



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Informasjonsteknologi - Kybernetikk	Vårsemesteret, 2010 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Daniel Wergeland (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Thor Ole Gulsrud Veileder: Tormod Drengstig	
Tittel på masteroppgaven: Modellering av dynamisk dreiemoment i forbindelse med oljeboring. Engelsk tittel: Modeling dynamic torque when drilling an oil well.	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Boreprosess, brønnboring, oljeboring, rotasjonsrate, dreiemoment, brønnfriksjon, viskositet, torque and drag, ROB,	Sidetall: 101 + vedlegg/annet: 34 Stavanger, 08.juni 2010 dato/år

Forord

Dette er sluttrapporten for hovedprosjektet til Daniel Wergeland. Hovedprosjektet har gått ut på modellere dynamisk dreiemoment i forbindelse med oljeboring. Prosjektet ble gjennomført våren 2010 hos SINTEF, Petroleumsforskning avd. Stavanger, i samarbeid med Universitetet i Stavanger, institutt for data- og elektronikk.

Prosjektet er en del av et IO-prosjekt for oljeindustrien. IO står for integrerte operasjoner og har et IO-senter med flere forskningsprogram knyttet til petroleumsforskning. Dette prosjektet inngår som et ledd i det 1. programmet som omhandler boring og brønnteknologi.

Hovedprosjektet teller 30 studiepoeng i det siste semester av sivilingeniørstudiet- informasjonsteknologi, med spesialisering i kybernetikk. Hovedprosjektet gir studenter mulighet til å bruke kunnskap som har blitt tilegnet gjennom studiet.

Arbeidet med prosjektet har vært lærerikt, interessant og utfordrende. Valget av oppgaven ble gjort ut i fra interesse. Samarbeidet mellom oppdragsgiver og student har vært tett, og oppdragsgiver har vist stor tillit.

Takk til Tormod Drengstig for god veiledning. Takk til Roald Kluge for konstruktiv kritikk, rettleiding og utfordringer underveis i prosjektperioden. Takk til Thomas Kjosmoen for opplyftende komiske kommentarer og høy kunnskapsdeling. Takk til Vahid, Kariann, Kristian, Inge, Hans Martin, Espen, Svein og ellers alle som jobber på SINTEF i Stavanger for snuslige kaffepauser med uformelle samtaleemner. Takk til George Hasley for rettleiding og kunnskapsdeling i forhold til boreprosessen. En stor takk til Thor Ole Gulsrud for mulighet til å gjennomføre prosjektet.

Sammendrag

Dette prosjektet er et samarbeid mellom Universitetet i Stavanger og SINTEF Stavanger. Prosjektet har gått ut på å modellere et uttrykk for avhengigheten mellom rotasjonsrate og dreiemoment under boring, også kalt dynamisk dreiemoment. Oppgavene i dette prosjektet har vært tredelt. Det har bestått i å gjøre teoristudie for å forstå de vitenskaplige beregningene, modellere parameterestimater fra datasett og modellere et teoretisk uttrykk for det dynamiske dreiemomentet.

Datasettene som er samlet til dette prosjektet er hentet fra SINTEF sine databaser. Disse filene er opprinnelig i .las-format slik at disse måtte lastes over til Excel-filer før de kunne brukes. Til sammen ble det samlet 33 Excel-filer som inneholder informasjon om rotasjonsraten, dreiemomentet og andre variabler som kan gi mer tilleggsinformasjon. Av disse var det kun 7 som ga datagrunnlag for modelleringsoppgaven.

For å kunne forstå hva som skjer under boreprosessen er det også gjort et litteraturstudie på boreprosessen. Dette litteraturstudiet har hovedsaklig basert seg på pensumsstoffet til faget *Boring* på Universitetet i Stavanger. Boreprosessen som er forklart i denne rapporten er derfor inspirert av faglærer og professor Erik Skaugens 'Kompendium i Boring'.

Resultatene i prosjektet indikerer at det er en lineær avhengighet mellom rotasjonsraten og dreiemomentet, og bekrefter at det er en viskøs friksjon knyttet til det dynamiske dreiemomentet ved boring.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Problemstilling	1
1.2	Hva som er gjort	1
2	Beskrivelse av boreprosessen	2
2.1	Plattformer	2
2.2	Utstyr på bore- og pumpedekk	4
2.2.1	Heisespill	4
2.2.2	Slamsystemet	6
2.2.3	<i>Blow Out Preventer</i> (BOP)	8
2.3	Borestreng	10
2.3.1	Borerør	10
2.3.2	Vektrør	11
2.3.3	Borekrone	12
2.3.4	<i>Bottom Hole Assembly</i> (BHA)	14
2.4	Sikring av brønn	16
2.5	Brønnboring	18
2.5.1	Vertikal boring	18
2.5.2	Retningsboring	19
2.6	Krefter og belastning på borestreng	22
3	Fysiske krefter	24

3.1	Generelle krefter for dreiemoment	24
3.2	Dempekonstant og friksjonskoeffisienter	26
3.2.1	Viskøs friksjon	26
3.2.2	Coulomb-friksjon	26
3.2.3	Statisk friksjon	27
3.2.4	Kinetisk friksjon	27
3.2.5	Rullefriksjon	28
3.2.6	Friksjonsvinkel	28
3.3	Friksjonselementer for dreiemoment	29
3.3.1	Boreslammets viskøse effekt	29
3.3.2	<i>Rotation off bottom</i> (ROB)	35
3.3.3	Bukling på borestreng	35
3.3.4	<i>Torque and Drag</i> -modellen	36
4	Forbehandling av datasett i Matlab	37
4.1	Beskrivelse av datasett	37
4.2	Utvikling av Matlab-kode	40
4.2.1	Laste inn data i Matlab	40
4.2.2	Fjerne NaN-verdier og uteliggere	42
4.2.3	Filtrering	47
4.2.4	Fjerne dynamikk	49
4.2.5	Representere data i Matlab	50
4.2.6	Lineær regresjonsmetode	52

4.2.7	Finne ROB	53
4.2.8	Borekronas dreiemomentetbidrag	55
4.2.9	Forutsetningsfunksjoner	61
5	Modellering	64
5.1	Introduksjon	64
5.2	Lineære regresjonsmetoder	66
5.2.1	Minste kvadraters metode	66
5.2.2	Minste kvadraters metode med avhengige variabler	67
5.2.3	Minste kvadraters metode med uavhengige inngangsvariabler	68
5.3	Alternative modellvarianter	69
5.3.1	Den første modellvarianten	69
5.3.2	Den andre modellvarianten	70
5.3.3	Den tredje modellvarianten	70
5.4	Teoretisk dreiemomentmodell	71
5.5	Parametrisk sammenheng	74
6	Resultat	79
6.1	Den første modellvarianten	79
6.2	Den andre modellvarianten	83
6.3	Den tredje modellvarianten	87
7	Analyse og diskusjon	92
8	Konklusjon og forslag til videre analyse	94

Referanser	95
Vedlegg	96
A Utledning av dreiemoment fra viskometer	96
B Utledning av dreiemomentkonstant	97
C <i>Djurhuus Torque and Drag</i> -modell	98
D Modellering i Matlab	100
D.1 Første modell	100
D.2 Andre modell	101
D.3 Tredje modell	102
E Matlabkode	105
E.1 Dreiemoment i Newtonsk væske	105
E.2 Dreiemomentmodell for en konsentrisk sylinder	105
E.3 Hovedkode	106
F Egenutviklede funksjoner i Matlab	116

1 Innledning

1.1 Problemstilling

Når man borer en brønn er det viktig å ha kontroll over dreiemomentet. Dreiemomentet er ofte en begrensende faktor for hvor dypt man kan bore. Forskere hos SINTEF har utviklet en avansert *torque and drag*-modell som er under kontinuerlig utvikling. Det mangler imidlertid et viktig element i denne og andre modeller av dreiemoment; nemlig avhengigheten mellom rotasjonsrate og dreiemoment, såkalt dynamisk dreiemoment.

Modeller over dreiemomentet antar vanligvis Coulomb friksjon mellom borestreng og brønnveggen, dermed burde ikke dreiemomentet være avhenging av rotasjonsraten. Likevel viser observasjoner at det er en sterk relasjon mellom disse to variablene.

Problemstillingen i dette prosjektet har vært å modellere det dynamiske dreiemomentet i forbindelse med oljeboring. Det har bestått i tre delmål: Å gjøre teoristudie for at leseren skal forstå de vitenskapelige beregningene som er gjort i prosjektet, modellere parameterestimat til datasett for dynamisk dreiemoment og modellere et generelt teoretisk uttrykk for det dynamiske dreiemomentet. For å kunne forstå hva som skjer under boreprosessen er det også gjort et litteraturstudie på boreprosessen.

1.2 Hva som er gjort

Mesteparten av teoristoffet til boreprosessen i denne rapporten er hentet fra [10, 11, 12]. Det som er hentet fra andre kilder er spesifisert i teksten. Rapporten er skrevet på norsk, derfor er engelske ord og uttrykk oversatt til norsk i den grad det finnes et godt norsk ord for det. Engelske ord og uttrykk som det ikke finnes norske ord for er satt i *kursiv*.

Programmet Matlab er brukt som matematisk verktøy for prosjektet.

Rapporten er skrevet i \LaTeX med standard font, "Knuth's Computer Modern", og tekststørrelse 11. Ved opplisting er hvert omtalt nøkkelord uthevet i **fet** skrift for å gjøre rapporten mer lettlest.

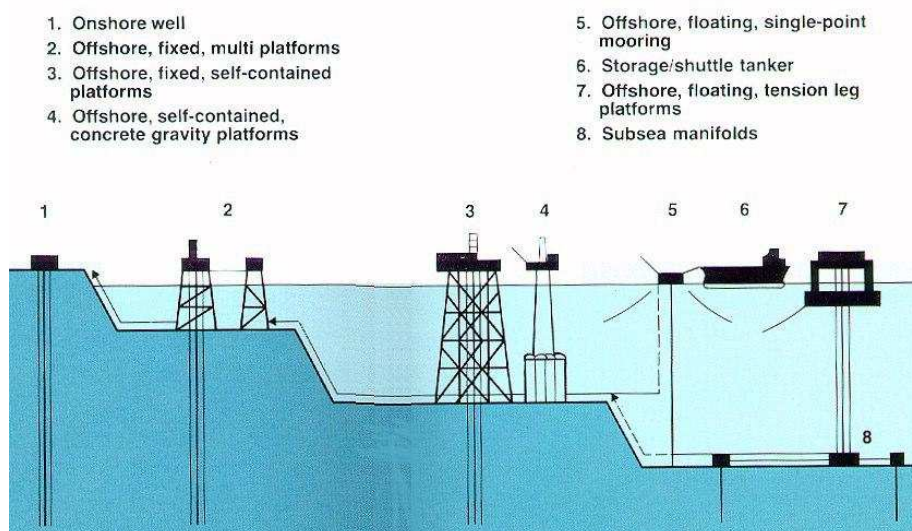
2 Beskrivelse av boreprosessen

Boreprosessen er en avansert operasjon som i sin helhet bør beskrives over mange kapitler. I denne rapporten beskrives de viktigste delene. Noen deler er ikke relevant for dette prosjektet, men er tatt med som orientering. For å beskrive boreprosessen er det valgt å starte med en kort beskrivelse av forskjellige plattformene som finnes. I de påfølgende delkapitlene blir utstyr og prosesser beskrevet mer detaljert. Stoffet i kapittel 2 er basert på [10, 11, 12].

2.1 Plattformen

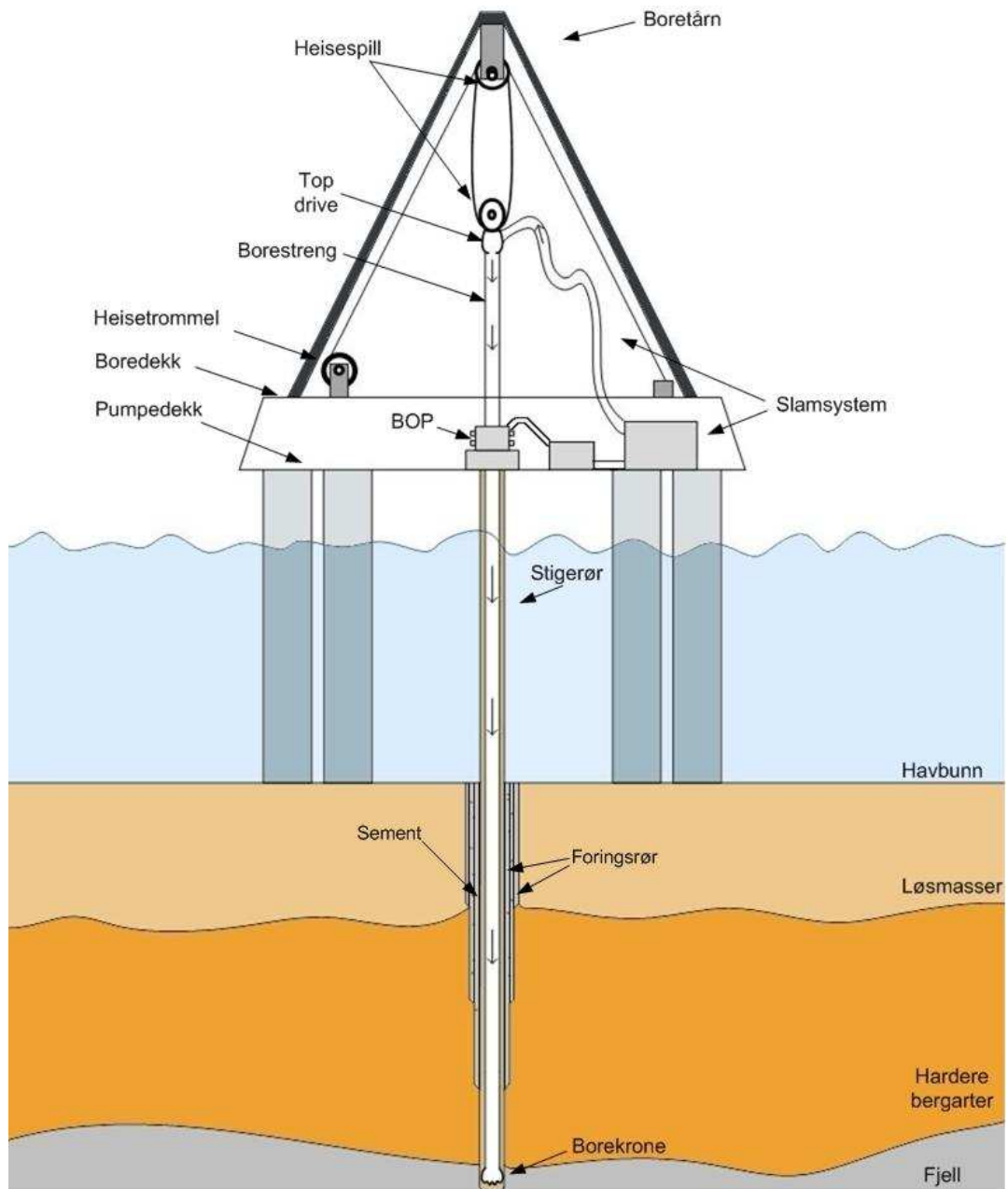
Dette delkapittelet er tatt med for å forstå boreprosessen, men er ikke direkte relevant for prosjektet. For boring etter olje og gass brukes det to hovedtyper av plattformen, flyttbare og faste. De faste plattformene brukes bare når en skal produsere et olje/gass-felt. Disse står permanent på havbunnen og blir demontert eller hugget opp når feltet er ferdig produsert. I tillegg til å bore produksjonsbrønner borer plattformene også injeksjonsbrønner som brukes til å injisere vann og/eller gass for å øke oljeproduksjonen.

De flyttbare plattformene kan flyttes fra sted til sted. De er som regel bygget i stål, og brukes både til leteboring og til boring av produksjonsbrønner for produksjonsplattformene. Under boring er det vanlig å senke plattformen noe ned ved å fylle ballasttanker (nedsenkbar plattform). Dette blir gjort for å gjøre plattformen mer robust under boring. En annen type har nedsenkbare bein som kan presses mot havbunnen (oppjekkbar plattform, kan bare brukes på grunt vann). Figur 2.1 viser de forskjellige typene plattformen som finnes. Det finnes også rigger på land, men i denne rapporten er det hovedsaklig tatt utgangspunkt i *offshore*-rigger.



Figur 2.1: Forskjellige typer plattformen. [2]

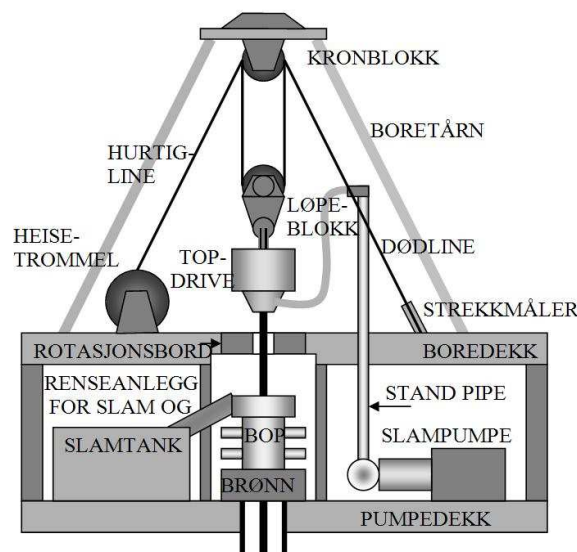
Nedenfor vises en skjematisk figur over det viktigste utstyret på en plattform. Dette vil bli beskrevet mer i detalj i de etterfølgende delkapitlene.



Figur 2.2: Skjematisk oversiktstegning.

2.2 Utstyr på bore- og pumpedekk

For tradisjonell boring brukes et boretårn, typisk omtrent 60 meter 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. Figur 2.3 viser en skjematisk tegning over det viktigste utstyret på plattformen.

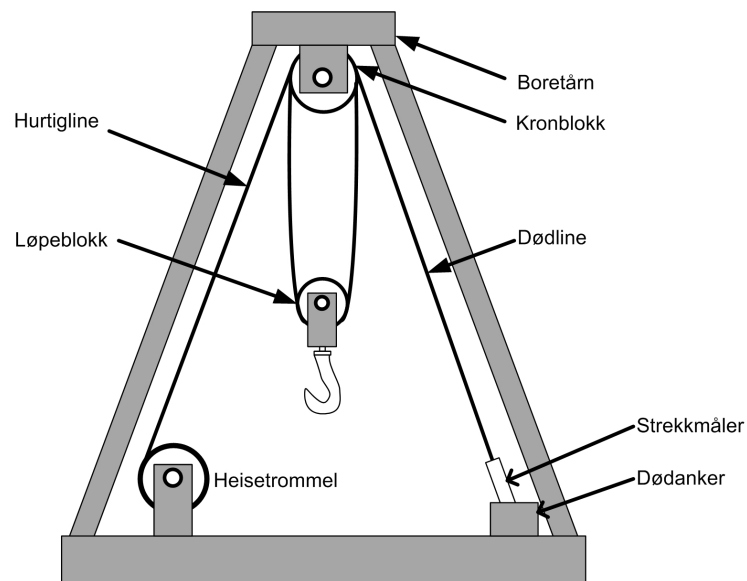


Figur 2.3: Skjematisk tegning av utstyr på bore- og pumpedekk. [10]

2.2.1 Heisespill

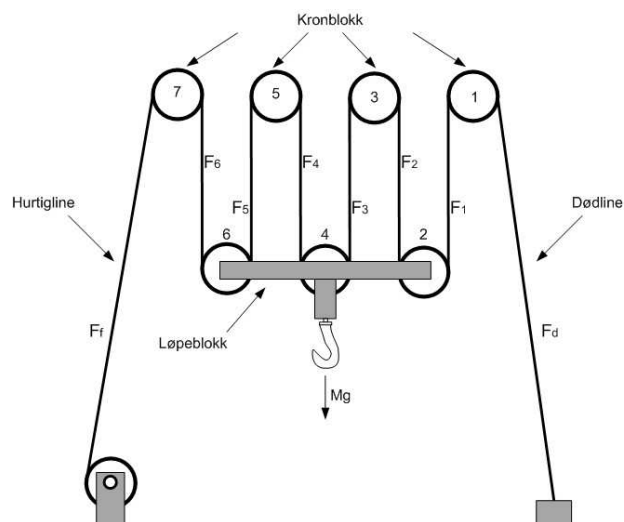
I utgangspunktet er ikke heisespillet relevant for prosjektet, men det gir forklaring på hvordan borestrengens vekt beregnes. Boretårnets funksjon er å heise borestreng og foringsrør (beskrevet i kap. 2.4) opp og ned i brønnen, samt plassering av annet utstyr, som blant annet sikkerhetsutstyr som BOP. Heiseoperasjonene skjer ved hjelp av et system med vaiere, trinser og en trommel, kalt heisespillet, vist i figur 2.4.

Fra heisetrommel som står på boredekket går heisekabel opp til kronblokka som henger i toppen av tårnet, over første trinse og deretter ned til løpeblokka og opp igjen, fra fem til syv ganger. Dette vises best i figur 2.5. Til slutt går kabelaen over siste trinse i kronblokka og ned til dødkankeret på boredekket. Her er det festet en kraftindikator som viser hvor stor belastningen er til enhver tid. Belastningen blir loggført og brukes til å regne ut vekta på borestrengen.



Figur 2.4: Skjematisk tegning av heisespillet.

Kabel fra heisetrommel til kronblokk beveger seg hurtigst ved heising og kalles hurtigline (*fast line*). Kabel fra kronblokk og ned til døddankeret beveger seg ikke og kalles dødline (*dead line*). Ved heising er det størst strekk i hurtiglina, styrken av denne er derfor en begrensende faktor for hvor mye last heisespillet kan belastes med. Ved senking av last (også kalt låring) blir det minst strekk i hurtiglina.



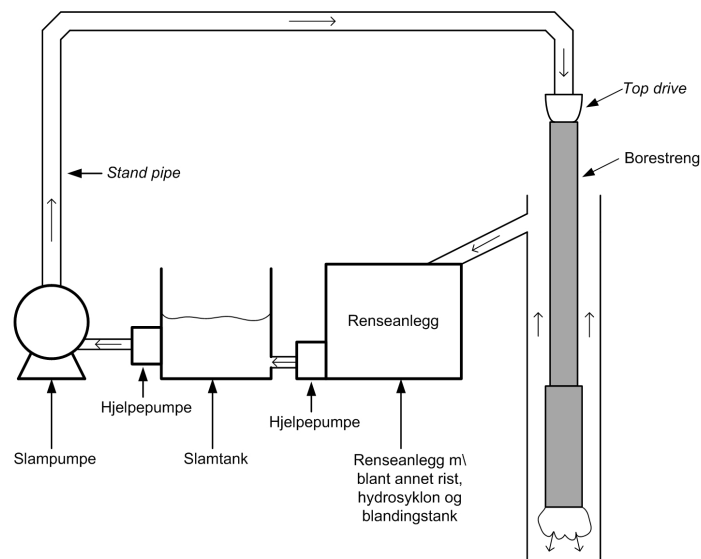
Figur 2.5: Utbrettet versjon av figur 2.4. Dette er bare en prinsipiell figur, da løpeblokka vanligvis har fem til syv trinser. Figuren inneholder også strekket (kreftene) i kablene.

2.2.2 Slamsystemet

Boreslam er en sammensetning av olje, vann og kjemikalier som har mange funksjoner under boreprosessen. Sammensetningen av boreslam er blitt ganske komplisert ettersom flere krav er blitt satt. I utgangspunktet er boreslam vann (vannbasert boreslam) eller olje (oljebasert boreslam) som er tilsatt en rekke forskjellige stoff. De fleste stoffer er malt opp til pulver. Størrelsen på pulverkornene kan ha stor betydning for funksjonen. Blant de viktigste funksjonene til boreslammet kan man nevne:

- Gi riktig trykk i brønnen.
- Spyle bort borekaks i bunn av brønn.
- Frakte borekaks opp til overflaten.
- Avkjøle borestrengen, spesielt i dype brønner.
- Smøre borestrengen for å minimere friksjon mot formasjonen.
- Beskytte borestreng og foringsrør mot korrosjon.
- Rense, avkjøle og smøre borekronen.
- Leverer hydraulisk energi til nedihulls slammotor og turbiner.

Under boring vil boreslam tilføres borestrengen under et sirkulasjonstrykk (*stand pipe pressure*) som er tilstrekkelig høyt til at væsken sirkulerer nedover gjennom borestrengen, ut gjennom små hull i borekronen, opp annulus mellom borestrengen og borehullet og tilbake til overflaten for behandling og resirkulering. Dette illustreres i figur 2.6.

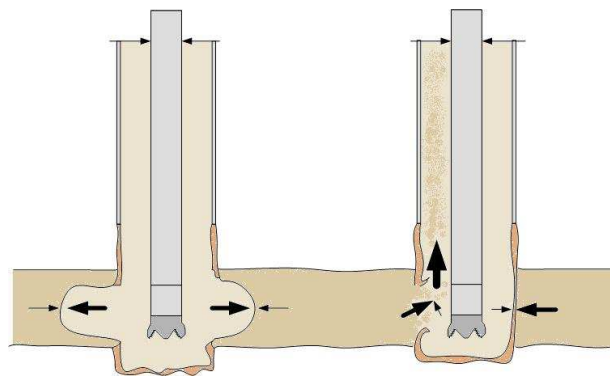


Figur 2.6: Skjematisk figur over slamsirkulasjonssystemet

For å sirkulere boreslammet blir det brukt en eller flere slampumper. Fra slampumpa går boreslammet gjennom en fast rørledning (*stand pipe*) til boredekket, derfra gjennom en fleksibel høytrykkslange til en rotasjonskobling festet direkte til *top drive*. Selv om det er noe friksjonstrykktap i borerøret vil trykket i boreslammet øke nedover borestrengen på grunn av at dybden øker. En god del av trykkøkningen som pumpe leverer blir tatt ut over dysene i borekrona, i form av jetstråler som spyer unna utboret masse og renser tennene i borekrona. På vei opp er boreslammet noe tyngre siden det tar med seg borekaks. På pumpedekket renner boreslammet ut av stigerøret og ned til renseanlegget, som renser ut borekaks og lufter ut eventuell gass som har kommet inn i slammet.

Renseanlegget på pumpedekket består av flere komponenter og har i oppgave å fjerne uønskede stoffer som er blitt tilført under boring, først og fremst borekaks. Fjerning av borekaks blir utført ved hjelp av en rist som skiller ut de største partiklene. De minste partiklene kan falle igjennom, og disse kan da bli fjernet i det sekundære renseanlegget. Dette anlegget kan bestå av sentrifuge, hydrosyklon eller andre apparater som kan fjerne små 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 boreslammet bli tilført partikler som er for små til å bli fjernet med renseanlegget. Disse partiklene kan være salter, olje, gass eller vann. De tilførte partiklene endrer tettheten til boreslammet som igjen endrer væsketrykket i brønnen (væsketrykket er gitt ved $P = \rho gh$). Blir væsketrykket for stort (større enn fraktureringstrykket) vil vi få frakturering av brønnen. Det vil si at trykket blir så stort at det danner sprekker i formasjonen og boreslam vil gå tapt (tapt sirkulasjon). Dersom væsketrykket blir for lite (mindre enn poretrykket) vil det føre til at væske og/eller gass strømmer inn fra formasjonen. Dette kan være farlig og kan føre til *kick*, og i verste fall *blow out*-situasjoner. For lite væsketrykk kan også destabilisere brønnveggen slik at den raser inn i brønnen. For å hindre disse uønskede hendelsene er det viktig å ha kontroll på hvilken tetthet boreslammet har, og hva frakturerings- og poretrykket i brønnen er. Figur 2.7 illustrerer hva som kan skje dersom man ikke har kontroll på væsketrykket.



Figur 2.7: Situasjonen til venstre viser at væsketrykket i brønnen er større enn fraktureringstrykket. Vi vil da få tapt sirkulasjon ut til formasjonen. Situasjonen til høyre viser at væsketrykket i brønnen er mindre enn poretrykket. Vi vil da få reservoarfluid inn i brønnen og potensiell *kick*- og *blow out*-situasjon

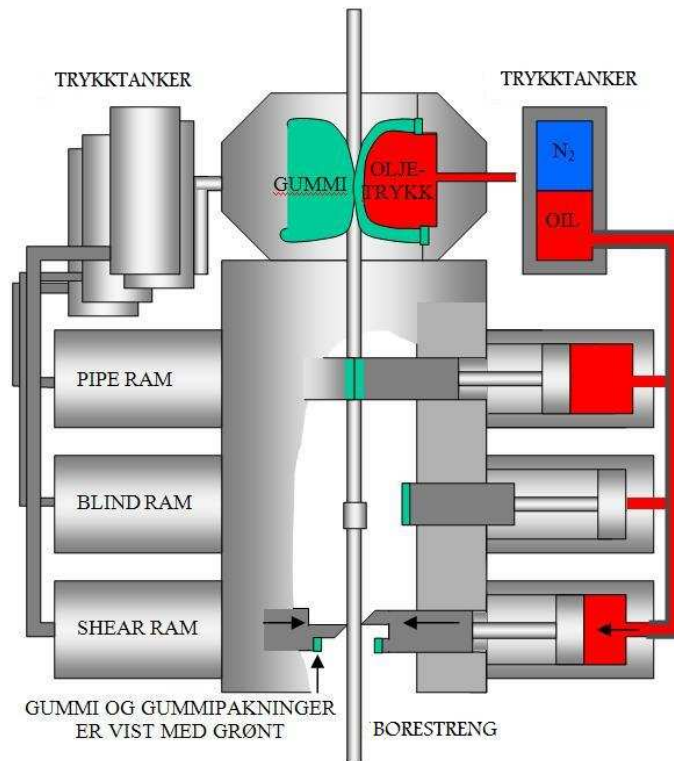
Fraktureringstrykket kan estimeres ved hjelp av en *leak off test*. Slamutløpet fra foringsrøret stenges og slampumpa pumper slam ned i brønnen med konstant rate mens trykket måles kontinuerlig. Så lenge formasjonen holder tett øker trykket proporsjonalt med innpumpet slammengde. Ved et visst trykk vil en se at trykkoppbygningen brått går langsommere. Dette trykket kan regnes som fraktureringstrykket.

Poretrykket måles ved å presse en målesonde mot formasjonen. Sonden er en slags ”kopp” med gummipakning rundt kanten slik at innsiden av koppen blir isolert fra trykk i brønnen. Trykket i sonden måles etter at det har stabilisert seg og antas å være lik poretrykket.

Viskositeten til boreslammet avgjør hvor godt boreslammet klarer å bære med seg borekaket opp til overflaten. Det må også ha en gelébyggende egenskap for å holde borekaket flytende ved borestans. Tettheten til boreveska må være tyngre enn rent vann for å holde høyt nok statisk trykk i formasjonen. I porøs formasjon kan boreslammet trenge inn i porene til formasjonen og tapes fra brønnen. Ved å tilsette små oljedråper i boreslammet reduseres effektivt tapet fordi oljedråpene stenger poråpningene. Smøreegenskapene til boreslammet øker også ved tilsetning av litt olje.

2.2.3 *Blow Out Preventer (BOP)*

Blow Out Preventer er i prinsippet ikke relevant for prosjektet, men tatt med for forståelsen av boreprosessen. For å unngå *kick-* og *blow out-*situasjoner er det alltid installert en BOP på brønnehodet. På faste plattformer står BOP på pumpedekket, mens på flyteplattformer står den på havbunnen. Ved bruk av flyteplattformer vil det alltid være en fleksibel kobling mellom BOP og stigerør, slik at plattformen kan drive uten at stigerøret blir bøyd/knekket. Hvis uvær gjør det umulig å holde plattformen over brønnen trekkes borestrengen ut, BOP stenger brønnen og stigerøret kobles fra BOP og blir med plattformen.



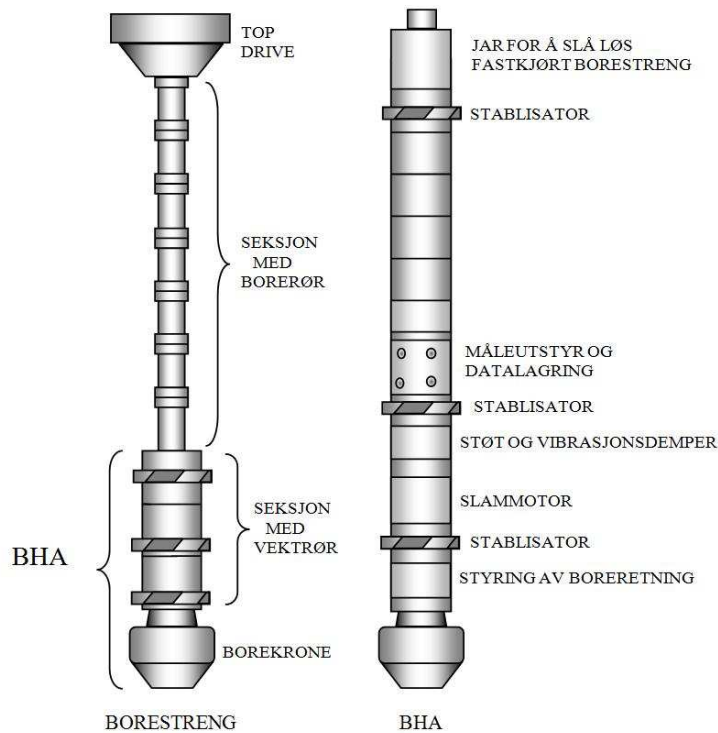
Figur 2.8: Skisse av BOP. Gummikappen øverst klemmes sammen om strengen. *Pipe ram* tetter rundt borestrengen. *Blind ram* tetter hele brønnen når det ikke er borestreng i brønnen. *Shear ram* kapper borestrengen. [11]

BOP består av en stabel av forskjellige lukkemekanismer, derfor kalles den også *BOP stack* (stabel). Denne stabelen illustreres i figur 2.8. Øverst på stabelen sitter en gummikappe som klemmer rundt borestrengen når det settes trykk på. Dette er den første mekanismen som utløses dersom man oppdager at en *kick* er på gang. Gummikappen tåler ikke så høyt trykk som de andre lukkemekanismene i stabelen. Disse mekanismene er skiver (*rams*) som skyves inn av hydrauliske stempel.

Den kraftigste mekanismen er *pipe rams*. *Pipe rams* fungerer slik at hydrauliske stempel med gummipakninger klemmer mot hverandre. De glir i spor med pakninger slik at det blir tett rundt hele skiva. Hver skive har en utsparring i fronten som passer rundt halve borestrengen, slik at de tetter rundt den også. En bør ha minst to sett med slike *pipe rams*. Hvis en ikke får tettet skikkelig med bruk av *pipe rams* må en bruke et sett med skjærskiver (*shear rams*) som kapper strengen og tetter mot hverandre. Dersom det ikke er borestreng i brønnen brukes det to skiver med rett front som bare tetter mot hverandre (*blind rams*).

2.3 Borestreng

Borestrengen består hovedsaklig av 3 deler som vises i figur 2.9. Den øverste delen er borerørseksjon. Den neste delen er en vektrørseksjon som består av massive rør som gir trykk ned til borekrona, som er den nederste delen av borestrengen. Vektrørseksjonen og borekrona utgjør tilsammen BHA.



Figur 2.9: Ulike seksjoner i borestrengen. [10]

2.3.1 Borerør

Borerør har en lengde på ca. 10 meter (30') og skrues sammen til en lang seksjon mens man borer. Borerørene har en påsveiset koblingsboks med hunn- og hanningjenger. Koblingsboksene er sterkere enn selve borerøret fordi de har større vegtthkkelsete. De tåler mer trykk, strekk og bøyning enn borerørene. Når borestrengen skrues sammen brukes en spesiell pasta mellom de koniske gjengene for å unngå lekkasje. Borerør kan ha forskjellige tiltrekningsmoment, dimensjoner, stålkalitet, klassifisering av rørslitasje og type koblinger. Disse blir beskrevet i resten av dette delkapittelet.

Tiltrekningsmomentet er på forhånd bestemt av de andre faktorene, og derfor kan rør av samme dimensjon ha ulik tiltrekningsmoment. Hvis man skrur borerørene for hardt sammen kan konsekvensen være at man mister borestrengen under boring eller at koblingsboksene

sprenges. Tiltrekningsmomentet for gjengene er derfor ofte øverste grense for hvor stort dreiemoment borestrengen tåler. Man bør derfor bruke samme tiltrekningsmoment på borerørene i hele seksjonen for å unngå at koblingsboks med mindre tiltrekningsmoment setter stopper for boreprosessen.

Dimensjonene til borerørene har en ytre diameter fra 61,9cm ($2\frac{3}{8}$ ") til 185cm ($6\frac{5}{8}$ ") og leveres med to til tre forskjellige veggtykkelser for hver dimensjon.

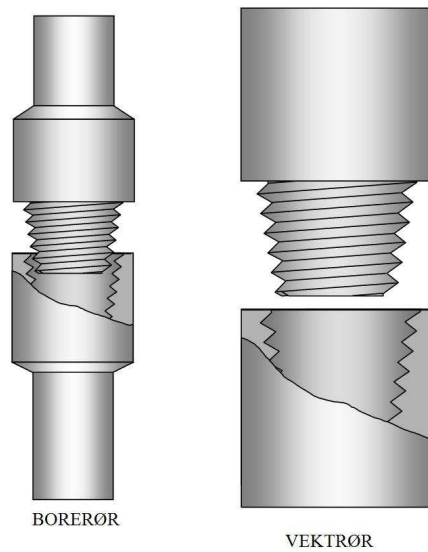
Stålkvaliteten bestemmes av hvilke forskjellige ståltyper borerøret er bygd opp av. Det er 4 forskjellige ståltyper, som ut i fra flytespenningen σ_y av materialet bestemmer hvor mye trykk de tåler. Flytespenningen er kraften materialet tåler per arealenheter.

Klassifisering av rørslitasje er den faktoren som viser i hvor stor grad rørene har bulker og skrammer. Klasse 1 er den beste klassifiseringen, som gis når rørene kommer rett fra produksjon og minimum flytgrense er høy nok til denne klassifiseringen. Klasse Premium er rør som har fått nedsatt veggtykkelse til over 80% av opprinnelig veggtykkelse, og antatt spenningstrykk og avslipningsgrense er redusert tilsvarende. Skades et rør mer enn dette, og gjenværende veggtykkelse er mer enn 70%, blir røret klassifisert som klasse 2.

Type koblinger har betydning for strømningsberegningen grunnet variasjon av ytre og indre diameter til koblingsboksene. Koblingsboksene holder borerørene sammen med koniske gjenger som vist i figur 2.10.

2.3.2 Vektrør

I likhet med borerør har vektrør en lengde på ca. 10 meter (30'). De skrues sammen til en lang seksjon på rundt 100 til 200 meter. Typisk for vektrørene er at de er tykkere enn borerørene, for de skal tåle kompresjon i aksiell retning, slik at trykket kan overføres til borekrona.



Figur 2.10: Koniske gjenger i borerør og vektrør. [10]

Vektrørene har ikke påsveiset tilkoblingsbokser, men har koniske gjenger dreid inn i endene på selve røret, som vist i figur 2.10. I vektrørsseksjonen blir vektrørens koblinger derfor det svakeste punktet for strekk, vridning, bøyning og trykk, men de tåler mer enn borerørene grunnet den store veggtykkelsen. Slammet som strømmer opp annulus gir en grense for hvor stor diameter vektrørene kan ha.

2.3.3 Borekrone

Borekrone er i enden på borestrengen og borer seg nedover. Likt for alle borekroner er at de har dyser som boreslammet kan strømme ut gjennom i høy hastighet. Hastigheten v finnes ved:

$$v = C \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_m} \right)^{0.5} \quad (2.1)$$

Hvor:

- C : dysefaktoren, som gir effekten av friksjon (standardverdi er 0.95)
- Δp : trykkforskjellen på innsiden og utsiden av borestrengen
- ρ_m : boreslammets tetthet

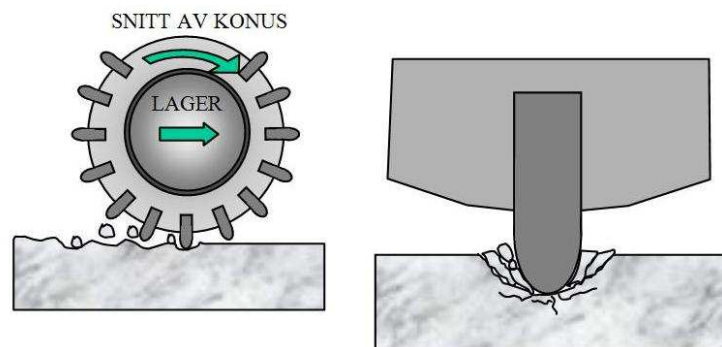
Dysetrykkfallet kan da finnes slik:

$$\Delta p = \rho_m \cdot \left(\frac{0.5 \cdot v^2}{C^2} \right) \quad (2.2)$$

Dysene utsettes for slitasje, og er derfor ofte foret med et sett utskiftbare hylser av wolframcarbin. Boreslammet er med på å kjøle ned borekrone slik at den ikke brenner opp

under boring. Kraften som kommer av vekten til vektrørene som presser borekrona nedover kalles for WOB (*Weight on bit*). Det er mange forskjellige borekroner, men de tre mest brukte hovedtypene er rullmeiselkroner, diamantkroner og PCD-borekroner (*Poly-Crystalline Diamond*).

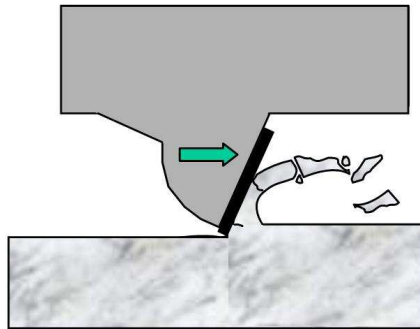
Rullmeiselkroner har tre koniske ruller, konuser, som knuser formasjonen punktvis med tennene, som vist i figur 2.11. Konusene roterer og renses hverandre ved at spissene går i hverandre i borehullets sentrum. Konusrullene i rullmeiselkronens er bevegelige ledd. WOB trykker tennene så hardt mot formasjonen at den knuses. I myke formasjoner brukes konuser i stål, og har større vinkel til boreretningen. I dypere og hardere formasjoner brukes konuser i hardmetall, og de har mindre vinkel til boreretningen. Resten av borekrona er laget av stål. Rullmeiselkroner blir mest brukt i den øverste brønnseksjonen med stor hull diameter. Hver tann lager et lite krater. Tennene er plassert ulikt, slik at de til sammen dekker hele bunnen av kraterhullet. Slitasje på tennene kan merkes som redusert borehastighet (*ROP - Rate Of Penetration*). Man vil da ofte øke WOB for å kompensere, men utsetter konusene for større belastning. En annen faktor som kan forårsake redusert borehastighet kan være for lite trykk over dysene. Man får da for liten spylehastighet slik at borekaks ligger igjen i bunnen.



Figur 2.11: Rullmeiselkrone. [10]

Diamantkroner har naturlige industri-diamanter støpt inn i borekroppen til borekrona. Hver diamant stikker noe ut og skrapes ned i formasjonen. Her er ingen bevegelige ledd i borekrona. Diamantkrona blir brukt til å bore i harde formasjoner.

PCD-borekroner har i likhet med diamantkronen ingen bevegelige ledd, men bruker bare et skjær av polykrystallinsk diamant, som er en kunstig diamant. Disse diamantene tåler ca. 200 ganger mer slitasje enn wolframkarbin. Når borekrona roterer skjærer PCD mot formasjonen som vist i figur 2.12.



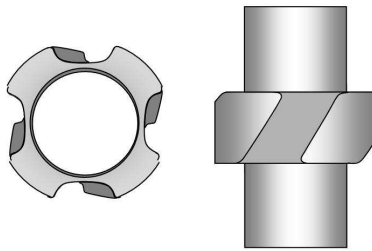
Figur 2.12: PCD-borekrone. [10]

Her er det viktig med høy spylehastighet for å spyle vekk borekaket og for å kjøle ned borekrona tilstrekkelig. Diamantene i skjæret tåler kun 700°C. For høyere temperaturer ekspanderer produksjonsmaterialet mellom skjæret og kronen, og forårsaker sprenging. Med en kostbar behandling der produksjonsmaterialet som forårsaker sprenging fjernes, kan PCD borekrona tåle varme opp til 1200°C. Borehastigheten er generelt større for PCD-borekroner enn for diamant og rullmeiselkroner.

2.3.4 *Bottom Hole Assembly (BHA)*

Nesten alt utstyr og boreinstrumenter i borestrengen står i seksjonen med vektrør, som vist i figur 2.9. Måleutstyret står her fordi det er her det er interessant å måle. Man finner mye data i den delen av brønnen som nettopp er boret ut, som for eksempel type formasjon, trykk og temperatur. Alt utstyr er plassert i rør som tåler belastningene som borestrengen blir utsatt for. Utstyr og boreinstrumenter i BHA er generelt stabilisatorer, hjelpeutstyr, måleutstyr og datalagring, slammotor og styreretningsenhet for boreretning. Disse blir beskrevet i resten av dette delkapittelet.

Stabilisatorer holder vektrøret sentrert i borehullet. I figur 2.13 er et eksempel på hvordan en stabilisator ser ut. For at vektrøret skal holdes stabilt må det to eller flere stabilisatorer inn i BHA.



Figur 2.13: Stabilisator. [10]

Hjelpeutstyr reduserer belastningen på borestrengen. Eksempler på hjelpeutstyr kan være støthammer (*jar*), akselerator og støtdemper. Støthammeren slår løs fastkjørt borestreng. Akseleratoren øker effekten til støthammeren, og blir ofte bygget sammen med denne. Støtdemper bør være så nær borekrona som mulig, da det kan være støtpulser som kan ødelegge borekrona.

Måleutstyr og datalagring måler og registrerer forskjellige boreparametre som helning, trykk, retning, temperatur og vibrasjonsnivå. Alle boreparametrene blir lagret og sendt opp til boreplattformen. Denne delen kalles for MWD (*Measurements While Drilling*). Kommunikasjonsutstyret i BHA komprimerer og sender binær data ved hjelp av slampulser. Dataraten er lav, ca. 10bit/s.

Slammotoren er innvendig formet som en roterende korktrekker. Slammet som passerer får motoren til å gå, slik at den kan gi videre kraft til rotasjon av borekrona og kan generere kraft til instrumenter. Slamturbin kan også brukes, men den har mye større rotasjonshastighet og må gires ned. Den passer bedre for kraftgenerering til instrumenter.

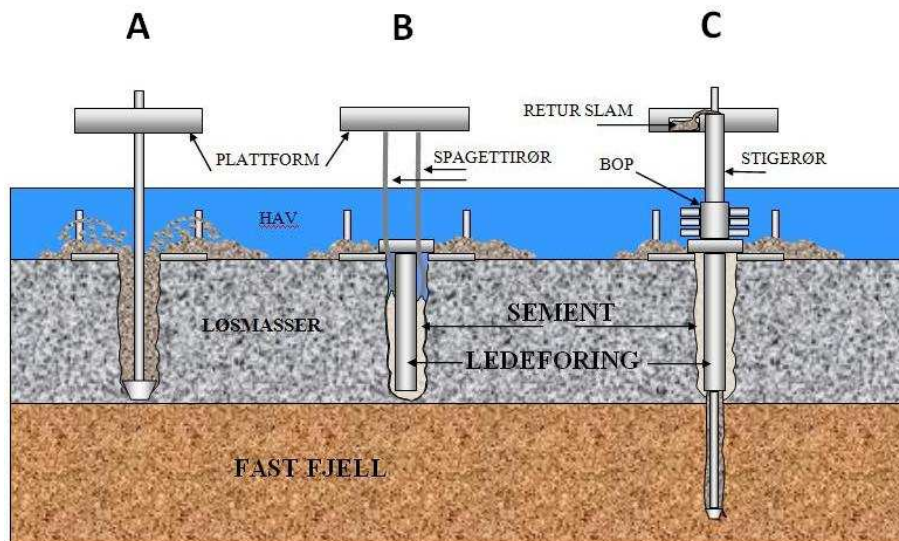
Styretretningsenhet for boreretning gjør nederste delen mot borekrona leddet og kan derfor bestemme boreretningen.

2.4 Sikring av brønn

Etter hvert som det bores nedover i formasjonen er det viktig å sikre brønnen. Brønnen må sikres for å forhindre strømning av fluid fra formasjon inn i brønn, sammenrasing og frakturering av brønnen. Dette gjøres ved bruk av brønnsikringsrør. Dette er solide stålrør som sementeres fast til bergarten. Det er tre forskjellige navn på brønnsikringsrør; ledeforing, foringsrør og *liner*.

- Det første brønnsikringsrøret som settes kalles **ledeforing**. I Nordsjøen er det ofte større enn 20", gjerne 30". Se figur 2.14 og 2.15
- **Foringsrør** er brønnsikringsrør med diameter 20" eller mindre, og som henger fra brønnehodet. Se figur 2.15
- **Liner** er et foringsrør som henger fra bunnen av et annet foringsrør. Se figur 2.15

Figur 2.14 viser typisk boring og sementering av de første brønnsikringsrørene fra en flyttbar plattform. Det første hullet kan også sikres ved å slå ledeforingen ned i løsmassene. Man sikrer dermed brønnen *før* børingen starter, samt at en slipper sementering av ledeforingen. En borer så ut løsmassene i ledeforingen med retur opp til plattformen.

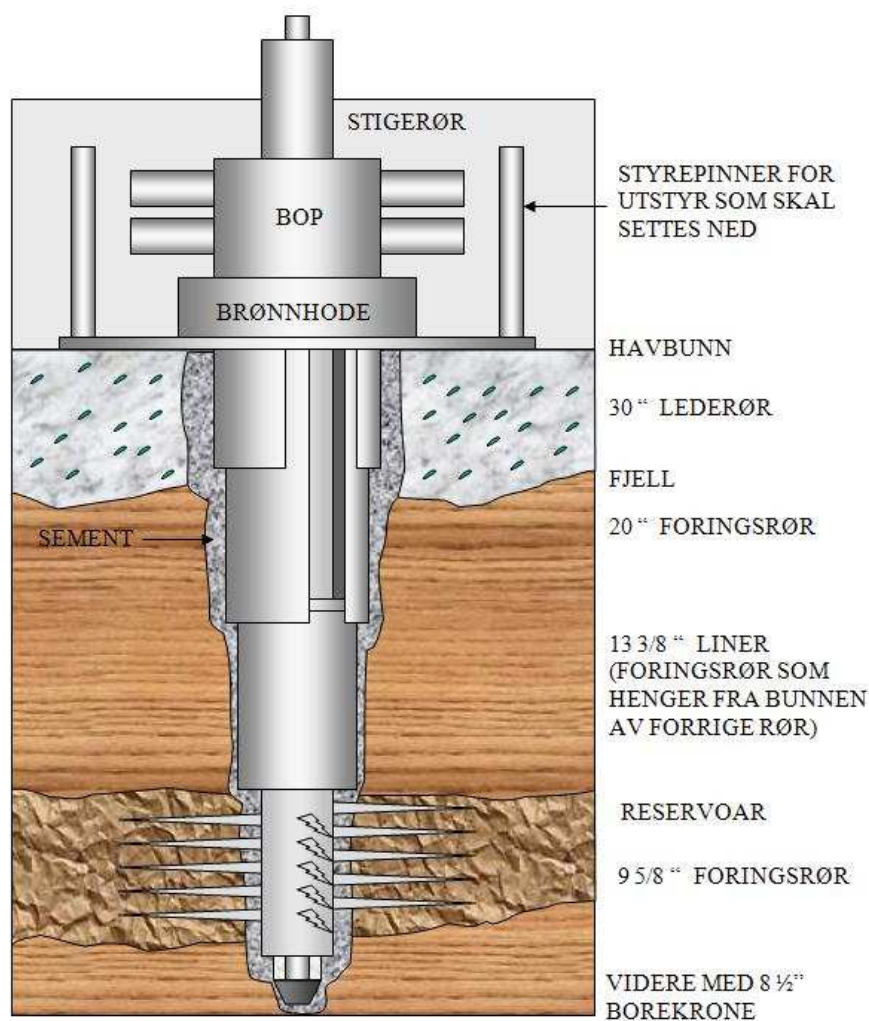


Figur 2.14: **A** viser boring med sjøvann som boreslam. I situasjon **B** er ledeforing satt ned, og den sementeres fast til bergarten. I **C** er BOP og stigerør montert. Videre boring skjer med mindre borekrone. [11]

Etter at ledeforingen er satt blir det deretter satt ned foringsrør. Foringsrørene produseres - som rørene i borestrengen - i lengder på ca 10 meter. Når en streng med foringsrør senkes

ned, forlenges strengen ved å koble på nye rørlengder enkeltvis. Standard kobling er koniske gjenger slått utvendig i selve rørgodset i begge ender.

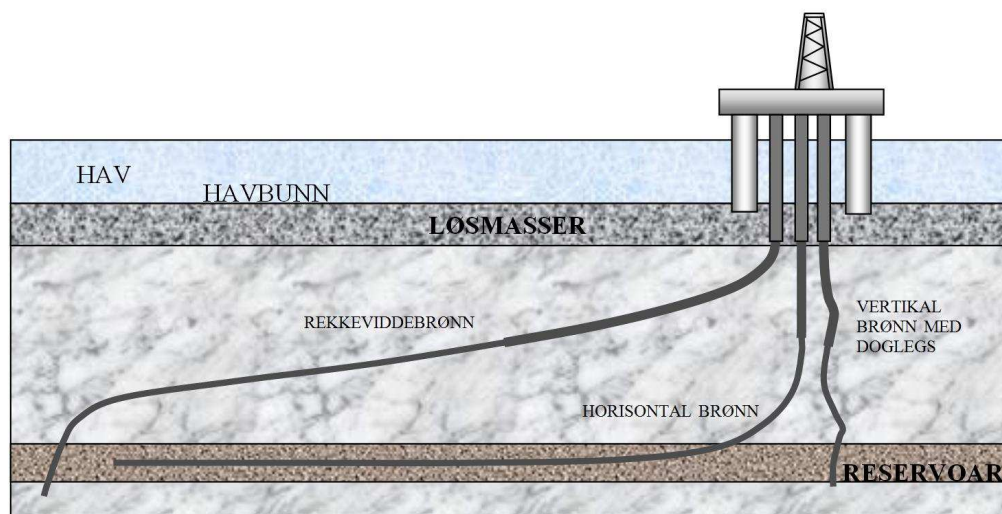
En måte å sette foringsrørene på er vist i figur 2.15. Her er de ytterste rørene skåret opp for å vise at rør nummer tre henger fra bunnen av forrige rør, og ikke fra brønnehodet. En rørsesjon som henger fra forrige rør kalles en *liner*, selv om den er satt sammen av vanlige foringsrør. Det innerste røret henger fra brønnehodet og er dermed et foringsrør. Det er ganske vanlig at siste sikringsrør henger fra toppen av brønnen. Dette gjør brønnen sikrere mot lekkasje. Tidligere rør har borestrengen gått gjennom, dermed er de blitt utsatt for slitasje mot denne, noe som øker muligheten for lekkasje. Etter at et brønnsikringsrør er satt ned blir det trykktestet, men det er mest for å se at koblingene er tette.



Figur 2.15: Ferdig satte brønnsikringsrør. [11]

2.5 Brønnboring

Formasjon er navnet som brukes på bergartene i jorda. Trykkforholdene i formasjonen er de viktigste egenskapene til formasjonen. Tettheten til boreslammet må være tilrettelagt for trykkforholdet for å unngå situasjoner som tidligere forklart i kapittel 2.2.2. Før boringen begynner, kartlegges formasjon med trykk og temperatur ned til oljefeltet. Når det bores blir det tatt prøver av formasjonen mer eller mindre kontinuerlig for å vite nøyaktig hvilken formasjon det bores i. Prøvene kan tas av store borekaks, ved væskeprøver av brønveggen og ved kjerneprøver. Prøvene blir loggførte mot dybden på brønnen. Brønndybden er lengden på borestrengen (*MD - measured depth*) og ikke sann vertikal dybde (*TVD - true vertical depth*).



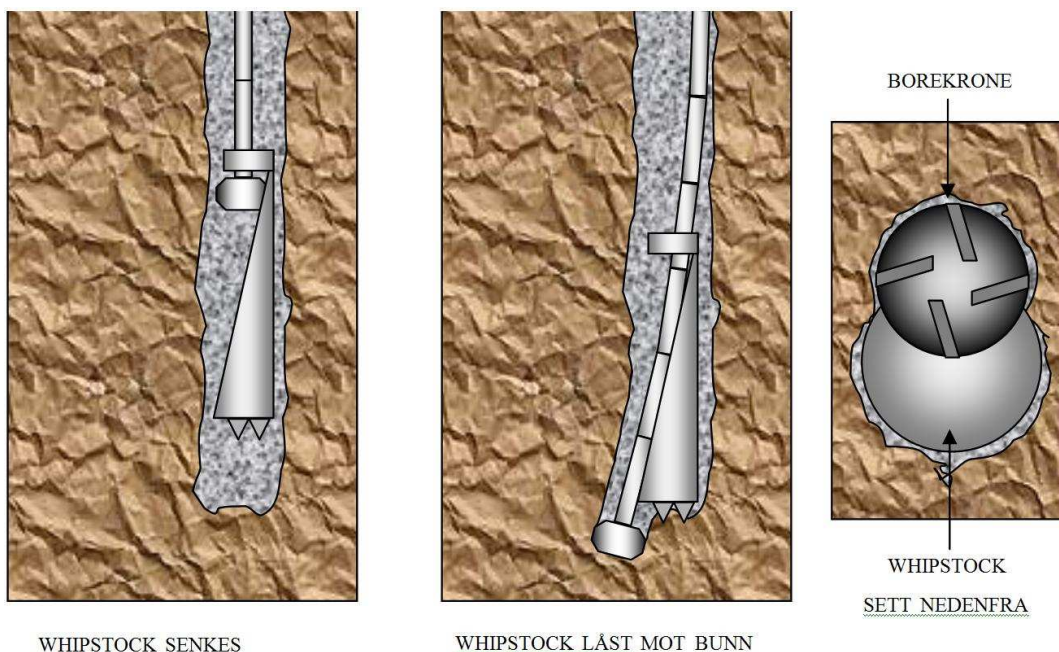
Figur 2.16: Brønnbaner. [11]

2.5.1 Vertikal boring

Tradisjonelle brønner er i teorien vertikale, men i praksis blir brønnen sjelden helt rett. Borekrona vil vandre omkring ettersom den arbeider seg gjennom formasjonen. Et avvik fra planlagt hullbane er alltid forventet. Avviket skyldes ofte geologiske forhold, spesielt ved lag av sterkere og svakere bergarter i vinkel til brønnbanen. Foldinger og forkastinger gjør at lagene ikke ligger horisontalt, og dermed gir usymetriske forhold for boreretningen. Borerørene er ganske stive. Dersom borestrengen passerer krumninger og knekkpunkt (*doglegs*) i borehullet som presser borerørene inn i brønveggen, gir det ekstra kontaktkrefter som øker friksjonen betydelig. Materialet blir strukket og komprimert en gang per omdreining i krumninger og knekkpunkter. Det kan føre til tretthetsbrudd, som blir forklart i kapittel 2.6. Hvis borestrengen graver seg inn i brønveggen og danner et en spalte som er for trang for vektrørene og borekrona, vil det bli vanskelig å trekke opp borestrengen. En slik spalte kalles *key-hole*.

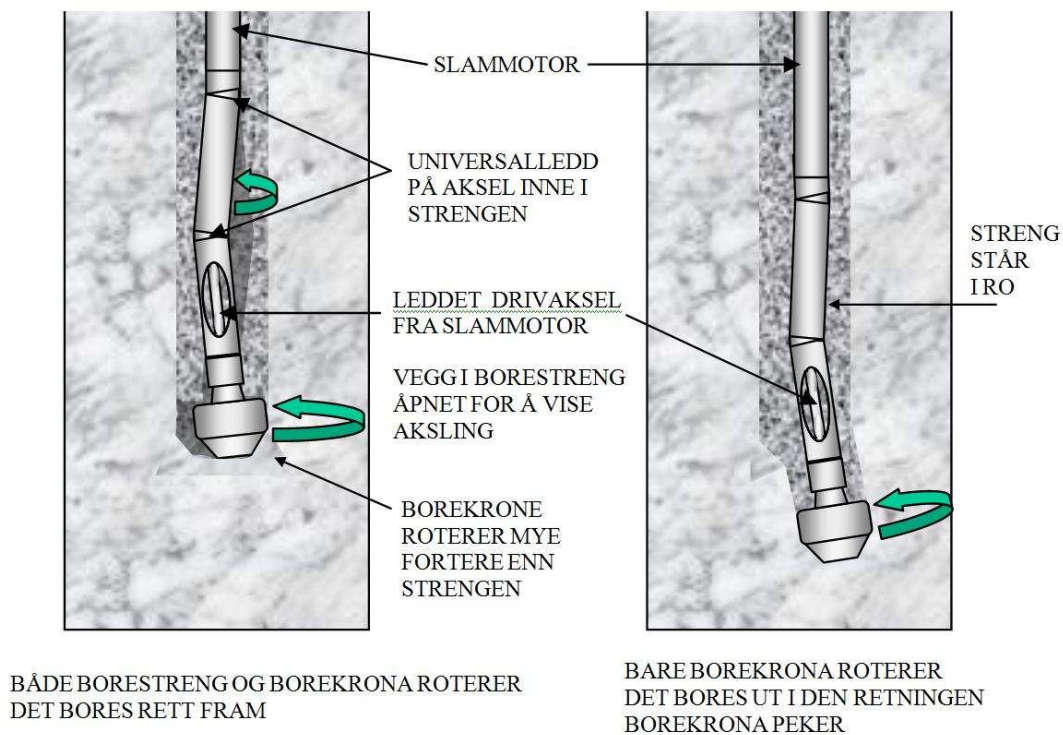
2.5.2 Retningsboring

Avviksboring er boring hvor hullretningen avviker fra vertikal retning. Det kan være mange grunner til at man ønsker retningsstyrt boring. Det kan være for å unngå et problemområde. Da er ikke formålet å bore skrått, men å komme forbi problemområdet. Det kalles **omgåelsesboring**. Å nå et helt spesifikt mål som ikke er tilgjengelig rent vertikalt, kaller man **målboring**. Det er for eksempel viktig ved drepebrønner hvor målet er en brønn under utblåsning. **Rekkeviddeboring** kalles brønner som strekker seg langt fra plattformen, vist i figur 2.16. Det var svært aktuelt når det ble opprettet plattformer til havs, fordi man slapp å konstruere en ny eller flytte en plattform for å nå et mindre oljefelt. Brønnbanen kan strekke seg opp mot 10 km og dekke et område på opp til 300 m². Tidligere var det begrensning på 50 til 55 graders avviksvinkel, men nå opererer man med over 70 grader. Rekkeviddebrønnene har gjerne en S-formet brønnbane hvor avviksvinkelen reduseres nærmere målet, for å sikre at brønnbanen krysser reservoaret i ønsket område. **Horisontal boring** legges langs reservoarlagene for å utnytte reservoarene billigere og bedre, vist i figur 2.16. Brønnen gir mulighet til å tappe olje eller gass fra langt større deler av reservoaret enn ved en vertikal brønn. Det vil også øke levetiden og utnyttelsesgraden til reservoaret ved lave trykkfall gjennom reservoarformasjonen. Brønnen har J-formet brønnbane. Ved retningsboring er det mulig å justere brønnbanen slik at den skaper minst friksjon med geologien i formasjonslagene fram mot reservoaret. For å starte retningsboring trenger man en *whipstock* eller en styreretningsenhet med slammotor.



Figur 2.17: Whipstock [10]

Whipstock er en stålkile som plasseres på bunnen i borehullet, vist i figur 2.17. Kilen er smal øverst og bredere i bunnen. Den tvinger en borekrone med mindre diameter i ønsket retning gjennom et spor i kilen. Denne borer omtrent 5 til 6 meter fobi stålkilen med en vinkel mellom 1 til 3 grader. Deretter trekkes borestrengen opp og man går ned med en hullåpner. Hullåpneren er en totrinns borekrone, hvor det første trinnet er en liten borekrone med samme diameter som borekrona som boret ned langs kilen. Denne sklir ned langs ledehullet og fortsetter boring i denne retning. Et stykke oppe på borestrengen sitter en ringformet borekrone som åpner til ønsket hull diameter. Etter et stykke boring trekkes strengen opp igjen og fortsetter boring med vanlig borekronediameter. Det er en krevende prosess, og ofte vanskelig å holde orienteringen på stålkilens retning når boringen starter. Man har nå i stor grad gått bort fra denne metoden.



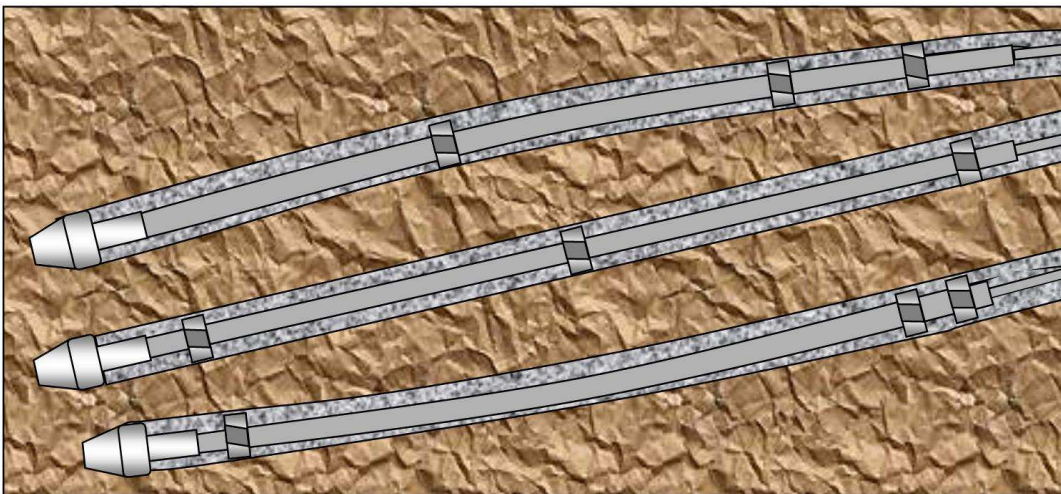
Figur 2.18: Leddet BHA. [10]

Nedihulls motoren er et bedre alternativ om man skal ha en retningsstyrt boring. Borestrengen stopper rotasjonen fra rotasjonsbordet og starter nedihullsmotoren som genererer kraft til rotasjon av borekrone. Styreretningsenheten gir en bøy på 0.5 til 3 grader i ønsket retning. Bøyen orienteres og retningsboring starter. Når oppnådd retning er nådd og man ønsker å bore rett igjen, trekkes borestrengen og man kan starte rotasjon av ny borestrengen fra rotasjonsbordet. Det er også mulig med styrbar nedihulls motor hvor man ikke trenger trekke borestrengen ut for å fortsette rett boring. Metoden blir lik som for nedihulls motoren uten styreenheten, men man slipper tripp-operasjoner.

Noen ganger kan det være ønskelig å fortsette boring fra en etablert brønnbane. Det kan være fordi det er satt fast borestreng og man får ikke opp utstyret, man treffer vanskelige bergarter som er vanskelig å penetrere eller man ønsker å bruke eksisterende brønn mot et nytt mål. Sideboringen ut fra en etablert brønn kan gjøres på forskjellige måter. Metodene som brukes er enten en foringsrørkile eller symmetrisk fresing og bøyd BHA.

Foringsrørkilen er lik *whipstock* som settes fast i en sementplugg i foringsrøret. Deretter er metoden lik som for *whipstock*metoden. Denne metoden brukes en del fordi det ikke oppstår problem med at foringsrørkilen roterer ved ledehulls-boring.

Symmetrisk fresing og bøyd BHA bruker en borestreng hvor det slås ut armer som freser vekk foringsrør over noen rørlengder. Om det er dårlig sementering vil det skape problemer for fresingen ved at vibrasjoner kan ødelegge fresen. Man må da eventuelt velge en annen sementert del av brønnen eller gå ned med trykksementering før retningsboringen kan begynne. Deretter settes en sementplugg fast, og retningsboringen kan starte med nedihullsmotoren og bøyd BHA som beskrevet tidligere. Denne metoden er mest brukt.



Figur 2.19: Avviksboring ved stabilisatoravstand. [10]

Når boringen har startet etter retningsboringemetodene kan det være ønskelig å redusere eller øke avviksvinkelen under boring. Ved å variere avtanden mellom stabilisatorene i BHA kan avviksvinkelen bygges eller reduseres, vist i figur 2.19. Lengden og tyngden til vektørseksjonen vil være med å bøye seksjonen litt hvis det er langt mellom stabilisatorene. Hvis første stabilisator er plassert langt nok fra borekrona vil den redusere avviksvinkelen ved at tyngdekraften lar den henge litt ned. Hvis den andre stabilisatoren er plassert langt bak vil tyngdekraften lage en bøy i motsatt retning og avviksvinkelen vil øke.

2.6 Krefter og belastning på borestreng

Det er store krefter i sving når en brønn bores. Borerørseksjonen er den svakeste delen i borestrengen, derfor er det naturlig å ta utgangspunkt i belastningskreftene som sliter på borerørsseksjonen som øvre grense for slitestyrke. Hvis det oppstår brudd i borestrengen kan dette føre til store tidsforsinkelser i boreoperasjonen. Ofte må man fiske etter den gjenværende borestrengen som ligger igjen, eller bore ut til siden og forbi denne delen. De viktigste belastningene på borestrengen er trykkbelastning, strekkbelastning, bøyebelastning, vridningsbelastning, vibrasjonsbelastning, utmattingsbelastning og overbelastning. Disse blir beskrevet mer i detalj i dette delkapittelet.

Trykkbelastning er belastningen som følger av boreslammets overtrykk ned i borerørene ved sirkulasjon. Nede i bunnen er overtrykket tilnærmet lik dysetrykket og derfor mye mindre enn ellers i borerørsseksjonen. For å regne ut trykkbelastningen P [bar] brukes følgende formel:

$$P = \rho_m \cdot g \cdot h \quad (2.3)$$

- ρ_m : tettheten av boreslam [kg/m^3]
- g : tyngdens akselerasjon (9.81) [m/s^2]
- h : vertikal dybde til der trykket måles [m]

Strekkbelastning kan regnes ut og sjekkes mot nedre grense for hva borerørene tåler. Før boring henger hele borestrengen fra toppen. Det øverste borerøret bærer vekten av hele strengen, og den største strekkbelastningen blir derfor på dette røret. Hele borestrengen henger nedsenket i boreslam, og dette gir en oppdrift som reduserer litt av belastningen. For en vertikal brønn er strekkbelastning K [kN] vekten av hele strengen multiplisert med oppdriftsfaktoren k :

$$K = (m_s \cdot h_s + m_v \cdot h_v) \cdot g \cdot k \quad (2.4)$$

Hvor:

$$k = 1 - \rho_m / \rho_s \quad (2.5)$$

- m_s : masse av borerør per meter [kg/m]
- m_v : masse av vektrør per meter [kg/m]
- h_s : total lengde av borerør [m]
- h_v : total lengde av vektrør inkludert borekrone og utstyr [m]
- g : tyngdens akselerasjon (9.81) [m/s^2]
- ρ_m : tettheten av boreslam [kg/m^3]
- ρ_s : tettheten av stål (strengmaterialet), standard verdi er 7850 [kg/m^3]

Bøyebelastning oppstår når brønnbanen ikke er helt rett og borestrengen bøyes. Det kan oppstå tretthetsbrudd ved bøyebelastning over tid. Ved bøying av rør strekkes materialet på utsiden og komprimeres på innsiden av bøyen. Det er viktig at disse kreftene er innenfor flytgrensa til materialet.

Dreiemomentet til borestrengen påvirker kraften fra rotasjonsbordet eller *top-drive*, som roterer borestrengen. Dreiemomentet M_v målt i $[Nm]$ ved boring kan finnes ved:

$$M_f = \mu \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{Mv} \cdot n}{\sqrt{v_B^2 + (\pi \cdot D_{Mv} \cdot n)^2}} \cdot \frac{1}{2} \cdot D_{Mv} \cdot m_v \cdot a_v + \frac{\pi \cdot D_{Ms} \cdot n}{\sqrt{v_B^2 + (\pi \cdot D_{Ms} \cdot n)^2}} \cdot \frac{1}{2} \cdot D_{Ms} \cdot m_s \cdot a_s \right) \quad (2.6)$$

$$\approx \mu \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot D_{Mv} \cdot m_v \cdot a_v + \frac{1}{2} \cdot D_{Ms} \cdot m_s \cdot a_s \right) \quad (2.7)$$

$$M_v = M_f + M_B \quad (2.8)$$

Hvor:

- M_f : Dreiemomentet i borerørseksjonen og vektrørseksjonen $[Nm]$
- M_B : Dreiemomentet for borekrona mot formasjonen $[Nm]$
- μ : friksjonskoeffisienten
- m_v : masse av vektrør per meter $[kg/m]$
- m_s : masse av borerør per meter $[kg/m]$
- D_{Mv} : største diametere av vektrør (vanligvis rørdiameteren) $[m]$
- D_{Ms} : største diametere av borerør (koblingsboksene) $[m]$
- a_v : lengden av vektrørseksjonen $[m]$
- a_s : lengden av borerørseksjonen $[m]$
- v_B : borehastigheten - fremdrift av borekrona $[m/sek]$
- n : rotasjonshastigheten - omdreining pr. sekund $[m/sek]$

I ligning (2.7) forutsetter man at borehastigheten er liten i forhold til rotasjonshastigheten. Løftes borestrengen et par meter over brønnbunnen kan man se bort i fra dreiemomentet til borekrona M_B og får at dreiemomentet er $M_v = M_f$. Maksimal grense for dreiemomentet går fram av tiltrekningsmomentet, slik at ikke koblingsboksene i borerørene ryker.

Vibrasjonsbelastning kommer av hurtige svingninger i strekk, vridning og bøyebelastning. Vibrasjonene genereres av borestrengens rotasjon ved sleng, klatring på vegg og av vibrasjoner i borekrona fra ujevnheter i formasjonen.

Utmatningsbelastning skyldes en kombinasjon av de overnevnte belastningene. Selv om alle belastninger er innenfor belastningsgrensene, vil gjentatte belastninger over tid føre til utmatningsbrudd.

Overbelastning er et resultat av belastningene ovenfor, og ingen egen belastningstype. Ved overbelastning blir det betydelig svekkelse i strengmaterialet, utmatting og sprekkdannelser. Ved mistanke om overbelastning vil rørene bli inspisert og vurdert om de kan brukes.

3 Fysiske krefter

I dette kapitlet er en oversikt over de generelle fysiske kreftene som virker på dreiemomentet. Det er gjort mange studier på Coulomb friksjon ved dreiemomentmodellering ved boring, men det er ikke kjent noen studier på dynamisk dreiemoment, selv om det er observert en sammenheng. Dette kapitlet vil derfor gi et grunnlag for å anta en viskøs friksjon knyttet til observert dynamisk dreiemoment. Delkapittel 3.1 gir en enkel forklaring på hva et generelt dreiemoment er og gir forklarende ligninger på hvordan dette kommer fram. Delkapittel 3.2 gir en enkel forklaring på friksjonsfaktorer og dempekrefter. Betegnelse dempefaktor og friksjonsfaktor er her brukt for utregning av mekanikk ved boring, og er definert for kraftbalanse eller væskestrøm for ingeniørvitenskaplige beregninger. Delkapittel 3.3 gir en enkel oversikt på friksjonselementer for dreiemomentet ved brønnboring. Det er lagt vekt på viskøs friksjon for å få bakgrunn til å anta et dynamisk dreiemoment i forbindelse med brønnboring.

3.1 Generelle krefter for dreiemoment

Dette delkapitlet bygger på læremateriell og ligninger fra [3] og [4]. Dreiemomentet τ er kraftens evne til å forandre legemets rotasjon. Den kommer fram av ligning (3.1). Her kan man generelt si at kraft ganger arm gir dreiemoment.

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (3.1)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} \vec{\tau} &: \text{Dreiemomentet } [Nm] \\ \vec{F} &: \text{Kraften } [N] \\ \vec{r} &: \text{Radius mellom kraftens angrepspunkt og rotasjonscenteret } [m] \end{aligned}$$

Den basiske dynamiske relasjonen for den roterende bevegelse i ethvert system er netto ytre dreiemoment lik ytre forandring i drivmomentet. Dreiemomentet blir da definert som endringsrate per tid for drivmomentet \vec{L} , vist i ligning (3.2).

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (3.2)$$

Hvor:

$$\vec{L} : \text{Drivmoment } \left[\frac{kg \cdot m^2}{s} \right]$$

Et legeme som roterer om en fast symmetrisk akse kan uttrykkes som et produkt av treghetsmomentet I og vinkelhastigheten $\vec{\omega}$, vist i ligning (3.3).

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega} \quad (3.3)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} I &: \text{Treghetsmoment } [kg \cdot m^2] \\ \vec{\omega} &: \text{Vinkelhastigheten } \left[\frac{rad}{s} \right] \end{aligned}$$

For et stivt legeme som roterer om en kjent akse er treghetsmomentet definert som i ligning (3.4).

$$I \stackrel{\text{def}}{=} \int r^2 dm \quad (3.4)$$

Hvor:

m : Masse [kg]

r : Radius mellom massepunktet og rotasjonsaksen [m]

Vinkelhastigheten $\vec{\omega}$ er definert som vinkelforandring per sekund. Sett i sammenheng med rotasjon per minutt rpm , periode T eller frekvensen f kan man finne vinkelhastigheten, vist i ligning (3.5).

$$\omega = rpm \cdot \frac{2\pi}{60} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (3.5)$$

Hvor:

rpm : Rotasjon per minutt [$\frac{1}{m}$]

T : Perioden [s]

f : Frekvens [$\frac{1}{s}$]

Ved innsetting av ligningene til et uttrykk for dreiemomentet som tar hensyn til variasjon i rotasjonen per minutt, får man følgende ligning:

$$\tau = I \cdot \frac{d \cdot rpm \cdot \frac{2\pi}{60}}{dt} \quad (3.6)$$

3.2 Dempekonstant og friksjonskoeffisienter

Teorien i dette delkapittelet er hentet fra [5] og [9]. Ved første øyekast kan disse beregningene se ut som misvisende betegnelser, men det er underliggende fakta og begrunnelser for den unike mekaniske friksjonsfaktoren i boreindustrien. Friksjonskoeffisienten μ eller Coulomb-friksjon er definert som forholdet mellom friksjonskraften og normalkraften i et kontaktpunkt. Friksjonskoeffisienten er dimensjonsløs i et estimat for dreiemoment. Det er stor usikkerhet i modellering av friksjonen til en lang borestreng. Mange friksjonsfaktorer er ikke inkludert i de mekaniske friksjonsfaktorene, men har innvirkning på friksjonskoeffisienten. Store borekaks langs borestrengen, bukting på borestrengen, boreslamets egenskaper, væskens viskøse effekt, brønnhullets temperatur, trykk og uensartede geometriske forstyrrelser mellom borestrengen og brønnen. Dette er noen av de faktorene som ikke inngår direkte, men er inkludert som usikkerhet i modellen.

3.2.1 Viskøs friksjon

Mekaniske systemer er utsatt for friksjon og dempekrefter av mange arter. Viskøs friksjon gjelder om friksjonskraften er tilnærmet proporsjonal med legemets hastighet, vist i ligning (3.7).

$$F_f = D \cdot v_s \quad (3.7)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} F_f & : \text{Friksjonskraften [N]} \\ D & : \text{Dempekonstanten [N/(m/s)]} \\ v_s & : \text{Systemets hastighet [m/s]} \end{aligned}$$

3.2.2 Coulomb-friksjon

Friksjonskoeffisienten er, som tidligere nevnt, definert som forholdet mellom friksjonskraften og normalkraften i et kontaktpunkt, vist i ligning (3.8). Det er basert på tørr friksjon mellom to legemer og er uavhengig av hastigheten.

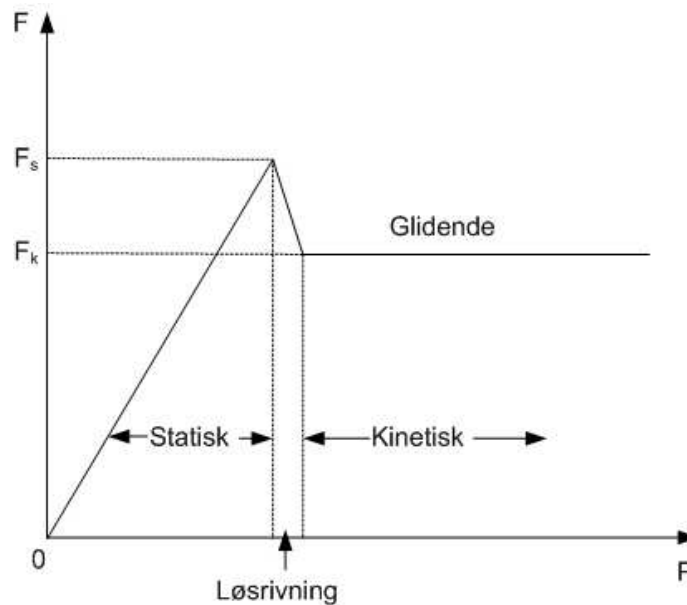
$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \quad (3.8)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} \mu & : \text{Friksjonskoeffisienten} \\ F_f & : \text{Friksjonskraften [N]} \\ F_n & : \text{Normalkraften [N]} \end{aligned}$$

3.2.3 Statisk friksjon

Statisk friksjon er kraften man påfører et system før det løsriver seg og forflytter seg, vist i figur 3.1.



Figur 3.1: Statisk og kinetisk friksjon ved friksjonskraften F som en funksjon av drakraften P .

Friksjonskraften et objekt har før det starter å bevege seg er større enn friksjonen det har når det forflyttes. Statisk friksjonskoeffisient er forholdet mellom overstående motstandskraft og normalkraften, vist i ligning (3.9)

$$\mu_s = \frac{F_{sf}}{F_n} \quad (3.9)$$

Hvor:

- μ_s : Statisk friksjonskoeffisient
- F_{sf} : Overstående motstandskraft [N]
- F_n : Normalkraften [N]

3.2.4 Kinetisk friksjon

Kinetisk friksjon er kraften man må påføre et system for å holde det i bevegelse, vist i figur 3.1. Den kinetiske friksjonskraften inkluderer ikke rulling eller spinning, men er basert på glidebevegelse av et objekt. Kinetisk friksjonskoeffisient har vanligvis mindre størrelse enn

den statiske friksjonskoeffisienten.

$$\mu_k = \frac{F_{kf}}{F_n} \quad (3.10)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} \mu_k &: \text{Kinetisk friksjonskoeffisient} \\ F_{kf} &: \text{Glidemotstandskraft [N]} \\ F_n &: \text{Normalkraften [N]} \end{aligned}$$

3.2.5 Rullefriksjon

Rullefriksjon er friksjon som oppstår når et legeme ruller på et annet. Denne friksjonskoeffisienten er basert på empiriske målinger for rullemotstandskrafta. Typisk er mindre enn kinetisk friksjon.

$$\mu_r = \frac{F_{rf}}{F_n} \quad (3.11)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} \mu_r &: \text{Rullefriksjonskoeffisienten} \\ F_{rf} &: \text{Rullemotstandskraft [N]} \\ F_n &: \text{Normalkraften [N]} \end{aligned}$$

3.2.6 Friksjonsvinkel

Tangenten til vinkelen for friksjonen er lik den statiske friksjonskoeffisient, også kalt friksjonsvinkelen. Det er vinkelen mellom produktet til kraften på overflaten og normalkraften når glidefriksjonen på overflaten er overhengende, vist i ligning (3.12).

$$\varphi = \tan^{-1}(\mu_s) \quad (3.12)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} \varphi &: \text{Friksjonsvinkelen} \\ \mu_s &: \text{Statisk friksjonskoeffisient} \end{aligned}$$

ligning (3.12) er gjeldende hvis et objekt har konstant fart, men for et akselererende objekt er den kinetiske friksjonskoeffisienten gjeldende, vist i ligning (3.13).

$$\mu_k = \tan(\varphi) - \frac{a_x}{g \cdot \sin(\varphi)} \quad (3.13)$$

Hvor:

$$\begin{aligned} \mu_k &: \text{Kinetisk friksjonskoeffisient} \\ \varphi &: \text{Friksjonsvinkelen} \\ a_x &: \text{Akselerasjon [m/s}^2\text{]} \\ g &: \text{Tyngdens akselerasjon [m/s}^2\text{]} \end{aligned}$$

3.3 Friksjonselementer for dreiemoment

Teorien i dette delkapittelet er hentet fra [1], [9] og [12]. Friksjonsfaktorene som har direkte innvirkning på dreiemomentet kan være svært mange, her er noen eksempler:

- Boreslamets type og viskøse effekt.
- Borehullsknekker (*doglegs*) og spalTEGRaver (*key-holes*).
- Borehullets kurvatur, torsjon, bøyning og diameter.
- Skarphet mellom borestrengen og brønnbanen.
- Bøyningsstivheten til borestrengen.

Friksjonskreftene er innenfor rimelighetens grenser selv for lange horisontale brønnbaner, men de er også en grense som avgjør lengden på brønnen. Feltefaring har vist at aksial drakraft er redusert når borestrengen roterer. Slik at friksjonskreftene blir regnet som vektorer i motsatt retning for rotasjonen. Dette gjelder også for den viskøse friksjonen, som er forklart i delkapittel 3.3.1. Et viktig element for å komme fram til dreiemomentet på borestrenger er å eliminere dreiemomentet fra borekrona, forklart i delkapittel 3.3.2. Bukting av borestrengen er forklart i delkapittel 3.3.3. Det er forklart hvordan en *Torque and Drag*-modell finner dreiemomentet fra normalkrefta til et legeme i delkapittel 3.3.4.

3.3.1 Boreslammets viskøse effekt

Teorien til beregningene som her er representert har bakgrunn fra [8] og [13], hvor notasjonen er ulik ligningene i læremateriellet. Fra observasjoner er det en relasjon mellom rotasjonen og dreiemomentet. Det dynamiske dreiemomentet skal således beregnes og det antas en viskøs friksjon som vist i ligning (3.7). For tyntflytende væsker er det lav viskositet mens for tyktflytende væsker er det høy viskositet. I hovedsak er det to strømningsforhold til væsken, laminær og turbulent strømning, vist i figur 3.2.



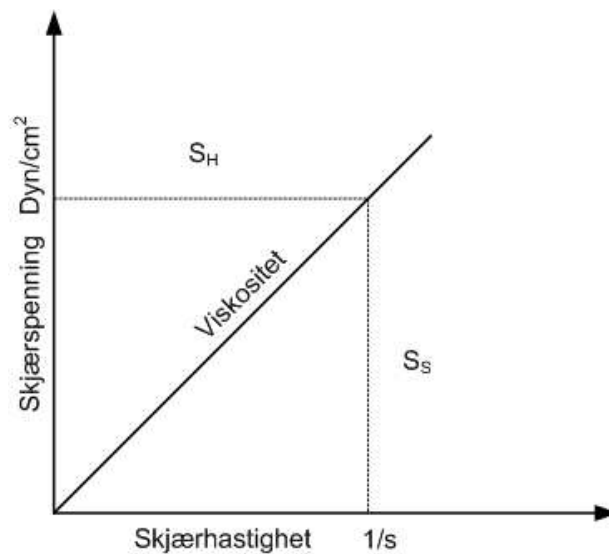
Figur 3.2: A - Turbulent strømning, B - Laminær strømning.

Om væsken renner gjennom et rør ved hjelp av trykk eller gravitasjonskraft, og alle partiklene i væsken beveger seg i parallelle rette linjer er det en laminær strømning. Hvis væskepartikle-

ne får innbyrdes roterende og uordnet bevegelse, hvor den enkelte væskepartikkel ikke følger aksens av røret, er det en turbulent strømning. Kraften som presser vinkelrett på væskens bevegelsesretning per arealenheter kalles for skjærspenning S_S . Hastigheten til væskepartiklene i laminær strømning er ikke lik i et rør, men forandrer seg fra 0 nærmest rørveggen til maksimum i rørets akse. Hastighetsforskjellen dividert på avstanden mellom de kalles for skjærhastighet S_H . Det er brukt to forskjellige teoretiske væskemodeller for viskositet. Det er Newton og Bingham plastisk væske. Bingham modellen passer godt med boreslam tilnærming fordi det sies at boreslam oppfører seg som Bingham væske. Det gir en vanskeligere modell for dreiemomentetberegning og er vanskeligere å analysere enn newtonsk væske. Derfor tas det først utgangspunkt i Newtonsk væske.

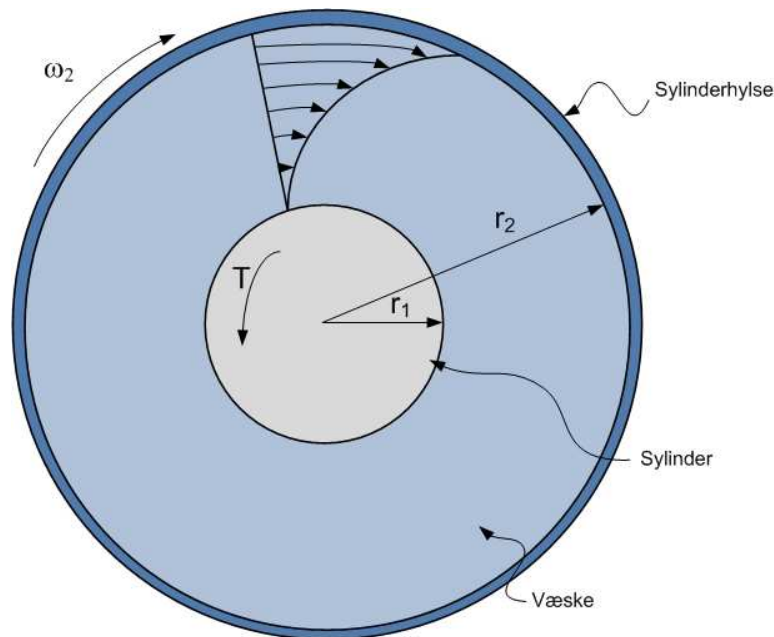
Newtonsk væske ble først studert av Newton, og han viste at viskositetkoeffisienten kan karakterisere flyteegenskapen til væsken helt ut for alle skjærhastigheter. Viskositetkoeffisienten omtales her som væskens viskositet. Definisjonen til viskositeten η for en Newtonsk væske er vist i ligning (3.14) og figur 3.3.

$$\eta = \frac{S_S}{S_H} \quad (3.14)$$



Figur 3.3: Reogram for en Newtonsk væske.

For å beregne en viskøs friksjon brukes ofte en konsentrisk sylinder som roterer inne i en hylse med viskøs masse. Et viskometer hvor ytre hylse roterer viser seg å gi en høyere skjærspenning enn roterende indre sylinder. Det er tatt utgangspunkt i roterende ytre sylinderhylse fordi det er kun den laminære strømningen som kan forklares analytisk. Denne modellen gir større analytisk grunnlag for friksjonskraften. Dette viskometeret er vist i figur 3.4.



Figur 3.4: Viskometer

Siden det er en ulineær skjærspenning med forandring i radius, er væskehastigheten en funksjon av radius og vinkelhastighet, vist i ligning (3.15).

$$v = r \cdot \omega \quad (3.15)$$

Forandringen i farten v med hensyn til radius r er lik skjerhastigheten gitt ved:

$$S_H = \frac{dv}{dr} = r \cdot \frac{d\omega}{dr} \quad (3.16)$$

Betingelsen for dette uttrykket er at væsken ikke sitter fast mellom radiuslagene som en kompakt væske med lik fart. Figur 3.4 viser at vinkelhastigheten til sylinderhylsa er større enn 0 ($\omega_2 > 0$ [rad/s]), mens den indre sylinderen er i ro ($\omega_1 = 0$). Dreiemomentet T på sylinderen virker i motsatt retning til dreiningen av sylinderhylsa og måles på lagene som følger av orden på radiusen. Dreiemomentet T er relatert til væskens skjærspenningen og en radius r mellom sylinderadiusen r_1 og sylinderhylseradiusen r_2 ved følgende ligning:

$$T = S_S \cdot (2\pi \cdot r \cdot h) \cdot r \quad (3.17)$$

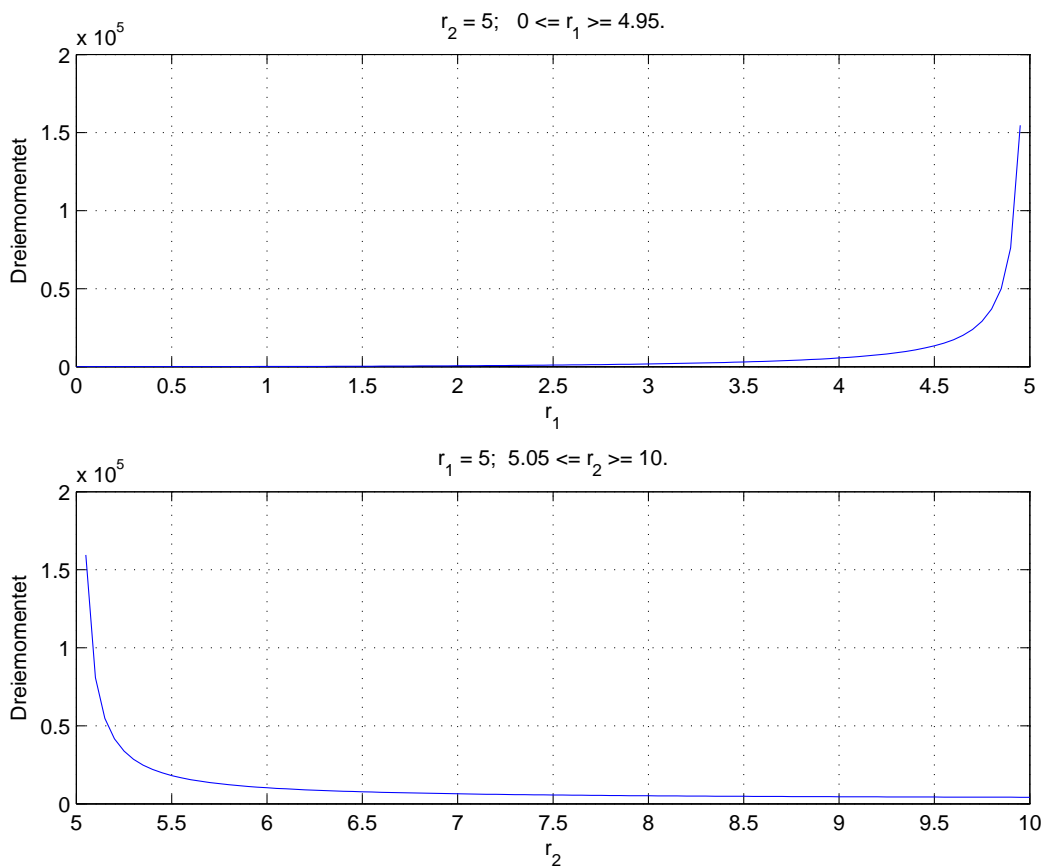
På bakgrunn av denne informasjonen er det utviklet et uttrykk for dreiemomentet som funksjon av viskositet til en newtonsk væske, høyden til sylinderene, radiusforskjellene til sylinderene og hastigheten på sylindereskallet. Utregningene er vedlagt i vedlegg A. Resultatet av utregningene er vist i ligning (3.18).

$$T = \frac{\eta \cdot 4 \cdot \pi \cdot h \cdot \omega_2}{\left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2}\right)} \quad (3.18)$$

Utrekningene knyttet til ligning (3.18) viser at dreiemomentet for en viskøs væske er gitt ved radius mellom indre og ytre sylinder og rotasjonsraten i et viskometer. Viskositeten, høyden på sylinderene og farten på sylindereskallet blir holdt konstant for en newtonsk væske, mens en av sylinderene varierer og en er konstant med hensyn til ligningen. Resultatet er vist i figur 3.5, hvor koden er vedlagt i vedlegg E.1.

Med innsatt:

$$\begin{aligned}\eta &= 1 && [cp] \\ h &= 1 && [m] \\ \omega &= 10 && [rad^{-1}]\end{aligned}$$



Figur 3.5: Dreiemomentet for et konsentrisk viskometer med forskjellige radius.

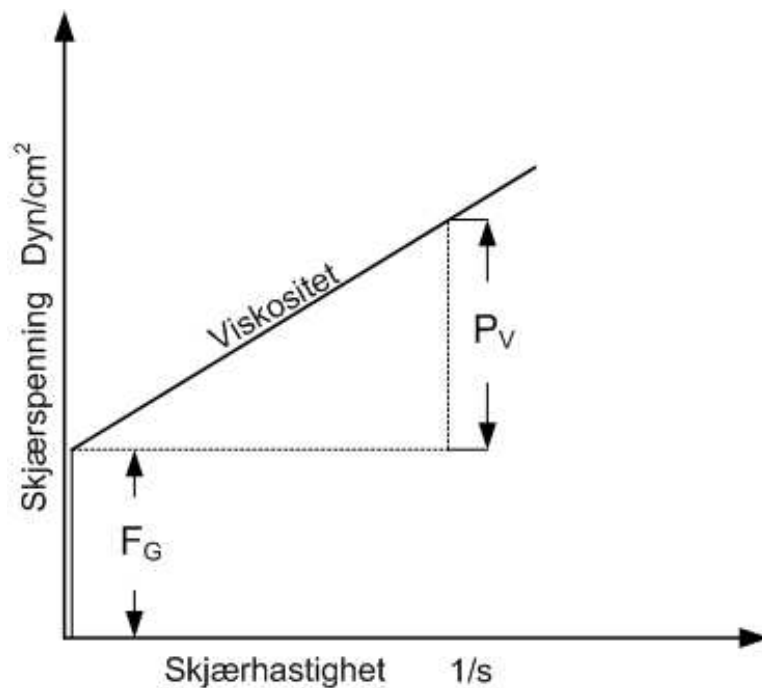
Som man kan se i figur 3.5 varierer dreiemomentet i forhold til radiusdifferansen mellom sylinderene for et viskometer. Ved liten radiusdifferanse mellom sylinderene akkumuleres større viskøs friksjon. Intuitivt kan man si at ved eksentrisitet fås større viskøs friksjon, uten at det kan begrunnes ytterligere i denne oppgaven.

Om den indre sylinderen roterer og den ytre sylinderhylsen holdes i ro vil grenseverdien endres i ligning (A.5). Ligningen blir dermed lik som vist i ligning (3.19). Ellers er ligningen

lik som vist i ligning (3.18).

$$T = \frac{\eta \cdot 4 \cdot \pi \cdot h \cdot \omega_1}{\left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2}\right)} \quad (3.19)$$

Bingham plastisk væske inneholder typisk større partikler enn molekyler, og vil derfor ikke direkte oppføre seg som Newtonsk væske. Den har to karakteriserte egenskaper, den første er at væsken trenger en endelig skjærspenning for å få væsken i bevegelse. Det er fordi partiklene i væsken har en tendens til å bygge en struktur. Den andre egenskapen er at væsken vil oppføre seg som newtonsk væske når denne skjærspenningen overskrides. Denne grenseverdien kalles for flytspenning F_G . Den plastiske viskositeten P_V setter i gang over flytgrensen og gir skjærspenning på en måleenhet, vist i figur 3.6.

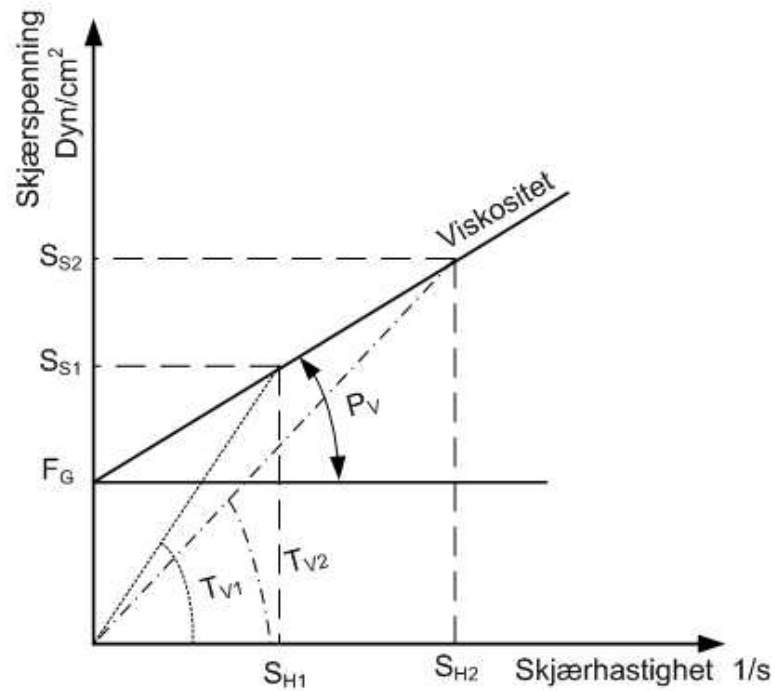


Figur 3.6: Reogram for en Bingham plastisk væske.

Dette gir ligning (3.20) som uttrykk for skjærspenningen.

$$S_S = F_G + P_V \cdot S_H \quad (3.20)$$

Det brukes ofte et begrep som tilsynelatende viskositet T_V om en slik væske fordi en først antar Newtonsk væske. Figur 3.7 viser tilsynelatende viskositeter ved to skjærhastigheter S_{H1} og S_{H2} . Tilsynelatende viskositet avtar når skjærhastigheten øker.



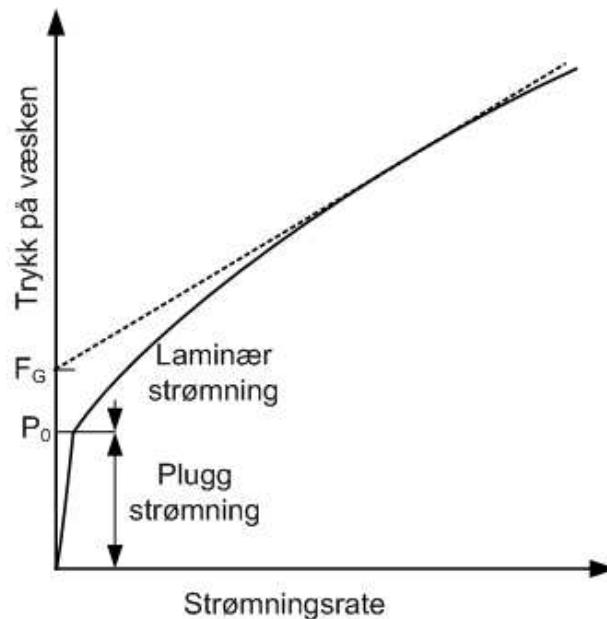
Figur 3.7: Tilsynelatende viskositet T_V for en Bingham plastisk væske.

Basert på figuren kan man finne tilsynelatende viskositet T_V ved å bruke noen enkle formler vist i ligning (3.21).

$$\begin{aligned}
 T_{V1} &= \frac{S_{S1}}{S_{H1}} \\
 &= \frac{S_{S1} - F_G}{S_{H1}} + \frac{F_G}{S_{H1}} \\
 &= P_V + \frac{F_G}{S_{H1}}
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Således kan man komme fram til tilsynelatende viskositet ved sum av to bidrag; plastisk viskositet og strukturviskositet $\frac{F_G}{S_{H1}}$. Strukturviskositeten er proporsjonal med flytegrensen og representerer motstanden væsken yter mot strømmingen. Den får et mindre og mindre bidrag ettersom skjærhastigheten øker. Det er derfor viktig å oppgi skjærhastigheten når tilsynelatende viskositet brukes for å få en meningsfull variabel.

Observert har trykket i væsken en innvirkende egenskap sett i forhold til strømningsraten for en tilnærmet Bingham plastisk væske [13]. Når trykket når en minstegrense P_0 på væsken, brytes strukturen og går langsomt over i laminær strømming, vist i figur 3.8.



Figur 3.8: Observert reogram for en væske med tilnærmet like egenskaper som en Bingham plastisk væske.

Det lykkes ikke i denne oppgaven å lage et uttrykk for dreiemomentet basert på et viskometer ved bruk av Bingham plastisk væske. Antar man at trykket i boreslammets er over minstegrensen P_0 og boreslammets egenskaper er lik som Bingham plastisk væske, fås en laminær strømning.

3.3.2 *Rotation off bottom (ROB)*

Friksjon fra borekrona ved rotasjon på brønnbunnen er en vesentlig størrelse for det totale dreiemomentet. Ved ROB kan denne friksjonskraften fra borekrona neglisjeres. Man kan da si at det er dreiemomentet på resten av borestrengen som utgjør all friksjonskraft.

3.3.3 Bukling på borestreng

Kontakt mellom brønnbanen og borestrengen gir større friksjon og kan i utgangspunktet betraktes som Coulomb-friksjon. Friksjonskraften virker nedover når borestrengen trekkes oppover og øker aksiell strekk i strengen. Større strekk i strengen øker kontakt i et område der brønnveggen avviker fra rett linje. Skyves strengen nedover virker friksjonskreftene i motsatt retning og gjør aksiell strekk mindre. Buklinger på borestrengen kan da forekomme. Buklinger eller buktinger av borestrengen langs brønnbanen kan tenkes som rør som komprimeres og derfor presses ut fra senter av akselen og inn i brønnveggen. En borestreng kan komprimeres

aksielt uten å bukle. Når aksiell kraft gir et bøyemoment som overstiger borestrengens evne til å rette seg opp vil bukling inntreffe. Turbulent strømming av boreslam og kontakt mellom borestreng og brønnveggen skaper da større friksjonsmotstand. Buklingen reduseres ved mindre kompresjon i borestreng som for eksempel ved mindre vekt på borekrona eller ROB.

3.3.4 *Torque and Drag*-modellen

Torque and Drag-modeller er basert på normalkrafta til borestreng for en gitt lengde som gir like mye friksjon ved å dra borestreng som å rotere den. Dermed kan dreiemomentet beregnes og blir estimert på en brukbar måte. Det blir ikke tatt med den viskøse friksjonen ved en slik modell. På SINTEF har de en diskret modell for *Torque and Drag* som det dynamiske dreiemomentet skal implementeres som en del. Det er derfor viktig for oppgaven å få et uttrykk for dynamisk dreiemoment som kan inngå i denne modellen. Det er i vedlegg C henvist til en kontinuerlig *Torque and Drag*-modell som indikerer modellens komplekse oppsett. Denne modellen er kun til orientering for spesielt interesserte og brukes ikke videre i oppgaven.

4 Forbehandling av datasett i Matlab

Datasettene som er brukt i dette prosjektet er i utgangspunktet rådatafiler i .las-format. Disse filene inneholder sensitiv informasjon om brønn og boreutstyr, og operatørselskapene ønsket derfor å anonymisere dataene presentert i denne rapporten. Den informasjonen som ble igjen etter anonymiseringen ble lagt inn i Excel-filer. Totalt ble det laget 42 Excel-filer, men grunnet mangler av vesentlige parametre har totalt 9 Excel-filer blitt slettet. Det er likevel bare 7 av filene som er lagt til grunn for resultatene i dette prosjektet. Kapittel 4.1 gir en beskrivelse av datasettene, mens kapittel 4.2 tar for seg hvordan datasettene blir behandlet i Matlab.

4.1 Beskrivelse av datasett

De Excel-baserte datasettene ble laget etter en bestemt mal slik at de automatisk kan åpnes i Matlab. Datasettene er derfor laget med variablene som vist i tabell 4.1. variablenavnene er forkortende uttrykk som her blir gjort rede for.

Tabell 4.1: En oversikt over borevariablene brukt i dette prosjektet

Navn	Beskrivelse:
TIME	Timer, minutt og sekunder
DATE	Dato, måned og år
DEPTH	Dybden til borekrona
RPM	Rotasjon pr. min
TRQ	Dreiemomentet
WOB	Vekt på borekrona
HKLD	Vekt av hele borestrengen
ROP	Borehastighet
BPOS	Posisjonen til <i>top drive</i>
BVEL	Blokkhastigheten, <i>block velocity</i>
SPP	Strømingstrykket, <i>stand pipe pressure</i>
FLOW	Strømningshastigheten

Karakteristiske trekk for datasettene er at alle inneholder verdier for variablene TRQ og RPM. Variablene uten verdi lastes inn til Matlab som NaN-verdi (*Not a Number*). Det er mange datasett som mangler variabelverdier og derfor ble det laget en generell oversikt av datasettene som vist i tabell 4.2. Tabellen viser karakteristiske trekk for hvert enkelt datasett, slik at det er lettere å kjenne dem igjen. For dette prosjektet betyr manglende variabelverdier og datapunkt at mange filer må vrakes.

Tabell 4.2: En oversikt over de forskjellige datasettene.

Navn	Sampler	Beskrivelse av datasett:
Bronn1	6609	Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn2	551	Problem med høy TRQ. Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL
Bronn3	1818	TRQ øker når RPM avtar. Lineær DEPTH. Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL.
Bronn5	2516	Stabil TRQ tross svingende RPM. Lineær DEPTH. Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL.
Bronn6	2432	TRQ følger RPM. Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn7	2527	Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn8	4435	Noe høy TRQ følger RPM. Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn10	5170	Variierende TRQ for stabil RPM. Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn11	5354	Jevnt økende TRQ med minkende RPM. Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn12	7299	Variierende TRQ for nokså stabil RPM. Mangler TIME, DATE, HKLD, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn14	8168	TRQ øker jevnt men faller ved høyere SPP. Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn15	8181	TRQ øker jevnt, følger SPP, RPM og WOB. Mangler TIME, DATE, HKLD, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn16	9046	Jevnt økende TRQ tross stabil RPM. Mangler TIME, DATE, HKLD, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn17	7055	Unormal peak i TRQ. Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH
Bronn18	9985	Høy peak i ROP. Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH.
Bronn19	57599	Mangler BVEL.
Bronn21	51347	Mangler BVEL.
Bronn22	52686	Mangler BVEL. Vekselvis bruk av RPM.
Bronn23	47700	Har alle variabler.
Bronn24	47159	Mangler BVEL.
Bronn26	36351	Mangler BPOS og BVEL.
Bronn27	34048	Mangler BPOS og BVEL.
Bronn29	47418	Mangler ROP, DEPTH og BVEL.
Bronn30	30959	Har alle parametre.
Bronn31	21060	TRQ får en høy verdi. Har alle parametre.
Bronn32	20386	Har alle variabler. Et lite område NaN.
Bronn33	20957	TRQ øker jevnt. Mangler TIME, DATE, HKLD, BPOS og BVEL. Lineær DEPTH.
Bronn35	18722	Negativ peak i DEPTH. Har alle variabler.
Bronn36	16797	Variierende TRQ mot RPM. Har alle parametre.
Bronn37	18504	Mangler TIME, DATE, BPOS og BVEL.
Bronn38	14944	TRQ uforståelig, ikke lik tidligere datasett. Har alle variabler.
Bronn40	65481	Har alle parametre.
Bronn41	65477	Har alle parametre.

Det er ikke alle datasettene som kan brukes i modelleringen til dynamisk dreiemomentestimaterne i dette prosjektet, fordi de fleste datasettene mangler nok variasjon i rotasjonsrate eller har for få datapunkt for hver dybdeenhet til å få resultater. Det er totalt 7 datasett som gir grunnlag for resultatene i dette prosjektet. Vist i tabell 4.3.

Tabell 4.3: En oversikt over de forskjellige datasettene brukt i dette prosjektet.

Datasett	Brønndybde	Borekrone	Casing	Boreslamtype	Inklinasjon
Bronn19.xls	1900-3455mMD	8 $\frac{1}{2}$ "-PCD	10 $\frac{3}{4}$ "	Oljebasert	84-90.5°
Bronn21.xls	2928-3710mMD	8 $\frac{1}{2}$ "-PCD	9 $\frac{5}{8}$ "	Oljebasert	17.3-47.06°
Bronn27.xls	2542-3472mMD	8 $\frac{1}{2}$ " × 9 $\frac{1}{2}$ "	9 $\frac{5}{8}$ "	Oljebasert	68.64-69.44°
Bronn31.xls	2113-3151mMD	12 $\frac{1}{4}$ "-PCD	13 $\frac{3}{8}$ "	Vannbasert	7.8°
Bronn32.xls	584-1362mMD	17 $\frac{1}{2}$ "-RCB	20"	Vannbasert	52.9°
Bronn40.xls	4155-4934mMD	6"-PCD	??	Oljebasert	80.69-88.8°
Bronn41.xls	3056-4351mMD	6"-PCD	??	Oljebasert	67.71-93.22°

Brønndybden gir en indikasjon på hvor lang borestrengen er i hvert datasett. Strekk er ikke tatt med i beregningen av lengden. Borekronene som er brukt i disse datasettene er i hovedsak PCD-borekroner med unntak av Brønn32.xls der det er brukt rullmeiselkrone (RCB). Casing er foringsrørdiameteren til den aktuelle brønndybde i datasettet. Type boreslam varierer ofte under boringen, men i hovedsak er det basert på vann eller olje. Inklinasjonen til borestrengen forteller hvilken avviksvinkel det er innenfor de aktuelle brønndybde til datasettene.

4.2 Utvikling av Matlab-kode

For å analysere datasettene i Matlab er det utviklet kode for preprosessering av dataene. Denne koden gjør alt fra innlasting av data, fjerning av uteliggere, fjerning av NaN, fjerning av dynamikk, til sammenligning av datasett før og etter behandling. Grunnen til at Matlab ble benyttet som databehandlingsverktøy framfor Excel er fordi Matlab har flere funksjoner til databehandling. Dette kapitlet tar for seg hver enkelt elementær del av koden i separate delkapitler, men selve modelleringen med tilhørende Matlabkode kommer i kapittel 5.

4.2.1 Laste inn data i Matlab

Basert på Excel-filene beskrevet i kapittel 4.1 ble det laget kode som laster Excel-data over til Matlab. Dette blir gjort ved bruk av følgende kode:

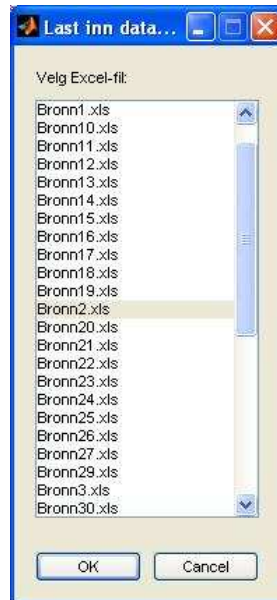
```
%% laster inn data fra fil
clear all
close all
clc
% Bruker listdlg for å velge .xls fil fra en liste
d = dir;
str = {d.name};
nr = listdlg('Name', 'Last_inn_data_fra_Excel_fil', ...
            'PromptString', 'Velg_Excel_fil:', ...
            'SelectionMode', 'single', ...
            'ListString', str);
bronn = cell2str(str(nr));
% Må fjerne tegnene ; og ' for at filimp.m skal kunne lese fila
l=length(bronn);
bronn(l)=[];
bronn(l-1)=[];
bronn(1)=[];
% Laster data fra Excel-fila inn i tabellen raw_data
raw_data = filimp(bronn);
```

Hvor filimp er gitt ved:

```
function [Data] = filimp(navn)
raw_data = importdata(navn);
% Fjerner datapunkt med verdi -999.25
ikke_maaling = find(raw_data.data(:, :) == -999.25);
raw_data.data(ikke_maaling) = NaN;
Data = raw_data.data;
```

Ved å kjøre denne koden vil en dialogboks, vist i figur 4.1 åpnes. Her kan en velge hvilket datasett en ønsker å jobbe med. Når datasettet er valgt vil funksjonen `filimp` laste dataene i Excel-fila inn i en tabell i Matlab, kalt `raw_data`. Funksjonen `filimp` er en enkel egenutviklet funksjon som bruker Matlab-funksjonen `importdata` til å hente data fra Excel. I tillegg

fjerner filimp datapunkter som ikke er målinger, det vil si datapunkter med verdi -999.25 . Disse punktene blir satt lik NaN slik at lengden til datasettene ikke forandres.



Figur 4.1: Liste over hvilke datasett som er tilgjengelig.

Når Excel-dataene er lastet inn i `raw_data` får hver kolonne et variabelnavn som tilsvarer borevariablene i Excel. Hvordan dette er gjort er vist i ruten nedenfor.

```
%% Deklarerer borevariablene
lengde = length(raw_data(:,1));
TIME = (1:lengde)'; % Samplepunkt
DATE = raw_data(:,2);
DEPTH = raw_data(:,3);
RPM = raw_data(:,4);
TRQ = raw_data(:,5);
WOB = raw_data(:,6);
HKLD = raw_data(:,7);
ROP = raw_data(:,8);
BPOS = raw_data(:,9);
BLEV = raw_data(:,10);
SPP = raw_data(:,11);
FLOW = raw_data(:,12);
```

Tid- og datoformat i Excel er annerledes enn i Matlab, og dermed må det gjøres litt programmering for å få samme tidsakse i Matlab som i Excel. Siden tid og dato mangler i mange av datasettene er det valgt å heller bruke samplepunkt som tidsvektor, gitt som variabelen `TIME`.

4.2.2 Fjerne NaN-verdier og uteliggere

En stor del av datasettene inneholder NaN-verdier. Disse verdiene er et problem ved bruk av funksjoner i Matlab, og derfor må disse fjernes. Dette blir gjort ved bruk av funksjonen `fjerne_nan`. Denne blir brukt på følgende måte:

```
[TIME_TRQ_uten_nan TRQ_uten_nan nan_TRQ] = fjerne_nan(TRQ);
```

Inndata til funksjonen er en av variabelne som er deklartert tidligere i koden. Funksjonen returnerer den samme variableen uten NaN-verdier sammen med en korresponderende tidsvektor som stemmer overens med variabelen. Det vil si at tidsvektoren har samme lengde som variabelen slik at de kan plottes mot hverandre. Koden til `fjerne_nan` vises nedenfor.

```
function [tid data_uten_nan antall] = fjerne_nan(data_med_nan)
% Finner lengde på datasettet
lengde = length(data_med_nan);
% Lager en samplevektor
tid = (1:lengde)';
% Finner NaN og setter de punktene med NaN lik []
nan = find(isnan(data_med_nan));
data_med_nan(nan) = [];
data_uten_nan = data_med_nan;
% Setter de tilhørende samplepunkt lik [];
tid(nan) = [];
antall = length(nan);
end
```

I tillegg til å returnere variabelen med tilhørende tidsvektor, returnerer funksjonen også en variabel med hvor mange NaN-verdier som ble fjernet i den aktuelle variabelen. Når koden blir kjørt blir dette presentert på skjermen ved bruk av en dialogboks vist i figur 4.2. Se vedlegg for kode.



Figur 4.2: Antall NaN fjernet i de forskjellige variablene.

I tillegg til å fjerne NaN-verdier, må også uteliggere fjernes. Foruten de uteliggerne som fjernes manuelt ved analyse, kan uteliggere i form av unormalt store verdier fjernes ved bruk av kode i Matlab. Til dette formålet er det utviklet en funksjon kalt `fjerne_peaks`. Funksjonen blir brukt på følgende måte:

```
[TIME_TRQ_uten_nan TRQ_uten_nan]=fjerne_peaks(TRQ_uten_nan,50);
```

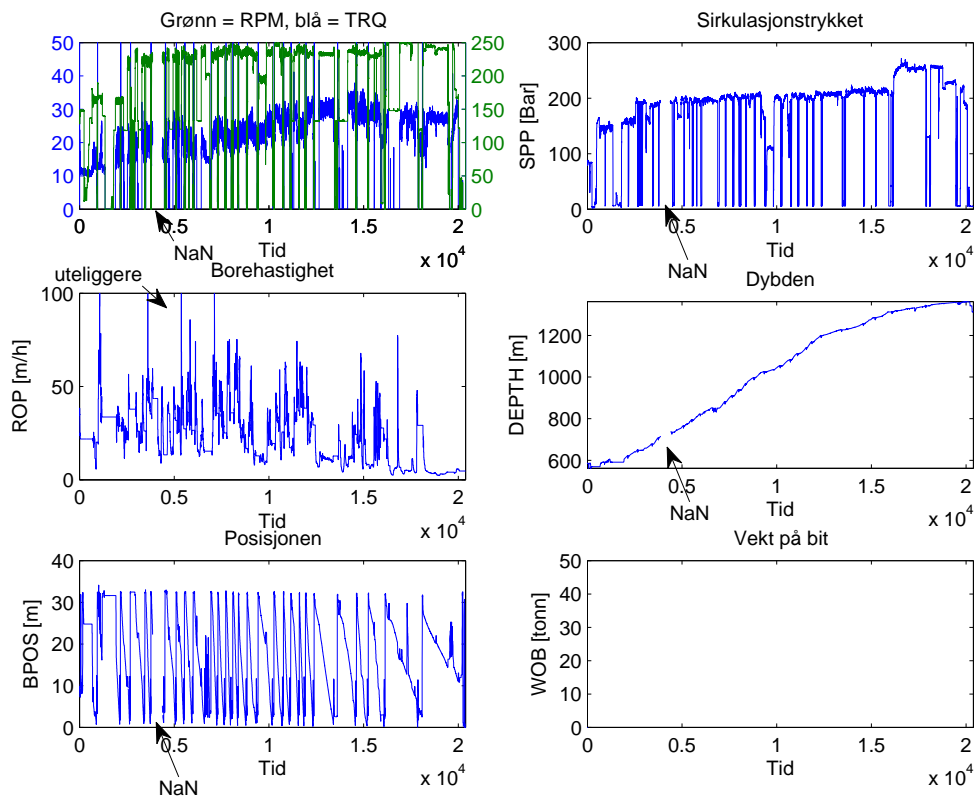
Denne funksjonen finner gjennomsnittet til datapunktene i den aktuelle variableen. Basert på gjennomsnittet fjerner funksjonen alle datapunktene som er utenfor intervallet, vist i ligning (4.1).

$$(\text{gjennomsnitt} - \text{delta}) < \text{datapunkt} < (\text{gjennomsnitt} + \text{delta}) \quad (4.1)$$

På samme måte som `fjerne_nan` returnerer `fjerne_peaks` den aktuelle variabelen uten peaks sammen med en tilhørende tidsvektor som stemmer overens med variabelen. Koden til `fjerne_peaks` er vist nedenfor

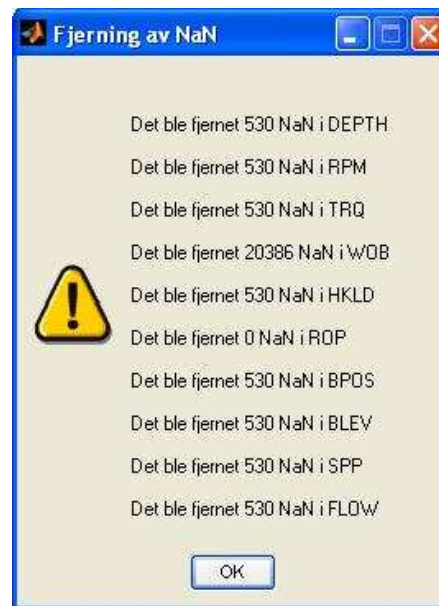
```
function [tid data_uten_peaks]=fjerne_peaks(data_med_peaks, delta)
% Finner lengde på datasettet
lengde = length(data_med_peaks);
% Lager en samplevektor
tid = (1:lengde)';
% Finner gjennomsnittet til datasettet
gjsnitt = mean(data_med_peaks);
% Finner lokasjonene til de unormalt store verdiene
peaks = find(data_med_peaks>(gjsnitt+delta)...
| data_med_peaks<(gjsnitt-delta) );
data_med_peaks(peaks) = NaN;
data_uten_peaks = data_med_peaks;
tid(peaks) = NaN;
end
```

Erfaringer med datasettene viser at alle datasettene inneholder NaN og/eller uteliggere. Figur 4.3 viser et sett med rådata.



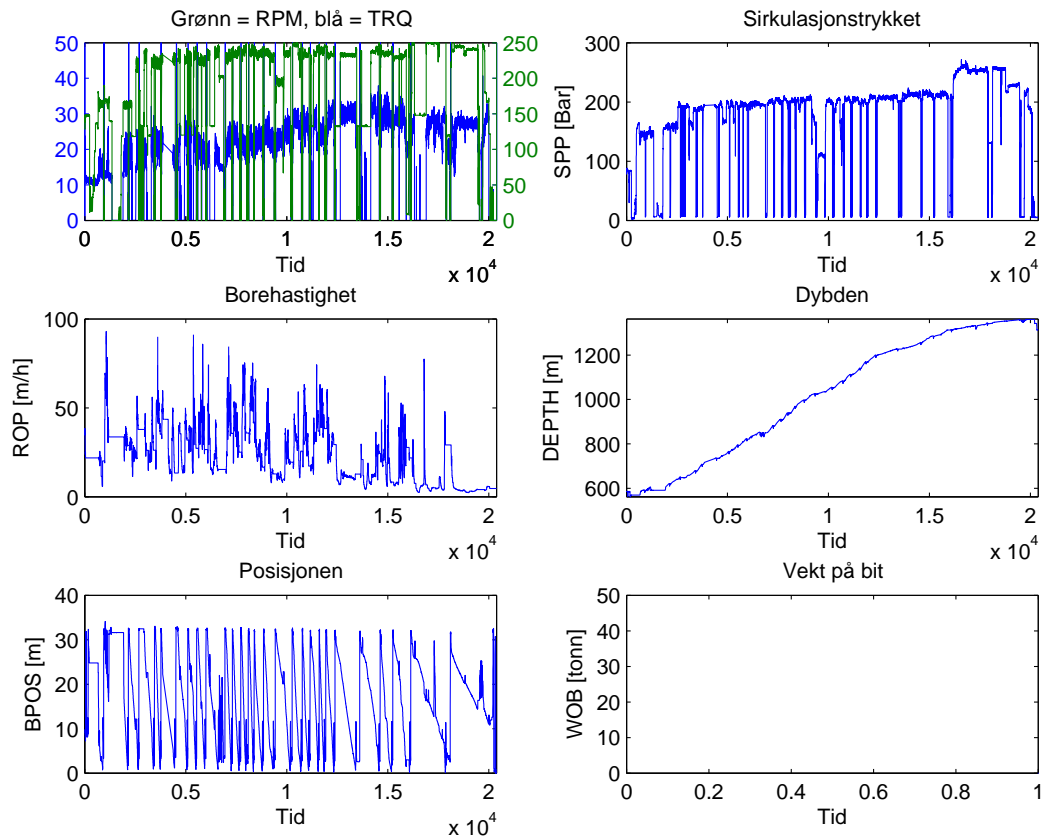
Figur 4.3: Plott av rådata som inneholder NaN og uteliggere.

Som en kan se inneholder dette datasettet fire variabler med NaN-verdier. variabelen ROP inneholder også unormalt store verdier som går langt utenfor de faste aksene. Disse problemene kan fikses ved bruk av funksjonene `fjerne_nan` og `fjerne_peaks`. Når datasettet blir behandlet av disse funksjonene kommer en dialogboks med informasjon om hvor mange NaN-verdier som ble fjernet i hver variabel, vist i figur 4.4.



Figur 4.4: Dialogboks som forteller hvor mange NaN som blir fjernet.

Som en kan se er det altså fjernet 530 datapunkter i de fleste variablene. Dette er det området som er vist med piler i figur 4.3. I variabelen WOB er det fjernet 20386 datapunkter, noe som kan tyde på at denne variabelen ikke er med i dette datasettet. Etter at behandlingen er gjort blir resultatet som vist i figur 4.5.



Figur 4.5: Plott av behandlet datasett.

NaN-verdiene er fjernet i både tidsvektoren og den aktuelle variabelen, derfor vil det gå en rett linje mellom hver side av det åpne området for å binde datapunktene sammen. Uteliggerne i ROP blir også fjernet.

4.2.3 Filtrering

Mange variabelsett inneholder mye støy. For å få et jevnt datasett uten for mye dynamikk kan et lavpassfilter uten faseforringelse brukes. Til dette formålet kan man bruke følgende kode:

```
%% Filtrerer TRQ_uten_nan
N          = 4;
Wn         = 0.15;
[B,A]      = butter(N,Wn);
TRQ_filt   = filtfilt(B,A,TRQ_uten_nan);
```

Først brukes et *Butterworth*-filterdesign med funksjonen $[B, A] = \text{butter}(N, W_n)$, for å finne filterkoeffisientene i vektorene B (teller) og A (nevneren). Filteret designer et N 'te ordens lavpassfilter og returnerer filterkoeffisientene til vektorer som er $N + 1$ lange. Typisk for dette filterdesignet er å ha en frekvensrespons som er så flat som matematisk mulig i passband. Knekkfrekvensen W_n må være innenfor $0.0 < W_n < 1.0$, hvor 1.0 tilsvarer nyquistfrekvensen.

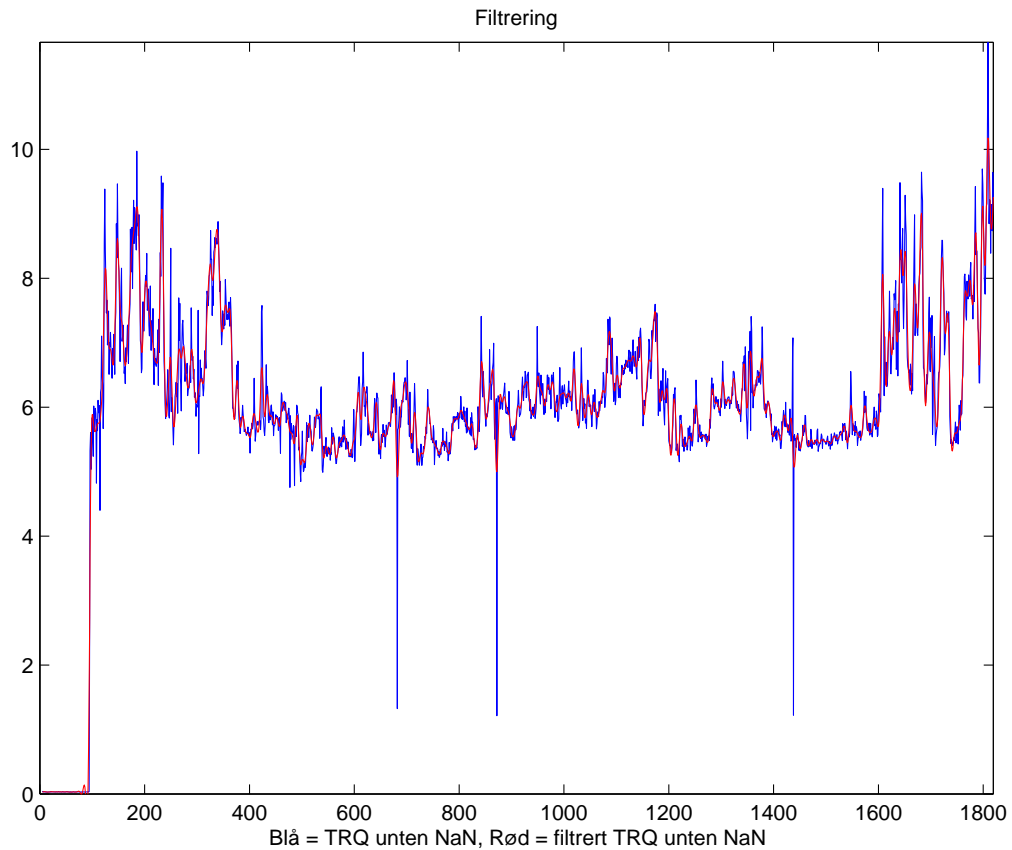
Deretter brukes funksjonen $Y = \text{filtfilt}(B, A, X)$. Funksjonen filtrerer dataene i vektoren X beskrevet av vektorene A og B , for å lage de filtrerte dataene Y . Funksjonen går igjennom hele datarekken og lager ny verdi for alle punkt basert på denne formen. Dette er vist i ligning (4.2).

$$y(n_x) = b(1) \cdot x(n_x) + b(2) \cdot x(n_x - 1) + \dots + b(n_b + 1) \cdot x(n_x - n_b) - a(2) \cdot y(n_x - 1) - \dots - a(n_a + 1) \cdot y(n_x - n_a) \quad (4.2)$$

Antall datapunkt i parameteren X må være mer enn tre ganger så lang som det N 'te ordens filteret, definert som $\max(\text{length}(B)-1, \text{length}(A)-1)$ i Matlab.

For at man skal kunne filtrere et datasett med funksjonen `filtfilt` må datasettet være uten NaN. Datasettet blir ikke mindre ved bruk av funksjonen og kan derfor plottes med samme tilhørende tidsakse som før filteringen.

Ved å ta utgangspunkt i data fra Bronn3.xls brukes et fjerdeordens *Butterworth*-filter med knekkfrekvensverdi 0.15 som gir en glattere kurve som vist i figur 4.6.



Figur 4.6: Plott av TRQ uten NaN og filtrert TRQ uten NaN med felles tidsakse fra filen Bronn3.xls.

Ved å bruke filter for å fjerne dynamikk eller støy på denne måten blir ofte datasettet glattere. Alle datapunkt i datasettet får nye verdier med mindre variasjon, men det kan diskuteres om datasettet blir ødelagt grunnet endring i datasettets dynamiske egenskap som fører til større variasjon mellom variabelverdiene.

4.2.4 Fjerne dynamikk

Poenget med å fjerne dynamikk er å finne de stasjonære verdiene i datasettene, slik at man kan se relasjonen mellom variablene tydeligere. For å fjerne dynamikk er det utviklet en selvlaget funksjon. I koden nedenfor vises bruk av funksjonen.

```
[tid data1 data2] = fjerne_dynamikk(RPM,TRQ,0.15);
```

Funksjonen `fjerne_dynamikk` lager først en felles tidsakse. Datasettet får så fjernet dynamikk ved hjelp av funksjonen `diff`. Funksjonen fjerner dynamikk for et primært datasett og fjerner så tilhørende datapunkt i et sekundært datasett og i den tilhørende tidsaksen som vist i koden under.

```
function [tid data1 data2] = fjerne_dynamikk(primdata , sekdata , delta)
tid = (1:length(primdata))';
i = find(diff(primdata)>delta);
primdata(i) = NaN;
sekdata(i) = NaN;
tid(i) = NaN;
j = find(diff(primdata)<-delta);
primdata(j) = NaN;
sekdata(j) = NaN;
tid(j) = NaN;

data1 = primdata;
data2 = sekdata;
```

Funksjonen `diff` finner endringen mellom hvert datapunkt i datasettet ved å ta hver datapunktverdi minus forrige datapunktverdi i datasettet. Koden setter datapunktverdier som varierer mer eller mindre enn *delta* lik NaN i det primære datasettet, og tilsvarende datapunkt i det sekundære datasettet og den tilhørende tidsakse.

4.2.5 Representere data i Matlab

Når datasettene blir plottet i Matlab er det en fordel at aksene er låst, da dette gjør at datasettene blir lettere å sammenligne. Basert på datasettene er det funnet minimum- og maksimumverdier til variablene, og disse blir satt som minimum- og maksimumverdier til y-aksene i figurene. Disse minimums- og maksimumsverdiene varierer for hvert datasett. Eksempelvis kan disse verdiene settes lik:

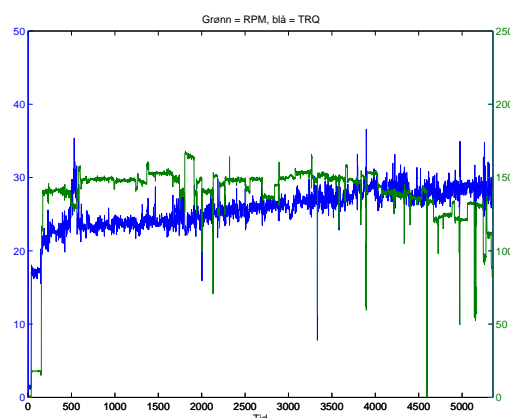
```
max_RPM = 250; %kNm  
max_TRQ = 50; %rpm  
max_WOB = 50; %tonn  
max_ROP = 100; %meter/hr  
max_BPOS = 40; %meter  
max_SPP = 300; %bar
```

Ikke alle variablene beskrevet i kapittel 4.1 blir plottet i Matlab, derfor er ikke alle variablene med i ruten ovenfor.

Siden denne rapporten dreier seg om sammenhengen mellom dreiemoment (TRQ) og rotasjonsrate (RPM) er det derfor valgt å plote disse to variablene i samme figur. Til dette er det brukt funksjonen `plotyy`. Hvordan denne er brukt og hvordan aksene blir låst, vises i ruten nedenfor.

```
ax = plotyy(TIME, TRQ, TIME, RPM);  
axes(ax(1)); axis([0 Inf 0 max_TRQ]);  
set(gca, 'YTick', [0 10 20 30 40 50])  
axes(ax(2)); axis([0 Inf 0 max_RPM]);  
set(gca, 'YTick', [0 50 100 150 200 250])
```

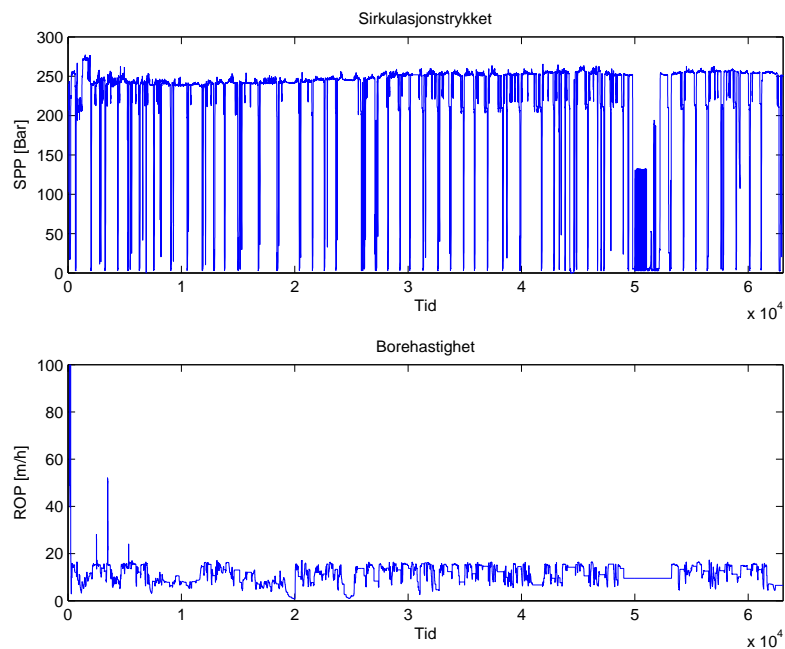
`set`-funksjonen brukes også til å sette tick-verdiene (punktene) på y-aksen. Her er det valgt at TRQ skal ha verdiene [0 10 20 30 40 50] på y-aksen, mens RPM skal ha verdiene [0 50 100 150 200 250]. Ved å kjøre denne koden blir figuren i Matlab seende slik ut:



Figur 4.7: Representasjon av data i Matlab.

For å plote flere figurer inn i en og samme figur brukes subplot-funksjonen. Det kan også være aktuelt å koble tidsaksene sammen, slik at man kan zome inn på ønsket område og få tilsvarende område for alle variablene. Da kan linkaxes-funksjonen brukes. Disse funksjonene kan eksempelvis brukes som vist i koden under.

```
ax(1) = subplot(2,1,1);  
plot(TIME,SPP)  
title('Sirkulasjonstrykket'), ylabel('SPP [Bar]'), xlabel('Tid');  
axis([0 Inf 0 max_SPP])  
  
ax(2) = subplot(2,1,2);  
plot(TIME,ROP)  
title('Borehastighet'), ylabel('ROP [m/h]'), xlabel('Tid');  
axis([0 Inf 0 max_ROP])  
  
linkaxes(ax, 'x');
```



Figur 4.8: Representasjon av data i Matlab.

4.2.6 Lineær regresjonsmetode

For å bruke en minste kvadraters metode må man ha like mange datapunkt for alle variablene i modellen og de må ikke inneholde NaN. Så man kan ikke fjerne NaN i en variabel uten å fjerne tilhørende punkt i samtlige varabler som inngår i modellen. Da bruker man følgende kode:

```
% Fjerner nan
n = find(isnan(DEPTH)|isnan(RPM)|isnan(TRQ)|...
        isnan(HKLD)|isnan(SPP)|isnan(WOB));

TIME(n) = [];
DEPTH(n) = [];
RPM(n) = [];
TRQ(n) = [];
HKLD(n) = [];
BPOS(n) = [];
SPP(n) = [];
WOB(n) = [];
```

For å finne multipel lineær regresjonsmodell basert på minste kvadrats metode, lages en predefinert modellform som f.eks: $X = a_1 \cdot 1 + a_2 \cdot RPM + a_3 \cdot DEPTH$ og en observasjonsvektor $y = TRQ$. Modellparameteren a kommer fram av den pseudoinverse til X ganget med utsignalet y , som forklart i ligning (5.7) og vist i koden under. Den største feilen blir satt som en variabelen $MaxErr$ og gir en indikasjon på hvor stor spredningen er. Koden er lik for alle modellformer som kan settes lik ligning (5.7) minste kvadraters metode

```
y = TRQ;
X = [ones(size(RPM)) RPM DEPTH];
a = X\y
Y = X*a;
MaxErr = max(abs(Y-y))
```

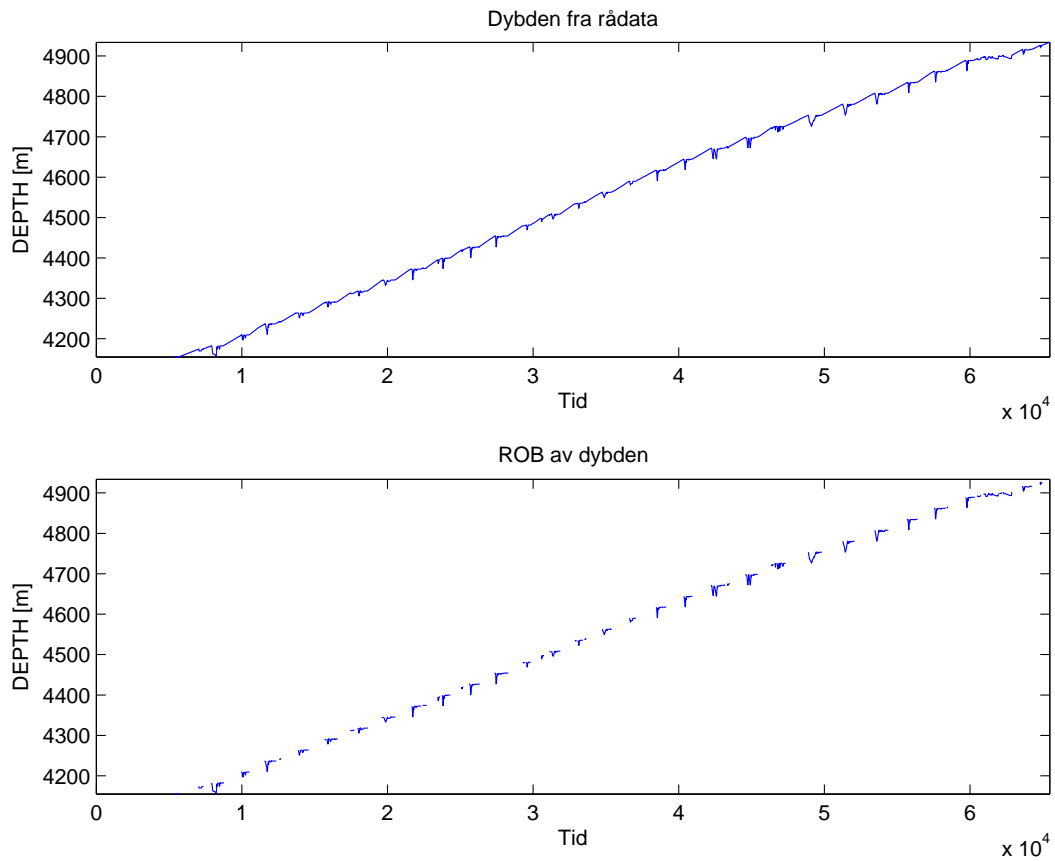
Vanligvis brukes $(X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T$ for å komme fram til den pseudoinverse. I denne Matlab-koden er det brukt $X \setminus y$ for å komme fram til variabelverdiene. Resultatet blir det samme, men ved bruk av \setminus blir koden enklere.

4.2.7 Finne ROB

Den viktigste forutsetningen i dette prosjektet for å eliminere bidraget fra dreiemomentet til borekrona, er å finne perioder med ROB. Det gjøres rent praktisk ved at borestrengen løftes et par meter over brønnbunnen. For å få tak i disse datapunktene er det laget en variabel j som følger den største dybden for hvert datapunkt. Hvis variabelen j er mindre eller lik dybden i datapunktet antas det at borekrona er i bunnen. Således lages en variabel $OnBottom$ som setter tilhørende datapunkt i parametrene lik NaN slik at perioder med ROB står igjen. Det er brukt følgende kode:

```
OnBottom = [];  
% j er økende med større dybde.  
j = dybde(1);  
for i = 1:length(dybde)  
    if j <= dybde(i)           % Hvis variabelen er mindre enn neste dybdepunkt:  
        j = dybde(i);         % Settes største dybde på brønnbunnen.  
        OnBottom(i) = i;      % lager variabel for alle punkt på bunnen.  
    end  
end  
l = find(OnBottom' > 0);  
dybde(l) = NaN;  
rpm(l) = NaN;  
trq(l) = NaN;  
hkld(l) = NaN;  
bpos(l) = NaN;  
spp(l) = NaN;  
wob(l) = NaN;
```

Forutsetningene som ligger til grunn for systemene har fått ulike funksjoner i Matlab. Forutsetningsfunksjonene er presentert i delkapittel 4.2.9. Resultatet etter å kjøre koden som er presentert over gir et plott som vist i figur 4.9.



Figur 4.9: Setter ROB som forutsetning og fjerner datapunkt hvor borestrenger er på bunnen av brønnen.

Som man kan se i figur 4.9 finner koden fornuftige perioder med ROB. Datasettene blir kortere ved denne forutsetningen og gjør at det blir færre datapunkt til modellestimatene i prosjektet. Det øker også variasjon og usikkerhet til modellen.

4.2.8 Borekronas dreiemomentetbidrag

En annen metode som kan eliminere borekronas dreiemomentetbidraget er å estimere dette bidraget og trekke det fra totalt dreiemoment. I datasettene som er folklart i kapittel 4.1 er WOB en tilnærmet variabelverdi for vekt på borekrona. Variabelen tar utgangspunkt i HKLD hvor man setter ny settverdi for tyngden av borestrengen for hver ny borerørstand på ca 30 meter som blir satt inn under boring. Dette gjøres manuelt under boring og WOB blir derfor bare en tilnærmet variabelverdi og ikke god nok for å estimere dreiemomentbidraget til borekrona. Ved å se på hvordan man estimerer WOB ut i fra HKLD kan den estimeres til bedre verdier. Det er en for stor oppgave for dette prosjektet, men tanken er å lage en algoritme som gjennomfører en slik prosess.

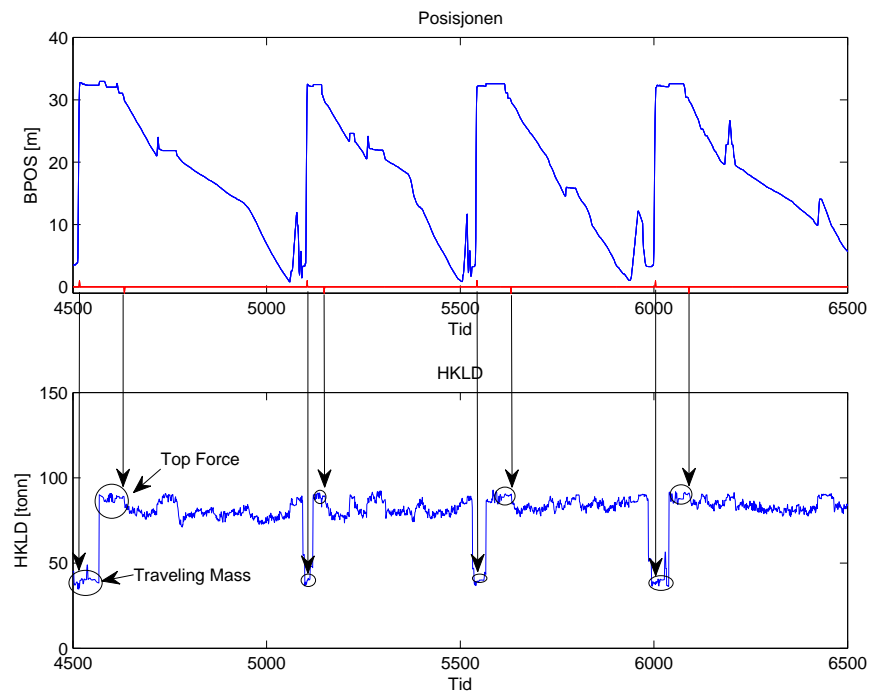
Det er laget en funksjon TRQ_WOB som estimerer borekronas dreiemomentetbidrag prinsipielt, men den kan ikke brukes som en fasit for bidraget. I koden nedenfor viser bruk av funksjonen.

```
[TRQ_borestreng TRQ_bit] = TRQ_WOB(TIME, TRQ, WOB, HKLD, BPOS, 30);
```

Denne funksjonen laster inn variablene TIME, TRQ, WOB, HKLD og BPOS. I tillegg settes en standardhøyde t for en borerørstand som her er 30 meter. Det lages en logisk variabel B knyttet til BPOS. Når BPOS er over standardhøyden settes variabelverdien lik 1 og ellers lik 0, som vist i koden under.

```
B = zeros(length(BPOS), 1, 'double');  
a = find(BPOS >= t);  
B(a) = 1;
```

Deretter deriveres variabelen B til en ny variabel A , slik at endringene blir satt som 1 og -1 . Når ny borerørstand settes får en verdien 1 og når boring starter med ny borerørstand får en verdien -1 . For å forklare hvordan ny WOB blir estimert er figur 4.10 laget. Her er to nye begrep innført. *Traveling mass* og *Top Force* er typiske settverdier for estimatet.



Figur 4.10: Finner settverdier for *Traveling mass* og *Top Force* basert på variabelen A .

Sammenhengen mellom HKLD, *Traveling mass*, *Top Force* og WOB kan ses i ligning (4.3). Der $TopFrc_0$ er settverdien i hvert datasett og benyttes videre for å beregne dreiemomentbidraget fra borekrona.

$$\begin{aligned}
 TopFrc &= HKLD - TM \\
 WOB &\approx TopFrc_0 - TopFrc
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Det er brukt følgende kode:

```

for k = 1:(length(BPOS)) % for løkke fra 1 til lengden av datasettet
    if A(k) == 1; % hvis variasjonen er lik 1 gjør:
        T_M = mean(HKLD(k-2:k+2)); % Oppdaterer verdi for travling mass.
    end
    if A(k) == -1; % hvis variasjonen er lik -1 gjør:
        T = mean(HKLD(k-4:k)); % Oppdaterer verdi for topforce.
        T_M = mean(HKLD(k-4:k)); % Oppdaterer verdi for travling mass.
    end
    TopFrc_0(k) = T; % Oppdaterer ny verdi til topforce(k)
    TopFrc(k) = HKLD(k) - T_M; % Lager estimert verdi av -WOB
    if TopFrc(k) >= 0; % hvis -estimert WOB over 0
        TopFrc(k) = 0; % setter verdi til 0.
    end
    WOB_rett(k) = - TopFrc(k)'; % lager ny WOB
end

```

For å estimere dreiemomentbidraget fra borekrona er det mest hensiktsmessig å fjerne alle datapunkt der variabelen TRQ er mindre enn verdien 2. Verdier mindre enn 2 er tilhørende med datapunkter hvor det er ingen rotasjon av borestrengen. Fordi disse verdiene har kun sammenheng med at det ikke pågår boring i henhold til RPM og gir ingen målt variabelverdi for TRQ. Det er typisk observerbart for alle datasettene. Det brukes følgende kode for å fjerne denne forutsetningen.

```
l = find(TRQ<2);           % setter dreiemoment under 2 til nan
TRQ(l) = NaN;            % fjerner punkt i TRQ
```

Deretter fjernes NaN i alle tilhørende punkt for TIME, TRQ, WOB_{rett} og TopFrc₀, slik at minste kvadraters metode kan benyttes. Minste kvadraters metode brukes som vist i følgende kode:

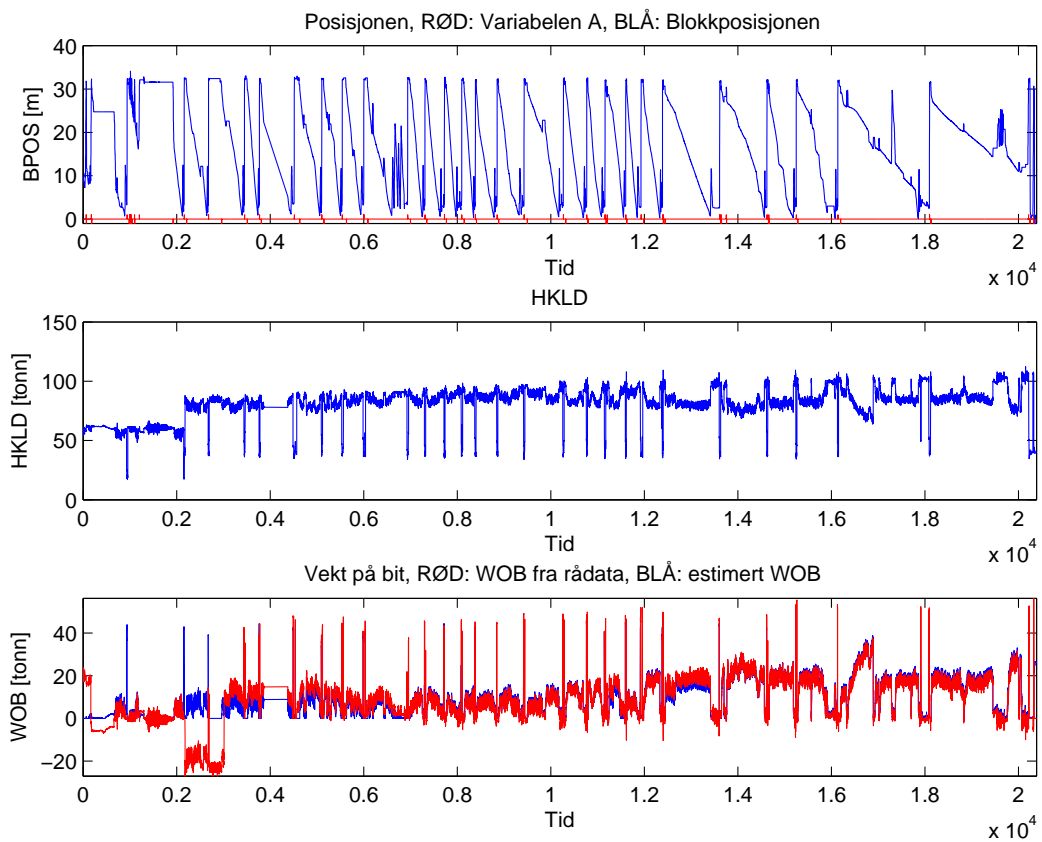
```
X = [TopFrc_0 WOB_rett]; % 2 inputs
y = TRQ;                 % 1 output

a = X\y                  % Løser matriseligningene ved minste kvadraters metode
Y = X*a;                 % Lager ny TRQ basert på funksjonen
```

Deretter finner man TRQ_{BIT} og TRQ_{BORESTRENG} ved bruk av følgende kode:

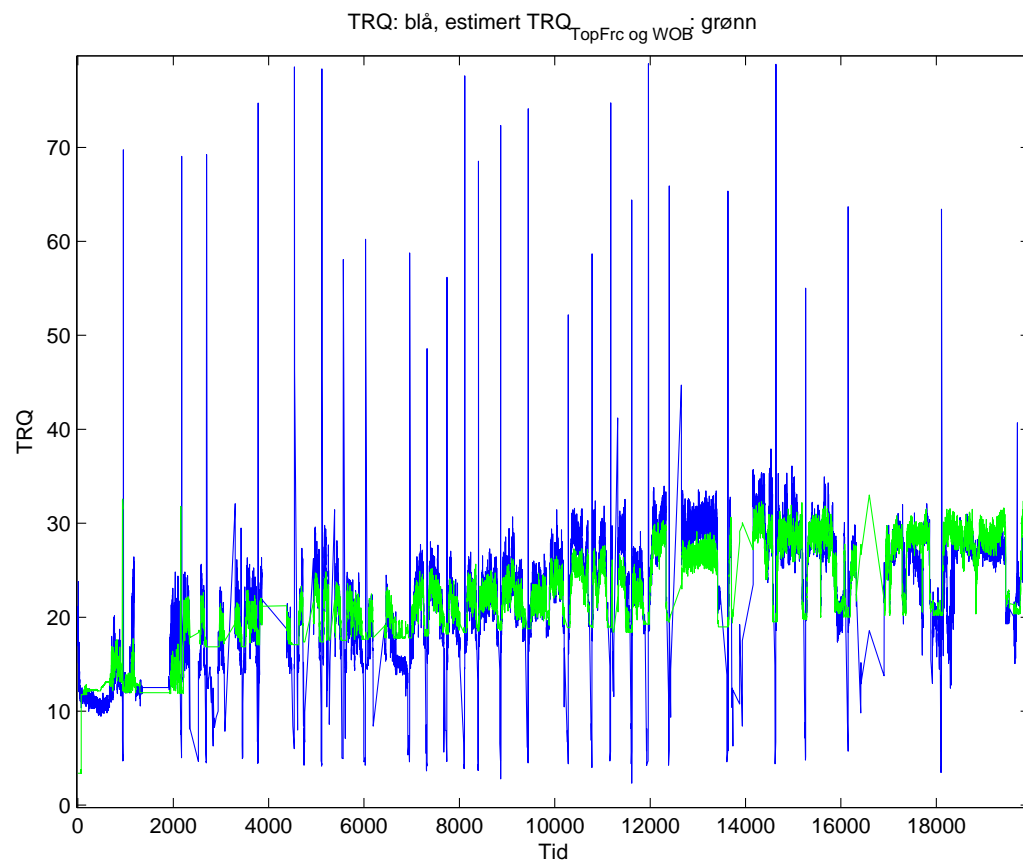
```
for l = 1:length(TRQorg) % for-løkke
    TRQ_bit(l) = WOB_rett(l).*a(2); % estimert TRQ_bit.
    if TRQ_bit(l) <= 0; % dreiemomentet på estimert WOB under 0.
        TRQ_bit(l) = 0; % setter verdi til 0.
    end
    N(l) = TRQorg(l) - TRQ_bit(l)'; % estimerer dreiemomentet på
    % borestrengen basert på dreiemomentet på estimert WOB.
    if N(l) <= 0; % dreiemomentet på borestrengen under 0.
        N(l) = 0; % setter verdi til 0.
    end
end
TRQ_borestreng = N'; % estimert dreiemomentet på borestrengen
```

Funksjonen TRQ_WOB skriver således ut TRQ_{bit} og TRQ_{borestreng} som er en tilnærming av variabelverdiene for borekronas og borestrengens dreiemomentbidrag. Ved bruk av koden som er forklart lages figurene 4.11- 4.13. Figurene viser resultatet ved bruk av koden. Det er ikke lett å finne rett standardhøyde for alle datasett, fordi dette kan variere også inbyrdes i datasettene og kan gi ulike resultater.



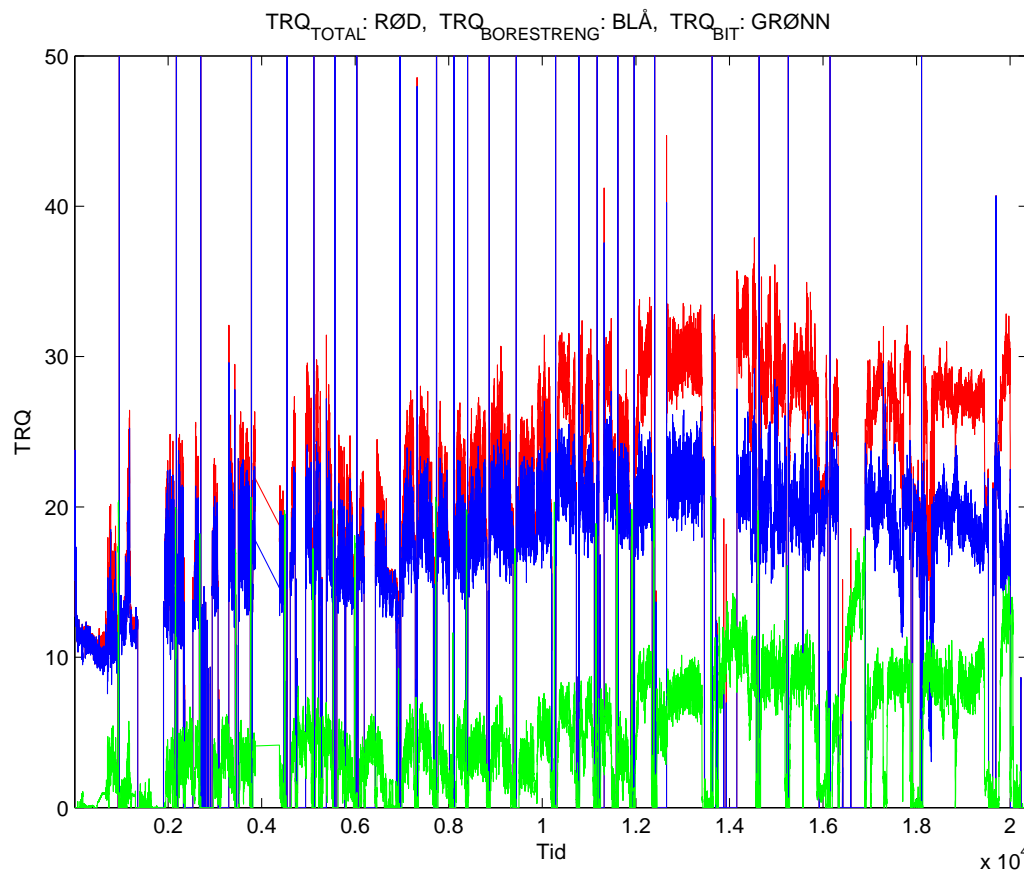
Figur 4.11: Estimerer en ny WOB basert på variabelene HKLD og BPOS.

Som man kan se i figur 4.11 fås en estimert WOB som gir mer fornuftige verdier enn WOB fra rådata til datasettet. Legg merke til perioden mellom 200 - 300 i tidsaksen for hvor datasettets WOB får stort negativt avvik i forhold til estimert WOB.



Figur 4.12: Bruker minste kvadraters metode for beste lineære tilpassning av variablene i forhold til TRQ.

Som man kan se i figur 4.12 får man en sammenfallende dreiemomentberegning ved bruk av funksjonen.



Figur 4.13: Viser forholdet mellom det totale dreiemomentet og det estimerte dreiemomentbidraget fra borekrona og borestrengen.

Som man kan se i figur 4.13 blir dreiemomentbidraget til borekrona og borestrengen fornuftig estimert ut i fra det totale dreiemomentet. Datasettet brukt her har en kortere brønndybde enn mange av de store datasettene. Borekronas dreiemomentbidrag har derfor større bidrag i forhold til den totale dreiemomentmålingen enn for mange andre datasett. Resultatet viser derfor at det er fornuftige verdier for dreiemomentbidragene til borekrona og borestrengen. Datasettene blir ikke kortere ved bruk av funksjonen. Det gir et mer stabilt resultat, med flere datapunkt som datagrunnlag, enn ved bruk av ROB som forutsetning.

4.2.9 Forutsetningsfunksjoner

For å hente ut de periodene i et datasett som gir grunnlag for å estimere dynamisk dreiemoment må periodene vrake alle datapunkt som ikke passer med forutsetningene. Derfor ble det laget en funksjon `perioder` som plukker alle datapunkt som passer med forutsetningene. Funksjonen kan bli brukt på følgende måte:

```
P = perioder (TIME,DEPTH,RPM,TRQ,WOB,HKLD,BPOS,SPP,0,length(DEPTH),1);
TIME_1 = P(:,1);
DEPTH_1 = P(:,2);
RPM_1 = P(:,3);
TRQ_1 = P(:,4);
WOB_1 = P(:,5);
HKLD_1 = P(:,6);
BPOS_1 = P(:,7);
SPP_1 = P(:,8);
```

Denne funksjonen laster inn ulike parametre, går igjennom alle datapunkt med ulike forutsetninger og gir tilbake alle datapunkt fra datasettet som er innenfor forutsetningene og fjerner NaN. Dynamikken til TRQ og RPM blir fjernet for å skape tilnærmet statiske system. Dynamikken til DEPTH blir fjernet for at ikke store dybdeendringer skal virke inn på friksjonevinkelen ved aksial friksjon. De ulike forutsetningene er vist nedenfor.

```
% Forutsetninger :
A = find(diff(DEPTH)>0.1);
B = find((HKLD)<50);
C = find(isnan(DEPTH)|isnan(RPM)|isnan(TRQ)|isnan(HKLD)|isnan(SPP));
D = find(diff(TRQ)>0.1 | diff(RPM)>0.1);
E = find(TRQ<1 | RPM<5);
F = find(TIME<minimum | TIME> maximum);
G = find(WOB>5);
H = find(OnBottom'>0);
```

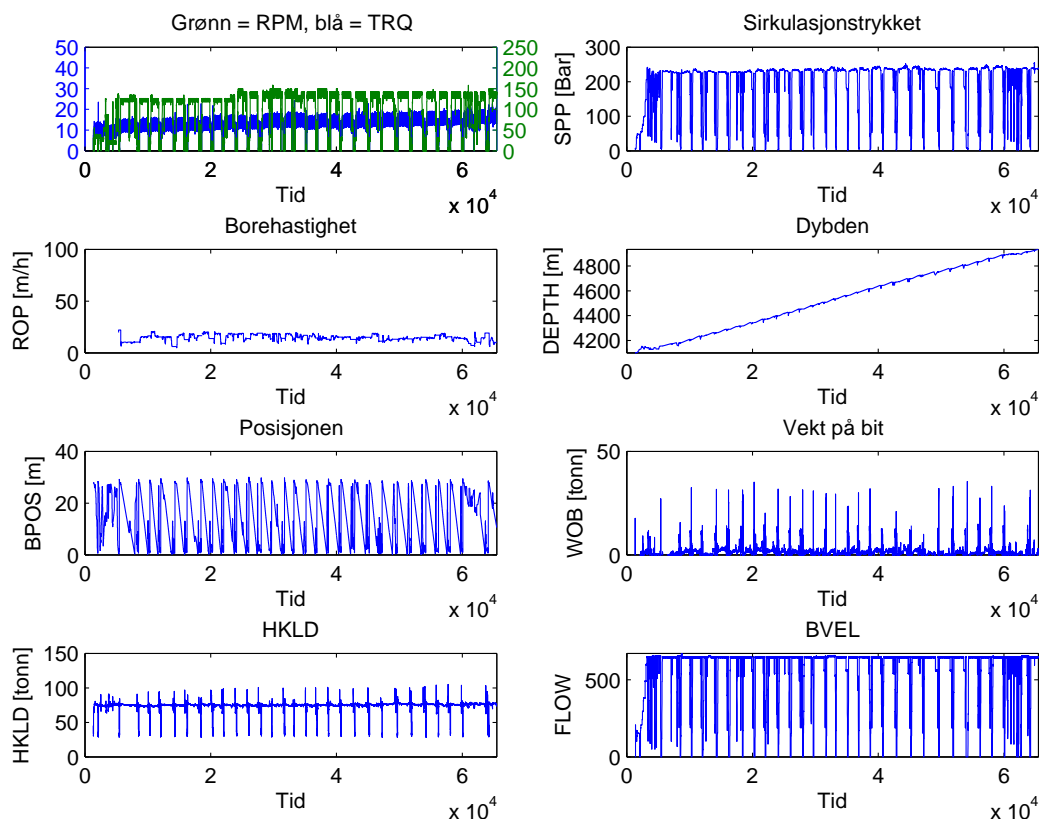
Når alle forutsetningene er blitt satt brukes videre funksjonen `union` for å slå sammen alle punkt som skal fjernes. Deretter fjernes de ved å sette datapunktene lik NaN. Dette blir gjort med følgende kode:

```
I = union((union((union(A,B),(union(C,D))))),...
          (union((union(E,F),(union(G,H))))));
dybde(I) = NaN;
rpm(I) = NaN;
trq(I) = NaN;
hkld(I) = NaN;
bpos(I) = NaN;
spp(I) = NaN;
wob(I) = NaN;
```

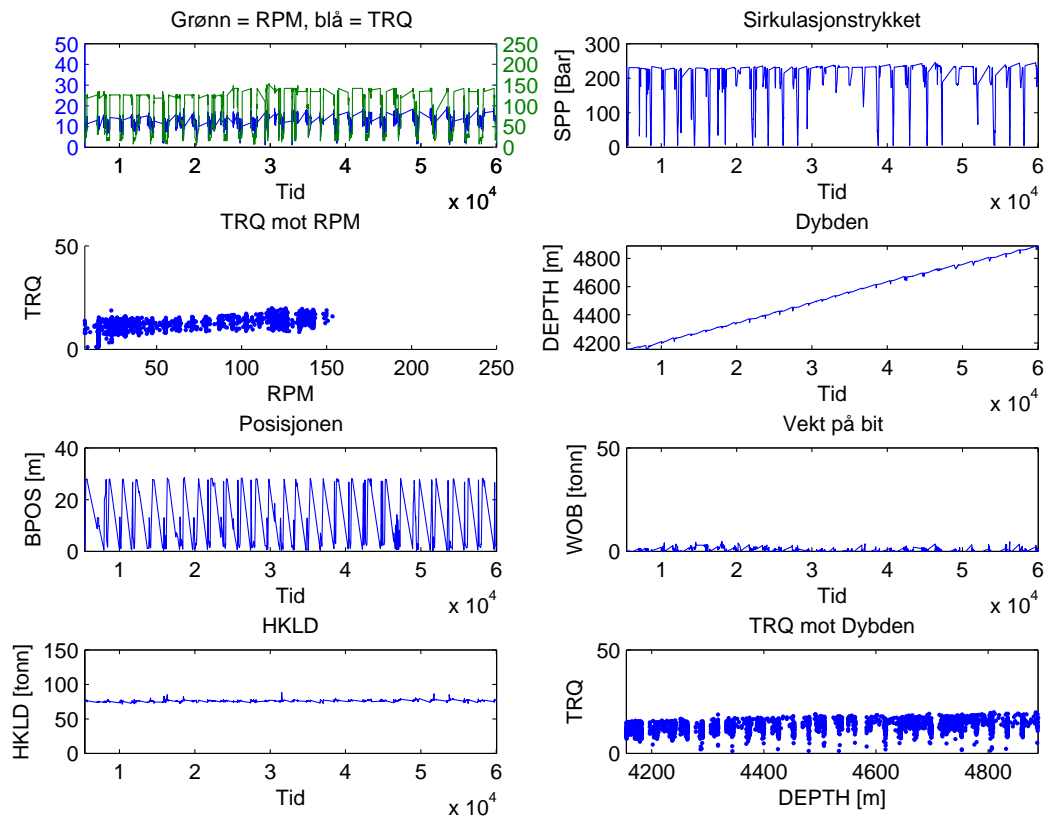
Deretter fjernes alle NaN verdier og plotter en figur med alle aktuelle variabler. Det lages også en matrise `P` som har alle aktuelle variabler. Det er også laget to funksjoner, `perioder1` og

perioder2, basert på denne funksjonen, men disse funksjonene tar utgangspunkt i dybdeenheter istedenfor minimum og maksimum datapunkt. Funksjonen perioder1 har alle forutsetningene som er vist i perioder, men lager ikke figurer. Funksjonen perioder2 lager verken figurer eller tar utgangspunkt i ROB. Denne funksjonen er laget for bruk sammen med borekronas dreiemomentbidrag ved bruk av funksjonen TRQ_WOB. Matlabkoden til funksjonene ligger vedlagt i vedlegg F.

I figur 4.14 er det vist et ubehandlet datasett. Resultatet etter bruk av funksjonen perioder vises i figur 4.15.



Figur 4.14: Ubehandlet rådata fra datasettet bronn40.xls.



Figur 4.15: Resultat etter bruk av funksjonen `perioder` til datasettet `bronn40.xls`.

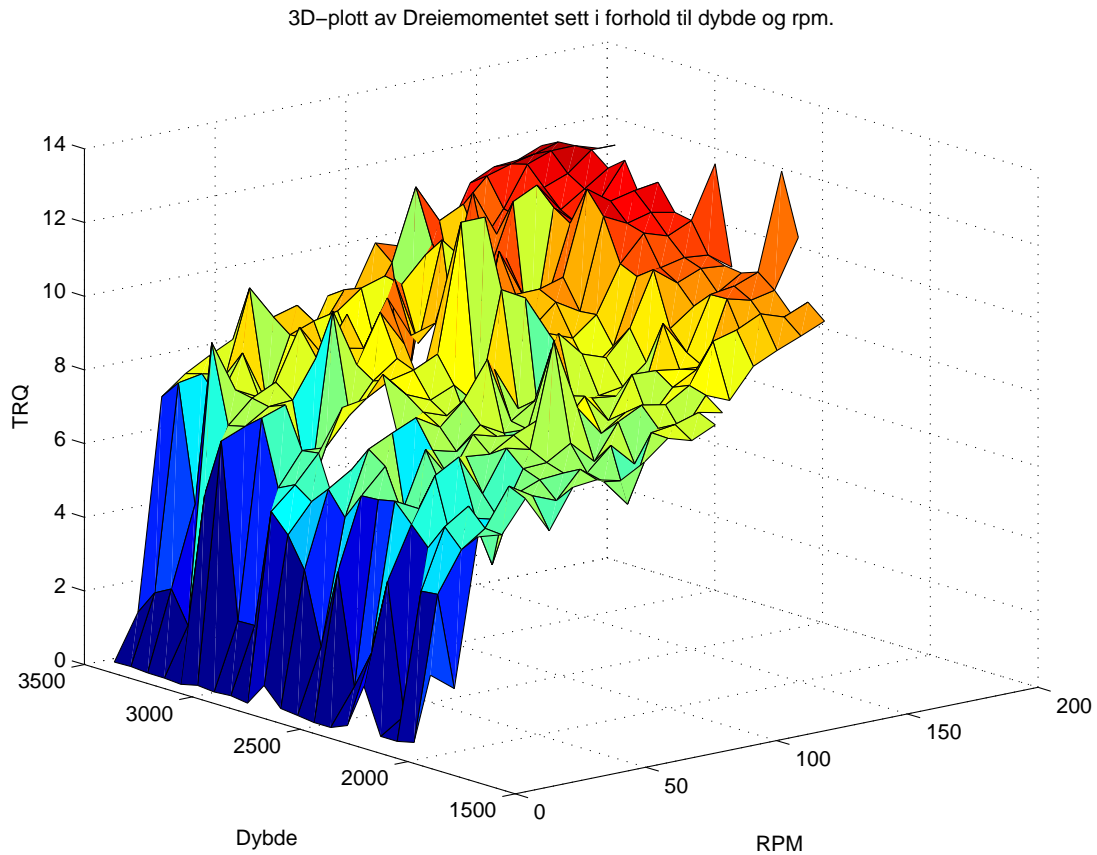
Som man kan se i figur 4.15 gjør funksjonen `perioder` fornuftige operasjoner for å finne forutsetningene som ligger til grunn for å modellere det dynamiske dreiemomentet basert på ROB.

5 Modellering

Det er viktig med modeller for å analysere et fysisk system. Et systems matematiske modell er de ligningene som beskriver systemets oppførsel. Det er svært vanskelig og ofte umulig å lage en helt nøyaktig matematisk modell av et fysisk system, for det er alltid fenomener vi ikke klarer å modellere. Modellfeil og -usikkerhet vil alltid være en del av modellen [6].

5.1 Introduksjon

Dreiemomentet påvirkes av lengde og radius på borestrengen, rotasjon, vekt på borestrengen, boreslamets type og viskositet, pumperate, brønnforhold, brønnbanen og formasjon. Dybden i hvert datasett gir ikke nødvendigvis likt utslag på dreiemomentet fordi brønnbanene er forskjellige. Ulik brønnbane og formasjon gir ulike friksjonskoeffesienter til dreiemomentet. Lengden på borestrengen i tillegg til brønnbaneforholdene settes i sammenheng med variabelen DEPTH. Derfor er dreiemomentets variabel TRQ direkte avhengig av DEPTH. Boreslamets viskositet og radius på borestrengen kan ses på i sammenheng med variabelen RPM, fordi dette er knyttet til en viskøs friksjon. Hvor mye RPM og DEPTH påvirker dreiemomentetvariabelen TRQ er illustrert i figur 5.1. De usikre faktorene påvirker det dynamiske dreiemomentet i dette prosjektet som støy.



Figur 5.1: Et 3D-plott av ubehandlet rådata fra Bronn19.xls, som viser gjennomsnitt dreiemoment for hver RPM og Dybde-enhet.

For å kunne modellere en matematisk modell for det dynamiske dreiemomentet må man ha en klar mening om hvor mye det påvirker det totale dreiemomentet. Det er vanskelig å estimere en dynamisk modell for det dynamiske dreiemomentet, for det må vrakes mange datapunkt ved forutsetningene, loggføringen i datasettene er basert på gjennomsnitt av målinger på 10 sekunder og det er ingen direkte fasit for det dynamiske dreiemomentet. Det er derfor mer hensiktsmessig å lage en statistisk modell for det dynamiske dreiemomentet. Statisk friksjon blir ikke tatt i betraktning for modelleringen og blir fjernet i forutsetningene til parameterestimaterne. Det er antatt ved forutsetningene at kun den kinetiske friksjonen er lagt til grunn for parameterestimaterne. Små verdier for rotasjonen og dreiemomentet fjernes fordi det er ikke målt noen dreiemomentverdi i variabelen TRQ når det ikke er rotasjon av borestrengen.

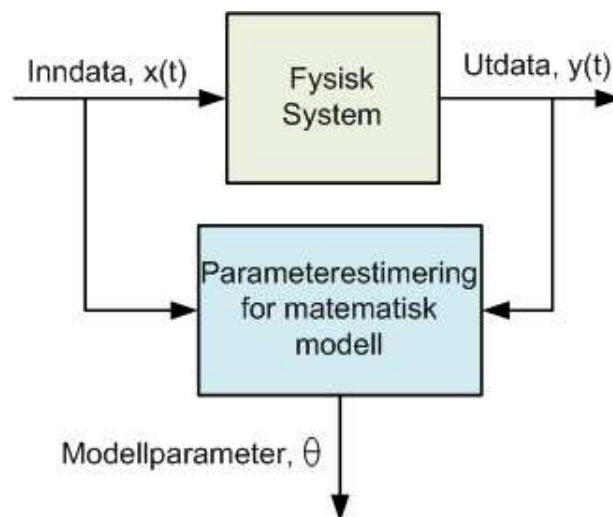
5.2 Lineære regresjonsmetoder

Dette delkapittelet har tatt utgangspunkt i læremateriell fra [6], [7], [14] og [15]. Notasjonen i funksjonene er ikke helt lik som i kildene, men prinsippene er like og metodene de samme. Dette delkapittelet gir grunnlag for å forstå metodene som er brukt til modellering i oppgaven.

I matematikken betyr lineær regresjon å finne den lineære funksjonen til de innsamlede dataene. De innsamlede dataene inneholder gjerne en statistisk feilkilde som gjør at man må estimere beste lineære tilpassning. Til dette brukes minste kvadraters metode.

5.2.1 Minste kvadraters metode

Minste kvadraters metode parameterestimerer inngangsdata og utgangsdata til beste lineære matematiske modell, vist i figur 5.2. Den tar utgangspunkt i en predefinert modellform og er en standardmetode brukt til estimering.



Figur 5.2: Estimering av modellparameter θ mot en matematisk modell basert på inndata $x(t)$ og utdata $y(t)$.

For å kunne estimere modellparameteren θ må man ha kjennskap til det fysiske systemets sammenheng mellom inn og utdata. Ut i fra kjennskapen kan man finne en funksjon som passer.

$$y = \theta_1 \cdot f_1(x) + \theta_2 \cdot f_2(x) + \dots + \theta_n \cdot f_n(x) \quad (5.1)$$

θ har n ukjente parametre. Funksjonen y må være lineær i θ , men trenger ikke være lineær for inndata x . Funksjonene f_i fra ligning (5.1) antas kjent og samles deretter i en

regresjonsvektor φ .

$$\varphi = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

likning (5.1) kan således skrives slik:

$$y = \varphi^T \cdot \theta \quad (5.3)$$

Vektoren Y lages med N observasjoner av funksjonen y , og likedan lages en $N \times n$ -matrise Φ for φ .

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \varphi(1)^T \\ \varphi(2)^T \\ \vdots \\ \varphi(N)^T \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Dette kan skrives som:

$$Y = \Phi \cdot \theta \quad (5.5)$$

Løsningen for minste kvadrats metode er $\hat{\theta}$ hvor $\hat{Y} = \Phi \hat{\theta}$. Når $\|Y - \hat{Y}\|^2$ er minst mulig er resultatet optimalt.

$$\|Y - \hat{Y}\|^2 = \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2 \quad (5.6)$$

For å få tak i $\hat{\theta}$ på venstre side gjennom likning (5.5) må Φ pseudoinverteres og ganges med Y , vist i likning (5.7).

$$\hat{\theta} = \Phi^+ \cdot Y \quad (5.7)$$

hvor den pseudoinverse er:

$$\Phi^+ = (\Phi^T \cdot \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T \quad (5.8)$$

Løsningen til $\hat{\theta}$ fra likning (5.7) gir en $n \times 1$ -matrise som settes inn i den predefinerte modellen.

I Matlab løses likning (5.7) enkelt ved å sette inn \backslash for den pseudoinverse, vist i likning (5.9). Det blir gjort rede for i delkapittel 4.2.6.

$$\hat{\theta} = \Phi \backslash Y \quad (5.9)$$

5.2.2 Minste kvadraters metode med avhengige variabler

I noen tilfeller er flere utganger avhengige av flere innganger. Ved å bruke et uttrykk som passer inn med likning (5.4), kan minste kvadraters metode brukes. Her deles problemet opp i flere deler for hvert tidssteg, vist i likning (5.10) [14].

$$y_k = \theta_1 \cdot f_1(x_i) + \theta_2 \cdot f_2(x_i) + \dots + \theta_n \cdot f_n(x_i) \quad (5.10)$$

Hvor k er antall utganger og i antall innganger. Man får da følgende vektorer:

$$\varphi_i = \begin{bmatrix} f_1(x_i) \\ f_2(x_i) \\ \vdots \\ f_n(x_i) \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Et system med to avhengige innganger og to avhengige utganger får et ligningssystem som vist i ligning (5.12). Her er det to utganger, $y_1(k)$ og $y_2(k)$, som egentlig blir to ligninger, $y_1 = \varphi_1^T \cdot \theta$ og $y_2 = \varphi_2^T \cdot \theta$. Her er et system med $2 \cdot N$ ligninger og n ukjente.

$$\begin{bmatrix} y_1(1) \\ y_2(1) \\ y_1(2) \\ y_2(2) \\ \vdots \\ y_2(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1^T(x_1) \\ \varphi_2^T(x_1) \\ \varphi_1^T(x_2) \\ \varphi_2^T(x_2) \\ \vdots \\ \varphi_2^T(x_N) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Utrekningen videre er lik som tidligere vist i kapittel 5.2.1, ved å bruke samme metode som for minste kvadraters metode i ligning (5.6), som viser at:

$$\hat{\theta} = \Phi^+ \cdot Y \quad (5.13)$$

5.2.3 Minste kvadraters metode med uavhengige inngangsvariabler

Ved bruk av en multippel lineær regresjonsmodell hvor en utgang er avhengig av flere uavhengige innganger kan den settes opp som den predefinerte modellen i ligning (5.14). Her er det k antall uavhengige inngangsvariabler x_1, x_2, \dots, x_k og n observasjoner y_1, y_2, \dots, y_n [15].

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \beta_2 \cdot x_{2i} + \dots + \beta_k \cdot x_{ki} \quad (5.14)$$

Sammenhengen kan skrives som for minste kvadraters metode:

$$y = X \cdot \beta \quad (5.15)$$

Hvor:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{kn} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Her brukes samme metode som for minste kvadraters metode i ligning (5.6), som viser at:

$$\hat{\beta} = X^+ \cdot Y \quad (5.17)$$

5.3 Alternative modellvarianter

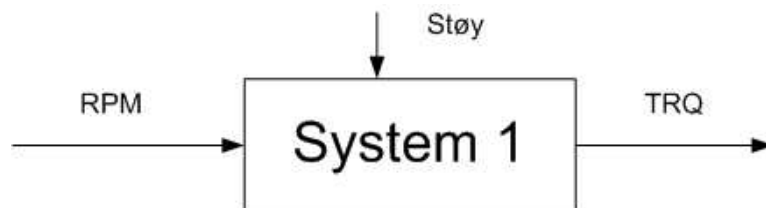
I denne oppgaven er det totale dreiemomentet TRQ målt i rotasjonsbordet eller *top-drive* på boredekket. Det er tatt utgangspunkt i at denne målingen er korrekt for dreiemomentet til borestrengen. De faktorene som påvirker dreiemomentet er i utgangspunktet mange. Det er derfor viktig å avgrense og gjøre forenklete antagelser av modellen. Modellen er en mekanisk bevegelsesmodell med kombinert roterende og translatorisk bevegelse. Generelt er dreiemomentet kryssprodukt av kraft og arm som vist i kapittel 3.1, men treghtetsmomentet her varierer i stor grad med friksjonen i brønnbanen, slik at en modell som gjelder for flere datasett blir temmelig kompleks. Det antas at det er lik type boreslam gjennom hele datasettet. Det motiverer for tre modellvarianter presentert i de følgende underkapitler.

5.3.1 Den første modellvarianten

Den første modellvarianten har en inngang (RPM) og en utgang (TRQ), vist i figur 5.3. Det er tenkt at modellen vil gi en direkte sammenheng mellom RPM mot TRQ ved bruk av lineær regresjonsmodellering. Avgrensingen av denne modellen blir gjort ved å stabilisere alle andre variabler, for å kunne se på den direkte sammenhengen mellom RPM og TRQ alene. Det er plukket enkelte perioder hvor HKLD er holdt stabil, SPP er konstant, DEPTH deles opp i k antall binger, WOB er liten og rotasjon over bunnen på brønnhullet. Således brukes funksjonen `perioder1` for alle forutsetningene hvor funksjonen blir kjørt for hver ny bing. Binge brukes her for like store mengder dybdeenheter gjennom hele datasettet. De påvirkende faktorene som faller utenfor forutsetningene er regnet som støy. Minste kvadraters metode blir brukt på uttrykket vist i ligning (5.18),

$$TRQ(k) = x_0(k) + x_1(k) \cdot \omega(k) \quad k \in \{1, 2, 3, 4, \dots\} \quad (5.18)$$

hvor $\omega = \text{RPM} \cdot \frac{2\pi}{60}$ som vist i ligning (3.5). Vinkelhastigheten ω brukes for å se direkte sammenhengen mellom rotasjonsraten og dreiemomentet, som her kalles dynamisk dreiemoment.



Figur 5.3: modell 1.

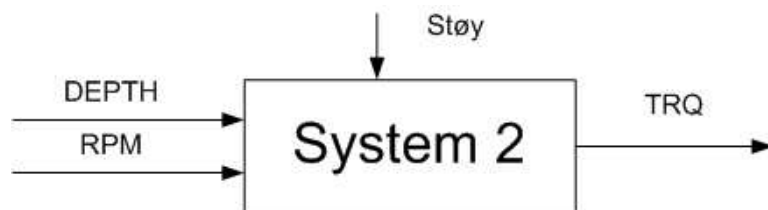
Matlabkoden er vedlagt i vedlegg D.1.

5.3.2 Den andre modellvarianten

Den andre modellen bygger på at det dynamiske dreiemomentet er avhengig av rotasjonen og brønnbanen, og derfor har det to innganger (RPM og DEPTH) og en utgang (TRQ), vist i figur 5.4. Det er tenkt at denne modellen vil gi en sammenheng mellom RPM og TRQ ved bruk av multipel lineær regresjonsmodell. RPM og DEPTH blir her satt som uavhengige variabler ved bruk av modellformen i ligning (5.19).

$$TRQ = x_0 + x_1 \cdot \omega + x_2 \cdot DEPTH \quad (5.19)$$

Forutsendingene som er lagt til grunn er hentet fra funksjonen `perioder`.



Figur 5.4: modell 2.

Matlabkoden er vedlagt i vedlegg D.2.

5.3.3 Den tredje modellvarianten

Den tredje modellvarianten bygger på samme premisser som for den andre modellen, men tar utgangspunkt i dybdeenheter. Dybden DEPTH deles opp i k antall binger. RPM og DEPTH blir her satt som uavhengige variabler ved bruk av modellformen i ligning (5.20). Det bruker minste kvadraters metode på uttrykket.

$$\begin{aligned} TRQ(k) &= x_0(k) + x_1(k) \cdot \omega(k) & k \in \{1, 2, 3, 4, \dots\} \\ x_0(k) &= t_{00}(k) + t_{01}(k) \cdot DEPTH(k) \\ x_1(k) &= t_{10}(k) + t_{11}(k) \cdot DEPTH(k) \end{aligned} \quad (5.20)$$

Således finner man det estimerte konstantleddet til dreiemomentet og det estimerte dynamiske dreiemomentet som funksjon av dybdeenheter. Det blir tatt utgangspunkt i forutsetningene til ROB ved bruk av funksjonen `perioder1` og estimering av borestrengens dreiemomentbidrag ved bruk av funksjonene `TRQ_WOB` og `perioder2`. Matlabkoden er vedlagt i vedlegg D.3.

5.4 Teoretisk dreiemomentmodell

Balanseloven benyttet på et mekanisk system er gitt ved kraftbalanseloven som er Newtons andre lov, vist i ligning (5.21). Her er summen av kreftene lik masse ganger akselerasjon.

$$m \cdot a = \frac{d(m \cdot v)}{dt} = \sum_i F_i \quad (5.21)$$

Fra ligning (3.1) er det generelle dreiemomentet definert som kraft ganger arm. Det totale dreiemomentet må derfor være summen av alle friksjonskreftene multiplisert med radiusen til armen, vist i ligning (5.22).

$$r \times (m \cdot a) = T = r \times \sum_i F_i \quad (5.22)$$

SINTEF har en diskret *Torque and Drag* modell hvor det dynamiske dreiemomentet skal inngå som en del. Ut i fra den kunnskapen som ligger til grunn i denne rapporten bygges en modell basert på de fysiske sammenhengene. Modellen bygger på friksjonskreftene som kommer fram av Coulomb-friksjon i en konsentrisk sylinder, vist i ligning (5.23). Denne ligningen kommer fra friksjonskraften F_f i ligning (3.8),

$$T = F_f \times r = (\mu \cdot F_n) \times r \quad (5.23)$$

hvor:

- T : Dreiemomentet [Nm]
- μ : Friksjonskoeffisient
- F_n : Normalkraften [N]
- r : Radius til sylinder [m]

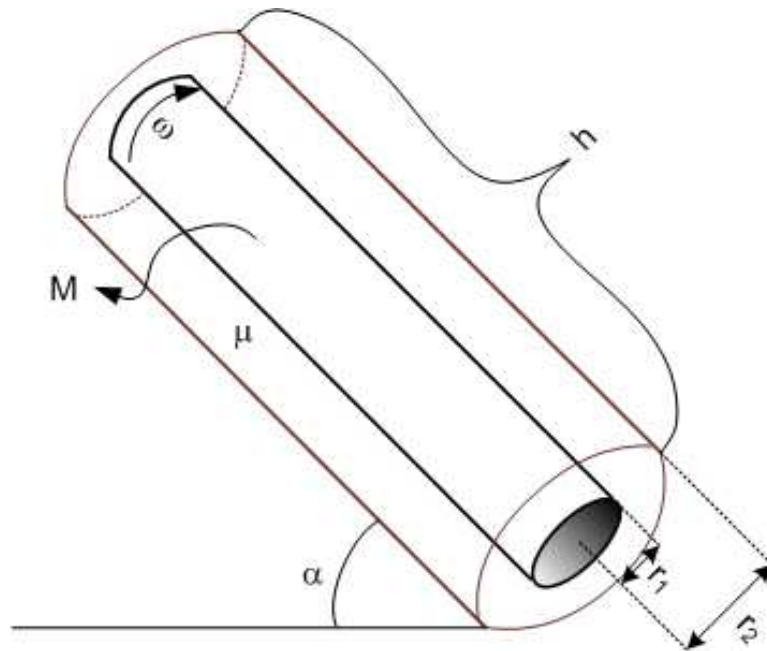
Normalkraften F_n dekomponeres som:

$$F_n = h \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (5.24)$$

hvor:

- h : lenden til sylindere [m]
- M : Massen til sylindere [kg/m]
- g : gravitasjonakselerasjonen [m/s^2]
- α : vinkelen mellom sylindere og horisontalt plan [$^\circ$]

For å illustrere den konsentriske sylindere som modellen representerer benyttes figur 5.5.



Figur 5.5: Konsentrisk modell.

Figur 5.5 viser hvordan modellen er satt sammen av parameterene. Den viskøse friksjonskraften er avhengig av legemets hastighet (ligning (3.7)), og er et produkt av en dempekonstant D og legemets hastighet v_s . I utledningen av det konsentriske viskometeret er det utledet et uttrykk for viskøst dreiemomentet i delkapittel 3.3.1. Ved å implementere dette uttrykket i modellen kan dreiemomentet settes lik en sum av friksjonskreftene fra Coulomb-friksjon $F_{Coulomb}$ og viskøs friksjon F_{viskos} , vist i ligning (5.25) og indikert i figur 5.5.

$$\begin{aligned}
 T &= F_{Coulomb} \times r + F_{viskos} \times r \\
 &= \mu \cdot F_n \times r + D \cdot v_s \times r \\
 &= \mu \cdot h \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot r + \eta \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \frac{d\omega}{dr} \cdot r \\
 &= \mu \cdot h \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot r_1 + \eta \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot h}{\left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2}\right)} \cdot \omega
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

Det viskøse dreiemomentet presentert i denne modellen er ikke avhengig av vinkelen α . Forholdet mellom Coulomb og viskøs friksjon er i denne ligningen ikke nødvendigvis lik virkelig dreiemoment for en borestreng, men det er en tilnærming. Det må derfor gjøres en parametrisk analyse for en nærmere tilnærming av dette uttrykket. Modellen er basert på dreiemomentet for en lengdeenhet med konsentriske sylindere, mens for en borestreng vil den beste tilnærmingen sannsynligvis være en dreiemomentmodell som funksjon av eksentrisitet. Det lyktes ikke i denne oppgaven å lage en funksjon for den eksentriske dreiemomentberegningen, men det kan være en mulig utviding av dette prosjektet.

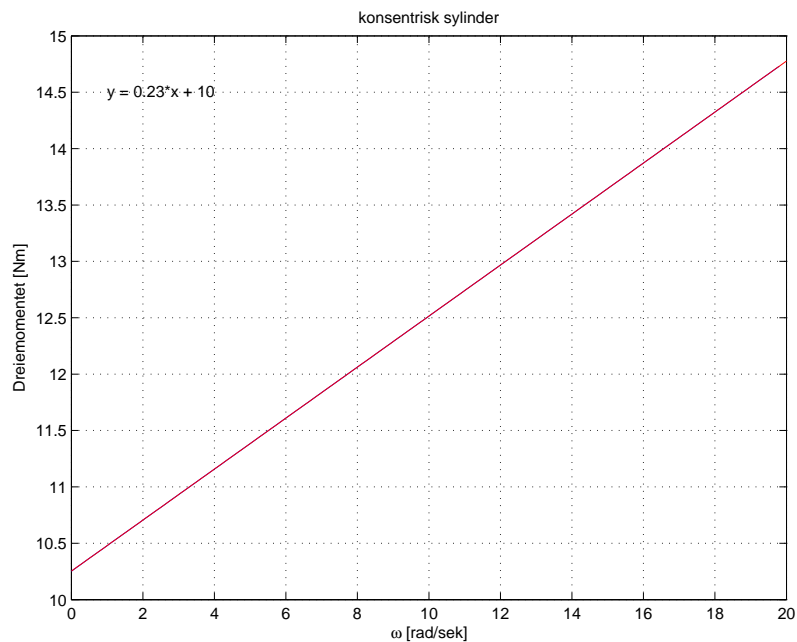
Ved å sette inn noen generelle verdier i den teoretiske dreiemomentmodellen som er utledet i ligning (5.25), gir et resultat som vist i figur 5.6. Det er tatt utgangspunkt i noen basisverdier for radius på sylindrene, tettheten i stål og boreslam, friksjonskoeffisienten, vinkelen og viskositeten i forhold til dreiemomentkonstanten for den teoretiske dreiemomentmodellen:

$$\begin{array}{ll} r_0 = 0.07 [m] & \eta = 1 [cp] \\ r_1 = 0.10 [m] & g = 9.81 [m/s^2] \\ r_2 = 0.15 [m] & \alpha = \frac{\pi}{4} [rad] \\ h = 1 [m] & \rho_S = 7850 [kg/m^3] \\ \mu = 0.15 & \rho_B = 1700 [kg/m^3] \end{array}$$

Massen M til den indre sylindren med oppdrift er gitt ved:

$$\begin{aligned} M &= \pi \cdot (r_1^2 - r_0^2) \cdot \rho_S \cdot \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_S}\right) \\ &= \pi \cdot (0.10^2 - 0.07^2) \cdot 7850 \cdot \left(1 - \frac{1700}{7850}\right) = 98.5361 [kg/m] \end{aligned} \quad (5.26)$$

Koden er vedlagt i vedlegg E.2.



Figur 5.6: Ser den fysiske sammenhengen der ω varierer mellom 0 og 20.

Figur 5.6 viser at dreiemomentmodellen gir et uttrykk for dreiemomentet ved bruk av minste kvadraters metode ved hjelp av en grunnleggende tilpassningsfunksjon i Matlabfiguren. Øverst i venstre hjørnet av figuren står det at $y = 0.23 * x + 10$ som kommer av denne tilpassningsfunksjonen. Uttrykket kan ses på i sammenheng med at $T = 10 + 0.23 \cdot \omega$.

5.5 Parametrisk sammenheng

For å sammenligne resultatene fra de ulike modellene må det lages et felles uttrykk som kan gjenspeile i hvor stor grad det er et dynamisk dreiemoment og eventuelt hvor stor del det utgjør av det totale dreiemomentet. Dreiemomentet antas her som en sum av statisk og dynamisk dreiemoment, vist i ligning (5.27).

$$T = k_1 + k_2 \cdot \omega \quad (5.27)$$

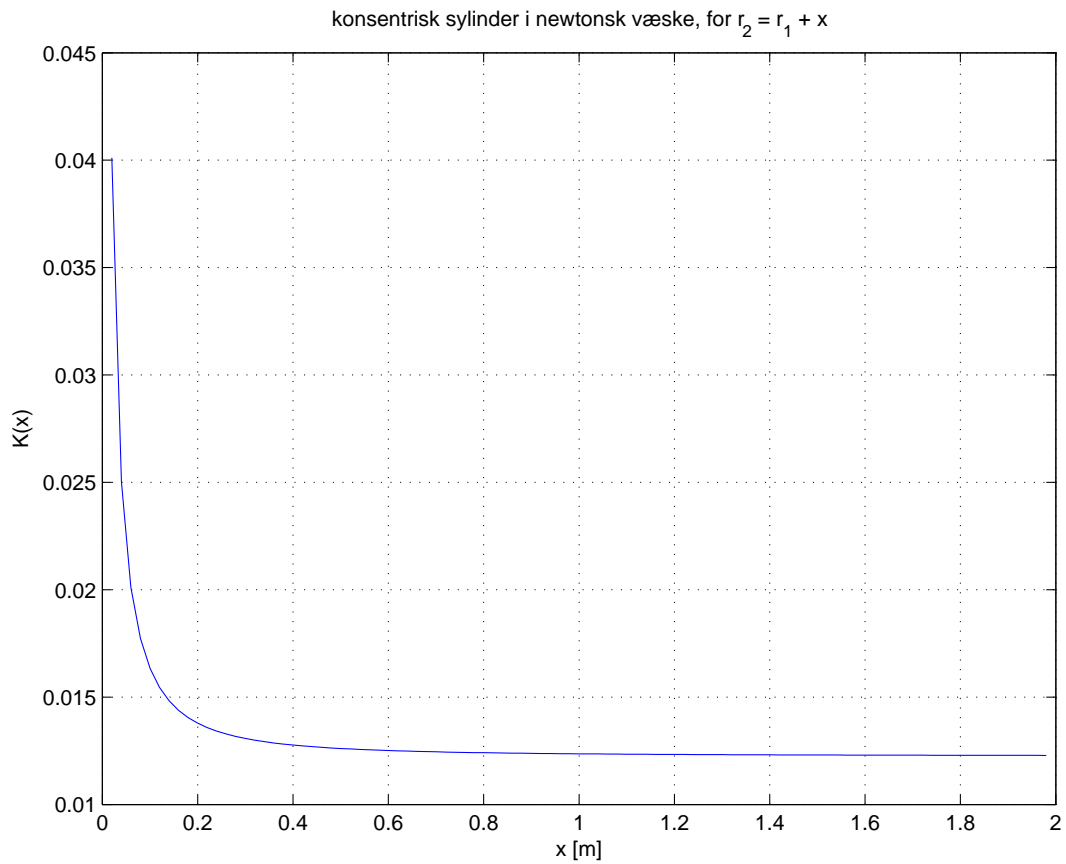
Det er derfor utviklet en dimensjonsløs dreiemomentkonstant, utledet i vedlegg B og vist i ligning (5.28).

$$K = \frac{k_2}{k_1} = \frac{\eta \cdot 4 \cdot \pi}{\mu \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot r_1 \cdot \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right)} \quad (5.28)$$

Dreiemomentkonstanten K er laget for det teoretiske dreiemomentuttrykket og for datasettene, og kan gi en indikasjon på forholdet mellom variablene. Det kan også gi sammenligningsgrunnlag. Dreiemomentkonstantligningen er vist i ligning (5.28). Med innsatt de samme basisverdier som for den teoretiske dreiemomentmodellen:

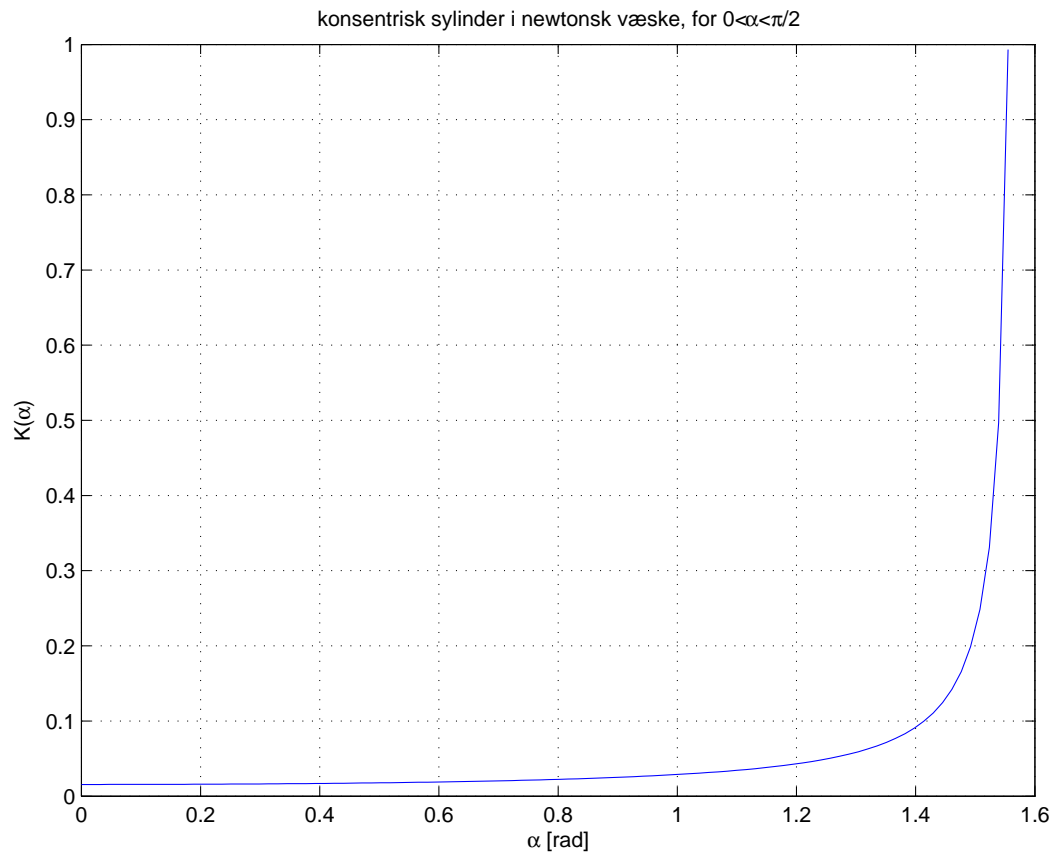
$$\begin{array}{ll} r_0 &= 0.07 [m] & \eta &= 1 [cp] \\ r_1 &= 0.10 [m] & g &= 9.81 [m/s] \\ r_2 &= 0.15 [m] & \alpha &= \frac{\pi}{4} [rad] \\ \mu &= 0.15 & \rho_s &= 7850 [kg/m^3] \\ \rho_m &= 1700 [kg/m^3] & & \end{array}$$

Med disse verdiene er dreiemomentkonstanten $K = 0.022062$. For å se hvordan denne endrer seg i forhold til de enkelte variabelverdiene, følger variasjon i noen basisverdier for å se hvordan dreiemomentkonstanten K forholder seg til hver variabelverdi, vist i figur 5.7 - 5.10.



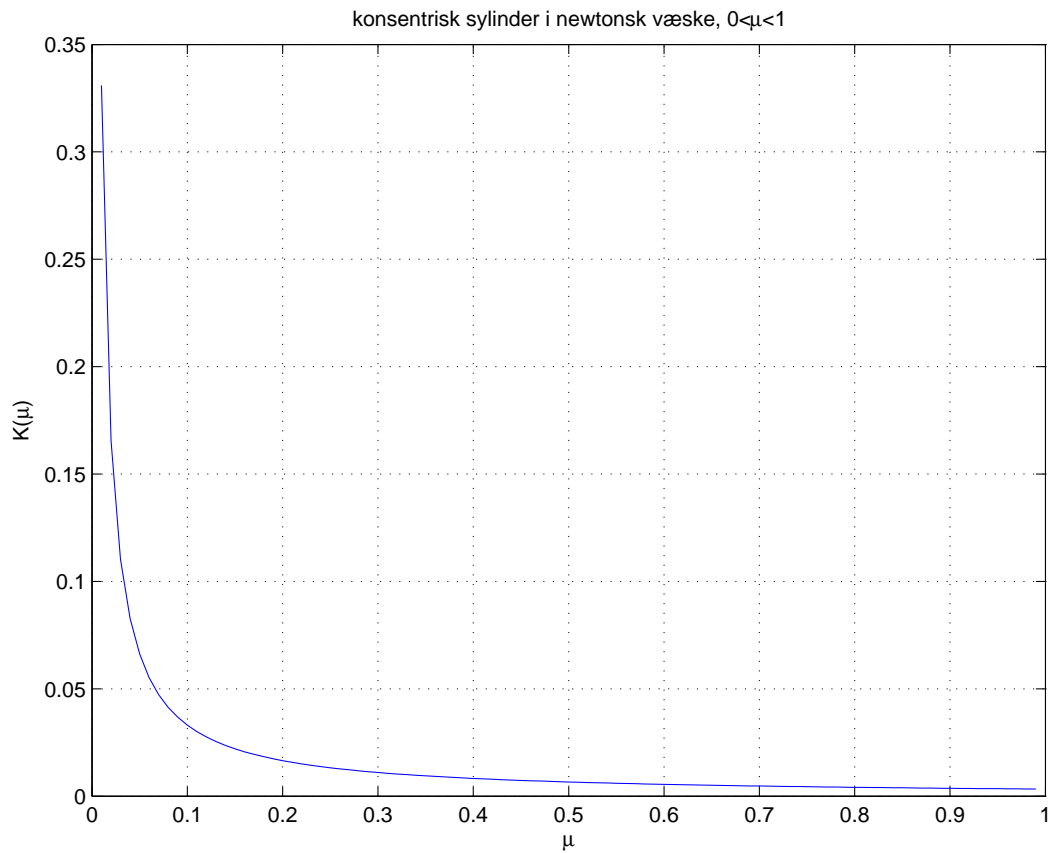
Figur 5.7: $K(x)$ viser variasjon i x for $r_2 = r_1 + x$.

Som man kan se i figur 5.7 avtar dreiemomentkonstanten med større avstand mellom indre og ytre sylinder i forhold til den teoretiske dreiemomentmodellen. Det er naturlig fordi den viskøse friksjonen blir da mindre i forhold til den Coulombske friksjonen.



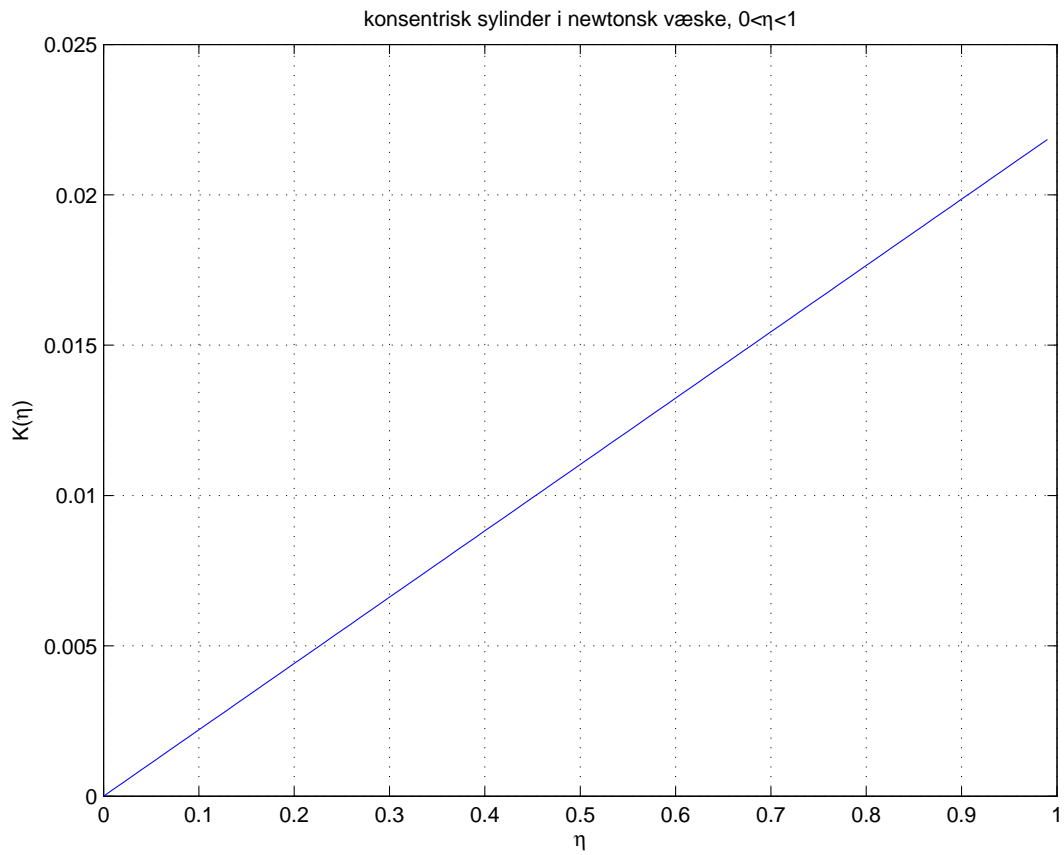
Figur 5.8: $K(\alpha)$ viser variasjon i vinkelen α mellom 0 og $\frac{\pi}{2}$

Figur 5.8 viser at bidraget til den Coulombske friksjonen minker ved større vinkel til horisontalplanet. Det er naturlig siden denne friksjonen er størst når et legeme dras langs horisontalplanet uten avviksvinkel.



Figur 5.9: $K(\mu)$ viser variasjon i friksjonskoeffisienten μ mellom 0 og 1.

Som man kan se i figur 5.9 får dreiemomentkonstanten mindre verdi ved høyere friksjonskoeffisient μ . Bidraget til den Coulombske friksjonen øker ved større friksjonskoeffisient.



Figur 5.10: $K(\eta)$ viser variasjon i viskositeten η mellom 0 og 1.

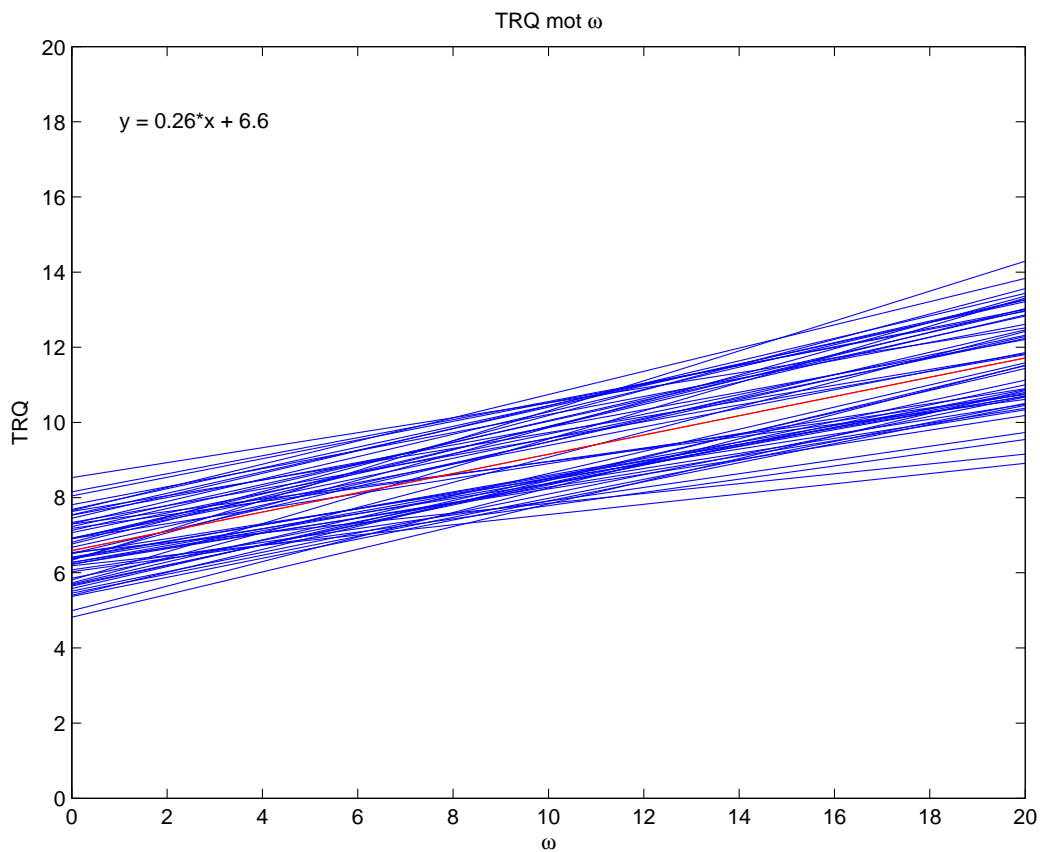
Figur 5.10 viser en positiv lineær trend ved å øke viskositeten i væsken. Det er naturlig fordi den viskøse friksjonen øker i forhold til den Coulombske friksjonen med lineær størrelsesorden.

6 Resultat

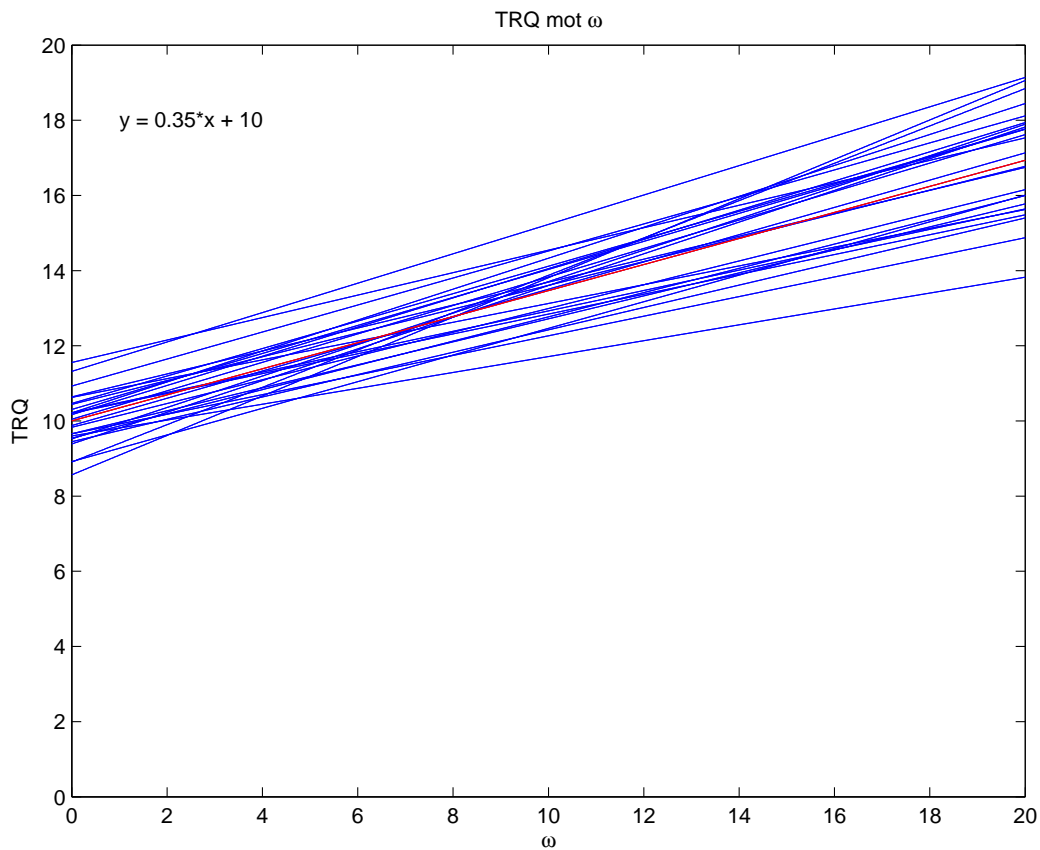
Dette kapittelet presenterer resultatene for de tre modellvariantene vist i kapittel 5.3.

6.1 Den første modellvarianten

På bakgrunn av koden som er laget for den første modellvariantens parameterestimat er det gode resultater for mange datasett, vist i figur 6.1 og 6.2. Alle observasjoner har vist at det er en lineær sammenheng mellom dreiemomentet og rotasjonsraten, og derfor har det bare blitt brukt lineære ligningssystem.



Figur 6.1: Første modellvariantens resultat fra Bronn19.xls.



Figur 6.2: Første modellvariantens resultat fra Bronn40.xls.

Som man kan se i figur 6.1 og 6.2 blir det laget et uttrykk for dreiemomentet basert på Coulomb friksjon og rotasjonsraten øverst i venstre hjørnet av figurene. Uttrykket er estimert av en grunnleggende tilpassningsfunksjon i Matlabfunksjonen som bruker minste kvadraters metode på gjennomsnittstrenden. Stigningstallet varierer mellom de to datasettene som er gitt i figuren. Stigningstallet stiger i nesten samsvarende takt med konstantleddet. Det er laget en tabell over parameterestimaterne til datasettene, vist i tabell 6.1.

Tabell 6.1: Resultater fra den første modellvariantens parameterestimat.

TRQ = $a_1 + a_2 \cdot \omega$		
Datasekk	a_1	a_2
Bronn19.xls	6.6136	0.2598
Bronn21.xls	19.5172	0.4141
Bronn27.xls	9.8538	0.3002
Bronn31.xls	19.3937	0.3982
Bronn32.xls	12.9887	0.2025
Bronn40.xls	10.0031	0.3526
Bronn41.xls	5.1058	0.3133

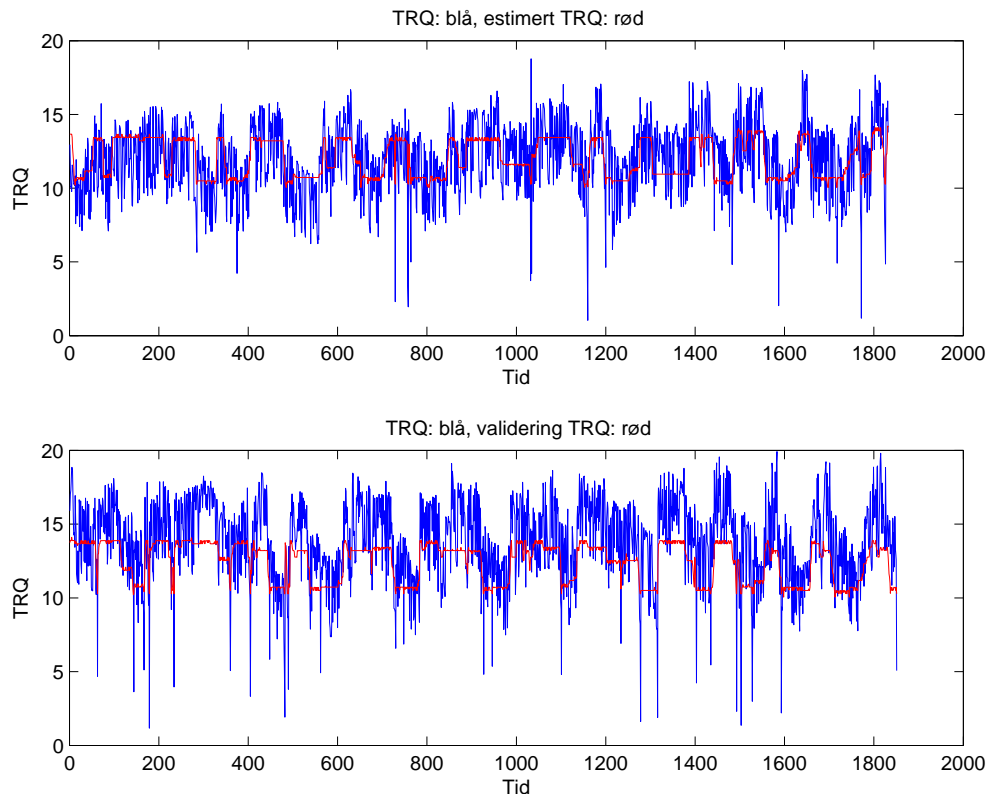
Tabellen viser at det er ikke mulig å bruke parameterestimatet fra et datasekk på et annet. For å bruke disse parameterene til sammenligning benyttes den dimensjonsløse dreiemomentkonstanten. Basert på den teoretiske dreiemomentmodellen er det laget en tilsvarende dreiemomentkonstant som vil gi en pekepinne på hvordan modellen er oppbygd. Resultatene for dreiemomentkonstanten er vist i tabell 6.2, hvor a_1 er satt lik k_1 , a_2 er satt lik k_2 og $K = \frac{k_2}{k_1}$.

Tabell 6.2: Resultater fra den første modellvariantens dreiemomentkonstantberegning.

Datasekk	k_1	k_2	K
Bronn19.xls	6.6136	0.2598	0.03928
Bronn21.xls	19.5172	0.4141	0.02122
Bronn27.xls	9.8538	0.3002	0.03047
Bronn31.xls	19.3937	0.3982	0.02053
Bronn32.xls	12.9887	0.2025	0.01559
Bronn40.xls	10.0031	0.3526	0.03525
Bronn41.xls	5.1058	0.3133	0.06136

Sett i sammenheng med dreiemomentkonstanten for datasettene viser at det sammenfaller i forhold til det teoretiske dreiemomentuttrykket. Det er mange faktorer som spiller inn under beregningene til dreiemomentkonstanten. Avviksvinkelen α til vertikal brønnbane bidrar til forskjell for dreiemomentkonstanten. Forventet i disse resultatene er at dreiemomentkonstantverdien for Bronn31.xls skulle vært større i forhold til Bronn41.xls grunnet avviksvinkelen, men det kan skyldes at det mindre rom mellom borestrengen og anulus for dette datasettet. Det er i tillegg brukt vannbasert boreslam i Bronn31.xls og Bronn32.xls som er med på å gi mindre viskøs friksjon. Det er ikke gitt hvilken viskositet det er i boreslammet for de forskjellige brønnene, men det kan tenkes at det er større viskøs friksjon i et oljebasert boreslam enn for et vannbasert boreslam. Datasettene har oppgitt en dybde med en avviksvinkel innenfor den aktuelle dybden, men det sier ingenting om hvordan brønnbanen er for mindre dybde. Er det en lang vertikal seksjon i forkant av brønnnybden til Bronn41.xls kan dette gi en god

forklaring på hvorfor dreiemomentkonstanten for dette datasettet er større enn de andre. Ved horisontal boring blir det ofte boret nesten rent vertikalt ned til reservoarlaget hvor horisontalboringen starter. Det er mange usikre momenter ved disse datasettene som det ikke har lyktes å få klarhet i. Det er derfor vanskelig å validere en god dreiemomentmodell på bakgrunn av de dataene som er tilgjengelig. Det plottes en figur som viser hvor godt valideringsdata sammenfaller med målt dreiemoment fra parameterestimater med bakgrunn i estimeringsdata, vist i figur 6.3.

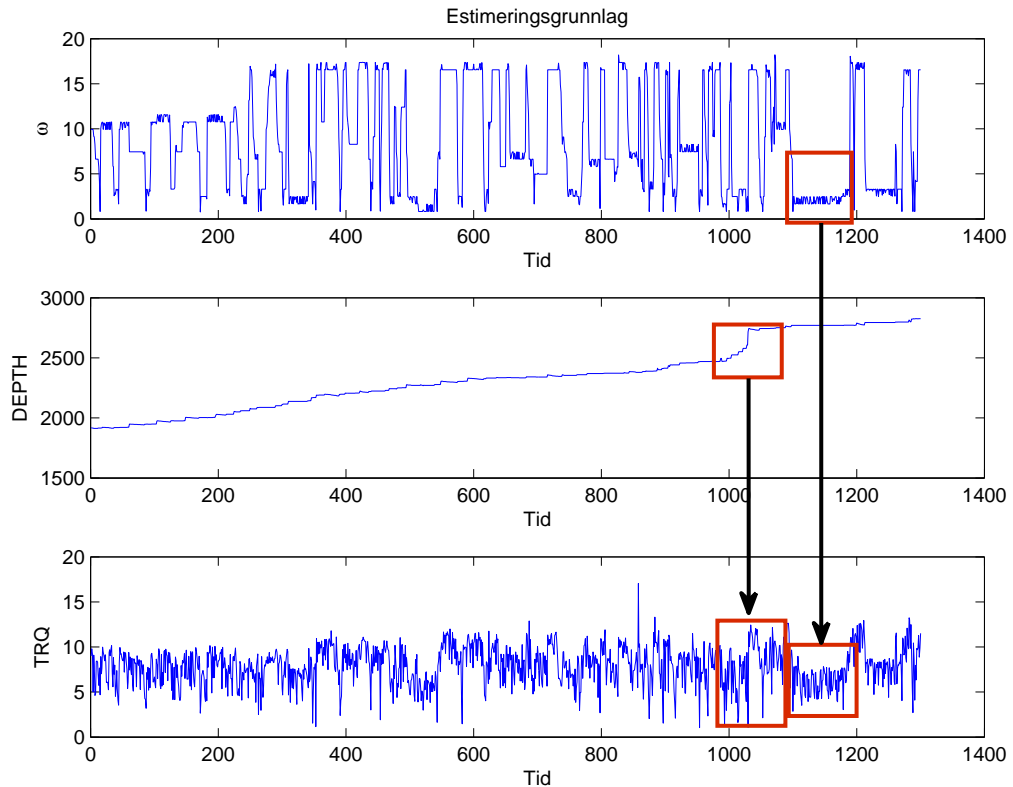


Figur 6.3: Estimert og målt TRQ plottes i den øverste grafen, mens valideringsdata og målt TRQ er plottet i den nederste med bakgrunn i data fra Bronn40.xls.

Resultatet fra figur 6.3 indikerer at det gjøres fornuftig beregning av det estimerte dreiemomenttrykket basert på modellen. Resultatene indikerer at valideringsdata sammenfaller greit med målt TRQ.

6.2 Den andre modellvarianten

Variablene til den andre modellvarianten kan visualiseres i en figur som viser ω , DEPTH og TRQ som funksjon av tiden. De er vist i figur 6.4. Det er i denne figurene tatt utgangspunkt i første halvdel av datasettet Bronn19.xls.



Figur 6.4: ω , DEPTH og TRQ plottes som funksjon av tiden fra Bronn19.xls.

Figur 6.4 viser at TRQ påvirkes av variasjonen i ω . Det er uthevet to perioder i figuren hvor den til høyre viser at det er et vesentlig fall i TRQ når det er liten rotasjon i ω . Perioden indikerer at det er en sammenheng mellom rotasjonsraten og dreiemomentet, samt at det er flere krefter som påvirker det totale dreiemomentet. TRQ påvirkes av variasjon i DEPTH men i langt mindre grad. Det er uthevet en periode hvor det er et sprang i DEPTH som indikere et utslag i TRQ. DEPTH øker også gradevis med større verdier hvor TRQ stiger noe.

Ved å parameterestimere uttrykket presentert i ligning (5.19) på bakgrunn av første halvdel av datasettet fås resultater som vist i tabell 6.3.

$$\text{TRQ} = x_0 + x_1 \cdot \omega + x_2 \cdot \text{DEPTH} \quad (5.19)$$

Tabell 6.3: Resultater fra den andre modellvariantens parameterestimater.

$$TRQ = a_1 + a_2 \cdot \omega + a_3 \cdot \text{DEPTH}$$

Datasekk	a_1	a_2	a_3
Bronn19.xls	1.4409	0.2943	0.0017
Bronn21.xls	-5.9810	0.3554	0.0076
Bronn27.xls	13.9615	0.3256	-0.0014
Bronn31.xls	-5.5227	0.2868	0.0092
Bronn32.xls	3.1708	0.1189	0.0123
Bronn40.xls	-5.0113	0.3334	0.0033
Bronn41.xls	-7.9387	0.3046	0.0034

Tabell 6.3 viser at resultatene for parameterestimeringen skiller det dynamiske dreiemomentet fra et konstantledd og et ledd i forbindelse med dybden i datasettene. Det gir et bedre parameterestimater enn for den første modellvarianten fordi det har mer informasjon om hvordan både dybde og rotasjonsraten påvirker modellen. For å kunne sammenligne resultatene for de to modellene må de settes dimensjonsløse ved hjelp av dreiemomentkonstanten. For å bruke dreiemomentkonstanten må modellformen settes lik ligning (5.27).

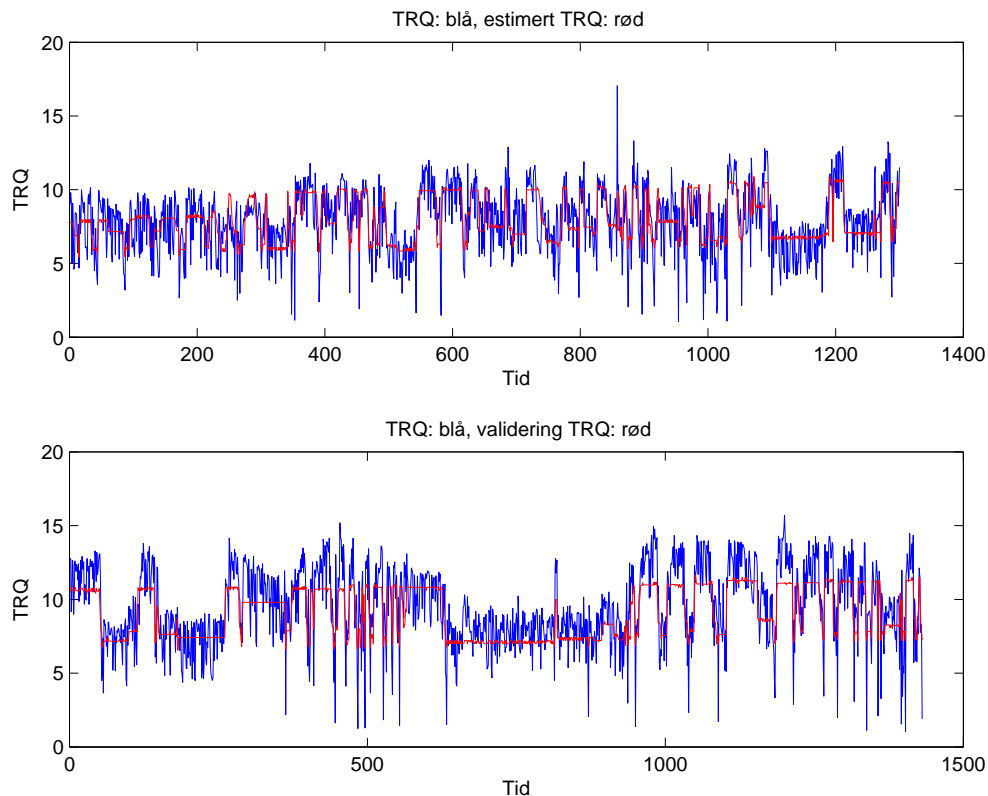
$$T = k_1 + k_2 \cdot \omega \quad (5.27)$$

Ved å ta utgangspunkt i gjennomsnittsdypden DEPTH_{mean} for den andre modellvariantens modellform kan $a_1 + a_3 \cdot \text{DEPTH}_{mean}$ settes lik k_1 og a_2 settes lik k_2 . Det kan da lages en ny tabell for dreiemomentkonstanten K vist i tabell 6.4, hvor $K = \frac{k_2}{k_1}$.

Tabell 6.4: Resultater fra den andre modellvariantens parameterestimater.

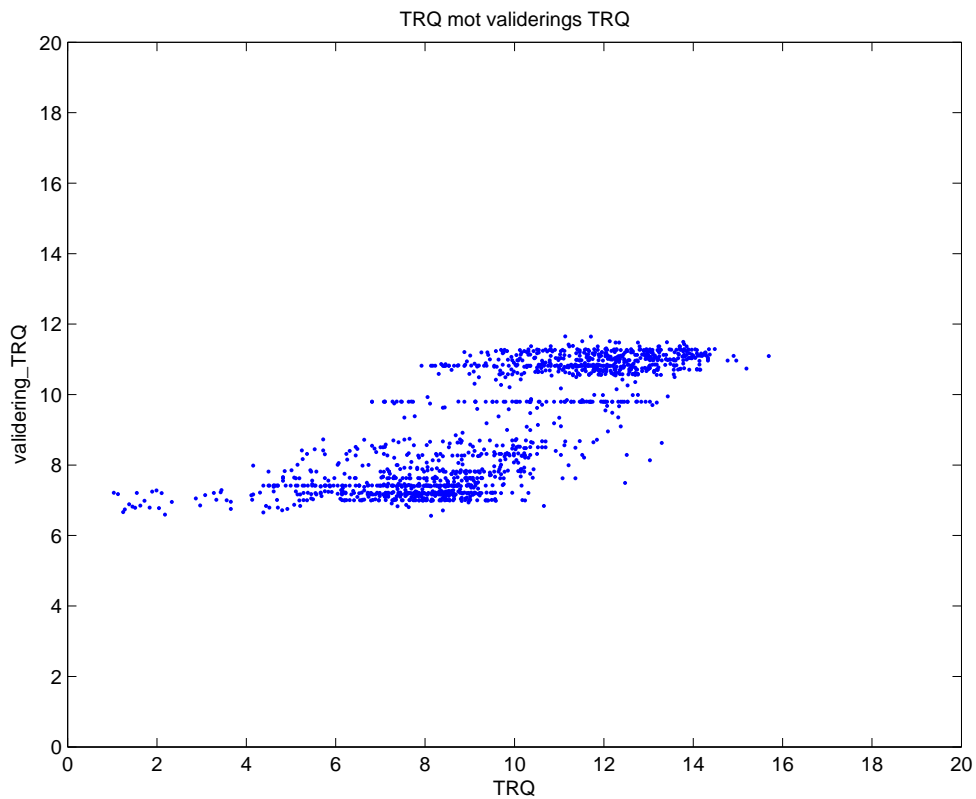
Datasekk	a_1	a_2	a_3	DEPTH_{mean}	K
Bronn19.xls	1.4409	0.2943	0.0017	2757	0.0480
Bronn21.xls	-5.9810	0.3554	0.0076	3361	0.0182
Bronn27.xls	13.9615	0.3256	-0.0014	3013	0.0334
Bronn31.xls	-5.5227	0.2868	0.0092	2696	0.0149
Bronn32.xls	3.1708	0.1189	0.0123	1029	0.0075
Bronn40.xls	-5.0113	0.3334	0.0033	4556	0.0333
Bronn41.xls	-7.9387	0.3046	0.0034	3753	0.0632

Resultatet fra tabell 6.4 viser at dreiemomentkonstanten K får større variasjon enn for den første modellvariantens dreiemomentestimater. Det kan skyldes at det er bare halve datasett som ligger til grunn for resultatene i tabell 6.4. Resultatene indikerer at ved bruk av flere parametre i parameterestimateret kan man si mer om datasettene. For å kunne si om det er gode resultater i forhold til datasettene må parameterestimateret sammenlignes med et valideringssett fra samme datasett. Det plottes derfor en figur som viser hvor godt valideringsdata sammenfaller med målt dreiemoment med bakgrunn av Bronn19.xls, vist i figur 6.5.



Figur 6.5: Estimert og målt TRQ plottes i den øverste grafen, mens valideringsdata og målt TRQ er plottet i den nederste med bakgrunn i data fra Bronn19.xls.

Figur 6.5 viser at det gjøres fornuftig beregning av det estimerte dreiemomentuttrykket basert på modellen. Resultatene indikerer at valideringsdata sammenfaller greit med målt TRQ. Det er observert for alle de aktuelle datasettene. For å se hvor godt valideringsdata sammenfaller med målt TRQ kan man se på største differanse mellom disse variablene. Det gir en indikasjon på hvor stor differansen er mellom de. For dette datasettet fås en maksimal differanse på 9.7916. For å vise dette visuelt plottes hvert tilhørende datapunkt for valideringsdata mot målt TRQ, vist i figur 6.6.



Figur 6.6: ValideringsTRQ plottes mot mot TRQ.

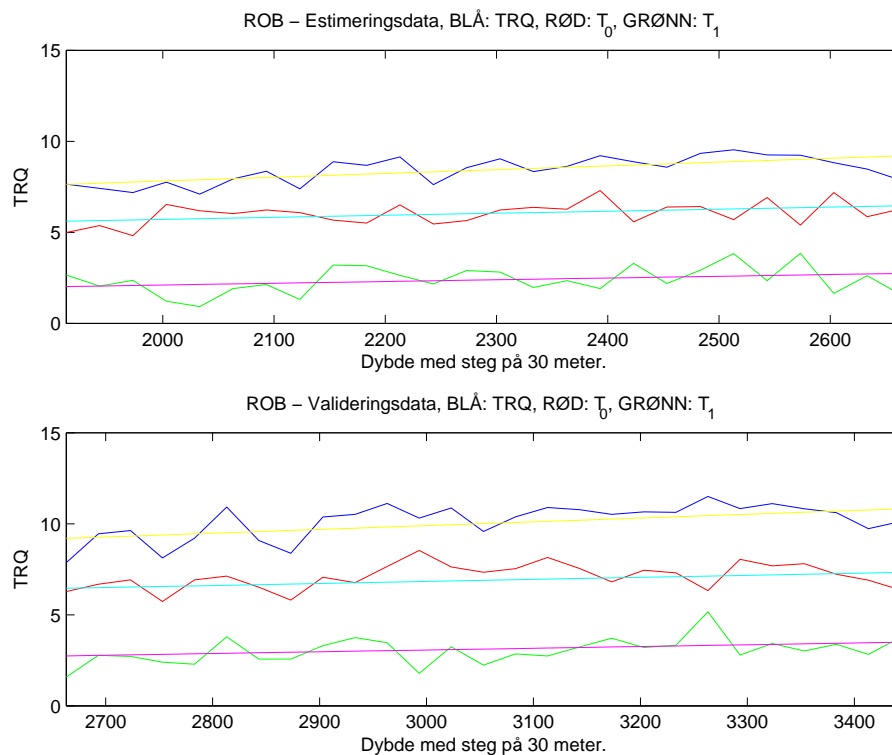
Som man kan se i figur 6.6 får man en større spredning i det målte TRQ enn valideringsdataen. Resultatet viser at det er en fornuftig etimering av datasettet. Den andre modellvariantens resultater indikerer at rotasjonsraten og dybden er lineært avhengige variabler for en dreiemomentmodell. Det viser også at det er mulig å estimere dreiemomentet i sann tid på bakgrunn av tidligere datapunkt.

6.3 Den tredje modellvarianten

Resultater etter bruk av Matlabkoden for den tredje modellvarianten vises i figur 6.7 og 6.8. Det er tatt utgangspunkt fra ligning (5.20),

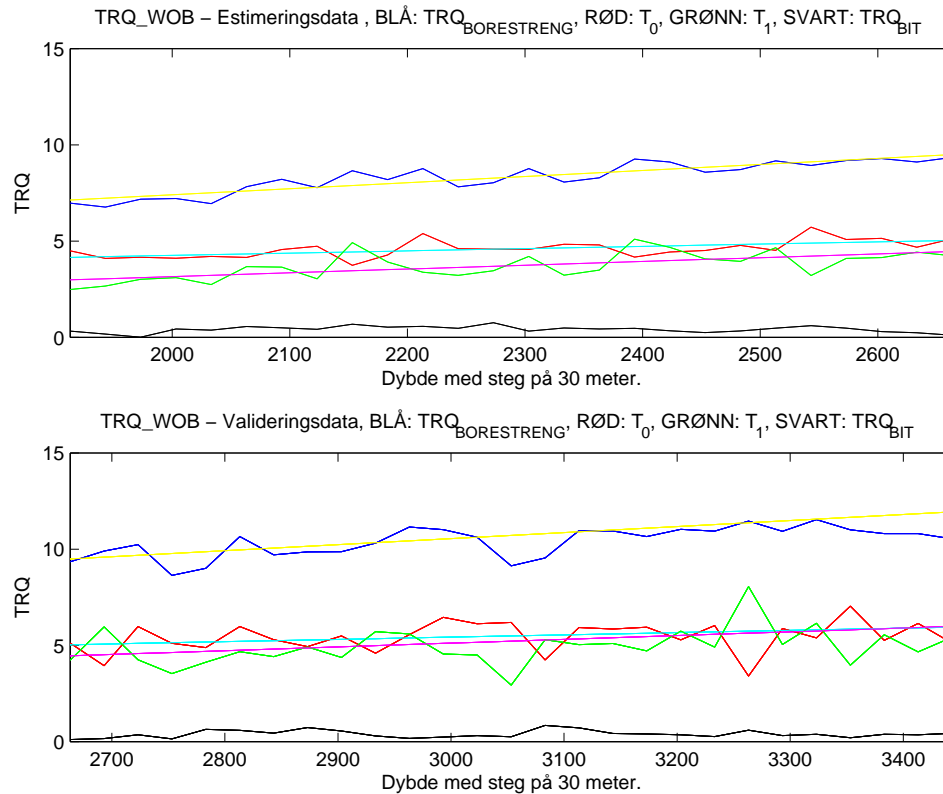
$$\begin{aligned} \text{TRQ}(k) &= x_0(k) + x_1(k) \cdot \omega(k) & k \in \{1, 2, 3, 4, \dots\} \\ x_0(k) &= t_{00}(k) + t_{01}(k) \cdot \text{DEPTH}(k) \\ x_1(k) &= t_{10}(k) + t_{11}(k) \cdot \text{DEPTH}(k) \end{aligned} \quad (5.20)$$

hvor det estimeres en trend for x_0 som i figurene vises som T_0 . Det estimeres også en trend for $x_1 \cdot \omega$ som vises i figurene som T_1 . Disse er basert på et parameterestimat fra første halvdel av variablene i datasettet. Den andre halvdel av datasettet brukes for å validere hvor gode parametere er for en tilsvarende periode. Det tas først utgangspunkt i forutsetningen om ROB hvor det totale dreiemomentet TRQ får en trend i figur 6.7. Mens det tas utgangspunkt i dreiemomentbidraget til borekrona og borestrengen i figur 6.8 der TRQ_{BIT} vises som en svart variabel og $\text{TRQ}_{BORESTRENG}$ får en trend. Det er viktig å ha klart for seg at dreiemomentberegningen estimeres uten borekronas dreiemomentbidrag TRQ_{BIT} og derfor vises denne kun for å få med størrelsesforholdet.



Figur 6.7: Dreiemomentet TRQ plottet som funksjon av dybde DEPTH og rotasjonsrate ω , med utgangspunkt i datasettet Bronn19.xls. Den gule streken er den estimerte trenden for det totale dreiemomentet TRQ. Den turkise streken er den estimerte trenden for T_0 som funksjon av dybde DEPTH. Den lilla streken er den estimerte trenden for det dynamiske dreiemomentet T_1 som er en funksjon av dybde DEPTH og rotasjonsraten ω .

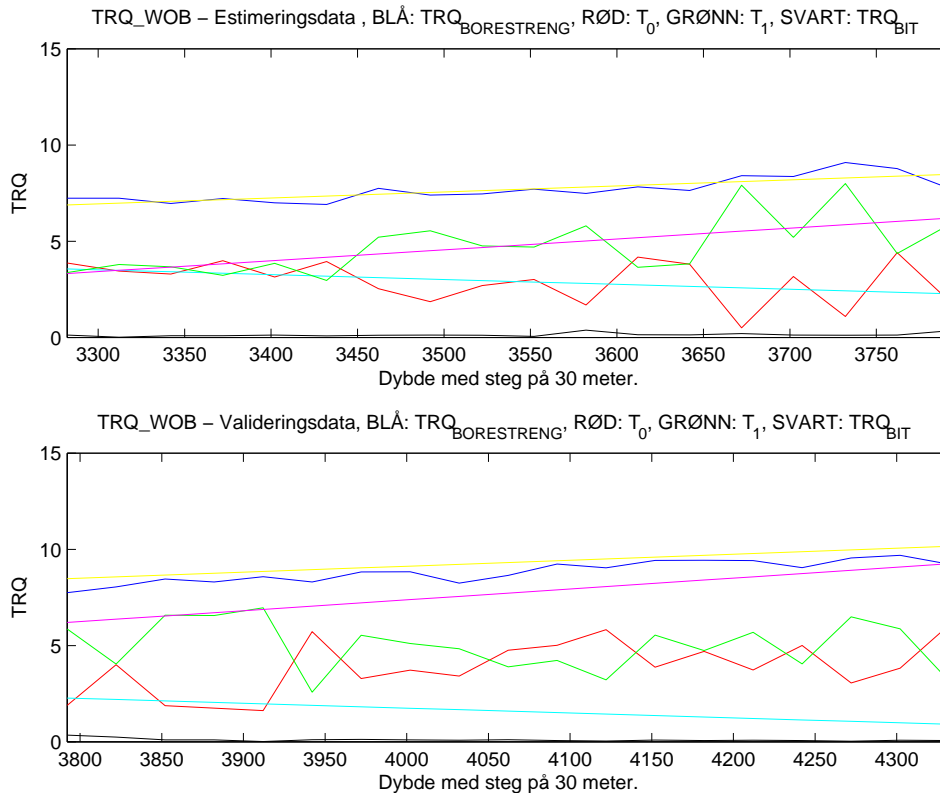
Resultatet fra figur 6.7 viser at den tredje modellvariantens parameterestimater finner en god trend for dreiemomentet til datasettet Bronn19.xls. De estimerte parameterverdiene passer godt med valideringsdataene.



Figur 6.8: Dreiemomentet TRQ plottet som funksjon av dybde DEPTH og rotasjonsrate ω , med utgangspunkt i datasettet Bronn19.xls. Den gule streken er den estimerte trenden for det totale dreiemomentet TRQ. Den turkise streken er den estimerte trenden for T_0 som funksjon av dybde DEPTH. Den lilla streken er den estimerte trenden for det dynamiske dreiemomentet T_1 som er en funksjon av dybde DEPTH og rotasjonsraten ω .

Resultatene fra figur 6.8 viser at de estimerte parameterverdiene passer godt med valideringsdataene. Ved utgangspunkt i ROB (figur 6.7) vil parameterestimater baseres på færre datapunkt, men får en trend som følger bedre valideringsdata enn for figur 6.8. Forutsetningsfunksjonen TRQ_WOB er en metode laget for å eliminere dreiemomentbidraget fra borekrona. Det tas da utgangspunkt i alle datapunkt, men subtraherer dreiemomentbidraget til borekrona fra det totale dreiemomentet. Det blir da mange flere datapunkt i parameterestimater som kan gi mer validerende parameterverdier. Et annet resultat er at ved å eliminere dreiemomentbidraget fra borekrona gir parameterestimater ut større dynamisk dreiemomentbidrag T_1 enn for ROB. Det er observerbart for alle de aktuelle datasettene. Her er det ikke trenden som er vesentlig, men brønnbanens relasjon til forholdet. Det kan tenkes at høyere trykk på borekronen vil føre til at borestrengen får litt mindre strekk og derfor letter trykket mot borehullets vegger. Borestrengen kan da dra med seg boreslam rundt hele borestrengen

og får større glidefunksjon. Rotasjonsraten ω har også større gjennomsnittsverdier for hvert bingenummer som også fører til at forholdet er forskjellig. Resultatene fra et annet datasett er plottet for å vise at den tredje modellvarianten ikke nødvendigvis gir et godt resultat for alle datasettene, vist i figur 6.9.



Figur 6.9: Dreiemomentet TRQ plottet som funksjon av dybde DEPTH og rotasjonsrate ω , med utgangspunkt i datasettet Bronn41.xls. Den gule streken er den estimerte trenden for det totale dreiemomentet TRQ. Den turkise streken er den estimerte trenden for T_0 som funksjon av dybde DEPTH. Den lilla streken er den estimerte trenden for det dynamiske dreiemomentet T_1 som er en funksjon av dybde DEPTH og rotasjonsraten ω .

Resultatet vist i figur 6.9 indikerer at det er ikke nødvendigvis like store forhold mellom T_0 og T_1 gjennom hele datasettet. Det indikerer at den viskøse friksjonen får større bidrag for noen dybder enn for andre og viser at formasjonen og brønnbanen kan variere i et datasett. De estimerte trendene for T_0 og T_1 i Bronn41.xls følger derfor ikke like godt valideringsdata som Bronn19.xls gjør. Det er derfor stor usikkerhetsfaktor ved brønnbaneforholdene til hvert enkelt datasett. Det er laget en tabell som viser alle estimerte parametrene for de aktuelle datasettene, vist i tabell 6.5.

Tabell 6.5: Resultater fra den tredje modellvariantens parameterestimat.

$TRQ_{ROB} = (t_{00} + t_{01} \cdot DEPTH) + (t_{10} + t_{11} \cdot DEPTH) \cdot \omega$				
Datsett	t_{00}	t_{01}	t_{10}	t_{11}
Bronn19.xls	3.0481	0.0013	0.1041	0.0001
Bronn21.xls	-4.3805	0.0074	0.1809	0.00003
Bronn27.xls	16.0750	-0.0023	-0.0737	0.0001
Bronn31.xls	-43.8948	0.0230	2.6106	-0.0008
Bronn32.xls	0.1186	0.0167	0.3104	-0.0002
Bronn40.xls	1.8779	0.0018	-0.4429	0.0002
Bronn41.xls	-3.5546	0.0023	-0.0693	0.0001

$TRQ_{BORESTRENG} = (t_{00} + t_{01} \cdot DEPTH) + (t_{10} + t_{11} \cdot DEPTH) \cdot \omega$				
Datsett	t_{00}	t_{01}	t_{10}	t_{11}
Bronn19.xls	2.1460	0.0011	0.1201	0.0001
Bronn21.xls	-17.1841	0.0106	1.4921	-0.0003
Bronn27.xls	Mangler BPOS			
Bronn31.xls	34.2337	-0.0053	-2.4912	0.0010
Bronn32.xls	-1.9974	0.0152	0.6508	-0.0004
Bronn40.xls	-1.1738	0.0020	0.3498	-0.000005
Bronn41.xls	-4.4513	0.0022	-0.1120	0.0001

Resultatene fra tabell 6.5 viser at det lages en trend for alle aktuelle datasettene bortsett fra Bronn27.xls som mangler BPOS. Man kan derfor ikke estimere borekronas eller borestrenghens dreiemomentbidrag på bakgrunn av forutsetningsfunksjonen TRQ_{WOB} . For at disse parameterverdiene skal kunne sammenlignes med de tidligere modellvariantene må de gjøres dimensjonsløse. De settes derfor i sammenheng med gjennomsnittet av dybden $DEPTH_{mean}$ for hvert datasett, og får et uttrykk som passer med modellformen til ligning (5.27).

$$T = k_1 + k_2 \cdot \omega \quad (5.27)$$

$t_{00} + t_{01} \cdot DEPTH_{mean}$ settes som k_1 og $t_{10} + t_{11} \cdot DEPTH_{mean}$ settes som k_2 , hvor dreiemomentkonstanten er $K = \frac{k_2}{k_1}$. Disse utregningene er lagt inn i tabell 6.6.

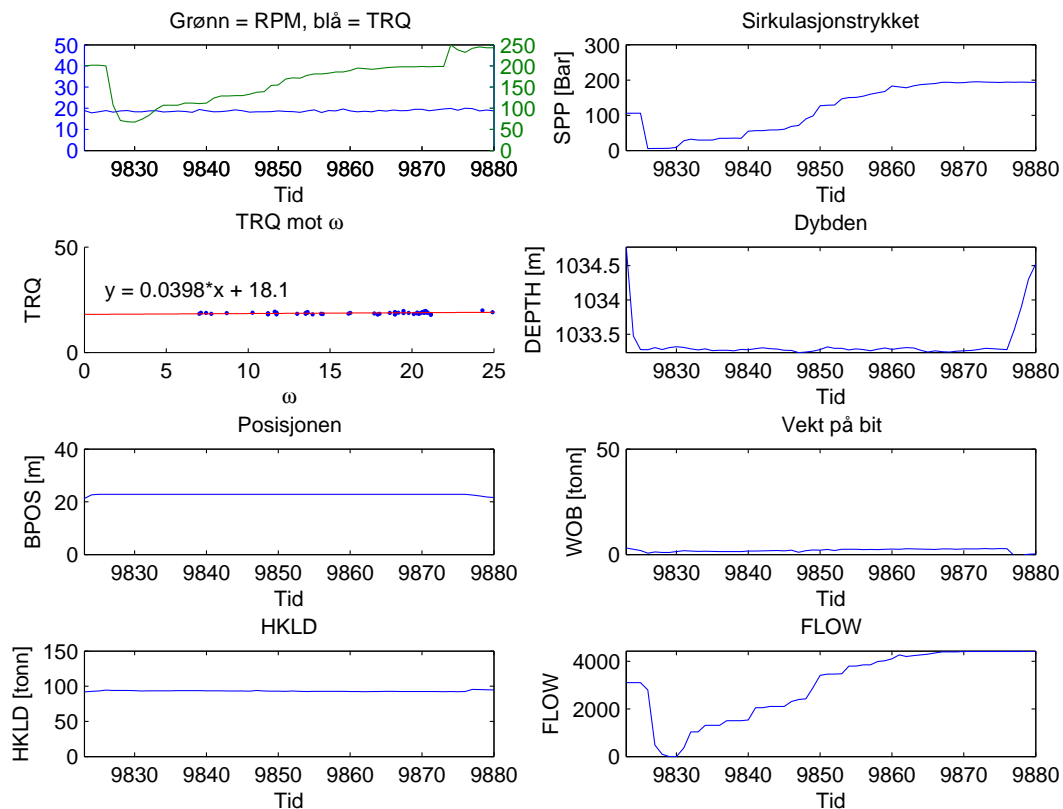
Tabell 6.6: Dreiemomentkonstant for den tredje modellvariantens parametersetimat.

Datsett	$DEPTH_{mean}$	$TRQ_{ROB} K$	$TRQ_{BORESTRENG} K$
Bronn19.xls	2757	0.0601	0.0764
Bronn21.xls	3361	0.0137	0.0262
Bronn27.xls	3013	0.0249	-
Bronn31.xls	2696	0.0251	0.0103
Bronn32.xls	1029	0.0060	0.0175
Bronn40.xls	4556	0.0465	0.0412
Bronn41.xls	3753	0.0603	0.0692

Resultatet i tabell 6.6 viser at dreiemomentkonstantberegningen for de aktuelle datasettene varierer i liten grad mellom forutsetningene for den tredje modellvarianten.

7 Analyse og diskusjon

De fleste datasettene har mange korte perioder med lite variert rotasjon for et parameterestimert for dynamisk dreiemoment. Det gjør det vanskelig å få fram en lineær trend mellom dreiemomentet og rotasjonsraten. Derfor er mange datasett utelukket for å estimere dynamisk dreiemoment i dette prosjektet. Enkelte perioder er utenfor noen logisk forklaring, som eksempel vist i figur 7.1, men likevel tatt med i parameterestimeringen for det dynamiske dreiemomentet.



Figur 7.1: En periode fra Bronn32.xls med ROB og stor variasjon i RPM, SPP og FLOW, men liten endring i TRQ. Denne perioden er et eksempel på at det er en komplisert prosess og vanskelig å fastslå en god modell for dreiemomentet.

Figur 7.1 viser at det er perioder hvor det er vanskelig å gi en god forklaring på hvordan dreiemomentet påvirkes av de ulike variablene. Man skulle tro at ved å få høyere trykk i brønnen vil det være vesentlig tyngre å rotere borestrengen, men her vises bare en veldig liten dreiemomentendring. I plottet for TRQ og ω vises en trend for dreiemomentet som funksjon av rotasjonsraten, med $y = 0.0398 * x + 18.1$ hvor y er TRQ og x er ω . Det er mulig å tilpasse en dreiemomentmodell etter variablene fra et datasett, men vanskelig å fremstille en modell som gjelder for flere datasett. Derfor er dreiemomentkonstanten en tilnæringsverdi som kan gi en modelltilpassning for de forskjellige datasettene. Ved å ta utgangspunkt i

den teoretiske dreiemomentmodellen i prosjektet kan man finne de forskjellige parametrene som inngår i modellen, men her igjen er det vanskelig for dette prosjektet. Datasettene har ikke alle parametre som for eksempel radius på borestrengen, viskositeten i boreslammet og friksjonskoeffisienten tilgjengelig. Noen parametre kan indikere resultater for andre, men gir ikke en fasit. Dreiemomentkonstanten for de forskjellige modellene funnet i datasettene er vist i tabell 7.1.

Tabell 7.1: Dreiemomentkonstant for de tre modellvariantenes parametersetimat.

<i>K</i>				
Datasett	1.modell	2.modell	3.modell _{ROB}	3.modell _{BORESTRENG}
Bronn19.xls	0.0328	0.048	0.0601	0.0764
Bronn21.xls	0.02122	0.0182	0.0137	0.0262
Bronn27.xls	0.03047	0.0334	0.0249	-
Bronn31.xls	0.02053	0.0149	0.0251	0.0103
Bronn32.xls	0.01559	0.0075	0.0060	0.0175
Bronn40.xls	0.03525	0.0333	0.0465	0.0412
Bronn41.xls	0.06136	0.0632	0.0603	0.0692

Resultatet i tabell 7.1 indikerer at de forskjellige modellvariantene gir forskjellige parameterverdier for datasettene som varierer i forhold til dreiemomentkonstanten. Det gir en pekepinn på hvordan datasettene oppfører seg i forhold til dynamisk dreiemoment, men ingen fasit. Dreiemomentkonstanten som er beregnet i dette prosjektet er basert på summen av en Coulomb friksjonsmodell og konsentrisk newtonisk viskositetsmodell. Ved å ta utgangspunkt i denne teoretiske dreiemomentmodellen kan dreiemomentkonstanten for datasettene gi en tilnærming av variablene. Man kan da antyde mer hvordan modellen oppfører seg i forhold til de forskjellige parametrene samtidig som man kan fastslå at det er et dynamisk dreiemoment observert for alle datasettene. For en borestrengtilnærming er det nok mer riktig å utlede en eksentrisk Bingham plastisk viskositetsmodell i kombinasjon med den Coulombe friksjonsmodellen, som en funksjon av eksentrisitet og rotasjonsraten. Dette vil sannsynligvis gi en god tilnærming av borestrengens dynamiske dreiemoment. Dreiemomentkonstanten i prosjektet viser at det er en lineær sammenheng mellom dreiemomentet og rotasjonsraten, som kalles for dynamisk dreiemoment i dette prosjektet. Ved å se på en eksentrisk modell vil sannsynligvis dreiemomentkonstanten tilnærmes bedre datasettene. Mangler på informasjon fra datasettene har gjort til at det er vanskelig å validere hvor god modell som er laget, men resultatene indikerer at det er en tilnæringsmodell.

8 Konklusjon og forslag til videre analyse

Resultatene fra forbehandlingen av datasettene viser at koden gjør fornuftige behandlinger av datasettene i forhold til å estimere dynamisk dreiemoment. Det er gjort rede for to metoder å fjerne dreiemomentbidraget fra borekrona på, som gjør fornuftige behandlinger. Det er likevel muligheter for forbedringer i alle forbehandlingskoder. Det oppfordres til å bruke Matlabkoden for en videre analyse, men også å se på forbedringer ved koden.

Det er laget en konsentrisk newtonsk dreiemomentmodell i prosjektet på bakgrunn fra teori om et viskometer. Det har ikke laget en eksentrisk eller Bingham væskebasert dreiemomentmodell. For videre forskning vil en slik væskemodell sannsynligvis gi en god tilnærming.

Den teoretiske dreiemomentmodellen bygger på et produkt mellom en konsentrisk sylinder i et newtonsk væskebasert viskometer og Coulomb friksjon. Ved å bruke denne modellen kan man si at det dynamiske dreiemomentet varierer med brønnbane, boreslammets viskositet, radius til borestreng og brønnbanen, lengden på borestrengen og sannsynligvis eksentrisiteten mellom borestrengen og borehullet.

Resultatene fra datasettene viser at dreiemomentet er lineært avhengig av rotasjonsraten, og bekrefter at det er en viskøs friksjon ved boring. Forholdet mellom Coulomb og dynamisk dreiemoment i datasettene varierer med brønnbanen for alle datasettene.

Resultatene indikerer at det er en lineær avhengighet mellom rotasjonsraten og dreiemomentet. Resultatene viser også at en generell dreiemomentmodell, basert på tilgjengelig data for datasettene som er representert i oppgaven, ikke kan valideres.

Referanser

- [1] Bernt S. Aadnoy. *Mechanics of Drilling*. 2006.
- [2] Håvard Devold. *ABB ATPA Oil and Gas - Oil and gas production handbook*. 2006.
- [3] Hugh D. Young & Roger A. Freedman. *University physics*, 11th edition, 2004.
- [4] John Haugan. *Formler og tabeller*, 2004.
- [5] Finn Haugen. *Regulering av dynamiske systemer, 1*. 2000.
- [6] Finn Haugen. *Dynamiske systemer, modellering, analyse og simulering*, 3.utgave, 2007.
- [7] Finn Haugen. *Lecture notes in MODELS, ESTIMATION and CONTROL*. 2009.
- [8] Adam T. Borgoyne jr. & Martin E. Chenevert & Keith K. Millheim & F. S. Young jr. *Applied drilling engineering*, 2005.
- [9] Robello Samuel. *Friction factors: What are they for torque, drag, vibration, bottom hole assembly and transient surge/swab analyses?* IADC/SPE 128059, 2010.
- [10] Erik Skaugen. *Introduksjon - boring a*.
- [11] Erik Skaugen. *Introduksjon - boring b*.
- [12] Erik Skaugen. *Kompendium 1 - boring*, 1997.
- [13] Olaf Skjeggstad. *Boreslamteknologi: Teori og praksis*, 1989.
- [14] Karl Skretting. *Forelesningsnotater, mik 130 systemidentifikasjon*, 2009.
- [15] Roald E. Walpole & Raymond H. Myers & Sharon L. Myers & Keying Ye. *Probability & statistics for engineers & scientists*, 8th edition, 2007.

A Utledning av dreiemoment fra viskometer

Newtonsk væske:

$$T = S_S \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot h) \cdot r \quad (\text{A.1})$$

$$S_S = \eta \cdot S_H = \eta \cdot r \frac{d\omega}{dr} \quad (\text{A.2})$$

$$T = \eta \cdot r \cdot \frac{d\omega}{dr} \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot h) \cdot r \quad (\text{A.3})$$

$$T = \eta \cdot \frac{d\omega}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot h \cdot r^3 \quad (\text{A.4})$$

$$T \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^3} dr = \eta \cdot 2 \cdot \pi \cdot h \cdot \int_0^{\omega_2} d\omega \quad (\text{A.5})$$

$$T \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) = \eta \cdot 2 \cdot \pi \cdot h \cdot \omega_2 \quad (\text{A.6})$$

$$T \cdot \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) = \eta \cdot 4 \cdot \pi \cdot h \cdot \omega_2 \quad (\text{A.7})$$

$$T = \frac{\eta \cdot 4 \cdot \pi \cdot h \cdot \omega_2}{\left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right)} \quad (\text{A.8})$$

B Utledning av dreiemomentkonstant

Dimensjonsløst uttrykk:

$$T(\omega) = k_1 + k_2 \cdot \omega \quad (\text{B.1})$$

$$T(0) = k_1 \quad (\text{B.2})$$

$$T^x = \frac{T(\omega)}{T(0)} = 1 + \frac{k_2}{k_1} \cdot \omega = 1 + K \cdot \omega \quad (\text{B.3})$$

$$T(\omega) = \mu \cdot h \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot r_1 + \eta \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot h}{\left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2}\right)} \cdot \omega \quad (\text{B.4})$$

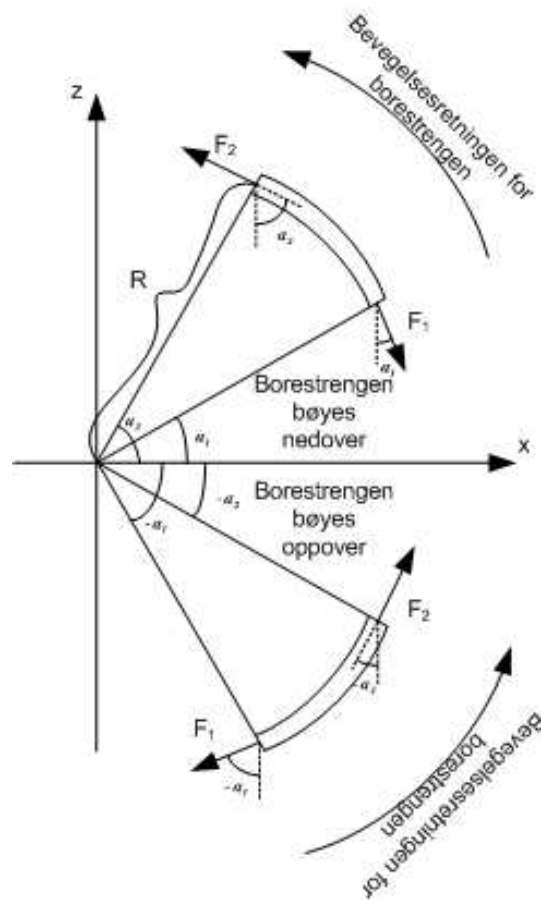
$$T^x = 1 + \frac{\eta \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot h}{\left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2}\right)} \cdot \omega}{\mu \cdot h \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot r_1} \quad (\text{B.5})$$

$$1 + K \cdot \omega = 1 + \frac{\eta \cdot 4 \cdot \pi \cdot h \cdot \omega}{\mu \cdot h \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot r_1 \cdot \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2}\right)} \quad (\text{B.6})$$

$$K = \frac{\eta \cdot 4 \cdot \pi}{\mu \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot r_1 \cdot \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2}\right)} \quad (\text{B.7})$$

C Djurhuus *Torque and Drag*-modell

Teorien i dette vedlegget gir ikke direkte grunnlag for en diskret modell, men det er her vist en kontinuerlig modell hentet fra [1]. Notasjonen er her litt forskjellig fra læremateriellet. Modellen tar utgangspunkt i kreftene som oppstår ved aksiell friksjon og bøyebelastning på borestrengen. Ved å se på normalkraften kan man regne ut dreiemomentet hvor borestrengen bøyes. Her er et sammendrag av ligningene til Djurhuus ligninger for strekk i sirkelbuebøy på borestrengen. Figur C.1 viser hvordan strekkreftene F_1 og F_2 kommer fram etter dekomponering av kreftene. Bend brukes her for bøyd borestrengstykke.



Figur C.1: Viser kreftene F_1 og F_2 , hvor F_2 alltid er den øverste kraften.

Dreiemomentet i en bend som vist i figur C.1 er gitt ved:

$$M_s = \left| r \cdot \mu \cdot \int_{N(\alpha_1)}^{N(\alpha_2)} dN \right| \quad (\text{C.1})$$

- M_s : Vridningsmotstand [Nm]
 r : radius av brønnhullet [m]
 μ : friksjonskoeffisienten
 N : Normalkraften [N]
 α_1 : borehullets vinkel i bunnen av bendet
 α_2 : borehullets vinkel i toppen av bendet

Normalkraften er gitt ved:

$$dN = (F + M \cdot R \cdot \sin\alpha) \cdot d\alpha \quad (C.2)$$

- F : strekkraftene [N]
 α : borehullets vinkel i bendet
 M : borestrengseksjonens vekt inkludert oppdrift [kg]
 R : radius av bendet [m]

Strekkrefter i bendet er gitt ved:

$$F_2 = F_1 \cdot e^{\pm\mu(\alpha_2 - \alpha_1)} + \frac{M \cdot R}{1 + \mu^2} \left\{ \begin{array}{l} (1 - \mu^2) \cdot (\sin\alpha_2 - e^{\pm\mu(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot \sin\alpha_1) \\ -2(\pm\mu) \cdot (\cos\alpha_2 - e^{\pm\mu(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot \cos\alpha_1) \end{array} \right\} \quad (C.3)$$

- F_1 : strekkraften i bunnen av bendet [N]
 F_2 : strekkraften i toppen av bendet [N]

Ved innsetting får man følgende uttrykk for dreiemomentet over oppbyggingskurven til borestrengen:

$$M_s = \left| r \cdot \mu \left[\pm \frac{1}{\mu} F_1 (e^{\pm\mu(\alpha_2 - \alpha_1)} - 1) + \frac{M \cdot R}{1 + \mu^2} \left\{ \begin{array}{l} 2(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) - (1 - \mu^2) \left(\pm \frac{1}{\mu} \right) (e^{\pm\mu(\alpha_2 - \alpha_1)} - 1) \sin\alpha_1 \\ + 2(\pm\mu)(\sin\alpha_1 - \sin\alpha_2) + 2(e^{\pm\mu(\alpha_2 - \alpha_1)} - 1) \cos\alpha_1 \end{array} \right\} \right] \right| \quad (C.4)$$

Hvis det ikke er aksiell friksjon, dvs. at borestrengen roterer uten å løftes eller senkes, kan man bruke følgende uttrykk for dreiemomentet.

$$M_s = |r \cdot \mu [F_1 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) + M \cdot R \cdot [2(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) - (\alpha_1 - \alpha_2) \sin\alpha_1]]| \quad (C.5)$$

D Modelling i Matlab

Matlab koden i dette kapitlet er utviklet for å finne en generell modell for det dynamiske dreiemomentet. Parameterestimatene til de predefinerte modellformene for de forskjellige modellene er utledet i delkapittel D.1-D.3.

D.1 Første modell

Her ble først periodene plukket manuelt med alle forutsetningen som ligger til grunn for den første modellen. Alle periodene ble plottet med TRQ mot $\text{RPM} \cdot \frac{2\pi}{60}$. Det ble benyttet minste kvadraters metode over de aktuelle dybdeenhetene med modellformen $TRQ = x_0 + x_1 \cdot \omega$. Det var tungvint å få fram resultatene. En algoritme som finner alle funksjonene i matlab gjorde det lettere å komme fram til resultatene. Resultatet ble at RPM varierte for lite innenfor en konstant dybde til å få gode grunnlag for parameterestimat i den gitte modellformen. Derfor ble denne modellens dybdeenheter satt i binger som for den tredje modellen. Koden som utfører dette er vist under.

```
k=1; % Deklarerer tellevariabel
j=30; % Dybdeenheter for hver dybdebinge.
l=0; % Dybdeenheter i overlapping.
m=j-l; % Steglengden i dybden. mindre steglengde gir større speding.
% Deklarerer variabler
w = [0:0.01:20];
a = [];
% Filtrering
%[b,a1] = butter(1,.2);
figure
for i = min(DEPTH_1):m:max(DEPTH_1),
    if i+j<max(DEPTH)
        P = perioder1(TIME,DEPTH,RPM,TRQ,WOB,HKLD,BPOS,SPP,i,i+j);
    else
        P = perioder1(TIME,DEPTH,RPM,TRQ,WOB,HKLD,BPOS,SPP,i,max(DEPTH));
    end
    TRQ_filt = P(:,4); % filtfilt(b,a1,P(:,4));
    RPM_filt = P(:,3); % filtfilt(b,a1,P(:,3));
    u = RPM_filt.*((2*pi)/60); % 1 input
    y = TRQ_filt; % 1 output
    X = [ones(size(u)) u];
    a(:,k) = X\y;
    Y = X*a(:,k);
    plot(w,[a(1,k)+a(2,k)*w]);
    hold on
    i=i+m;
    k=k+1;
    if i>max(DEPTH)-l
        break
    end
end
end
axis([0 20 0 inf])
title('TRQ mot \omega'), ylabel('TRQ'), xlabel('\omega');
```

D.2 Andre modell

Modellen bygger på en lineær avhengighet mellom inngangsvariablene DEPTH og RPM. Et datasett deles i to deler og bruker funksjonen `perioder` for å få alle forutsetningene med ROB. Deretter fjernes NaN ved hjelp av funksjonen `fjerne_nan`, og det lages en dialogboks for å kontrollere at like mange NaN er fjernet i alle variabler. Deretter settes modellen i en matrise ved bruk av følgende kode:

```
u1 = [RPM_uten_nan.*((2*pi)/60) DEPTH_uten_nan]; % 2 estimerings inputs
y1 = TRQ_uten_nan; % 1 estimerings output
u2 = [RPM_uten_nan_2.*((2*pi)/60) DEPTH_uten_nan_2]; % 2 validerings inputs
y2 = TRQ_uten_nan_2; % 1 validerings output
```

Deretter plottes TRQ med tiden sammen med både $RPM \cdot \frac{2\pi}{60}$ og DEPTH for å se på relasjonen, vist i koden under:

```
subplot(3,1,1)
plot(u1(:,1)), title('Estimeringsgrunnlag');
ylabel('\omega'), xlabel('Tid');
subplot(3,1,2)
plot(u1(:,2))
ylabel('DEPTH'), xlabel('Tid');
subplot(3,1,3)
plot(y1(:,1))
ylabel('TRQ'), xlabel('Tid');
```

Multipel lineær regresjonsmodell med minste kvadraters metode benyttes for modellformen $TRQ = a_1 + a_2 \cdot \omega + a_3 \cdot DEPTH$ til estimeringsdata, vist i koden under:

```
X = [ones(size(u1(:,1))) u1(:,1) u1(:,2)];
a = X \ y1
Y = X * a;

est_TRQ = a(1) + a(2) * u1(:,1) + a(3) * u1(:,2);
val_TRQ = a(1) + a(2) * u2(:,1) + a(3) * u2(:,2);

MaxErr = max(abs(val_TRQ - y2))
```

a -matrisa gir ut tilnærmingen av parameterestimatet, som gir en relasjon mellom Coulomb friksjonsbasert, dynamisk og dybdebasert dreiemoment. For å se hvor god modellen sammenfaller med datasettet plottes TRQ og valideringsdata som funksjon av tiden.

D.3 Tredje modell

Koden som vist for den første modellen i kapittel D.1 blir brukt også for den tredje modellen med noen endringer, vist under.

```

k=1; % Deklarerer tellevariabel
j=30; % Sampelpunkt for hver dybde.
l=0; % overlappingdybde.
m=j-l; % Steglengden i dybden. mindre steglengder gir større variasjon.
T = []; % Deklarerer variabler
w = [];
D = [];
a = [];
%[b, a1] = butter(1, .2);
for i = min(DEPTH_1):m:max(DEPTH_1),
    if i+j<max(DEPTH)
        P = perioder1 (TIME, DEPTH, RPM, TRQ, WOB, HKLD, BPOS, SPP, i, i+j);
    else
        P = perioder1 (TIME, DEPTH, RPM, TRQ, WOB, HKLD, BPOS, SPP, i, max(DEPTH));
    end
    TRQ_filt = P(:, 4); % filtfilt(b, a1, P(:, 4));
    RPM_filt = P(:, 3); % filtfilt(b, a1, P(:, 3));
    u = RPM_filt.*((2*pi)/60); % 1 input
    y = TRQ_filt; % 1 output
    X = [ones(size(u)) u];
    a(:, k) = X\y;
    Y = X*a(:, k);
    T(k) = mean(P(:, 4));
    w(k) = mean(P(:, 3).*((2*pi)/60));
    D(k) = i;
    i=i+m;
    k=k+1;
    if i>max(DEPTH)-l
        break
    end
end
end

```

Det blir deretter laget to estimatvariabler for stasjonært og dynamisk dreiemoment for hver dybdebinge. Samt nye variabler for dybdeverdien og gjennomsnittet til TRQ, vist i koden under.

```

T_0 = a(1, :)' ;
T_1 = a(2, :)' .* w';
trq_0 = T';
Dybde = D';

```

Deretter fjernes NaN og inf verdier i de aktuelle variablene.

```
% Fjerner nan og inf
nan = find(isnan(Dybde)|isnan(T_0)| isnan(T_1) | isnan(trq_0)|...
          isinf(Dybde)| isinf(T_0)| isinf(T_1)| isinf(trq_0));
T_0(nan) = [];
T_1(nan) = [];
Dybde(nan) = [];
trq_0(nan) = [];
```

Deretter brukes minste kvadraters metode over T_0 og T_1 .

```
% LS For  $T_0 = a_{00} + a_{01} * Depth$ ;
X = [ones(size(Dybde)) Dybde];
a0 = X \ T_0
Y1 = X * a0;
% LS For  $T_1 = a_{10} + a_{11} * Depth$ ;
X = [ones(size(Dybde)) Dybde];
a1 = X \ T_1
Y2 = X * a1;
```

Deretter plottes den første av to figurer ved bruk av følgende kode.

```
% plotter figur
figure(7)
aa(1) = subplot(2,1,1);
plot(trq_0, 'b')
hold on
plot((T_0), 'r')
plot(Y1, 'c')
plot((T_1), 'g')
plot(Y2, 'm')
plot(Y1+Y2, 'y')
title('ROB-LS over flere dybdeperioder, BLÅ: TRQ, RØD: T_0, GRØNN: T_1');
ylabel(''), xlabel(['Dybde med steg på', int2str(m), ' meter.']);
axis([-Inf Inf 0 15])
```

Deretter brukes tilsvarende kode med en litt ulik forutsetning enn den forrige. Her tas det utgangspunkt i dreiemomentet minus dreiemomentbidraget til borekrona.

```

for i = min(DEPTH_1):m:max(DEPTH_1),
    if i+j<max(DEPTH)
        P = perioder2(TIME,DEPTH,RPM,TRQ_borestreng,TRQ_bit',WOB,...
            HKLD,BPOS,SPP,i,i+j);
    else
        P = perioder2(TIME,DEPTH,RPM,TRQ_borestreng,TRQ_bit',WOB,...
            HKLD,BPOS,SPP,i,max(DEPTH));
    end
    TRQ_filt = P(:,4);          % filtfilt(b,a1,P(:,4));
    RPM_filt = P(:,3);         % filtfilt(b,a1,P(:,3));
    u = RPM_filt.*((2*pi)/60); % 1 input
    y = TRQ_filt;              % 1 output
    X = [ones(size(u)) u];
    a(:,k) = X\y;
    Y = X*a(:,k);
    Tb(k) = mean(P(:,5));
    T(k) = mean(P(:,4));
    w(k) = mean(P(:,3).*((2*pi)/60));
    D(k) = i;
    i=i+m;
    k=k+1;
    if i>max(DEPTH)-l
        break
    end
end
end

```

Deretter følger lik kode som for den første algoritmen, men figuren som plottes plasseres under den forrige ved bruk av følgende kode.

```

figure(7)
aa(2) = subplot(2,1,2);
plot(trq_0,'b')
hold on
plot((T_0),'r')
plot(Y1,'c')
plot((T_1),'g')
plot(Y2,'m')
plot(Y1+Y2,'y')
plot(trq_bit,'k')
title(['LS over flere dybdeperioder, BLÅ: TRQ_{BORESTRENG}, RØD: T_0, ...
    GRØNN: T_1, SVART: TRQ_{BIT}']);
ylabel('TRQ'), xlabel(['Dybde med steg på ',int2str(m),' meter.']);
axis([-Inf Inf 0 15])
linkaxes(aa,'x');

```

E Matlabkode

E.1 Dreiemoment i Newtonsk væske

```
% plott av konsentrisk sylinder i newtonsk væske i et viskometer.  
clear all  
close all
```

```
a = ones(size(1:100));  
h = a;  
y = a;  
w = a;  
p = a.*4*pi;  
x1 = a.*5;  
x2 = 5.05:0.05:10;  
x3 = 0:0.05:4.95;
```

```
T = y.*h.*w.*p;
```

```
T1 = T./((a./x1.^2)-(a./x2.^2));  
T2 = T./((a./x3.^2)-(a./x1.^2));
```

```
figure  
subplot(2,1,2)  
plot(x2,T1)  
grid on  
title('r_{1} = 5; 5.05 <= r_{2} >= 10.');
```

```
xlabel('r_{2}'),ylabel('Dreiemomentet');
```

```
subplot(2,1,1)  
plot(x3,T2)  
grid on  
title('r_{2} = 5; 0 <= r_{1} >= 4.95.');
```

```
xlabel('r_{1}'),ylabel('Dreiemomentet');
```

E.2 Dreiemomentmodell for en konsentrisk sylinder

```
% plott av dreemoment modellen for en konsentrisk sylinder i newtonsk væske.  
% clear all  
% close all
```

```
a = ones(size(1:100));
```



```
h = a;
n = a.*10^(-3);
w = 0:0.2:19.8;
p = a.*4*pi;
e = 0:0.1:9.9;
g = a.*9.81;

r0 = a.*0.07;
r1 = a.*0.10;
r2 = a.*0.15;

M = pi*(r1.^2-r0.^2)*7850*(1-(1700/7850));% + pi*r0.^2*1700;

konst = 0.15.*h.*M.*g.*r1.*cos(pi/4);
visko = (n.*h.*w.*p)./((a./r1.^2)-(a./r2.^2));%

T = konst + visko;

figure
plot(w,T)
grid on
title('konsentrisk sylinder');
xlabel('\omega [rad/sek]'),ylabel('Dreiemomentet [Nm]');
```

E.3 Hovedkode

```
%% laster inn data fra fil
clear all
close all
clc
% Bruker listdlg for å velge .xls fil fra en liste
d = dir;
str = {d.name};
nr = listdlg('PromptString','Select a file:',...
            'SelectionMode','single',...
            'ListString',str);
bronn = cell2str(str(nr));
% Må fjerne tegnene ; og ' for at filimp.m skal kunne lese fila
l=length(bronn);
bronn(l)='';
bronn(l-1)='';
bronn(1)='';
% Laster data i Excel-filen inn i tabellen raw_data
```

```
raw_data = filimp(bronn);

% Deklarerer boreparameterne
lengde = length(raw_data(:,1));
TIME = (1:lengde)'; % Samplepunkt
DATE = raw_data(:,2);
DEPTH = raw_data(:,3);
RPM = raw_data(:,4);
TRQ = raw_data(:,5); %.*10;
WOB = raw_data(:,6);
HKLD = raw_data(:,7);
ROP = raw_data(:,8);
BPOS = raw_data(:,9);
BVEL = raw_data(:,10);
SPP = raw_data(:,11);
FLOW = raw_data(:,12);

clear str nr l d bronn raw_data lengde
% Boring eller ikke boring?
% Plotter de parameterne som trengs for å avgjøre om
% det er boring eller ikke.

figure(1);
subplot(4,2,1);
ax = plotyy(TIME, TRQ, TIME, RPM);
axes(ax(1)); axis([0 Inf 0 50]); set(gca,'YTick',[0 10 20 30 40 50])
axes(ax(2)); axis([0 Inf 0 250]); set(gca,'YTick',[0 50 100 150 200 250])
title('Grønn = RPM, blå = TRQ');
xlabel('Tid');

ax(3) = subplot(4,2,2);
plot(TIME,SPP)
title('Sirkulasjonstrykket'), ylabel('SPP [Bar]'), xlabel('Tid');
axis([0 Inf 0 300])

ax(4) = subplot(4,2,3);
plot(TIME,ROP)
title('Borehastighet'), ylabel('ROP [m/h]'), xlabel('Tid');
axis([0 Inf 0 100])

ax(5) = subplot(4,2,4);
plot(TIME,DEPTH)
title('Dybden'), ylabel('DEPTH [m]'), xlabel('Tid');
axis([0 Inf -Inf Inf])

ax(6) = subplot(4,2,5);
```

```
plot(TIME,BPOS);
title('Posisjonen'), ylabel('BPOS [m]'), xlabel('Tid');
axis([0 Inf 0 40])

ax(7) = subplot(4,2,6);
plot(TIME,WOB);
title('Vekt på bit'), ylabel('WOB [tonn]'), xlabel('Tid');
axis([0 Inf 0 50])

ax(8) = subplot(4,2,7);
plot(TIME,HKLD);
title('HKLD'), ylabel('HKLD [tonn]'), xlabel('Tid');
axis([0 Inf 0 150])

ax(9) = subplot(4,2,8);
plot(TIME,FLOW);
title('BVEL'), ylabel('FLOW'), xlabel('Tid');
axis([0 Inf -inf inf])
linkaxes(ax,'x');

%% Enkelt fjerner nan
n = find(isnan(DEPTH) | isnan(RPM) | isnan(TRQ) | isnan(WOB) | isnan(HKLD) ...
        | isnan(ROP) | isnan(SPP));
TIME(n) = [];
DATE(n) = [];
DEPTH(n) = [];
RPM(n) = [];
TRQ(n) = [];
HKLD(n) = [];
BPOS(n) = [];
SPP(n) = [];
WOB(n) = [];
ROP(n) = [];
BVEL(n) = [];
FLOW(n) = [];

clear n
%%
P = minmaks(TIME,DEPTH,RPM,TRQ,WOB,HKLD,BPOS,SPP,FLOW,9823,9880,15);
TIME_s = P(:,1);
DEPTH_s = P(:,2);
RPM_s = P(:,3);
TRQ_s = P(:,4);
WOB_s = P(:,5);
HKLD_s = P(:,6);
BPOS_s = P(:,7);
```

```

SPP_s = P(:,8);

%% Fjerner punkt on bottom

P = perioder(TIME,DEPTH,RPM,TRQ,WOB,HKLD,BPOS,SPP,0,(length(DEPTH)),1);
TIME_1 = P(:,1);
DEPTH_1 = P(:,2);
RPM_1 = P(:,3);
TRQ_1 = P(:,4);
WOB_1 = P(:,5);
HKLD_1 = P(:,6);
BPOS_1 = P(:,7);
SPP_1 = P(:,8);

clear P

%% Deler opp fil i dybdeenheter.
k=1; % Deklarerer tellevariabel
j=30; % Sampelpunkt for hver dybde.
l=0; % overlappingdybde.
m=j-1; % Steglengden i dybden. mindre steglengder gir større variasjon.
T = []; % Deklarerer variabler
w = [];
D = [];
a = [];
%[b,a1] = butter(1,.2);
%figure(13)
%s = [0:0.01:20];
for i = min(DEPTH_1):m:max(DEPTH_1),
    if i+j<max(DEPTH)
        P = perioder1(TIME,DEPTH,RPM,TRQ,WOB,HKLD,BPOS,SPP,i,i+j);
    else
        P = perioder1(TIME,DEPTH,RPM,TRQ,WOB,HKLD,BPOS,SPP,i,max(DEPTH));
    end
    TRQ_filt = P(:,4); % filtfilt(b,a1,P(:,4));
    RPM_filt = P(:,3); % filtfilt(b,a1,P(:,3));
    u = RPM_filt.*((2*pi)/60); % 1 input
    y = TRQ_filt; % 1 output
    X = [ones(size(u)) u];
    a(:,k) = X\y;
    Y = X*a(:,k);
    %plot(s,[a(1,k)+a(2,k)*s]);
    %hold on
    T(k) = mean(P(:,4));
    w(k) = mean(P(:,3).*((2*pi)/60));
    D(k) = i;

```

```

        i=i+m;
        k=k+1;
        if i>max(DEPTH)-1
            break
        end
    end
end
% axis([0 20 0 20])
% title('TRQ mot \omega'), ylabel('TRQ'), xlabel('\omega');
% for hver dybdeenhet med steg i meter.
f_est = (1:(length(a)/2));
f_val = int16(length(a)/2:(length(a)));

T_0est = a(1,f_est)';
T_1est = a(2,f_est)'.*w(f_est)';
trq_0est = T(:,f_est)';
Dybdeest = D(:,f_est)';

T_0val = a(1,f_val)';
T_1val = a(2,f_val)'.*w(f_val)';
trq_0val = T(:,f_val)';
Dybdeval = D(:,f_val)';

% Fjerner nan og inf
n = find(isnan(Dybdeest)|isnan(T_0est)| isnan(T_1est) | isnan(trq_0est)|...
        isinf(Dybdeest)|isinf(T_0est)|isinf(T_1est)|isinf(trq_0est));
T_0est(n) = [];
T_1est(n) = [];
Dybdeest(n) = [];
trq_0est(n) = [];

n = [];

n = find(isnan(Dybdeval)|isnan(T_0val)| isnan(T_1val) | isnan(trq_0val)|...
        isinf(Dybdeval)|isinf(T_0val)|isinf(T_1val)|isinf(trq_0val));
T_0val(n) = [];
T_1val(n) = [];
Dybdeval(n) = [];
trq_0val(n) = [];

% estimering
% LS For  $T_0 = a_{00} + a_{01} * \text{Depth}$ ;
X = [ones(size(Dybdeest)) Dybdeest];
a0 = X\T_0est
Y1 = X*a0;
% LS For  $T_1 = a_{10} + a_{11} * \text{Depth}$ ;
a1 = X\T_1est

```

```

Y2 = X*a1;

% validering
Xval = [ones(size(Dybdeval)) Dybdeval];
Y3 = Xval*a0;
Y4 = Xval*a1;

% plotter figur
figure(7)
aa(1) = subplot(2,1,1);
plot(Dybdeest,trq_0est,'b')
hold on
plot(Dybdeest,(T_0est),'r')
plot(Dybdeest,Y1,'c')
plot(Dybdeest,(T_1est),'g')
plot(Dybdeest,Y2,'m')
plot(Dybdeest,Y1+Y2,'y')
title('ROB - Estimeringsdata, BLÅ: TRQ, RØD: T_0, GRØNN: T_1');
ylabel('TRQ'), xlabel(['Dybde med steg på ',int2str(m),' meter.']);
axis([-Inf Inf 0 15])

aa(2) = subplot(2,1,2);
plot(Dybdeval,trq_0val,'b')
hold on
plot(Dybdeval,(T_0val),'r')
plot(Dybdeval,Y3,'c')
plot(Dybdeval,(T_1val),'g')
plot(Dybdeval,Y4,'m')
plot(Dybdeval,Y3+Y4,'y')
title('ROB - Valideringsdata, BLÅ: TRQ, RØD: T_0, GRØNN: T_1');
ylabel('TRQ'), xlabel(['Dybde med steg på ',int2str(m),' meter.']);
axis([-Inf Inf 0 15])
print(gcf, '-depsc2', 'bronn41sys3');

%% Fjerner TRQ ON BIT fra TRQ og får TRQ på borestrengen.

n = find(isnan(TRQ)|isnan(HKLD)|isnan(WOB));
TIME(n) = [];
TRQ(n) = [];
HKLD(n) = [];
BPOS(n) = [];
WOB(n) = [];

[TRQ_borestreng TRQ_bit] = TRQ_WOB(TIME,TRQ,WOB,HKLD,BPOS,28);

figure(6)

```

```

plot(TIME,TRQ,'r')
hold on
plot(TIME,TRQ_borestreng)
plot(TIME,TRQ_bit,'g')
axis([-inf inf 0 50]); set(gca,'YTick',[0 10 20 30 40 50])
title('TRQ_{TOTAL}: RØD, TRQ_{BORESTRENG}: BLÅ, TRQ_{BIT}: GRØNN');
ylabel('TRQ'), xlabel('Tid');

clear n

%% Deler opp fil i dybdeenheter.
k=1; % Deklarerer tellevariabel
j=30; % Dybdepunkt i hver estimatgruppe.
l=0; % overlappingdybde.
m=j-1; % Steglengden i dybden. mindre steglengder gir større variasjon.
T = []; % Deklarerer variabler
w = [];
D = [];
a = [];
%[b,a1] = butter(1,.2);

for i = min(DEPTH_1):m:max(DEPTH_1),
    if i+j<max(DEPTH)
        P = perioder2(TIME,DEPTH,RPM,TRQ_borestreng,TRQ_bit',WOB,HKLD,BPOS,SPP,i,i+j);
    else
        P = perioder2(TIME,DEPTH,RPM,TRQ_borestreng,TRQ_bit',WOB,HKLD,BPOS,SPP,i,max(DEP
    end
    TRQ_filt = P(:,4); % filtfilt(b,a1,P(:,4));
    RPM_filt = P(:,3); % filtfilt(b,a1,P(:,3));
    u = RPM_filt.*((2*pi)/60); % 1 input
    y = TRQ_filt; % 1 output
    X = [ones(size(u)) u];
    a(:,k) = X\y;
    Y = X*a(:,k);
    Tb(k) = mean(P(:,5));
    T(k) = mean(P(:,4));
    w(k) = mean(P(:,3).*((2*pi)/60));
    D(k) = i;
    i=i+m;
    k=k+1;
    if i>max(DEPTH)-1
        break
    end
end
end
% for hver dybdeenhet med steg i meter.
f_est = (1:(length(a)/2));

```

```

f_val = int16(length(a)/2:(length(a)));

T_0est = a(1,f_est)';
T_1est = a(2,f_est)'.*w(f_est)';
trq_0est = T(:,f_est)';
Dybdeest = D(:,f_est)';
trq_bitest = Tb(:,f_est)';

T_0val = a(1,f_val)';
T_1val = a(2,f_val)'.*w(f_val)';
trq_0val = T(:,f_val)';
Dybdeval = D(:,f_val)';
trq_bitval = Tb(:,f_val)';

% Fjerner nan og inf
n = find(isnan(Dybdeest)|isnan(T_0est)| isnan(T_1est) | isnan(trq_0est)|...
        isinf(Dybdeest)|isinf(T_0est)|isinf(T_1est)|isinf(trq_0est));
T_0est(n) = [];
T_1est(n) = [];
Dybdeest(n) = [];
trq_0est(n) = [];
trq_bitest(n) = [];

n = [];

n = find(isnan(Dybdeval)|isnan(T_0val)| isnan(T_1val) | isnan(trq_0val)|...
        isinf(Dybdeval)|isinf(T_0val)|isinf(T_1val)|isinf(trq_0val));
T_0val(n) = [];
T_1val(n) = [];
Dybdeval(n) = [];
trq_0val(n) = [];
trq_bitval(n) = [];

% estimering
% LS For T_0 = a_00 + a_01*Depth;
X = [ones(size(Dybdeest)) Dybdeest];
a0 = X\T_0est
Y1 = X*a0;
% LS For T_1 = a_10 + a_11*Depth;
a1 = X\T_1est
Y2 = X*a1;

% validering
Xval = [ones(size(Dybdeval)) Dybdeval];
Y3 = Xval*a0;
Y4 = Xval*a1;

```



```

% plotter figur
figure(8)
aa(1) = subplot(2,1,1);
plot(Dybdeest,trq_0est,'b')
hold on
plot(Dybdeest,(T_0est),'r')
plot(Dybdeest,Y1,'c')
plot(Dybdeest,(T_1est),'g')
plot(Dybdeest,Y2,'m')
plot(Dybdeest,Y1+Y2,'y')
plot(Dybdeest,trq_bitest,'k')
title(['TRQ\WOB - Estimeringsdata , BLÅ: TRQ_{BORESTRENG}, RØD: T_0,',...
      ' GRØNN: T_1, SVART: TRQ_{BIT}']);
ylabel('TRQ'), xlabel(['Dybde med steg på ',int2str(m),' meter.']);
axis([-Inf Inf 0 15])

aa(2) = subplot(2,1,2);
plot(Dybdeval,trq_0val,'b')
hold on
plot(Dybdeval,(T_0val),'r')
plot(Dybdeval,Y3,'c')
plot(Dybdeval,(T_1val),'g')
plot(Dybdeval,Y4,'m')
plot(Dybdeval,Y3+Y4,'y')
plot(Dybdeval,trq_bitval,'k')
title(['TRQ\WOB - Valideringsdata, BLÅ: TRQ_{BORESTRENG}, RØD: T_0,',...
      ' GRØNN: T_1, SVART: TRQ_{BIT}']);
ylabel('TRQ'), xlabel(['Dybde med steg på ',int2str(m),' meter.']);
axis([-Inf Inf 0 15])

linkaxes(aa,'x');
print(gcf, '-depsc2', 'bronn41sys3_1');

clear D P T T_0 T_1 X Y Y1 Y2 u w y i j k l m n trq_0 Tb trq_bit

%% Fjerner NaN
% Må fjernes før man kan ta i bruk funksjoner i matlab.
[TIME_DEPTH_uten_nan DEPTH_uten_nan nan_DEPTH] = fjerne_nan(DEPTH);
[TIME_RPM_uten_nan RPM_uten_nan nan_RPM] = fjerne_nan(RPM);
[TIME_TRQ_uten_nan TRQ_uten_nan nan_TRQ] = fjerne_nan(TRQ);
[TIME_WOB_uten_nan WOB_uten_nan nan_WOB] = fjerne_nan(WOB);
[TIME_HKLD_uten_nan HKLD_uten_nan nan_HKLD] = fjerne_nan(HKLD);
[TIME_ROP_uten_nan ROP_uten_nan nan_ROP] = fjerne_nan(ROP);
[TIME_BPOS_uten_nan BPOS_uten_nan nan_BPOS] = fjerne_nan(BPOS);
[TIME_BVEL_uten_nan BVEL_uten_nan nan_BVEL] = fjerne_nan(BVEL);

```

```

[TIME_SPP_uten_nan SPP_uten_nan nan_SPP] = fjerne_nan(SPP);
[TIME_FLOW_uten_nan FLOW_uten_nan nan_FLOW] = fjerne_nan(FLOW);

% Skriver ut hvor mange NaN som blir fjernet
warndlg({'Det ble fjernet ', num2str(nan_DEPTH), ' NaN i DEPTH'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_RPM), ' NaN i RPM'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_TRQ), ' NaN i TRQ'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_WOB), ' NaN i WOB'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_HKLD), ' NaN i HKLD'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_ROP), ' NaN i ROP'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_BPOS), ' NaN i BPOS'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_BVEL), ' NaN i BLEV'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_SPP), ' NaN i SPP'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_FLOW), ' NaN i FLOW'};
    [''];...
    },'Fjerning av NaN')
clear nan_DEPTH nan_RPM nan_TRQ nan_WOB nan_HKLD nan_ROP nan_BPOS nan_BVEL nan_SPP nan_FLOW

%% Fjerner unormalt store verdier
% [TIME_DEPTH_uten_nan DEPTH_uten_nan] = fjerne_peaks(DEPTH_uten_nan,50);
% [TIME_RPM_uten_nan RPM_uten_nan] = fjerne_peaks(RPM_uten_nan,50);
% [TIME_TRQ_uten_nan TRQ_uten_nan] = fjerne_peaks(TRQ_uten_nan,50);
% [TIME_WOB_uten_nan WOB_uten_nan] = fjerne_peaks(WOB_uten_nan,50);
% [TIME_HKLD_uten_nan HKLD_uten_nan] = fjerne_peaks(HKLD_uten_nan,50);
% [TIME_ROP_uten_nan ROP_uten_nan] = fjerne_peaks(ROP_uten_nan,50);
% [TIME_BPOS_uten_nan BPOS_uten_nan] = fjerne_peaks(BPOS_uten_nan,50);
% [TIME_BLEV_uten_nan BLEV_uten_nan] = fjerne_peaks(BLEV_uten_nan,50);
% [TIME_SPP_uten_nan SPP_uten_nan] = fjerne_peaks(SPP_uten_nan,50);
% [TIME_FLOW_uten_nan FLOW_uten_nan] = fjerne_peaks(FLOW_uten_nan,50);

%% filtrerer bort uteliggere

n = find(isnan(DEPTH) | isnan(RPM) | isnan(TRQ) | isnan(HKLD) | isnan(SPP) | isnan(WOB));
TIME(n) = [];
DEPTH(n) = [];
RPM(n) = [];

```

```

TRQ(n) = [];
HKLD(n) = [];
BPOS(n) = [];
SPP(n) = [];
WOB(n) = [];

[b,a] = butter(10,.2);
TRQ_filt = filtfilt(b,a,TRQ_1);
RPM_filt = filtfilt(b,a,RPM_1);

figure(3)
subplot(2,1,1)
scatter(RPM_1,TRQ_1,'.');
axis([-inf 250 0 50])
title('TRQ mot RPM'), ylabel('TRQ'), xlabel('RPM');
subplot(2,1,2)
scatter(RPM_filt,TRQ_filt,'.');
axis([-inf 250 0 50])
title('TRQ mot RPM'), ylabel('TRQ_{filt}'), xlabel('RPM_{filt}');

%% Filtrerer TRQ_uten_nan
[b,a] = butter(4,.2);
TRQ_filt = filtfilt(b,a,TRQ_uten_nan);
figure(3);
plot(TIME_TRQ_uten_nan,TRQ_uten_nan)
hold on
plot(TIME_TRQ_uten_nan,TRQ_filt,'r')
title('Filtrering')
xlabel('Blå = TRQ uten NaN, Rød = filtrert TRQ uten NaN')
axis([0 Inf 0 Inf]);
%print(gcf, '-depsc2', 'filtrerttrq');
%% Den andre modellvarianten

P = perioder(TIME,DEPTH,RPM,TRQ,WOB,HKLD,BPOS,SPP,0,(length(DEPTH)/2),1);
TIME_1 = P(:,1);
DEPTH_1 = P(:,2);
RPM_1 = P(:,3);
TRQ_1 = P(:,4);
WOB_1 = P(:,5);
HKLD_1 = P(:,6);
BPOS_1 = P(:,7);
SPP_1 = P(:,8);

P = perioder(TIME,DEPTH,RPM,TRQ,WOB,HKLD,BPOS,SPP,(length(DEPTH)/2),length(DEPTH),2);
TIME_2 = P(:,1);
DEPTH_2 = P(:,2);

```

```

RPM_2 = P(:,3);
TRQ_2 = P(:,4);
WOB_2 = P(:,5);
HKLD_2 = P(:,6);
BPOS_2 = P(:,7);
SPP_2 = P(:,8);

[TIME_DEPTH_uten_nan DEPTH_uten_nan nan_DEPTH] = fjerne_nan(DEPTH_1);
[TIME_RPM_uten_nan RPM_uten_nan nan_RPM] = fjerne_nan(RPM_1);
[TIME_TRQ_uten_nan TRQ_uten_nan nan_TRQ] = fjerne_nan(TRQ_1);
[TIME_DEPTH_uten_nan_2 DEPTH_uten_nan_2 nan_DEPTH_2] = fjerne_nan(DEPTH_2);
[TIME_RPM_uten_nan_2 RPM_uten_nan_2 nan_RPM_2] = fjerne_nan(RPM_2);
[TIME_TRQ_uten_nan_2 TRQ_uten_nan_2 nan_TRQ_2] = fjerne_nan(TRQ_2);

warndlg({'Det ble fjernet ', num2str(nan_DEPTH), ' NaN i DEPTH estimering'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_RPM), ' NaN i RPM estimering'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_TRQ), ' NaN i TRQ estimering'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_DEPTH_2), ' NaN i DEPTH validering'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_RPM_2), ' NaN i RPM validering'};...
    [''];...
    ['Det ble fjernet ', num2str(nan_TRQ_2), ' NaN i TRQ validering'};...
    },'Fjerning av NaN')

u1 = [RPM_uten_nan.*((2*pi)/60) DEPTH_uten_nan]; % 2 inputs
y1 = TRQ_uten_nan; % 1 output

u2 = [RPM_uten_nan_2.*((2*pi)/60) DEPTH_uten_nan_2]; % 2 inputs
y2 = TRQ_uten_nan_2; % 1 output

ts = 1;

z1 = iddata(y1,u1,ts);
set(z1,'InputName',{'\omega estimering';'DEPTH estimering'}...
    ,'OutputName','TRQ estimering');%

z2 = iddata(y2,u2,ts);
set(z2,'InputName',{'\omega validering';'DEPTH estimering'}...
    ,'OutputName','TRQ validering');%

figure(9)
subplot(3,1,1)
plot(u1(:,1)),title('Estimeringsgrunnlag');

```

```

ylabel('\omega'),xlabel('Tid');
subplot(3,1,2)
plot(u1(:,2))
ylabel('DEPTH'),xlabel('Tid');
subplot(3,1,3)
plot(y1(:,1))
ylabel('TRQ'),xlabel('Tid');
% Finner multipel lineær regresjonsmodell basert på minste kvadrats metode
% Med modellformen:
%  $Y = a_1 + a_2 \cdot \text{RPM} + a_3 \cdot \text{DEPTH}$ 

X = [ones(size(u1(:,1))) u1(:,1) u1(:,2)];%
a = X\y1
Y = X*a;
MaxErr = max(abs(Y-y1))
% Plotter disse sammen for å sammenligne med virkelig TRQ.

est_TRQ = a(1)+a(2)*u1(:,1)+a(3)*u1(:,2);
val_TRQ = a(1)+a(2)*u2(:,1)+a(3)*u2(:,2);

figure(10)
subplot(2,1,1)
plot(TIME_TRQ_uten_nan, TRQ_uten_nan);
hold on
plot(TIME_TRQ_uten_nan, est_TRQ,'r');
title('TRQ: blå, estimert TRQ: rød'), ylabel('TRQ'), xlabel('Tid');
subplot(2,1,2)
plot(TIME_TRQ_uten_nan_2, TRQ_uten_nan_2);
hold on
plot(TIME_TRQ_uten_nan_2, val_TRQ,'r');
title('TRQ: blå, validering TRQ: rød'), ylabel('TRQ'), xlabel('Tid');

figure(11)
plot(TRQ_uten_nan_2,val_TRQ,'.');
axis([0 20 0 20])
title('TRQ mot validerings TRQ'), ylabel('validering\_TRQ'), xlabel('TRQ');

%% Plotter et 3D surfaceplott med DEPTH og RPM i plan mot TRQ.

pktD = 20; % antall skaleringsbinger for dybden.
pktR = 20; % antall skaleringsbinger for rpm.

% Lager histogram med skaleringene for å finne skaleringsverdiene til x og
% y aksene, som her er dybde og rpm. Her ser man også antall punkt som
% faller i hver matrisebenge.
[a,c] = hist3 ([DEPTH RPM],[pktD pktR]);

```

```
dD = c{1,1}(2)- c{1,1}(1); % delta mellom bingene.
dR = c{1,2}(2)- c{1,2}(1); %

T = [];

for i = 1:pktD;
    for j = 1:pktR;
        A = [];
        B = [];

        A = find(c{1,1}(i)-(dD/2) <= DEPTH & c{1,1}(i)+(dD/2) >= DEPTH);
        B = find(c{1,2}(j)-(dR/2) <= RPM & c{1,2}(j)+(dR/2) >= RPM);

        C = intersect(A,B);
        T(i,j) = mean(TRQ(C));
    end
end

% plotter surface 3D plot med gjennomsnitt av TRQ for hver matrisebinge.
figure(3)
surf(T,'DisplayName','DEPTH,RPM,TRQ','YData',c{1,1},'XData',c{1,2});
title('3D-plott av Dreiemomentet sett i forhold til dybde og rpm. ');
ylabel('Dybde'), xlabel('RPM'), zlabel('TRQ');
```

F Egenutviklede funksjoner i Matlab

filimp:

```
function [Data] = filimp(navn)
% FILIMP(navn)
% Laster inn data fra excel-fil
raw_data = importdata(navn);
% Fjerner målinger som ikke er brukbare, dvs målinger med verdi -999.25
ikke_maaling = find(raw_data.data(:, :) == -999.25);
raw_data.data(ikke_maaling) = NaN;
% Output fra funksjonen
Data = raw_data.data;
```

fjerne_nan:

```
function [tid data_uten_nan antall_nan] = fjerne_nan(data_med_nan)
% FJERNE_NAN
% Denne funksjonen fjerner alle NaN i datasettet
% og erstatter de med et tomt felt, [].

% Finner lengde på datasettet
lengde = length(data_med_nan);
% Lager en samplevektor
tid = (1:lengde)';
% Finner NaN og setter de punktene med NaN lik []
nan = find(isnan(data_med_nan));
data_med_nan(nan) = [];
data_uten_nan = data_med_nan;
% Setter de tilhørende samplepunkt lik [];
tid(nan) = [];
antall_nan = length(nan);
end
```

fjerne_peaks:

```
function [tid data_uten_peaks] = fjerne_peaks(data_med_peaks, delta)
% Finner lengde på datasettet
lengde = length(data_med_peaks);
% Lager en samplevektor
tid = (1:lengde)';
% Finner gjennomsnittet til datasettet
```

```
gjsnitt = mean(data_med_peaks);
% Finner lokasjonene til de unormalt store verdiene
peaks = find(data_med_peaks>(gjsnitt+delta)...
    | data_med_peaks<(gjsnitt-delta) );
data_med_peaks(peaks) = NaN;
data_uten_peaks = data_med_peaks;
tid(peaks) = NaN;
end
```

fjerne_dynamikk:

```
function [tid data1 data2] = fjerne_dynamikk(primdata, sekdata,delta)
% Behandling
% Denne funksjonen fjerner først alle NaN i datasettet og erstatter
% de med et tomt felt []. Fjerner dynamikk i primærdata.
% delta: Differansen for å fjerne dynamikk.

% Finner lengde på datasettet
lengde = length(primdata);
% Lager en samplevektor
tid = (1:lengde)';
% Finner NaN og setter de punktene med NaN lik []
nan = find(isnan(primdata));
primdata(nan) = [];
sekdata(nan) = [];
% Setter de tilhørende samplepunkt lik [];
tid(nan) = [];

i = find(diff(primdata)>delta);
primdata(i) = NaN;
sekdata(i) = NaN;
tid(i) = NaN;
j = find(diff(primdata)<=-delta);
primdata(j) = NaN;
sekdata(j) = NaN;
tid(j) = NaN;
k = find(primdata<= 5 |sekdata <= 5);
primdata(k) = NaN;
sekdata(k) = NaN;
tid(k) = NaN;

data1 = primdata;
data2 = sekdata;
end
```


TRQ_WOB:

```

function [NYTRQ TRQBIT] = TRQ_WOB(TIME,TRQorg,WOB,HKLD,BPOS,t)
% Funksjonen finner dreiemomentet gitt av borekrona og borestrengen.

% BPOS er blokkposisjonen for top-drive høyden, hvor maks høyde blir lagt
% til grunn for en løkke som finner nye målinger for WOB basert på HKLD.
% HKLD er målt tyngde på borestrengen fra top-drive. WOB er vekt på
% bit med nytt settpunkt for hver stand. TM er traveling mass som varierer
% for hvert settpunkt.

% t er høyden på blokkposisjonen for ny stand.
delta = 35; % Fjerne uteliggere i estimert WOB ved fjerning av delta over
           % og under gjennomsnittet.

% Deklarerer en variabel for blokkposisjonen hvor alle verdier over t
% settes lik 1 og resten lik 0.
B = zeros(length(BPOS),1,'double');
a = find(BPOS>=t);
B(a) = 1;

% Deklarerer ytterligere variabler
A = [0;diff(B)]; % Variasjonen i blokkposisjonen over og under t.
T_M = min(HKLD); % Travling mass
T = min(HKLD); % Top force begynnerverdi
TopFrc_0 = ones(length(BPOS),1,'double');
TopFrc = []; %
WOB_rett = []; % Estimert WOB.

for k = 1:(length(BPOS)) % for løkke fra 1 til lengden av datasettet
    if A(k) == 1; % hvis variasjonen er lik 1 gjør:
        T_M = mean(HKLD(k-2:k+2)); % Oppdaterer verdi for travling mass.
    end
    if A(k) == -1; % hvis variasjonen er lik -1 gjør:
        T = mean(HKLD(k-2:k+2)); % Oppdaterer verdi for topforce.
        T_M = mean(HKLD(k-2:k+2)); % Oppdaterer verdi for travling mass.
    end
    TopFrc_0(k) = T; % Oppdaterer ny verdi til topforce(k)
    TopFrc(k) = HKLD(k) - T_M; % Lager estimert verdi av -WOB
    if TopFrc(k) >= 0; % hvis -estimert WOB over 0
        TopFrc(k) = 0; % setter verdi til 0.
    end
    WOB_rett(k) = - TopFrc(k)'; % lager ny WOB
end
% Fjerner peaker i ny WOB.

```

```
peaks = find(WOB_rett>(mean(WOB_rett)+delta)...
    | WOB_rett<(mean(WOB_rett)-delta));
WOB_rett(peaks) = 0;

% plotter grafene for å stille på deltaverdien og høyden på ny stand basert
% på observasjonene i grafene.
figure(4)
aa(1) = subplot(3,1,1);
plot(TIME,A,'r');
hold on
plot(TIME,BPOS);
title('Posisjonen'), ylabel('BPOS [m]'), xlabel('Tid');
axis([0 Inf -1 40])

aa(2) = subplot(3,1,2);
plot(TIME,HKLD);
title('HKLD'), ylabel('HKLD [tonn]'), xlabel('Tid');
axis([0 Inf 0 150])

aa(3) = subplot(3,1,3);
plot(TIME,WOB_rett);
hold on
plot(TIME,WOB,'r');
title('Vekt på bit'), ylabel('WOB [tonn]'), xlabel('Tid');
axis([0 Inf -inf inf])
linkaxes(aa,'x');

% Deklarerer nye variabler
WOB_1 = WOB_rett';      % lager ny variabel for estimert WOB.
TRQ = TRQorg;          % lager en variabel basert på originalt dreiemoment

I = find(TRQ<2);        % setter dreiemoment under 0 til nan
TRQ(I) = NaN;          % fjerner punkt i TRQ

% Fjerner nan
n = find(isnan(TRQ));
TIME(n) = [];
TRQ(n) = [];
WOB_1(n) = [];         % fjerner punkt i estimert WOB
TopFrc_0(n) = [];     % fjerner punkt i Topforce

% Minste kvadraters metode basert på:
u = [TopFrc_0 WOB_1]; % 2 inputs
y = TRQ;              % 1 output
ts = 1;               % Sampletiden
```

```

z = iddata(y,u,ts);      % Lager datapakke
set(z,'InputName',{'TOPFORCE_(0)';'WOB'},'OutputName','TRQ');% gir navn

X = [u(:,1) u(:,2)];    % Lager en matrise
a = X\y                 % Løser matriseligningene ved minste kvadraters metode
Y = X*a;                % Lager funksjon basert på løsning

% plotter figur for å vise funksjon mot reelle verdier.
figure(5)
plot(TIME, TRQ);
hold on
plot(TIME, Y,'g');
title('TRQ: blå, estimert TRQ_{TopFrc og WOB}: grønn');
ylabel('TRQ'), xlabel('Tid');

%Deklarerer ny variabel N
N = [];

% for løkke til å sette verdier på dreiemomentet på estimert WOB.
for l = 1:length(TRQorg) % for løkke fra 1 til lengden av datasettet
    TRQBIT(l) = WOB_rett(l).*abs(a(2)); % estimert WOB ganger stigningstallet
    if TRQBIT(l) <= 0; % finner dreiemomentet på estimert WOB under 0.
        TRQBIT(l) = 0; % setter verdi til 0.
    end
    N(l) = TRQorg(l) - TRQBIT(l)'; % estimerer dreiemomentet på
    % borestrengen basert på dreiemomentet på estimert WOB.
    if N(l) <= 0; % finner dreiemomentet på borestrengen under 0.
        N(l) = 0; % setter verdi til 0.
    end
end
end
NYTRQ = N'; % tar ut estimert dreiemomentet på borestrengen

```

perioder:

```

function P = perioder(tid,dybde,rpm,trq,wob,hkld,bpos,spp,minimum,maximum,k)

% Automatisk detektere gode perioder med rotasjon over bunnen av brønnen.
% Med neglisjering av bpos og mud-type.
%
% Funksjonen laster inn ulike parametre, går igjennom alle datapunkt med
% ulike forutsetninger og gir tilbake alle datapunkt fra datasettet som
% er innenfor forutseningene og fjerner nan.

```

```

OnBottom = [];
% j er økende med større dybde.
j = dybde(1);
for i = 1:length(dybde)
    if j <= dybde(i)      % Hvis største dybde er mindre enn neste punkt:
        j = dybde(i);    % Settes største dybde på bunnen.
        OnBottom(i) = i; % lager variabel som har verdi for alle punkt
                        % på bunnen.
    end
end

% Forutsetninger:
% A = 1;
A = find(diff(dybde)>0.1);
% B = 1;
B = find((hkld)<50);
% C = 1;
C = find(isnan(dybde)|isnan(rpm)|isnan(trq)|isnan(hkld)|isnan(spp));
D = find(diff(trq)>0.1 | diff(rpm)>0.1);
E = find(trq<1 | rpm<5);
F = find(tid<minimum | tid > maximum);
G = find(wob>5);
H = find(OnBottom'>0);

I = union((union((union(A,B)),(union(C,D))))),...
          (union((union(E,F)),(union(G,H)))));

dybde(I) = NaN;
rpm(I) = NaN;
trq(I) = NaN;
hkld(I) = NaN;
bpos(I) = NaN;
spp(I) = NaN;
wob(I) = NaN;

n = find(isnan(dybde) | isnan(rpm) | isnan(trq) | isnan(hkld) | isnan(spp) | isnan(wob));
tid(n) = [];
dybde(n) = [];
rpm(n) = [];
trq(n) = [];
hkld(n) = [];
bpos(n) = [];
spp(n) = [];
wob(n) = [];

figure(k+1)

```

```
subplot(4,2,1);
ax = plotyy(tid, trq, tid, rpm);
axes(ax(1)); axis([-inf inf 0 50]); set(gca,'YTick',[0 10 20 30 40 50])
axes(ax(2)); axis([-inf inf 0 250]); set(gca,'YTick',[0 50 100 150 200 250])
title('Grønn = RPM, blå = TRQ');
xlabel('Tid');

ax(3) = subplot(4,2,2);
plot(tid,spp)
title('Sirkulasjonstrykket'), ylabel('SPP [Bar]'), xlabel('Tid');
axis([-inf inf 0 300])

subplot(4,2,3);
scatter(rpm,trq,'.');
axis([-inf 250 0 50])
title('TRQ mot RPM'), ylabel('TRQ'), xlabel('RPM');

ax(4) = subplot(4,2,4);
plot(tid,dybde)
Title('Dybden'), ylabel('DEPTH [m]'), xlabel('Tid');
axis([-inf inf -Inf Inf])

ax(5) = subplot(4,2,5);
plot(tid,bpos);
title('Posisjonen'), ylabel('BPOS [m]'), xlabel('Tid');
axis([-inf inf 0 40])

ax(6) = subplot(4,2,6);
plot(tid,wob);
title('Vekt på bit'), ylabel('WOB [tonn]'), xlabel('Tid');
axis([-inf inf 0 50])

ax(7) = subplot(4,2,7);
plot(tid,hkld);
title('HKLD'), ylabel('HKLD [tonn]'), xlabel('Tid');
axis([-inf inf 0 150])

subplot(4,2,8);
plot(dybde,trq,'.')
Title('TRQ mot Dybden'), ylabel('TRQ'), xlabel('DEPTH [m]');
axis([-Inf Inf 0 50])
linkaxes(ax,'x');

P = [tid,dybde,rpm,trq,wob,hkld,bpos,spp];
```

perioder1:

```

function P = perioder1(tid,dybde,rpm,trq,wob,hkld,bpos,spp,mindybde,maxdybde)

% Automatisk detektere gode perioder med rotasjon over bunnen av brønnen.
%
% Funksjonen laster inn ulike parametre, går igjennom alle datapunkt med
% ulike forutsetninger og gir tilbake alle datapunkt fra datasettet som
% er innenfor forutseningene.

OnBottom = [];
% j er økende med større dybde.
j = dybde(1);
for i = 1:length(dybde)
    if j <= dybde(i)           % Hvis største dybde er mindre enn neste punkt:
        j = dybde(i);         % Settes største dybde på bunnen.
        OnBottom(i) = i;      % lager variabel som har verdi for alle punkt
                               % på bunnen.
    end
end

% Forutsetninger:
%A = 1;
A = find(dybde<mindybde | dybde>maxdybde);
%A = find(diff(dybde)>0.1);
%B = 1;
B = find((hkld)<50);
% C = 1;
C = find(isnan(dybde)|isnan(rpm)|isnan(trq)|isnan(hkld)|isnan(spp));
D = find(diff(trq)>0.1 | diff(rpm)>0.1);
E = find(trq<2 | rpm<5);
% F = find(tid<minimum | tid > maximum);
F = 1;
G = find(wob>10);
H = find(OnBottom'>0);

I = union((union((union(A,B)),(union(C,D))))),...
          (union((union(E,F)),(union(G,H)))));

% Setter uteliggende datapunkt til nan
dybde(I) = NaN;
rpm(I) = NaN;
trq(I) = NaN;
hkld(I) = NaN;

```

```
bpos(I) = NaN;
spp(I) = NaN;
wob(I) = NaN;

% Fjerner nan
nan = find(isnan(dybde)|isnan(rpm)|isnan(trq)|...
          isnan(hkld)|isnan(spp)|isnan(wob));
tid(nan) = [];
dybde(nan) = [];
rpm(nan) = [];
trq(nan) = [];
hkld(nan) = [];
bpos(nan) = [];
spp(nan) = [];
wob(nan) = [];

P = [tid,dybde,rpm,trq,wob,hkld,bpos,spp];
```

perioder2:

```
function P = perioder2(tid,dybde,rpm,trq,trq_bit,wob,hkld,bpos,spp,mindybde,maxdybde)

% Funksjonen laster inn ulike parametre, går igjennom alle datapunkt med
% ulike forutsetninger og gir tilbake alle datapunkt til datasettet som
% er innenfor forutseningene.

% Forutsetninger:

A = find(dybde<mindybde | dybde>maxdybde);
B = find(trq<0.5 | rpm<5);

I = union(A,B);

% Setter uteliggende datapunkt til nan
dybde(I) = NaN;

% Fjerner nan
n = find(isnan(dybde));
tid(n) = [];
dybde(n) = [];
rpm(n) = [];
trq(n) = [];
hkld(n) = [];
bpos(n) = [];
spp(n) = [];
```

```
wob(n) = [];  
trq_bit(n) = [];
```

```
P = [tid, dybde, rpm, trq, trq_bit, wob, hkld, bpos, spp];
```