

STF80 A044024 – Åpen

# RAPPORT

## **Konsept og styrkemessig vurdering av nye forankringssystemer for stålanlegg Nye rømmingssikre merdkonsept**

Heidi Moe, Jørgen R. Krokstad, Egil Lien og Mats A. Heide

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

**SINTEF Fiskeri og havbruk AS**

Havbruksteknologi

April 2005



**SINTEF Fiskeri og havbruk AS**  
Havbruksteknologi

Postadresse: 7465 Trondheim  
Besøksadresse:  
SINTEF, Forskningscenteret på Rotvoll  
Arkitekt Ebbellsvei 10  
Telefon: 73 59 56 50  
Telefaks: 73 59 56 60  
E-post: fish@sintef.no  
Internet: www.fish.sintef.no

Foretaksregisteret: NO 980 478 270 MVA

# SINTEF RAPPORT

TITTEL

**Konsept og styrkemessig vurdering av nye forankringssystemer for stålanlegg**  
**Nye rømmingssikre merdkonsept**

FORFATTER(E)

Heidi Moe, Jørgen R. Krokstad, Egil Lien og Mats A. Heide

OPPDRAGSGIVER(E)

Fiskeri- og Havbruksnæringens Forskningsfond

RAPPORTNR.

STF80 A044024

GRADERING

Åpen

OPPDRAGSGIVERS REF.

Svein Hallbjørn Steien, ref. nr. 2002/006494

GRADER. DENNE SIDE

ISBN

PROSJEKTNR.

ANTALL SIDER OG BILAG

ssige forhold i flytekragen. Noe konseptideer av  
forankringskonfigurasjoner er testet ut med datasimuleringer.

En rekke ideer vil være mulig å forfølge videre hvis en gjør moderate designforandringer av flytekragen samtidig med reduksjon av antallet terminalpunkt (ankerline kontaktpunkt). En slik strategi vil være mer havarisikker m.h.p. belastninger i ankerlinene i skrånende terreng.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Havbruksteknologi	Aquaculture technology
GRUPPE 2	Konstruksjonsanalyse	Structure analysis
EGENVALGTE	Forankring	Mooring
	Rømming	Escape

## INNHALDSFORTEGNELSE

<b>Forord</b>	<b>3</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>4</b>
1.1 Generelt	4
1.2 Vurdering av konsept	5
1.3 Definisjoner	5
<b>2 Problembeskrivelse</b>	<b>6</b>
2.1 Forankring av stålanlegg i skrånende terreng	6
2.2 En forbedret forankringsfilosofi	8
2.3 Metoder for endring av linefleksibilitet	10
2.4 Ankerlinekarakteristikk	10
<b>3 Statistiske analyser</b>	<b>14</b>
3.1 Generelt	14
3.2 Mål, metode og begrensninger	14
3.3 Modellering for analyse	15
3.3.1 Forenklet forankring	15
3.3.2 Modellering av flyter	19
3.3.3 Grensebetingelser, forspenning og belastninger	21
3.4 Analyseresultater	24
3.4.1 Strømbelastninger og reduksjon av strømhastighet	24
3.4.2 Statisk horisontalt bøyemoment	24
3.4.3 Følsomhet for variasjon i dybde	30
3.4.4 Verifisering av analysene	31
3.4.5 Beregning av stivhet, masse og egenperioder	34
<b>4 Analyse av eksisterende anlegg med forenklet forankring</b>	<b>39</b>
4.1 Generelt	39
4.2 Strekk- og momentfordeling i 6 burs stålanlegg	39
4.3 Muligheten for store saktevarierende bevegelser	40
<b>5 Konklusjoner</b>	<b>42</b>
<b>6 Referanser</b>	<b>43</b>
<b>7 Vedlegg</b>	<b>44</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 konseptuelt arbeid og analyser av eksisterende og forenklete forankringssystemer. Målet har vært å bidra til utvikling av forbedrede og mer rømmingssikre oppdrettsanlegg i interaksjon med forankringssystem.

SINTEF Fiskeri og havbruk, Trondheim, 6. april 2005

## 1 Innledning

### 1.1 Generelt

I forbindelse med prosjektet *Nye Rømmingssikre merdkonsept* er det utført en konseptstudie av forskjellige forankringssystemer for stålanlegg. Hovedmålet er å bidra til utvikling av enklere forankringssystemer som kan redusere faren for havari av forankringssystem og flyter.

Utgangspunktet for å fokusere på forankring er den sterke interaksjonen som eksisterer mellom forankringssystem og belastninger i flyterkonstruksjonen. I verste fall kan forankringen være årsaken til kritiske belastninger i flytekragen som kan føre til havari og rømming.

Hvis hele anlegg kollapser som følge av svikt i forankringssystemet, kan dette føre til at store mengder fisk rømmer. Slike hendelser vil kunne gi et betydelig bidrag til rømmingstallene, selv om hyppigheten er liten. Ved å ta enkle forhåndsregler kan man legge forholdene til rette for at forankringssystemet skal fungere bedre og være mindre avhengig av justeringer i forbindelse med ordinær drift.

Et forankringssystem har som hovedoppgave å holde anlegget på plass innenfor et gitt område for å unngå konflikt med farled, land, grunne, fôrflåter og lignende. Samtidig som forankringen skal holde anlegget på plass, må det også gi anlegget en viss mulighet til å bevege seg. De største belastningene på flytekrage kommer som reaksjonskrefter i forankringssystemet, og er et resultat av strøm og bølger. Forankringen må være fleksibel nok til at flytekragen ikke utsettes for store dynamiske krefter på grunn av bølger. Uten den riktige fleksibiliteten vil anlegget og forankringen bli påført store krefter, som over tid kan føre til utmatningskader og havari av anlegget.

Strøm gir store krefter på nøtene som overføres til anlegg og forankringssystem, mens bølger beveger anlegget fram og tilbake. For at anlegget skal tåle så mye strøm som mulig, må kreftene i ankerlinene fordeles riktig, slik at belastningene på forankringsliner og flyter blir minst mulig.

I kapittel 2.1 diskuteres forankring av stålanlegg i skrånende terreng. Her presenteres en ny regel som bør benyttes, og en gammel og godt innarbeidet regel utfordres.

I kapittel 3 beskrives enkle, statiske beregninger som er gjennomført for et utvalg av forenklete forankringssystem. Kapittel 4 presenterer flere statiske og dynamiske analyser av eksisterende stålanlegg med forenklet forankring.

Det er også gjort et konseptuelt arbeid med mål å komme frem til nye forankringsløsninger, som presenteres i vedlegg 1.

## 1.2 Vurdering av konsept

Følgende faktorer er viktig når forskjellige forankringssystemer skal vurderes opp mot hverandre:

- **Lengde-bredde forhold til flytekragen (L/B)**
- **Komponentene i forankringssystemet**, det vil si antall ankerliner, angrepsvinklene til ankerlinene og ankerlinelengder. For å oppnå et forenklet forankringssystem, ønsker man å redusere antall ankergrupper, terminalpunkter og ankerliner (i prioritert rekkefølge). Ved å gjennomføre disse tiltakene vil det være enklere å beregne og installere et velfungerende forankringssystem.
- **Antall ankergrupper** (anker som ligger i nærheten av hverandre på antatt likt vanddyb) og okkupasjon av bunnareal
- **Bøyemoment i flytekragen**
- **Antall terminalpunkter** (punkt hvor ankerliner er festet til flyter)
- **Forskyvning og rotasjon** av flytekragen i vannplanet (det vil si stivhet i translasjon og gir) og okkupasjon av overflateareal
- **Følsomhet ovenfor variasjoner i stivheten til de forskjellige ankerlinene** på grunn av kompleks bunntopografi (store forskjeller i dybde ved anker).
- **Mulighet for å legge til med båt** uten å komme i konflikt med ankerlinene. Slitasje fra båter på ankerliner kan føre til brudd i ankerliner.
- **Vertikal bevegelse**
- **Egenperioder**. Man må kjenne egenperioden til totalsystemet for å vurdere mulighetene for resonans med bølgene (indusering av store bevegelser). Dette er spesielt viktig når forflåte integreres i totalsystemet.

## 1.3 Definisjoner

Dette avsnittet inneholder noen definisjoner på viktige uttrykk benyttet i denne rapporten:

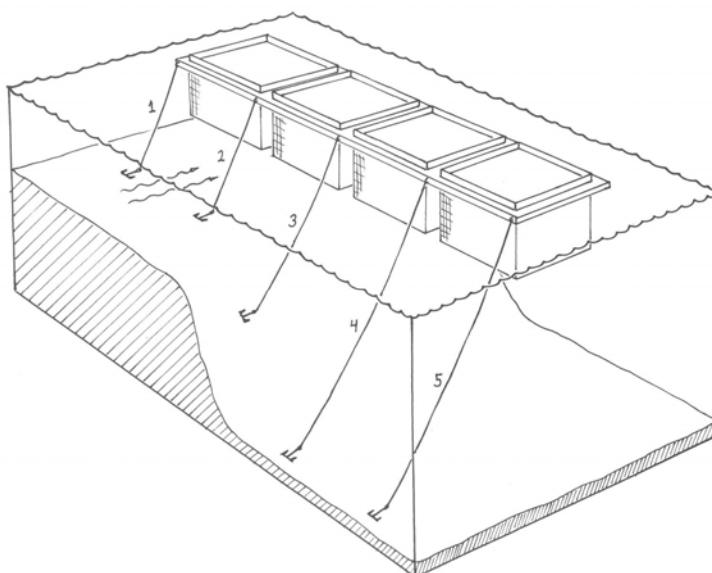
Flyter / flytekrage	<i>den flytende komponenten av oppdrettsanlegget/totalsystemet (bøyer ikke inkludert). Typisk plastring eller stålanlegg</i>
Forankringssystem	<i>alle komponenter i forankringa (kjetting, bøye, lodd, syntetisk line anker etc.) og utleggets tredimensjonale geometri</i>
Merd	<i>flyter, not og utspilingsystem (for eksempel lodd på not)</i>
Terminalpunkt	<i>punkt hvor ankerliner er festet til flyter</i>
Totalsystem	<i>alle komponentene i et oppdrettsanlegg (merd og forankringssystem). Kan også inkludere forlekter.</i>

## 2 Problembeskrivelse

### 2.1 Forankring av stålanlegg i skrånende terreng

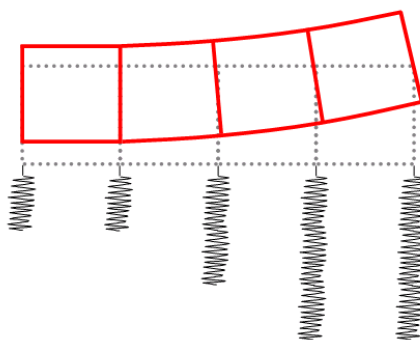
Flere aktører i oppdrettsnæringa har observert brudd i anlegg som ligger fortøyd i skrånende terreng. I flere tilfeller kan dette muligens forklares med at regelen om konstant lengde på dybde forhold er ukritisk benyttet. I dette kapittelet presenteres en ny regel og den gamle blir utfordret.

I (Krokstad et al. 2005) finnes uttalelser som ”Vi prøver å oppnå et konstant lengde på dybde forhold med å bruke forskjellige ankerlinelengder”. Dessverre tror mange at definisjonen på god forankring av stålanlegg er at forholdet mellom lengden ( $l$ ) til ankerlina og dybden ( $d$ ) ved anker skal være konstant (ofte  $l/d = 2.5$  eller  $3$ ). Dersom denne regelen benyttes når man skal forankre et anlegg i skrånende terreng, får man et forankringssystem som vist i Figur 2-1.



**Figur 2-1** Illustrasjon av forankring i skrånende terreng. Alle forankringslinene har samme, konstante lengde på dybde forhold ( $l/d = \text{konstant}$ ). (Linene i illustrasjonen er kortere enn de vil være i virkeligheten).

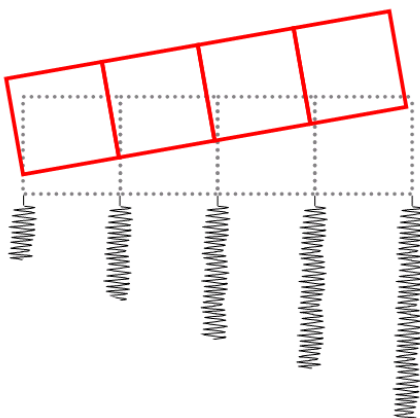
Ei forankringsline kan sees på som ei springfjær. Dette er vist for line 1 til line 5 (fra venstre til høyre) i Figur 2-2. Line 1 og 2 blir to korte fjærer, som dermed er lite fleksible, mens line 4 og 5 blir to lange, fleksible fjærer. Med strøm på tvers av anlegget, vil anlegget bøyes som følge av at de korte linene vil holde igjen anlegget mens de lange vil la anlegget bevege seg. Det er svært vanlig at forankringssystemet på denne måten fører til store belastninger i flytekragen. Dette er helt unødvendig, og medfører økt risiko for skader og havari.



**Figur 2-2** Illustrasjon av hvordan anlegget kan bøye seg når det er forankret i terreng med varierende dybde langs anlegget.

For at strøm ikke skal gi unødvendig store belastninger på flytekragen, er det viktig at holdekrafta til ankerlinene ikke fører til at anlegget bøyes. For å unngå bøying av anlegget må ankerlinene på langs av anlegget ha lik eller jevnt økende fleksibilitet. Regelen om konstant lengde på dybde forhold gjelder kun når man har lik eller jevnt økende dybde langs anlegget.

I Figur 2-3 er line 2, 3 og 5 forlenget sammenlignet med forankringssystemet i Figur 2-2, slik at lengden til fjærene øker jevnt langs lengden av anlegget. I dette tilfellet vil anlegget rotere og nesten ikke bøyes, og belastningene på flytekragen blir betydelig redusert. I et anlegg som har en slik forankring vil det ta lengre tid før utmatningsskader oppstår og faren for havari i uvær er redusert.



**Figur 2-3** Illustrasjon av hvordan lengden til forankringslinene kan tilpasses slik at anlegget vrir seg i stedet for å bøyes.

For at forankringa ikke skal gi unødvendig store krefter inn på flytekragen, er det viktig at kreftene som virker inn mot terminalpunktene ikke bidrar til bøying av anlegget. Det vil si at kreftene må være konstante eller lineært økende ved en jevn belastning, slik at anlegget vrir seg uten at det bøyes.



## 2.2 En forbedret forankringsfilosofi

Det er de horisontale kreftene og de globale forskyvningene som er interessante når man skal vurdere forankringssystemets bøyning av anlegget. Forholdet mellom disse finnes fra følgende uttrykk:

$$T_H = EA \frac{X_H^2}{L^3} \cdot \Delta X_H \quad (1.1)$$

hvor  $T_H$  er horisontale krefter i terminalpunktet  
 $E$  er E-modulen til ankerlina (stivhetsegenskapene til taumaterialet)  
 $A$  er tverrsnittsarealet til ankerlina  
 $X_H$  er den horisontale avstanden mellom terminalpunktet og ankeret  
 $L$  er lengden til ankerlina  
 $\Delta X_H$  er horisontal forskyvning av terminalpunktet

I denne ligningen neglisjeres effekten av bøye og bunnkjetting på stivheten til lina. Dette kan som regel gjøres i en forenklet analyse av et vanlig forankringssystem.

Ut fra forholdet mellom horisontale krefter og forskyvninger i terminalpunktet, kan den horisontale stivheten til ankerlina uttrykkes som følger:

$$k_H = \frac{T_H}{\Delta X_H} = EA \frac{X_H^2}{L^3} = EA \frac{L^2 - d^2}{L^3} \quad (1.2)$$

Den nye regelen for forankring av stålanlegg i skrånende terreng kan formuleres som følger:

*Bøyemomentet i flytekragen blir minst når de horisontale kreftene i forankringslinene er konstante eller lineært økende langs lengden av anlegget. Da vil flytekragen rotere i stedet for å bøyes. Dette oppnår man dersom den horisontale fleksibiliteten til ankerlinene er konstant eller lineært økende langs lengden av anlegget.*

Den horisontale fleksibiliteten til lina er den inverse av stivheten:

$$\frac{1}{k_H} = \frac{L^3}{EA \cdot (L^2 - d^2)} \quad (1.3)$$

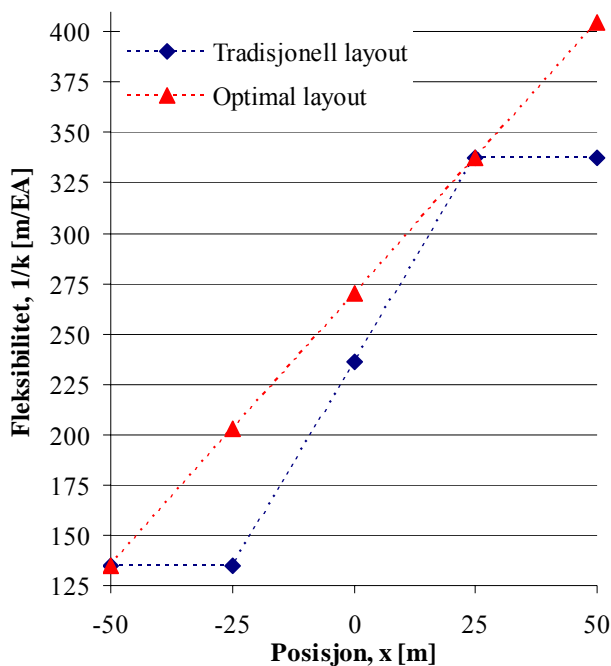
Dersom det kan antas at vanddypet er likt ved alle ankrene, vil det være riktig å dimensjonere forankringen ut fra regelen at  $L/d = \text{konstant}$ . Dette fordi fleksibiliteten blir lik for alle linene. Dersom vanddypet er varierende langs anlegget bør konstruksjonsprinsippet  $L/d = \text{konstant}$  forkastes til fordel for  $L^3 / (EA \cdot (L^2 - d^2)) = \text{konstant}$  eller lineært varierende.

Dette kan fremstilles grafisk som vist i Figur 2-4. Med utgangspunkt i anlegget, forankringen og bunntopografien illustrert i Figur 2-1, antas det at ankeret til line 1 og 2 ligger på 40 meters dyp, ankeret til line 3 på 70 meters dyp, mens ankrene til line 4 og 5 ligger på 100 meters dyp. Det antas videre at dybden ved anker er uavhengig av linelengden. Dersom man i praksis ikke kan gjøre den siste antagelsen, må man iterere seg fram til en løsning.

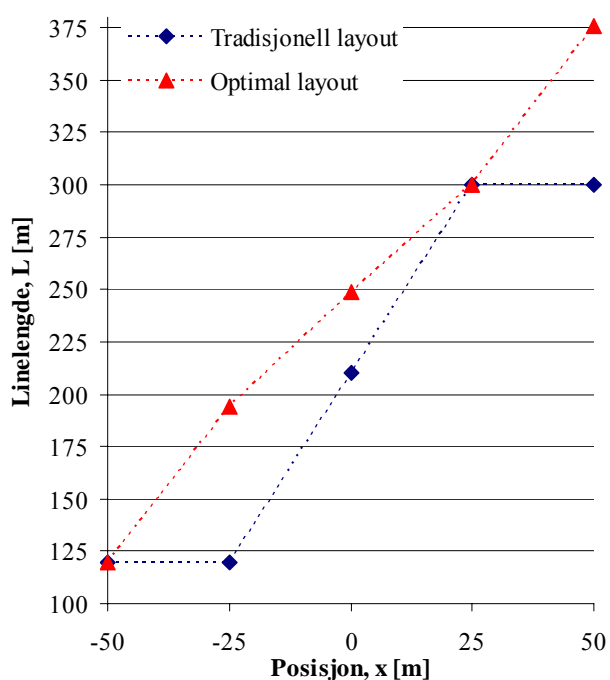
Dersom det benyttes et forankringssystem med såkalt ”tradisjonelt layout” og følger den ”gamle” regelen  $L/d = 3$ , fås de verdiene som er merket med (♦) for den horisontale fleksibiliteten gitt i Figur 2-4. Disse punktene er langt fra lineære, og anlegget vil bøyes. Punktene merket med (▲)

representerer et forankringssystem med ”optimalt layout”, hvor den horisontale fleksibiliteten i ankerlinene øker lineært langs anlegget.

De tilsvarende linelengdene er vist i Figur 2-5. Denne figuren viser at ved en lineær variasjon av den horisontale fleksibiliteten, vil lengden til ankerlinene variere omtrent lineært langs anlegget. Dersom man skal lage en første skisse av et forankringssystem, kan man søke å oppnå lineært varierende lengder på ankerlinene langs anlegget. Dette vil føre til noe bøyning av anlegget, men vil sannsynligvis gi bedre resultater enn å følge regelen ” $L/d = \text{konstant}$ ”.



**Figur 2-4** Horisontal fleksibilitet i ankerlinene langs stålanlegget.



**Figur 2-5** Lengde av ankerlinene langs stålanlegget.

### 2.3 Metoder for endring av linefleksibilitet

Fleksibiliteten til ei ankerline med en gitt lengde kan økes på to måter. Man kan enten gjøre selve lina mykere (elastisk fleksibilitet), eller man kan ”knekke” lina ved bruk av bøye eller lodd (geometrisk fleksibilitet).

Den **elastiske** fleksibiliteten til ei ankerline er avhengig av tre faktorer; hvilket materiale tauet er laget av, hvor stor diameter tauet har og lengden til tauet. Man kan øke den elastiske fleksibiliteten ved å øke lengden til lina, velge et tynnere tau eller et tau i et mykere materiale (for eksempel nylon).

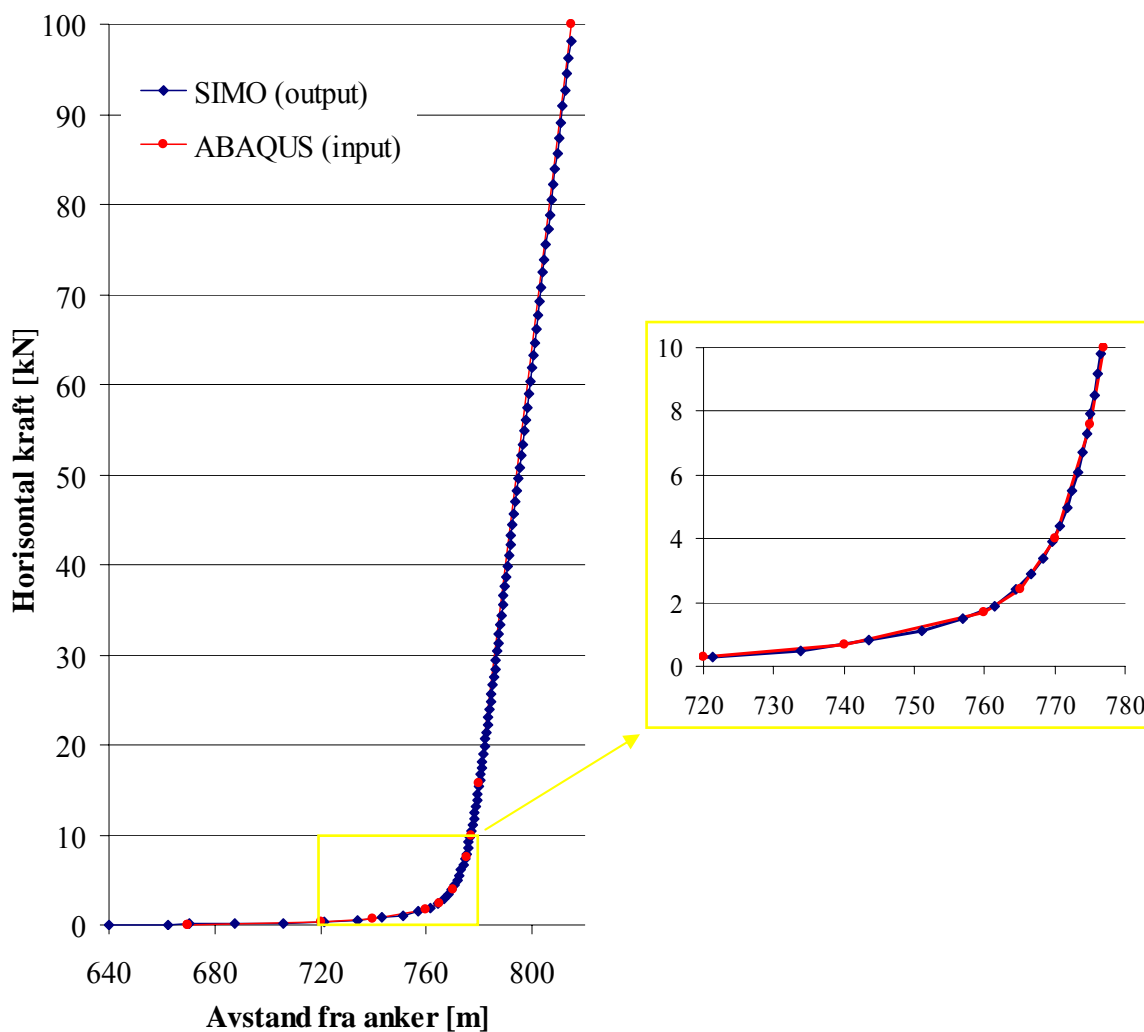
For å oppnå **geometrisk** fleksibilitet, må som sagt lina ”knekkes” ved hjelp av lodd eller bøye. Skal et vesentlig bidrag oppnås, må bøya eller loddet plasseres i god avstand fra merden. Dersom bøya på ei lang line (> 200 m) er plassert 15 m fra anlegget, vil den ha svært liten betydning for fleksibiliteten til lina. I hardt vær forskyves anlegget gjerne flere meter, men allerede etter en moderat forskyvning er lina strekt ut og effekten av bøya er brukt opp. Det hjelper lite å øke størrelsen til bøya. (Se også avsnitt 2.4 for nærmere forklaring). Av samme grunn har bunnkjettingen også svært liten effekt på fleksibiliteten til lina i kritiske situasjoner.

Den geometriske fleksibiliteten har en klar ulempe, det er vanskelig å få den til å fungere i et system på dagens stålanlegg. Når linene strekkes ut og strammes opp i sterk strøm, kan man få store krefter i enkeltliner dersom ikke alle linene strekkes ut likt, og dette er vanskelig å oppnå.

Man kan oppleve brudd i enkeltliner uten at anlegget havarerer, men et slikt brudd kan føre til sprekker og andre skader på anlegget. Når bølger og strøm skyver på anlegget er det den minst fleksible lina som får den største belastningen og dette er som oftest den korteste lina. Dersom det oppstår problemer med brudd i korte liner, er det viktig å ikke forsterke denne lina, men tvert i mot gjøre lina mer fleksibel. Da oppnås en reduksjon av belastningene i denne lina. I mer kompliserte tilfeller kan hele leggemønsteret måtte endres.

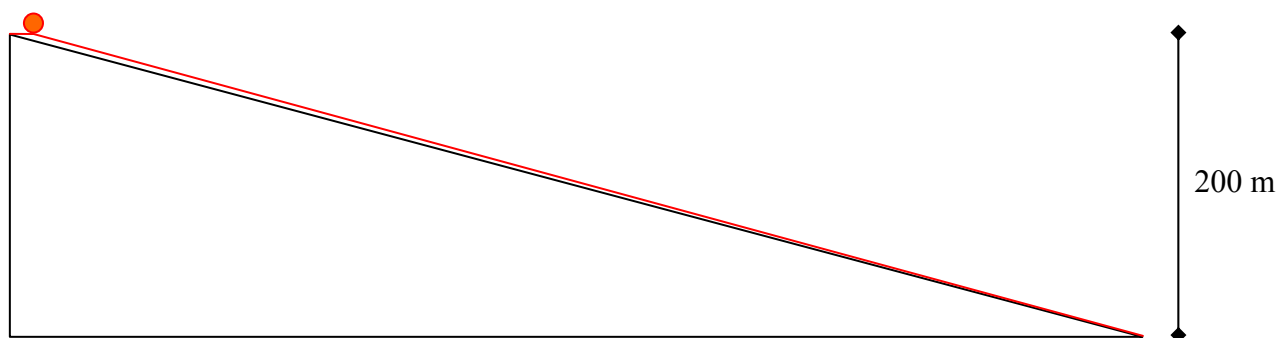
### 2.4 Ankerlinekarakteristikk

En ankerlinekarakteristikk gir stivheten til lina som forholdet mellom krefter i lina og forskyvning av anlegget. Ankerlinekarakteristikken plottes som en kurve i et diagram som vist i Figur 2-6. Stivheten i et valgt område (for en gitt forskyvning eller kraft) finnes som stigningstallet til kurven. Den første delen av kurven er ikke-lineær og dominert av geometrisk stivhet. Den representerer tilstander før lina er helt utstrekt. Når lina er helt utstrekt er bøya dradd under og kjettingen på bunnen er løftet, slik at ankerlina utgjør en rett linje fra terminalpunkt til anker.



**Figur 2-6** Ankerlinekarakteristikk for ei 800 m lang ankerline, forankret på 200 m vanddyb.

Dataprogrammet SIMO (MARINTEK 2004) er benyttet for å beregne ankerlinekarakteristikker for ei typisk ankerline. Ankerlina er antatt å ha en lengde på fire ganger et vanddyb ved anker på 200 m, det vil si 800 m. Av denne lengden består de første 15 meterne fra anlegget av kjetting, de neste 760 metrene er syntetisk line, mens de siste 25 metrene også er kjetting. 15 meter fra anlegget (i overgangen mellom kjetting og line) er det festet en bøye med 4 tonn oppdrift. Dette er en unormalt stor bøye. I Figur 2-7 er ankerlina illustrert. Kjettingen på bunnen er utelatt.



**Figur 2-7** Bøyas påvirkning på ankerlina.

Ved hjelp av et par enkle geometriske betraktninger, kan man nå gjøre et overslag over bøya sin effekt på stivheten til ankerlina.

Uten belastninger i lina, kan den horisontale avstanden mellom terminalpunkt og anker beregnes som følger:

$$x_1 = 15 + \sqrt{(760^2 - 200^2)} = 748.2\text{m}$$

Når den geometriske stivheten til lina er strekt ut, er den horisontale avstanden mellom terminalpunkt og anker:

$$x_2 = \sqrt{((760 + 15)^2 - 200^2)} = 748.7\text{m}$$

Det betyr at når anlegget har forskjøvet seg en halv meter, er effekten av bøya brukt opp. Bøya er da trekt ned 4 meter. Et anlegg vil vanligvis forskyve seg flere meter, og effekten er derfor minimal uansett størrelsen på bøya. Så selv om vi benyttet en bøye med ekstra stor oppdrift, viser det seg at bøya har liten effekt på stivheten til lina.

Bøya kan indusere store belastninger på anlegget ved at den beveger seg i bølgene og dermed skaper store strekkrefter i ei oppspent ankerline. Ved lange liner bør man derfor vurdere å utelate bruk av bøye i nærheten av anlegget og i bølgesonen. Dette betinger at anlegget har tilstrekkelig oppdrift ved terminalpunktene, slik at det ikke dras ned når det er store krefter i ankerlinene.

Geometrisk stivhet i form av bøye kan være gunstig i situasjoner der man har en line som er mye kortere enn de andre. Ei relativt kort line uten geometrisk stivhet vil være betydelig stivere enn lengre liner, og vil dermed også ta opp større belastninger. Dersom man skal myke opp ei stiv line ved bruk av bøye eller lodd, får man størst effekt dersom man plasserer bøye/lodd langt ut på lina (nærmere loddet enn flytekragen).

Geometrisk stivhet i ei ankerline kan også representere en fare. Det er vanskelig å designe et system hvor alle ankerliner har lik geometrisk stivhet. Dette kan medføre at ei line brått blir mye stivere enn de andre, og vil som en konsekvens av dette ta opp store deler av belastningene. I verste fall kan kapasiteten til lina overskrides, og den vil ryke. Ankerlinebrudd vil påføre stålanlegget store skjevbelastninger, som kan føre til permanente deformasjoner og sprekker i anlegget. Belastningene i de intakte ankerlinene øker, og man kan oppleve at flere ankerliner ryker som følge av dette (såkalt progressivt brudd).

Den geometriske stivheten er vanskelig å beregne og kontrollere i praksis. Derfor anbefales det å redusere stivheten til ei ankerline ved å gjøre den lengre når det er praktisk mulig.

I de statiske todimensjonale analysene som blir presentert i neste kapittel, er det den horisontale stivheten til ankerlinene som er av interesse. Horisontal kraft er plottet mot avstand mellom anker og terminalpunkt i Figur 2-6. Figuren viser at når avstanden mellom anker og terminalpunkt er 775 meter ( $\sqrt{(800^2 - 200^2)}$ ) eller større, er den elastiske stivheten til lina dominerende. Siden det syntetiske tauet har lavest E-modul, vil tauet gi stivheten til lina direkte som

$K = EA/L \approx 700\text{MPa} \cdot \pi \cdot (30\text{mm})^2 / 775\text{m} \approx 2600\text{N/m}$ , som tilsvarer stigningstallet i Figur 2-6 når avstanden fra anker er større enn 775 m.

I området der den elastiske stivheten til lina dominerer, vil en økning i avstanden mellom anker og terminalpunkt føre til at tauet strekkes og forlenges. Ved en tilstrekkelig stor kraft vil noe av denne forlengelsen være permanent og det vil være nødvendig å stramme opp ankerlina. Ved

utsett av ankerliner med helt nytt tau, vil lina forlenges permanent på grunn av at tvinninga i det syntetiske tauet strekkes ut. Man må da stramme opp ankerlinene inntil de har stabilisert seg.

Ved enkle analyser vil det ikke være nødvendig å modellere den geometriske stivheten. Figur 2-6 viser at den geometriske stivheten er relativt liten, og lina vil ganske raskt strekkes ut. Allerede ved en moderat belastning på 10 kN (~1 tonn), er det meste av den geometriske stivheten oppbrukt (kurven nærmer seg det lineære området). Ankerlinene på stålanlegg er vanligvis forspent med ei kraft i størrelsesorden 5 til 10 kN, og man kan dermed benytte en lineær stivhet for ankerlinene i forenklede analyser. Selv med ei kraftig bøye, vil altså den geometriske stivheten brukes opp ved moderate belastninger på anlegget.

### 3 Statistiske analyser

#### 3.1 Generelt

Det er i dette arbeidet gjennomført en rekke todimensjonale analyser av stålanlegg med forskjellige forankringssystemer. Analysene tar kun hensyn til bevegelser og krefter i horisontalplanet. Det betyr for eksempel at bevegelse og krefter i anlegget fra bølger, ikke er vurdert i disse analysene.

I dagens oppdrettsanlegg vil forankringen påvirke de vertikale bevegelsene til anlegget. Vertikale bevegelser må tas med i betraktningen når man skal designe et nytt forankringssystem for merder. I Kapittel 4 er det gjennomført tredimensjonale dynamiske analyser av et eksisterende anlegg, hvor man tar hensyn til de vertikale bevegelsene til anlegget.

#### 3.2 Mål, metode og begrensninger

Målet med arbeidet presentert i dette kapitlet, har vært å vurdere forenklete forankringssystemers påvirkning på et utvalg flyterkonstruksjoner og egenskapene til totalsystemet (forankring og merd). I disse analysene er det hovedsakelig statisk bøyemoment i vannplanet (horisontalt) i flytekragen som er vurdert. Statisk globalt bøyemoment i vannplanet har i flere tilfeller vist seg å være den mest kritiske belastningen på et oppdrettsanlegg.

I analysene beregnes det globale bøyemomentet i flytekragen, som følge av belastninger fra strøm og forskjellige forankringssystemer. Bøyemomentet kan formelt defineres som ”En krafts evne til å få et stivt legeme til å rotere om en fast akse” (Irgens 1994). Bøyemomentet ( $M$ ) er lik kraften ( $F$ ) multiplisert med avstanden til rotasjonsaksen (momentarm,  $a$ ), og kan uttrykkes som  $M = F \cdot a$ .

Et enkelt og praktisk eksempel som illustrerer betydningen av bøyemoment, er når man skal feste en skrue med en skiftnøkkel. Lengden til skiftnøkkelen er lik momentarmen når man drar i enden av skiftnøkkelen. Dersom lengden til skiftnøkkelen er 20 cm og man drar med ei kraft på 100 N (ca 10 kg), beregnes bøyemomentet som  $M = 100\text{N} \cdot 0,20\text{m} = 20\text{Nm}$ . Dersom man fortsetter å dra i skiftnøkkelen etter at skruen er skrudd fast, vil nøkkelen kunne bøyes dersom momentet er stort nok.

For et oppdrettsanlegg er bildet noe mer komplisert. Kraftene er fordelt over hele anlegget og anlegget holdes mer eller mindre fast i flere terminalpunkt. Vi har verken en entydig kraft eller momentarm, og utregningen av bøyemomentet blir mer komplisert og håndteres i dette tilfellet numerisk av ABAQUS (Hibbitt Karlsson & Sorensen Inc. 2002), et dataprogram for styrkeberegninger (FEA- Finite Element Analysis).

Fordelingen av bøyemoment i et oppdrettsanlegg forteller oss hvor mye hovedbrygger, ut- og mellomliggere belastes av strøm og forskjellige forankringssystem. Store bøyemoment på grunn av sterk strøm og ugunstig forankringssystem, har i flere tilfeller vist seg å representere de største belastningene på stålanlegg.

Ekstreme belastninger i ankerliner og flyter oppstår som regel ved kombinasjon av sterk strøm og bølger i samme retning. Som regel er det strømmen som gir det største bidraget til ekstreme bøyemoment. Vi har derfor valgt å se kun på statiske strømbelastninger i disse forenklete analysene.

I analysene er kun globale effekter vurdert. Det betyr at detaljer i flytekragen ikke studeres, og at effekter fra hengsler og eventuelle ekstra forsterkninger ikke er inkludert.

Spenningskonsentrasjoner (store belastninger) som ofte oppstår i hengsler og kneplater vil derfor ikke bli avdekket i disse analysene.

Bøyemomentet som belaster anlegget er sterkt avhengig av forankringssystemet, strekkrefter i linene (fra strøm) og variasjon i ankerlinenes horisontale fleksibilitet (forklart i kapittel 2).

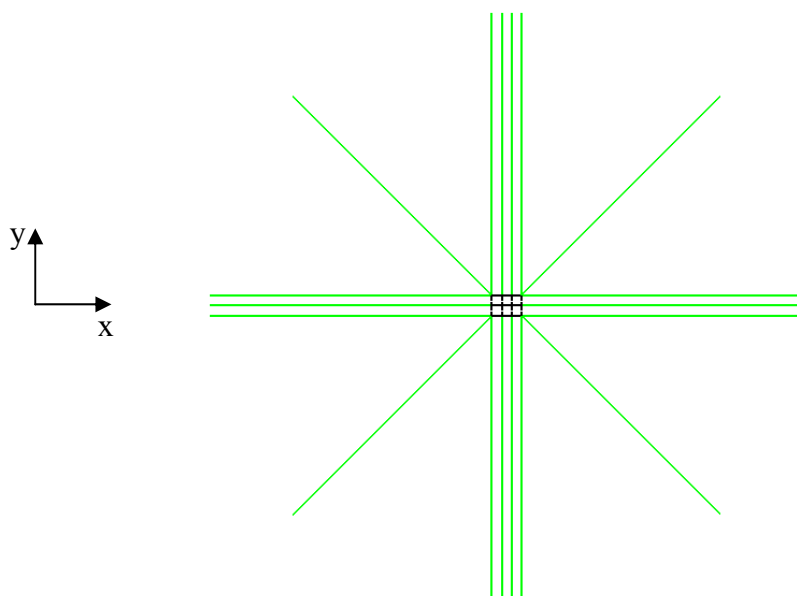
Bølger er for øvrig svært viktig i analyser av utmatting, da de gir vekslende spenninger som kan føre til utmattingssprekker. Utmatting er et stort problem i mange stålanlegg, og melder seg ofte som sprekker i forbindelse med hengsler, kneplater og andre forbindelser. Denne belastningen kommer i tillegg til resultatene i analysene som er gitt i dette kapitlet.

### 3.3 Modellering for analyse

#### 3.3.1 Forenklet forankring

Det er gjennomført analyser for et utvalg eksisterende og forenklede forankringssystem. Disse forankringssystemene presenteres i dette avsnittet.

Det er definert et ”standard” forankringssystem, med terminalpunkt for ankerliner i hjørnet av alle bur i tillegg til skrå liner i hjørnene. Systemet er vist i Figur 3-1 for et anlegg med 2x3 bur (se vedlegg 4). Tilsvarende ”standard” forankringssystemer er også utformet for 2 x 2 og 1 x 4 bur (se vedlegg 5 og 6).



**Figur 3-1.** Standard forankringssystem for anlegg med 2x3 bur.

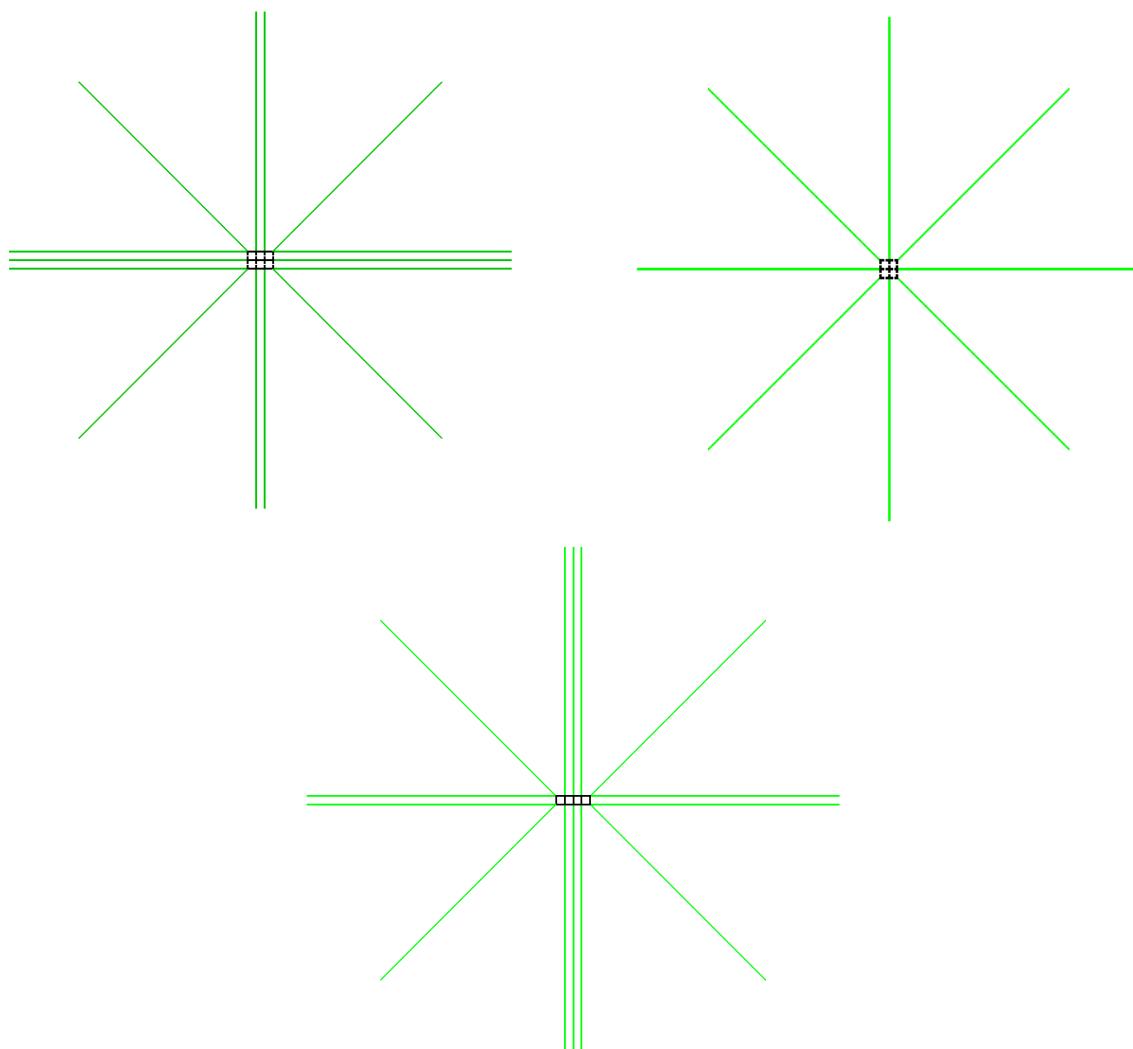


Alle konfigurasjoner av standard forankringssystem er analysert, og tallene fra disse analysene er referansestørrelser for å kunne vurdere effekten av de forenklete forankringssystemene.

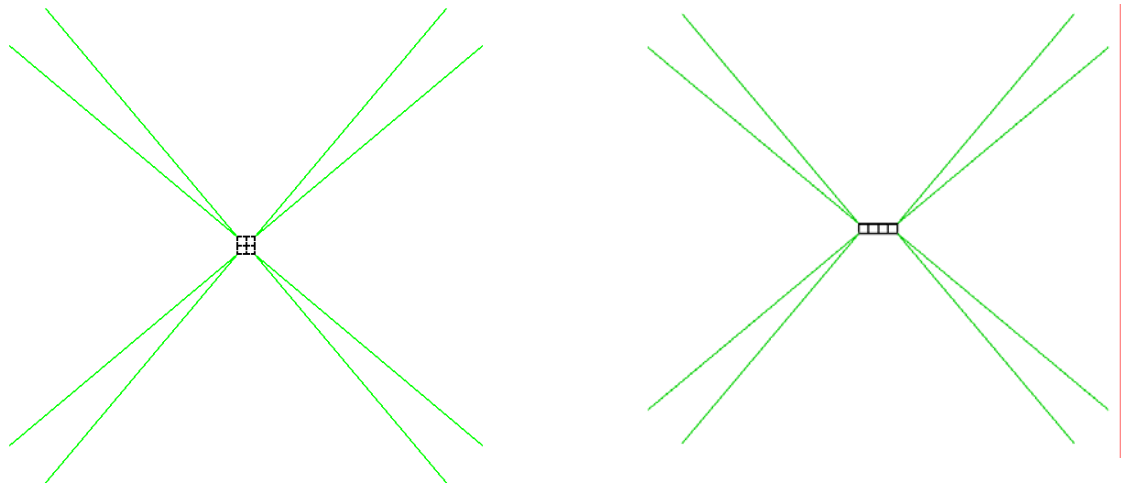
Følgende forenklete forankringssystemer er analysert:

1. Uten tverrliner i hjørnene, for anlegg med 2x3, 2x2 og 1x4 bur. (figur 3-2)
2. Liner kun i hjørnene, for anlegg med 2x2 og 1x4 bur. (figur 3-3)
3. Liner i senter, for anlegg med 1x4 bur. (figur 3-4)
4. Fire terminalpunkt, for anlegg med 2x3, 2x2 (to versjoner) og 1x4 bur. (figur 3-5)

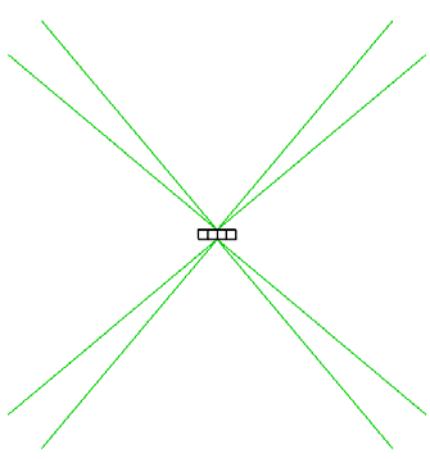
I forankringssystem 2 til 4 går det to liner ut fra hvert terminalpunkt. De har en retning på  $5^\circ$  i forhold til hverandre. Doble liner vil øke rotasjonsstivheten til anleggene og representere en dobbeltsikring i tilfelle brudd i ankerline.



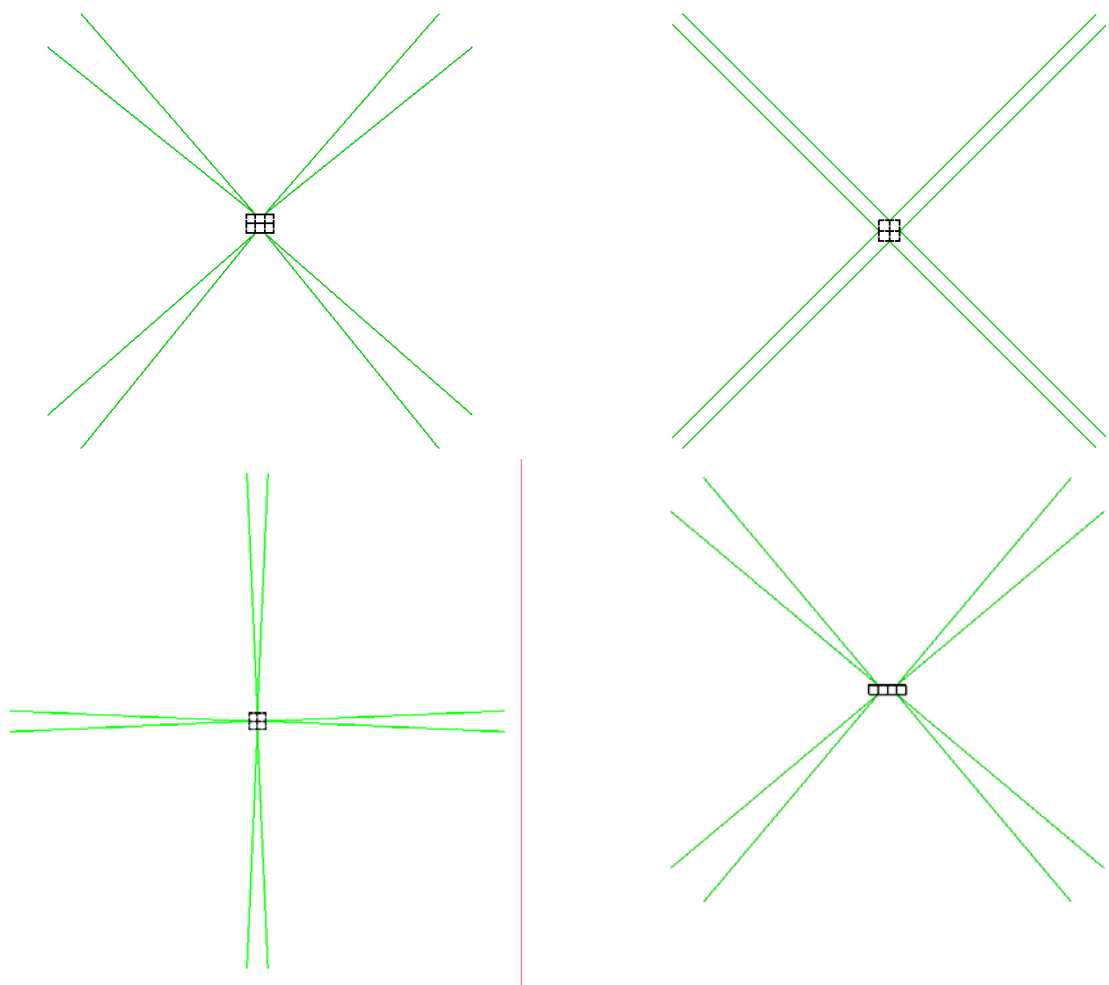
**Figur 3-2.** Forenklet forankringssystem uten tverrliner i hjørnene, for anlegg med 2x3, 2x2 og 1x4 bur.



**Figur 3-3.** Forankringssystem med liner kun i hjørnene, for anlegg med 2x2 og 1x4 bur.



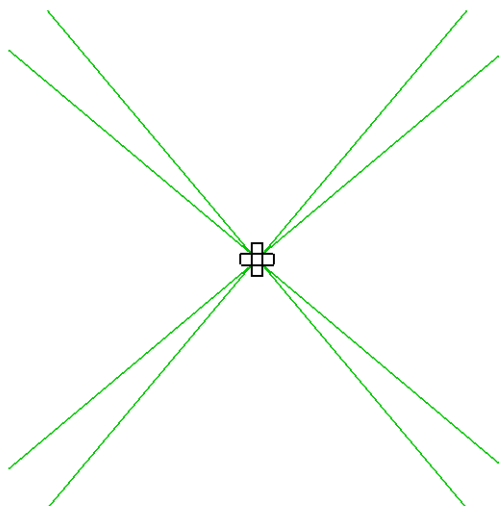
**Figur 3-4.** Forankringssystem med liner kun i senter, for anlegg med 1x4 bur.



**Figur 3-5.** Forankringssystem med fire terminalpunkt, for anlegg med 2x3, 2x2 (to versjoner, med henholdsvis 90 og 5 graders vinkel mellom liner fra samme terminalpunkt) og 1x4 bur.

Det er også sett på et anlegg med 5 bur som vist i figur 3-6. Dette anlegget er tilpasset et forankringssystem med fire terminalpunkt.

En umiddelbar konsekvens av et forankringssystem med redusert antall ankerliner, er at det blir behov for større anker og kraftigere ankerliner.

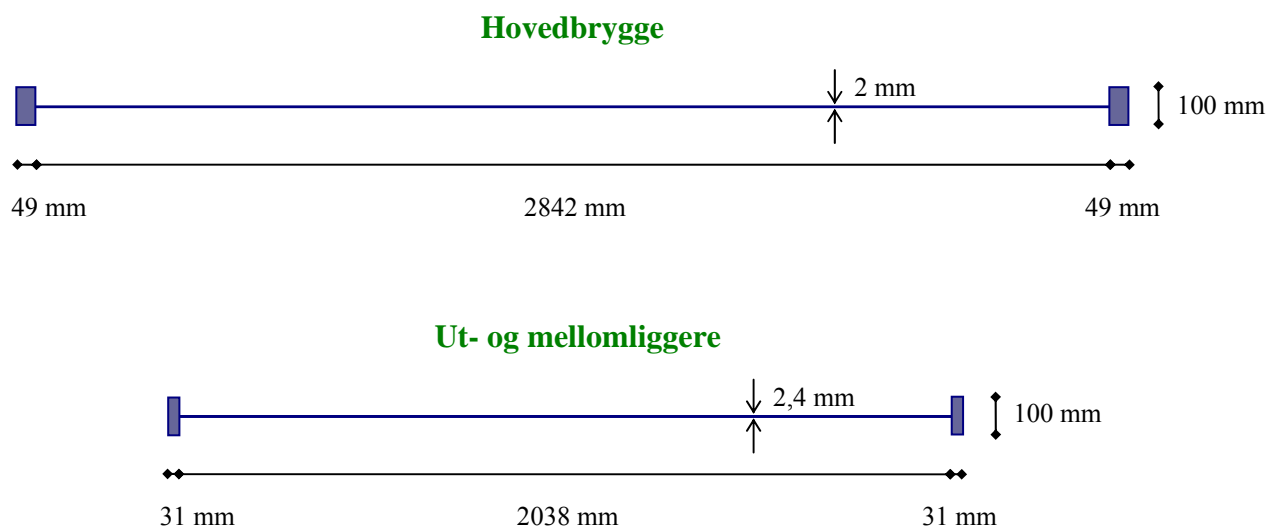


**Figur 3-6.** Forankringssystem med fire terminalpunkt og flyter med 5 bur.

### 3.3.2 Modellering av flyter

I disse forenklete analysene er det i første omgang sett på stålanlegg bestående av 2 x 3, 2 x 2 og 1 x 4 bur (vist i figur 3-2). Anleggene er bygd opp av bur på 24 x 24 m med gangveier på 2 eller 3 meter mellom hvert bur. Nøtene er standard nøter definert i Vedlegg 2.

For modellering av flytekrage er det tatt utgangspunkt i et typisk stålanlegg. Et typisk stålanlegg er bygd opp av hovedbrygger, ut- og mellomliggere. Disse er igjen bygd opp av bjelker og fagverk. For analysene er det utformet forenklete brygger som skal tilsvare de virkelige, men som vil være enklere å regne igjennom, såkalte ekvivalente bjelketverrsnitt. De ekvivalente bjelketverrsnittene har tilnærmet riktig bøyestivhet i horisontalplanet, men skjærstivheten vil være betydelig større enn for det virkelige tverrsnittet. Dette har liten betydning så lenge det kan antas at deformasjonene i flytekragen er små, og det er bøyemomentene som er av interesse. Hovedbrygger og ut- og mellomliggere er modellert som H-bjelker med dimensjoner som vist i figur 3-7.

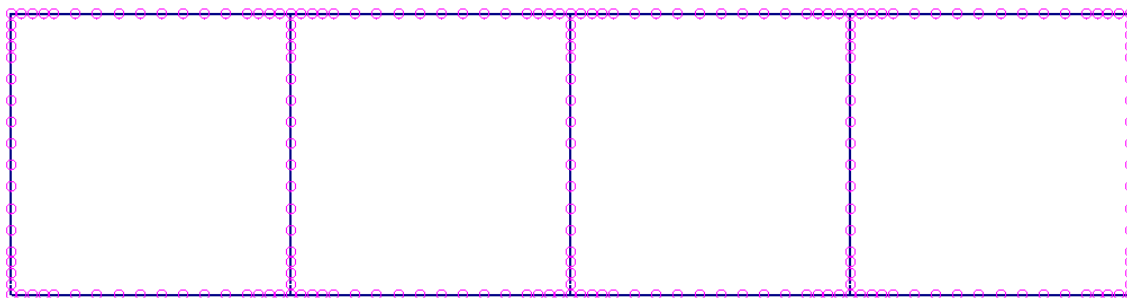


**Figur 3-7.** Tverrsnitt av ekvivalent bjelke for hovedbrygger og ut- og mellomliggere.

Ved bruk av disse ekvivalente bjelkene, kan vekten til anlegget anslås, og de globale belastningene (spenningene) i anlegget beregnes.

De forskjellige stålanleggene er hovedsakelig bygd opp av ut- og mellomligger-elementer, bortsett fra anleggene med 2 x 3 og 2 x 2 bur, hvor den sentrale bjelken er en hovedbrygge.

Et eksempel på modell av flyter med mesh er vist i figur 3-8, hvor hver node er representert med en rosa sirkel. Betydningen av mesh og noder er forklart i (Moe og Heide 2004).



**Figur 3-8.** Modell med mesh. Stålanlegg med 1 x 4 bur.

Det er viktig å merke seg at hovedbryggene er mye kraftigere enn ut- og mellomliggerne, og tåler derfor betydelig større bøyemoment. Det er spenningene som forteller hvor stor del av kapasiteten til stålet som er benyttet. Som følge av bøyemoment, oppstår det bøyepeninger i materialet som kan beregnes ved bruk av følgende formel:

$$\sigma_b = \frac{M}{I} y \quad (1.4)$$

hvor  $M$  er bøyemoment,  $I$  er arealtreghetsmoment (blant annet avhengig av hvor kraftig tverrsnittet til bjelken er) og  $y$  er avstanden fra nøytralaksen til tverrsnittet

Arealtreghetsmomentet beregnes fra geometrien til tverrsnittet og dermed får vi:

$$I_{\text{hovedbrygge}} = \frac{1}{12} \cdot (2 \cdot 2842^3 + 2 \cdot 100 \cdot 49^3) + ((2842 + 49)/2)^2 \cdot 100 \cdot 49 = 14.1 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{ut- og mellomligger}} = \frac{1}{12} \cdot (2.4 \cdot 2038^3 + 2 \cdot 100 \cdot 31^3) + ((2038 + 31)/2)^2 \cdot 100 \cdot 31 = 5.01 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Når disse tallene sammenlignes får vi:

$$I_{\text{hovedbrygge}} = 2.8 \cdot I_{\text{ut- og mellomligger}}$$

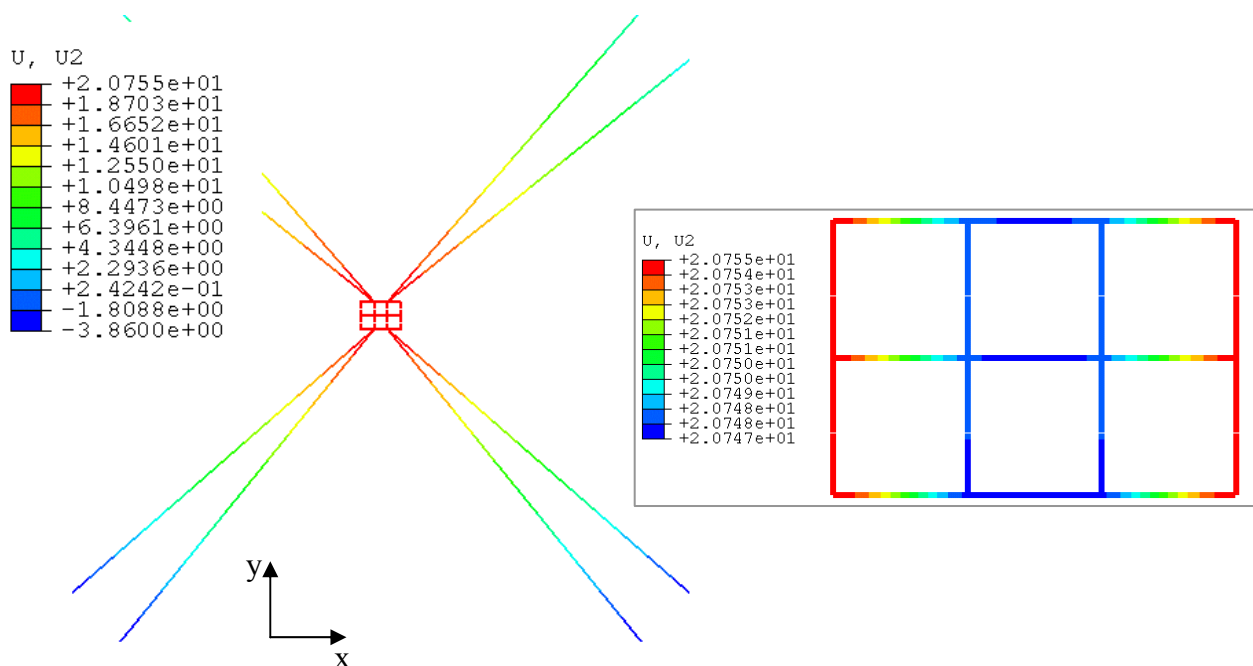
For samme bøyemoment fåes følgende forhold mellom spenningene i hovedbrygge og ut- og mellomligger:

$$\sigma_{\text{hovedbrygge}} = \frac{\sigma_{\text{ut- og mellomligger}}}{2.8}$$

Disse enkle beregningene viser at hovedbryggen tåler 2,8 ganger så mye moment som ut- og mellomliggerne.

Stålanleggene er stive og deformeres svært lite i horisontalplanet. Selv med et forankringssystem som gir relativt store belastninger i flytekragen, deformeres flytekragen kun noen millimeter som

vist i figur 3-9. I realiteten vil deformasjonen av flytekragen være noe større. Dette skyldes hovedsakelig at flytekragen er modellert med for høy skjærstivhet, og at eventuell slakke i hengslene ikke er inkludert i analysene. Likevel vil deformasjonene være små, og de antas å ikke være av betydning for beregning av bøyemoment. Man kan derfor anta at den forenklete modelleringen av flytekragen, ved bruk av ekvivalente bjelker, er god nok for å beregne globale bøyemoment.



**Figur 3-9.** Deformasjon i y-retning. Totalsystem til venstre, flyter til høyre. Deformasjonen i flytekragen er kun noen få millimeter.

Små tøyninger (deformasjoner) i flytekragen og lineære ankerkarakteristikker rettferdiggjør bruk av lineære FEM-analyser for sammenligningsstudier. Flytekragen er produsert i stål med en lineær E-modul på 210 GPa.

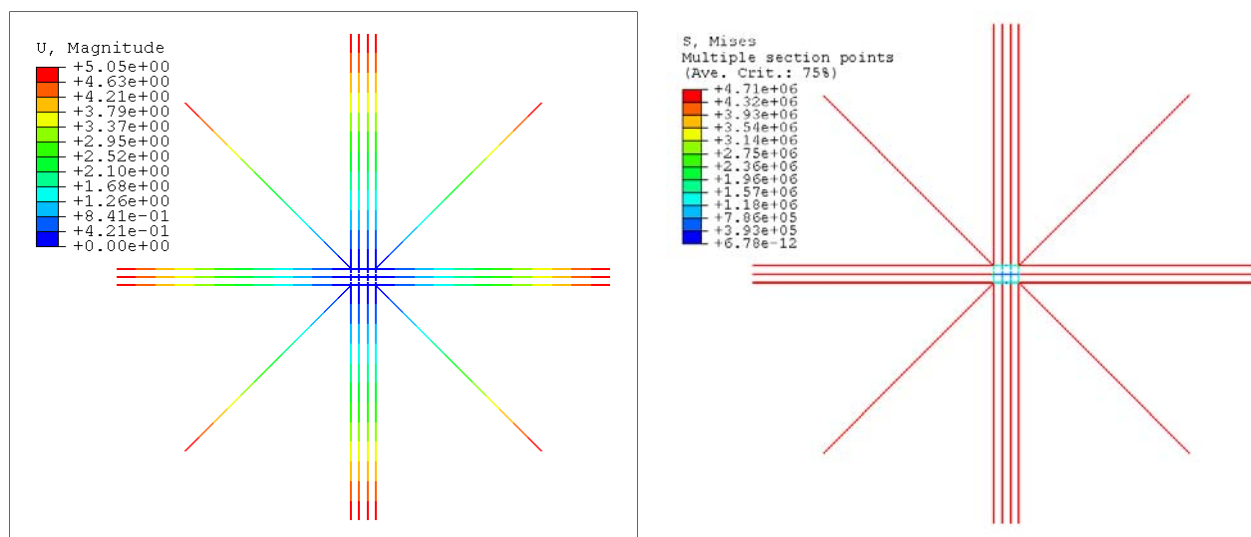
### 3.3.3 Grensebetingelser, forspenning og belastninger

Etter at et anlegg er lagt ut, må forankringslinene strammes opp og forspennes. Å forspenne ei forankringsline betyr at man strammer opp lina slik at det er strekk i lina når anlegget ligger i ro, og anlegget kan bevege seg et stykke i retning av ankeret uten at lina går i slakk.

Forspenning er viktig for å unngå at liner går i slakk i bølger. Anlegget vil ”ri bølgen” og unngå store rykkbelastninger, dersom forankringssystemet har tilstrekkelig forspenning i kombinasjon med tilstrekkelig fleksibilitet. For å unngå dette må man også ha et tilstrekkelig fleksibelt forankringssystem. Bølgene sender anlegget fram og tilbake, og dersom liner går i slakk vil det stadig rykke til i anlegget når en og en line strammes opp igjen. Dette sliter på anlegget. Det hersker uenighet blant aktørene i havbruksnæringa om hvor viktig det er å ha kontroll over størrelsen på forspenninga. Dette kan skyldes at det er vanskelig å se direkte konsekvenser av forspenninga på anlegget.

Dersom linene har betydelig geometrisk fleksibilitet, er det viktig å ha kontroll over forspenningene og dermed fleksibiliteten til linene. Dersom den geometriske fleksibiliteten er ubetydelig, spiller det liten rolle om forspenningen i linene er noe ujevn så lenge det ikke fører til slakk og rykk eller uvirksomme liner.

I analysene er ankerlinene forspent med ca 1 tonn ( $F = \sigma \cdot A = 4,7 \text{ MPa} \cdot 0,002124 \text{ m}^2 \approx 10\,000 \text{ N}$ ) ved at ankerpunktene forflyttes en beregnet distanse på 5,05 meter, som vist i Figur 3-10, og holdes fast i disse posisjonene. Dette er eneste grensebetingelsen som er påført modellen.

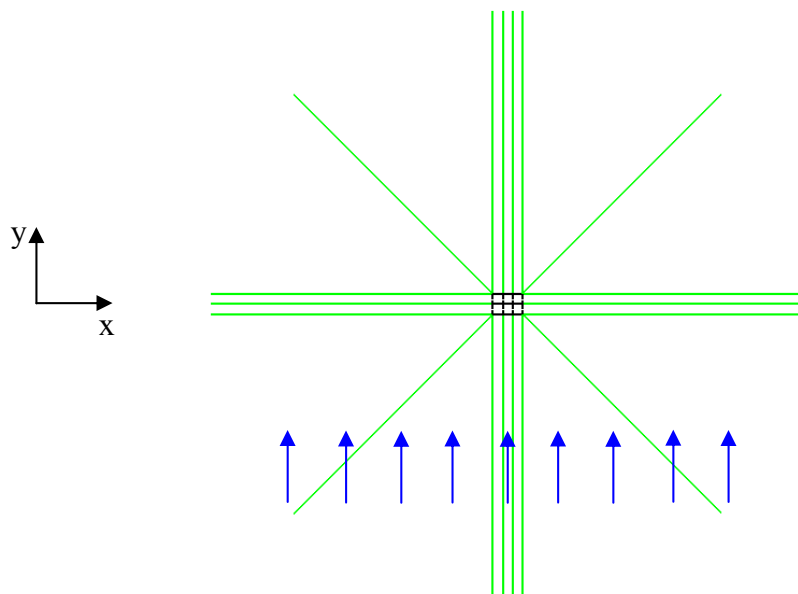


**Figur 3-10.** Forspennig av ankerliner gitt som forskyvning [m] (venstre) og spenning [Pa] (høyre).

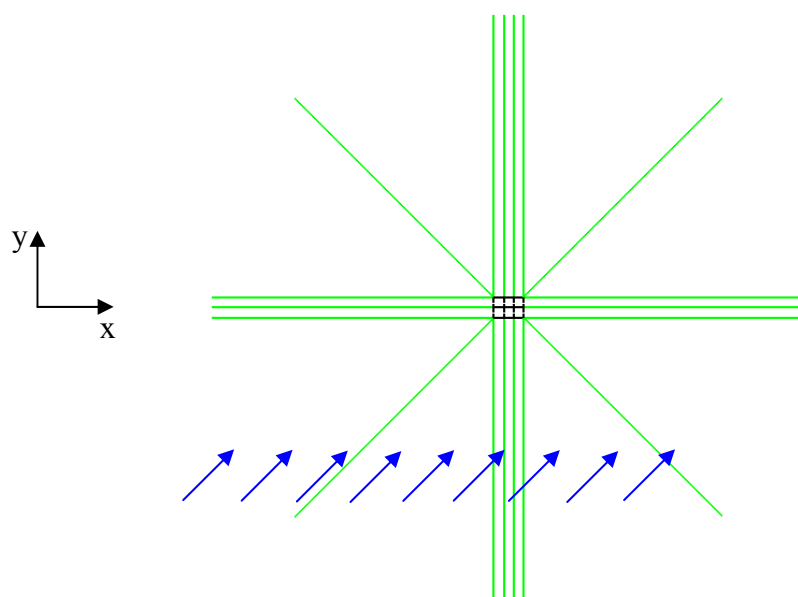
I de statiske analysene er ankerlinene modellert med en horisontal lengde på 750 m, diameter på 52 mm og E-modul på 700 MPa. Den geometriske stivheten i ankerlina neglisjeres. Det er fullt mulig å modellere den ikke-lineære ankerlinekarakteristikken, men det krever ekstra arbeid og anses ikke som viktig for resultatene av disse analysene. Ankerlinene er modellert som stavelementer (ingen bøyestivhet) som ikke tar kompresjon.

Eneste belastning er strømbelastninger (dragkrefter) med hastighet på 0,5 m/s og varierende retning. Strømbelastningen på flytekragen er neglisjerbar sammenlignet med belastningen på nøtene, og er derfor ikke inkludert i analysene. Strømbelastningene er beregnet ved bruk av programmet Notdrag, som tar hensyn til skyggeeffekt (dvs. at strømhastigheten reduseres på vei gjennom nota). Begroing er inkludert ved at tykkelsen til notlinet er økt fra 2 til 3 mm, som tilfredsstiller krav gitt i NS 9415.

Strømkrefter er beregnet i vedlegg 3 for strøm på tvers av anlegget og strøm med retning er grader i forhold til x-aksen. Retningene er vist i figur 3-11 og figur 3-12. I analysene er strømbelastningene påført som jevnt fordelte krefter av varierende størrelse på alle bryggeelementene.



**Figur 3-11.** *Strøm på tvers av anlegget, dvs i y-retning.*



**Figur 3-12.** *Strøm med retning 45 grader i forhold til x-aksen.*

Vedlegg 3 gir i tillegg strømhastigheten inne i burene og notdeformasjon. Tilstrekkelig gjennomstrømming av friskt vann og stort volum i nota, er viktig for at fisken skal vokse godt.



### 3.4 Analyseresultater

#### 3.4.1 Strømbelastninger og reduksjon av strømhastighet

Tabell 3-1 gir de totale belastningene på anleggene fra strøm, og minste strømhastighet i senter av bur for strøm på tvers av anlegget og med retning 45 grader i forhold til x-aksen.

**Tabell 3-1** Totale belastninger på anleggene og minste strømhastighet i senter av bur.

	2 x 3 bur	1 x 4 bur	2 x 2 bur	5 bur
Totale belastning med strøm på tvers av anlegget	13 tonn	11 tonn	10 tonn	12 tonn
Totale belastning med strøm med retning 45 grader	11 tonn	9 tonn	7 tonn	9 tonn
Minste strømhastighet i senter av bur (% reduksjon i parentes)	0,24 m/s <sup>1)</sup> (48 %)	0,35 m/s <sup>1)</sup> (70 %)	0,24 m/s <sup>1)</sup> (48 %)	0,20 m/s <sup>2)</sup> (40 %)

<sup>1)</sup> Strøm med retning 45 grader i forhold til x-aksen.

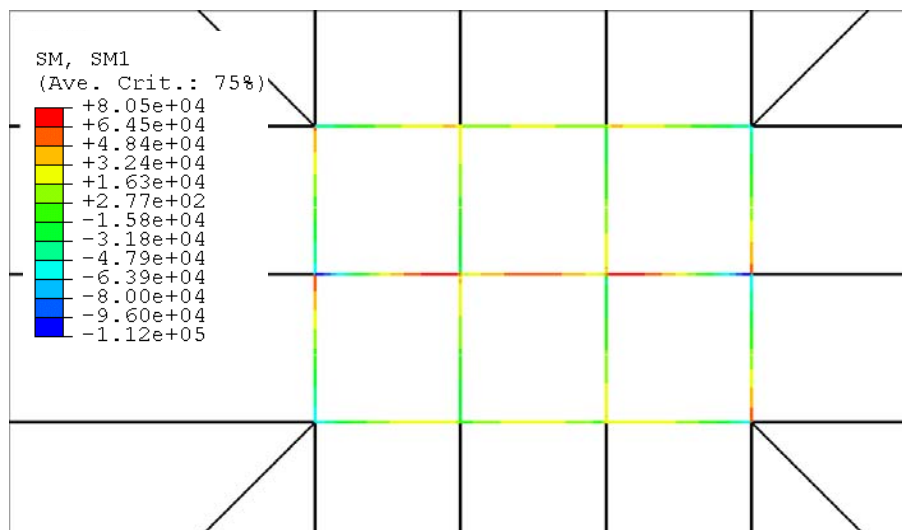
<sup>2)</sup> Strøm med retning 90 grader i forhold til x-aksen (på tvers av anlegget).

#### 3.4.2 Statisk horisontalt bøyemoment

Resultatene fra alle analysene er gitt i detalj som bøyemoment, forskyvninger og maksimale ankerlinekrefter i vedlegg 4, vedlegg 5, vedlegg 6 og vedlegg 7. Bøyemomentene sier lite om hvor mye anleggene tåler, da det som regel er spenningskonsentrasjoner i detaljer som hengsler og kneplater som er kritisk for konstruksjonen. Disse spenningskonsentrasjonene vil ikke komme til syne i disse forenklete analysene. Analysene sier hvor mye de globale bøyemomentene forandres ved forenklet forankring, i forhold til anlegg med standard forankringssystem. I vedleggene er bøyemoment i flyter med forenklet forankringssystem sammenlignet med bøyemoment i flyter med standard forankringssystem.

De forenklete forankringssystemene i avsnitt 3.3.1 har færre terminalpunkter enn et standard forankringssystem. Færre terminalpunkter vil som regel resultere i økt bøyemoment i flytekragen (bøying av flytekragen), økt forskyvning og noen ganger større vertikale bevegelser. I noen spesielle tilfeller vil reduksjon av ankerliner og/eller terminalpunkt i teorien redusere bøyemomentet i flytekragen. Disse tilfellene vil bli beskrevet senere i avsnittet.

Figur 3-13 gir statisk bøyemoment i anlegg med 2 x 3 bur og standard forankringssystem. Tilsvarende plott for alle flyterne og forankringssystem finnes i vedlegg 4 til vedlegg 7. En oversikt over de resulterende maksimale bøyemomentene er gitt i Tabell 3-2. Anlegg med 2 x 3 og 1 x 4 bur vil få de største bøyemomentene med strøm på tvers av anlegget, og er derfor ikke analysert for strøm med retning 45 grader i forhold til x-aksen.



**Figur 3-13.** Statisk horisontalt bøyemoment i flyter med standard forankringssystem og strøm i positiv y-retning [Nm].

**Tabell 3-2** Maksimalt statistisk horisontalt bøyemoment i flyter med varierende antall bur og forankringssystem [kNm].

Forankringssystem /flyter	3 x 2 bur*	2 x 2 bur*	4 x 1 bur*	2 x 2 bur <sup>(45°)</sup> **
Standard	115	73	86	84
Uten tverrliner i hjørnet	36	30	22	65
Kun liner i hjørnet	-	133	233	-
Liner i senter	-	-	271	-
Fire terminalpunkt	153	179	98	200
Fire term. 90 grader***	-	24	-	52

\* Strøm på tvers av flytekragen (y-retning).

\*\* Strøm med retning 45° i forhold til x-aksen.

\*\*\* Spesialtilfelle for flyter med 2 x 2 bur.

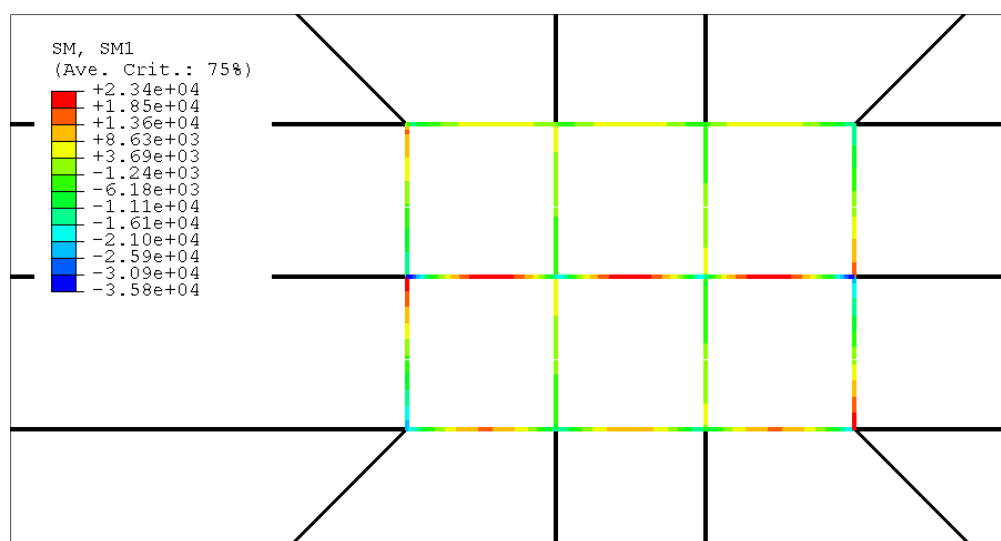
Anlegg med 3 x 2 bur er ikke analysert med ankerliner kun i hjørnene. Dette forankringssystemet vil gi en stor momentarm og dermed store bøyemoment i flytekragen. Det er ikke praktisk mulig å plassere ankerliner i senter av anlegg med 2 x 3 bur. Terminalpunktet må i så fall plasseres midt på et bur, noe som vil introdusere store lokale belastninger i flytekragen.

Anlegg med 2 x 2 bur er analysert med alle variasjoner av forankringssystem, med strøm på tvers av anlegget. Forankringssystem "Liner i senter" er for dette anlegget den samme som "Fire terminalpunkt". Dette anlegget er som eneste anlegg også analysert for strøm med retning 45 grader i forhold til x-aksen. Anlegg med 3 x 2 og 4 x 1 bur vil få de største bøyemomentene med strøm på tvers av anlegget, og er derfor ikke analysert for strøm med retning 45 grader i forhold til

x-aksen. Tabell 3-2 viser at anlegg med 2 x 2 bur blir utsatt for størst bøyemoment når strømmen har retning 45 grader i forhold til x-aksen. Det samme gjelder for et forankringssystem med liner kun i hjørnene. Dette skyldes at momentarmen (avstanden mellom ankerlinene) blir større for denne strømretningen.

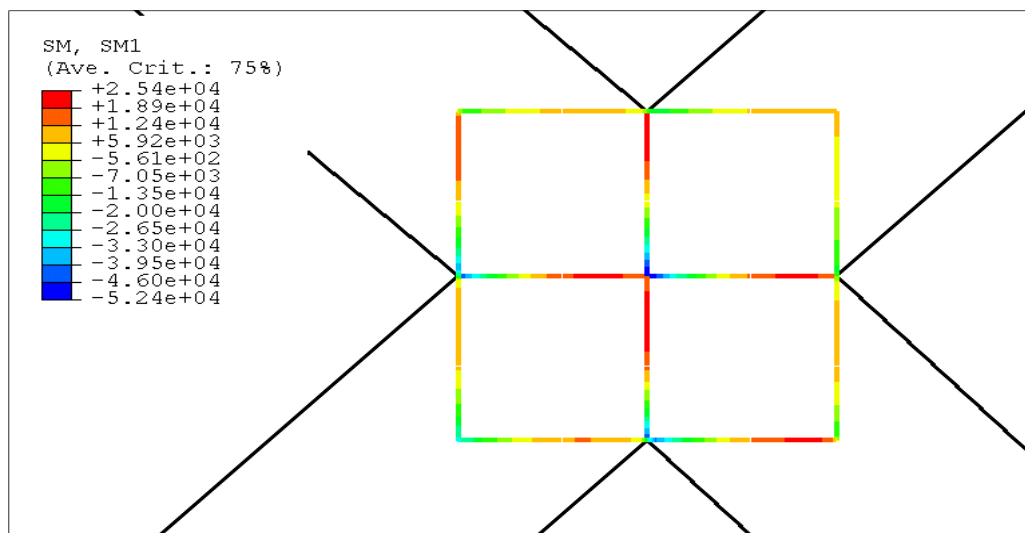
Anlegg med 1 x 4 bur er analysert for alle variasjoner i forankringssystem.

Tabell 3-2 viser at lave moment oppnås for alle anlegg om tverrlinene i hjørnene kuttes. Grunnen til dette er at den totale momentarmen blir mindre når liner lengst borte fra senter av anlegget fjernes, slik at belastningene som var i disse linene fordeles på de gjenværende linene. Dette ser dermed ut til å være et svært gunstig forankringssystem med hensyn til belastninger i anlegget fra strøm. Momentfordelinga er gitt i figur 3-14.



**Figur 3-14.** Horisontalt bøyemoment i flyter med forankringssystem der tverrlinene i endene er fjernet [Nm]. Strøm i positiv y-retning.

For et anlegg med 2 x 2 bur, ser det ut til å være gunstig å ha et forankringssystem med fire terminalpunkt med 90 graders vinkel mellom to liner i en gruppe. Momentfordelinga for dette systemet er gitt i figur 3-15. Totalanlegget i figur 3-15 er mykere enn et anlegg med standard forankringssystem, og vil oppleve større avdrift og rotasjon. Det kan være vanskelig å legge til med båt uten å komme i konflikt med ankerlinene.



**Figur 3-15.** Et eksempel på at redusert antall ankergrupper, terminalpunkt og ankerliner kan gi redusert bøyemoment i flytekragen [Nm].

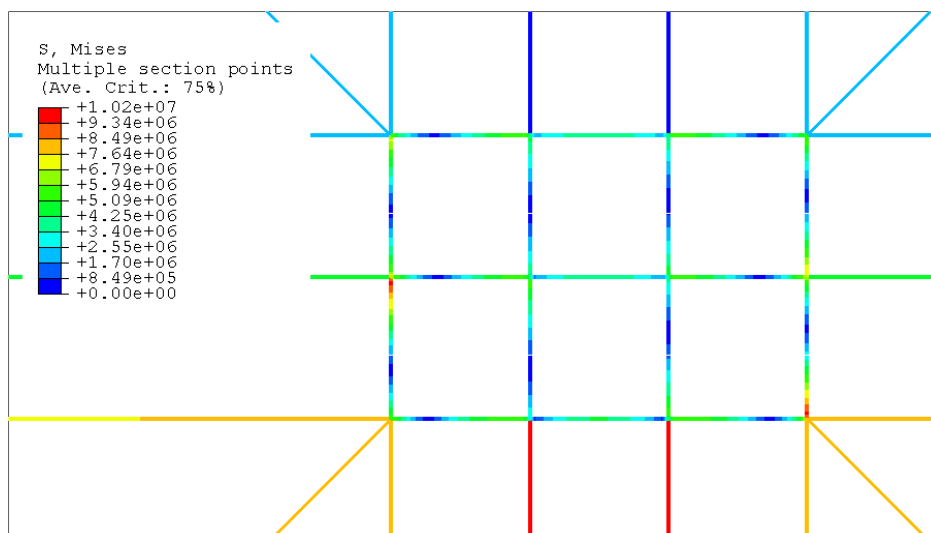
Et forenklet forankringssystem resulterer generelt sett i større forskyvninger av anlegget på grunn av at ankersystemet blir mykere. Det vil bli større krefter i ankerlinene, noe som kan bety at ankerlinene må oppdimensjoneres. Dette vil føre til at forankringssystemet blir stivere. Stivere ankerliner vil ikke påvirke de statiske belastningene i flytekragen, da kreftene i hver line vil være de samme.

Tabell 3-2 viser videre at med ankerliner kun i senter eller hjørnene av flytere, vil flytekragen bli påført store bøyemoment. Et system med fire terminalpunkt, ser ut til å gi en moderat økning i bøyemoment for anlegg med 3 x 2 bur og særlig for anlegg med 4 x 1 bur.

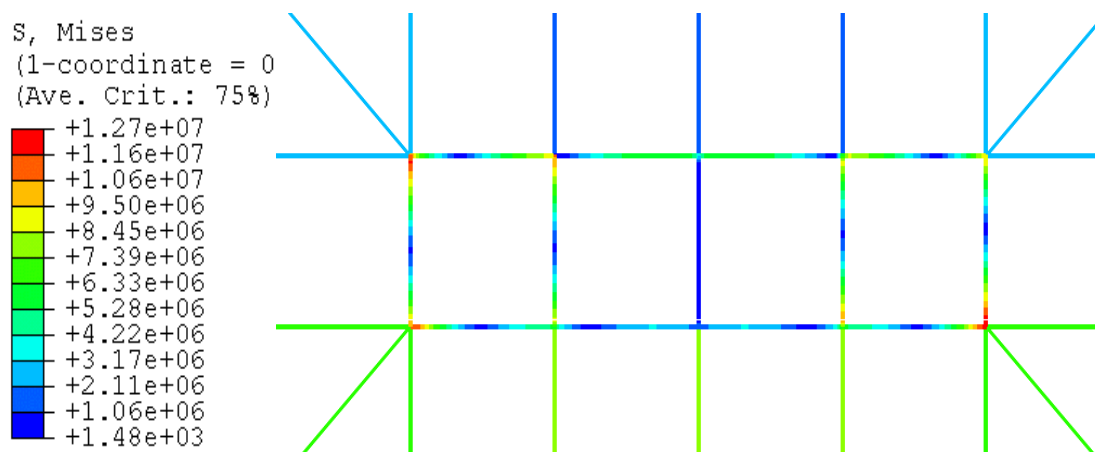
Bøyemomentet forteller hvor store belastninger anlegget blir påført fra strøm, mens spenningene forteller hvor mye av kapasiteten til stålet som er benyttet. Jo høyere spenningen i et materiale er, jo større del av kapasitet er benyttet. For stål med en flytespenning på 235 MPa, kan man godta spenninger opp mot cirka 180 MPa i detaljer. Figur 3-16 til figur 3-18 er spenningsplott for anlegg med standard forankringssystem. Selv om de globale spenningene i anleggene er moderate, kan man ha spenninger som overstiger 180 MPa i forbindelse med detaljer som for eksempel hengsler og kneplater.

Det er viktig å merke seg at anlegget med 4 x 1 bur er bygd opp av mellom- og utliggerer som er mye svakere enn den kraftige hovedbryggen i senter av anlegg med 3 x 2 og 2 x 2 bur (dette er forklart i avsnitt 3.3). I anlegg med 2 x 3 bur, er spenningene omtrent like for hovedbryggen og mellom- og utliggerne som er parallelle til denne, selv om figur 3-13 viser at momentet er betydelig høyere i hovedbryggen.

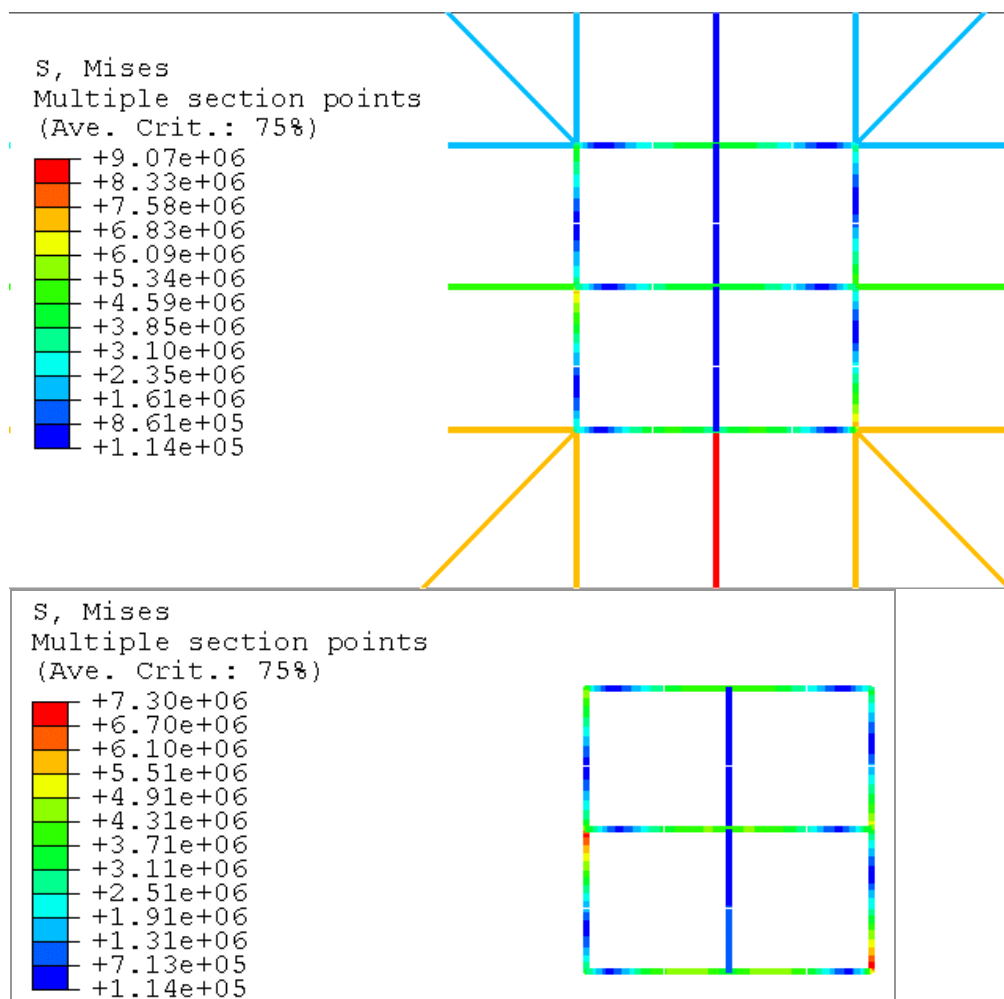
Selv om bøyemomentet har størst maksimalverdi i anlegg med 2 x 3 bur, er spenningene størst i anlegg med 4 x 1 bur. Anlegg med 2 x 2 bur er modellert med en hovedbrygge på tvers av strømretningen. Dersom strømmen skifter retning med 90 grader, vil spenningene i anlegg med 2 x 2 bur øke betydelig, dette fordi hovedbrygga vil følge strømretningen og ikke ta opp moment.



**Figur 3-16.** Spenning i flyter (2 x 3) (på høyre side eller oversiden av bjelkene) med standard forankringssystem og strøm på tvers av anlegget (positiv y-retning), [Pa].



**Figur 3-17.** Spenning i flyter (1 x 4) (på høyre side eller oversiden av bjelkene) med standard forankringssystem og strøm i positiv y-retning [Pa].



**Figur 3-18.** Spenning i flyter (2 x 2) (på høyre side eller oversiden av bjelkene) med standard forankringssystem og strøm i positiv y-retning [Pa]. (I bildet nederst er ankerlinene fjernet for å vise spenningene i flytekragen bedre.)

Tabell 3-3 gir en oversikt over maksimale krefter i ankerlinene for de forskjellige flyterne og forankringssystemene. Alle de forenklede forankringssystemene fører til økte belastninger i ankerlinene i forhold til et standard forankringssystem. Dette er logisk, da det er færre ankerliner som må holde igjen like store krefter. Kraftene i ankerlinene øker med en faktor på opptil 2,1. Sannsynligheten er stor for at forenklede forankringssystemer krever kraftigere ankerliner og anker enn et standard forankringssystem.

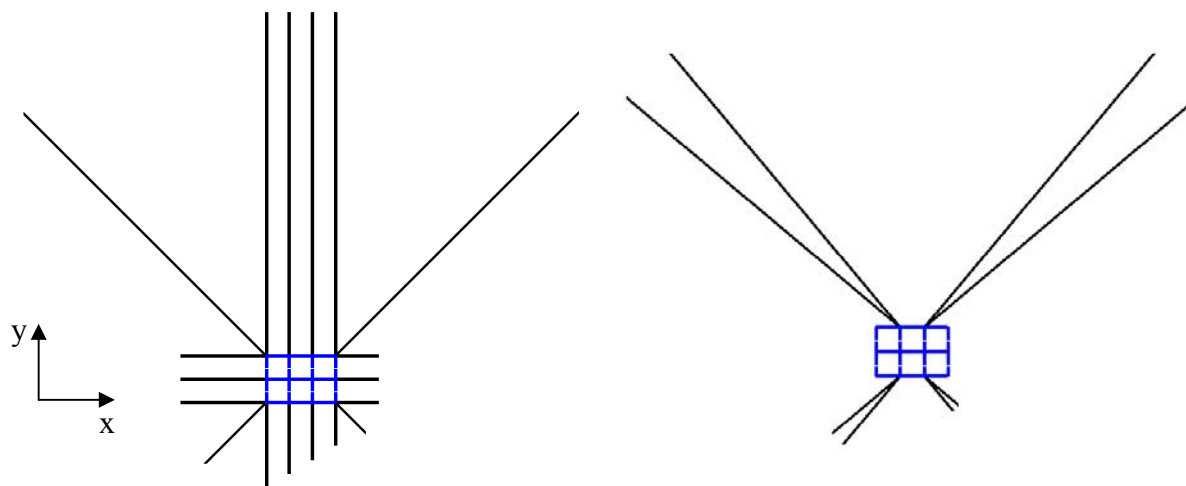
**Tabell 3-3** *Maksimal belastning i ankerlinene for flyter med varierende antall bur og forankringssystem [tonn].*

Forankringssystem /flyter	2 x 3 bur	2 x 2 bur	1 x 4 bur	2 x 2 bur 45 gr.
Standard	2,2	1,9	1,8	2,3
Uten tverrliner i hjørnet	3,5	3,5	2,2	4,4
Kun liner i hjørnet	-	2,8	3,4	-
Liner i senter	-	-	3,4	-
Fire terminalpunkt	4,1	3,8	3,4	3,6
Fire term. 90 grader*	-	2,7	-	4,9

\* Spesialtilfelle for flyter med 2 x 2 bur.

### 3.4.3 Følsomhet for variasjon i dybde

Følsomhet for variasjon i dybde ved ankerpunkt har blitt vurdert for anlegg med seks bur (2 x 3 konfigurasjon) og henholdsvis standard og forenklet forankringssystem. Forankringssystemene er vist i Figur 3-19.



**Figur 3-19.** *Forankringssystem for anlegg forankret i skrånende terreng. Standard til venstre og forenklet til høyre.*

Analysene er utført for et stålanlegg forankret i skrånende terreng med strøm i positiv y-retning. Ankrene på le-siden er antatt plassert på 400 meters dybde, mens dybden på lo-siden varierer fra 50 til 100 meter. Lengden på ankerlinene er gitt som fire ganger dybde ved anker.

Ankerlinene er modellert med en lengde som er en fjerdedel av den virkelige horisontale lengden. For å kompensere for dette er linene gitt en E-modul som er en fjerdedel av den virkelige E-modulen, slik at stivheten til linene er korrekt modellert ( $K = A E / l$ ). Det er kun stivheten til

ankerlinene som er interessant for analysene, så den forkortede lengde til ankerlina vil ikke påvirke resultatene.

I Tabell 3-4 er resultatene fra analyser av anlegg med anker på varierende dybde presentert og sammenlignet med resultater for konstant dybde. Fordeling av moment og krefter er illustrert i Vedlegg 8.

**Tabell 3-4** *Maksimalt bøyemoment, aksial- og skjærkraft for de to forskjellige forankringssystemene ved konstant og varierende vandyp.*

	<b>Bøyemoment</b>	<b>Aksialkraft</b>	<b>Skjærkraft</b>	<b>Faktor*</b>
<b>Konstant vandyp</b>				
Standard	115 kNm	26 kN	15 kN	1 / 1 / 1
Forenklet	153 kNm	58 kN	17 kN	1.33 / 2.3 / 1.11
<b>Variierende vandyp</b>				
Standard	150 kNm	40 kN	18 kN	1.31 / 1.6 / 1.15
Forenklet	155 kNm	65 kN	17 kN	1.35 / 2.5 / 1.11

\*Bøyemoment, aksialkraft og skjærkraft i forhold til tilsvarende størrelser fra analyser med standard forankringssystem og konstant vandyp.

Resultatene viser at den forenklede forankringsløsningen er mindre følsom ovenfor variasjoner i dybde og stivhet i ankerlinene. Både bøyemoment, aksial- og skjærkraft påvirkes i mindre grad av stivhetsvariasjoner i ankerlinene. Dette skyldes at forankringssystemet har to terminalpunkt på langsiden, slik at man ikke får en situasjon hvor det er en problemstilling med variasjon i stivheten og dermed kreftene i forankringslinene.

#### 3.4.4 Verifisering av analysene

For verifikasjon, er analysene fra ABAQUS sammenlignet med tilsvarende resultater fra analyser ved bruk av et internt program, AQUASYS (Lien 2004). Resultatene for et stålanlegg med 1 x 6 bur konfigurasjon er presentert i figur 3-20 til figur 3-23. Som det fremkommer gir de to analyseprogrammene sammenfallende resultat. Stålanlegget er analysert både med standard forankringssystem og forankringssystem uten tverrliner i hjørnene.

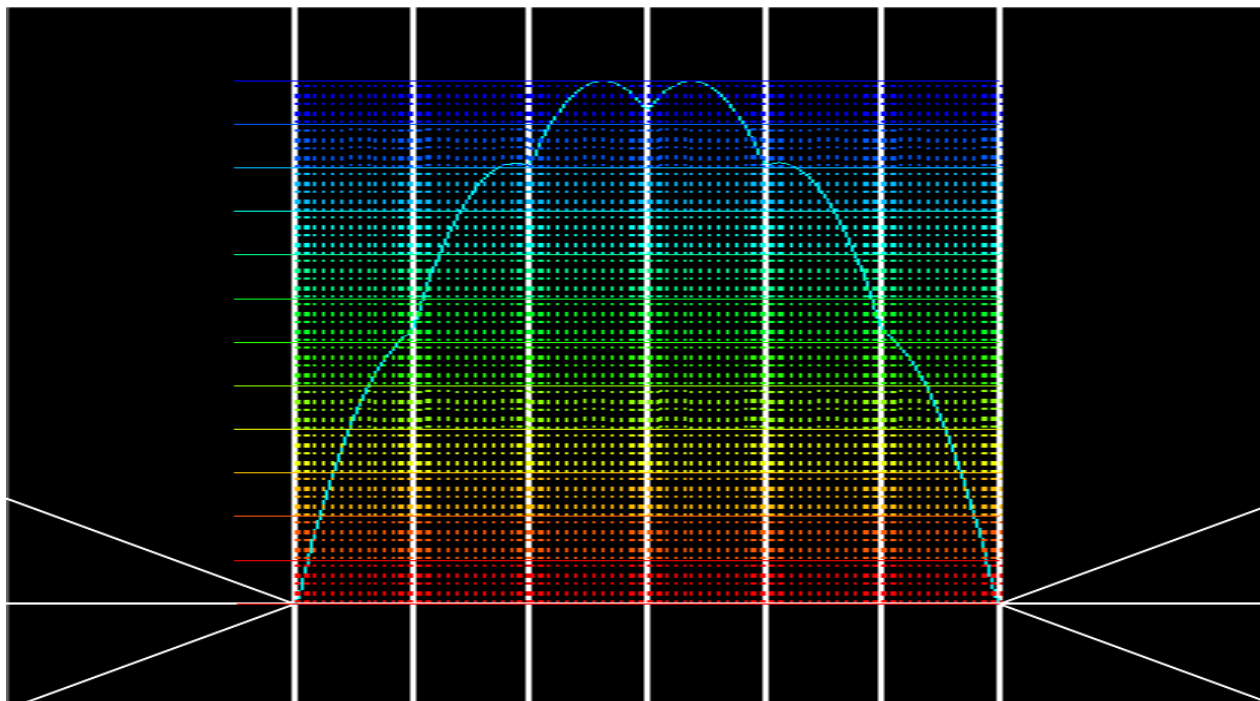
Anlegget modellert i AQUASYS består av seks 20 m brede bur, er totalt 120 m langt og er utsatt for en jevnt fordelt last på totalt 30 tonn. Anlegg modellert i ABAQUS (beskrevet i avsnitt 3.3.2) har bur med bredde på 26 meter som tilsvarer en total lengde på 156 m. For å oppnå tilsvarende moment, er dette anlegget påført en jevnt fordelt belastning på totalt 24 tonn (siden burene er bredere vil armen være større). Det kreves dermed en mindre last for å oppnå samme moment.

AQUASYS gir et maksimalt bøyemoment på 1230 kNm for det originale forankringssystemet, og momentet reduseres til ca 200 kNm når de fire ankerlinene på tvers av endene til flytekragen fjernes. Dette tilsvarer en reduksjon i bøyemoment på ca 80 %.

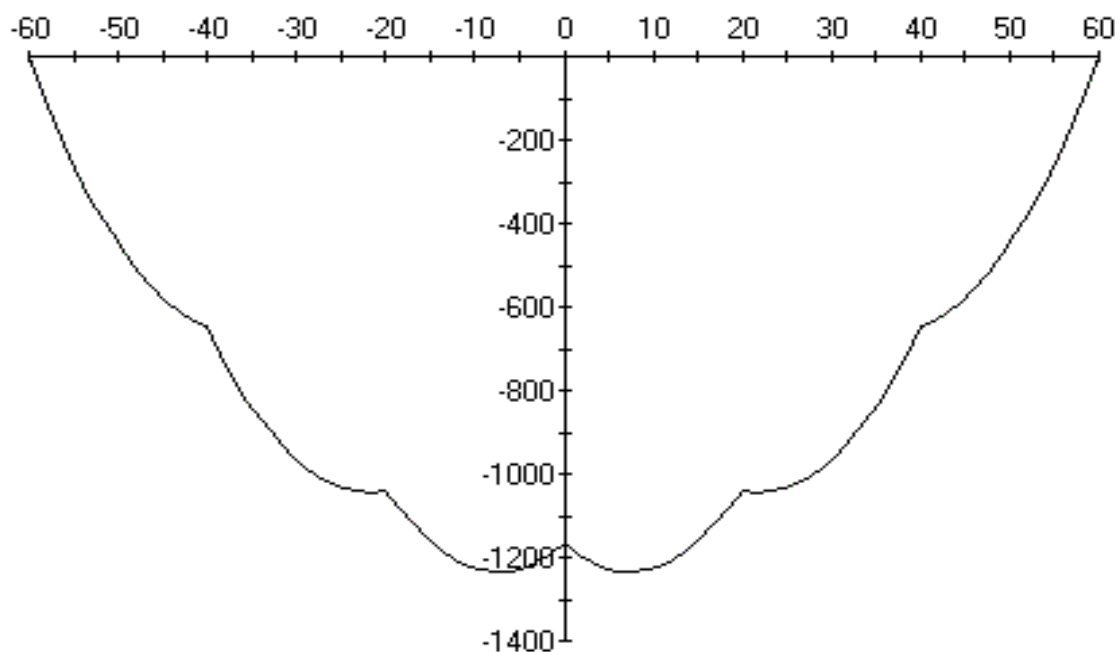
ABAQUS-analysene gir et maksimalt bøyemoment på 1210 kNm for det originale forankringssystemet, mens momentet er redusert til ca 240 kNm når de fire ankerlinene på tvers av endene til flytekragen fjernes. Dette tilsvarer også en reduksjon i bøyemoment på ca 80 %.

Det er dermed godt samsvar mellom resultatene fra de to analyseprogrammene og metodene.

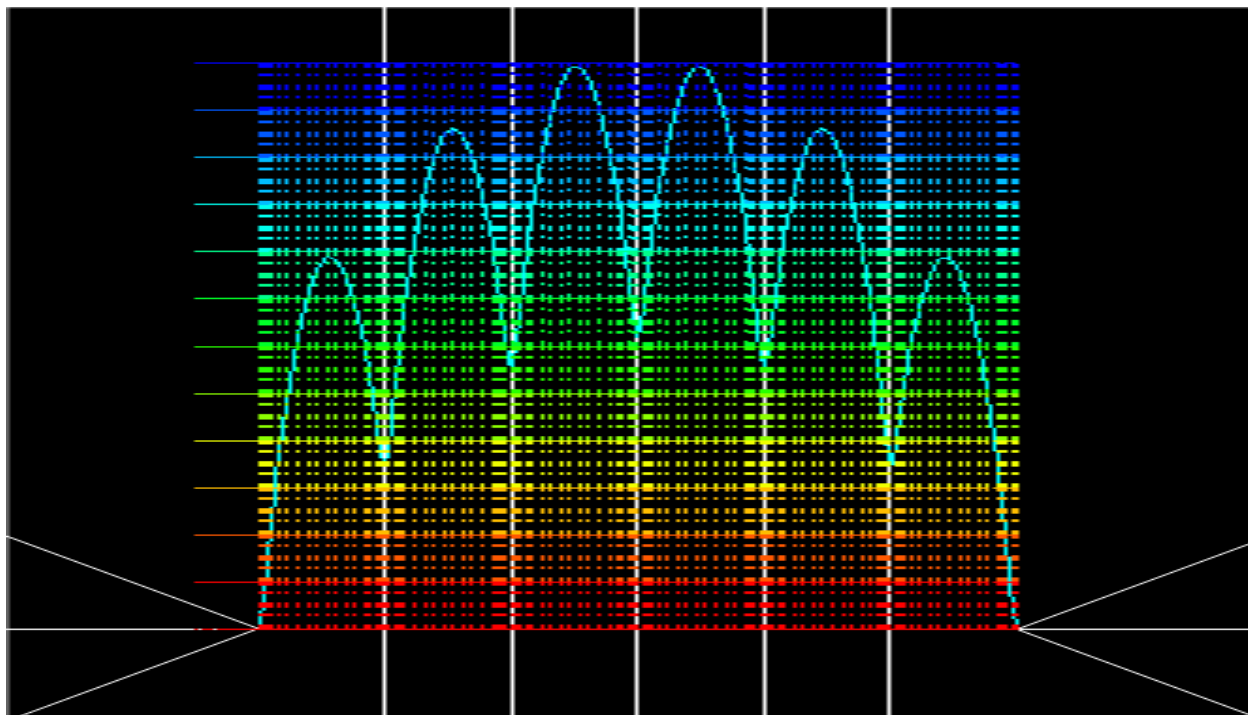




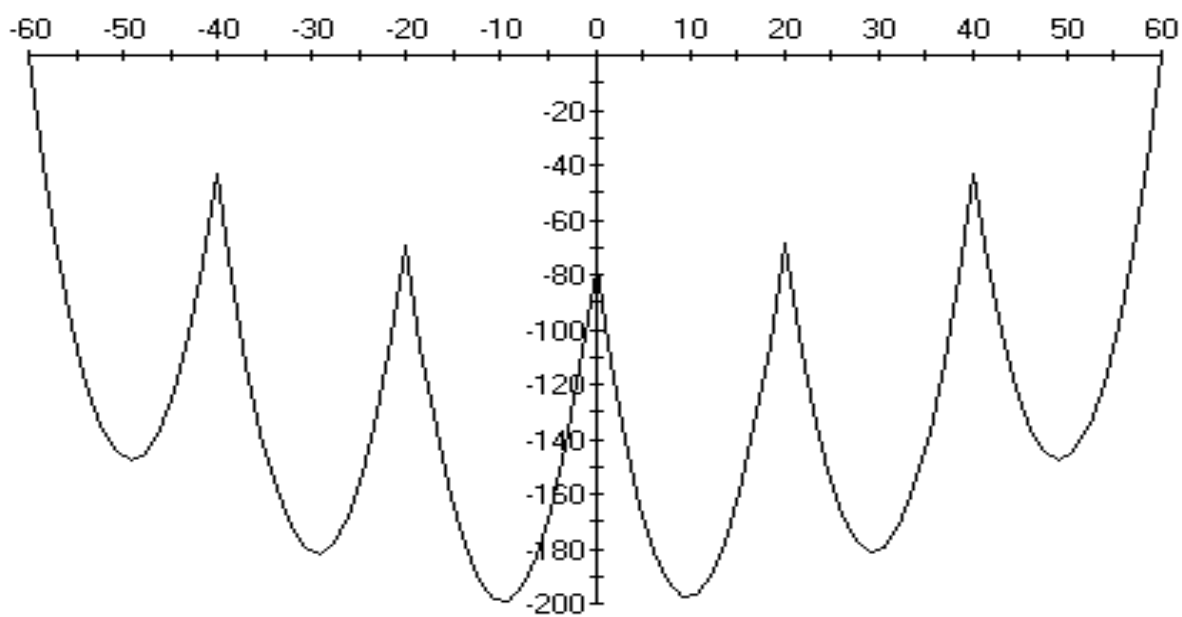
**Figur 3-20.** Bøyemoment for standard forankringssystem ved bruk av ABAQUS [Nm].



**Figur 3-21.** Bøyemoment for standard forankringssystem ved bruk av AQUASYS [kNm].



**Figur 3-22.** Bøyemoment for forankringssystem uten tverrliner i hjørnene ved bruk av ABAQUS [Nm].



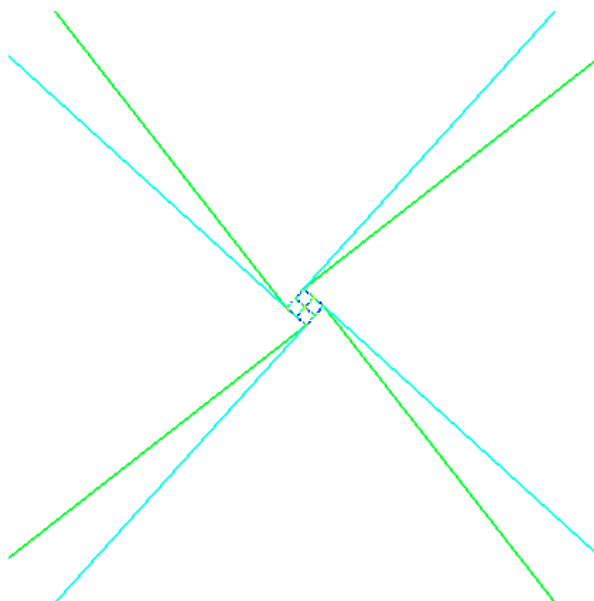
**Figur 3-23.** Bøyemoment for forankringssystem uten tverrliner i hjørnene ved bruk av AQUASYS [kNm].

### 3.4.5 Beregning av stivhet, masse og egenperioder

Stivheten til totalsystemet forteller hvor stor kraft som må påføres anlegget for å gi det en gitt forskyvning. Denne krafta kan variere avhengig av eventuell eksisterende forskyvning av anlegget. Dersom stivheten til systemet er kjent og belastningene anlegget vil utsettes for kan anslås, kan det anslås hvor stort område anlegget vil bevege seg over. Har totalsystemet en liten stivhet (ankerlinene er fleksible), vil flytekragen få relativt store bevegelser, og motsatt.

Stivheten til forankringssystemet må være kjent for at egenperiodene til totalsystemet skal kunne beregnes. Det er viktig å kjenne egenperiodene for å vite om det er fare for resonans med bølgene (kan inntreffe når bølgeperioden er lik egenperioden). Når totalsystemet er i resonans med bølgene, vil anlegget settes i stor bevegelse. Responen er vanligvis ikke et problem for havbruksanlegg fordi nøtene vil dempe bevegelsene. I tillegg kan saktevarierende bevegelser introdusere store dynamiske krefter i anker systemet.

Den globale stivheten til et totalsystem, i translasjon i x- og y- retning og rotasjon i horisontalplanet, kan finnes gjennom analyser i ABAQUS. Den aktuelle modellen utsettes for tvungen forskyvning eller rotasjon, og resulterende krefter og momenter kan plottes som funksjon av forskyvning og rotasjon. En illustrasjon av forskyvning og rotasjon av et anlegg med 2x2 burs konfigurasjon er vist i figur 3-24.



**Figur 3-24.** Illustrasjon av tvungen rotasjon av anlegg med 2 x 2 bur og forankringsliner kun i hjørnene.

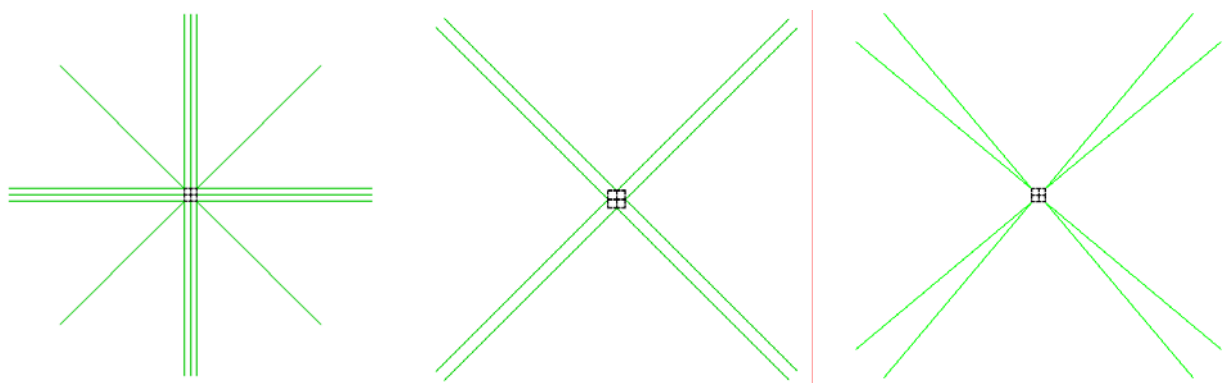
Tre forankringssystemer er analysert med hensyn på stivhet i forskyvning og rotasjon (figur 3-25). I figur 3-26 og figur 3-27 er resultater for forskyvning og rotasjon vist for disse konfigurasjonene. Ut i fra resultatene kan global stivhet i translasjon i x- og y- retning og rotasjon i horisontalplanet for en flytekrage med 2 x 2 bur og varierende forankringssystem finnes. Stivheten til systemet ved en gitt forskyvning eller rotasjon, kan finnes som stigningstallet til kurvene:

Global stivhet i x- og y- retning:  $K_t = \Delta\text{Kraft}/\Delta\text{Forskyvning}$  [N/m]

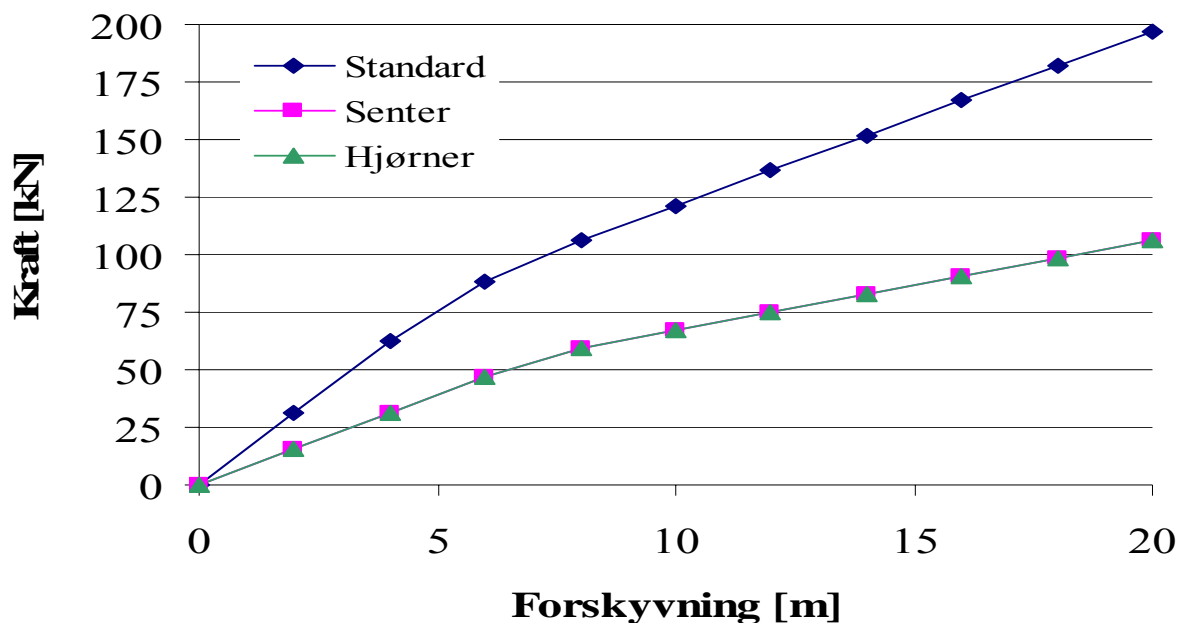
Global stivhet i rotasjon:  $K_r = \Delta\text{Moment}/\Delta\text{Rotasjon}$  [Nm/rad]

Stivhet i translasjon og rotasjon for de forskjellige forankringssystemene er gitt i Tabell 3-5.

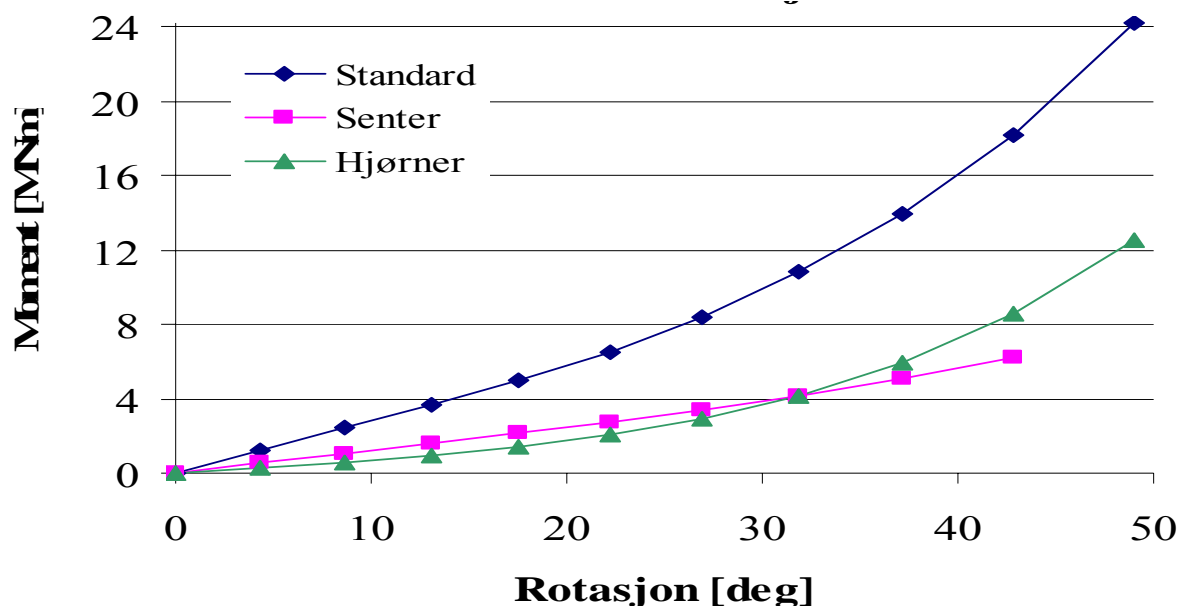
Den globale stivheten i x- og y- retning er delvis lineær. Kurvene øker lineært opp til 5 m. I dette området er linene på le-sida fremdeles i strekk (som følge av forspenning beskrevet i avsnitt 3.3.3). Deretter reduseres kurvens stigningstall (stivheten til systemet) når linene på le-sida har gått i slakk. Standard forankringssystem er betydelig stivere (dobbel så stivt) enn anlegg med liner i senter eller hjørner for en deformasjon opptil 5 m. Ved ytterligere forskyvning av anlegget vil forskjellene i stivhet reduseres, men standard forankringssystem vil fremdeles være noe stivere. Det er antatt samme ankerlinetykkelse for alle forankringssystemene. Tykkelsen må antagelig økes for anlegg med liner i senter eller hjørner, og stivheten vil øke.



**Figur 3-25.** Varierende forankringssystem. Fra venstre: "Standard", "Senter" og "Hjørner".



**Figur 3-26.** Kraft som funksjon av forskyvning i x- og y- retning for anlegg med 2 x 2 bur og varierende forankringssystem (se figur 3-25).



**Figur 3-27.** Moment som funksjon av rotasjon i horisontalplanet for anlegg med 2 x 2 bur og varierende forankringssystem (se figur 3-25).

**Tabell 3-5** Stivhet i translasjon (x- og y-retning) og rotasjon.

	Stivhet i translasjon [kN/m]		Stivhet i rotasjon [MNm/rad]			
	dx < 5 m	dx > 8 m *	$\alpha < 9^\circ$	$9^\circ < \alpha < 18^\circ$	$18^\circ < \alpha < 27^\circ$	$27^\circ < \alpha < 37^\circ$
Standard	15,6	7,7	16,0	16,4	21,1	31,1
Senter	7,8	4,0	7,0	7,3	7,4	9,4
Hjørner	7,9	3,9	3,6	5,4	9,5	17,0

\*dx > 8 m tilsvarer en situasjon der ankerlinene på le side er gått i slakk (strømkraftene overstiger forspenningen).

For å finne egenperiodene til anleggene, må man kjenne den totale massen til flytekragen. Hovedbrygger, ut- og mellomliggere i flytekragen er modellert med ekvivalente bjelker i analysene. Det betyr at massen til flytekragen kan estimeres i ABAQUS. Ekstra utstyr slik som rister til gangvei, rekkverk, pongtonger, skur og annet, er ikke inkludert i dette estimatet. Det er derfor valgt å multiplisere den estimerte vekten med en faktor på 1,5. Nota er tilnærmet nøytral i vannet så lenge den ikke er tungt begrodd, og vil dermed ikke øke massen til anlegget, men den vil ha tilleggsmasse når den blir utsatt for akselererende bevegelser i vannet. Tilleggsmassen er i praksis ikke konstant (fordi akselerasjonen varierer), men er anslått til cirka 1 tonn per not i beregningen av massen til totalanlegget. Loddvektene må inkluderes og det antas at de tilsvarer ca 1 tonn per not i neddykket tilstand. Forankringslinene er nøytrale i vann, og vil ikke påvirke massen til anlegget.

Regnestykket blir da som følger:  $M = M_{\text{ABAQUS-modell}} + M_{\text{utstyr}} + M_{\text{not}} + M_{\text{lodd}}$

$$M = M_{\text{ABAQUS}} \cdot 1,5 + 4 \cdot 1 + 4 \cdot 1 = 19,4 \cdot 1,5 + 4 + 4 = 37 \text{ tonn.}$$

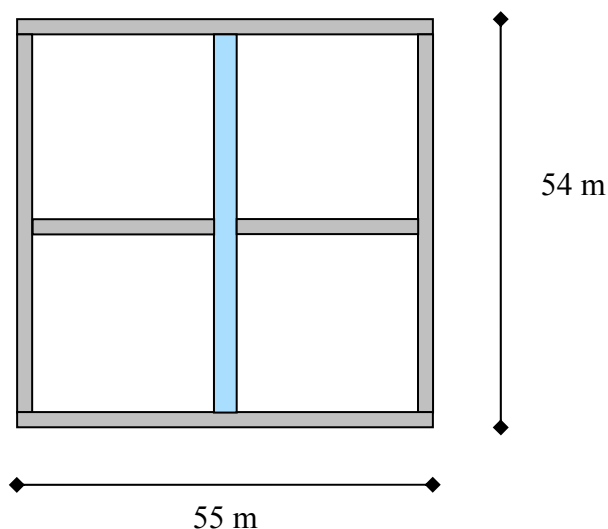
Tung begroing og noen typer impregnering, vil kunne bidra til å øke både massen og tilleggsmassen til nota.

Egenperiodene kan beregnes som følger:

$$\text{I translasjon, } T_t = 2\pi\sqrt{M/K_t}.$$

$$\text{I rotasjon, } T_r = 2\pi\sqrt{I_z/K_r}, \text{ hvor } I_z \text{ er massetregghetsmomentet.}$$

Massetregghetsmomentet er avhengig av fordelinga av massen i horisontalplanet, og geometrien til flytekragen. Det antas at massen er fordelt over bryggene, slik at massen til hovedbryggen er 50 % større enn massen til ut- og mellomliggerne:  $M_H = 1,5 \cdot M_{U/M}$ . Videre antas det at massen av utstyr, nøter og lodd fordeles jevnt over anlegget. Massetregghetsmomentet til en brygge er  $I_z = 1/12 M(l^2 + b^2)$  hvor  $l$  er lengden og  $b$  er bredden. Det totale tregghetsmomentet til anlegget er summen av  $I_z$  for hver enkelt brygge pluss Steiner-tillegget (tar hensyn til effekten av massens avstand fra senter av anlegget). Anlegget er bygd opp som vist i figur 3-28.



**Figur 3-28.** Oppbygging av anlegg med 2 x 2 bur. Ut- og mellomliggerne (grå) er 2.1 m brede, mens hovedbrygga (blå) er 2.9 m bred.

Masse per meter ut- og mellomligger:

$$M/l_{U/M} = 37000\text{kg}/(2 \cdot 55 + 2 \cdot 24 + 2 \cdot 50 + 50 \cdot 1.5)\text{m} = 111 \text{ kg/m}$$

$$M/l_{U/M}(l_{U/M}) = 111 \cdot l_{U/M} \text{ [kg]}, \text{ hvor } l_{U/M} \text{ er lengden til en ut- eller mellomligger.}$$

Avhengig av lengden, fås følgende masser for ut- og mellomliggere:

$$M_{U/M}(55\text{m}) = 6105\text{kg}$$

$$M_{U/M}(50\text{m}) = 5550\text{kg}$$

$$M_{U/M}(24\text{m}) = 2664\text{kg}$$

Masse per meter hovedbrygge:

$$M/l_H = 1.5 \cdot 111 \text{ kg/m} = 167 \text{ kg/m}$$

$$M_H(50\text{m}) = 8350\text{kg}$$

Totalt massetregghetsmoment blir da:

$$\begin{aligned}
 I_z &= 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 6105 \cdot (55^2 + 2 \cdot 1^2) + 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 2664 \cdot (24^2 + 2 \cdot 1^2) + 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 5550 \cdot (50^2 + 2 \cdot 1^2) \\
 &+ 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 8350 \cdot (50^2 + 2 \cdot 9^2) + 2 \cdot 26^2 \cdot 6105 + 2 \cdot 26 \cdot 5^2 \cdot 5550 = 3082 + 258 + 2317 \\
 &+ 3491 + 8254 + 7795 \text{ tonn} \cdot \text{m}^2 = 2.52 \cdot 10^4 \text{ tonn} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}$$

Massen (M), stivheten ( $K_t$  og  $K_r$ ) og massetregghetsmomentet ( $I_z$ ) til totalsystemet er nå kjent. Dermed kan egenperiodene til systemet beregnes. Disse er gitt i Tabell 3-6.

**Tabell 3-6** Egenperioder i translasjon (x- og y-retning) og rotasjon.

	Egenperioder i translasjon [s]		Egenperioder i rotasjon [s]			
	dx < 5 m	dx > 8 m*	$\alpha < 9^\circ$	$9^\circ < \alpha < 18^\circ$	$18^\circ < \alpha < 27^\circ$	$27^\circ < \alpha < 37^\circ$
Standard	10	14	8	8	7	6
Senter	14	19	12	12	12	10
Hjørner	14	19	17	14	10	8

\*dx > 8 m tilsvarer en situasjon der ankerlinene på le side er gått i slakk (strømkreftene overstiger forspenningen).

Når strømkreftene overstiger forspenningen, går halvparten av ankerlinene i slakk og stivheten til totalsystemet i translasjon halveres (som vist i Tabell 3-5). Man får da følgende uttrykk for egenperioden i translasjon:

$$T_t^* = 2\pi\sqrt{M/K_t^*} = 2\pi\sqrt{M/(0,5 \cdot K_t)} = 1,4 \cdot T_t$$

Hvor  $T_t^*$  er egenperioden i translasjon for anlegg hvor halvparten av ankerlinene er i slakk  
 $T_t$  er egenperioden i translasjon for anlegg hvor alle ankerlinene er i strekk

Når halvparten av ankerlinene går i slakk, må man multiplisere egenperioden i translasjon med en faktor på 1,4. Dette gjelder for alle forankringssystem og flytere. Ved tungt begrodde nøter, blir massen og dermed egenperiodene til totalsystemet større.

## 4 Analyse av eksisterende anlegg med forenklet forankring

### 4.1 Generelt

Som et ledd i det å verifisere muligheten av å legge ut et eksisterende stålanlegg med forenklet forankring samlet i maksimum 4 nedslagsgrupper, ble det gjennomført noen komplette analyser av to forskjellige 6 burs reelle stålanlegg. Ankersystemene har blitt vurdert ut i fra strekkbelastning og total momentbelastning. Dette er en litt upresis oppdeling i forhold til kapasitetskontroll, men nøyaktig nok for relative vurderinger. En strøm hastighet på 0,5 m/s er benyttet, tilsvarende strømklasse b i NS9415. Strømretningene 0 (i lengderetningen) og 90 grader ble i første omgang prioritert, men ble senere komplementert med noen resultater fra 45 grader. 45 grader svarer til et maksimalt eksponert tverrsnittsnotareal og høyest belastning.

### 4.2 Strekk- og momentfordeling i 6 burs stålanlegg

Resultatene er presentert i vedlegg 10, figur 1 til figur 7. Fra resultatene framgår at 8 liners systemet (Betegnet M4) gir størst strekk belastning i utliggerne inn mot katamaranene (kobling inn mot hovedbryggen) når strømmen er 0 grader (i lengderetningen til anlegget). Som det kommer frem fra analysene, blir strekkbelastningen 2.5 ganger høyere enn for et 28 liner forankringssystem (Betegnet M0). Om et forenklet forankringssystem med et standard system sammenlignes, men med brudd i en ankerline 8 (Betegnet M2), blir belastningen for det forenklete systemet noe større. Det forenklete forankringssystemet er mindre påvirket av et eventuelt brudd i en line, siden to og to liner er festet til samme punkt.

I vedlegg 10, figur 4 og figur 5 er resultater for strøm inn på tvers, 90 grader, presentert. I dette tilfellet øker strekkbelastningene for mellomligger på loside med en faktor på 3, fra 45.7 kN til 137 kN. I figur 6 og figur 7 er resultat for strøm inn 45 grader på anlegget presentert. Også fra disse analysene er det tydelig at den maksimale belastningen på anlegget øker betydelig med et system med forenklet forankring.

Vedlegg 10, figur 8 til figur 14 presenterer tilsvarende resultat for momentbelastning for de samme analysene. Vi får en økning av momentbelastningene med en faktor på tre når strømretningen er 90 grader og man går over til 8 liners systemet. Moment og strekkbelastningene ser derfor ut til å være like følsom for ankerlinereduksjon. Generelt er ikke momentbelastningen kritisk i en statisk analyse. Det er bølgeresponsene som mest sannsynlig overskrider kapasiteten til konstruksjonen. I kombinasjonen høy strøm og høye krappe bølger er derimot konstruksjonskapasiteten liten.

Det er tydelig fra disse analysene at et tradisjonelt stålanlegg ikke vil kunne forankres med forenklet 8 liners ankersystem, uten at kapasiteten til stålanlegget økes eller at stålanlegget redesignes. Derimot, for et helt stivt anlegg, vil et slik forenklet forankringssystem kunne ha et større potensial.

Tabell 4.1 gir en oppsummering av resultatene fra analysene.



**Tabell 4-1** Største strekk og moment for M0 (28 liners), M2 (24 liners), M4 (8 liners)

Størrelse	M0 (0°)	M0 (45°)	M0 (90°)	M2 (0°)	M4 (0°)	M4 (45°)	M4 (90°)
Strekk [kN]	32.8	59.1	45.7	74.7	82.9	176.	137.
Moment [kNm]	6.0	11.4	7.3	12.1	13.4	29.1	22.4

### 4.3 Muligheten for store saktevarierende bevegelser

For forankrede konstruksjoner, flåter, skip og flytende plattformer vil saktevarierende bevegelser i mange tilfeller dominere det dynamiske bidraget til strekkvariasjoner i en ankerline. Hvis derimot konstruksjonen er såkalt overkritisk dempet vil ikke dette kunne skje. Den viskøse bølgeeksitasjonen vil dominere kreftene på nøtene. Dette vil automatisk føre til at saktevarierende krefter i irregulær sjø eller statiske i regulær sjø vil bli eksitert så lenge det er bølger. En vurdering for å se på muligheten for at disse effektene kan føre til ytterligere komplisering av forankringskreftene foretas i det følgende. Sammenhengen mellom masse og demping i systemet blir spesielt studert.

Som et realistisk case vil vi ta utgangspunkt i det samme 6 burs stålanlegg av type I. Relevant referanselitteratur er Faltinsen (Faltinsen 1987) .

Massen til anlegget  $M = 57\,126$  kg. Tilleggsmassen estimert ved 4 sek er  $C_m = 2.1$ . Ved å bruke Notdrag ved 0.5 m/s regnes global stivhet i lengderetningen 11 (langs med hovedbrygga, jag) og 22 på tvers av hovedretningen (svai).

$$k_{11} = F_{11}(U_c=0.5)/\delta_{11} = 94271\text{N}/16.4085 = 5745.25 \text{ N/m}$$

$$k_{22} = F_{22}(U_c=0.5)/\delta_{22} = 117105\text{N}/13.924 = 8410.30 \text{ N/m}$$

Kvadratisk ”dempningskoeffisient” fra drag koeffisienten til anlegget estimeres ut i fra:

$$C_{D,11}^{(2)} = 94271/0.5^2 = 377084 \text{ N s}^2/\text{m}^2$$

$$C_{D,22}^{(2)} = 117105/0.5^2 = 468420 \text{ N s}^2/\text{m}^2$$

Udempede egenperioder estimeres:

$$T_{0,11} = 2\pi\sqrt{(C_m * M / k_{11})} = 2\pi\sqrt{(2.1 * 57126 / 5745.25)} = 28.7 \text{ sec}$$

$$T_{0,22} = 2\pi\sqrt{(C_m * M / k_{22})} = 2\pi\sqrt{(2.1 * 57126 / 8410.30)} = 23.7 \text{ sec}$$

Dempningsforholdet som faktor av kritisk demping kan estimeres fra ligningen:

$$\lambda = \frac{c_{eq}}{c_{kr}} = \frac{4}{3\pi} \frac{C_D^{(2)}}{MC_m} \zeta_a \eta_{11} \quad (1.5)$$

hvor  $\zeta_a \eta_{11}$  er bølgeamplituden ganger responstransferfunksjonen.

Det antas at denne er lik  $\zeta_a \eta_{11}$  2 meter, dvs. at konstruksjonen følger bølgene. Med denne antagelsen er dempningsforholdet i jag og svai:

$$\lambda_{11} = 2.67$$

$$\lambda_{22} = 3.31$$

Når  $\lambda$  er 1 eller større er bevegelsen overkritisk dempet og alle forstyrrelser vil bli dempet ut uten å oscillere. Det er derfor ingen fare for å få større bevegelser i bølgene og dermed større dynamiske strekkbelastninger i ankerlinene enn maksimum bevegelser i størrelsesorden bølgeamplituden. Det forholdet som er dominerende er  $C_D^{(2)}/M$ . Hvis  $M$  økes med en faktor på 3-4, vil underkritisk dempning og store dynamiske effekter kunne oppstå. Dette kan være en konsekvens av å koble opp en forflåte. Hvis mange nok nøter fjernes kan det også føre til en reduksjon av viskøs dempning til 20 -30 % av det beregnede nivået. Da øker også faren for store dynamiske bølgebevegelser.

## 5 Konklusjoner

For at forankringa ikke skal gi unødvendig store krefter inn på flytekragen, er det viktig at kreftene som virker inn mot terminalpunktene ikke bidrar til bøyning av anlegget. Det vil si at kreftene må være konstante eller lineært økende ved en jevn belastning, slik at anlegget vrir seg uten at det bøyes. Da vil flytekragen rotere i stedet for å bøyes. Dette oppnås dersom den horisontale fleksibiliteten til ankerlinene er konstant eller lineært økende langs lengden av anlegget.

En normalt plassert bøye har liten effekt på stivheten til lina. Derimot kan bøya indusere store belastninger på anlegget ved at den beveger seg i bølgene og dermed skaper store strekkrefter i ei oppspent ankerline. Ved lange liner bør det vurderes å utelate bruk av bøye i nærheten av anlegget og i bølgesonen.

Betydelig lavere statisk horisontalt bøyemoment oppnås dersom tverrlinene i endene av et anlegg fjernes. Øvrige forankringssystemer med få terminalpunkt fører til betydelig økning i statiske og dynamiske belastninger i flytekragen. Et standard stålanlegg har ikke kapasitet til å tåle en annen linekonfigurasjon fordi de statiske kreftene og momentene blir mye høyere enn tradisjonell konfigurasjon. Analysene viser derimot at det forenklete forankringssystemet kan være mindre følsomt for store forskjeller i bunntopografi. Et enkelt ankerlinebrudd vil også være mindre kritisk, da resten av ankerlinene vil ”ta over” jobben til den brutte lina.

Hovedutfordringen ligger i samspillet mellom forankring og flyter. Det forenklete forankringssystemet fører til økt bøyning av flytekragen. For å kunne benytte dette forankringssystemet må derfor flytekragen oppdimensjoneres, eller et nytt design som er tilpasset forankringssystemet utvikles.

## 6 Referanser

Faltinsen, O. M. (1987). Sea loads and motions of marine structures. Trondheim, Institutt for marin hydrodynamikk.

Hibbitt Karlsson & Sorensen Inc. (2002). ABAQUS Users's Manual Version 6.3, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.

Irgens, F. (1994). Statikk, TAPIR forlag.

Krokstad, J. R. et al. (2005). Nye rømmingssikre merdkonsept: Oversikt over forankringsløsninger. Nye rømmingssikre merdkonsept, SINTEF Fiskeri og havbruk AS.

Lien, E. (2004). AQUASYS, SINTEF Fiskeri og havbruk AS.

MARINTEK (2004). Simulation of motions of marine operations (SIMO).

Moe, H. og M. A. Heide (2004). Riving og deformasjon av not, nye rømmingssikre merdkonsept.

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

## **7 Vedlegg**

- Vedlegg 1: Konseptutvikling, forankring av stålanlegg
- Vedlegg 2: Definisjon av standard not
- Vedlegg 3: Strømkrefter og hastighetsreduksjon
- Vedlegg 4: Sammenligning av bøyemoment i anlegg med 2 x 3 bur
- Vedlegg 5: Sammenligning av bøyemoment i anlegg med 2 x 2 bur
- Vedlegg 6: Sammenligning av bøyemoment i anlegg med 1 x 4 bur
- Vedlegg 7: Sammenligning av bøyemoment i anlegg med 2 x 2 bur, varierende forankringssystem og strøm med retning 45 grader i forhold til y-aksen
- Vedlegg 8: Bøyemoment i utliggere
- Vedlegg 9: Følsomhet for variasjon i dybde
- Vedlegg 10: Strekk- og momentfordeling i 6 burs stålanlegg