

A24030 - Åpen

# Rapport

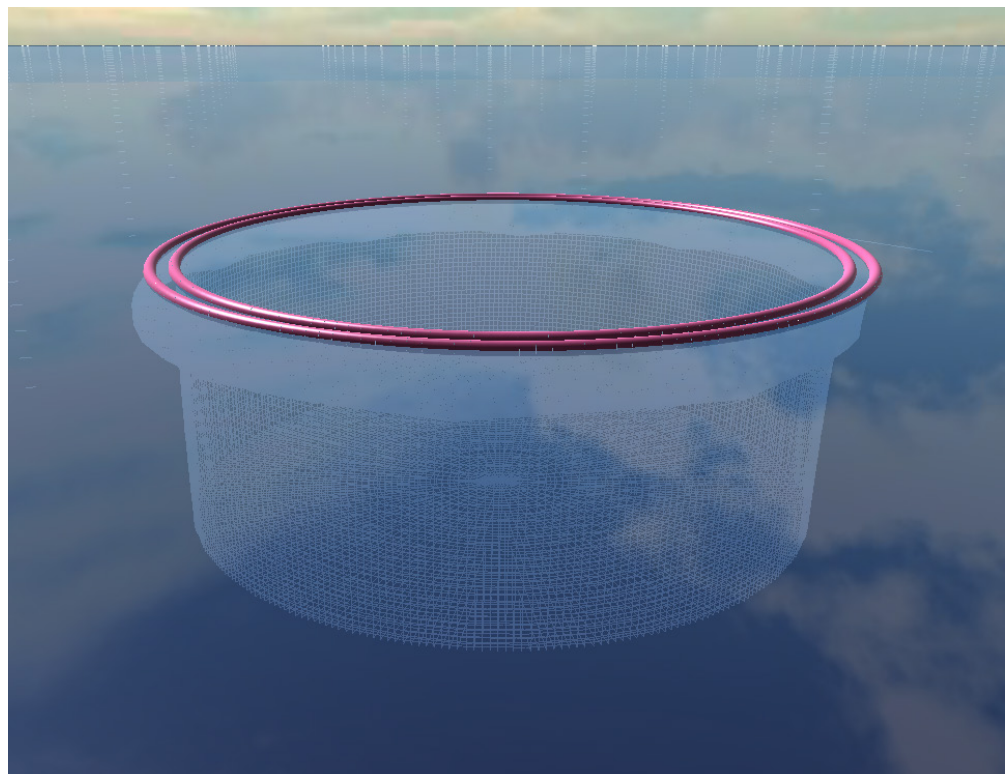
## Krefter og deformasjon av skjørt i FhSim

Beregning av krefter og deformasjon av skjørt med bruk av simuleringsverktøyet FhSim

### Forfatter(e)

Per Rundtop

Andreas Myskja Lien



# Rapport

## Krefter og deformasjon av skjørt i FhSim

Beregning av krefter og deformasjon av skjørt med bruk av simuleringverktøyet FhSim

EMNEORD:  
Havbruksteknologi  
Simulering  
Lakselus  
Presenning  
Kraft  
Deformasjon

**VERSJON**

2.00

**DATO**

2013-02-08

**FORFATTER(E)**

Per Rundtop  
Andreas Myskja Lien

**OPPDRAKSGIVER(E)**

Fiskeri- og Havbruksnæringens Forskningsfond (FHF)

**OPPDRAKSGIVERS REF.**

Kjell Maroni

**PROSJEKTNR**

6020243

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**

29+ vedlegg

**SAMMENDRAG**

### Krefter og deformasjon av skjørt i FhSim

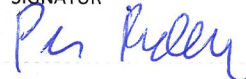
Skjørtets evne til å skjerme mot lus, samt belastningene som skjørtet påfører merd og fortøyning, er avhengig av de rådende strøm- og bølgeforholdene ved lokaliteten. Gjennom arbeidet presentert i denne rapporten er det studert hvordan skjørtets egenskaper kan forbedres i forhold til sjøkrefter, og blant annet hvordan skjørtet kan modifiseres med hensyn til nedlodding og innfesting.

For å vurdere de ulike skjørtmodifikasjonene ble det utviklet en merdmodell med skjørt for simuleringkjernen FhSim. Modellen ble validert mot fysiske modellforsøk med merd og skjørt.

I hovedsak viste valideringsresultatene at dragkreftene for skjørtet og skjørtdeformasjonen ble overestimert i FhSim i forhold til modellforsøkene, men den numeriske modellen vil allikevel være godt egnet til å gjøre innledende studier for å vurdere forskjellige mulige forbedringer i design. Resultatene indikerer at skjørtdeformasjonen vil kunne reduseres og bli jevnere ved å feste skjørtet i bunnringen ved hjelp av en skjørtline, øke nedloddingsvekten eller ved å erstatte enkeltlodd i skjørtet med loddline. Det er også sannsynlig at disse modifikasjonene vil kunne redusere problemet med luftlommer i skjørtet og at skjørtet kryper oppover flytekragen. Kortere og jevnere avstand mellom innfestingspunktene vil kunne få skjørtet til å henge glattere uten folder.

**UTARBEIDET AV**

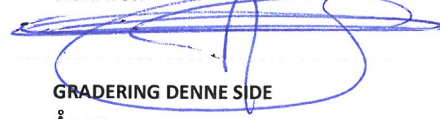
Per Rundtop

**SIGNATUR****KONTROLLERT AV**

Østen Jensen

**SIGNATUR****GODKJENT AV**

Jostein Storøy

**SIGNATUR****RAPPORTNR**

A24030

**ISBN**

978-82-14-05572-6

**GRADERING**

Åpen

**GRADERING DENNE SIDE**

Åpen

# Historikk

---

<b>VERSJON</b>	<b>DATO</b>	<b>VERSJONSBEKRIVELSE</b>
1.00	2013-02-01	Ferdig utkast til gjennomlesing av styringsgruppe.
2.00	2013-02-08	Revidert etter tilbakemelding fra styringsgruppe.

# Innholdsfortegnelse

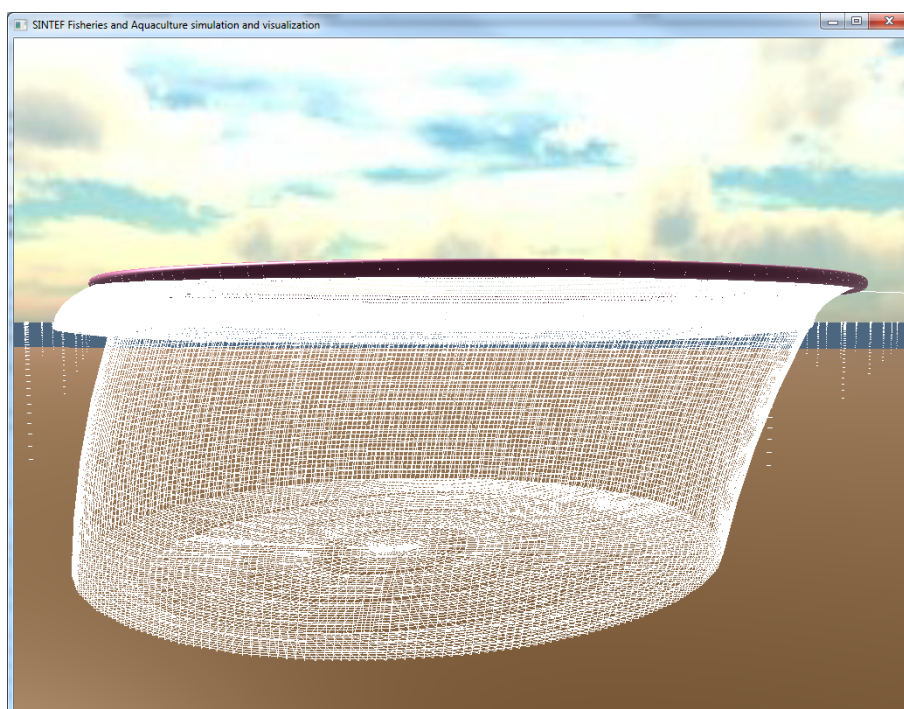
<b>1</b>	<b>Innledning</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Formål</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Underlag for simuleringene</b> .....	<b>8</b>
	3.1 Modelforsøk i Hirtshals som case .....	8
	3.2 Modifikasjoner av skjørtløsningen.....	9
<b>4</b>	<b>Materialer og metoder</b> .....	<b>12</b>
	4.1 Numeriske modeller.....	12
<b>5</b>	<b>Simuleringscase</b> .....	<b>14</b>
	5.1 Validering av modellen .....	14
	5.2 Modifikasjoner av skjørtløsningen.....	14
<b>6</b>	<b>Resultater</b> .....	<b>16</b>
	6.1 Definisjoner.....	16
	6.2 Validering av modellen .....	16
	6.3 Modifikasjoner av skjørtløsningene.....	19
<b>7</b>	<b>Diskusjon</b> .....	<b>26</b>
	7.1 Validering av modellen .....	26
	7.2 Modifikasjoner av skjørtløsningen.....	26
<b>8</b>	<b>Konklusjon</b> .....	<b>28</b>
<b>9</b>	<b>Videre arbeid</b> .....	<b>29</b>
<b>10</b>	<b>Referanser</b> .....	<b>29</b>

## 1 Innledning

Lakselus er, sammen med rømming, regnet som en av de største utfordringene for havbruksnæringen. Innledende studier har indikert at et 5 meter dypt permanent presenning-skjørt omkring den øvre delen av en oppdrettsmerd kan redusere lusepåslaget på laksen. Skjørtets evne til å skjerme mot lus, samt de belastninger skjørtet påfører merd og fortøyning, er avhengig av strøm og bølgeforhold på lokaliteten. For å bedre skjørtets evne til å håndtere miljøet, kan skjørtet modifiseres med hensyn til på nedlodning, innfesting og dybde.

Det er viktig å unngå skade på kommersielle havbruksanlegg og produksjonsfisk ved bruk av skjørt. For å teste ut nye løsninger og modifikasjoner på et tidlig stadium, kan modellforsøk være et alternativ til fullskala forsøk. Modellforsøk kan være tidkrevende og kostbart, spesielt når mange forskjellige konfigurasjoner skal testes. Det vil ofte være hensiktsmessig å gjøre numeriske simuleringer i forkant for å begrense antall modell og fullskalaforsøk. Numeriske simuleringer er både tid- og kostnadsbesparende i forhold til fysiske forsøk. I tillegg får man en unik og detaljert forståelse for hvilke krefter som virker og systemets dynamikk.

FhSim er en simuleringskjerne utviklet ved SINTEF Fiskeri og havbruk med tilhørende numeriske modeller for fiskeri og havbruksapplikasjoner. I løpet av høsten 2012 ble en merdmodell med skjørt utviklet i FhSim og brukt til simulering av ulike lokalitetsmiljø og modifikasjoner av skjørtet (Figur 1). Modellen ble validert mot modellforsøk gjennomført i Hirtshals, Danmark, mars 2012.



**Figur 1 Visualisering av simuleringsmodellen med flytekrage, not og skjørt.**

Dette studiet er en del av prosjektet "Permanent skjørt for reduisering av luspåslag på laks" (Permaskjørt) (#900711), som er finansiert av Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfond (FHF) og norske industripartnere. Prosjektets styringsgruppe består av Kjell Braa, Botngaard AS, Finn Wilhelm Sinkaberg, Sinkaberg-Hansen AS, og Noralf Rønningen, Aqualine AS.

## 2 Formål

Ulike modifikasjoner av skjørtet ble foreslått for å møte utfordringen med ulike former for deformasjon av skjørtet. Simuleringer av de ulike modifikasjonene ble kjørt på et tidlig stadium for å avgjøre om det er hensiktsmessig å ta det videre til fullskalauttesting.

Med deformasjon av skjørtet menes her endring av den sylindriske formen skjørtet har når det henger nedloddet fra flytekragen i stille vann, som fører til redusert skjerming av volumet inne i merden, eksempelvis redusert skjørtedybde og endring av vinkel.

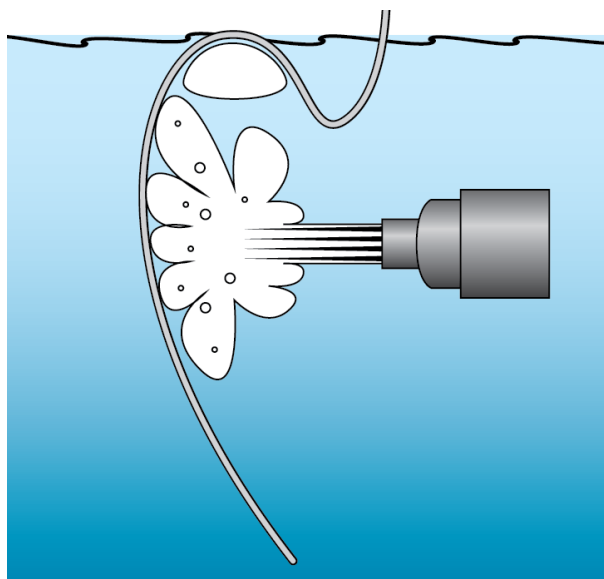
Utfordringene det her fokuseres på å løse er:

### a) Luftlommer

Luft samles i folder og hever skjørtet. Luftlommene kan forekomme mellom flyterørene eller på innsiden av flytekragen (Figur 2). Årsaker til luftlommene kan være bevegelser i vannflaten eller vannjetstråle fra en båt rettet inn mot skjørtet (Figur 3).



**Figur 2** Luftlomme i skjørtet på innsiden av flytekragen.



**Figur 3** Vannjetstråle rettet inn mot skjørtet kan være en av årsakene til luftlommer.



*b) Krypning*

Skjørtet kan krype opp på flytekragen slik at dybden reduseres. Årsaker til dette kan være vær og bølger. I spesielle tilfeller kan uvær kaste skjørtet helt ut av sjøen (Figur 4 og Figur 5).



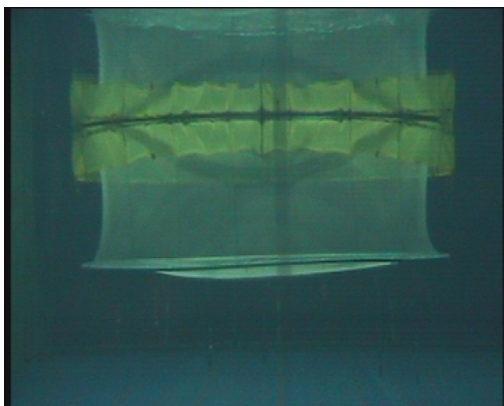
**Figur 4** Skjørt kastet opp av sjøen og opp på flytekragen som følge av uvær.



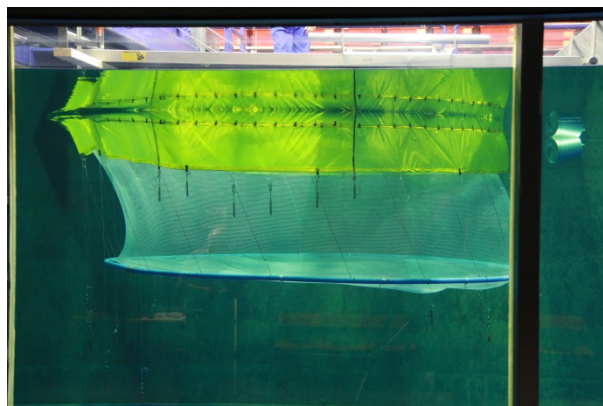
**Figur 5** Skjørt kastet opp av sjøen og opp på flytekragen som følge av uvær.

*c) Buer*

Nedlodding av skjørtet i enkeltpunkter fører til at det løfter seg i buer mellom loddenes festepunkter. I buene blir skjørtet grunnere og det er større sannsynlighet for at lus passerer under skjørtet og slipper inn i merden.



**Figur 6** Skjørt løfter seg i buer på oppstrøms side på modellmerd sett fra oppstrøms side. Modellen tilsvarer 6 m dypt skjørt i  $40 \text{ cm s}^{-1}$  strøm.



**Figur 7** Skjørt løfter seg i buer på oppstrøms side (venstre side på bildet) på modellmerd sett på tvers av strømmen. Modellen tilsvarer 6 m dypt skjørt i  $40 \text{ cm s}^{-1}$  strøm.

#### d) Folder

Dersom skjørtets innfestingspunkter ikke samsvarer med klammere på flytekragen, kan det medføre folder og lommer i skjørtet. Dette kan gi ujevn belastning på flytekragen, samt at provisoriske innfestingsløsninger kan komme i veien for de som skal arbeide på gangbanen (Figur 8).

Hull i skjørtet, som følge av slitasje over tid på grunn av gnag mot andre komponenter eller under håndtering, kan slippe vann med lus inn i det skjermede volumet inne i merden (Figur 9). Dette er en utfordring som er viktig å ta hensyn til for at skjørtet skal ha den ønskede effekten. Det fokuseres ikke videre på denne utfordringen i denne rapporten, da det bør løses ved forsterking av dukmaterialet eller måten skjørtet håndteres på.



**Figur 8 Ujevn innfesting av skjørtet skaper folder og lommer i skjørtet.**



**Figur 9 Skader på skjørtet kan slippe lus gjennom.**



### 3 Underlag for simuleringene

#### 3.1 Modelforsøk i Hirtshals som case

For å studere hvordan et påmontert skjørt vil kunne påvirke krefter på fortøyning, notdeformasjon og vannstrømninger inn i og rundt en merd, ble det gjennomført eksperimenter i SINTEF Fiskeri og havbruk AS sin flumetank i Hirtshals, Danmark, i perioden 26. til 29. mars, 2012.

##### 3.1.1 Materialer og metoder

I eksperimentene ble det brukt en modell av en 157-metring i skala 1:17. Denne ble testet med ulike skjørtkonfigurasjoner ved ulike strømhastigheter. Krefter på fortøyning, not- og skjørtdeformasjon, samt strømhastighet og retning i og utenfor merden ble målt.

##### 3.1.2 Resultater

Forsøkene viste at skjørtets evne til å skjerme mot lus kan bli redusert ved høye strømhastigheter ( $V_c > 40 \text{ cm s}^{-1}$ , full skala), på grunn av at skjørtet blir presset bakover og opp mot overflaten, slik at lus lettere kan passere under og inn i merden. På grunn av økningen i dragkrefter som følge av et påmontert skjørt, vil det være viktig å inkludere bruk av skjørt når det gjøres fortøyningsanalyser på anlegget. Fortøyningskreftene er for øvrig ikke betydelig påvirket av verken den initielle skjørtedybden eller nedloddningen av skjørtet. Grunnen til dette kan være at skjørtdeformasjonen ble begrenset av bunnringkjettingene, men også at desto dypere skjørtene var desto mer ble de deformert.

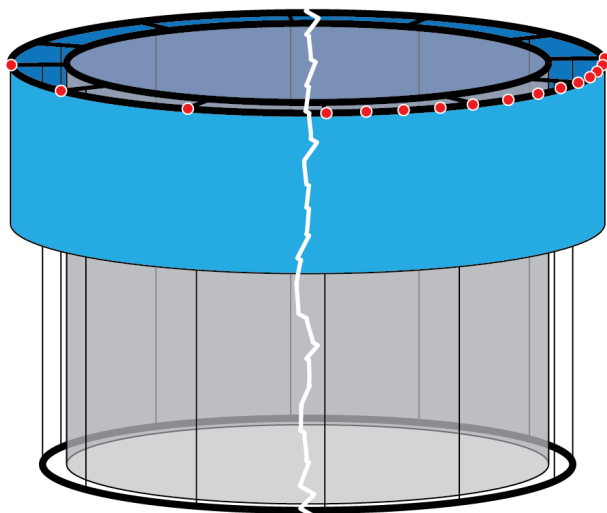
Modellen ble brukt som utgangspunkt for oppbygging av den numeriske modellen som beskrives i dette dokumentet. Mer informasjon om modelforsøket kan hentes fra rapporten (Lien og Volent, 2012).

### 3.2 Modifikasjoner av skjørtløsningen

Som tiltak for å løse utfordringene a) *Luftlommer*, b) *Kryping*, c) *Buer* og d) *Folder* er det nedenfor foreslått noen modifikasjoner av skjørtløsningen.

#### 3.2.1 Innfesting

Ved å øke antall innfestingspunkter kan belastningen på merden fordeles jevnere, noe som vil redusere punktbelastningen (Figur 10). Hypotesen er at flere innfestingspunkter også vil redusere eventuelle folder slik at skjørtet henger glattere omkring merden. Dette vil kunne redusere problemene med utfordring c) og d).

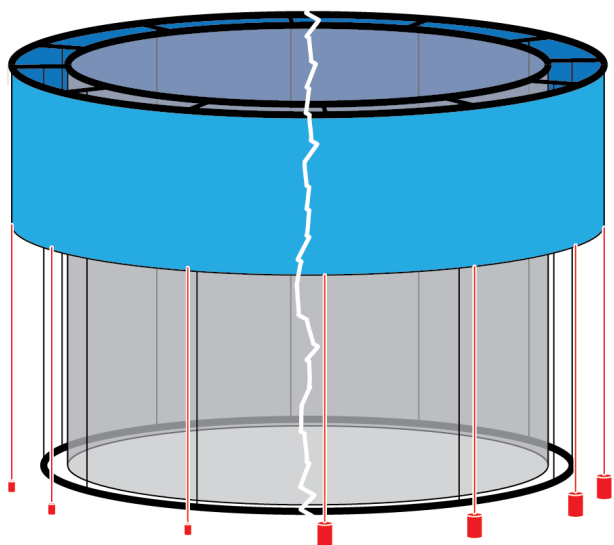


**Figur 10** Økning i antall innfestingspunkter for å se om det kan redusere problemene med utfordring c) *Buer* og d) *Folder*.

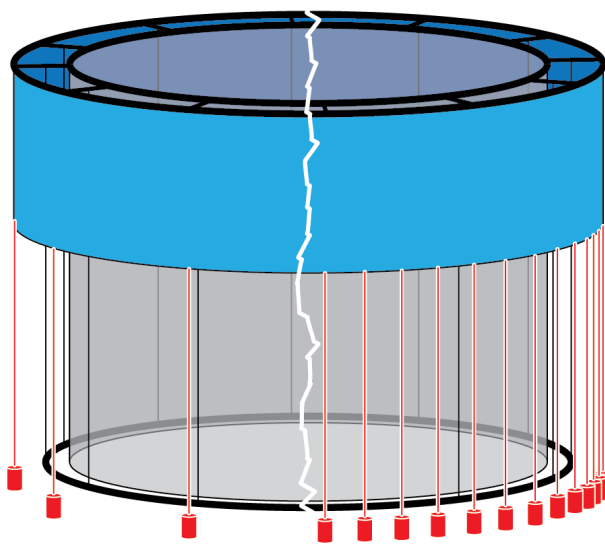
### 3.2.2 Nedlodding

Ved å variere loddvekten kan man påvirke hvor mye skjørtet deformeres av strømmen (Figur 11). Hypotesen er at tyngre loddvekt vil kunne redusere problemet med utfordring a) *Luftlommer* og b) *Kryping*. Ved å redusere deformasjon av skjørtet vil man samtidig øke dragkreftene. Det er derfor viktig å undersøke kreftene når loddvekten økes.

En annen hypotese angående nedlodding, er at flere lodd i nedkanten av skjørtet fører til at det henger jevnere og at det ikke dannes like store buer som kan slippe vann inn under (Figur 12).



**Figur 11** Tyngre loddvekt kan redusere problemene med utfordring a) *Luftlommer* og b) *Kryping*.

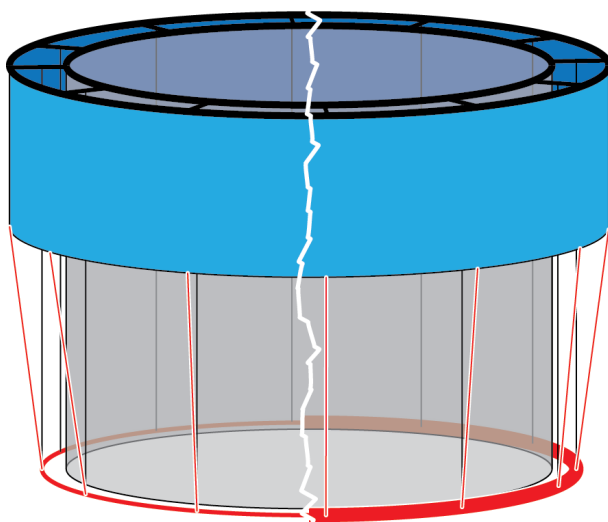


**Figur 12** Flere lodd kan redusere problemet med utfordring a) *Luftlommer* og c) *Buer*.

### 3.2.3 Feste i bunnring

Som et alternativ til å øke loddvekten i skjørtet kan bunnringen utnyttes for å holde skjørtet nede. Dette kan gjøres ved å forbinde nedre del av skjørtet med bunnringen ved hjelp av liner (Figur 13). Hypotesen er at liner mellom skjørt og bunnring vil kunne redusere problemet med utfordring a) *Luftlommer* og b) *Kryping*. Det er da viktig å undersøke hvordan dette påvirker notdeformasjonen og dragkreftene. Samtidig vil det være viktig å undersøke innvirkningen av ulik vekt i bunnringen.

For modellering av krefter og deformasjon er kun prinsippet viktig, og hvordan forbindelsen bør gjøres i praksis med tanke på drift og operasjon er ikke tatt hensyn til i simuleringene.



**Figur 13** Liner mellom skjørt og bunnring kan redusere problemene med utfordring a) **Luftlommer** og b) **Kryping**.

## 4 Materialer og metoder

### 4.1 Numeriske modeller

Gjennom blant annet prosjektet "Numerical simulation of complex systems involving interaction between elements with large and varying stiffness properties (Forskningsrådet, prosjekt 199574/O70)" er det utviklet ulike numeriske modeller for merdkomponentene, og modellene som er brukt i disse simuleringene beskrives her.

#### 4.1.1 FhSim

Den numeriske implementeringen ble gjennomført i FhSim, som er et rammeverk for numerisk tid-domene simulering, utviklet ved SINTEF Fiskeri og havbruk. FhSim har numeriske modeller av ulike komponenter og utstyr som brukes i havbruk, fiske og andre marine næringer. De individuelle komponentene kan forbinde og utveksle data under simulering ved hjelp input og output porter. Dette gjør det mulig å simulere komplekse systemer bestående av ulike sub-modeller, som havbruksmerder (typisk simulert med sammenhengende modeller av flytekrage, notstrukturer, tau, kjettinger og lodd).

#### 4.1.2 Strøm (miljømodell)

Det ble brukt uniform og tidsinvariant strøm for alle simuleringene, og dette innebærer at strømmen er konstant uavhengig av tid, vertikal eller horisontal posisjon.

#### 4.1.3 Flytekrage

Flytekragen er fleksibel for å gi en realistisk oppførsel i bølger. Simuleringsresultatene er lite sensitive for hvilke parametere som brukes ettersom simuleringene er kjørt uten bølger, og flytekragen er gitt en stivhet for minimal ovalisering.

#### 4.1.4 Notstruktur

Notstruktur-modellen er bygd opp av trekantelementer, ofte referert til som Priour elementer, hvor hvert element har tre noder som er koblet sammen med naboelementene for å danne et mesh med ønsket geometri. Hver enkelt node har en tilstand for hastighet og posisjon som beregnes med bakgrunn i treghet og kreftene som virker på hvert element. Disse kreftene inkluderer indre krefter, samt ytre krefter som gravitasjonskrefter og hydrodynamiske krefter, hvor sistnevnte dominerer når simuleringen har stabilisert seg i stasjonær tilstand.

Notsimuleringsmodulen antar bøyestivhet lik null i nodeforbindelser mellom elementer. Dermed blir den simulerte strukturen helt fleksibel i nodekoblingene. Dette er en god tilnærming når notmaterialer med lav eller ubetydelig bøyestivhet, slik som nylon, skal simuleres. Strukturelle elementer er stive elementer med seks frihetsgrader, som er forbundet via et sett av grensebetingelser påsatt relativ avstand og orientering mellom elementer. Grensebetingelsene er regulert med en elastisk variant av Baumgarte-stabiliseringsmetode (Baumgarte, 1972) som gjør at reguleringskreftene relateres til strukturelle krefter. Noe forenklet, sikrer avstandsgrensebetingelsene aksiale- og skjærkrefter, og retningsgrensebetingelsene sikrer bøyekrefter. En mer omfattende beskrivelse av de strukturelle elementene er beskrevet i Jensen et al. (Submitted to OMAE2013).

Notstrukturmodellen har eksterne tilkoblingsnoder, og på forhånd defineres det hvilke noder som er eksterne, og i praksis hvilke noder som kobles mot innfestingspunkter i flytekrage og eksterne krefter fra nedlodding. Meshet av noder og elementer autogenereres ved å legge inn parametere for diameter, høyde, osv.



Det er rimelig å anta at den delen av noten som er skjermet av skjørtet, ikke vil bli utsatt for hydrodynamiske krefter. For simuleringstasene som er beskrevet her ble derfor strømmen som virket på denne delen av notlinet satt lik null.

#### Parametere

Navn	Enhet	Hirtshals	FhSim
Stolpelengde	mm	7.3	7.3
Tråddiameter	mm	0.78	0.78
Soliditet	%	21.1	21.3
E-modul <sup>1</sup>	MPa	-	82
Tetthet	kg/m <sup>3</sup>	1125	1125
Diameter topp/bunn	m	2.90	3.00
Dybde	m	1.18	1.18
Antall innfestingspunkter	-	20	20
Antall enkeltlodd	-	Bunnring	20
Total nedlodding	N	13.2	13.2
Antall elementer	-	-	340
Antall noder	-	-	181

#### 4.1.5 Skjørt

For å simulere skjørtet ble det brukt samme modell som for noten. Soliditet ble satt lik 100 % for å kunne representere en tett membranduk.

For å gjøre montering enklere består både full skala skjørt og skjørtmodellen brukt i forsøkene i Hirtshals av to presenningsdeler som monteres som halvmåner omkring hver sin side av merden og overlapper i skjøtene, uten å festes i hverandre. I FhSim ble dette forenklet til et sammenhengende skjørt uten skjøter.

#### Parametere

Navn	Enhet	Hirtshals	FhSim
Stolpelengde	mm	-	1.0
Tråddiameter	mm	-	1.0
Soliditet	%	100	100
E-modul <sup>1</sup>	MPa	-	82
Tetthet	kg/m <sup>3</sup>	1025	1025
Diameter topp/bunn	m	3.12	3.25
Dybde 2	m	0.363	0.363
Dybde 3	m	0.54	0.54
Antall innfestingspunkter	-	80	20
Antall enkeltlodd	-	Enkeltlodd	20
Total nedlodding	N	10.3	10.3
Antall elementer	-	-	200
Antall noder	-	-	120

<sup>1</sup> E-modulen har liten betydning for de fysiske forsøkene ettersom deformasjonen kommer av bøyning og ikke de aksiale kreftene

#### 4.1.6 Hanefot

Hanefoten består av en enkelt kabel som er festet til et fast punkt i rommet i den ene enden og til flytekragen i den andre enden. I Hirtshals var hanefoten trippel inn mot flytekragen for å stabilisere merden. I FhSim-modellen er flytekragen gitt en stivhet for minimal ovalisering, og ett punkt for innfesting i flytekragen er derfor tilstrekkelig.

#### 4.1.7 Bunnring

For noen av simuleringscasene ble det brukt bunnring koblet til flytekrage og not ved hjelp av kabelelementer. Bunnringen fungerer etter samme prinsipp som flytekragen, men er fleksibel for å kunne ta hensyn til deformasjon ut av horisontalplanet.

### 5 Simuleringscase

#### 5.1 Validering av modellen

Det ble satt opp simuleringscase for å finne ut hvor god overenstemmelse den numeriske modellen har i forhold til modellforsøkene som ble gjort i Hirtshals.

En modell i FhSim med flytekrage, not, skjørt og bunnring ble konfigurert, og følgende modellkonfigurasjoner ble kjørt:

1. Kun not
2. Not og skjørt med dybde 0.36m
3. Not og skjørt med dybde 0.54m

For hver av de tre modellkonfigurasjonene over ble det kjørt fire case med ulik strøm: 0.05, 0.1, 0.15 og 0.2m/s. Parameterne i modellene er identiske med det som er beskrevet i avsnitt 3.3.

#### 5.2 Modifikasjoner av skjørtløsningen

For å oppnå større fleksibilitet for simuleringscasene med ulike skjørtedesign, ble antall punkter som det kan festes lodd i økt fra 20 til 40. Dette bidrar også til at antall skjørtelementer øker tilsvarende. Øvrige parameterendringer, og de ulike modellkonfigurasjonene, er beskrevet i avsnittene under.

##### 5.2.1 Sammenligning av ulike loddvekter for skjørt

For å undersøke skjørtdeformasjon og dragkrefter ved ulike loddvekter ble det kjørt simuleringscase med 5, 10, 20 og 30N som total loddvekt for skjørtet. Loddvekten ble fordelt på 40 enkeltlodd, og det ble brukt skjørtedybde på 0.249m og 0.1m/s strøm for alle casene.

##### 5.2.2 Sammenligning av enkeltlodd og loddline

Det nærmeste man kommer en loddline i skjørtmodellen er å legge inn ett lodd i hver node, og loddlinen ble derfor representert ved å firedoble antall enkeltlodd, og det antas at dette er en god tilnærming til en loddline.

Det ble kjørt følgende modellkonfigurasjoner:

1. Skjørtedybde 0.25m og 10 enkeltlodd
2. Skjørtedybde 0.25m og 40 enkeltlodd
3. Skjørtedybde 0.36m og 10 enkeltlodd
4. Skjørtedybde 0.36m og 40 enkeltlodd

For alle konfigurasjonene over ble det kjørt simuleringscase ved 0.05, 0.1, 0.15 og 0.2 m/s strøm.

### 5.2.3 Sammenligning av antall innfestingspunkter

For å undersøke skjørtets oppførsel ved ulike innfestingspunkter ble det kjørt følgende modellkonfigurasjoner:

1. 40 innfestingspunkter
2. 10 innfestingspunkter

For alle konfigurasjonene over ble det kjørt simuleringscase ved 0.05, 0.1, 0.15 og 0.2 m/s strøm, og skjørtdybde 0.36m.

### 5.2.4 Sammenligning av enkeltlodd og skjørt festet i bunnring

Det ble konfigurert en merd med bunnring og 20 bunnringkjettinger. Skjørtet ble koblet sammen med bunnringen ved hjelp 20 kabler festet i skjørtets underkant. Kablenes lengde ble satt lik avstanden mellom bunnringen og skjørtets underkant når systemet er i udeformert tilstand.

Det ble kjørt en referansekonfigurasjon uten kabler mellom skjørt og bunnring, og skjørtet ble påsatt 10 enkeltlodd. Deretter ble det kjørt en case uten lodd i skjørtet, kabler mellom skjørt og bunnring, og med tilsvarende bunnringsvekt som i referansecaset. Det ble også kjørt en konfigurasjon hvor bunnringens vekt ble økt tilsvarende loddvekten brukt på skjørtet i referansecaset, og total loddvekt for merden er da identisk med referansecaset.

Modellkonfigurasjonen oppsummeres under:

1. Uten kabler mellom bunnring og skjørt: Nedlodding skjørt/bunnring: 10N (10 enkeltlodd) / 13N
2. Kabler mellom bunnring og skjørt: Nedlodding skjørt/bunnring: 0N / 13N
3. Kabler mellom bunnring og skjørt: Nedlodding skjørt/bunnring: 0N / 23N

For alle konfigurasjonene ble det kjørt simuleringscase ved 0.05, 0.1, 0.15 og 0.2 m/s strøm, og skjørtdybde 0.363m ble brukt for alle casene.

## 6 Resultater

### 6.1 Definisjoner

Simuleringsresultatene av interesse er i hovedsak dragkrefter og deformasjon for not og skjørt. Dragkreftene er de kreftene som virker horisontalplanet, og det er i hovedsak disse kreftene som virker på haneføttene. I tillegg kommer dragkrefter fra flytering, bunnring og tau/kjetting, men disse kreftene er til sammenligning små, og i simuleringsresultatene er det derfor ikke fokusert på disse kreftene.

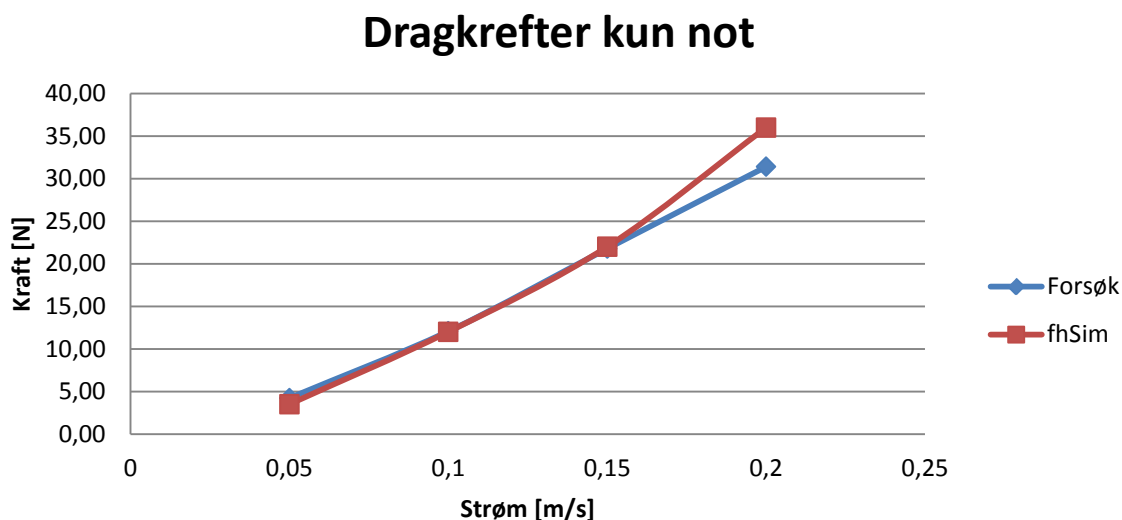
Som mål på deformasjon ble det brukt dybden for bunnodene (nodene i nedkant) for skjørt og not. Resultatene blir presentert som relativ dybde i forhold til dybden i udeformert tilstand.

For skjørtet er det brukt fire ulike metoder for å kvantifisere deformasjonen:

- Oppstrøms side: snittdybden av tre bunnoder på oppstrøms side
- Nedstrøms side: snittdybden av tre bunnoder på nedstrøms side
- Gjennomsnitt deformasjon: snittdybden av alle bunnodene
- Maks skjørtdeformasjon: dybden for bunnoden med minst dybde (bunnoden som er nærmest vannoverflaten)

### 6.2 Validering av modellen

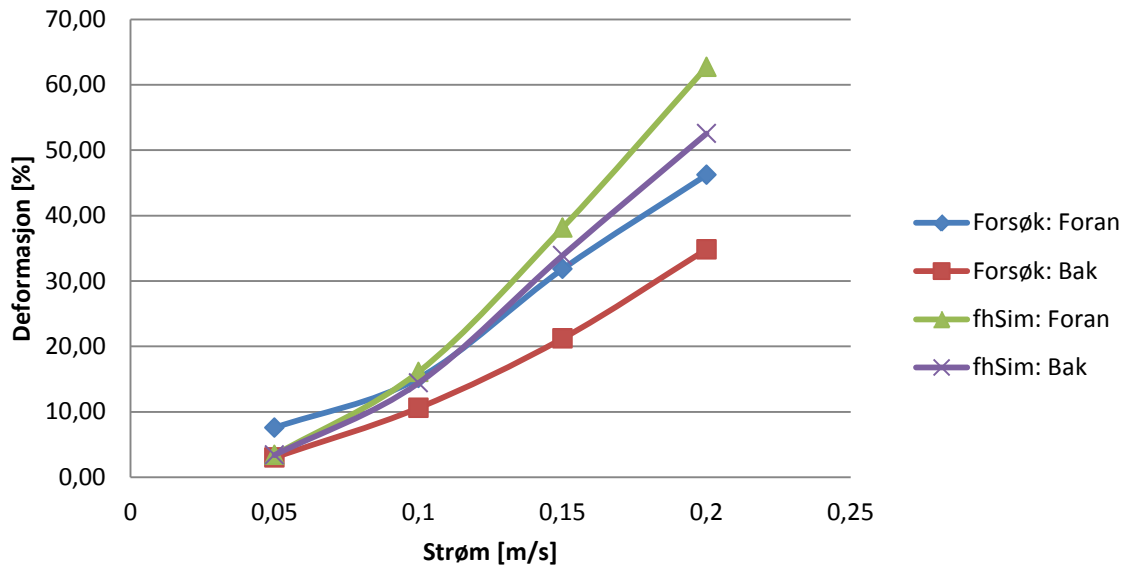
For notmodell uten skjørt ble dragkreftene overestimert med ca. 15 % ved strømhastighet 0.2m/s. For de øvrige casene var det minimale avvik mellom simuleringene og de fysiske forsøkene (Figur 14).



Figur 14 Sammenligning av dragkrefter for notmodell uten skjørt.

Notdeformasjonen for notmodell uten skjørt ble overestimert med 3-45 % i FhSim-simuleringene i forhold til de fysiske modellforsøkene, og overestimert var økende ved økende strømhastighet (Figur 15).

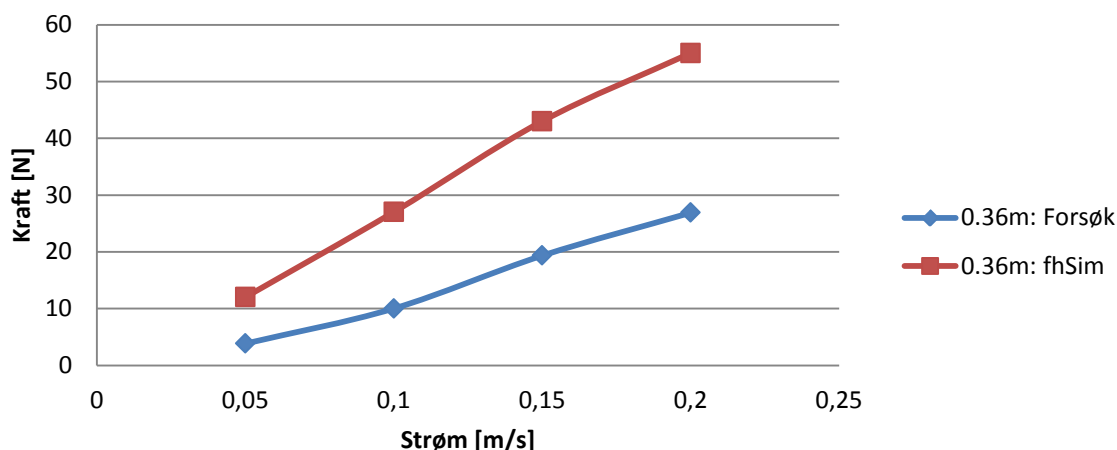
### Deformasjon kun not



**Figur 15 Sammenligning av notdeformasjon oppstrøms og nedstrøms på merden for notmodell uten skjørt.**

For skjørtmodellen ble dragkreftene overestimert i FhSim med ca. 100-200 %. Overestimert avtok for økende strømhastigheter (Figur 16).

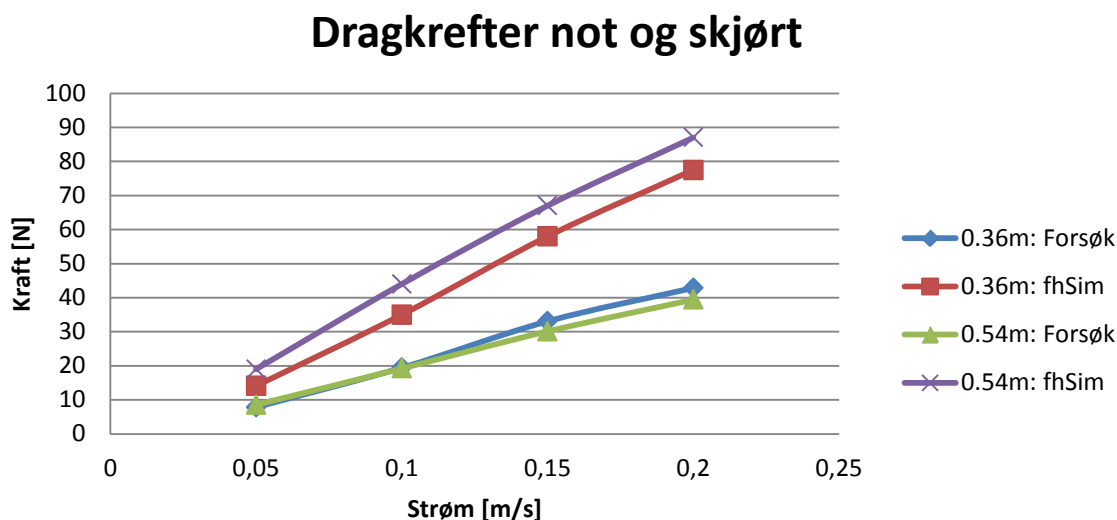
### Dragkrefter kun skjørt



**Figur 16 Sammenligning av dragkrefter for skjørtmodell uten not.**

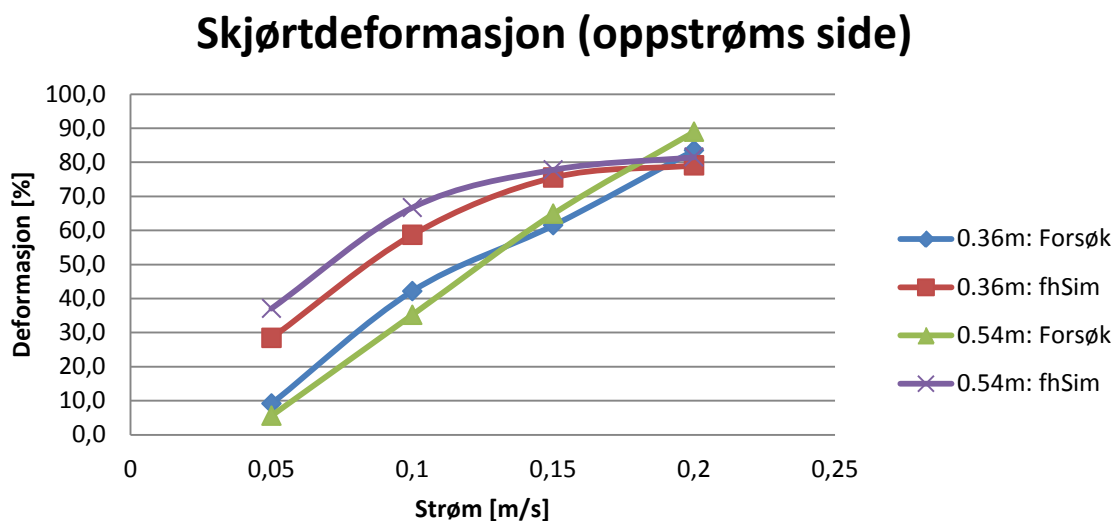


Resultatene fra simulering av både not- og skjørtmodell viste at dragkreftene ble overestimert med 80-140 % (Figur 17).



**Figur 17 Sammenligning av summen av dragkreftene for not- og skjørtmodell.**

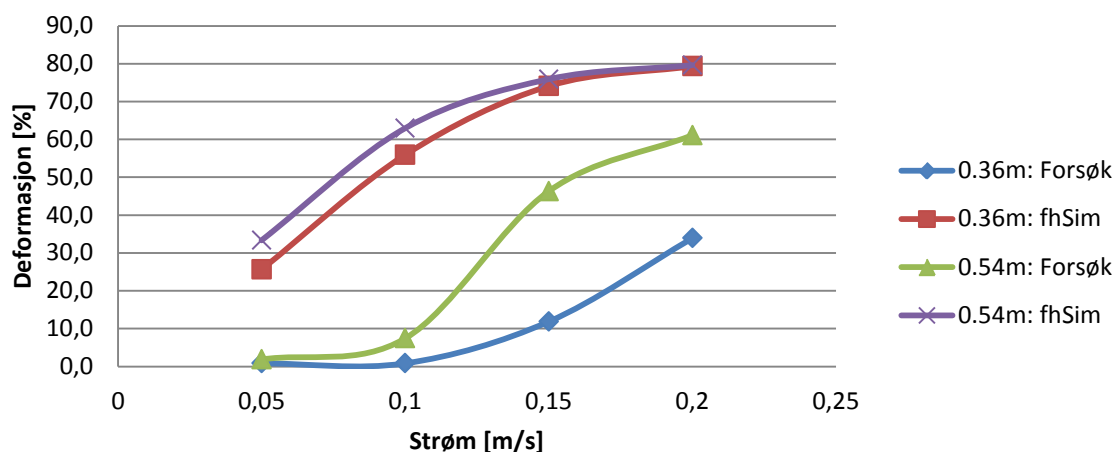
Skjørtdeformasjon oppstrøms ble overestimert markant for lave strømstyrker (ca. 200 %), mens overestimert avtok for økende strøm og med et lite underestimat for strømstyrke lik 0.2m/s (Figur 18).



**Figur 18 Deformasjon av skjørt, oppstrøms side, uttrykt i prosent relativt til udeformert skjørttybde.**

Overestimert for skjørtdeformasjon nedstrøms på merden var mer markant enn for casene oppstrøms på merden, og i likhet med disse casene, avtok overestimert ved økende strøm (Figur 19). For de fysiske forsøkene var det en signifikant forskjell mellom skjørtdybde 0.36 og 0.54m, og det er verd å legge merke til at simuleringsresultatene ikke gjenspeiler dette.

## Skjørtdeformasjon (nedstrøms side)



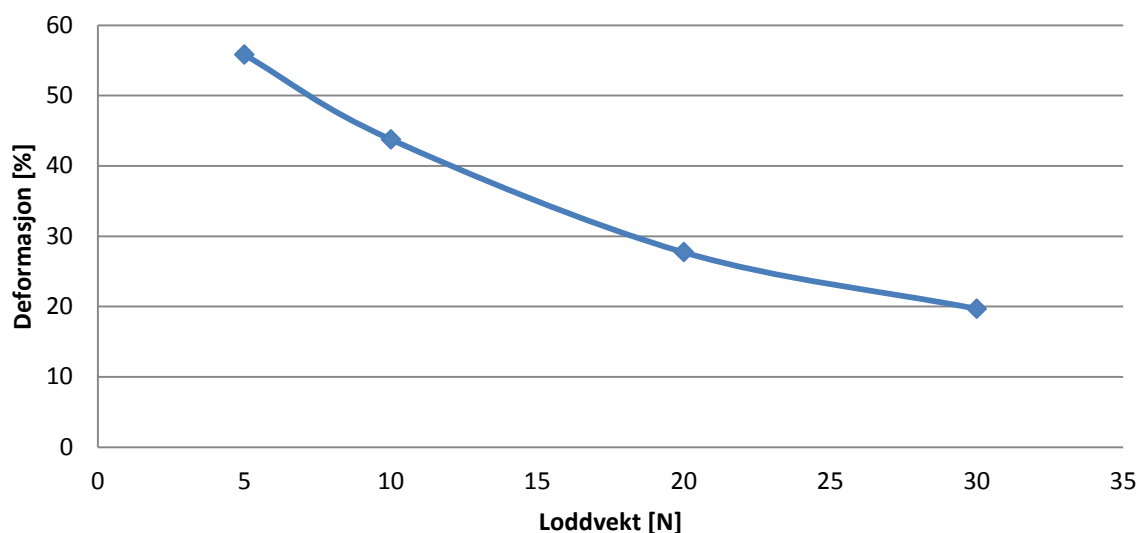
Figur 19 Deformasjon av skjørt, nedstrøms side, uttrykt i prosent relativt til udeformert skjørtdybde.

## 6.3 Modifikasjoner av skjørtløsningene

### 6.3.1 Sammenligning av ulike loddvekter for skjørt

Simuleringscasene indikerer en signifikant korrelasjon mellom loddvekt og skjørtdeformasjon (Figur 20).

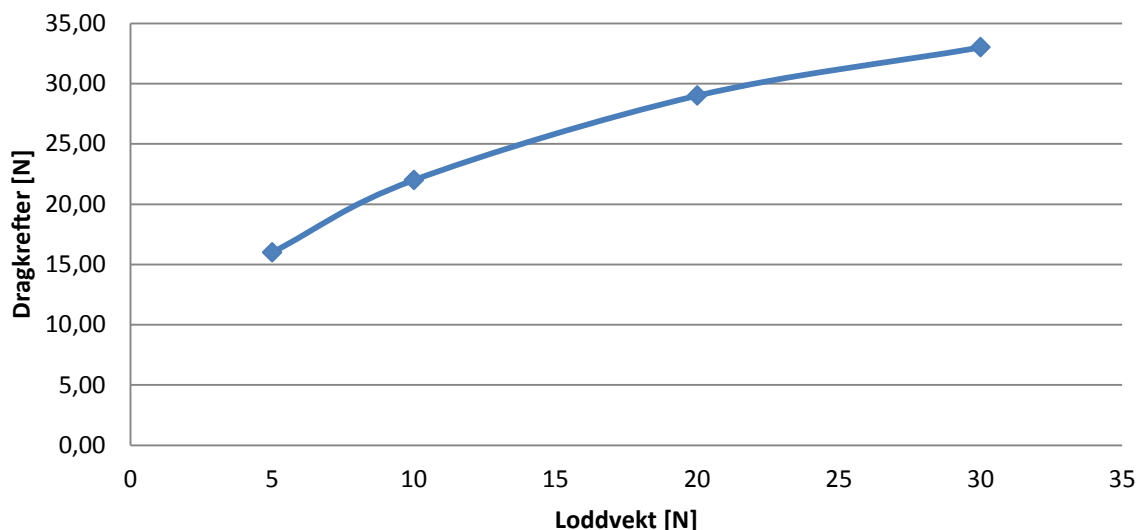
## Loddvekt vs. deformasjon



Figur 20 Sammenhengen mellom loddvekt og deformasjon av skjørt for skjørtdybde 0.25m og strøm lik 0.1m/s.

Simuleringscasene indikerte en klar korrelasjon mellom loddvekt og dragkreftene som ble generert av skjørtet (Figur 21).

## Loddvekt vs. dragkrefter

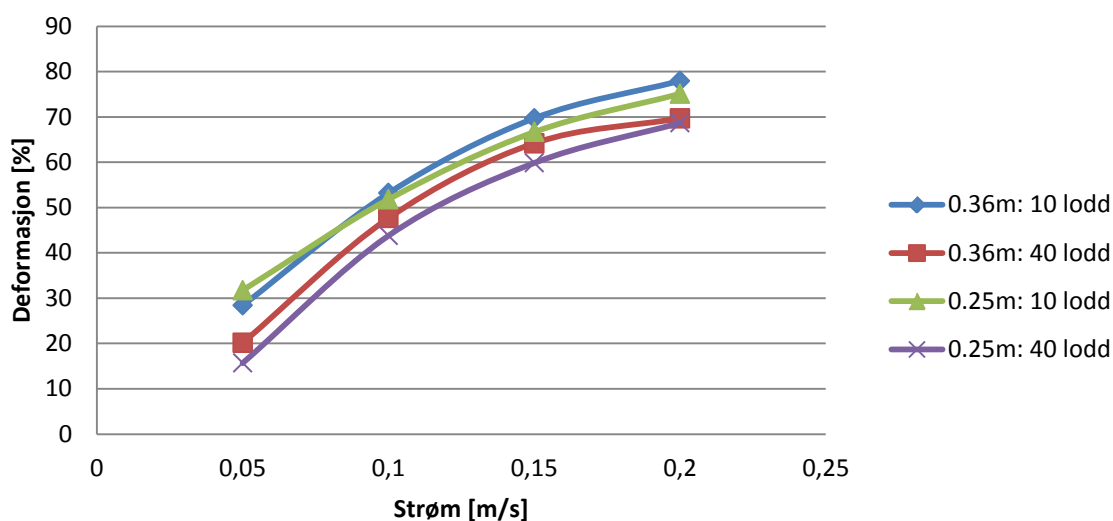


**Figur 21** Sammenhengen mellom loddvekt og dragkrefter for skjørt for skjørtdybde 0.25m og strøm lik 0.1 m/s.

### 6.3.2 Sammenligning av enkeltlodd og loddlinje

Gjennomsnittsdeformasjon ved bruk av loddlinje reduserte deformasjonen med opptil 50 % og 30 %, for henholdsvis skjørtdybde 0.25 og 0.36m, og dette har størst betydning ved moderat strøm (Figur 22).

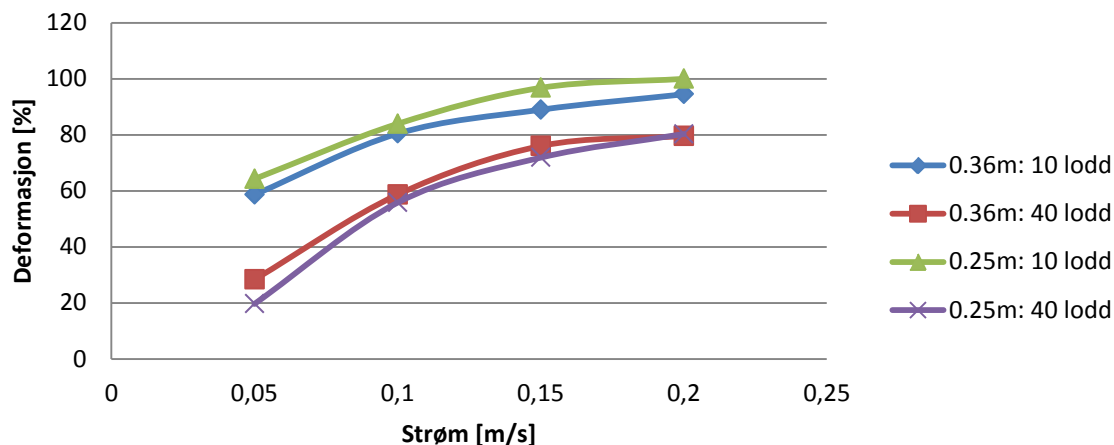
## Skjørtdformasjon (Gjennomsnitt)



**Figur 22** Sammenligning av skjørtdeformasjon for 10 og 40 enkeltlodd for skjørtdybder 0.25 og 0.36m.

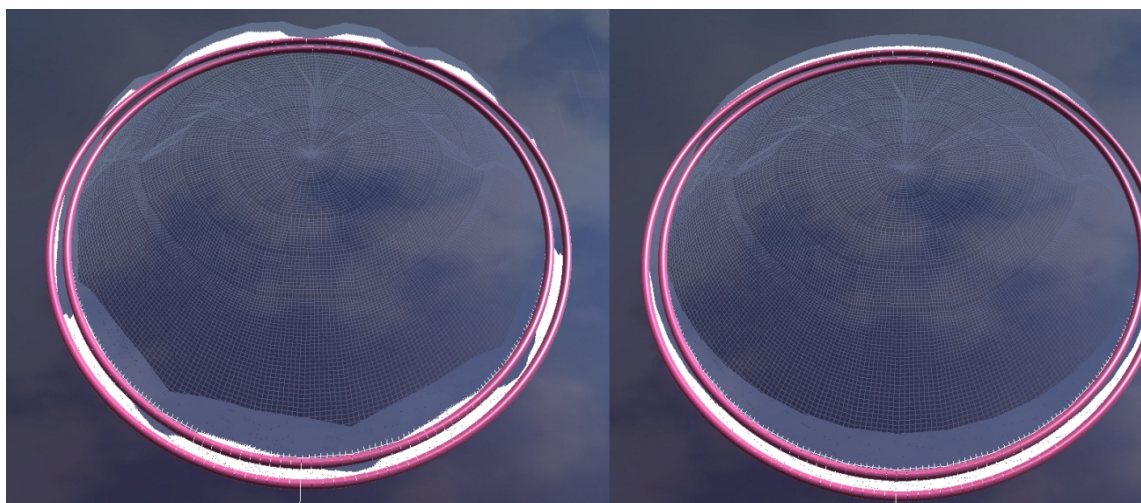
Det er interessant å se på den noden i bunnen av skjørtet som har størst deformasjon. Og dette gir en indikasjon for i hvilken grad det er utposing mellom hvert loddpunkt. Resultatene indikerte at casene med 40 enkeltlodd ga betydelig mindre utposing enn casene med 10 enkeltlodd (Figur 23).

### Maks skjørtdeformasjon enkeltnode



**Figur 23 Sammenligning av største deformasjon av enkeltnode for 10 og 40 enkeltlodd for skjørtedybder 0.25 og 0.36 m.**

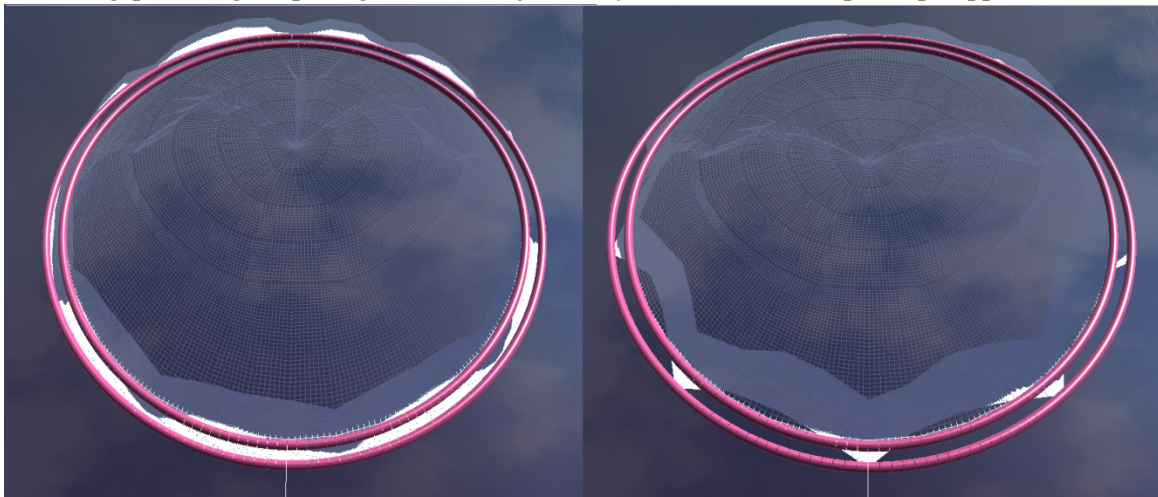
For caset med 10 enkeltlodd var det tydelig utposing mellom hvert av loddpunktene. For caset med 40 enkeltlodd hang skjørtet på samme dybde rundt hele merdens omkrets (Figur 24).



**Figur 24 Visualisering av deformasjon av skjørt med 10 (venstre) og 40 (høyre) enkeltlodd ved strømhastighet 0.2 m/s.**

### 6.3.3 Sammenligning av antall innfestingspunkter

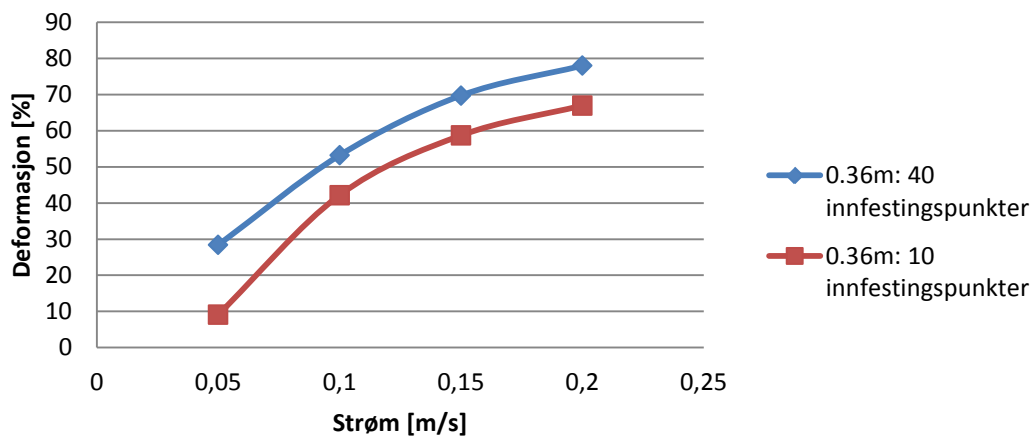
Figur 25 viser sammenligning av 10 og 40 innfestingspunkter, og bildene indikerer at færre innfestingspunkter gir utposing over hele skjørtets dybde mellom hvert punkt på oppstrøms side av merden.



**Figur 25** Visualisering av 40 innfestingspunkter (venstre) og 10 innfestingspunkter (høyre). Strømhastigheten var i dette tilfellet 0.2 m/s.

Resultatene indikerte at deformasjonen var størst for casene med 40 innfestingspunkter (Figur 26).

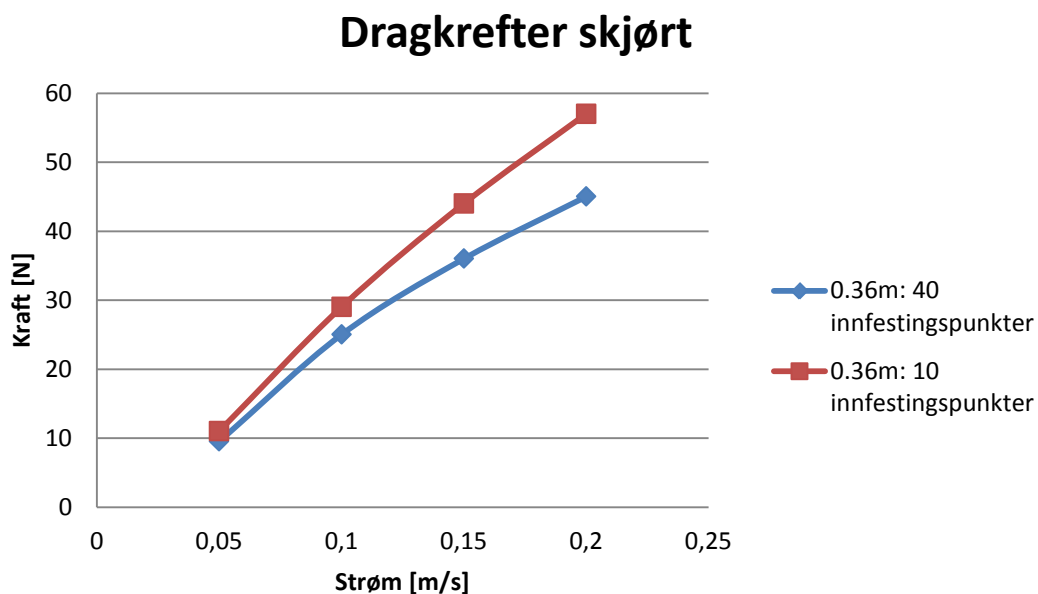
### Skjørtdeformasjon (Gjennomsnitt)



**Figur 26** Sammenligning av skjørtdeformasjon for 10 og 40 innfestingspunkter.



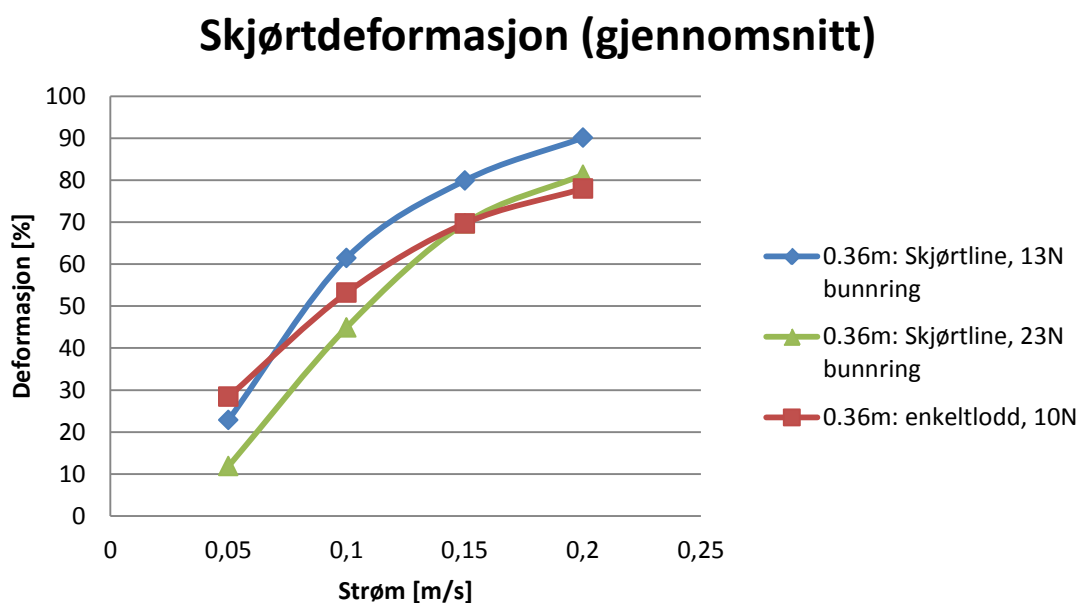
Resultatene indikerte at dragkreftene ble større for casene med 10 innfestingspunkter (Figur 27).



**Figur 27 Sammenligning av dragkreftene for skjørtet med 10 og 40 innfestingspunkter.**

### 6.3.4 Sammenligning av enkeltlodd og skjørt festet i bunnring

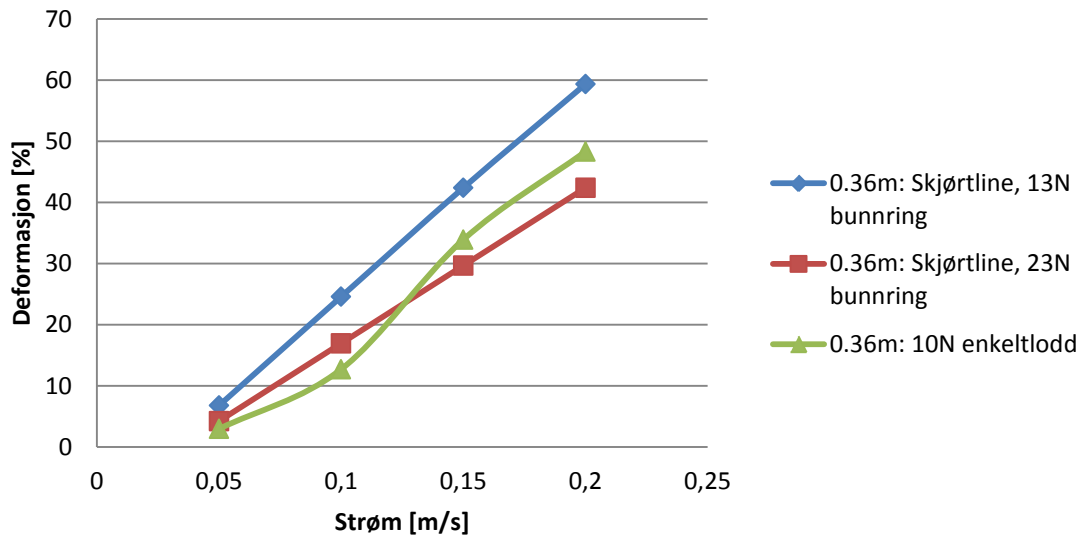
Resultatene indikerte at casene med skjørtline og uforandret vekt på bunnringen ga størst deformasjon. Deformasjonen ble betydelig redusert ved å øke vekten for bunnringen, slik at total nedlodning for merden ble identisk med referansecaset (Figur 28).



**Figur 28 Sammenligning av deformasjon for enkeltlodd og line mellom skjørt og bunnring.**

Når skjørtet festes til bunnringen kan det forventes at skjørtkreftene vil påvirke notdeformasjon. Resultatene indikerte at for lav bunnringvekt økte notdeformasjonen som en årsak av skjørtkreftene (Figur 29).

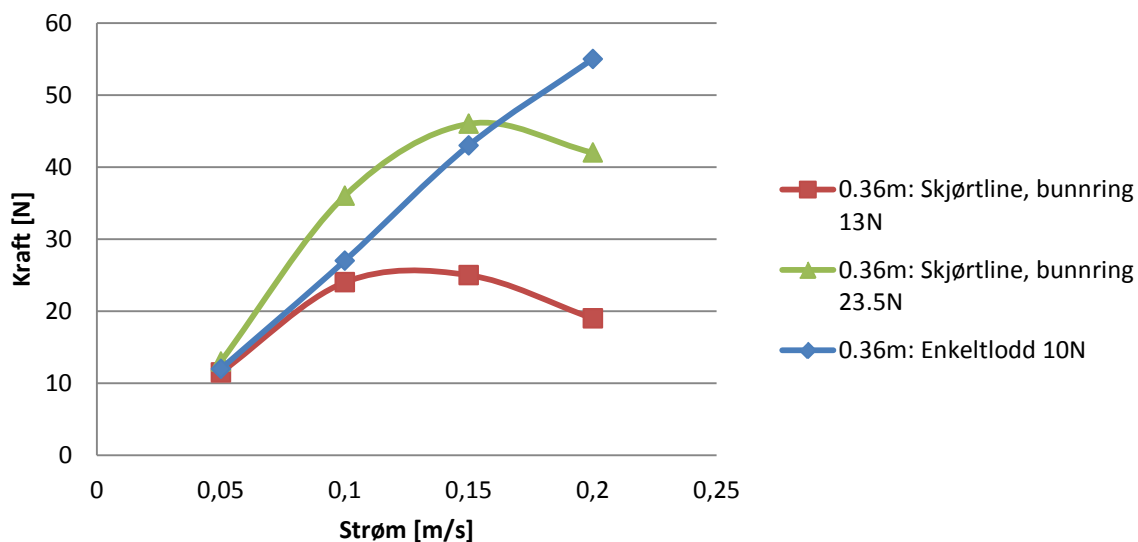
### Notdeformasjon (gjennomsnitt)



**Figur 29** Sammenligning av notdeformasjon når skjørtet ble festet i bunnringen.

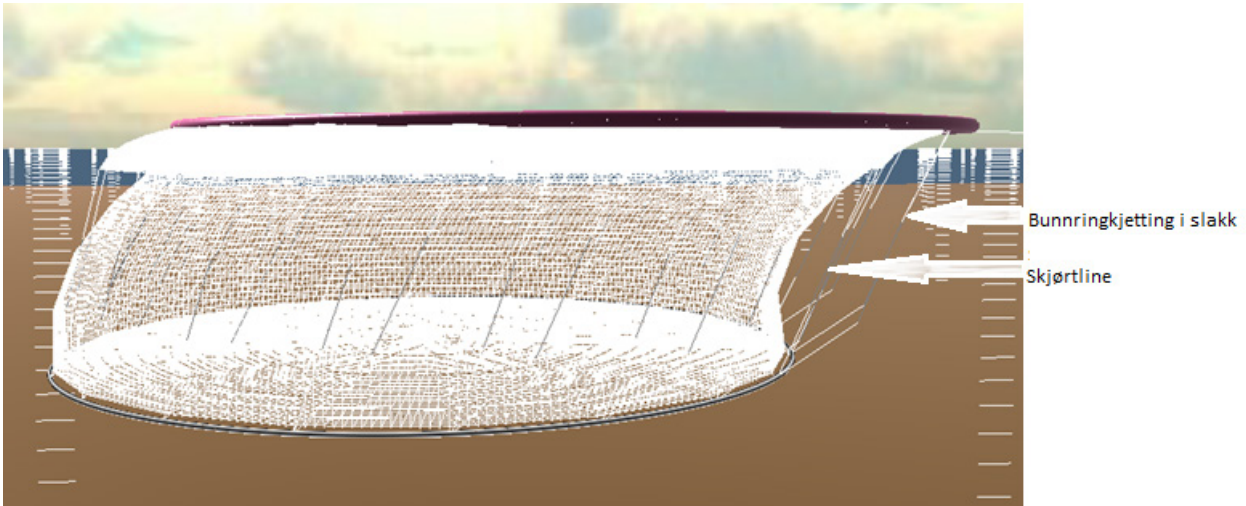
Resultatene indikerte at dragkreftene avtok ved høy strøm i casene med skjørtline (Figur 30).

### Dragkrefter skjørt



**Figur 30** Sammenligning av dragkrefter for enkeltlodd og line mellom skjørt og bunnring.

Når skjørtet var festet til bunnringen ved hjelp av skjørtliner, gikk bunnringene på oppstrøms side i slakk, mens skjørtlinene var stramme (Figur 31).

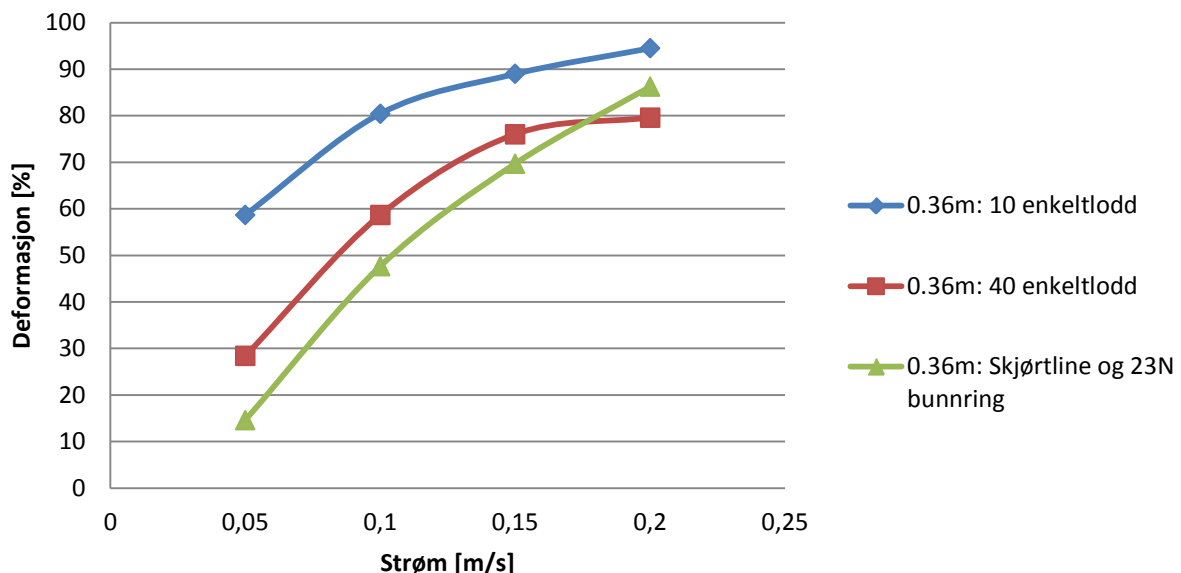


**Figur 31** Visualisering av modellen med skjørtet festet til bunnring ved strømhastighet lik 0.15 m/s.

### 6.3.5 Oppsummering

Figur 32 viser skjørtdeformasjon for de mest interessante simuleringskonfigurasjonene. Her er maksimum skjørtdeformasjon valgt ettersom dette antas å ha størst betydning for hvor mye lus som kan passere skjørtet og inn i merden. Simuleringsresultatene indikerer at bruk av line mellom skjørt og bunnring gir minst og jevnest deformasjon av skjørtet.

### Maks. skjørtdeformasjon enkeltnode



**Figur 32** Maksimum skjørtdeformasjon for utvalgte case.

## 7 Diskusjon

### 7.1 Validering av modellen

I hovedsak viser valideringsresultatene at dragkreftene for skjørtet og skjørtdeformasjonen ble overestimert i FhSim i forhold til modellforsøkene i Hirtshals. Årsakene til dette er sammensatte.

Resultatene fra simuleringene viste at skjørtdeformasjonen og dragkreftene ble større på nedstrøms side av skjørtet enn de var i Hirtshals-forsøket. En av årsakene til dette er at elementene i dette området utsettes for høyere strøm enn det som er tilfelle i den fysiske modellen. Halvdelen av skjørtet på nedstrøms side står i skyggen av halvdelen på oppstrøms side. Denne skyggeeffekten er en del av modellverket som skjørt- og notmodellen er basert på. En begrensning er at skyggeeffektmodellen er utviklet med tanke på notlin, som har langt lavere soliditet enn skjørtet. For skjørtet førte dette til en overestimering av skyggeeffekten, og både dragkreftene og deformasjonen på nedstrøms side ble tilnærmet lik null. Skyggeeffekten for skjørtet ble deaktivert ettersom det var ønskelig med en konservativ lastmodell i forhold til krefter og deformasjon. En tilleggsårsak til overestimering av dragkreftene kan være at det ble brukt en lastmodell for notlin hvor soliditeten var satt lik 100 %, og dette ga sannsynligvis et konservativt estimat av dragkreftene. For et bedre estimat av dragkrefter kan et alternativ være å videreutvikle lastmodellen slik at også skyggeeffekten kan benyttes for materialer med høyere soliditet.

Skjørtmodellen registrerte ikke kollisjon med de øvrige komponentene i modellen, og kontaktkreftene ble ikke modellert, og dette medfører overestimering av skjørtdeformasjonen. I FhSim vil derfor deformasjon i større grad bestemmes av loddvekten tilkoblet skjørtet. I FhSim finnes det kabel- og panelmodeller med kollisjonsdeteksjon, men disse modellene er ikke integrert i not- eller skjørtmodellen. Det vil være mulig å simulere de nevnte kontaktkreftene ved å integrere disse modellene sammen med skjørtmodellen.

Modellskjørtet som ble brukt i Hirtshals bestod av to skjørtedeler som overlappet i skjøtene, uten å være fiksert til hverandre. Skjørtdelene kunne derfor deformeres uavhengig av hverandre. I FhSim var skjørtet modellert som ett stykke, uten skjøter, og det kan antas at deformasjonen av skjørtet på sidene på tvers av strømmen, og til en viss grad på nedstrøms side, var lavere på grunn av dette.

**Selv om det var avvik mellom de fysiske forsøkene og simuleringsresultatene, vil modellen være nyttig for kvalitative og prinsipielle analyser. Den numeriske modellen vil være godt egnet til å gjøre innledende studier for å vurdere forskjellige mulige forbedringer i design.**

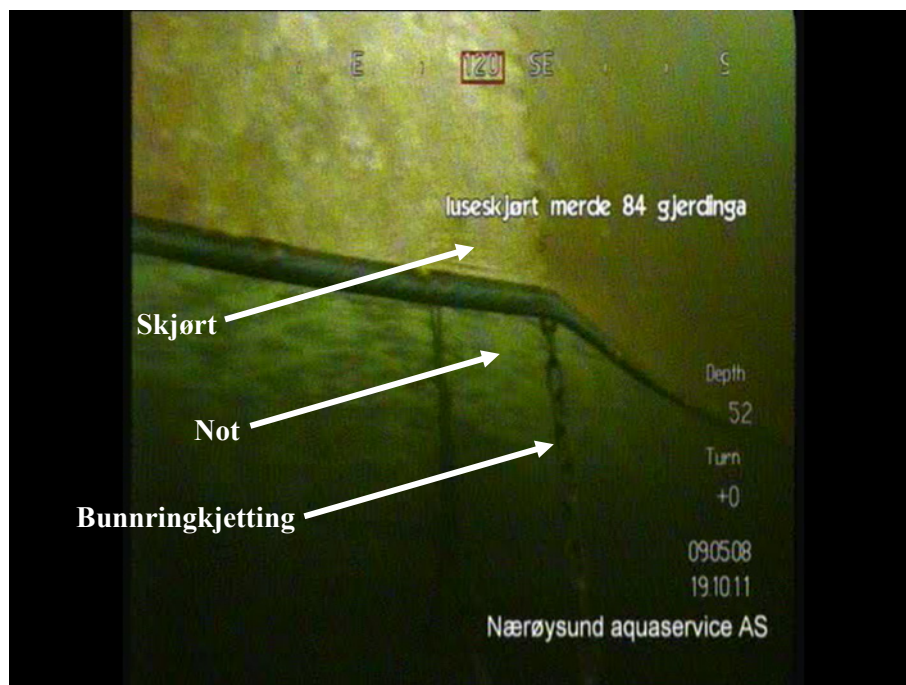
### 7.2 Modifikasjoner av skjørtløsningen

#### 7.2.1 Sammenligning av ulike loddvekter for skjørt

Simuleringsresultatene viste korrelasjon mellom nedloddingsvekt og dragkrefter/deformasjon, og større nedlodding gir mindre deformasjon og høyere dragkrefter. For en kommersiell merd i en rammefortøyning er det mange faktorer som fører til at strømbildet på opp- og nedstrøms side er mindre uniforme og ulikt forsøkene fra flumetanken, og effekten av dette vil være usikkert.

Modellforsøket i Hirtshals viste at skjørtdeformasjonen i liten grad var avhengig av loddvekten, ettersom skjørtdeformasjon på oppstrøms side ble begrenset av at skjørtet kolliderte med bunnringkjettingene. Skjørtdeformasjonen i FhSim-modellen er i større grad avhengig av loddvekten på grunn av manglende modellering av kontakt.

Med hensyn til slitasje kan bunnringkjettingene potensielt være en risiko dersom skjørte blir liggende og gnage inntil. Erfaringer fra innledende utprøvinger hos oppdrettere har for øvrig vist meget liten slitasje selv om skjortene tydelig har lagt seg inntil bunnringkjettingene på oppstrøms side (Figur 33).



**Figur 33** Skjørtet legger seg inntil bunnringkjetting på oppstrøms side under innledende utprøving ved Sinkaberg-Hansens lokalitet Gjerdinga (Foto: Nærøysund aquaservice).

### 7.2.2 Sammenligning av enkeltlodd og loddline

Resultatene indikerte at deformasjon kan reduseres ved å erstatte enkeltlodd med loddline, og at dette har størst betydning ved moderat strøm. Det som er minst like interessant å se er hvilke forbedringer loddlinen gir i de områdene hvor deformasjonen er som størst, og her kommer fordelene til loddlinen enda tydeligere frem. Loddlinen gir en jevnere nedlodding som forhindrer skjørtet i å heve seg i buer mellom innfestingspunktene for enkeltlodd. Det er derfor sannsynlig at en loddline både vil bidra til å redusere utposingsproblematikken og redusere deformasjonen.

### 7.2.3 Sammenligning av antall innfestingspunkter

Simuleringsresultatene indikerte at ved å øke antall innfestingspunkter vil utposingsproblematikken på oppstrøms side av merden reduseres. Samtidig viste resultatene at skjørtdeformasjonen var lavere for casene med mange innfestingspunkter. Dette kommer mest sannsynlig av at skjørtet står som et seil i vannet mellom punktene, og kan føre til at vann slipper inn i merden på skjørtets overside.

### 7.2.4 Sammenligning av enkeltlodd og skjørt festet i bunnring

Simuleringsresultatene indikerte at bruk av tau mellom skjørt og bunnring er et effektivt utspilingsprinsipp for skjørtet. Hvor godt systemet vil være for å hindre utposing er avhengig av hvor mange skjørtkabler som benyttes. I tillegg til at systemet gir lav deformasjon, er det også sannsynlig at dette er det mest effektive systemet for å hindre kryping og luftlommer ettersom skjørtets dybde bestemmes av bunnringens posisjon.

Simuleringene indikerer at bunnringkjettingene går over i slakk tilstand, mens skjørtkablene bærer hele vekten av bunnringen, og dette fører til høye krefter i skjørtkablene og skjørtets innfestingspunkter. For den

fysiske modellen vil bunnringkjettingen stoppe skjørtets deformasjon på forsiden av merden, og kreftene i skjørtkablene vil begrenses. På baksiden er det ingenting som stopper skjørtdeformasjonen, og det kan i spesielle tilfeller oppleves lignende scenario som vist i simuleringsscasene. I de fleste tilfeller vil sannsynligvis strømmen på baksiden være betydelig lavere enn på forsiden av merden. Som en ekstra sikkerhet kan det brukes skjørtliner med bruddstyrke som ikke overstiger det som regnes for kritiske krefter for skjørt og innfestingspunkter, dersom det oppstår unormalt høye krefter vil skjørtlinene ryke, og forhindre skade på skjørt eller øvrige merdkomponenter.

Dersom det er aktuelt å gå videre med en slik en løsning, vil det blant annet være viktig å analysere bølgekreftene, ettersom dette kan gi stor sykklisk belastning for skjørtet, og potensielle rykkklaster. Det bør vurderes å bruke en strikk eller fjær koblet i serie med skjørtlinene for å begrense rykkklaster.

Fordeler:

- Ikke nødvendig med separat nedlodning av skjørtet
- Sannsynligvis unngås problemet med luftlommer
- Sannsynligvis unngås problemet med kryping
- Sannsynligvis mer effektiv utspiling og mindre deformasjon, og dermed bedre skjerming

Ulemper:

- Kreftene i skjørtet og innfestingspunktene kan bli svært store
- Skjørtet kan i enkelte tilfeller bidra til å gi bunnringen løft og dermed øke notdeformasjonen, og det er sannsynlig at bunnringens vekt bør økes for å unngå dette problemet
- Løsningene må tilpasses slik at bunnringen fortsatt kan heves og senkes

I simuleringene er det ikke tatt hensyn til hvordan forbindelsen bør gjøres i praksis med tanke på drift og operasjon. Dette bør vurderes nøye før en eventuelt tar i bruk en slik løsning, slik at komplikasjoner med heving og senking av bunnring og skjørt, samt rask fjerning av skjørtet ved kritiske situasjoner, kan unngås. En mulighet er å trekke linen fra nedkant av skjørtet, gjennom et øye i bunnringklammer, og opp til flytekragen, hvor linen festes. Skal skjørtet fjernes raskt, kan man løsne linene på flytekragen, og skjørtet henger fritt.

For simuleringsscasene ble det brukt tau mellom skjørt og bunnring, men et enklere og like effektivt design vil være å fiksere bunnen av skjørtet direkte til bunnringkjettingen. Med en slik løsning vil bølgedynamikken i mindre grad være avhengig av bunnringen. Dersom skjørtet henges på innsiden av flyteringen kan et annet alternativ være å feste skjørtet i notstrukturen. Operasjonelt kan det være fare for stor punktbelastninger for notstrukturen når noten heves og senkes.

## 8 Konklusjon

Simuleringsmodellen i FhSim overestimerer skjørtkreftene og skjørtdeformasjonen, likevel har den vært nyttig for å sammenligne ulike modifikasjoner av skjørtløsningene. Med basis i simuleringresultatene vurderes det nedenfor hvordan de ulike modifikasjonene kan bidra til å løse utfordringene beskrevet i avsnitt 2.

Med hensyn til generell deformasjon:

Ved å utnytte bunnringen for å lodde ned skjørtet vil en kunne oppnå redusert og jevnere skjørtdeformasjon enn ved bruk av nedlodning direkte på skjørtet. Ulempen med dette systemet er at det i enkelte tilfeller kan påvirke notdeformasjon og øke belastningen på skjørtet. En mer konservativ løsning er å erstatte enkeltlodd med en loddline, noe som forventes å redusere deformasjonen.

Med hensyn til spesifikke utfordringer:

*a) Luftlommer*

Det er sannsynlig at problemet med luftlommer kan reduseres ved å øke vekten på nedloddningen av skjørtet, redusere avstanden mellom lodd eller bruke loddline. Det antas at den mest effektive løsningen er bruk av skjørtline mellom skjørt og bunnring.

*b) Krypning*

Den mest effektive løsningen er sannsynligvis bruk av skjørtline, ettersom skjørtedybden vil være gitt av bunnringens posisjon. Det er også sannsynlig at problemet med at skjørtet kryper oppover kan reduseres ved å øke vekten på nedloddningen av skjørtet.

*c) Buer*

For at skjørtet skal henge mer rett ned, slik at den effektive skjermingsflaten økes, kan antall innfestingspunkter økes for å redusere utposingsproblematikken på oppstrøms side. Dette vil også kunne redusere mengden vann som kommer inn i merden på oversiden av skjørtet. Tettere nedloddning, og eventuelt kun loddline som erstatning for enkeltlodd, vil kunne redusere skjørtdeformasjonen og skjørtet vil henge jevnere.

*d) Folder*

Utposingsproblematikken på oppstrøms side vil kunne reduseres ved å øke antall innfestingspunkter, og ha lik avstand mellom innfestingene, noe som igjen vil redusere foldene i skjørtet.

## 9 Videre arbeid

Videre anbefales det at modifikasjoner som gjelder innfestingspunkter, loddline i stedet for enkeltlodd, og alternativ nedloddning tas videre til fullskala uttesting i forbindelse med feltutprøving av Permaskjørt. Før en eventuell uttesting av liner mellom bunnring og skjørt, anbefales det å utføre videre analyse for skjørtbelastningen og hvordan skjørtet påvirker de øvrige merdkomponentene, og spesielt med fokus på bølgekrefter.

Det anbefales også å utvikle en mer realistisk lastmodell av skjørtet, samt inkludere kontaktkrefter, og dette vil være avgjørende for at dragkreftene og skjørtdeformasjon oppstrøms på merden skal kunne bli realistiske. I tillegg bør videre simuleringer inkludere bølger, og dette gjelder spesielt for casene med skjørtliner.

## 10 Referanser

Baumgarte, J., 1972. Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems. Comput. Meth. Appl. M. 1: 1-16.

Lien, A. M., Volent, Z., 2012. Rapport: Deformasjon av not og Permaskjørt og krefter på fortøyning. SINTEF Fiskeri og havbruk AS. ISBN: 978-82-14-05445-3





Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)