vann fra 1 cP (centiPoise) til 10 cP må en tilsette 5 vektprosent bentonitt. Andre leirtyper må en tilsette fra 8.5 til 35 vektprosent av for å få samme viskositetsøkning. I praksis bruker en aldri boreslam med større viskositet enn 50 cP, da trenger en 7.5 vektprosent bentonitt (eller fra 16 til 49 % andre leirtyper).

I nyere tid er det blitt mer vanlig å tilsette polymerer i stedet for leire for å øke viskositeten. Disse er langkjedete molekyler som hekter seg sammen og akkurat som platekjedene i leire hindrer vannet i å strømme fritt. Siden diameteren på polymerkjeder (ett molekyl) er mye mindre enn på platene i leire (mange molekyler), trenger en mindre av polymerene enn av leire for å få en bestemt viskositetsøkning. Men leire er billigere.

Dess høyere viskositet boreslammet har, dess bedre er det i stand til å føre med seg utboret borekaks opp til overflaten. Borekaket vil ha en viss synkehastighet i boreslammet, og hvis denne synkehastigheten er mindre enn strømningshastigheten til boreslam i annulus (utsiden av borestrengen), vil borekaket transporteres opp. Men økende viskositet krever også økende pumpetrykk ved en gitt pumperate. I praksis begrenses slammets viskositet derfor til mindre enn 50 cP. Nå kan det skje at de største borekaksbitene da synker for fort og blir akkumulert rundt nederste del av borestrengen. For å fjerne disse er det vanlig å pumpe ned en "pille" med høy-viskositets boreslam. Denne har et volum som er betydelig mindre enn volumet av brønnen, fyller bare noen hundre meter av brønnen. Den vil da ta med seg de store borekaksbitene uten å gi så stor trykkøkning i pumpa.

I vannbasert boreslam kan det være typisk 6 % av volumet som olje. Disse er i form av små dråper som holdes stabile og hindres i å flyte sammen til større dråper av de tilsatte tensidene (se liste over). Vi kaller vann den kontinuerlige fasen, oljen er diskontinuerlig da den er brutt opp i dråper som ikke henger sammen. Det er hovedsakelig den kontinuerlige fasen som kommer i kontakt med bergveggen under boring, og som derfor må danne slamkake. Det er også viskositeten til den kontinuerlige fasen som bestemmer totale viskositet til boreslammet. De andre stoffene som er tilsatt, som leire og vektstoff, er da også i vannfasen i vannbasert boreslam.

Salt i vannet løses opp i positive og negative ioner som hindrer oppløsning av leire. Det enkleste boreslammet er derfor ferskvannsslamm. Men det løser også lett opp leire i formasjonen og kan gjøre hullveggen ustabil i leirskifer og andre formasjoner med leire. Det er da en stor fordel å bruke saltvannsslamm, men da må leira prehydreres, løses opp i litt ferskvann, før den tilsettes. Et alternativ er å bruke oljebasert slam, da olje ikke reagerer med leire i formasjonen.

I oljebasert boreslam er olje kontinuerlig fase, og leire og vektstoff er i oljen. Vektstoffet (barytt) er tørt pulver når det blandes i oljen, det blir da oljefuktende og holder seg der. Leire

løser seg vanligvis ikke opp i olje da oljemolekyler er elektrisk nøytrale og ikke vekselvirker med ladningene på leirplatene. Denne leira må derfor spesialbehandles og få litt vann å vekselvirke med for å danne kjeder i oljen. Det er vanlig å ha en god del vann i oljebasert boreslam, fra 10 til 35 volumprosent. Vannet er da som dråper i oljen, stabilisert med tensider. Dette vannet har gjerne høyt saltinnhold slik at det ikke reagerer med leire i formasjonen. Vann i oljebasert boreslam er nødvendig av flere grunner, de to viktigste er:

- Det viser seg at for at leire i olje skal danne kjeder som gir viskositetsøkning må det være minst 4 % vann i oljen.
- I porøse formasjoner er det alltid vann. Under boring vil dette vannet frigjøres og blande seg med boreslammet. For at det ikke skal flyte sammen til store dråper, men holde seg fordelt som små dråper, må det stabiliseres med tensider. Det vannet som allerede er i slammet har overskudd av tensider og fungerer som tensidlager. Nye vannråper får en del av disse ved kollisjon og blir dermed stabile.

En annen fordel med oljebasert slam er at det smører borestrengen bedre og gir mindre friksjon, samt at det danner tynnere slamkake mot hullveggen. Dette har stor betydning ved boring av horisontale brønner hvor det er viktig å ha lite friksjon, og hvor borestrengen ligger mot undersiden av brønnen og dermed presses ned i slamkaka. Stanses boringa en tid kan da borestrengen bli sugd fast så det er umulig å skyve eller rotere den. Dette kalles differential sticking og er en av de vanligste årsakene til fastkjøring av borestrengen.

Alle stoffer som tilsettes boreslam vil til en viss grad påvirke både viskositet og tetthet. Dråper og faste partikler vil øke viskositeten, antallet er viktigere i så måte enn størrelsen. En gitt masse av vektstoff vil derfor gi en viskositetsøkning som er større dess mer finmalt denne massen er. Men med de partikkelstørrelsene og mengdene en opererer med er viskositeten hovedsakelig bestemt av tilsatt leire eller polymerer. Tettheten derimot er merkbart påvirket av andre tilsetninger enn vektstoffet. Et ferskvannslam med viskositet på 20 cP vil ha 6.2 vektprosent bentonitt. Uten andre tilsetninger vil tettheten da bli:

100 kg slam inneholder 93.8 kg vann ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) og 6.2 kg bentonitt ( $2600 \text{ kg/m}^3$ ).  
 $93.8 \text{ kg vann har et volum på } 93.8 \text{ kg}/(1000 \text{ kg/m}^3) = 0.09380 \text{ m}^3$ .  
 $6.2 \text{ kg bentonitt har et volum på } 6.2 \text{ kg}/(2600 \text{ kg/m}^3) = 0.00238 \text{ m}^3$ .  
 Totalt volum er  $0.09380 + 0.00238 = 0.09618 \text{ m}^3$ , som gir en tetthet på  
 $100 \text{ kg}/(0.09618 \text{ m}^3) = 1039.7 \text{ kg/m}^3$ , noe større enn tetthet til sjøvann,  $1003 \text{ kg/m}^3$ .

Det tilsettes 20 kg barytt, hva blir tettheten av boreslammet vi nå får?

Totalvekten blir nå 120 kg, volumet blir  $0.09618 \text{ m}^3 + \text{volum av } 20 \text{ kg barytt} =$   
 $0.09618 \text{ m}^3 + 20 \text{ kg}/(4230 \text{ kg/m}^3) = 0.09618 + 0.00473 = 0.10091 \text{ m}^3$ . Dette gir en  
 slamtetthet på  $120 \text{ kg}/(0.10091 \text{ m}^3) = 1189.2 \text{ kg/m}^3$ .

Tilsvarende beregninger kan gjøres for andre tilsetningsstoffer. For å kontrollere at vi nå virkelig har et boreslam med tetthet  $1189 \text{ kg/m}^3$  og viskositet på omtrent 20 cP kan en veie et bestemt volum og måle viskositeten i et viskosimeter. Dette er standard måleinstrumenter som blir brukt jevnlig for å sjekke kvaliteten på boreslammet. Andre målinger blir også gjort, noe som blir behandlet i senere kurs.

Denne kontrollen er nødvendig fordi det under boring blir tilført boreslammet nye stoffer fra formasjonen, som leire, finmalt stein, vann, salter, olje og gass. Noen av disse stoffene fjernes i renseanlegget på overflaten, som gass og ikke alt for små steinbiter. Men leire og finmalt stein, med partikkelstørrelse like liten som for vektstoffet ( $< 100 \mu\text{m}$ ), kan ikke

fjernes. Dette vil gradvis forandre egenskapene til boreslammet som sirkulerer. Nå må det stadig blandes opp og tilsettes nytt slam etter som brønnen blir dypere, da den dermed rommer mer slam. En kan da muligens kompensere for forandringene, for eksempel ved vanntilførsel i brønnen lages nytt slam som inneholder mindre vann enn ønsket for slammet.

Tilførselen av stoffer fra brønnen kan lett bli større enn det som det er mulig å kompensere for på dette viset. En må da innimellom kaste en del, eller i verste fall mesteparten, av returnert slam. Noen stoffer, som salter og svovelholdig gass, kan forgifte boreslammet. Det betyr at en får kjemiske reaksjoner som forstyrrer eller ødelegger funksjonen til stoffer som allerede er til stede. Som oftest kan det da tilsettes spesielle stoffer som forhindrer dette.

Væsker med kjedete molekyler og partikler som kan hekte seg sammen har en annen oppførsel ved strømming enn væsker som består av enkeltmolekyler, som vann og olje. De siste kalles Newtonske væsker og har en konstant viskositet. I væsker som boreslam og sementpasta, som inneholder kjeder av molekyler eller partikler, vil kjedene rives over når væska strømmer, mer og mer dess raskere den flyter. Viskositeten avtar derfor når strømningshastigheten øker. Avtar hastigheten vil kjedene hekte seg mer sammen igjen. Disse prosessene tar tid, slik at forandring i viskositet ikke skjer med en gang hastigheten forandres.

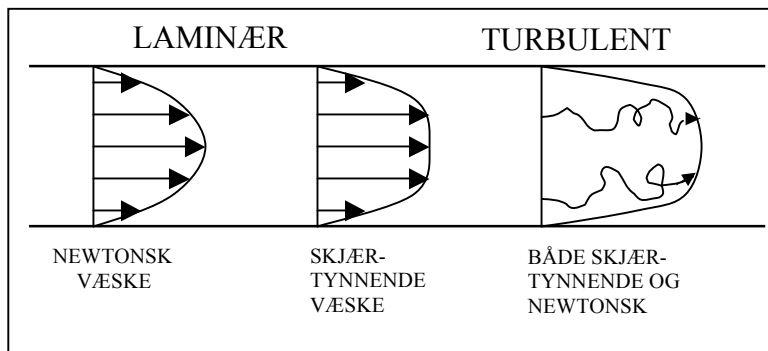
Disse væskene som forandrer viskositet med strømningshastighet kalles generelt ikke-Newtonske væsker, og spesielt skjærtynnende når viskositeten avtar når hastigheten øker. Begrepet "skjær" kommer av at ved strømming vil strømningshastigheten variere, og hvor fort den forandrer seg med posisjon i strømmen kalles skjærhastigheten. For eksempel ved rørstrøm så vil væska helt inntil veggen stå i ro mens den strømmer hurtigst midt i røret. Hvis en nå, 10 mm fra veggen har en strømningshastighet på 10 m/s, og 1 mm lenger inn har hastigheten 10.8 m/s, er skjærhastigheten 10 – 11 mm inn i røret gitt av:

$$\text{Skjærhastighet} = (10.8 \text{ m/s} - 10.0 \text{ m/s}) / (0.011 \text{ m} - 0.010 \text{ m}) = 0.8 / 0.001 = 800 \text{ s}^{-1}.$$

Merk at benevningen på skjærhastighet er en delt på sekund. Tilsvarende defineres skjærspenning som friksjonskraft per flateenhet mellom to posisjoner i væskestrømmen, når flatene står vinkelrett på avstanden mellom disse posisjonene (og avstanden står vinkelrett på strømningsretningen). Benevning på skjærspenning blir  $\text{N/m}^2$ , eller Pa ( $= 10^{-5}$  bar). Viskositeten mellom disse to posisjonene blir da skjærspenningen dividert på skjærhastigheten, som gir SI-benevningen  $\text{Ns/m}^2$ . Vanlig benevning er cP som svarer til  $10^{-3}$   $\text{Ns/m}^2$ . For Newtonske væsker er denne som nevnt konstant, og dermed den samme tvers gjennom røret. For skjærtynnende væsker, som boreslam, er den minst ved rørveggen, hvor skjærhastigheten alltid er størst, og størst midt i røret, hvor skjærhastigheten er minst (lik null ved laminær strømning).

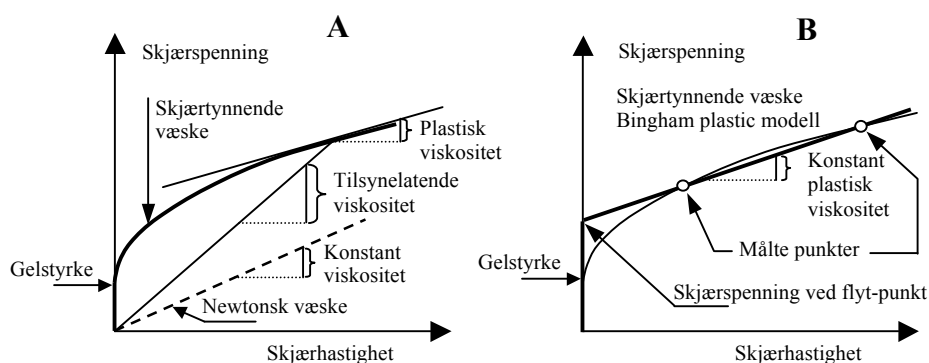
Figur 7 på neste side viser at for laminær strøm blir hastighetsprofilen for skjærtynnende væske flatere i midten av røret enn for Newtonsk væske. For væsker med gel-egenskaper kan den bli helt flat. Væska i midten av røret beveger seg da som et fast stoff, det kalles pluggstrøm. I en slik væske binder alle kjedene seg sammen når væska ikke røres om og låser vannet så det oppfører seg som et fast stoff som ligner på gelé, derav navnet. Hvis en setter nok trykk på, som i praksis blir en skjærspenning, så brytes en del av forbindelsene og væska blir flytende igjen. Den skjærspenninga som skal til for å bryte opp gel-strukturen kalles for gelstyrke. For boreslam er denne oppførselen en fordel. Hvis en må stanse pumping av boreslam en periode så geller boreslammet i brønnen og all borekaks på vei opp i annulus blir stående i ro i det nå faste slammet. Dette gjelder imidlertid bare biter som ikke er så store at vekten av dem gir en skjærspenning som er større enn gelstyrken. Hvis boreslam ikke geller

så vil borekaks i brønnen siye nedover uansett hvor stor viskositeten er, og vil etter hvert pakke seg rundt borestrengen i bunnen av brønnen. Dette kan gi store problemer med å starte opp boringa igjen, i verste fall får en ikke løs borestrengen.



Figur 7 Hastighetsprofiler i rør for laminær og turbulent strøm, både for Newtonsk væske og skjærtynnende væske (ikke-Newtonsk væske). Vandring av noen væskepartikler i et gitt tidsrom er vist med piler. Der de går lengst er hastigheten størst. Kurven gjennom endepunktene for pilene er hastighetsprofilen og viser hastigheten langs strømningsretningen. Hastighetsprofilen for turbulent strøm vil være litt forskjellig for Newtonsk og skjærtynnende væske, men mye mindre enn for laminær strøm.

For å kunne regne på en ikke-Newtonsk væske er det vanlig å bruke en forenklet modell. For det første antar en at kjedeforbindelsene ikke bruker tid på å forandre seg, for det andre forenkles sammenhengen mellom skjærspenning og skjærhastighet. Figur 8A under viser typisk målt sammenheng mellom disse størrelsene ved steady state strømningsforhold og laminær strømming, som ved en liten, konstant strømningshastighet gjennom et langt, jevntykt rør, langt fra innløp og utløp. Også Newtonsk væske er vist, samt en tilpasning til den skjærtynnende væsken med den forenklete Bingham plastic modellen som brukes mest i oljeindustrien (Fig. 8B). Det finnes andre og bedre modeller, men de er mer kompliserte å regne på.



Figur 8 Del A viser typisk sammenheng mellom skjærspenning og skjærhastighet for en skjærtynnende (ikke-Newtonsk) væske, og for en Newtonsk væske, for steady state, laminær strømming. Hvis den prikkede, horisontale linjebiten har en lengde på en enhet av skjærhastigheten, er den avmerkede, vertikale linjelengden et direkte mål på viskositeten, som vist. Del B viser tilpasning til en skjærtynnende væske med Bingham plastic modellen.

Figur 8A viser to måter å definere viskositet på for en ikke-Newtonsk væske, den lokale viskositeten som er vinkelkoeffisienten til tangenten til kurven og som kalles plastisk

viskositet, og den globale eller tilsynelatende viskositeten som er viskositeten til en Newtonsk væske med samme skjærspenning ved den skjærhastigheten en har. For en Newtonsk væske faller disse to viskositetene sammen, idet tangenten til en rett linje er linja selv. Videre vil begge disse viskositetene variere med skjærhastigheten for en ikke-Newtonsk væske, mens for en Newtonsk er viskositeten konstant og uavhengig av skjærhastigheten.

I Bingham plastic modellen er steady-state sammenhengen mellom skjærspenning og skjærhastighet beskrevet med to rette linjer. En måler skjærspenningen ved to skjærhastigheter i viskosimetret og får dermed de to målepunktene som vist i Fig. 8B. Der linjen krysser vertikal akse (skjærspenning) har en definert flyt-punktet. Ved å trekke en rett linje gjennom målepunktene kan plastisk viskositet og skjærspenning ved flyt-punktet finnes, flytspenningen. Merk at plastisk viskositet i denne modellen er konstant, uavhengig av skjærhastigheten. Disse to parametrene brukes til å beregne strømningsegenskapene til boreslammet.

Det viser seg at begge parametrene har betydning ved laminær strøm, men ved turbulent strøm er det bare plastisk viskositet (og slammets tetthet) som betyr noe. Ved turbulent strøm oppfører en slik Bingham plastic væske seg akkurat som en Newtonsk væske med samme viskositet (plastisk viskositet lik viskositeten til den Newtonske væsken).

Nå er en også interessert i å finne reell gel-styrke til væsken for å kunne estimere evnen til å bære borekaks under pumpestans, og gjør derfor en separat måling av denne ved å måle skjærspenningen ved svært lav skjærhastighet.

Ved laminær strøm er alltid trykkfallet i et horisontalt rør proporsjonalt med viskositeten og med volumstrømmen gjennom røret for en Newtonsk væske. For en gitt væske er viskositeten konstant, og dermed er trykkfallet direkte proporsjonalt med volumstrømmen (eller volum eller strømningsraten). Dette trykkfallet kalles friksjonstrykkfallet og er uavhengig av rørets retning. Men for et rør som ikke er horisontalt får en i tillegg trykkfall i røret på grunn av væskas tyngde (statisk trykkfall). For en skjærtynnende væske avtar viskositeten når volum-strømmen øker, dermed øker trykkfallet langsommere enn volumraten for en gitt væske. Ved full turbulent strøm øker trykkfallet med kvadratet av volumraten for alle typer væsker. I en overgangssone øker trykkfallet med en potens av strømningsraten som ligger mellom 1 og 2. I industrien ligger de fleste rater i dette overgangsområdet. For boreslam regner en ofte med en potens på 1.8. Se seksjon om trykk i borestrengen.

### **Borestreng - borerør og vektrør**

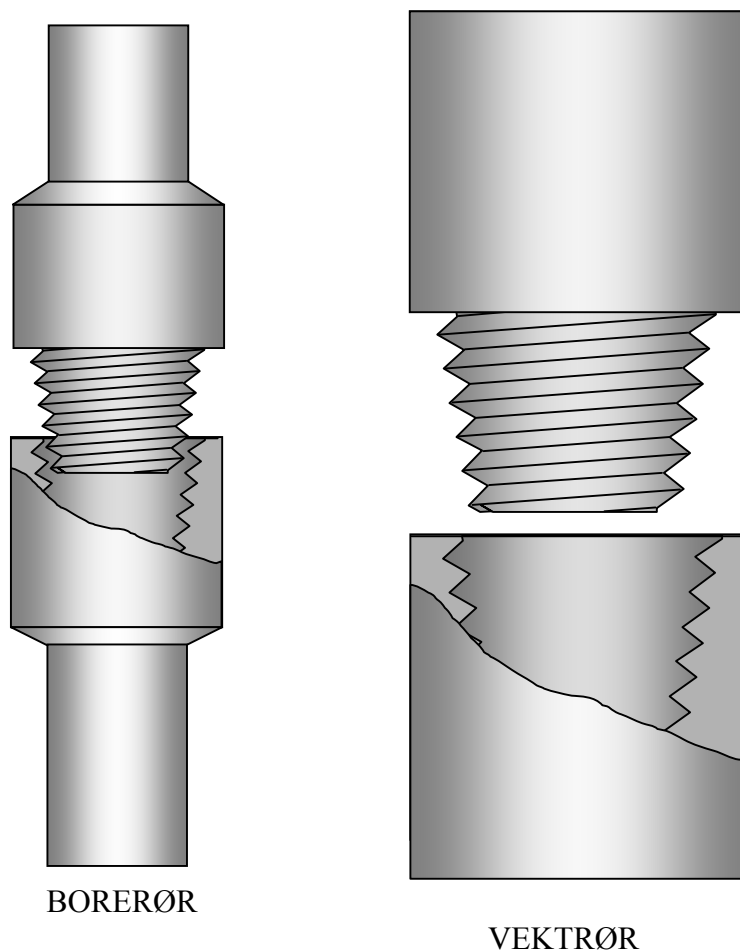
Borestrengen består hovedsakelig av borerør og vektrør som er skrudd sammen med koniske gjenger. Borekrona sitter nederst, skrudd fast i bunnen av vektrørene (koniske gjenger her også). Koniske gjenger har tre fordeler:

- Det trengs bare et par omdreininger for å skru dem sammen, dette gjør at sammenkobling av borestrengsrør går raskere enn med rette gjenger
- Når de er skrudd sammen presser de mot hverandre så det blir en solid forbindelse uten noe slark. Dette er viktig for en borestreng som må tåle slag og vibrasjoner
- Da de presses mot hverandre blir det bedre tetting mot lekkasje enn med vanlige, rette gjenger. For god tetting må de likevel smøres med gjengepasta som fyller alle åpninger mellom gjengene, se Fig. 9.



Borerørene har påsveiset en koblingsboks i hver ende, en med hunngjenger og en med hanngjenger (de innerste gjengene). Hanngjengene står alltid nedover. Koblingsboksene har større veggtykkelse enn selve borerøret slik at de sammenskrudde koblingsboksene er sterkere enn borerøret både for trykk, strekk og bøyning. Men hvis en skrur gjengene for hardt sammen sprenges de. For å få en så fast forbindelse som mulig skal en trekke til så hardt at stålet i gjengene nesten når flytgrensa. Når borestrengen roteres må derfor ikke dreiemomentet være større enn anbefalt tiltrekningsmoment for gjengene. Dette er vanligvis mindre enn det selve borerøret tåler av dreiemoment, så her er ofte gjengene det svake punktet.

Det kraftigere godset i koblingsboksene gjør at de har større ytterdiameter enn selve borerøret, som vist i tidligere figurer. De har vanligvis også litt mindre innerdiameter enn borerøret. Den større ytterdiameteren gjør at det hovedsakelig er koblingene som roterer og glir mot hullveggen slik at slitasjen på borerøret reduseres. På grunn av tykkere gods tåler koblingene mer slitasje enn røret mellom dem. De kan bli belagt med et hardere materiale for å tåle denne slitasjen bedre (hardere enn stålet i koblingene og røret, dette kan ikke være for hardt da det da blir for sprøtt til å tåle slag så godt).



Figur 9 Koniske gjenger for sammenkobling av borerør, vektrør og utstyrsenheter i borestrengen. Før koblingene skrur sammen smøres de inn med gjengepasta som fyller åpninger, spesielt åpningen mellom bunnen av gjengene og den avrundede toppen av de motstående gjengene.

Vektrørene har gjengene dreid rett inn i endene på selve røret, som vist i Fig. 9. Her blir koblingene det svake punkt både for strekk, bøyning, vridning og trykk. Men på grunn av den

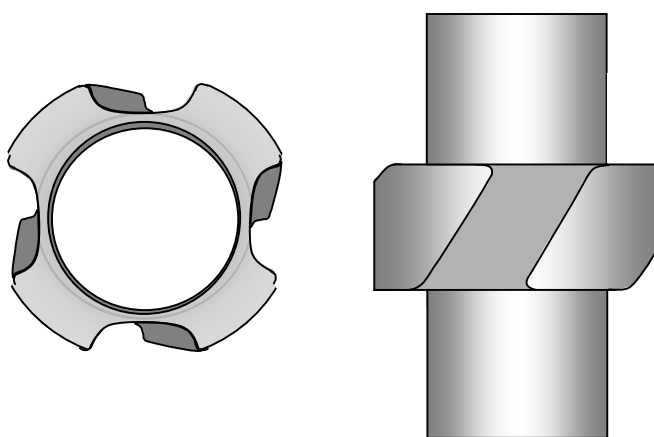
mye større veggtykkelsen på vektørørene er koblingene her likevel sterkere enn på borerørene. Dessuten ville det på vektørørene vært uheldig med større diameter ved koblingene fordi en da ville fått enda mindre klaring til hullveggen.

Både vektørørene og borerørene produseres i lengder på omtrent 10 m (30 fot). For brønner i Nordsjøen kan det være aktuelt med vektørør med ytre diameter fra 6 til 14 tommer (0.1524 m til 0.3556 m), med vekt fra 87.3 kg/m til 749.5 kg/m. Hver størrelse (definert ved ytre diameter) produseres med forskjellige innerdiameterer. For eksempel kommer 8 ” vektørør med innerdiameterer fra 1.5 til 4 ”, i trinn på 0.25 ” (” betyr tommer, ’ betyr fot (12 tommer)).

Vektørørene må ikke ha så stor diameter at det blir for trangt mellom dem og brønnveggen. Det vil gi for stor strømningsmotstand for slammet som strømmer opp på utsiden av strengen. Da brønnhulsdiameteren er bestemt av borekronas diameter må ytre diameter på vektørørene i praksis være minst 1.5 ” mindre enn for borekrona, helst minst 2 ” mindre.

Da ytre diameter er begrenset kan en øke vekten ved å bruke en mindre innerdiameter. Det er vanlig at vektørørene har noe mindre innerdiameter enn borerørene. Selv om strømningsmotstanden per meter da kan bli betydelig større enn for borerørene betyr det ikke så mye da vektørørseksjonen er mye kortere. For strømningsrater rundt 2000 liter/min bør likevel ikke indre diameter være mindre enn 3 ”, da øker motstanden dramatisk. Det er heller ikke så mye å vinne i vekt ved å gå under denne verdien. Et 8 ” vektørør øker i vekt fra 218.8 kg/m til 229.7 kg/m ved å redusere innerdiameter fra 3 ” til 2.5”, en vektøkning på bare 5 %, mens strømningsmotstanden øker med 140 %.

Vektørørene skal, med sin store vekt, gi nødvendig kraft på borekrona mot formasjonen i bunnen av brønnhullet. (Formasjon er en fellesbetegnelse på alle bergartstyper, eventuelt løs sand og leire som jordkorpa måtte bestå av). Avhengig av type og størrelse av borekrona samt bergartstype er nødvendig trykk-kraft mot formasjonen omtrent fra 5 til 60 tonn 50 – 600 kN). Med for eksempel 8 ” vektørør med indre diameter på 3 ” (vekt 218.8 kg/m) gir dette en lengde på seksjonen med vektørør fra 27 til 329 m. Det vanlige er en vektørørseksjon på 100 til 300 m. Siden en brønn kan være flere kilometer dyp vil derfor det aller meste av borestrengen vanligvis bestå av borerørene.



Figur 10      Stabilisator, sett nedenfra og på siden, da montert på vektørøret. Vanligvis vil en stabilisator ha noen flere utfresninger (6 – 8 stykker).

Noen få av vektørørene er påsatt en stabilisator, minst tre steder langs seksjonen med vektørør. Stabilisatorene er ringer av stål med ytre diameter lik, eller nesten lik borehulsdiameteren.

Disse holder vektørerne sentrert i borehullet slik at det ikke slenger rundt under boring. Plasseringen av disse er viktig for styring av borekrona, dette blir kort diskutert under seksjon om hullbaner. Stabilisatorene har utfreste spor som lar slamstrømmen oppover i annulus slippe gjennom. Disse sporene går gjerne på skrå i forhold til lengdeaksen til borestrengen, se Fig. 10.

### Borestreng – styrkeberegning (pensum)

Rett før boring begynner henger hele borestrengen fra toppen, i top drive (som igjen henger i heisespillet (løpeblokka)). Den største belastningen er derfor i toppen av borestrengen, da det øverste borerøret bærer vekten av hele strengen. Nå henger praktisk talt hele strengen nedsenket i boreslam, og dette gir en oppdrift som reduserer belastningen noe. Strekkbelastning i toppen av strengen er vekten av hele strengen multiplisert med oppdriftsfaktoren  $k$ , som gir redusert belastning på grunn av oppdrift. For en vertikal brønn:

$$K = (m_s h_s + m_v h_v) g k \quad \text{hvor} \quad k = 1 - \rho_m / \rho_s$$

Hvor:  $m_s$  er masse av borerør per meter

$m_v$  er masse av vektør per meter

$h_s$  er total lengde av borerør

$h_v$  er total lengde av vektør, inkludert borekrone og utstyr

$g$  er tyngdens akselerasjon, i Nordsjøområdet lik  $9.81 \text{ m/s}^2$

$\rho_m$  er tettheten av boreslam

$\rho_s$  er tettheten av stål (strengmaterialet), standard verdi er  $7850 \text{ kg/m}^3$

Vekten av borerørene er gitt av ytre diameter og veggtykkelse, samt av type koblingsboks som de har. Som hovedklassifisering av borerør brukes ytre diameter i tommer, samt nominell vekt i pund per fot (lb/ft). Nominell vekt er her vekt av selve røret, uten koblingsbokser, med fast ståltetthet gis veggtykkelsen av vekten. For hver enkelt ytterdiameter har en fra to til tre forskjellige nominelle vekter, og dermed veggtykkelser. Den nominelle vekten skal ikke brukes i beregninger, for der er en interessert i total vekt av borestrengen, inkludert koblingene.

Nå er borerørene lagd i forskjellige stålkvaliteter, vanligst er klassifiseringene E, X95, G105 og S135. Tallet etter bokstaven angir minimum flytgrense for stålet i tusen psi (amerikansk trykkenhet og spenningsenhet,  $1 \text{ bar} = 14.5 \text{ psi}$ ). For kvalitet E er dette tallet 75. Omregnet til Europeiske enheter er da flytgrensene  $75000 \text{ psi} = 5170 \text{ bar} = 517 \text{ N/mm}^2$ ,  $95000 \text{ psi} = 6550 \text{ bar} = 655 \text{ N/mm}^2$ ,  $105000 \text{ psi} = 7240 \text{ bar} = 724 \text{ N/mm}^2$ , og  $135000 \text{ psi} = 9310 \text{ bar} = 931 \text{ N/mm}^2$ . Koblingsboksene er lagd i bare en stålkvalitet, med minimum flytgrense på  $120000 \text{ psi} = 8280 \text{ bar} = 828 \text{ N/mm}^2$ . Dette betyr at hvis stålkvaliteten økes i en bestemt borerør dimensjon (diameter og veggtykkelse er de samme), må koblingsboksene lages kraftigere og dermed tyngre for å få samme styrkeforhold mellom rør og kobling. I tillegg finnes 2 til 4 forskjellige koblingstyper (med forskjellig vekt) for hver rørttype.

For vektberegninger brukes tabeller (for eksempel Drilling Data Handbook) hvor en for alle kombinasjoner av ytterdiameter, nominell vekt, stålkvalitet og koblingstype finner gjennomsnittlig masse per meter (eller pund per fot). Av disse tabellene finner en også hvor mye borerøret tåler av strekk, vridning, indre overtrykk (sprengningstrykk) og ytre overtrykk (kollapstrykk).

I tillegg klassifiseres også borerørene etter grad av slitasje. Nye eller lite brukte borerør er i klasse 1, noe slitt er klasse premium, og mer slitt er klasse 2. Tabellene nevnt ovenfor tar hensyn til slitasjegraden når styrke finnes, mens vekten regnes uavhengig av slitasje. Det er også egne tabeller for hvor stort tiltrekningsmoment og dermed vridning alle de forskjellige koblingene tåler, dette reduseres med slitasjen. Som nevnt tidligere er det bare for vridning at koblingene er svakere enn selve borerøret. Det er derfor ikke tabeller for hva koblingene tåler av strekk og trykk, da selve røret her alltid er det svakeste. Bruk av tabeller gjennomgås i hovedkurset i boring.

For standard styrkeberegning av borestreng regnes det bare på borerørene. Vektrørene er sterkere enn borerørene, dessuten er de i bunnen av strengen hvor belastningene er minst. Dette gjelder imidlertid bare statisk belastning. Ved boring får en vibrasjoner, og de er verst nederst i strengen. Brudd på strengen på grunn av vibrasjoner skjer ofte i vektørsseksjonen.

Vi ser på et tilfelle hvor en vertikal brønn er under boring med 8.5 ” borekrone, og har nådd en dybde på 2500 m under pumpedekket. Det brukes en borestreng på 4.5 ” (ytre diameter) og en nominell vekt på 16.60 lb/ft, stålqualität E, slitasjeklasse premium og koblingstype NC50(IF). Vektørsseksjonen er 150 m lang og består av 6.75 ” vektør med vekt på  $m_v = 151.2 \text{ kg/m}$ . Boreslammet har en tetthet på  $1100 \text{ kg/m}^3$ . Av tabell finner en da strekkstyrke  $K_Y = 1157 \text{ kN}$ , grense for sprengningstrykk  $P_Y = 620 \text{ bar}$ , og  $m_s = 26.77 \text{ kg/m}$ . Vektørsseksjonen har en lengde på  $h_v = 150 \text{ m}$ , dermed får borerørsseksjonen (som er resten av strengen) en lengde på  $h_s = 2500 \text{ m} - 150 \text{ m} = 2350 \text{ m}$ . Ligning ovenfor gir da aksielt strekk (kraft) på toppen:

$$K = (26.77 \text{ kg/m} * 2350 \text{ m} + 151.2 \text{ kg/m} * 150 \text{ m}) * 9.81 \text{ m/s}^2 * (1 - 1100/7850) = 721977 \text{ N}$$

Eller 721.977 kN. Vi ser at dette er mindre enn hva borerøret tåler i strekk, som er 1157 kN. For å vite om dette er sikkert nok krever en at sikkerhetsfaktoren skal være større enn en viss verdi, vanlig brukt er 1.5. Her får en, etter definisjon av sikkerhetsfaktor:

$$SF = K_Y / K = 1157 / 721.977 = 1.60 \quad \text{som indikerer at denne borestrengen er sterk nok}$$

Det en nå også kan beregne er maksimum trykkraft  $K_B$  en kan ha fra borekrona, mot formasjonen (WOB). Under boring hviler en del av vekten av vektrørene ned på borekrona, vanligvis begrenset til 2/3 av vektørsseksjonen:

$$K_B = (2/3) m_v h_v g = (2/3) * 151.2 \text{ kg/m} * 150 \text{ m} * 9.81 \text{ m/s}^2 * (1 - 1100/7850) = 127.542 \text{ kN}$$

Videre standard beregninger er å finne maksimum trykk slampumpa må levere, dermed kan en vurdere om borestrengen tåler dette trykket, samt å bestemme størrelsen på dysene som skal brukes i borekrona. Disse beregningene vises for dette eksemplet i seksjonen om trykk i borestrengen.

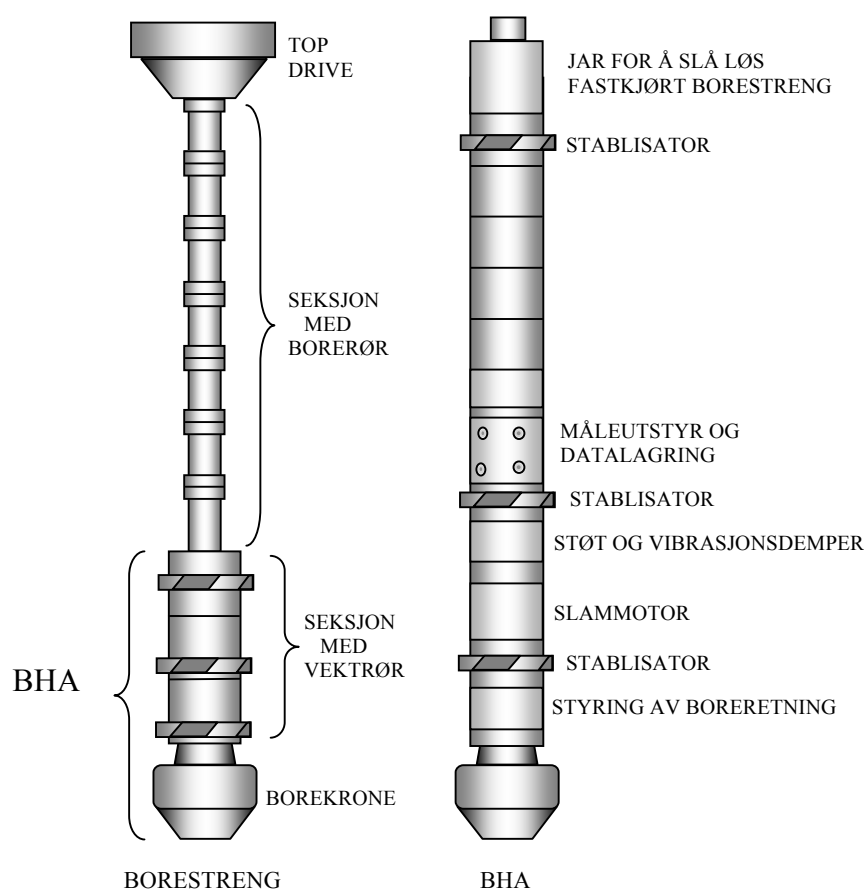
### **Borestreng – utstyr i strengen**

Praktisk talt alt utstyr som er plassert i borestrengen står i seksjonen med vektør, av følgende grunner:

- For måleutstyr er en mest interessert i å måle nede ved borekrona, i den delen av brønnen som nettopp er boret ut.

- Hjelpeutstyr opererer stort sett i forbindelse med borekrona og må være nær den.
- Alt utstyr er plassert i rør som må ha en viss veggtykkelse for å bli sterke nok til å tåle belastningene som borestrengen blir utsatt for. Samtidig må de ha en kanal for å føre slammet som pumpes ned videre nedover, og de må ikke ha særlig større ytre diameter enn vekttrørene. Å pakke utstyret så godt at ytre diameter er mer lik borerørene er nærmest umulig. Utstyr i strengen passer derfor bedre sammen med vekttrørene.

Utstyr i strengen er som nevnt plassert i rør med omtrent eller helst lik diameter til vekttrørene. I endene har de samme type gjenger som vekttrørene slik at de kan skrues rett inn i strengen med vekttrør. Den nederste delen av borestrengen, vekttrørene, borekrona og utstyrsenheter, kalles for "Bottom Hole Assembly", forkortet til BHA.



Figur 11 Prinsippskisse av borestrengen med BHA vist spesielt. Mulig plassering av utstyr i BHA er vist skjematisk. Alle enheter (bortsett fra borekrona) er vist sterkt komprimert i lengderetningen.

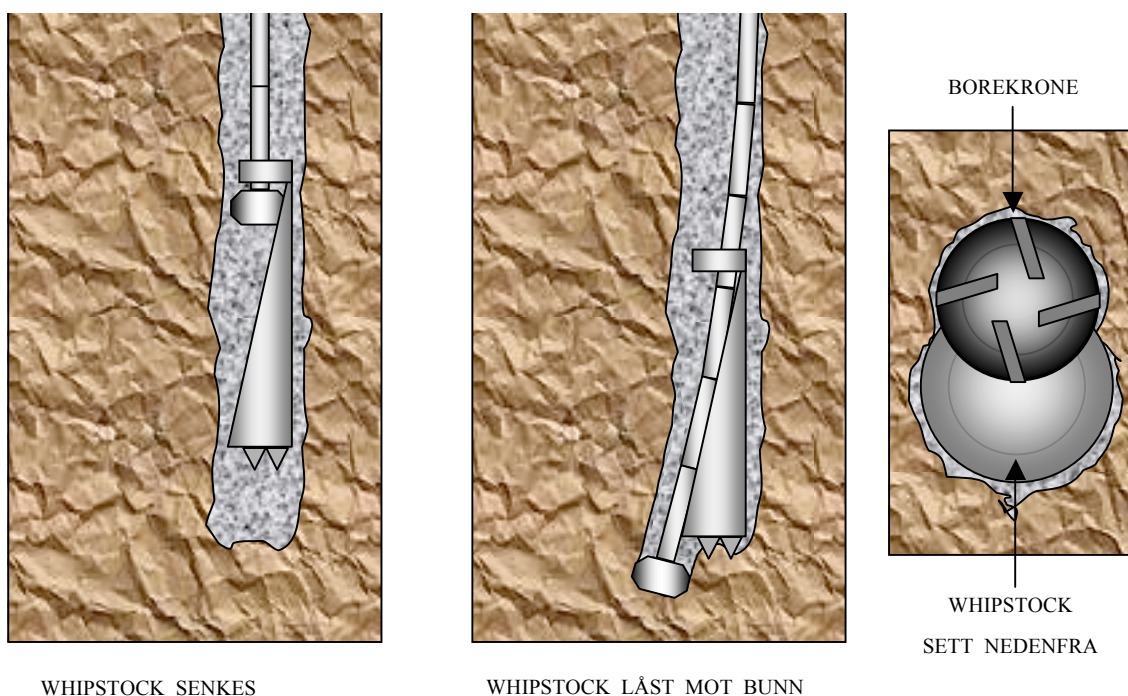
Utstyr i strengen kan deles i fem grupper:

- 1 Utstyr for styring av borekrona, spesielt viktig ved boring av horisontale brønner med horisontal del i reservoaret. Da kreves presis plassering av brønnen.
- 2 Nedihulls motor og kraftoverføring for rotasjon av borekrona, samt eventuelt motorer for drift av energikrevende utstyr. Motor er som oftest en slammotor, en lang stang formet som en korktrekker som tvinges til å rotere for at slamstrømmen skal passere den på vei ned. Rotasjonshastigheten blir passe for

diamantborekroner i den enkleste utformingen, 5 – 7 omdreininger i sekundet. Slamturbin kan også brukes, men den har mye større rotasjonshastighet og må gires ned. Den passer imidlertid bedre for kraftgenerering (strøm) til instrumenter.

- 3 Måleutstyr for registrering av trykk og temperatur i brønnen, orientering av borestrengen, vibrasjoner i borestrengen, samt måling av fluid og bergartsegenskaper i og omkring brønnen (MWD = Measurement While Drilling).
- 4 Kommunikasjonsutstyr for å komprimere og velge ut data, kode og sende data opp til overflaten, samt ta imot data fra overflaten. Data sendes binært ved hjelp av slampulser som blir generert ved å lukke for slamstrømmen et kort øyeblikk. Dataraten blir lav, omtrent 10 bit i sekundet (1.2 byte i sekundet).
- 5 Hjelpetstyr for å redusere belastning på borestrengen (støtdemper, bumper sub), samt utstyr for å slå løs strengen hvis den setter seg fast (jar).

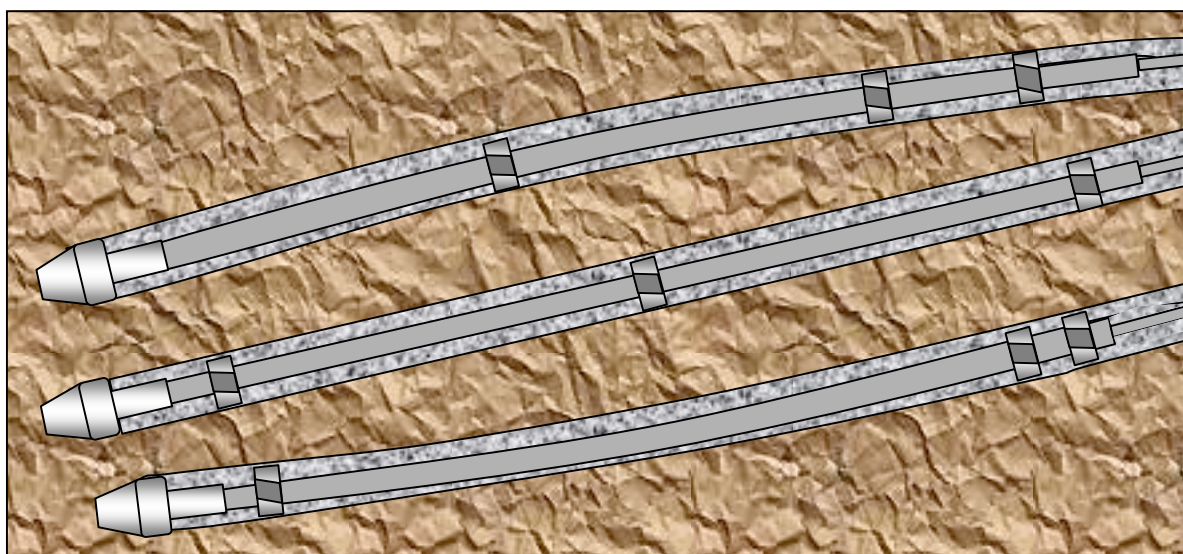
Nærmere beskrivelse av dette utstyret blir gitt i hovedkurset i boring. Her skal vi bare se nærmere på hvordan boreretningen styres. Den eldste metoden krevde ikke noe spesielt utstyr montert i strengen. For å starte et avvik i en horisontal brønn (som alle brønner er i starten) trakk man opp strengen og satte på strengen en stålkile (whipstock) som tvang boret ut til siden når den stoppet mot og låste seg mot bunnen av hullet under tripping ned. Se Fig. 12. En må passe på at whipstock står orientert i riktig retning. Når whipstock landet i bunnen kan det være nødvendig å senke ned måleutstyr (inni borestrengen) for å sjekke retning (se seksjon om måling i brønn). Står whipstock feil må en heve den litt og rotere strengen til orientering er riktig.



Figur 12 Whipstock settes, hengende på borestrengen, ned på bunnen av brønnen. Boring startes, og borekrona tvinges ut til siden. Foringa rundt borestrengen som whipstock henger i kan lages så den løsner når boring starter. Whipstock blir da stående igjen i hullet når borestrengen trekkes. Hvis ikke blir whipstock med opp og kan brukes på ny. Merk at skråflata som borekrona glir mot er buet, formet etter borekronedimensjonen.

Under videre boring økte eller reduserte man avviket ved plassering av stablisatorene, som vist i Fig. 13, eventuelt holdt det konstant. Denne metoden forutsetter at man allerede har et visst avvik, i en vertikal brønn vil borestrengen henge rett ned uansett plassering av stablisatorene. En må derfor alltid starte et avvik fra en vertikal brønn med whipstock.

Problemet var at boret trakk ut mot ene siden under slik avviksboring, og dette hadde man ingen kontroll over. For å rette opp hullbanen sideveis, eventuelt lage ønsket avvik, måtte en sette en whipstock på nytt. For hver gang ny whipstock ble satt, eller stablisatorplassering skulle forandres, måtte en trippe opp (og ned igjen). Samme whipstock kan brukes flere ganger. Selv om den trekkes vil forandring i hullbane være etablert. Etter fjerning av whipstock vil borekrona muligens stoppe mot bunnen av første hull, men starter en boring hvis det skjer vil den arbeide seg inn i den nye hullbanen.

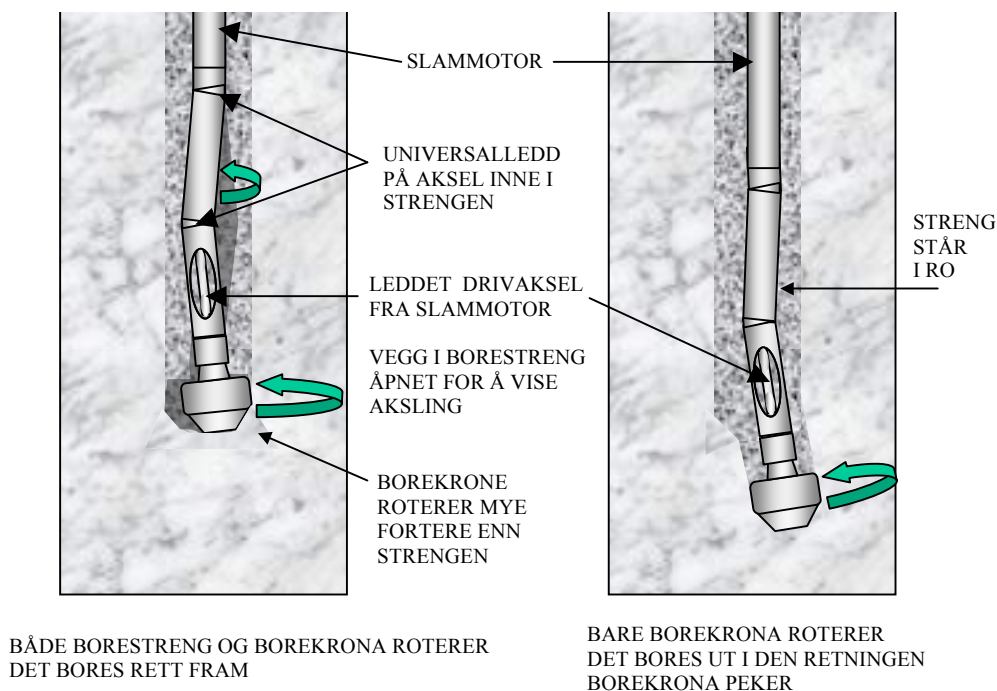


Figur 13 Seksjonen med vektrør er så lang og tung at den vil bøye seg litt hvis det er langt mellom stablisatorene. Dette kan utnyttes til å redusere eller øke avviksvinkelen under boring. Når første stablisator er plassert langt fra borekrona vil den henge litt ned og redusere avviksvinkel. Når andre stablisator er plassert langt bak vil vektrørene henge ned mellom første og andre stablisator og dermed vippe borekrona opp. Avviksvinkel øker.

Noen ganger må avvik startes i en brønnseksjon hvor en allerede har satt foringsrør. Det er mest tilfelle hvor avviket ikke er planlagt, men må gjøres fordi utstyr har satt seg fast i bunnen av hullet og er umulig å få opp (eller det tar for lang tid). En setter da gjerne en sementplugg over utstyret som står igjen i brønnen før whipstock settes. I stedet for borekrona er det nå montert en metallfres på enden av strengen som kan arbeide seg gjennom stålet i foringsrøret. Etter at full åpning er etablert trekkes strengen og boring fortsetter med vanlig borekrona. I dette tilfellet må whipstock bli stående.

Med slammotor nede i strengen ble bedre styring mulig. Nederste del av BHA er svakt bøyd som vist i Fig. 14 slik at borekrona står i en liten vinkel i forhold til borestrengen (ca. 3 grader). Når borestrengen roteres fra toppen bores det rett fram. Men når det ikke roteres fra toppen borer borekrona ut i den retningen den da står. Merk at i begge tilfeller brukes

slammotoren, den roterer betydelig raskere enn raten borestrengen roteres med når en borer rett fram.



Figur 14 Borestreng med bøy og bruk av slammotor gjør det mulig å styre boreretning. Når borestrengen roteres slenger bøyen og borekrona rundt som vist med skyggen i første figur, resultatet er boring rett fram. Når borestrengen ikke dreies og bare borekrona roterer borer den ut i den retningen bøyen peker.

Ved bruk av dette styringsutstyret er det vanlig å ha montert instrumenter i strengen (BHA) med kommunikasjon til overflaten med slampulser. Retningen bøyen i strengen står i kan da avleses på overflaten, og strengen kan roteres derfra til bøyen står i ønsket retning.

De fleste avviksbrønner og horisontale brønner i dag er boret med dette systemet. Ett av de største problemene med dette er at når strengen ikke roteres blir det mye større friksjon mellom streng og hullvegg i strengens lengderetning. Det blir da vanskelig å få nok trykkraft på borekrona mot formasjonen ved boring med store avvik fra vertikal retning.

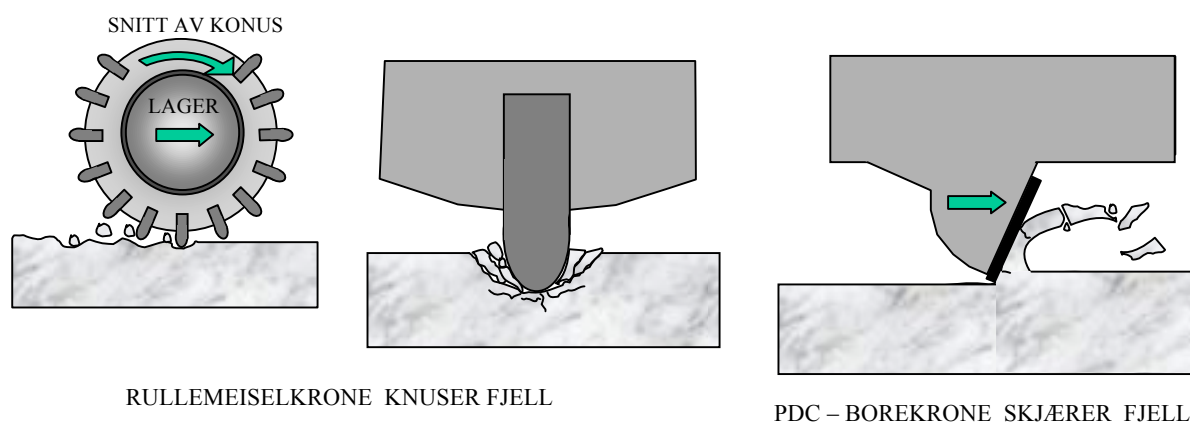
I det aller siste er det kommet en bedre metode. Strengen er rett og den roteres hele tiden for å få redusert friksjon framover i boreretningen. Rett bak borekrona sitter en enhet som i prinsippet ligner en stabilisator, men vingene (avstandsstykkene) kan hydraulisk skyves ut og inn. Borestrengen kan rotere fritt inne i denne enheten, men den vil allikevel rotere sakte idet den dras med rundt av friksjon i lagret mellom den og strengen. Måleinstrumenter holder hele tiden rede på posisjon av enheten og en datamaskin styrer vingene slik at de hele tiden presser borekrona mot den retningen brønnen skal bøye av. Her kan en også bestemme graden av avbøyning. Datamaskinen får instruksjoner fra overflaten via slampulser. Hvis en skal bore rett fram låses alle vingene i samme posisjon så borekrona blir sentrert i hullet, og styreenheten fungerer som en vanlig stabilisator.



## Borestreng - borekroner

Det er tre hovedtyper av borekroner, rullemeiselkrona, diamantkrona, og PDC – borekrone. De mest vanlig brukte i dag er rullemeiselkrona og PDC – krona. Den første brukes mest på de øverste brønnseksjonene med stor hulldiameter, den andre mest på de dypere delene av brønnen. To forkortninger brukes svært ofte i forbindelse med boring. Det er vekten på borekrona eller mer korrekt kraften den presser mot formasjonen med. Det forkortes til **WOB** (Weight On Bit). Den andre er borehastigheten, **ROP** (Rate Of Penetration).

Rullemeiselkrona har tre koniske ruller (konuser) opplagret på yttersiden. Når krona roteres ruller konusene passivt mot bunnen av hullet. Disse konusene har tenner, enten i stål (for myke formasjoner) eller i hardmetall, vanligvis wolframkarbid (for harde formasjoner). Resten av krona er i stål. Tenner av hardmetall er presset inn i hull i konusene. Vekten på krona (**WOB**, fra vektrørene) trykker tennene så hardt mot formasjonen at den knuses, hver tann lager et lite krater. Tennene er plassert ulikt på de tre konusene, slik at de til sammen dekker hele bunnen av hullet ganske jevnt med krater.



Figur 15 Boremekanismer for de to mest vanlige borekronetyperne, rullemeiselkrona med tre koniske ruller (bare en er vist), her med innpressede hardmetalltenner, og PDC – borekrone med skjær av polykrystallinsk diamant (helt svart på figuren). Som oftest er diamantskjæret formet som en rund skive, her sett rett fra siden.

Mellom konusene, på yttersiden av borekrona er det dyser, tre stykker da det er tre mellomrom. Alt slammet som pumpes ned strømmer ut av disse med høy hastighet (70 – 150 m/s eller 250 – 540 km/t). Dette gir et kraftig trykkfall over dysene, slik at omtrent halvparten av trykket slampumpa leverer går med til dette. Resten brukes på friksjons-trykkfallet ned inne i borestrengen og opp annulus på utsiden, samt til å drive en eventuell slammotor. Dysene skal spyle unna utboret stein (borekaks) og holde hullbunnen fri for dette slik at borekrona ikke arbeider mot allerede utboret stein. For lite trykk over dysene og dermed for liten spylehastighet gir fort en betydelig reduisering av borehastigheten (**ROP**).

De svakeste punktene er tennene som slites ned, og lagrene til konusene som blir utsatt for svært høy belastning, noe som kan gjøre at konusene låser seg eller i verste fall kan føre til at de faller av. Slitasje av tennene merkes som redusert **ROP**. Dette kan for en periode delvis kompenseres ved å øke **WOB**, men det utsetter lagrene for ennå større belastning. Slitasje av ståltenner kan bli redusert ved å sveise på dem et hardmetallbelegg.

PDC borekroner har ingen bevegelige deler, de er derfor svært fleksible når det gjelder form. De er lagd av hardmetall med skjær av polykrystallinsk diamant, som tåler omtrent 200 ganger så mye slitasje som wolframkarbid. Skjærene ligger hele tiden mot formasjonen og skjærer av steinspon når borekrona roterer. Her er det også nødvendig med dyser som spylar unna utboret materiale. Antall dyser er her ikke bestemt av geometrien, det er ofte 5 – 6 dyser da det fordeler slamstrålene bedre. Her er det spesielt viktig med avkjøling av skjærene da de arbeider hele tiden og fort blir varme uten slam som spylar rundt dem. Den kunstige diamanten tåler opp til 700°C før den sprenges av indre spenninger.

Polykrystallinsk diamant består av sandkornstore (fin sand) diamanter som er vokst sammen. Den er derfor porøs som sandstein, men med porene fylt av vekststoffet den er grodd i. Dette har høyere termisk utvidelse enn diamant, og sprenger diamantkornene fra hverandre når temperaturen når omtrent 700°C. På spesielt utsatte steder hvor det er dårlig kjøling, som på siden av borekrona, brukes ofte termisk stabilisert polykrystallinsk diamant. Denne er av samme type, men med vekststoffet i porene etset vekk (en uke i kongevann ved kritisk trykk og temperatur for kongevann). Disse kan varmes opp til øvre temperatur for diamant (også naturlig diamant) som er 1200°C. Diamanten rekrystalliserer da til grafitt, som er den stabile krystallformen for karbon ved lave trykk (mindre enn ca. 30 000 bar).

Diamantborekrona (ikke PDC – borekrone) ble og blir ennå brukt til å bore i harde formasjoner. Den har heller ingen bevegelige deler, og er lagd i hardmetall med innstøpte, naturlige industridiamanter på 1 – 3 karat. Disse stikker litt ut og fjerner steinmateriale ved å skrape mot formasjonen. (Industridiamanter har så mye forurensninger at de ikke er klare og gjennomskjennelige, og derfor ubrukelige til smykker. En god del av diamantene som finnes i diamantgruver kan være industridiamanter).

### **Borestreng – trykk i borestrengen**

Trykk i og utenfor borestrengen blir under vanlig boring bestemt av statisk trykk i boreslammet, av friksjonstrykkfall og av trykkfall over dysene i borekrona (dynamisk trykkfall).

- Statisk trykk  $P$  skyldes vekten av fluid i brønnen og er gitt av  $P = \rho g h$ , hvor  $\rho$  er tetthet av fluidet, vanligvis boreslam,  $g$  er tyngdens akselerasjon  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  i Nordsjøområdet, og  $h$  er vertikal dybde, fra toppen av fluidet og ned til det stedet hvor trykket måles. Merk at fluid er fellesnavn på gass og væske, egentlig et engelsk ord, men vi bruker det her i mangel av et norsk ord for dette. Det statiske trykket er alltid til stedet og forandrer seg ikke på grunn av pumping.
- Friksjonstrykkfall  $\Delta P_F$  er trykkfall i fluid når det strømmer. Dette trykkfallet er alltid langs strømningsretningen, og er uavhengig av rørets retning (horisontalt eller vertikalt). Dette kan til en viss grad beregnes eller finnes av tabeller. Det er avhengig av geometrien til systemet det strømmer i, av volumstrømmen, og av viskositet og tetthet av fluidet selv. Det kan også være avhengig av type fluid, om det er Newtonsk eller ikke-Newtonsk væske, men dette ligger i viskositeten hvis den gis som funksjon av skjærhastigheten. Geometrien til systemet er her alltid et rør, eller et ringrom (annulus).

- Dysetrykkfallet  $\Delta P_D$  er trykkfall over dysene. Dette skyldes hovedsakelig hydraulisk energi som går med til å øke hastigheten av boreslammet, fra noen meter i sekundet til ofte over hundre meter i sekundet gjennom dysene. Friksjon i dysene bidrar med et trykkfall som er omtrent 10% av det rene dynamiske trykkfallet. Vanlig formel for dysetrykkfall (dyseformelen), med friksjon i dysene inkludert, er:

$$\Delta P_D = 0.5v^2/C_D^2 \quad \text{Alternativ form:} \quad v = C_D (2 \Delta P_D/\rho)^{0.5}$$

hvor  $v$  er hastigheten av slam ut fra dysene, og  $C_D = 0.95$  er dysefaktoren, som gir effekten av friksjon (0.95 er standard verdi, kan variere litt). Siden alt slam må gå gjennom dysene, er slamhastigheten  $v$  i dysene gitt av  $v = Q/A_D$ , hvor  $Q$  er volumstrøm av slam, og  $A_D$  er samlet tverrsnittsareal av alle dyseåpningene.

Alternativ form av formel gir dysehastighet  $v$  for et ønsket dysetrykkfall  $\Delta P_D$ . For en gitt volumrate slam  $Q$  finner en da samlet dyseåpningsareal av  $A_D = Q/v$ . Dette gir størrelsen av dysene i borekrona. Selve dysene er utvendig gjengede pluggen som kan skrues inn i gjengede hull i borekrona. I midten av dysepluggen er det boret et hull som da er dyseåpningen. Disse finnes med forskjellige hulldiametre, slik at i borekrona kan en skru inn de dysene som passer best.

Det viser seg at størst mulig del av hydraulisk energi – hydraulisk kraft i boreslammet blir fokusert i dysene hvis dysetrykkfallet er omtrent lik totalt friksjonstrykkfall. Dette er ofte ønskelig, da det gir best mulig spyling og rensing av brønnbunnen for borekaks.

Trykk i brønnen er statisk trykk i boreslam når det ikke pumpes. Både inne i borestrengen og utenfor, i annulus mellom borestreng og brønnvegg, er da trykket gitt av formel for statisk trykk. Overflaten av slam står da like høyt inne i og utenfor borestrengen. Nivået er bestemt av toppen av annulus, hvor slam kan renne ned til slamrenseutstyret, se Fig. 5. Ved pumping (sirkulering av boreslam) blir det i tillegg friksjonstrykkfall og dysetrykkfall. Disse trykkene må leveres av slampumpa, som må ha et utgangstrykk lik summen av disse trykkfallene. Merk at statisk trykk ikke forandrer seg og betyr dermed ikke noe for pumpetrykket. I neste seksjon er det som eksempel gitt en full standard beregning av krefter og trykk i brønnen.

### Borestreng – eksempel på hydraulisk beregning

Vi ser videre på eksemplet under styrkeberegninger på side 19, hvor en vertikal brønn er under boring med 8.5 ” borekrona, og har nådd en dybde på 2500 m under pumpedekket. I tillegg til andre gitte opplysninger trenger vi nå flere opplysninger om boreslammet. Det har en tetthet på  $1100 \text{ kg/m}^3$  og en viskositet på 25 cP, noe som gir en B-faktor på  $1.1^{0.8} 25^{0.2} = 2.05448$ . Ønsket volumstrøm på 2600 liter/min. er delvis bestemt ut fra erfaring, blant annet om hva som trengs for å spyle brønnbunnen godt nok til ikke å redusere borehastigheten, og at den skal være betydelig høyere enn det som trengs for å transportere opp borekaks.

Med disse dataene finner en nå fra tabeller (Drilling Data Handbook) at inne i borerørene er indre koblingsdiameter  $95.3 \text{ mm} = 3.75''$ , som gir  $N_2 = 250 \text{ kPa}/100\text{m}$ . Friksjonstrykkfallet er  $\Delta P_F/\Delta L = 2.05448 * 2500 \text{ Pa/m} = 0.05136 \text{ bar/m}$ . For vektørørene, som etter tabell har en indre diameter på 2.75 ”, får en  $\Delta P_F/\Delta L = 2.05448 * 12110 \text{ Pa/m} = 0.2488 \text{ bar/m}$  ( $N_3 = 1211$ ). Dette gir friksjonstrykkfall fra toppen av borestrengen og ned til inne i borekrona:

$$\Delta P_F = 0.05136 \text{ bar/m} * 2350 \text{ m} + 0.2488 \text{ bar/m} * 150 \text{ m} = 120.7 \text{ bar} + 37.3 \text{ bar} = 158 \text{ bar}$$

I tillegg kommer et friksjonstrykkfall på 3 – 5 bar fra slampumpa og opp til toppen av borestrengen, samt ca. 14 bar fra utsiden av borekrona og opp annulus (funnet fra formel). Totalt friksjonstrykkfall er da  $\Delta P_{FT} = 4 \text{ bar} + 158 \text{ bar} + 14 \text{ bar} = 176 \text{ bar}$ .

For å optimalisere spyling av brønnbunnen under boring ønsker vi et dysetrykk lik totalt friksjonstrykkfall,  $\Delta P_D = \Delta P_{FT} = 176 \text{ bar}$ . Dette gir etter alternativ dyseformel en hastighet på slamstråle fra dysene på:

$$v = 0.95 * (2 * 17600000 \text{ Pa} / 1100 \text{ kg/m}^3)^{0.5} = 178.9 \text{ m/s}$$

Det samlede dysearealet blir da:  $A_D = Q/v = (2600/60000) \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} / 178.9 \text{ m/s} = 242.2 \text{ mm}^2$   
Med tre dyser blir diameteren på dyseåpningen  $d = ((4/\pi)(A_D/3))^{0.5} = 10.1 \text{ mm}$ . (Denne formelen får vi ved å løse formel for tverrsnittsareal for en dyse,  $A_D/3 = (\pi/4)d^2$ , med hensyn på d). Vi må altså velge dyser med diameter så nær dette som mulig. Dysene kommer med et utvalg av standard hull, i trinn på 1/32 tomme. Den nærmeste er 13/32 tomme = 10.32 mm.

Hvis vi nå vil vite nøyaktig dysetrykkfall må vi regne andre veien, og får da et samlet dyseareal på 250.9 mm, som gir en dyse slamhastighet på 172.7 m/s, som innsatt i første dyseformel gir et dysetrykk på  $\Delta P_D = 165.2 \text{ bar}$ . Nødvendig slampumpetrykk blir da  $P_p = \Delta P_D + \Delta P_{FT} = 165 \text{ bar} + 176 \text{ bar} = 341 \text{ bar}$ .

Nå ble slampumpetrykket ganske høyt, vi må i alle fall ha en slampumpe som er betydelig kraftigere enn den vi regnet på tidligere, og som klarte maks 265 bar. Nå er ikke det umulig, med lik konstruksjon (5.5" foring og effektivitet 0.6), må en øke motoreffekten fra 1000 kW til i hvert fall  $(341/265) * 1000 \text{ kW} = 1287 \text{ kW}$ . Det finnes mange standard slampumper med større effekt enn 1000 kW og maks trykk helt opp til 385 bar for 5.5" foring. Maks volumstrøm levert er da rundt 1800 l/min, slik at en her måtte ha to slike pumper i parallell, noe som er vanlig.

Som et resultat av disse beregningene ser vi også at borestrengen må tåle et sprengningstrykk minst lik slampumpetrykket på 341 bar (egentlig 4 bar mindre, da vi har regnet med et friksjonstrykkfall på 4 bar fra slampumpa og opp til toppen av borestrengen). Men her også bør vi ha en sikkerhetsfaktor på minst 1.5 (vanlig verdi), slik at borestrengen må tåle minst  $1.5 * 341 \text{ bar} = 512 \text{ bar}$ . I seksjon om styrkeberegning ble det funnet at borerørene tålte opp til 620 bar, som gir en sikkerhetsfaktor mot sprengning på  $620/341 = 1.82$ .

Til slutt beregnes de trykkene vi har i brønnen på fire steder, både uten og med pumping. Merk at på toppen av annulus, hvor slam kommer opp, er trykket alltid null (i industrien måles trykk vanligvis i forhold til atmosfæretrykk). Uten pumping:

- Bunnen av brønnen, utenfor borekrona:  $P_w = \rho_m g h = 1100 * 9.81 * 2500 \text{ Pa} = 269.775 \text{ bar}$
- Inne i borekrona. Det er nå ikke noe trykkfall over dysene:  $P_B = P_w = 269.775 \text{ bar}$
- Inne i borestreng, ved topp BHA:  $P_V = \rho_m g h_s = 1100 * 9.81 * 2350 \text{ Pa} = 253.589 \text{ bar}$
- Topp av borestreng:  $P_S = 0$

For pumping:

- Friksjonstrykkfall fra pumpe til topp av borestreng:  $\Delta P_{FP} = 4 \text{ bar}$
- Friksjonstrykkfall fra topp av borestreng til BHA:  $\Delta P_{FS} = 120.7 \text{ bar}$
- Friksjonstrykkfall fra BHA til inni borekrona:  $\Delta P_{FV} = 37.3 \text{ bar}$
- Dysetrykkfall inni borekrona til utafor:  $\Delta P_D = 165.2 \text{ bar}$
- Friksjonstrykkfall fra utafor borekrona til topp annulus:  $\Delta P_{FA} = 14.4 \text{ bar}$

Nå regner vi ”baklengs”, idet trykket på toppen av annulus fremdeles er null.

- Trykk i bunnen av brønnen, utafør borekrona:  $P_w^* = P_w + \Delta P_{FA} = 269.8 + 14.4 = 284.2$  bar
- Trykk inni borekrona:  $P_B^* = P_w^* + \Delta P_D = 284.2 + 165.2 = 449.4$  bar
- Trykk inni borestreng, ved topp BHA:  $P_V^* = P_V + \Delta P_{FA} + \Delta P_D + \Delta P_{Fy} =$   
 $253.6 + 14.4 + 165.2 + 37.3 = 470.5$  bar
- Trykk inni borestreng, ved toppen:  $P_S^* = P_S + \Delta P_{FA} + \Delta P_D + \Delta P_{Fy} + \Delta P_{Fs} =$   
 $0 + 14.4 + 165.2 + 37.3 + 120.7 = 337.6$  bar
- Utgangstrykk på slampumpe:  $P_P^* = P_S^* + \Delta P_{FP} = 337.6 + 4 = 341.6$  bar

Merk at her har vi for hvert trinn bakover i systemet enten bare addert friksjonstrykkfallet til forrige verdi hvis det ikke er noe forskjell i statisk trykk (fra utafør til inni borekrona og fra topp borestreng til slampumpe), eller vi har brukt statisk trykk og addert alle friksjonstrykkfall (inkludert dysetrykkfallet) derfra og til topp annulus. Det er det siste som er hovedregelen, og ville gitt samme verdi der vi brukte første regel, sjekk selv.

Nå har vi åpenbart gjort en feil, idet vi har regnet topp borestreng til å være på samme høyde som brønnhodet, der slam renner ut. Dette er vanlig! For trykk uten pumping blir dette helt riktig, idet slamnivå i borestreng da synker til det står likt med slamnivå i annulus. Med pumping blir det ingen statisk trykkforskjell mellom utgang pumpe og inne i borestreng på høyde med topp annulus idet de er på samme nivå. Men toppen av borestrengen er over boredekket, og er 10 til 40 m over slampumpenivået, det betyr at boreslam strømmer gjennom en lengre borestreng enn vi har regnet med, og friksjonstrykkfallet blir større. La oss anta at topp borestreng er 40 m over pumpedekk. Da friksjonstrykkfall er proporsjonalt med lengden har vi et korrekt friksjonstrykkfall i borestrengen på  $120.7 \text{ bar} \cdot (2350 + 40)/2350 = 122.8$  bar, altså 2.1 bar mer enn vi har regnet med. Dermed blir pumpetrykket egentlig  $341.6 + 2.1 = 343.7$  bar. Trykket i toppen av borestrengen blir også høyere på grunn av friksjon, men lavere på grunn av mindre statisk trykk, det gir:  $337.6 + 2.1 - \rho_m g h^* = 339.7 - 1100 \cdot 9.81 \cdot 40 \text{ Pa} = 339.7 - 4.3 = 335.4$  bar altså lavere enn på høyde med topp annulus. Største sprengningstrykk i borestrengen er derfor fremdeles 337.6 bar, det ble helt riktig.

En kan også bemerke at friksjonstrykkfall i annulus ikke er beregnet helt korrekt, da vi har regnet med bare borerør helt ned. Annulus rundt BHA er trangere så vi får større trykkfall der. Til gjengjeld er det sikkert foringsrør lengre opp, og de har noe større indre diameter enn borekrona på 8.5”, så trykkfallet er lavere der. Dette kan beregnes nøyaktig, men gir små korreksjoner.

Til slutt anslår vi sprengningstrykket nederst i borerørsseksjonen, mest for å konstatere at det er mindre enn på toppen. Vi fant et trykk inni på 470.5 bar ved strømning. Utenfor har vi ingen verdi, men det er større enn det statiske trykket som er lik statisk trykk inni på samme nivå. Det er 253.6 bar. Sprengningstrykket er forskjellen på innvendig og utvendig trykk og blir da mindre enn  $470.5 - 253.6 = 216.9$  bar. Dette er adskillig mindre enn trykket på toppen, 337.6 bar. Merk at på toppen er det luft rundt borestrengen, med trykk (i forhold til atmosfæretrykk) på null. Sprengningstrykk er derfor lik trykk inni strengen der.