

STF80 A044027 – Åpen

# RAPPORT

## **Svaiforankring av oppdrettsanlegg Nye rømmingssikre merdkonsept**

Egil Lien, Jørgen R. Krokstad og Mats Augdal Heide

**SINTEF Fiskeri og havbruk AS**

Havbruksteknologi

April 2005

www.sintef.no

**SINTEF Fiskeri og havbruk AS**

Postadresse: 7465 Trondheim  
Besøksadresse:  
SINTEF, Forskningscenteret på Rotvoll  
Arkitekt Ebbellsvei 10  
7053 Ranheim

Telefon: 73 59 56 50  
Telefaks: 73 59 56 60

E-post: fish@sintef.no  
Internet: www.sintef.no

Foretaksregisteret: NO 980 478 270 MVA

# SINTEF RAPPORT

TITTEL

**Svaiforankring av oppdrettsanlegg  
Nye rømmingssikre merdkonsept**

FORFATTER(E)

**Egil Lien, Jørgen R. Krokstad og Mats Augdal Heide**

OPPDRAGSGIVER(E)

**Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfond**

RAPPORTNR. <b>STF80 A044027</b>	GRADERING <b>Åpen</b>	OPPDRAGSGIVERS REF. <b>Svein Hallbjørn Steien, ref. nr. 2002/006494</b>	
GRADER. DENNE SIDE <b>Åpen</b>	ISBN <b>82-14-03320-9</b>	PROSJEKTNR. <b>840099.42</b>	ANTALL SIDER OG BILAG <b>29</b>
ELEKTRONISK ARKIVKODE <b>STF80A044027.doc</b>	PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) <b>Jørgen R. Krokstad</b>	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) <b>Arne Fredheim</b>	
ARKIVKODE	DATO <b>2005-04-04</b>	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) <b>Jostein Storøy, forskningssjef havbruksteknologi</b>	

**SAMMENDRAG**

Rapporten inneholder en diskusjon relatert til utfordringer med svaiforankring av oppdrettsanlegg. Svaiforankring av oppdrettsanlegg er fra et styrkemessig synspunkt en ideell forankring og er spesielt gunstig ved kompleks bunntopografi. Utfordringen er at svaiforankring legger beslag på mer areal, og derfor vil være mindre egnet i trange sund, nær skipsleder osv. og at det i utgangspunktet ikke er redundans i et svaiforankringssystem.

Tilfredsstillende sikker drift av oppdrettsystemer med svaiforankring, vil kreve bedre kontroll med forankringslines tilstand enn det som er tilfelle i dag.

Dagens løsninger med slakk ankerline innebærer en risiko for at linen kan komme mellom nøtene på systemer med flere bur. Rapporten presenterer noen forslag til forbedringer som kan bidra til å redusere faren for dette problemet.

Det er også gjort vurderinger av bruk av fôrflåte koblet opp mot svaiforankrede anlegg siden integrering av praktiske grunner kan være hensiktsmessig, siden forankringen er arealkrevende.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Havbruksteknologi	Aquaculture technology
GRUPPE 2	Forankring	Mooring
EGENVALGTE	Rømming	Escape
	Laks	Salmon

## INNHALDSFORTEGNELSE

<b>Forord</b>	<b>3</b>
<b>1 Problemdefinisjon</b>	<b>4</b>
1.1 Bakgrunn	4
1.2 Sikkerhet mot linebrudd	4
1.3 Primær utfordring ved eksisterende løsninger	5
1.4 Kontakt mellom ankerline og not - en geometrisk betraktning	6
<b>2 Svaiforankring – nye løsninger</b>	<b>8</b>
2.1 Innledning	8
2.2 Passiv stramming - bunnfriksjon	8
2.3 Aktiv stramming fra merdenhet	9
2.4 Aktiv rotasjon av merder - thrusterløsning	11
2.5 Annen passiv og aktiv styring fra anlegg	12
2.6 Nødvendig overflateareal	14
2.7 Svaiforankret løsning basert på forankring inn mot fôrflåter	14
<b>3 Konseptcase: Styrkemessige betraktninger av svaiforankret stålanlegg</b>	<b>16</b>
<b>4 Konklusjon</b>	<b>18</b>
<b>5 Referanser</b>	<b>19</b>
<b>Vedlegg A - Stabilitet og sikkerhet for fôrflåter i svaiforankrede system</b>	<b>20</b>

## **Forord**

SINTEF har på oppdrag fra FHF gjennomført prosjektet ”Nye rømmingssikre merdkonsept”. Prosjektet er inndelt i flere delområder. Denne rapporten dokumenterer arbeid utført i prosjektet under delaktiviteten *Oversikt over forankringssystemer*.

Rapporten inneholder vurderinger relatert til ettpunkts forankring av merdsystemer, og det foreslås noen løsninger som kan forbedre driftsikkerheten til disse. Det er også tatt med en analyse av en eksisterende fôrflåte.

SINTEF Fiskeri og havbruk AS, Trondheim, 4. april 2005

## 1 Problemdefinisjon

### 1.1 Bakgrunn

Svaiforankring innebærer at en flytende konstruksjon forankres til havbunnen gjennom en enkelt innfesting (line, kjetting). Svaiforankring er fra et styrkemessig synspunkt en ideell forankring. Alle krefter tas opp i et punkt uansett retning på miljøkrefter. En har ingen uvirksomme liner i le. Derimot er det problematisk at man i et tradisjonelt svaiforankret anlegg ikke kan tillate linebrudd. Dette er også problematisk i forhold til Norsk Standard NS 9415 (Standard Norge 2003). På den annen side kan man imidlertid legge betydelig mer sikkerhet i en enkelt line grunnet besparelsen ved å ikke ha uvirksomme liner. Det er også mulig å duplisere linene opp til en svivel eller en samling av linene i et rotasjonspunkt.

I denne rapporten belyses sikkerheten ved oppførselen til et svaiforankret system og det diskuteres bl.a. hvilke risiki som må evalueres.

### 1.2 Sikkerhet mot linebrudd

Et normalt krav ved design av forankringssystemer er at det må aksepteres brudd i minst en tilfeldig ankerline, uten at dette medfører totalhavari av systemet. Dette er et prinsipp som kan avvikes dersom en godtar en designfilosofi med å stille krav til akseptabelt risikonivå. Dette er et kjent designkrav i andre sammenhenger, hvor sikkerheten til en konstruksjon er avhengig av en enkelt komponent. Dette omtales gjerne som en "fail safe" strategi. Et typisk risikonivå vil være at skade ikke skal skje med en sannsynlighet på  $10^{-2}$ . I tillegg vil det da stilles strengere krav til dimensjonering, dokumentasjon, beskyttelse i overflatesonen og overvåking, inspeksjon og utskifting.

En normal materialfaktor for tauverk er satt til 3.0 og lastfaktor på 1.15 eller 1.6 avhengig av beregningsmetode for ubemannede anlegg (NS 9415). Dette tilsvarer en sikkerhetsfaktor på 3.5 eller 4.8. En økning av sikkerhetsfaktoren til eksempelvis 10 vil sikre at det aldri vil kunne forventes linebrudd fra overbelastning.

Videre vil det være av stor betydning å ivareta sikkerheten mot brudd grunnet:

- Påkjørsel av ankerliner fra båter
- Svikt i enkeltkomponenter som inngår i forankringen, herunder sjakler og eventuell strammemekanisme

En økt sikkerhet mot påkjørsel kan f.eks. forsvares med at ankomst og avgang av fôr og arbeidsbåter vil alltid foregå på leside, altså vekk fra ankerlinen

En økt sikkerhet på komponentnivå kan ivaretas ved bruk av sikrere komponenter og inspeksjonssystemer, eksempelvis:

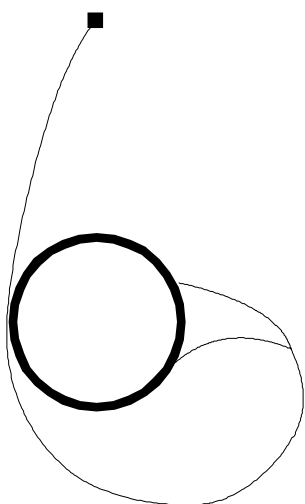
- Strengere krav til sveising av kauser
- Sjakler bør sikres uten bruk av låsepinne. Et krav kan være at låsemutter sveises fast
- Kortere inspeksjonsintervaller
- Overvåking v.h.a. optiske fibersystemer

### 1.3 Primær utfordring ved eksisterende løsninger

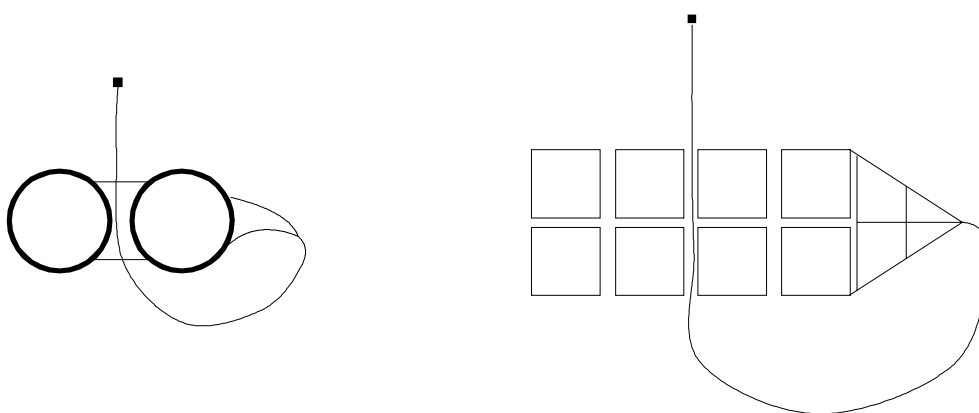
Svaiforankringssystemer har vært utlagt, testet og drevet i mindre antall de senere år. Spesielt kan nevnes et system levert av Frøyaringen AS (nå Aqualine AS), som består av en vertikal forankring med stor oppdriftsbøye i kombinasjon med stag ut fra merdene.

Disse forankringssystemene har meget stor visning (stor linevinkel i forhold til horisontalplanet), lite l/d (linelengde/dybde) forhold, og har sine begrensninger med hensyn på dybde og strømforhold.

Ved bruk av en svaiforankring må det skilles mellom systemer med en og flere merder. Med et ettburs anlegg kan en lage enklere løsninger som forhindrer låsing av systemet (figur 1), mens en med flere merder må unngå at det oppstår en situasjon hvor ankerlina kommer inn mellom nøtene. Dette er illustrert i figur 2.

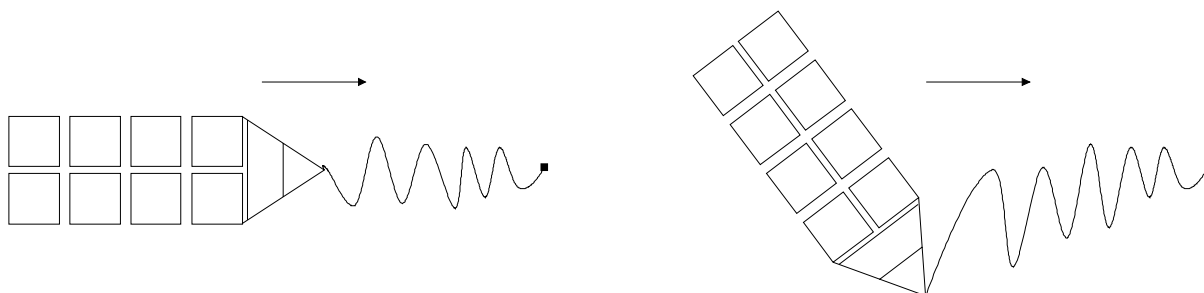


Figur 1. Med kun en merd i systemet unngås muligheten for at "låst" situasjon kan oppstå.



Figur 2. En situasjon for to burs plastanlegg og et 8 burs stålanlegg, hvor en ankerline kommer mellom merdene (dvs. låsing).

Dersom en benytter en tradisjonell svaiforankring må det påregnes at slike situasjoner vil kunne oppstå. Problemet kan være størst på lokaliteter med periodevis stille vann, eksempelvis på en lokalitet med tidevannsendring av strømretningen. Over en 10 års periode vil en kunne få i størrelsesorden 14000 stilleperioder hvor strømmen snur. Selv om systemet ved normale forhold vil dreie med stram ankerline, vil det alltid kunne oppstå forhold med en ugunstig kombinasjon av vind og bølger som vil kunne gi en situasjon hvor ankerlina kommer inn mellom nøtene (figur 3). Konsekvensen vil kunne bli at nøter rives i stykker.



Figur 3. Mulige problemer ved avdrift over forankring for merdanlegg med flere nøter/bur.

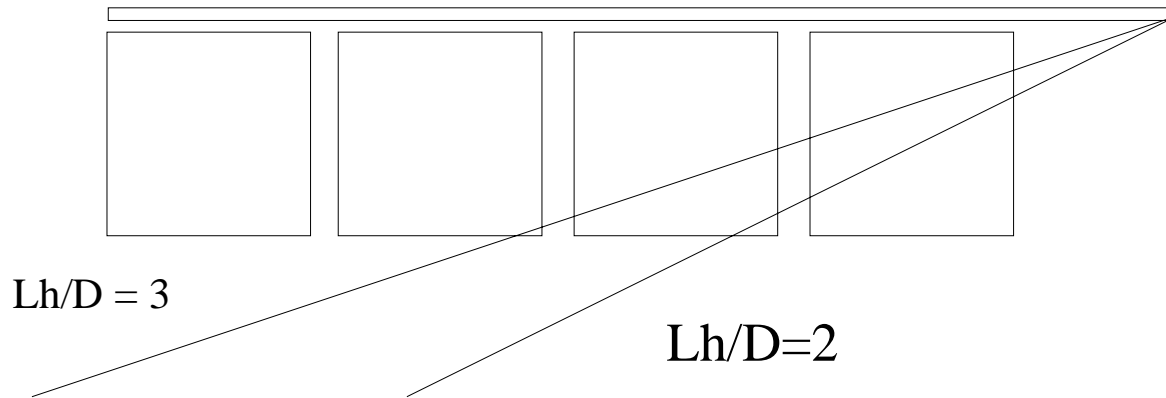
Ved bruk av ei enkelt merd vil situasjonen lite sannsynlig oppstå. Her vil alltid merden ”rulles ut”. En må imidlertid unngå bruk av tradisjonelle bunnlodd, for at ikke låsing skal kunne oppstå også her. Alternative løsninger, eksempelvis bunnring vil være meget godt egnet. Det er også vesentlig å ha et arrangement på bunnen av nota som sikrer at forankringslina ikke henger seg fast.

#### 1.4 Kontakt mellom ankerline og not - en geometrisk betraktning

Det er flere måter å redusere risikoen for at en situasjon med kontakt mellom ankerline og not i et svaiforankret system kan oppstå. I prinsippet ønsker en å sikre en kontrollert dreining av enheten.

Som nevnt ovenfor, vil en sentral problemstilling være anleggets oppførsel i en stille periode. Ved eksempelvis 100m dyp og en lengde/dybdeforhold på 3 vil anlegget kunne drive 5-600m før ny oppstramming skjer. Dette medfører at anlegget kan ha oppnådd en betydelig hastighet når ny oppstramming skjer. Prinsipielt ønsker man derfor at ankerlina alltid skal ha en viss stramming.

Skal man unngå at ankerlina kommer i kontakt med merda, kan man eventuelt benytte en stor avstand fra merd til terminalpunkt. Dette er illustrert i figur 4. Som illustrasjonen viser, blir imidlertid denne avstanden så stor (i praksis 50-75m) at det blir en meget lang og dyr konstruksjon.



*Figur 4. Geometrisk betraktning for ugunstig tilfelle der anlegg driver over forankring. Ved  $Lh/D$ -forhold på 3 må altså de to merdene til høyre tas vekk for å unngå konflikter med forankring.*



## 2 Svaiforankring – nye løsninger

### 2.1 Innledning

Mulige forbedringer som kan øke sikkerheten mot kontakt mellom ankerline og not og reduksjon av muligheten for at ankerliner kommer inn mellom nøtene, blir presentert i dette kapitlet.

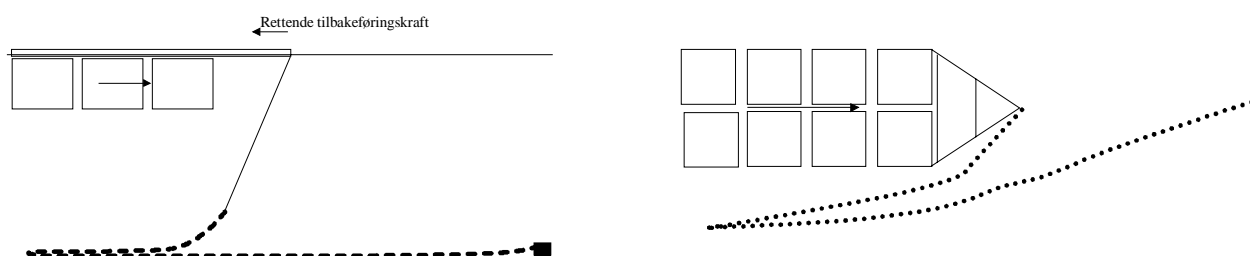
For å unngå at forankring kommer i konflikt med nøter, kan generelt to metoder benyttes:

1. Passiv dreining av enheten på et tidlig tidspunkt slik at man unngår slakke i forankringslina.
2. Aktiv dreining av enheten ved bruk av mekanisk fremdriftsenhet

Passiv dreining vil også skje ved en normal slakk forankring. Problemet er at en ikke vil få et rettende moment før anlegget har drevet langt tilbake over forankringspunktet. Ved å innføre et rettende moment på et langt tidligere tidspunkt, vil sannsynligheten for at anlegget dreier seg rundt være langt større. Dersom en forankring som alltid opprettholdt et visst strekk i ankerlina kunne innføres, vil perioden, dvs. tiden for å snu anlegget bli langt større.

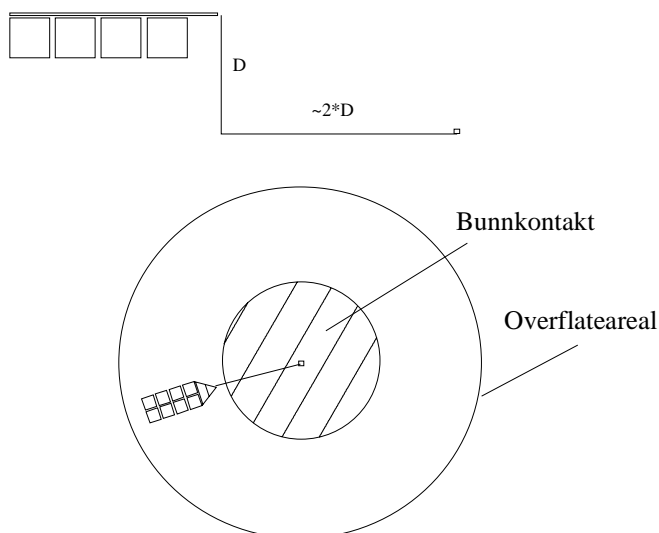
### 2.2 Passiv stramming - bunnfriksjon

Dersom bunntopografien tillater det vil den enkleste metoden for å stramme forankringen være å utnytte bunnfriksjon. Dersom det benyttes en tung kjetting, evt. i kombinasjon med ekstra bunnlodd vil en tidlig tilbakeføringskraft kunne oppnås, og således et rettende moment (Figur 5).



Figur 5. Løsning for bunnfriksjon forankringsløsning. Kjetting innfører tilbakeføringskraft på anlegget på et tidlig tidspunkt.

Fordelen med dette systemet er at det er meget enkelt. Systemet vil imidlertid kunne brukes kun på et fåtall lokaliteter i Norge. Løsningen krever bunnforhold som gjør at kjettingen ikke henger seg fast. Vekt, lengde og tyngde av kjettingsegmentet må tilpasses slik at visningen ikke blir for liten. Med en tung kjetting som tillates å bli dratt over et stort område, vil bunnen over et relativt stort område skrapes ren (figur 6). Dermed stilles det spørsmål ved om løsningen bør benyttes av miljøhensyn.



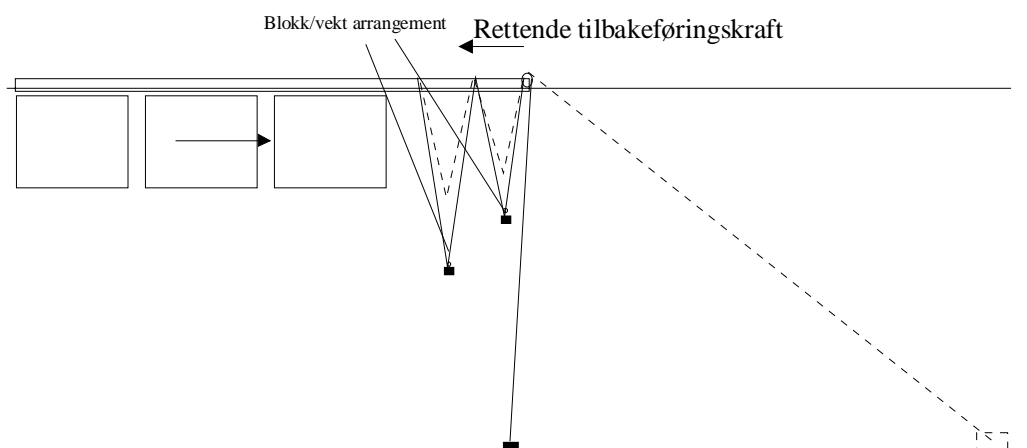
Figur 6. Arealbehov for svaiforankret system. Et slikt system med bunnkjetting vil oppta et betydelig overflateareal, og et større bunnareal vil bli skrappt rent.

### 2.3 Aktiv stramming fra merdenhet

Prinsipielt innfører denne løsningen enhet(er) på oppdrettsanlegget som alltid holder forankringen stram, ved å aktivt stramme inn overskytende forankringsline. Også med denne løsningen er primær hensikt å innføre tilbakeføringskraft på et tidlig tidspunkt for å sikre at systemet snus i tide. Flere løsninger vil være mulige, og i denne rapporten presenteres to konseptuelt forskjellige løsningsforslag.

#### 1) Gravitasjonsløsning

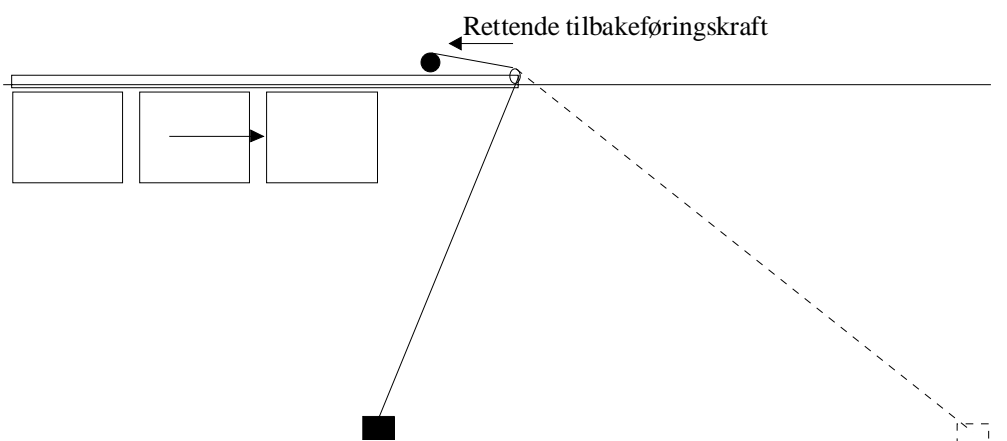
En gravitasjonsløsning er sannsynligvis den enkleste løsningen. I Figur 7 er illustrert en løsning som holder forankringen stram ved hjelp av loddvekter, som via trinser på merdanlegget kan trekke inn overskuddsline. Det vil sannsynligvis trenge tunge lodd for å få en tilfredsstillende funksjon. Dette vil igjen ha konsekvens for nødvendig oppdriftskapasitet på merdanlegget.



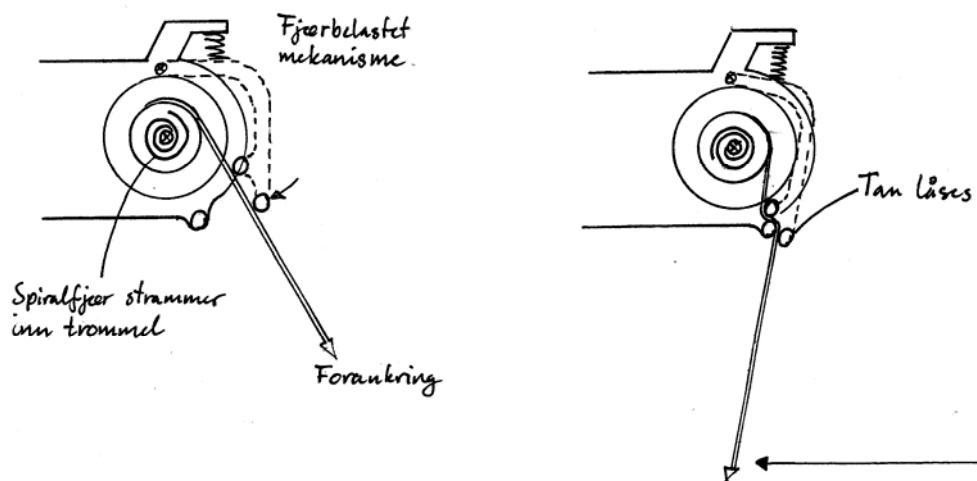
Figur 7. Loddarrangement prinsipp for oppstramming av forankring.

## 2) Vinsjarrangement

I figur 8 og 9 illustreres en løsning der en vinsjanordning montert på merdsystemet strammer inn overskuddsline. Ved å benytte en aktiv vinsj kan det innføres et låsesystem som beholder et høyt strekk dersom anlegget ligger over ankerpunktet, dvs. at lina kun slippes løs dersom anlegget har dreid rundt. En slik løsning vil imidlertid kunne medføre vesentlig løftkraft på anker. Løsningen bør derfor også inneholde en anordning som slipper ut line dersom vertikal kraftkomponent blir for stor.



Figur 8. Vinsjarrangement prinsipp for oppstramming av forankring.



Figur 9. Mulig detaljløsning for vinsjenhet med låsing av line.

## 2.4 Aktiv rotasjon av merder - thrusterløsning

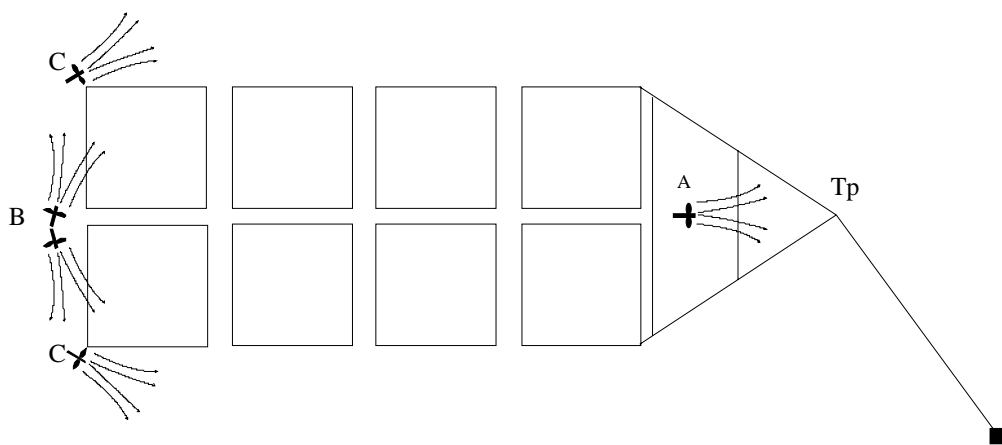
Ved å opprettholde et konstant drag i forankringslina vil en unngå situasjoner hvor ankerlina overkjøres. I en normaltilstand vil det alltid være et visst drag. "Stille perioder" vil stort sett være når tidevannet snur og i enkelte tilfeller ved oppopperende vind og strømretning. I en stille periode vil det med andre ord være tilnærmet null ytre krefter som virker på anlegget.

Ved bruk av aktive thruster kan det i prinsippet oppnås to kraftbidrag:

- En aksial kraft for å oppnå strekk i ankerlina
- Et dreierende moment for å svinge anlegget rundt i riktig retning

En akterover rettende kraft er vanskelig å oppnå (figur 10). Dersom en aktiv thruster plasseres på frontseksjonen (punkt A), vil stor reverserende kraft oppnås da propellstrålen ikke kommer i konflikt med nøtene. En slik posisjon vil derimot gi et lite moment da avstanden mellom propell og terminalpunkt blir liten.

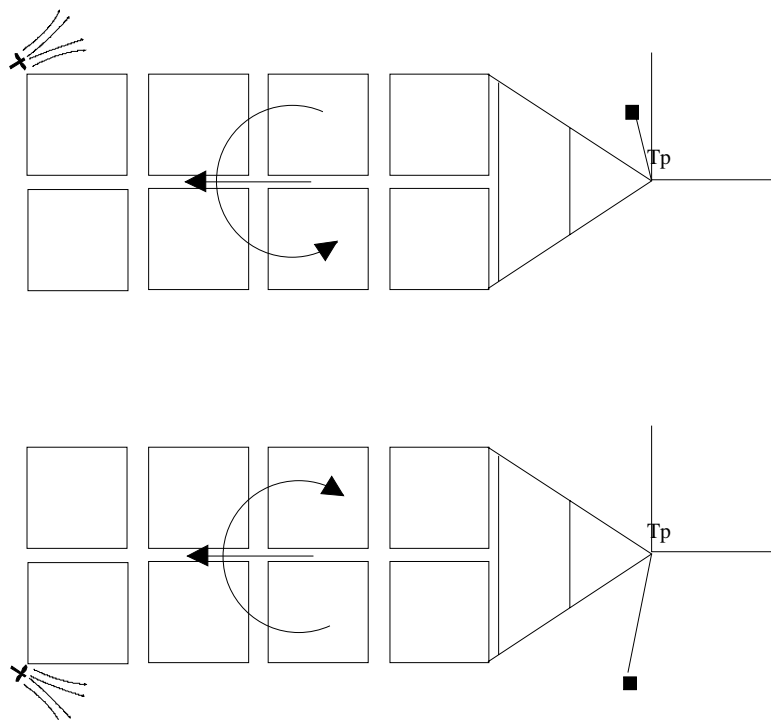
Festes derimot thrusteren ved B, vil et stort dreiemoment oppnås, men den reverserende kraftkomponenten blir begrenset av propellstrålens konflikt med nøtene. Propellens avstand fra nota blir her avgjørende. To thrustere plassert i akre hjørne, C, vil være gunstigste plassering med hensyn på skyv og momentvirkning.



Figur 10. Alternative plasseringer av aktive thrustersystemer.

En styring av dreieretning, momentretning, bør være koplet til linetrekking i terminalpunktet Tp.

En styring av thruster-retning, moment, kan gjerne koples inn mot drag-retningen på ankerlina ved terminalpunktet, Tp (figur 11). I utgangspunktet vil thrusterne kun aktiveres dersom det oppstår risiko for at anlegget glir over ankerlina. Det burde kunne gjøres ved en ren mekanisk aktivering av thruster som funksjon av orienteringen av ankerlina. Den mekaniske aktiveringen vil være avhengig av at systemet er utstyrt med et system hvor slakke på ankerlina trekkes inn (kapittel 2.3).



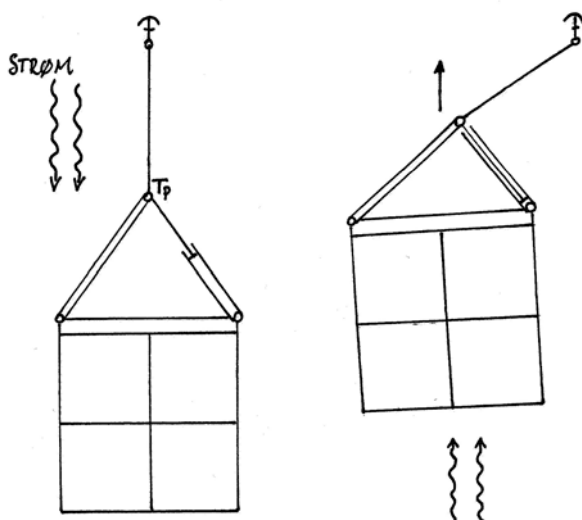
Figur 11. Momentretning tilpasses retning på ankerlina.

## 2.5 Annen passiv og aktiv styring fra anlegg

I dette delkapitlet presenteres to andre alternative løsninger som kan være med på å styre merdenhetene utenom forankringsline. Løsningene kan muligens fungere alene, alternativt i kombinasjon med andre.

### 1) Flyttbart terminalpunkt ( $T_p$ )

I forkant av merdsystem festes forankring inn via to stag (Figur 12). Dersom ett eller begge stagene fungerer teleskopisk slik at de kan trykkes sammen, kan terminalpunktet  $T_p$  flyttes. Med dette flyttes angrepspunktet for forankringen, og en kan få introdusert en rotasjon av merdsystemet.

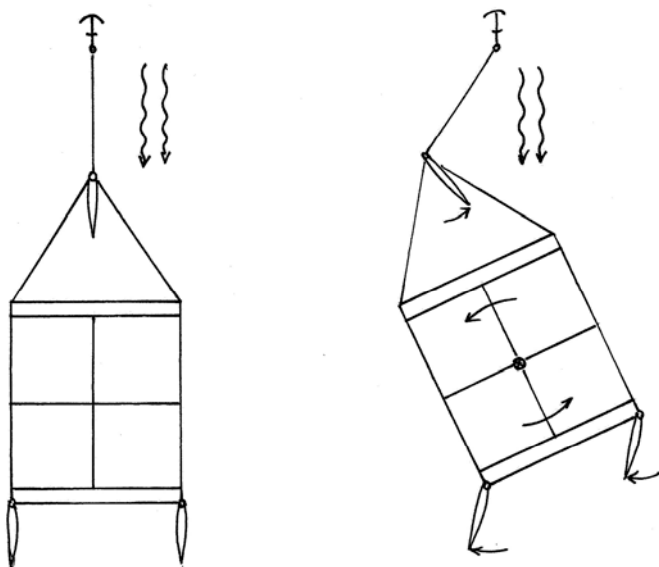


Figur 12. Et teleskopisk stag i forkant av merdsystemet kan flytte forankringens angrepspunkt  $T_p$ .

Denne løsningen kan være enten passiv eller aktiv. I passiv modus flyttes  $T_p$  ved at påkjente krefter bidrar til å trykke sammen eller dra ut den teleskopiske staven. I aktiv modus flyttes  $T_p$  aktivt ved hjelp av hydraulikk e.l., og styres av et intelligent system som logger merdsystemets posisjon i forhold til forankring.

## 2) Ror montert på merdanlegg

I Figur 13 vises en mulig løsning der et antall ror er montert på merdsystemet. Ved å manipulere vinkel på rorene kan merdsystemet flyttes og roteres relativt til forankring. Funksjonen til denne løsningen forutsetter en relativ vannstrøm i forhold til merdsystemet. Løsningen vil videre kreve et intelligent styringssystem som bestemmer vinkel på rorene i forhold til ankerlines posisjon. Det er ikke gjort vurderinger på hvilke størrelser på ror, vannhastighet mv. som må til for at løsningen skal fungere effektivt.



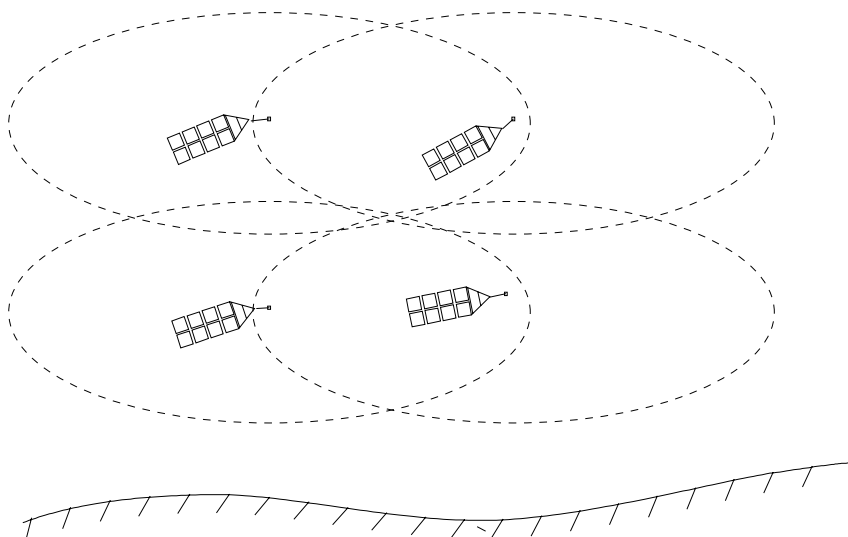
Figur 13. Ror kan flytte og rotere merdanlegget relativt til forankring.

## 2.6 Nødvendig overflateareal

I prinsippet kan et svaiforankret anlegg dreie rundt 360 grader. I et fjordsystem eller nært land vil et slakt forankret anlegg (figur 5), enten det benyttes bunnkjetting eller lettere tau uten etterstramming, oppta betydelig større areal enn et system med stramming (figur 8).

Er derimot bunntopografien slik at man har en dominerende strømretning, mens vindrosen kan sies å gå 360 grader, vil maksimalt utsving i et etterstrammet system kunne beskrives av en tilnærmet elliptisk omhyllingskurve. Med et system for etterstramming kan anlegg derfor plasseres rimelig tett. Dette er illustrert i figur 14.

Har anleggene noe forskjellig utforming, eller varierende antall merder, størrelse, begroing, etc. kan en ikke forutsette at de beveger seg likt i forhold til miljøbelastningen. Vind og strøm vil ha forskjellig effekt alt etter anleggenes uforming og tilstand. I ekstreme tilstander med stor vind og strømhastighet vil anleggene mer eller mindre legge seg på linje.



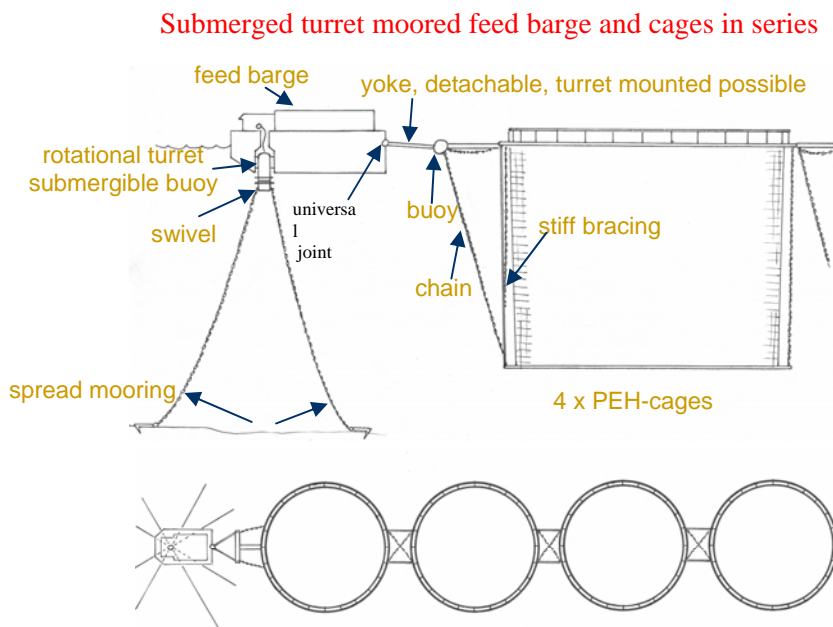
Figur 14. Arealbehov ved plassering av flere svaiforankrede anlegg. Ved bruk av strammemekanismer kan anlegg sannsynligvis plasseres tettere sammen.

## 2.7 Svaiforankret løsning basert på forankring inn mot fôrflåter

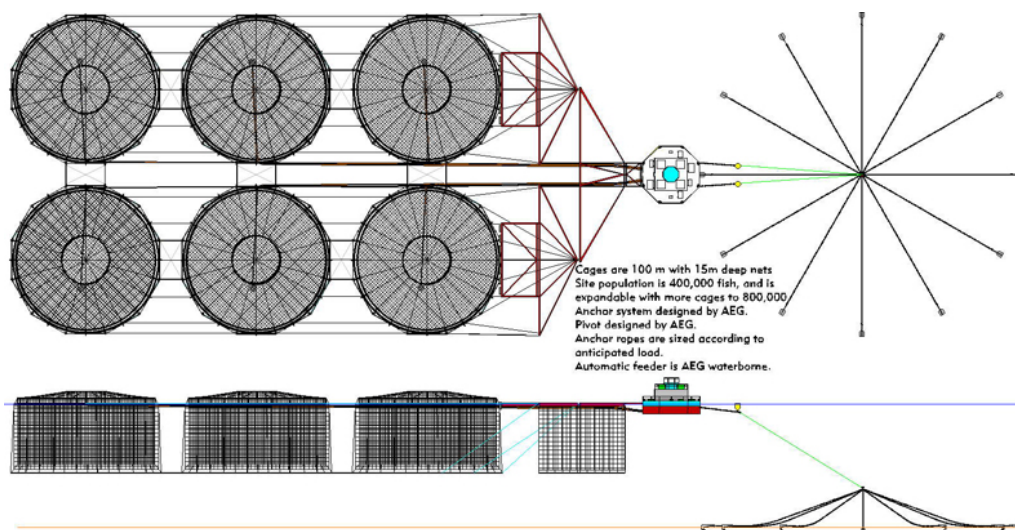
Siden et svaiforankret anlegg beveger seg i en stor sirkel over et stort flateareal er det vanskelig å benytte en fast forankret fôrflåte. Ved å gå ut i fra at man kan betrakte fôrflåten som "fail safe", er det allerede testet ut konsepter som baserer seg på svaiforankring inn mot fôrflåten.

I figur 15 presenteres eksempel på ett konsept som baserer seg på å legge en svivel inn i en fôrflåte og spre ankerbelastningen fra svivelen på fire liner som er lagt symmetrisk. Videre i figur 16 er det presentert et konsept som også baserer seg på bruk av svivel, men hvor forankringa gjøres ved hjelp av tre liner til en ankerline som fordeler og spres kreftene videre. Det siste konseptet har den ulempen at armen fra svivelen til nøtene må være lang hvis en skal unngå fare for sammenstøt mellom liner og nøter.

Konseptet i figur 16 er spesielt tilpasset kravet til enkel og rask fra og oppkobling. Dette er spesielt aktuelt i fjorder som kan ise igjen eller bli utsatt for farlige alger eller maneter.



Figur 15. Ett-punkts forankret fôrflåte med svivel og rekke av PEH merder.



Figur 16. Ett-punkts forankret fôrflåte og system av PEH merder. (Aquaculture Engineering Group, Canada)

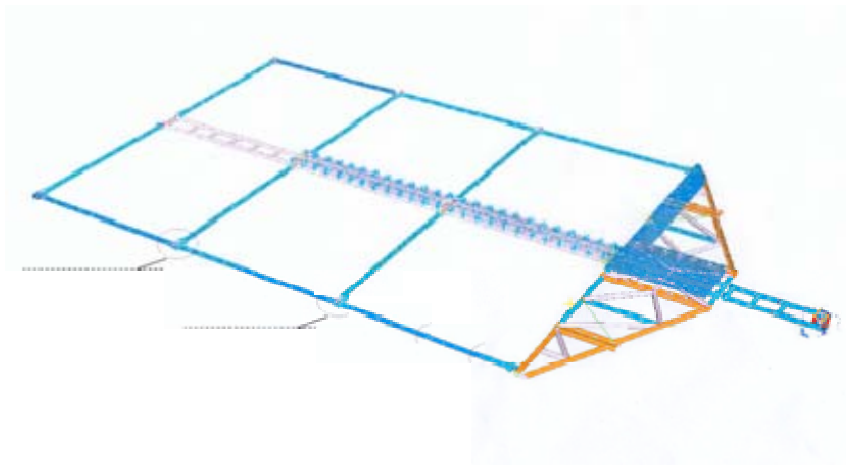
Fôrflåter anbefales normalt å forankres separat fra merdenes flytekrage, for at ikke et eventuelt havari av fôrflåten skal føre til at hele anlegget havarerer. Bakgrunnen for denne praksisen er at man ikke ønsker interaksjon mellom to komponenter med ofte store forskjeller i last- og bevegelseskaraktistikk, og ønsket om å redusere risiko for rømming ved å redusere kompleksiteten i systemet.

En gjennomgang av sjødyktigheten til en fôrflåte er gjengitt i vedlegg 1.



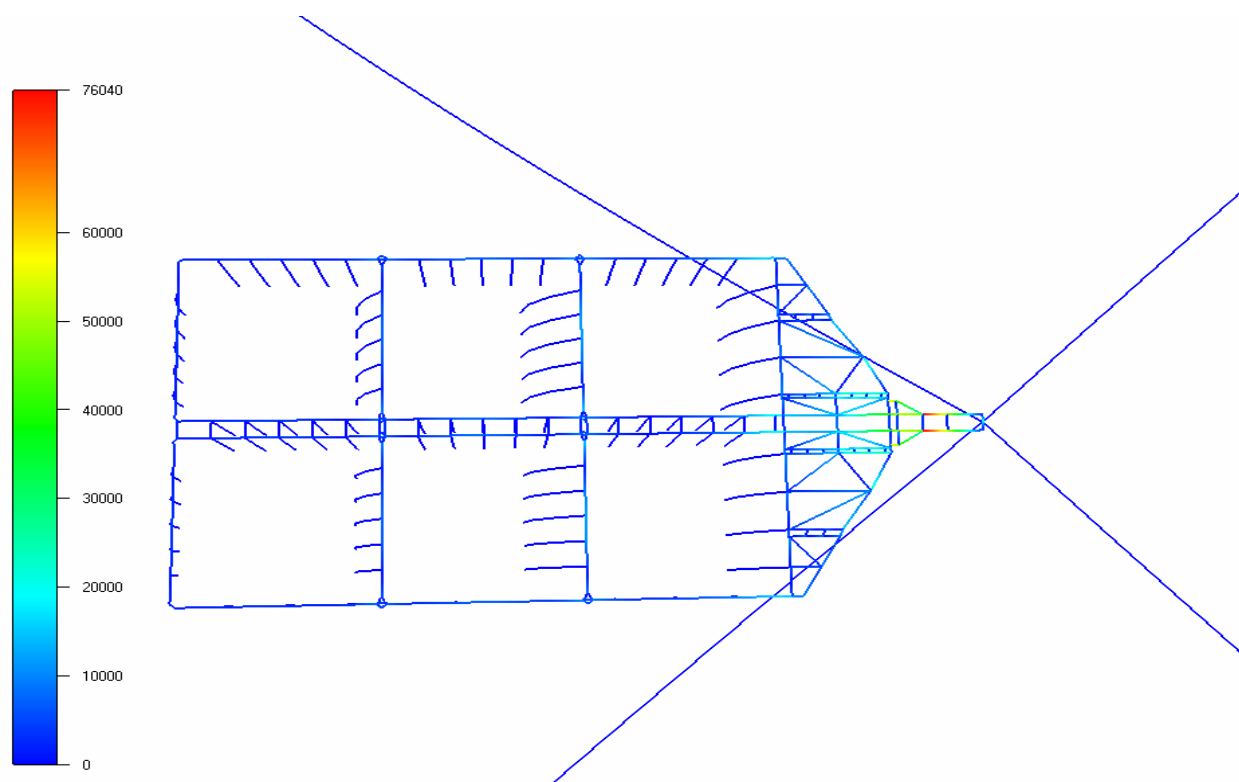
### 3 Konseptcase: Styrkemessige betraktninger av svaiforankret stålanlegg

En presentasjon av typiske styrkemessige belastninger i et svaiforankret system er angitt nedenfor. Anlegget består av 6 bur med dimensjon 25x25 meter og antatt 15-18 meters dypgang på nøtene. Anlegget er vist i figur 19. En har antatt at det brukes 4 liner inn mot svivelen. Kollisjonsfaren og eventuell tiltak for å unngå dette må evalueres nøye.

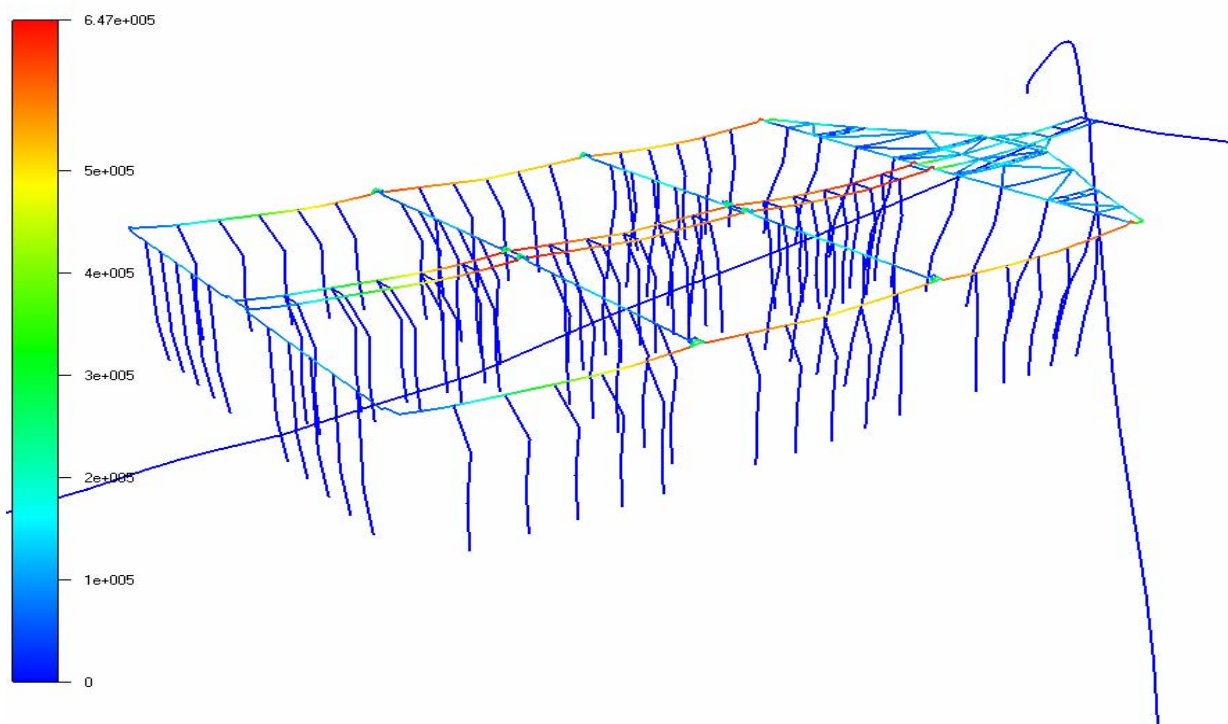


*Figur 19. Stålanlegg. Svaiforankring med svivel. Dimensjon 6x25x25 notbur.*

Resultatene i figur 20 og 21 viser at et svaiforankret stålanlegg vil ta de fleste av kreftene i snutepartiet inn mot svivelen. Dynamiske krefter vil derimot forplante seg over hele anlegget og i dette tilfellet er disse kreftene mindre enn de statiske kreftene. De fordeler seg også mot andre deler av konstruksjonen enn i baugpartiet. Totalt vil derfor de styrkemessige fordelene ved anlegget være betydelige. Videre vil kompleks topografi ikke ha betydning for dimensjonering av flyteren.



Figur 20. Stålanlegg. Plott av statisk bøyemoment i Nm med anlegget belastet av 0.25 m/s strøm alene. Maksimum moment ca. 76 kNm men i baugen er momentene noe lavere.



Figur 21. Stålanlegg. Plott av dynamisk bøyemoment i Nm med anlegget belastet av 3.0 meter regulær bølge ved 7.0 sec. Maksimum moment ca. 65 kNm. Maksimale forskyvninger er vist relativt til statisk geometri.

## 4 Konklusjon

Norge har generelt mye kompleks bunntopografi, noe som gjør bruk av svaiforankrede oppdrettssystemer til en tiltalende løsning. Videre vil et slikt oppdrettssystem kunne bevege seg over et større område, som gjør at forurensninger fra oppdrettsvirksomheten spres. Utfordringen er at svaiforankring legger beslag på mer areal, og derfor vil være mindre egnet i trange sund, nær skipsleder osv. og at det i utgangspunktet ikke er redundans i et svaiforankringssystem.

SINTEF Fiskeri og havbruk mener at en tilfredsstillende sikker drift av oppdrettssystemer med svaiforankring vil kreve bedre kontroll med forankringsliners tilstand enn det som er tilfelle i dag. Noen mulige løsninger kan bidra til dette er foreslått.

Følgende punkter oppsummerer de viktigste momentene som er presentert:

- Svaiforankring bør ikke benyttes i et anlegg med flere nøter, uten metoder for å kontrollere at ankertauet ikke kommer mellom nøtene. Selv om sannsynligheten er relativt liten, er konsekvensen for stor til at en "normal" slakk ankerline kan benyttes.
- Et anlegg med flere nøter bør som et minimumskrav være utstyrt med et aktivt/passivt inntrekkingssystem for ankerlinene.
- Av de foreslåtte løsningene vil en passiv løsning basert på bunnfriksjon kunne benyttes kun på et fåtall lokaliteter. Aktiv stramming av forankringsline på merdenhet er i prinsippet uavhengig av bunntopografien, og vil kunne innføres der svaiforankring benyttes i dag.
- Et aktivt system basert på thrustere vil kreve tilgang på elektrisitet på oppdrettssystemet, samt en automatisk løsning for aktivisering av systemet. Dette vil sannsynligvis være den mest kostbare løsningen.
- Det er fullt mulig å legge en fôrflåte som en integrert del av et roterende svaiforankringssystem. Fôrflåten må i så fall oppfylle strenge krav til sjødyktighet for å kunne integreres.

## 5 Referanser

STANDARD NORGE (2003). Flytende oppdrettsanlegg. Krav til utforming, dimensjonering, utførelse, installasjon og drift. NORSK STANDARD, Standard Norge AS. **NS 9415**.

## Vedlegg A

### 1 Stabilitet og sikkerhet for fôrflåter i svaiforankrede system

#### 1.1 Innledning

Fôrflåter anbefales normalt forankret separat fra merdenes flytekrage, for at ikke et eventuelt havari av fôrfåten skal føre til at hele anlegget havarerer. Bakgrunnen for denne praksisen er at man ikke ønsker interaksjon mellom to komponenter med ofte stor forskjell i last- og bevegelseskarakteristikk og redusere risiko for rømming ved å redusere kompleksiteten i systemet.

I denne rapporten forutsettes at en fôrflåte skal kunne designes minst like sjødyktig som et forankret anlegg i seg selv. P.g.a. begrensninger i lengder på fôrslanger, kan det være ønskelig også rent driftsmessig å koble flåten sammen med resten av anlegget. I uvær kan også fôrflåten ofte være en naturlig enhet personalet oppholder seg på. Som et resultat av dette har vi gått i gjennom en analyse av en eksempelflåte som like gjerne kan være basisen for et svaiforankret system. Det forutsetter derimot modifikasjoner av flåten som angitt i hovedrapportens kapittel 2.7.

Studien bidrar til å bedre krav til dokumentasjonsunderlaget og derigjennom totalsikkerhet for havbruksflåter. Arbeidet er konsentrert opp mot stabilitets- og fribordskrav gitt av ny norsk standard for flytende oppdrettsanlegg, (STANDARD NORGE 2003). Ved hjelp av en anonym eksempelflåte har vi vurdert stabilitet, hydrodynamikk og sikkerhetskrav for havbruksflåter opp mot eksponeringsgrad.

Følgende aktiviteter ble prioritert i dette studiet:

- Hydrostatisk stabilitetsanalyse av en typisk fôrflåte i operasjon (lastet) og skadet tilstand. En eksempelflåte av stål er valgt. Tilgjengelig dokumentasjon av flåtedata var avgjørende for valg.
- Hydrodynamisk analyse av samme konstruksjon med vekt på bevegelser, akselerasjoner og sannsynlighet for overslag av vann ved forskjellig eksponeringsgrad.
- Evaluering av resultater fra hydrostatisk og hydrodynamisk analyse.
- Arbeidet baseres på nye krav dokumentert i standard NS9415

I NS9415 er eksponeringsklasse til en fôrflåte bare knyttet til fribordsformelen. Standarden inkluderer ingen andre kriterier for vurdering av sikkerhetsnivået til en fôrflåte i høye og steile bølger. På grunn av denne mangelen har en spesielt lagt vekt på sikkerhetsaspekter som funksjon av bølgeeksponeringsgrad.

Det ble valgt en eksisterende flåte for å effektivisere arbeidet med modellering og beregninger. Resultatene fra beregningene for flåten skulle så danne grunnlag for diskusjon rundt sikkerhetskravene representert i NS9415. Studiet ble avgrenset til en ståflåte. Et sammenligningsstudie med en betongflåte bør også utføres. Ikke minst fordi fribordet på slike vil kunne være mindre og overbygget mer utsatt for vanninntregning.

Rapporten beskriver resultater fra den hydrodynamiske analysen. Påliteligheten av resultatene blir også diskutert siden noen hydrodynamiske størrelser kan være vanskelig å estimere med stor grad av sikkerhet uten verifikasjon ved hjelp av modellforsøk.

I løpet av studiet har SINTEF også vært i kontakt med engineeringsselskap for å diskutere påliteligheten av beregningen for overslag av vann. I tillegg er MARINTEK kontaktet for å diskutere diffraksjonsanalyser opp i mot modellforsøk med lekterkonstruksjoner.

## 1.2 Beregningsverktøy

For hydrostatiske beregninger er analyseverktøyet *Shipshape* benyttet, et integrert dataverktøy for design og hydrostatikk/stabilitetsberegninger. Systemet er utviklet ved MARINTEK. All videreutvikling og vedlikehold gjøres nå av LODIC AS.

Systemet er spesielt tiltenkt tidligdesign studier og er bygget opp rundt en topologisk definisjon av skrog, intern og ekstern struktur. Verktøyet gjør alle nødvendige beregninger for intakt- og skadestabilitet knyttet til de lastkondisjoner som er definert. Det er basert på anerkjente og godt dokumenterte beregningsmetodikker.

For beregning av hydrodynamiske transferfunksjoner ble et 3-D diffraksjonsprogram (kilde-sluk) program *WAMIT 6.2* brukt. Programmet er utviklet ved MIT og er ansett som det mest veldokumenterte hydrodynamikkprogram for storvolumkonstruksjoner. Med storvolum menes legemer som har en karakteristisk dimensjon større enn 1/5 av bølgelengden. Programmet beregner transferfunksjoner (antatt enhets bølgeamplitude som input) for blant annet 1.ordens bevegelser, diffraktert bølge i nærheten av flåten og andre hydrodynamiske størrelser.

I *WAMIT* beskrives undervannskroget (overflaten) med flateelementer. Som elementnettgenerator til *WAMIT* brukes *Multisurf*.

For å kunne regne om bevegelsene fra transferfunksjoner til RMS (Root Mean Square) verdier og maksimal verdier for flåten ut i fra en gitt input irregulær sjøtilstand brukes simuleringsprogrammet *SIMO*. *SIMO* regner blant annet globale bevegelser, akselerasjoner og diffrakterte bølger i en gitt irregulær bølgesjøtilstand.

Et eget regneprogram, *Relextreme*, ble utviklet for å beregne overslag av bølger over fribordet v.h.a globale bevegelsestidserier, antatt stivlegeme translasjon og diffraktert bølge. *SIMO* manglet infrastruktur for denne beregningen.

Fordi *WAMIT* er potensialteori er det nødvendig å estimere viskøs demping i rull og stamp og å legge det inn som lineærisert viskøs demping fra input.

## 1.3 Hydrostatisk modellering av fôrflåten

Det er tatt utgangspunkt i en moderne fôrflåte med følgende hoveddimensjoner:

$L_{pp}$	=	32.2 meter (lengde mellom perpendikulærer)
$B$	=	12.9 meter (bredde)
$D$	=	3.1 meter (dekkshøyde over kjøll)

## 1.4 Oversikt over lastkondisjonene

1. Lettskip (ingen last, bemanning eller utrustning)
2. Lettskip m/tanker (fulle tanker ellers ingen last, bemanning eller utrustning)
3. Fulle siloer (fullt lastet med bemanning og utrustning)
4. Halvfulle siloer (siloene halvt lastet ellers fulle tanker, bemanning og utrustning)
5. Skadet maskinrom (som kondisjon 3, men i en situasjon der maskinrom er fylt med vann som følge av vann inntrengning gjennom garasjeport og ned leder)
6. Forventet misbruk (som kondisjon 3, men med ekstra last på dekk og truck plassert i et hjørne og fylling av aktre void som følge av skade fra påkjørsel)

## 1.5 Stabilitetsberegninger

En sammenfatning av beregningsresultatene er gitt i Tabell 1.

Tabell 1. Oppsummering av stabilitetsberegninger fra lastkondisjonene.

	Kond. 1	Kond. 2	Kond. 3	Kond. 4	Kond. 5	Kond. 6
Draught at LPP/2 (m)	0.400	0.509	1.169	0.847	1.655	1.676
Draught at AP (m)	0.392	0.475	1.134	0.813	1.680	2.755
Draught at FP (m)	0.407	0.543	1.203	0.881	1.631	0.597
Trim over LPP (m)	-0.015	-0.068	-0.069	-0.068	0.049	2.157
Heel angle (St.b. +) (deg.)	0.000	0.315	0.378	0.338	0.095	0.328
Water density (tonnes/m <sup>3</sup> )	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025
Displacement (tonnes)	170.000	216.620	499.019	361.319	707.227	716.062
LCB (rel. to midship) (m)	0.001	0.281	0.126	0.170	-0.103	-3.483
LCB (relative to AP) (m)	16.101	16.381	16.226	16.270	15.997	12.617
VCB (relative to BL) (m)	0.200	0.255	0.585	0.425	0.829	0.955
LCF (rel. to midship) (m)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
LCF (relative to AP) (m)	16.100	16.100	16.100	16.100	16.100	16.100
Immersion (tonnes/cm)	4.154	4.154	4.154	4.154	4.154	4.154
Trim mom. (tonnes*m/cm)	11.067	11.146	11.146	11.146	11.146	11.146
KG (incl. correction) (m)	2.60	2.439	3.294	2.666	2.756	2.800
Free surf. Corr. (GG') (m)	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
KGmax, intact, calc. (m)		12.700	9.581	11.811	7.074	6.160
KMT (metasentr.height) (m)	36.046	27.844	12.487	16.877	9.222	12.869
GM (incl. correction) (m)	33.446	25.404	9.193	14.211	6.465	10.068

## 1.6 Hydrodynamiske inputdata

Positiv x-akse er lagt mot baug og bølgeretninger blir definert rundt positiv z-akse pekende oppover i himmelretning. y-aksen er definert positiv mot babord side. 0-grader bølgeretning er følgende sjø og definert som bølger propagerende i positiv x-retning. 180 grader bølgeretning er motsjø. z-aksen er definert ved  $L_{pp}/2$  midtskips og i vannoverflata.

Følgende lasttilstander er analysert:

### Normal operasjon. Kondisjon nr. 3.

T	=	1.169 meter (dypgang)
F	=	1.931 meter (fribord)
M	=	497087 kg (deplasement masse)
$x_g$	=	0.12 meter (tyngdepunkt i x-retning, LCG=16.22 m)
$y_g$	=	0 meter (tyngdepunkt i y-retning)
$z_g$	=	2.12 meter (tyngdepunkt i z-retning, VCG= 3.29 m)
$r_{44}$	=	4.52 meter (treghetsradius i rull, $0.35*B$ )
$r_{55}$	=	9.66 meter (treghetsradius i stamp, $0.3* L_{pp}$ )
$r_{66}$	=	9.66 meter (treghetsradius i gir, $0.3* L_{pp}$ )
GMT	=	9.19 meter (tverrskips metasenterhøyde)

Siden treghetsradier er estimert i henhold til tyngdepunktet for flåten må massene transformeres til en 6x6 matrise med referanse i koordinatsystemets origo som ligger i overflate, som beskrevet før. Dvs. lokalt aksesystem vil forandres for hver lastetilstand.

Trim er ikke tatt hensyn til i analysen. *Shipshape* analysen ga en liten men neglisjerbar langskips trim.

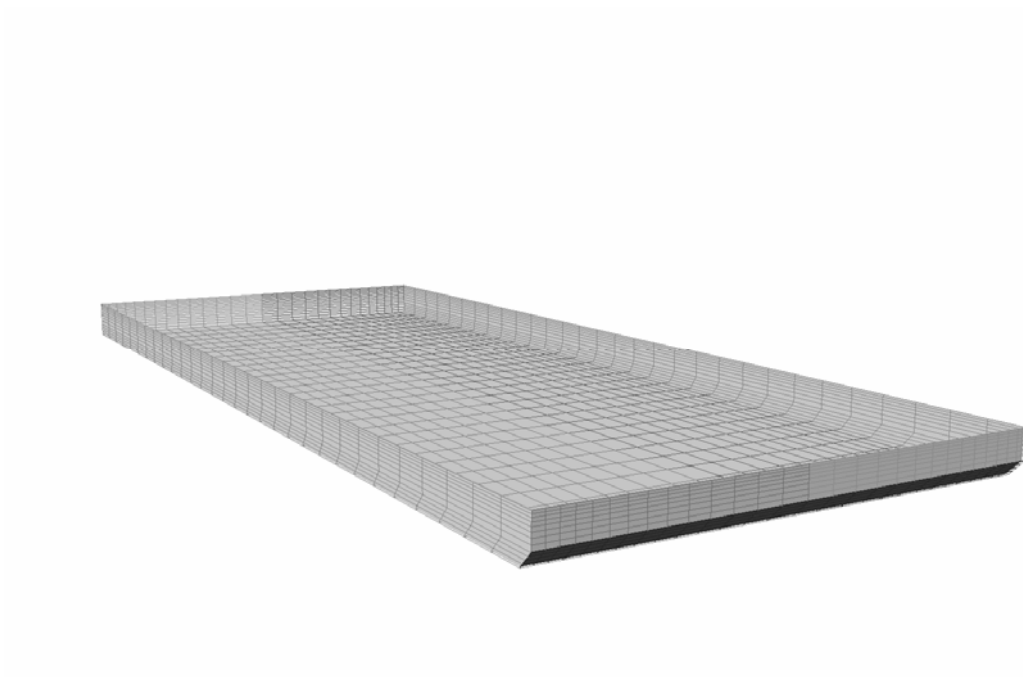
Merk at treghetsradier er estimert og sannsynligvis noe underestimert. En følsomhetsanalyse ble derimot foretatt.

### Skadet tilstand. Fylling lasterom. Kondisjon nr. 5:

T	=	1.655 meter (dypgang)
F	=	1.445 meter (fribord)
M	=	703582 kg (deplasement masse)
$x_g$	=	-0.10 meter (tyngdepunkt i x-retning)
$y_g$	=	0.00 meter (tyngdepunkt i y-retning)
$z_g$	=	1.10 meter (tyngdepunkt i z-retning)
$r_{44}$	=	4.52 meter (massetregghetsradius i rull, $0.35*B$ )
$r_{55}$	=	9.66 meter (massetregghetsradius i stamp, $0.3* L_{pp}$ )
$r_{66}$	=	9.66 meter (massetregghetsradius i gir, $0.3* L_{pp}$ )

Tregghetsradier er antatt som i operasjonstilstand siden langskipsfordelingen etter fylling er noenlunde lik. Trim er fortsatt neglisjert noe som ikke er urimelig p.g.a symmetri til lasterommet.





*Figur A.1 Beregningsgrid, flatelementer, av undervannskroget til flåte som input til WAMIT analysene. Generert i Multisurf.*

## 2 Resultater

### 2.1 Type resultater

Alle størrelser er beregnet for irregulær sjø i form av enten RMS (tilsvarer standardavvik når middelveien er null) til bevegelser og akselerasjoner eller ekstremverdi til overskytende bølgeamplitude i forhold til fribordet for en korttids 3 timers stasjonær bølgetilstand. Merk at bare en ekstremverdi er brukt i stedet for en statistisk tilpasning av ekstremverdifordelingene. Dette gir en høyere statistisk usikkerhet på ekstremverdianslagene. Med en samplingsperiode på 0.25 sec blir det brukt 43200 samples på en korttids simulering.

Akselerasjoner og relativbølger blir beregnet i følgende punkt ved  $z=0$ :

Tabell 2. Punktnummer og koordinater for relativ bølgeberegning og bevegelser.

Punkt nr.	Beskrivelse	x-koordinat (m)	y-koordinat (m)
1	Senterline i baug	16.2	0.0
2	Styrbord side og baug	16.2	-5.0
3	Styrbord side og baug	16.1	-6.55
4	Styrbord side og baug	15.0	-6.55
5	Styrbord side, midtskips	0.0	-6.55

Merk at punkt er lagt med en 10 cm avstand til flåtesiden for å unngå numeriske problemer.

Alle irregulære resultater er for bølgeretningene 90, 120 og 180 grader hvor 180 grader er møtende sjø og 90 grader fra styrbord side. De mest kritiske retningene ble plukket ut, men det er nesten symmetri mellom forskip og akterskip og dermed for eksempel 60 og 120 grader.

### 2.2 Krav knyttet til NS 9415

Det er ingen krav knyttet til maksimale bevegelser eller akselerasjoner for å kunne arbeide trygt ombord i en fôrflåte i standarden. Sannsynligvis har dette sin årsak i at dette ikke har direkte betydning for rømmingsfaren av fisk. Umulige arbeidsforhold vil derimot kunne øke sannsynligheten for havari og dermed øke rømming.

For å kunne vurdere bevegelser og akselerasjoner vil vi bruke NORSOK sine verdier som sier at for tungt, manuelt arbeid skal RMS verdiene av en rull eller horisontal og vertikal akselerasjon i et kritisk punkt på dekket være mindre enn:

Horisontal akselerasjon:	$0.07 \text{ g} = 0.69 \text{ m/s}^2$
Vertikal akselerasjon:	$0.15 \text{ g} = 1.47 \text{ m/s}^2$
Rull	4 grader

Når det gjelder faren for vannoverslag er følgende formel for fribord i millimeter lagt til grunn:

$$F_{\min} > 17xL_{pp} + K_1 + K_2$$

hvor  $K_1$  er faktor som øker fribordet med økende bølgeeksponering og  $K_2$  er ekstra fribordskrav grunnet kryssfortøyning.  $K_1$  er definert fra tabell 3.

Tabell 3. Fribordskrav som funksjon av eksponeringsgrad.

Bølgeklasse	$H_s$ (m)	Betegnelse	$K_1$ (mm)
A	0.0-0.5	Liten eksponering	300
B	0.5-1.0	Moderat eksponering	400
C	1.0-2.0	Stor eksponering	500
D	2.0-3.0	Høy eksponering	600
E	> 3.0	Svær eksponering	700

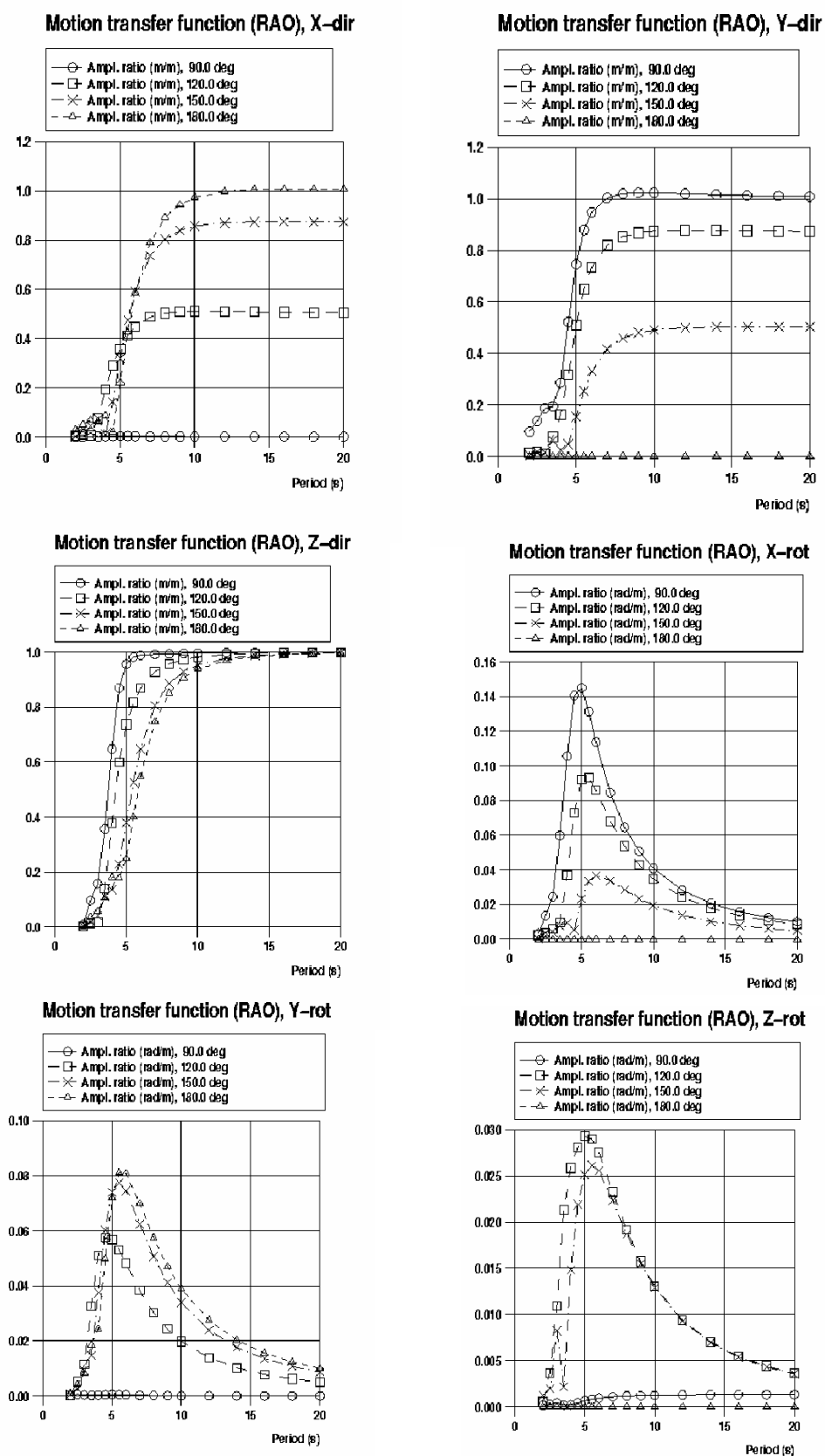
Følgende eksponeringsklasser er undersøkt:

1. **Bølgeklasse B** (Moderat eksponering):  $H_s = 1.0$  meter og  $T_p = 3.0$  sec,  $F_{\min} = 947$  mm
2. **Bølgeklasse C** (Stor eksponering):  $H_s = 2.0$  meter og  $T_p = 5.0$  sec,  $F_{\min} = 1047$  mm

Til å beskrive bølgetilstandene er det brukt et standard Jonswap spektrum med  $\Gamma = 1.55$  som fast verdi.

Det er antatt uendelig vanddyb for enkelhets skyld.

### 2.3 Globale transferfunksjoner for leker, dypgang 1.169 meter.



Figur A.2. Globale transferfunksjoner for leker.

De globale bevegelsene er definert i koordinatsystemets midtpunkt i vannlinja ved dypgang 1.169 meter og ved  $L_{pp}/2$ .

I stede for notasjonen x-dir, x-rot etc kan følgende notasjon brukes:

$\eta_1$	->	x-dir	->	jag	->	frihetsgrad nr. 1
$\eta_2$	->	y-dir	->	svai	->	frihetsgrad nr. 2
$\eta_3$	->	z-dir	->	hiv	->	frihetsgrad nr. 3
$\eta_4$	->	x-rot	->	rull	->	frihetsgrad nr. 4
$\eta_5$	->	y-rot	->	stamp	->	frihetsgrad nr. 5
$\eta_6$	->	z-rot	->	gir	->	frihetsgrad nr. 6

## 2.4 Beregning av overslag på dekk (grønn sjø).

For å regne vertikal relative bevegelse  $\eta_{3,rel}$  i ett punkt like ved skipssiden brukes følgende formel:

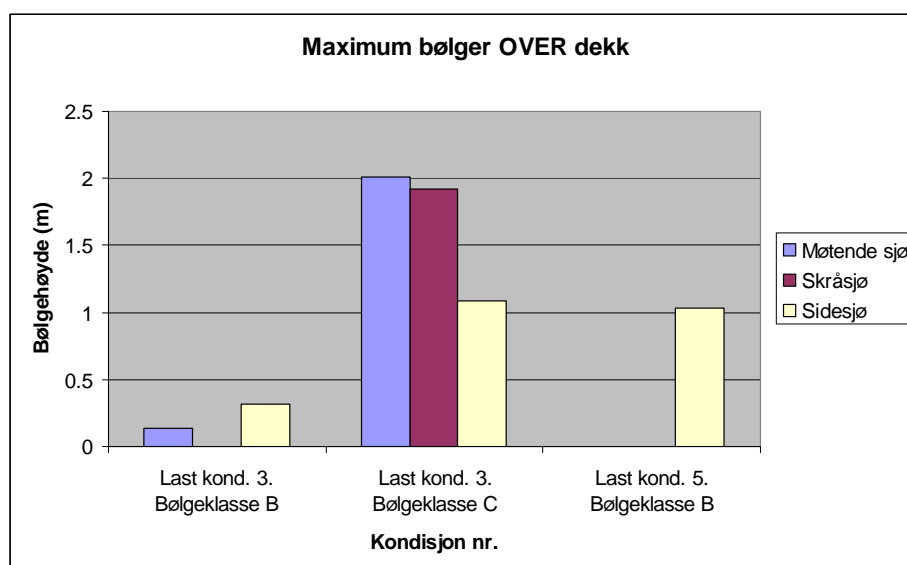
$$\eta_{3,rel} = \eta_3 + y\eta_4 - x\eta_5$$

hvor  $\eta_3$  er global hiv bevegelse,  $\eta_4$  er global rull bevegelse,  $\eta_5$  er global stamp bevegelse og x,y er x- og y- koordinaten til punktet i forhold til fartøyets origo. Alle bevegelse regnes i tidsplanet v.h.a programmet SIMO.

Relativ bølgehøyde som slår over dekk,  $\zeta_{over}$  med fribord  $F$ , i punktet x, y regnes ut i fra følgende formel

$$\zeta_{over} = \zeta_{diff} - \eta_{3,rel} - F$$

hvor  $\zeta_{diff}$  er diffraktert bølgehøyde beregnet v.h.a WAMIT i punktet x,y.  $\zeta_{over}$  beregnes i tidsplanet med programmet *Relextreme* som også estimerer maksimumsverdier fra 3 timers simulering varighet. Merk maksimumsverdiene kan ha statistisk usikkerhet på opp til 30 %.



Figur A.3. Oppsummering av alle statistiske resultater for bølger over dekk.

## 2.5 Oppsummering

Beregningene viste at eksempelflåten hadde gjennomgående gode beregningsresultater og ligger høyere enn det standarden krever. Konklusjonene baserer seg derfor på generelle betraktninger med basis i standarden:

- Initialstabiliteten til eksempelflåten er gjennomgående svært god i alle kondisjoner.
- Bevegelser og akselerasjoner for kritiske områder på eksempelflåten ligger innenfor NORSOK' krav med hensyn på tungt manuelt arbeid i en sjøtilstand tilsvarende bølgeklasse C (stor eksponering) i NS 9415.
- Beregningene viser at overslag er sannsynlig selv ved svært moderat eksponering, bølgeklasse B på eksempelflåten. Beregningene er verifisert mot resultat fra modellforsøk ved Havbassenget i MARINTEK og er også diskutert med engineeringsselskap. Grunnen til den høye sannsynlighet for overslag er svært høye diffraksjonseffekter i tillegg til at flåten går i motfase med bølgen. Diffraksjonsforsterkning på korte bølger kan gå opp til en faktor på 2. Dvs. at det er bare i tilfeller hvor fartøyet følger bølgen, i lengre bølger enn egenperioden, at overslag unngås. I bølgeklasse C er baug mest utsatt i møtende sjø mens i laveste bølgeklassen B er skipssiden mest utsatt i sidesjø.
- Små bevegelser til flåten fører til høyere sannsynlighet for overslag.
- Konsekvensen av vann på dekk er vanskelig å anslå eksakt, men mulige generelle scenarier er: ødeleggelse av lasteporten, håpløse arbeidsforhold, økt fare for mannskapet på dekk, fri overflate på dekk som fører til sloshing og til slutt mulig fylling av andre rom.
- NS9415 bør oppdateres m.h.p fribordskrav og baseres på rasjonelle beregninger eller modellforsøk. Etter regelverket har eksempelflåten et fribord som tilfredsstillende NS9415 med mer enn 884 mm i bølgekategori C. Beregningene indikerer at en *ytterligere* økning av standardens krav til fribord er nødvendig i bølgekategori C. Nærmere undersøkelser må gjøres, men dette tyder på at fribordsformelen i NS9415 er betydelig underdimensjonert spesielt for de steile og korte sjøtilstandene. Alternativt bør konsekvenser av vann på dekk kartlegges ytterligere.
- Overslag på dekk vil for generelle flåter med "garasjeporter" kunne gi vanninntrengning i deler av overbygg. Standarden stiller krav til værtett dør med terskel ihht. lastelinjekonvensjonen og gitt at dør til maskinromsnedgang blir stående åpen, kan dette gi en sårbar tilstand, ved at maskineri slås ut ved vannfylling.