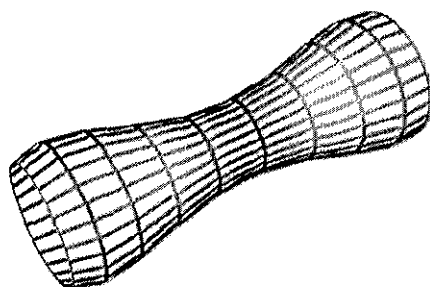


Havari av oppdrettsanlegg i Finnmark

**Analyser av oppdrettsanlegg er utført for
Fiskeridirektoratet**



aquasttructuresTM
softwaretools

Aquasttructures AS

Oslo, 30.06.2003

middelvind) er fastsatt på grunnlag av en vurdering av Metrologisk institutt av 04.06.03 til 30 m/s. I henhold til prNS 9415 (teknisk standard for flytende oppdrettsanlegg) gir dette en sjøtilstand med 3.37 meter signifikant bølgehøyde og en periode på 6.1 sekunder. Dette tilsvarer en bølgelengde på 57.9 meter. 3.37 meter signifikant bølgehøyde gir i henhold til prNS 9415 en maksbølge i perioden med bølgehøyde på 6.4 meter.

I tillegg til denne maksbølgen er det kjørt et sett med litt lavere bølger for å undersøke effekt av bølgelengde på krefter. Dette er gjort blant annet på bakgrunn av en rapport fra DNMI på Vestlandet: På lokasjonen i den rapporten er det 10 km strøklengde, signifikant bølgehøyde på 2.7 meter og maksimal bølgehøyde på 4.9 meter. Bølgene vil ha en midlere bølgelegde på 35 meter som tilsvarer en bølgeperiode på 4.7 sekunder. Det bemerkes av dersom en legger bestemmelsene i prNS 9415 til grunn får en følgende verdier ved Hs 2,7 m og 10 km strøklende: Vindhastighet, U = 33,2 m/s, Pikperiode, Tp 5,04 s, Bølgelengde 39,66m.

Som en ser avviker disse tallene noe fra det som fremkommer fra DNMI. Derfor er det foretatt analyser med litt varierende bølgelengder. Den krappeste bølgen som er analysert av disse bølgene (periode 4.5 s) vil være noe lavere grunnet at en så høy og krapp bølge vil bryte. I analysen er det imidlertid valgt å bruke samme bølgehøyde for lasttilfelle 2-5 for sammenlignings skyld.

Anlegget er lagt slik at disse store bølgene i hovedsak vil ha en retning på langs av pongtongene.

Basert på overnente diskusjon vil følgende sjøtilstander bli undersøkt.

Tabell 1 Lastkondisjoner undersøkt på havarett anlegg

Lasttilfelle	Bølgehøyde, Hs	Bølgehøyde, Hmax	Strøm	Periode	Lengde	Retning
1	3.37	6.4	0.15	6.1	58.0	Langs pongtonger
2	2.7	4.9	0.15	4.5	31.6	Langs pongtonger
3	2.7	4.9	0.15	5	39.0	Langs pongtonger
4	2.7	4.9	0.15	5.5	47.2	Langs pongtonger
5	2.7	4.9	0.15	6	56.2	Langs pongtonger
6	3.37	6.4	1.00	6.1	58.0	Langs pongtonger

Vindgenerert strøm beregnet etter:

$$U_{sv}(z) = 0,02 \cdot U_{v10} \left(\frac{50 - z}{50} \right)$$

gir en strømhastighet på: 0,60 m/s i overflaten og 0,36 m/s på 20 meters dyp.

I analyse 1-5 er det påsatt strøm 0.15 m/s. I analyse 6 er det påsatt en strømhastighet på 1.0 m/s. Den ekstra analysen er foretatt for å undersøke om strøm er av avgjørende betydning på resultater.

4 BESKRIVELSE AV ANALYSEVERKTØY OG ANALYSEVALG.

Analyser er foretatt med beregningsverktøyet Aquasim (Berstad et. al. 2003, Berstad 2003), et beregningsverktøy for analyse av styrke og sikkerhet på marine konstruksjoner. Aquasim er

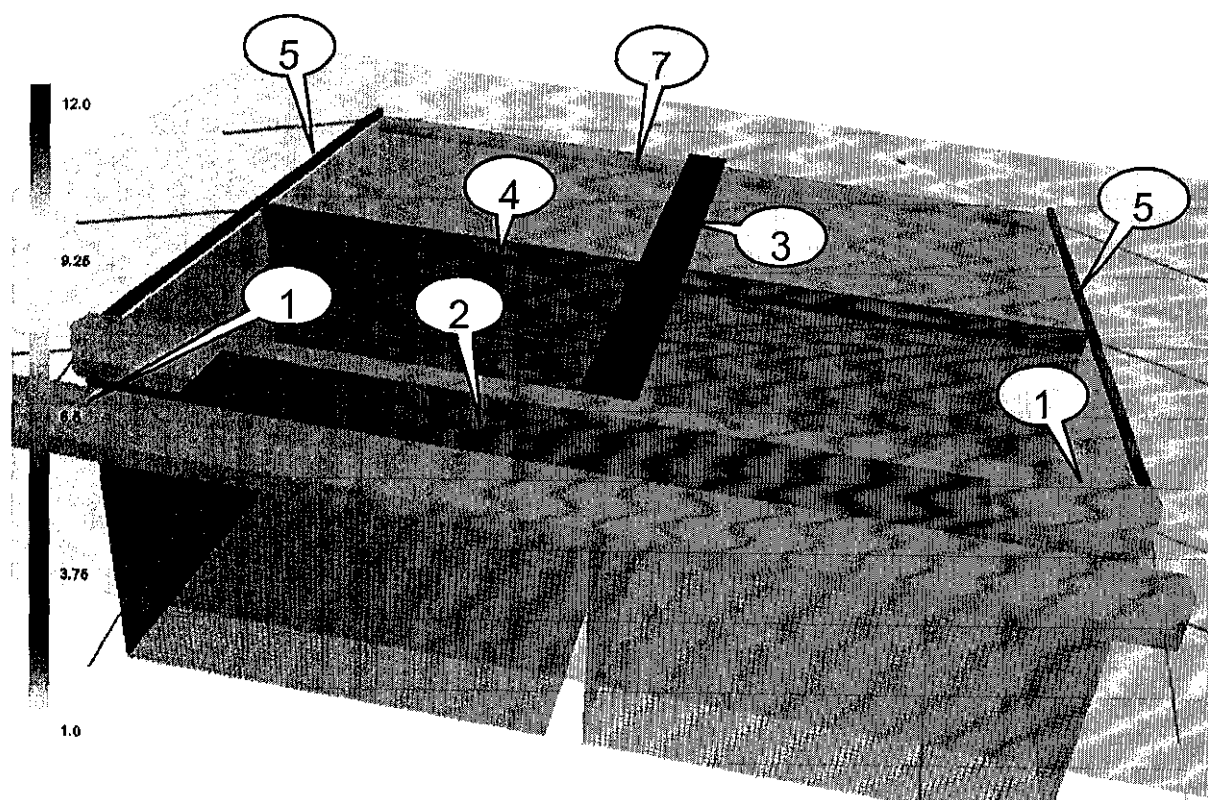
også benyttet til flere analyser av havbruksanlegg. Programmet har analysert styrke og sikkerheten på ulike typer anlegg. Analyse resultatene er i godt samsvar med virkelige målte data og anerkjente beregningsrutiner for marine konstruksjoner. Analyse programmet ligger helt i fronten av teknisk analyse verktøy og baserer seg på mange års forskning fra NTNU innenfor marine konstruksjoner og byggteknologi. Programmet er validert mot modellforsøk (Berstad et. al. 2003). Analyseverktøyet er spesialtilpasset for å analysere krav i henhold til prNS 9415 på en effektiv måte.

Analyseverktøyet bygger på tidssimulering. Man får ta med seg effekter av hvordan sterkt ikkelineære respons i forskjellige komponenter virker samtidig og hvordan disse påvirker hverandre og totalanlegget. I programmet er det åpning for å ta høyde for veldig mange ikkelineære effekter. Bruker av program gjør selv flere valg for å etterligne den virkelige fysikken ut i fra tilgjengelig tid og hensiktsmessighet. Ved bruk av programmet til design, må man være sikker på at antagelser man gjør går til sikker side. Gjør man derimot en etterregning prøver man å komme tettest mulig det som virkelig har foregått uten høyde for å være på sikker side. Sistnevnte tilnærming er benyttet i dette arbeidet.

I dette tilfellet er følgende valg gjort: Det er kjørt dynamisk analyse, masse er plassert som 14 tonn på pongtonger (komponent 4 og 7 i Figur 2), 11 tonn på senter kjørebrygge (komponent 3 i Figur 2), og 4 tonn på ytre brygger (komponent 5 i Figur 2). På flyter (komponent 1 og 2 i Figur 2), er det plassert 130 tonn jevnt fordelt over flyter og 70 tonn på jevnt fordelt på dekke. Det er kjørt lineære bølger. På ankerliner benyttes Morisons ligning med crossflow prinsippet. På not benyttes Morisons ligning i henhold til vanlig membranteori som gir drag og løft komponenter. På flytepongtonger er det benyttet diffraksjonsteori. Diffraksjonskrefter og tilleggsmasse og hydrodynamisk demping er funnet for gjennomsnittlig neddykket legeme vha stripeteori. Dette er gjort i "steady state" tilstanden hvilket betyr at anlegg er påsatt strøm. Det er benyttet en opsjon i programmet hvor det taes hensyn til at legemet er under eller over vann når vertikale krefter beregnes. Det vil si at lokale oppdriftskrefter på ett flyteelement er satt til maksimalt volumet av elementet og minimal oppdriftskraft er null. For 4% av vannlinjeareal er det antatt videre oppdrift ved overskylling. Froude kriloff krefter beregnes for aktuell horisontal plassering av tverrsnitt. Det er ikke tatt hensyn til ekstra oppdrift når flytebrygger går inn og ut av vann, verken ytre brygger eller kjørbrygge.

5 BESKRIVELSE AV ANLEGG

Anlegget som benyttes på ovennevnte lokalitet er et 4 dams 25*25 katamarananlegg. Anleggets tverrpongtonger er flytepongtonger, langsgående brygger ligger over vann. Anlegget er vist i Figur 2. I denne figuren er de forskjellige komponentene på anlegget angitt med forskjellige farger.



Figur 2 Fargene viser de forskjellige komponentene anlegget er modellert opp av. Komponent 1, er pongtongene på katamaran-forlekter (disse sees som hvit-grå på bildet). Komponent 2 er dekke over pongtongene. Komponent 3 er midtbrygge og komponent 4 er pongtong i midten. Komponent nummer 5 (blågrønn) er sidebrygger og nr 6 er kjetting i øverste og nederste del av ankerliner. Komponent nummer 7 er ytterste pongtong sett lengst borte på figuren. Komponent 8 representerer dobbel kjetting på midten av pongtong, mens komponent 9 og 10 er forankringstau. Komponent 11 og 12 er notposer.

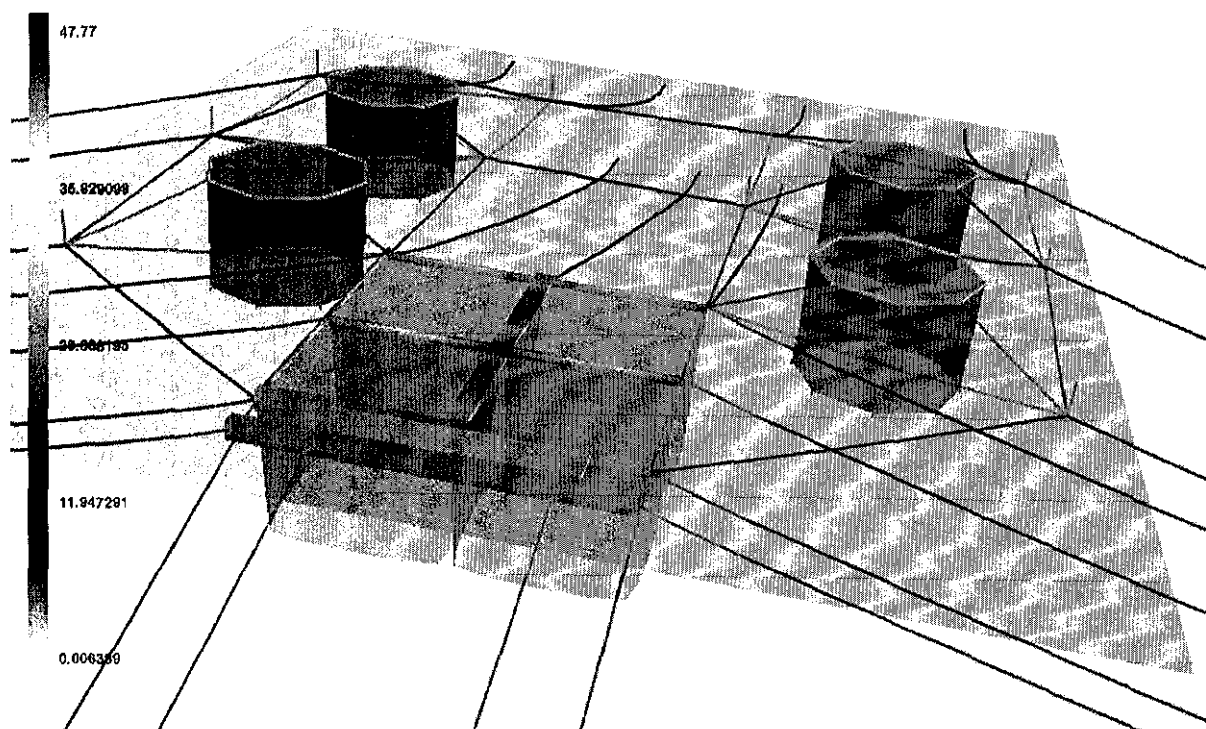
Komponent 3 (midtbrygge), Komponent 4 (midtpongtong), Komponent (5) sidebrygger og Komponent (7) endepongtong er modellert som bjelker med tverrsnittsdata gitt i Tabell 2.

Tabell 2 Tverrsnittsdata for katamarananlegg

Egenskap	Komp. 3	Komp. 4	Komp. 5	Komp. 7
Material	St 235	St 235	St 235	St 235
Tverrsnittsareal	0.033 m ²	0.0312 m ²	0.016 m ²	0.0276 m ²
Motstandsmoment om horisontal akse	0.00236 m ⁴	0.00565 m ⁴	0.0012 m ⁴	0.0039 m ⁴
Motstandsmoment om vertikal akse	0.0515 m ⁴	0.0031 m ⁴	0.0007 m ⁴	0.0027 m ⁴
Torsjonsmotstandsmoment	0.00945 m ⁴	0.0085 m ⁴	0.0013 m ⁴	0.0069 m ⁴
Bredde	2.98 m	0.9 m	0.48 m	0.9 m
Høyde	0.68 m	1.43 m	0.34 m	1.23 m
Avstand fra bunn til nøytralakse	0.34 m	0.68 m	0.34 m	0.60 m

Anleggets ankerliner har ca 25 m kjetting øverst og nederst og tau av polypropylen med 48 millimeter i diameter. Kjettingen øverst har en diameter på 28 millimeter og nederst 32 millimeter. I beregningene er 28 millimeter benyttet både oppe og nede. Nøter er 20 meter dype, og tre av merdene har halvmaskevidde på 20 mm og tråddareal på 1 mm² (oransje farge i Figur 2), mens den 4. merden har en halvmaskevidde på 15 mm med tråddareal 0.7 mm².

Anlegget slik det lå på havaritidspunktet hadde koblet til seg 4 plastmerder slik vist i Figur 3.



Figur 3 Modell av hele oppdrettsanlegget. Jevnføringspenninger når anlegget er påsatt egenlast er gitt i figuren.

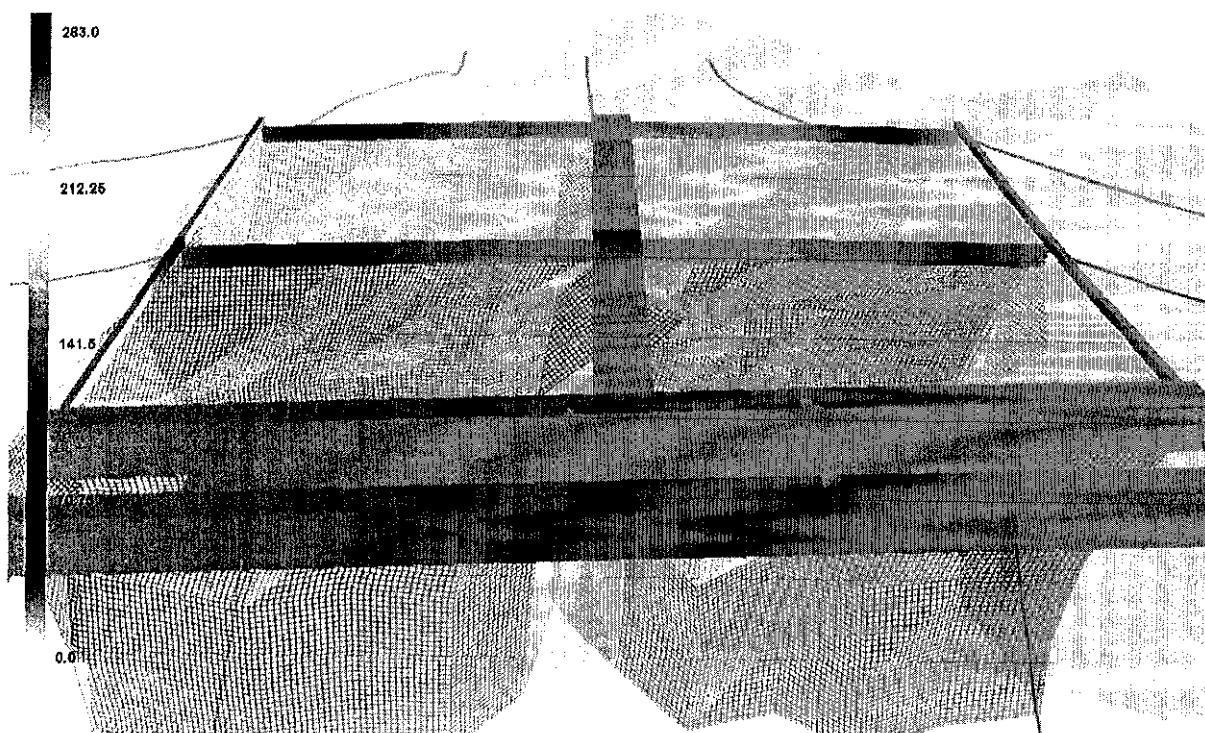
Vekter er fordelt på anlegg i henhold til spesifikasjon. Pongtonger (komponent 1,5 og 7) gir oppdrift.

6 ANALYSER OG RESULTATER.

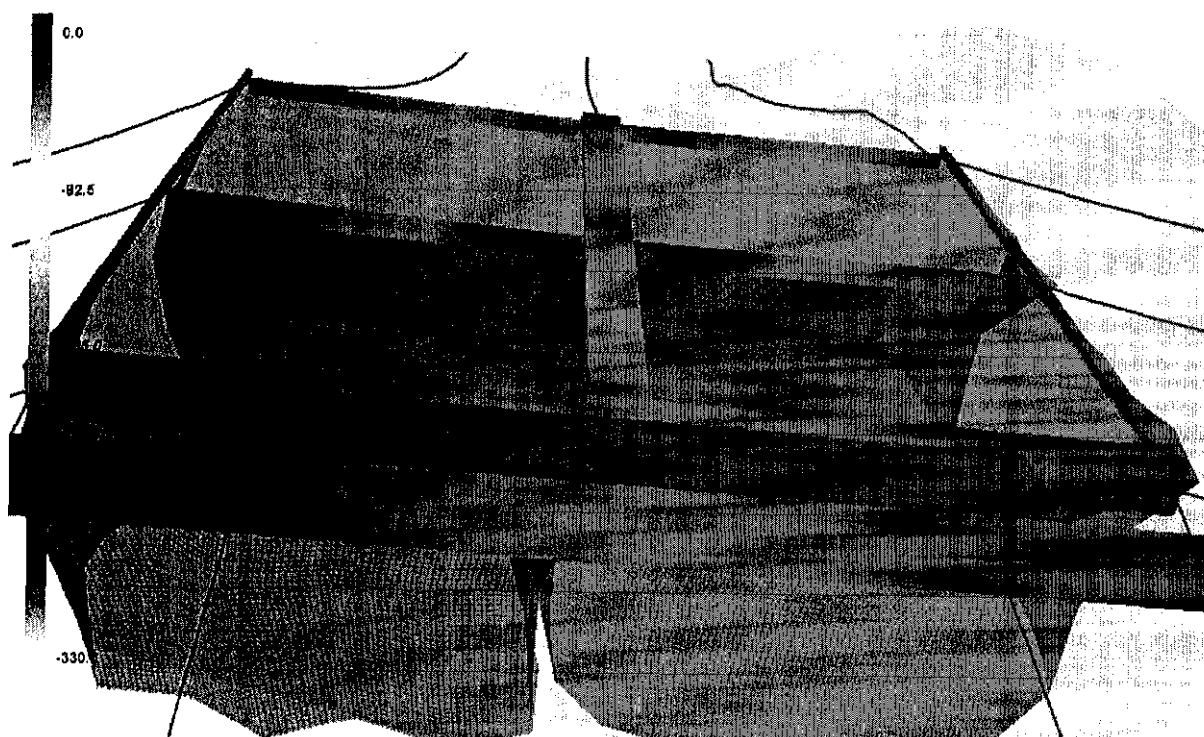
Siden det var stålanlegget som havarerte ble det i valgt å kun analysere denne delen av anlegget. Først er spenning nivået i anlegget funnet, så er det gjort mer detaljert analyse av områder med høy spenning.

6.1 Aksialspenninger i pongtonger.

Figur 4 og Figur 5 viser aksialspenninger i komponentene når en bølge topp respektive bunn passerer anlegget. Fargeskalaen viser spenninger på øvre flens av komponentene. Resultater vist i figurene er fra lasttilfelle 1.



Figur 4 Aksialspenninger i komponenter påsatt havaribølgen, for et tidspunkt en bølgetopp er midt under anlegget



Figur 5 Aksialspenninger i komponenter påsatt havaribølgen, for et tidspunkt en bølgebunn er midt under anlegget

Som man kan se fra disse figurene får man spenninger i området på cirka 330 MPa i trykk og ca 280 MPa i strekk. Da det på dette anlegget er benyttet vanlig S235 konstruksjonsstål ser man at her vil det oppstå flyt i materialet, og det er fare for sammenbrudd av tverrsnittet.

Tabell 3 viser maksimal opptredene spenninger i pongtonger som funksjon av sjøtilstand.

Tabell 3 Maks trykk og strekkspenninger i pongtonger, lasttilfelle 1-5

Lasttilfelle	Max trykk	Max strekk	Flytespenning	Utnyttelse
1	-330	283	235	1.40
2	-135	113	235	0.57
3	-210	209	235	0.89
4	-258	259	235	1.10
5	-280	248	235	1.19
6	-346	304	235	1.47

Som man kan se fra Tabell 3 overskrides flytespenning ved flere av sjøtilstandene. Størst overskridelse forekommer for lasttilfellet 6 som er lasttilfelle hvor tilstand på ulykkestidspunkt er etterregnet.

Man kan også se at spenninger i pongtonger er veldig avhengig av bølgelengde. Når man får en bølgelengde som klaffer med pongtonglengden på snaut 55 meter får man store bøyemomenter og ditto spenninger i anlegget.

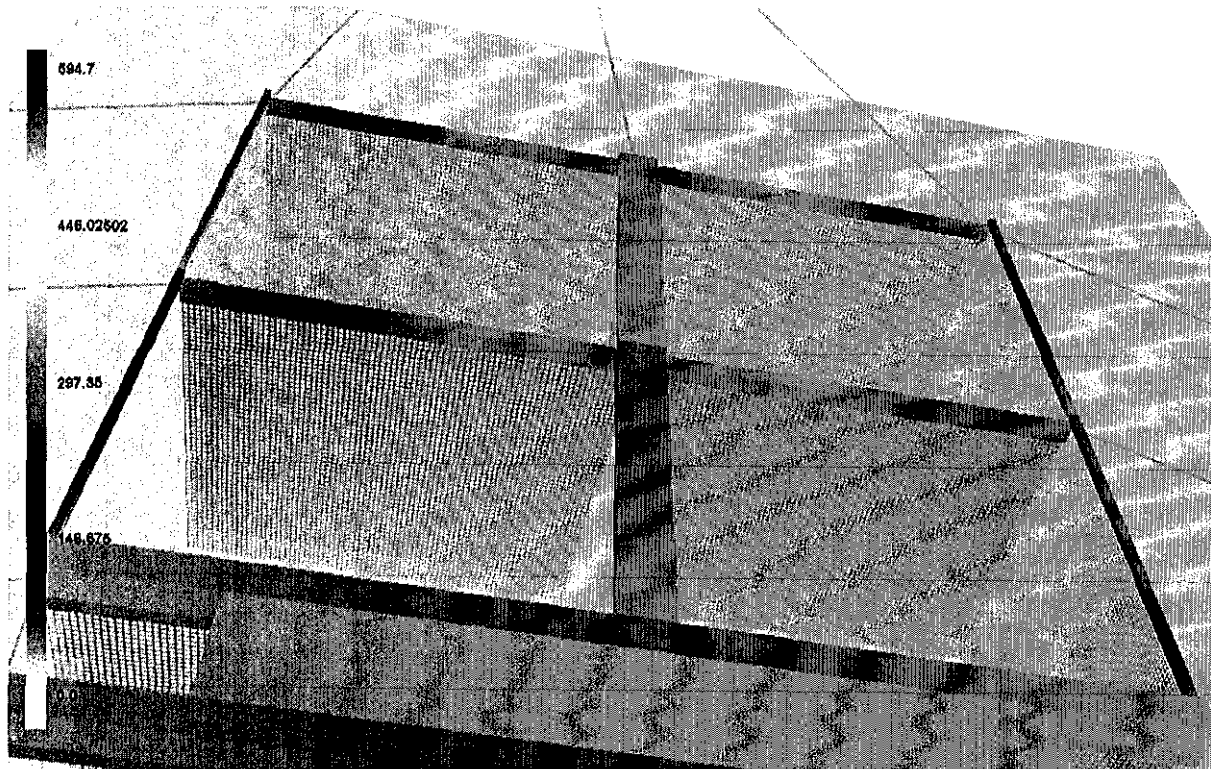
I tillegg vil relativ bølgehøyde over anlegget være ca 4 meter over anlegget på midten av anlegget (og enda mer lenger fram). En trykkehøyde på 4 meter fører til et lateraltrykk på pongtongen på ca 40.000 N, noe som gir en lokal bøyespenning i plate på ca 150 MPa. vil på oversiden av pongtonger vil dette oppstå samtidig med maksimalt strekk i totaltverrsnittet. Denne lokale bøyespenningen i pongtongenes flenser vil føre til at man får plastiske deformasjoner også for mindre bølger noe som kan gi buler på platene, en effekt som på båter kalles "sulten hest" effekten. Dette fører til at tverrsnittet får enda noe lavere kapasitet enn originaltverrsnittet i trykk. I dette tilfellet har originaltverrsnittet allerede for lav kapasitet.

6.2 Lokal plateknekkning av øvre flens av pongtong

Pongtongene består av lukkede profiler med 0.5 meter bred topplate, 7 millimeter tykk. Det er ingen langskipsskott, og tverrsnittsskott er plassert med en avstand av 5.15 meter. Tar man utgangspunkt i et platefelt som er 0.5 * 0.5 meter vil man få en bulespenning på 149 MPa dersom man antar at alle kanter er fritt opplagret. Antar man at sidekantene i platefeltet er fast opplagret får man en knekkkapasitet på 260 MPa. I dette tilfellet vil det være mest riktig å anta fritt opplagret fordi platefeltet er forbundet til en like tykk skrånende plate som ikke gir særlig rotasjonsmotstand. Som man ser fra Tabell 3 overskrides den lokale knekkkapasitet av belastningene. At det kan bli noe lokale buler grunnet lokale knekkmekanismer er derfor svært sannsynlig.

6.3 Utmatting

På toppen av pongtongene er det festet braketter som forbinder pongtonger til tversgående brygger. Disse brakettene ser skumle ut med hensyn til utmatting og sprekkvekst. Spesielt fra helen på braketten. Figur 6 viser nominelle spenningsvidder for lasttilfelle 1. Som man ser fra den figuren vil det i dette området være høye spenningsvidder som kan føre til sprekkvekst grunnet utmatting. Spenningsvidder og beregnet utmattingslevetid dersom man benytter denne spenningsvidden som basis i en utmattingsberegning er gitt i Tabell 4.



Figur 6 Nominelle spenningsvidder

Tabell 4 Maksimal spenningsvidde [MPa] i pongtonger, lasttilfelle 1-5

Lasttilfelle	Nominell spenningsvidde	K-faktor	Hot spot spenningsvidde	Levetid (år) ⁽¹⁾
1	613 MPa	2.2	1348.6 MPa	0.5
2	248 MPa	2.2	545.6 MPa	7.7
3	419 MPa	2.2	921.8 MPa	1.6
4	517 MPa	2.2	1137.4 MPa	0.85
5	528 MPa	2.2	1161.6 MPa	0.8
6	667 MPa	2.2	1467.4 MPa	0.4

⁽¹⁾ Det understrekes at når man beregner levetid for utmatting mener man tid til man ser en synlig sprekk. Dersom utmatting alene leder til brudd i tverrsnitt tar det gjerne ca 10 ganger så lang tid

Som man ser er har denne detaljen dårlig levetid mht utmatting. Tallene i Tabell 4 er basert på sveis i korrosivt miljø. SN – kurven for forventet levetid er benyttet, denne gir høyere forventet levetid enn designkurven. Det er antatt en Weibullfaktor på 1.0. Det understrekes at når man beregner levetid for utmatting mener man tid til man ser en synlig sprekk. Dersom utmatting alene leder til brudd i tverrsnitt tar det gjerne ca 10 ganger så lang tid.

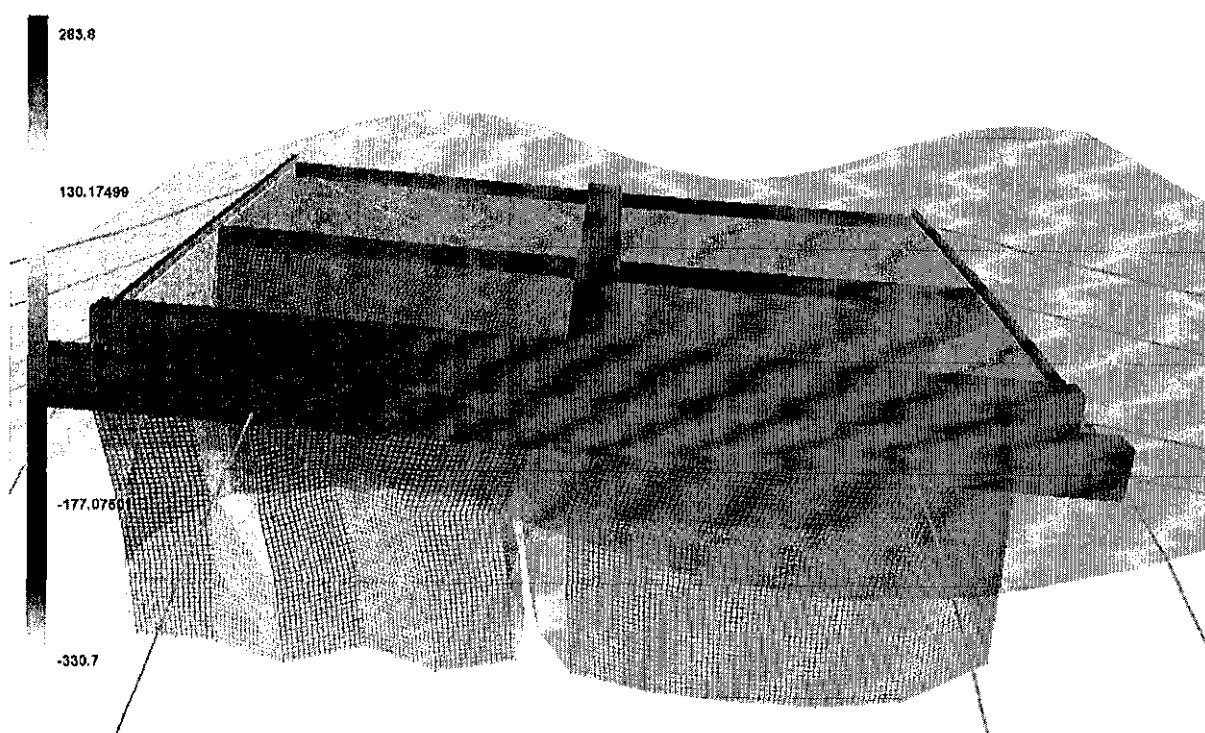
6.4 Diskusjon av resultater

Analyse av anlegget viser at kapasiteten til pongtonger er for lav i forhold til designkriterier som er vanlige å benytte. Skulle anlegget tilfredstilt vanlige designkriterier måtte arealet på pongtonger dobles. Uten last og materialfaktorer har man en utnyttelse på 1.4. Dersom man har en lastfaktor på 1.3 og en materialfaktor på 1.1 har man det dobbelte av krefter i anlegget i forhold til hva man bør ha.

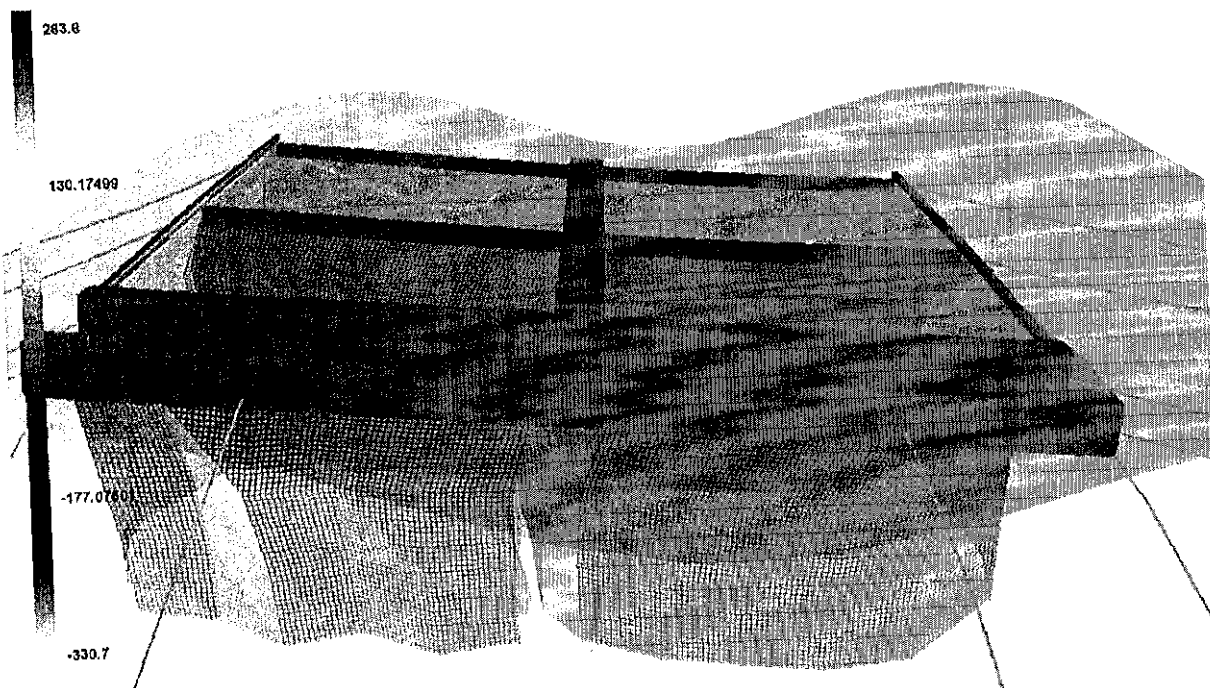
Analysene viser at det er overveiende sannsynlig at store krefter i pongtonger fører til lokal buling og mulig sprekkvekst ved braketter på toppen av pongtonger. Dette reduserer i sin tur tverrsnittets kapasitet, og når store bølger treffer vil pongtongene brette opp.

Noter også fra resultatene at også bølger med signifikant bølgehøyde på 2.7 meter også fører til for store krefter i anlegget. Dette er imidlertid avhengig av bølgeperiode. Krefter blir størst når bølgelengde er omtrent like stor som pongtonglengde.

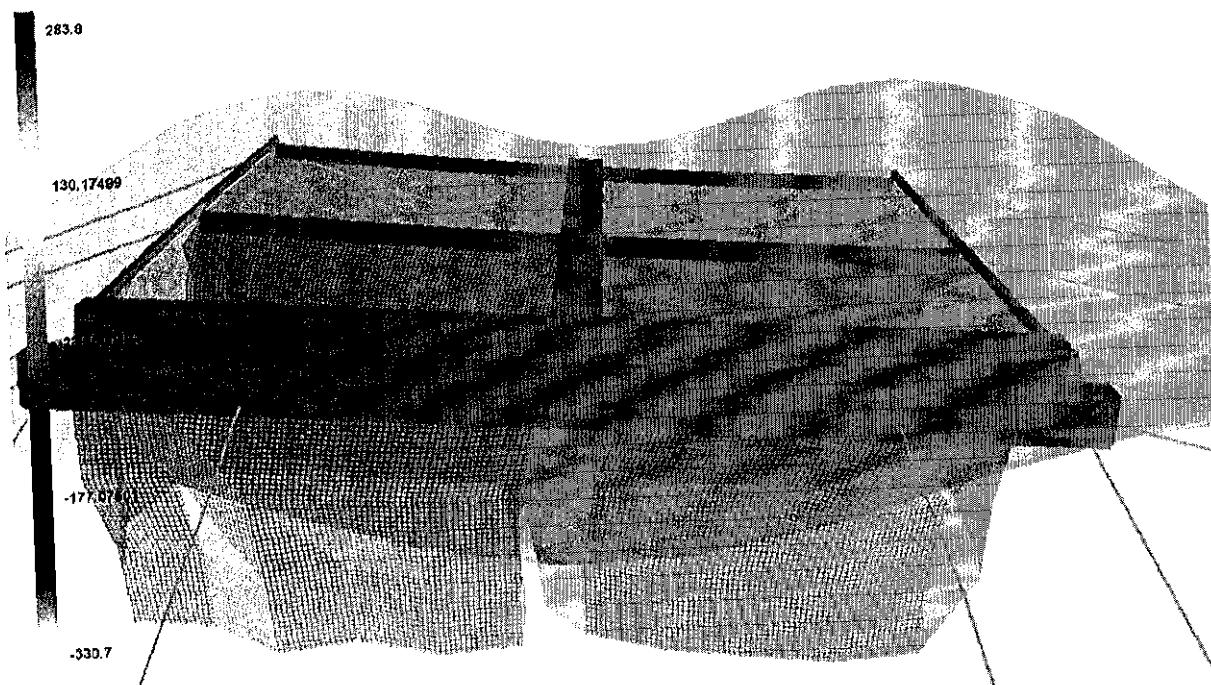
Billeddserien under viser hvordan kreftene i anlegg i form av spenninger i øvre flens varierer ettersom bølgene passerer.



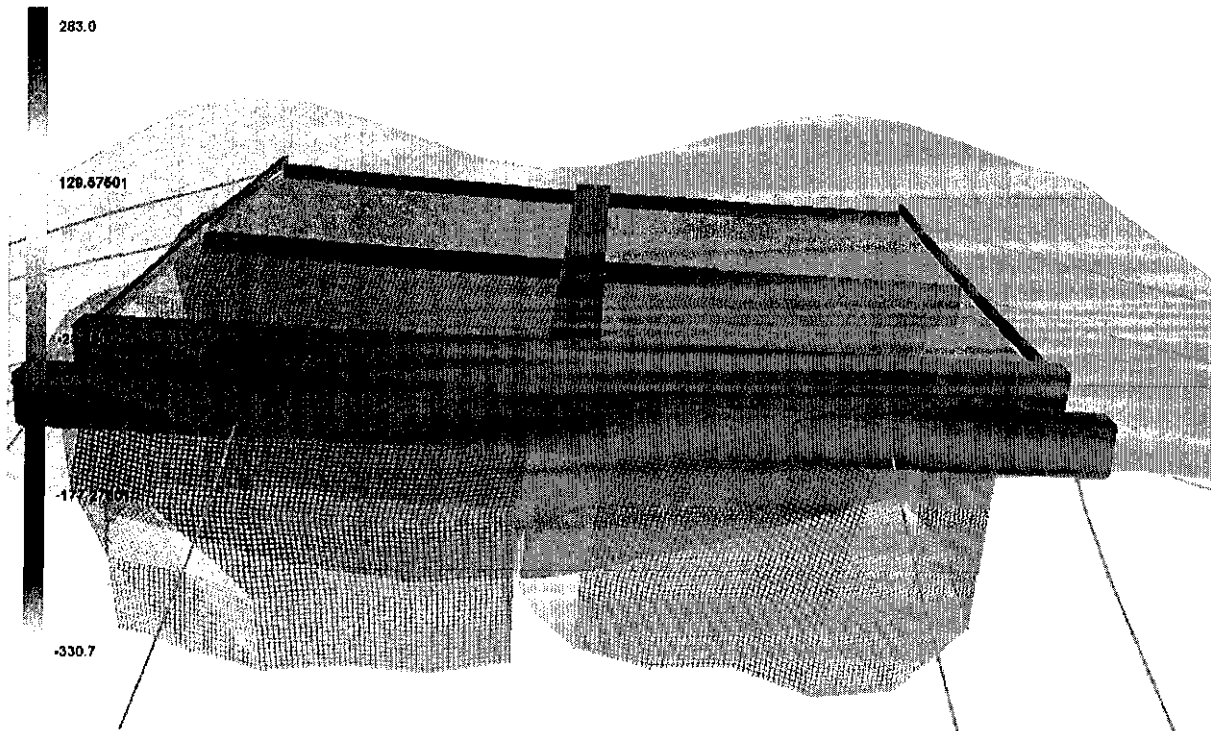
Figur 7 Anlegg påsatt bølger med bølgehøyde 3.37 meter. Bølgene kommer fra høyre. Fargeskalaen viser krefter i anlegget i form av spenninger i øvre flens av componentene



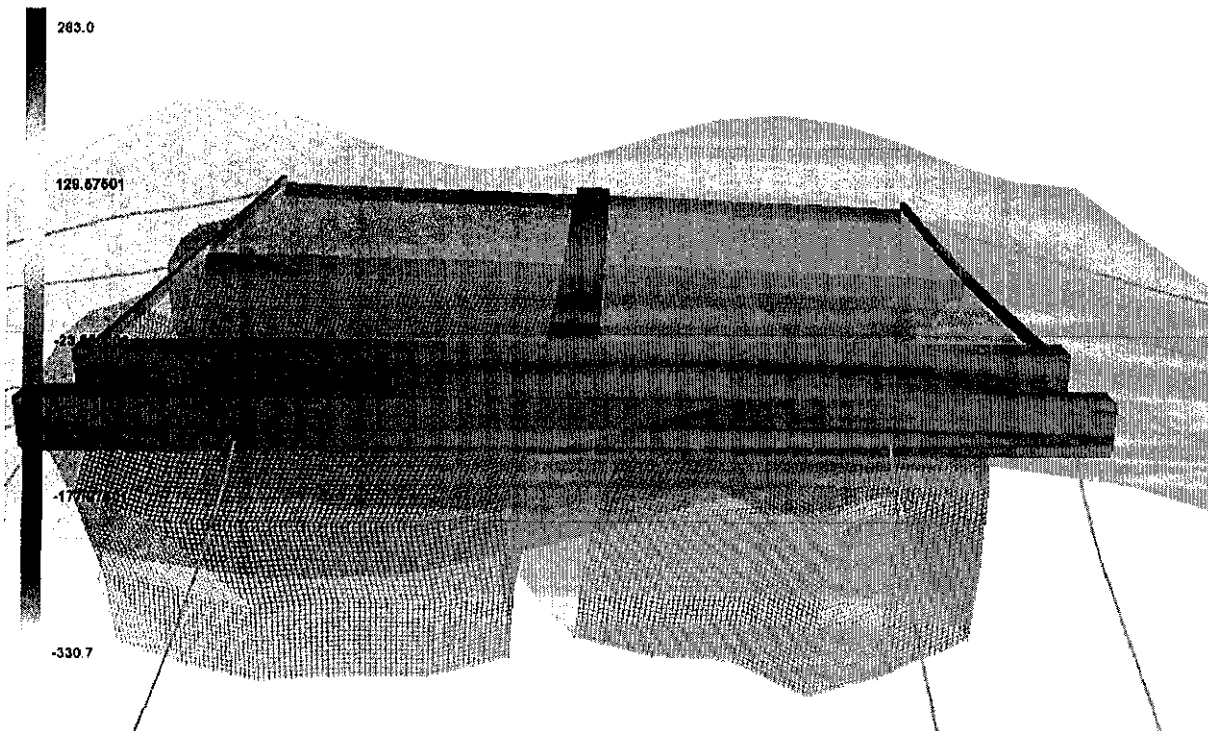
Figur 8 viser det samme som Figur 7 for ett litt senere tidspunkt



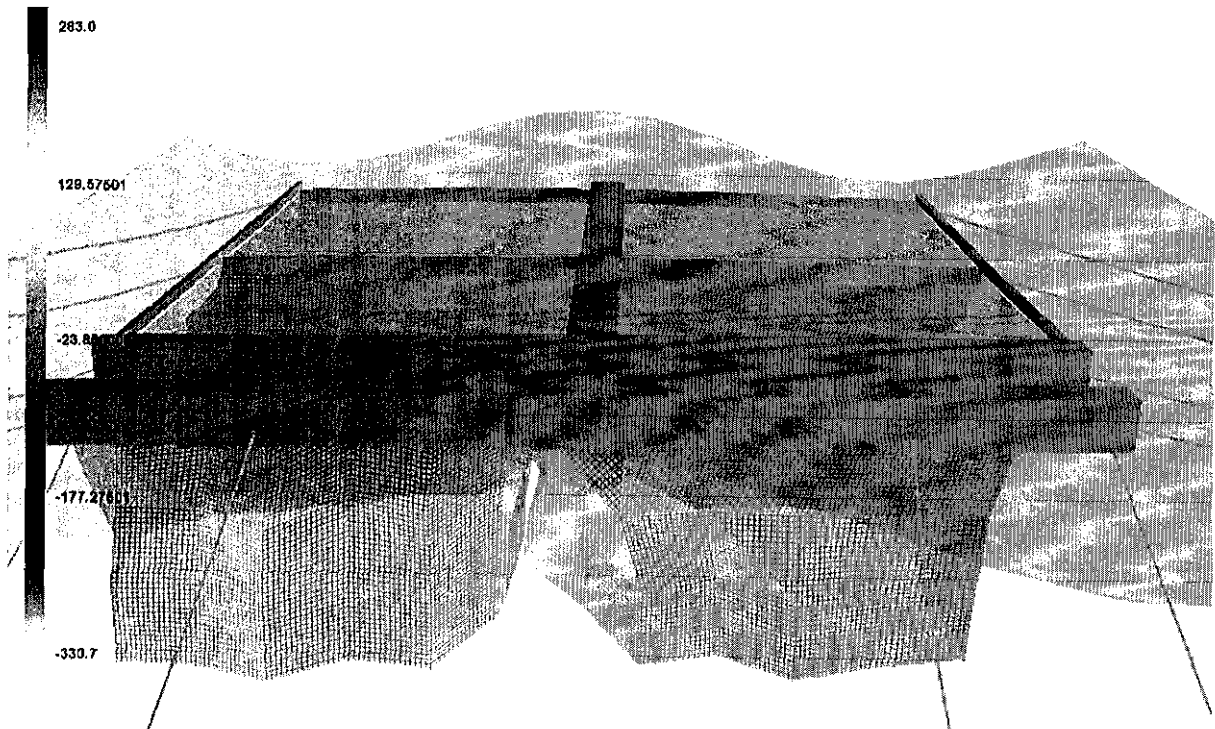
Figur 9 viser det samme som Figur 8 for et litt senere tidspunkt



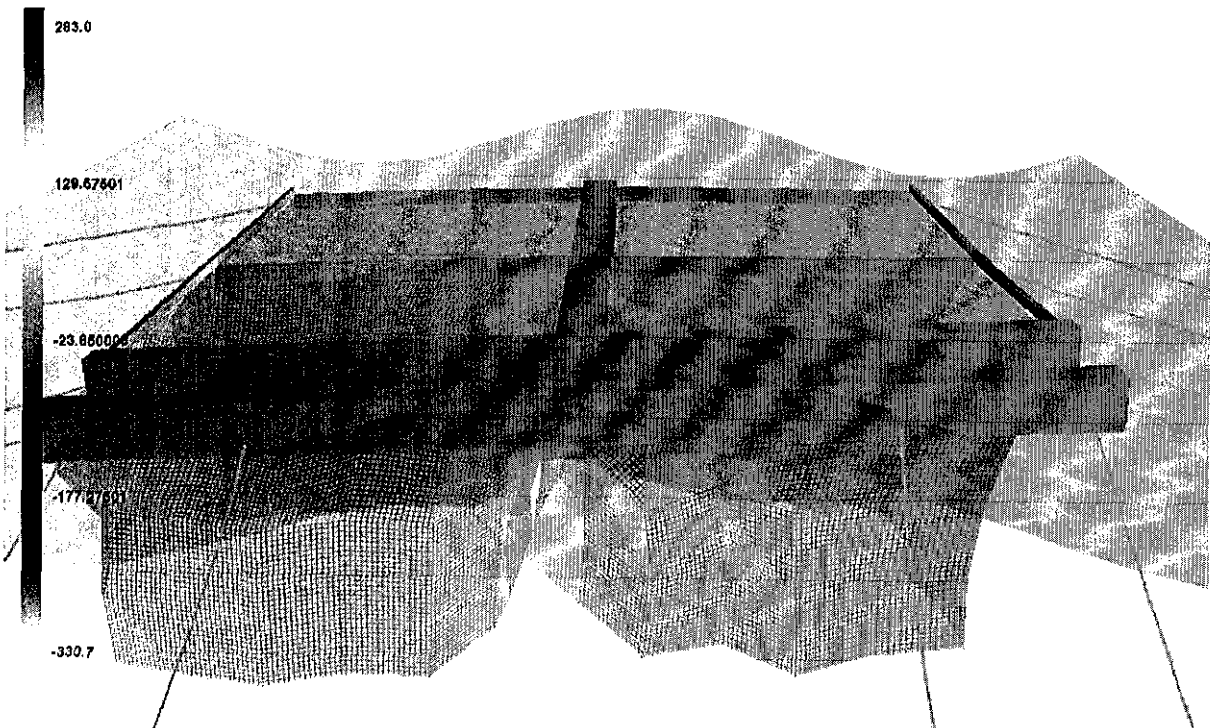
Figur 10 viser det samme som Figur 9 for et litt senere tidspunkt



Figur 11 viser det samme som Figur 10 for et litt senere tidspunkt

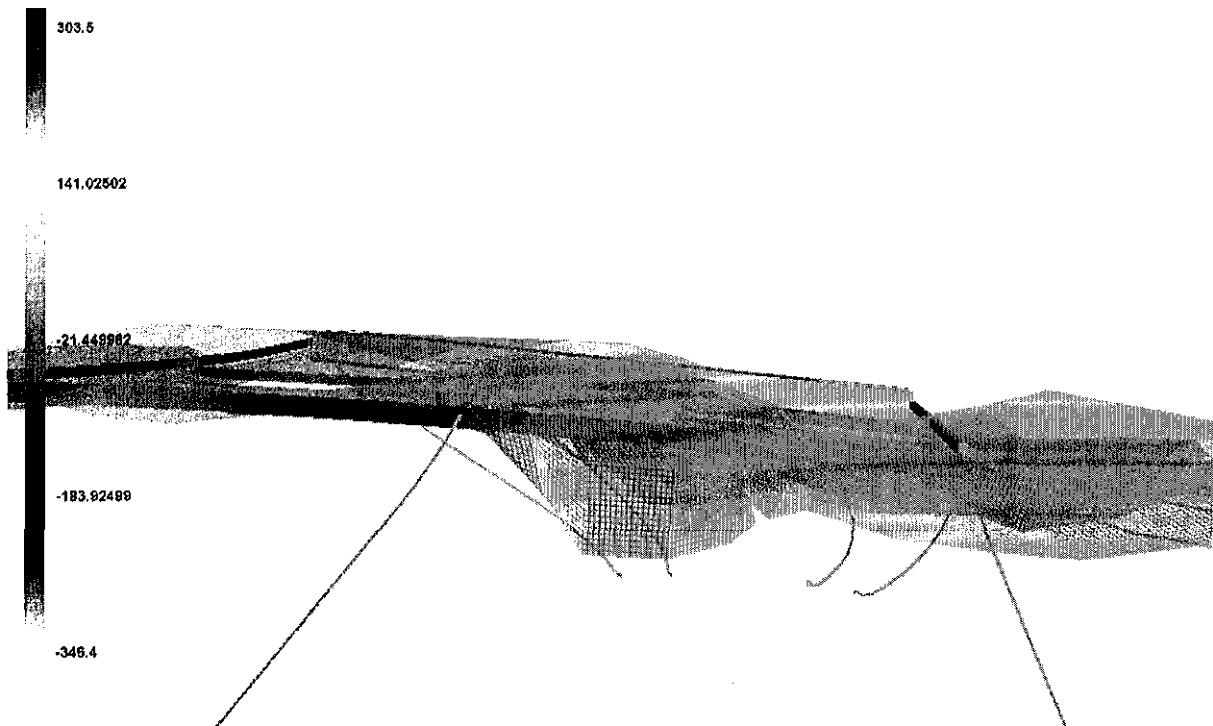


Figur 12 viser det samme som Figur 11 for et litt senere tidspunkt



Figur 13 viser det samme som Figur 12 for et litt senere tidspunkt.

I lasttilfelle 6 er det 1.0 m/s strømhastighet. I det tilfellet får nota veldig store deformasjoner slik vist i Figur 14. Krefter i pongtonger blir også litt større i dette tilfellet, men forskjellen er liten i forhold til lasttilfelle 1 noe som viser at det er bølgekreftene som er viktigste komponent i kreftene i pongtongene.



Figur 14 Bølge med signifikant bølgehøyde 3.37 meter. Strømhastighet 1 m/s. Anlegget er sett i motsatt retning i forhold til de andre figurene i rapporten.

6.5 Andre kommentarer angående anleggsdesign

Analysene viser at også krefter i sidebrygger og delvis midtbrygge er ganske store. Analysene som er kjørt er ikke kjørt for å sjekke når krefter der kan bli størst. Vi har her en tung lekter og et lettere anlegg koblet sammen. Disse to komponentene har forskjellige responsegenskaper i bølger og derfor er det stor mulighet for at man kan finne sjøtilstander hvor krefter gjennom hengsler og i brygger kan bli store. Dette er ikke undersøkt nærmere i denne analysen.

I forhold til designkriterier i prNS 9415 vil dette anlegget ikke oppnå godkjenning for gjeldende lokalitet, bølgeklasse D. Anlegget er helt sikkert godt nok for bølgeklasse B. Anlegget er muligens godt nok for bølgeklasse C, men for å avklare det må flere analyser gjennomføres.

7 KONKLUSJONER

Som konklusjon er den sannsynlige årsak til havari av anlegget ble påført større krefter enn hva kapasiteten er. Anlegg har for liten kapasitet både for brudd, lokal knekking og utmatting. Dette er typisk når dimensjoner generelt er for små.

Sannsynlig bruddsted er overgang mellom pongtonger og midtbrygge hvor krefter er mer enn dobbelt så store som det de bør være ut i fra vanlige designkriterier.

8 ANBEFALTE TILTAK

Det aller viktigste tiltak man kan gjøre for å hindre rømming av fisk er å designe oppdrettsanlegg ut i fra hvilke krefter anlegget er utsatt for. Det anbefales å analysere anlegg for de tilfeller hvor dette ikke er gjort.

Ytterligere informasjon kan oppnåes om man i tillegg gjør tøyningstester på et anlegg tilsvarende det analysert her. Dette må kombineres med analyser og inspeksjon av kritiske områder.

Dersom tverrsnittskapasitet ikke er veldig langt unna påførte laster kan kapasitet enkelt forbedres ved innsetting av stivere og eventuelt forbedring av lokale detaljer, eventuelt detaljerte inspeksjonsplaner.

9 REFERANSER

- Berstad, A. J., Tronstad, H., Ytterland, A. (2003) "Safety of Aquaculture facilities in rough sea environment- Bringing aquaculture beyond fjords and sheltered areas" AquaEuro 2003 Trondheim Norway.
- Berstad, A. J.(2003): "Verification and benchmarking of AquaSim, a softwaretool for safety simulation of flexible offshore facilities exposed to environmental and operational loads". Aquastructures report 2003-002
- NAS(2003): "prNS 9415 Flytende oppdrettsanlegg – Krav til utforming, dimensjonering, produksjon og drift"