

Edvard Fjærtøft
Mikkel Gjerde Nes

Design av nedsenkbar merd i stål

Bacheloroppgave i Havbruksingeniør
Mai 2023

Edvard Fjærtøft
Mikkel Gjerde Nes

Design av nedsenkbar merd i stål

Bacheloroppgave i Havbruksingeniør
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for naturvitenskap
Institutt for biologi



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

1 Forord

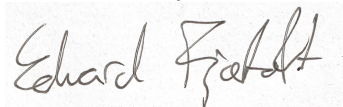
Vi er glade og takknemlige for å ha fullført vår bacheloroppgave i havbruk. Denne oppgaven markerer avslutningen på en spennende og utfordrende periode i vår utdanning. Vi vil benytte anledningen til å takke våre veiledere, Jomar Tørset, Bjørn Egil Asbjørnslett og Rolf Erik Olsen, som har bidratt til gjennomføringen av denne oppgaven. Deres veiledning og faglige ekspertise i denne oppgaven blir satt stor pris på. Vi er takknemlige for deres tålmodighet og dedikasjon, og for at de har bidratt til å forbedre innholdet og formen på oppgaven vår.

Vi ønsker å rette en spesiell takk til vår eksterne veileder, Andreas Fredborg ved Aker Solutions. Vi er svært takknemlige for bidraget til denne oppgaven ved å skape en spennende problemstilling og gi oss verdifull veiledning gjennom hele prosessen. Hans ekspertise og engasjement har vært uvurderlig, og han har hjulpet oss med å utvikle en grundig forståelse av emnet. Vi setter stor pris på hans konstruktive tilbakemeldinger og hans tålmodighet under veiledningssamtalene. Hans innsikt har virkelig beriket oppgaven vår, og vi er takknemlige for den tilliten vi har blitt vist gjennom hele prosessen.

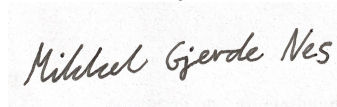
Til slutt vil vi takke alle andre som har bidratt til denne oppgaven, inkludert undervisere, faglige ressurser og institusjoner. Ekstra takk til AquaStructures AS for utlån av programvare. Uten deres bidrag ville ikke denne oppgaven vært mulig.

Vi håper at denne oppgaven kan bidra til videre forskning og utvikling innen havbruk.

Edvard Fjærtøft



Mikkel Gjerde Nes



Trondheim, 21. mai 2023

2 Sammendrag

Bacheloroppgaven forsøker å løse det omfattende lakselusproblemet i dagens fiskeoppdrettsindustri ved å designe en nedsenkbar stålmerd som kan tåle miljølastene og redusere miljøpåvirkningen fra lakseproduksjonen. Nedsenkbare merder egner seg for plassering på eksponerte områder, ettersom miljøkreftene blir mindre jo lenger under vannoverflaten man kommer. Dette muliggjør utnyttelse av områder som for øyeblikket ikke blir benyttet, og gir mindre miljøbelastninger enn hoveddelen av dagens oppdrett. I oppgaven gjennomføres det konseptutvikling for de viktigste elementene i en nedsenkbar merd, inkludert implementering av en luftlomme som tillater laksen å fylle svømmeblæren, valg av nedsenkingsmetode og utforming av merden.

Siden merden skal bygges i stål, blir luftlommen fastmontert i flytekragen for å dra nytte av stålets egenskaper. Det blir foreslått ulike konstruksjonsmetoder, og den mest effektive velges. Bruk av stål gir også mulighet for mer utradisjonelle former på merden. En viktig del av problemstillingen i oppgaven er derfor å velge riktig form på merden med fokus på hva som passer best i eksponerte områder. Digitale verktøy benyttes for å måle krefter og spenninger i merdkomponentene som oppstår som følge av simulerte miljølaste, bølger og strøm. Resultatene viser at en 16-kantet merd er best egnet basert på en helhetlig vurdering som inkluderer parametere som fiskevelferd, konstruksjonsvennlighet og kostnadseffektivitet.

Til slutt blir det foreslått ulike metoder for å sikre optimal drift av merden. Nedsenkingsmetoden innebærer bruk av en vinsj som er montert på havbunnen. Det gjøres også vurderinger av hvilke metoder for fôring, behandling, fjerning av døde fisk og overvåking som egner seg best for en nedsenkbar merd på eksponert lokalitet. Bruk av vannbåren fôring, luselaser og lift-up blir identifisert som gode metoder. Når det gjelder overvåking av fisken, fokuseres det på generelle velferdsparametere og bruk av kameraovervåking. Overvåkingen av merden inkluderer bruk av bølgehøydemålere, strømmålere, dybdemålere og oksygenmålere for å overvåke tilstanden til luftlommen.

3 Abstract

The bachelor's thesis aims to address the extensive problem of salmon lice in today's fish farming industry by designing a submersible steel cage that can withstand environmental loads and reduce the environmental impact of salmon production. Submersible cages are suitable for placement in exposed areas, as environmental forces decrease the deeper they are submerged. This allows for the utilization of areas that are currently unused and provides lower environmental impacts compared to the majority of current farming practices. The report involves concept development for the key elements of a submersible cage, including the implementation of an air pocket that allows the salmon to fill their swim bladder, choice of submersion method, and cage design.

As the cage will be constructed with steel, the air pocket is securely attached to the floating collar to take advantage of the properties of steel. Various construction methods are proposed, and the most effective ones are selected. The use of steel also enables more unconventional cage shapes. Therefore, an important aspect of the report is to choose the right shape for the cage, with a focus on what suits exposed areas best. Digital tools are used to measure the forces and stresses on the cage components resulting from simulated environmental loads, waves, and currents. The results indicate that a 16-sided fish cage is best suited based on a comprehensive assessment that includes parameters such as fish welfare, construction feasibility, and cost-effectiveness.

Finally, various methods are proposed to ensure optimal operation of the fish cage. The submersion method involves the use of a winch mounted on the seabed. Assessments are also made regarding feeding, treatment, removal of dead fish, and monitoring methods that are best suited for an exposed submersible fish cage. The use of waterborne feeding, lice lasers, and lift-up systems are identified as effective methods. In terms of fish monitoring, the focus is on general welfare parameters and the use of camera surveillance. Monitoring of the cage includes the use of wave height gauges, water flow meters, depth gauges, and oxygen sensors to monitor the condition of the air pocket.

Innholdsfortegnelse

1 Forord	i
2 Sammendrag	ii
3 Abstract	iii
Figurer	vii
Tabeller	ix
4 Innledning	1
5 Teori	3
5.1 Standarder og forskrifter	3
5.1.1 NYTEK23	3
5.1.2 NS9415	3
5.2 Teknologi	4
5.2.1 Utviklingen av fiskeoppdrettsanlegg	4
5.2.2 Oppbygning og plassering av fiskeoppdrettsanlegg	5
5.2.3 Drift av sjøbaserte oppdrettsanlegg	6
5.2.4 Nedsenkable merder	6
5.3 Biologi	8
5.3.1 Atlanterhavslaks	8
5.3.2 Lakselus	8
5.3.3 Tiltak mot lakselus	9
5.3.4 Laksens interaksjon med nedsenkede merder og luftkuppel	9
5.4 Marint miljø	11
5.4.1 Strøm og bølger på fisk og anlegg	11
5.4.2 Bølgeteori	12

5.4.3	Hydrostatisk trykk	14
5.4.4	Oppdrift	14
5.4.5	Morisons likning	15
5.4.6	Dynamisk respons	16
6	Metode	17
6.1	Designprosessen	17
6.2	Avgrensning	17
6.3	Beregne responser for valgt konsept	17
6.3.1	AquaSim	17
7	Design av merd	19
7.1	Kravspesifikasjon	19
7.1.1	Funksjonskrav	19
7.1.2	Konstruksjonskrav	19
7.2	Rammer for konseptene	20
7.3	Aktuelle konsepter og løsninger	21
7.3.1	Merdkonsept	21
7.3.2	Nedsenkingsmetode	23
7.3.3	Innfesting luftlomme	23
7.3.4	Luftlomme	25
7.3.5	Innfesting not	26
7.4	Analyse av form	27
7.4.1	Dimensjoner	27
7.4.2	Oppdrift	30
7.4.3	Analyse av kvadratisk merd	32
7.4.4	Analyse av 16-kantet merd	36
7.4.5	Håndberegning på sylinder	38

7.5	Drifting av merden	40
7.5.1	Fôring av fisk	40
7.5.2	Uttak av dødfisk	40
7.5.3	Behandling	41
7.5.4	Overvåking	41
8	Resultater	43
8.1	Bestemmelse av form	43
8.2	Drifting av merd	45
9	Diskusjon	47
10	Konklusjon	51
	Referanseliste	52
	Vedlegg 1	54

Figurer

1	Illustrasjon av hovedkomponenter i konvensjonell merd med fortøyningssystem . . .	5
2	Illustrasjon av laksens svømmeblære $c =$ luftkanal, $d =$ svømmeblære (Mortensen, 2021)	8
3	Illustrasjon av en regulær bølge	12
4	Uregelmessig bølge dannet av to regulære bølger	13
5	Illustrasjon av trykk på en kloss under vann	14
6	Illustrasjon av helt nedsenket merd fra Atlantis Subsea Farming (<i>Atlantis-konseptet</i> 2023)	21
7	Illustrasjon av merd fra Scale AQ med nedsenket not (<i>Subsea system</i> 2023)	22
8	Illustrasjon av delvis nedsenket merd fra Arctic Offshore Farming (<i>Arctic offshore farming</i> 2019)	22
9	Illustrasjon løsning 2 luftlommeinnfesting	24
10	Illustrasjon løsning 3 luftlommeinnfesting	25
11	Illustrasjon løsning 1 luftlommeinnfesting knutepunkt sett ovenfra og fra siden (Illustrasjon: Fredborg, A.J.F.)	25
12	Illustrasjon løsning 2 luftlommeinnfesting knutepunkt sett ovenfra og fra siden . .	26
13	Illustrasjon notinnfesting	27
14	Illustrasjon av dimensjoner på rund merd	28
15	Illustrasjon av dimensjoner på kvadratisk merd	28
16	Illustrasjon av rørlengder på 16-kantet flytekrage, sett ovenfra og fra siden	29
17	Illustrasjon av rørlengder på kvadratisk flytekrage sett ovenfra og fra siden	29
18	Illustrasjon av de statiske kreftene som virker på merden i nedsenket posisjon . . .	31
19	Illustrasjon av den kvadratiske modellen i AquaSim	33
20	Statisk strekkraft på vaieren til kvadratisk merd	33
21	Illustrasjon av lastretninger i forhold til merd sett ovenfra	34
22	Illustrasjon av kvadratisk merd med forankring	35
23	Illustrasjon av den 16-kantede modellen i AquaSim	36

24	Illustrasjon av sylindren som blir regnet krefter på	39
25	Illustrasjon av maksimal aksialkraft på et tau i sylindren	39
26	Illustrasjon av grovkonsept for drifting av merd	45

Tabeller

1	Forslag til masse på de viktigste komponentene	30
2	Likevektsberegning på kvadratisk merd	31
3	Likevektsberegning på 16-kantet merd	32
4	Avvik for aktuelle statiske krefter på kvadratisk merd	33
5	Spenninger på komponentene for ulike lastretninger på kvadratisk merd	35
6	Avvik for aktuelle statiske krefter på 16-kantet merd	36
7	Spenninger på komponentene for ulike lastretninger på 16-kantet merd	37
8	Forhold mellom notvolum og fabrikkert stål på merdene	43
9	Evalueringsmatrise for merdene	44

4 Innledning

Bakgrunn

Havbruk har lenge vært en viktig næring i Norge, spesielt oppdrett av laks. Samtidig har lakselusproblemet blitt en økende bekymring i norsk oppdrettsindustri. Denne bacheloroppgaven beskriver design av en nedsenkbar merd som kan plasseres på eksponerte lokasjoner. Målet er å senke merdens produksjonsvolum under lakselusbeltet for å redusere lakseluspåslag og samtidig minimere påvirkning av miljøbelastninger sammenlignet med teknologi fra tradisjonell fiskeoppdrett. Den tradisjonelle metoden for oppdrett innebærer bruk av åpne merder i kystnære farvann. Disse merdene er imidlertid sårbare for lusepåslag på grunn av høy fisketetthet langs kysten. Dette har ført til behovet for alternative metoder og teknologier som kan redusere luseinfestasjoner og begrense miljøkonsekvensene.

Lakselus (*Lepeophtheirus salmonis*) er en parasitt som naturlig infiserer villaks, men i oppdrettsanlegg kan lusen formere seg i store mengder og forårsake betydelig skade på oppdrettsfisk. Denne skaden fører til tap av produksjon, økonomiske konsekvenser for oppdrettsnæringen og ikke minst dårlig fiskevelferd. Lakselusinfestasjoner har også alvorlige konsekvenser for økosystemet og ville fiskebestander. Tidligere har førkostnader ved produksjon av laks vært den største utgiften i norsk fiskeoppdrett, men de siste årene har kostnader knyttet til behandling av lakselus blitt minst like store på grunn av et økt behov for avlusingsprosesser.

For å bli kvitt lakselusproblemet har myndighetene i Norge iverksatt en rekke tiltak. En betydelig endring i reguleringen av oppdrettsnæringen har vært overgangen fra begrensning av produksjonsområder til tildeling av konsesjoner basert på innovative konsepter og anlegg. Dette har ført til utvikling av nye ideer og teknologier som kan håndtere lakselusproblemet på en mer effektiv måte. Mange av de nyskapende konseptene handler om plassering av oppdrettsanlegg på eksponerte havområder. Ved å utnytte offshore- og eksponerte lokasjoner kan man dra nytte av bedre vannutskifting og redusert lusepåslag. På den andre siden er miljølastene mye større på eksponerte lokasjoner, som ofte fører til større og mer robuste konstruksjoner. Andre konsepter involverer lukkede merder som har lite vanngjennomstrømming og krever inntak og behandling av vann. I tillegg har landbasert fiskeoppdrett blitt mer og mer benyttet. Denne løsningen vil gi veldig gode resultater knyttet til lusepåslag, men krever høyteknologiske komponenter og gode drift- og vedlikeholdsstrategier. Selv om disse ideene har vist seg lovende, gjenstår det fortsatt en rekke utfordringer for å løse lakselusproblemet fullstendig.

Selv om det har vært betydelige fremskritt innen utvikling av fiskeoppdrettsanlegg på sjø og land, er det fortsatt nødvendig å løse noen sentrale utfordringer. Produksjonsanleggene som er i bruk i dag er svært tettpakket langs norskekysten. Det er få arealer igjen som kan bli benyttet til fiskeproduksjon, og disse vil føre til enda større miljøbelastninger og risiko for lakselusspredning. Nedsenkbare merder kan være en løsning på dette. En av de største utfordringene med nedsenkbare

merder er knyttet til laksens behov for å fylle svømmeblæren. Nedsenkbare merder krever derfor luftlommer der laksen kan fylle svømmeblæren. Det er mange ulike typer luftlommer som har blitt konstruert eller foreslått, og det kreves mer utprøving for å finne de mest optimale løsningene som sikrer best fiskevelferd.

Formål

Formålet med rapporten er å utvikle en merd som kan motstå miljøkreftene samtidig som den sikrer god fiskevelferd og optimal drift av oppdrettsanlegget etter gitte designkriterier. Merden skal være rustet mot miljølastene bølger og strøm. Her er det gitt bølgekrefter $H_S = 6m$ og vannstrømhastighet $1m/s$ lineært avtakende til $0m/s$ på 100 meters havdyp. Videre vil oppgaven utforske hvordan nedsenkbare merder kan bidra til å løse lakselusproblemet, samt identifisere og finne løsninger på potensielle utfordringer knyttet til samspillet mellom teknologiske utviklinger og laksens biologi. For å utføre dette blir det benyttet seg av relevante standarder og forskrifter samt bruk av digitale verktøy for å simulere miljølasten på eksponerte områder. I tillegg blir tidligere forskning og resultater på emnet nøye undersøkt. Det skal finnes frem til strukturdimensjoner for hver enkelt merd i systemet, en metode for nedsenking og et grovkonsept for en driftsmodell på merden.

Struktur

Strukturen i rapporten består av en omfattende teoridel som tar for seg de ulike temaene som er relevante for videre undersøkning. Deretter blir metoden dokumentert som forteller om fremgangsmåtene som har blitt brukt for å løse problemstillingen. Etter det blir merden designet hvor det kontinuerlig blir gjort vurderinger for å komme frem til de mest optimale løsningene. Dette dreier seg om komponenter, dimensjoner og form i tillegg til driftsmetoder. Deretter blir resultatet av design-prosessen fremstilt med endelig driftsmodell og strukturdimensjoner for merden. Resultatene og fremgangsmåten blir diskutert i diskusjonskapittelet. Til slutt blir det gitt en konklusjon som tar for seg hovedfunnene i oppgaven og forslag til videreutvikling av prosjektet.

5 Teori

5.1 Standarder og forskrifter

Hensikten med standarder og forskrifter er å etablere en felles ramme for sikkerhet og kvalitetssikring innenfor ulike områder. Den mest sentrale forskriften og standarden innenfor havbruksnæringen er henholdsvis de nylige reviderte NYTEK23 og NS9415:2021. De siste tiårene har det vært en stor utvikling og innovasjon innen havbruksnæringen i Norge. Det var derfor behov for revisjon. Revisjonen av NYTEK23 og NS9415 har foregått parallelt for å ha sammenfallende terminologi og funksjonskrav.

5.1.1 NYTEK23

NYTEK23 er en forskrift om krav til teknisk standard for akvakulturanlegg for fisk i sjø, innsjø og vassdrag. Dens formål er å bidra til å forebygge rømming av fisk fra akvakulturanlegg i sjø, innsjø og vassdrag ved å sikre forsvarlig teknisk standard på anleggene (NYTEK23, 2022). NYTEK23 stiller krav til lokalitetsundersøkelse og diverse komponenter i akvakulturanlegg. Det er likevel ikke alt man får med, så NYTEK23 henviser til NS9415 for oppfyllelse av forskriftskrav til lokalitetsundersøkelse, akvakulturanlegg, hovedkomponenter og ekstrautstyr (Standard Norge, 2021).

5.1.2 NS9415

NS9415:2021, Flytende akvakulturanlegg – Lokalitetsundersøkelse, prosjektering, utførelse og bruk er en norsk standard som gir retningslinjer og krav for planlegging, utvikling og bruk av flytende akvakulturanlegg i Norge. Hensikten til standarden er å forebygge rømming ved hjelp av å stille blant annet de nevnte kravene. Standarden går derfor ikke inn på temaer som ikke omhandler rømming av fisk, som fiskehelse og arbeidsmiljø.

En grundig lokalitetsundersøkelse er sentralt i planleggingsprosessen for flytende akvakulturanlegg. Det er nødvendig å utføre en omfattende undersøkelse av lokaliteten før anlegget etableres. Dette innebærer å vurdere miljøforhold som strøm- og vindforhold, bølger, havbunnsegenskaper og nærhet til andre anlegg eller verneområder. I tillegg til dette må man undersøke dybdeforholdene på lokaliteten. Dette innebærer vannstand, der man må dokumentere tidevannsnivå og ekstreme høy- og lavvannstands nivåer. NS9415 stiller også krav til hvordan miljøforholdene skal identifiseres. Målet er å identifisere en egnet lokalitet som oppfyller kravene for trygg og bærekraftig drift av akvakulturanlegget.

Prosjektering og utførelse er et annet viktig punkt som dekkes av standarden. Her fastsettes krav til utforming av flytende akvakulturanlegg. Dette inkluderer dimensjonering, materialvalg,

konstruksjonsteknikker, sikkerhetsfaktorer og risikovurdering. Prosjekteringen og utførelse skal dokumenteres. Dette innebærer påvisning av flyteevne og stabilitet, beregninger og analyser for dimensjonering. Metoder for dimensjonering blir også foreslått, der man blant annet må bestemme laster og påvise kapasitet til komponentene. Man kan også utføre modellforsøk for å styrke dokumentasjonen. Utførelse gir retningslinjer for hvordan byggingen av flytende akvakulturanlegg skal utføres. Dette inkluderer kvalitetskontroll og installasjon av utstyr. Dokumentasjon av utførelse må inneholde blant annet materialeegenskaper, som brudd- og flytegrense, og overflatebehandling.

5.2 Teknologi

5.2.1 Utviklingen av fiskeoppdrettsanlegg

I oppstarten av den havbruksnæringen vi kjenner i dag, som tok til på slutten av 1950-tallet, var det regnbueørret det ble forsøkt med først (Roaldsnes, 1999). De ble satt ut i viker i sjøen som ble avsperrert ved hjelp av nøter, netting eller moloer. Det ble også forsøkt med merder som var opphengt på peler som sto på havbunnen. Disse hadde svakheter og det ble eksperimentert med forskjellige typer enkeltstående flytende merder bestående av tre, flottører og not. Rundt 1965 var de største merdene ca. 10m x 10m i vannlinjeareal. Det ble forsøkt å sette ut laks på Hitra i 1969 av Grøntvedt brødrene som lagde merdene åttekantet for at fisken skulle kunne svømme i sirkel (Misund, 2023). «Grøntvedtmerden» viste seg å bli svært populær på 70-tallet og var i bruk til sent på 90-tallet. Oppdrettsanleggene på 70-tallet var plassert på skjermede lokaliteter med kort avstand til land. Behov for bedre gjennomstrømming og blant annet plassmangel gjorde at anleggene ble plassert lenger ut på mer eksponerte lokaliteter, men med bruk av samme teknologi på mer eksponerte lokaliteter resulterte det i økt forekomst av havari. Grøntvedtmerdene hadde en viss fleksibilitet, men kunne ikke brukes på lokaliteter med signifikant bølgehøyde på 1m i over tid. Signifikant bølgehøyde (H_S) forklares nærmere i kapittel 5.4.1.

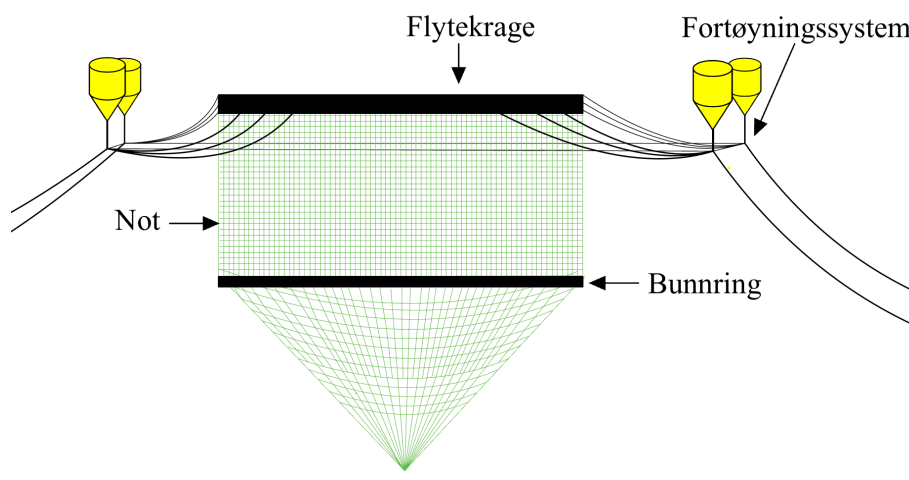
Stålanleggene kom på 80-tallet og representerer andre generasjons anleggstyper. Disse var industriproduserte med vannlinjeareal på ca. 15m x 15m og notvolum opp til ca. 1000 m^3 . Et anlegg besto gjerne av 12 merder i en 6 x 2 konfigurasjon (Roaldsnes, 1999). På 90-tallet økte størrelsene oppimot 25m x 25m med notdybde på ca. 20m. Merdene var satt sammen i stive eller leddete rammer med gangveier og arbeidsplattform, gjerne med en driftsbygning eller tilknyttet en driftsbygning på en flytende plattform. Selv med byggemateriale av stål hadde disse anleggene begrenset styrke i bølger. De stive anleggene hadde begrenset utmattingslevetid på lokaliteter der signifikant bølgehøyde var større enn ca. 1m. På 80-tallet forekom det en mengde utmattingsbrudd i slike anlegg som dels resulterte i havari.

Den første merden i plast ble laget av Helgeland Plast, senere AKVAgroun og kom allerede i 1974 (Roaldsnes, 1999). Aqualine, senere Scale AQ, leverte også merder i plast. Flytekragene på

disse merdene består av to plastrør som er sammenbundet med beslag. Disse merdene er svært fleksible og har lang levetid selv i områder med tidvis stor sjø. Aqualine merden var sent på 90-tallet typegodkjent for $H_S = 3,5 - 4m$, 2,4 knops strømhastighet og vindhastighet 30m/s. Det er videreutviklinger av disse merdene som i dag regnes som bransjestandard for kommersiell drift.

5.2.2 Oppbygning og plassering av fiskeoppdrettsanlegg

Et konvensjonelt sjøbasert oppdrettsanlegg for laks er oppbygd av flere komponenter som sammen danner en funksjonell enhet. Hovedkomponentene i et slikt oppdrettsanlegg er flytekrage, bunnring, not og fortøyningssystem. Flytekrager er flytende konstruksjoner som består av rammer eller ringer laget av plast eller stål som har som hensikt å sørge for oppdrift. Noten holdes i spenn mellom flytekragen og bunnringen der bunnringen sørger for nedtrekk. Noten er et nett som fungerer som en barriere for å holde fisken inne i merden samtidig som det gir god sirkulasjon av vann. I forbindelse med beregning av hydrodynamiske laster på noten brukes soliditet til å fortelle noe om egenskapene til en not. Soliditet er definert som forholdet mellom projisert notlineareal og totalt areal på et notpanel (Standard Norge, 2021). Noten er vanligvis laget av slitesterkt materiale som nylon. Merdene er festet til fortøyningssystemer som er forankret til sjøbunnen. Fortøyningssystemet består vanligvis av bøyer, anker, tau og kjetting som holder merdene på plass selv under påvirkning av bølger og strøm. I tillegg har anleggene enten en fôrflåte eller en fôrstasjon på land som anlegget styres fra og der fiskefôret lagres.



Figur 1: Illustrasjon av hovedkomponenter i konvensjonell merd med fortøyningssystem

Plasseringen av lokaliteter for oppdrett av laks tar hensyn til ulike faktorer for å møte næringens behov. Konvensjonell oppdrett benytter stort sett plastmerder som er plassert på skjermede lokaliteter. Imidlertid er det begrenset med tilgjengelig plass langs kysten i dag, og behovet for vekst i næringen krever alternative løsninger. For å imøtekomme denne utfordringen, blir det stadig viktigere å ta i bruk nye arealer på mer eksponerte lokaliteter. Dette innebærer å utforske

muligheter for oppdrett i områder med større bølgeeksponering og mer krevende miljøforhold. Ved å utvikle og implementere teknologi som tåler slike forhold, kan oppdrettsnæringen utvide produksjonen og utnytte potensialet i disse områdene. Slik kan oppdrettsnæringen i Norge fortsette å vokse og møte etterspørselen etter laks på en bærekraftig og ansvarlig måte. Dette krever imidlertid kontinuerlig forskning, innovasjon og samarbeid mellom oppdrettere, myndigheter og forskningsinstitusjoner for å finne optimale løsninger som ivaretar både økonomiske, miljømessige og sosiale hensyn.

5.2.3 Drift av sjøbaserte oppdrettsanlegg

Sjøbaserte matfiskanlegg driftes i dag med en kombinasjon av konvensjonelle metoder og økende bruk av ny teknologi. Konvensjonell oppdrett benytter vanligvis åpne merder som er utstyrt med fjernstyrte føringssystemer. Dette gjør det mulig å kontrollere og regulere føringen av fisken på en presis måte. Det er fremdeles mye manuelt arbeid og manuelle operasjoner involvert i driften av anleggene som for eksempel fjerning av død fisk og tilsyn av anlegget. Mens mange oppdrettsanlegg fortsatt er lavteknologiske, ser man en økende implementering av teknologiske løsninger. Dette inkluderer mer sensorer for overvåking av vannkvalitet og temperatur, men også mer avanserte systemer som automatisk teller lus og måler biomasse. Sensorinformasjonen gir viktig innsikt i oppdrettsmiljøet og bidrar til bedre styring av anlegget for å sikre fiskevelferd og optimal vekst. Driften av sjøbaserte matfiskanlegg er nøye regulert av forskrifter som Akvakulturdriftsforskriften, samt av tilsynsmyndigheter som Fiskeridirektoratet og Mattilsynet. Disse reguleringene sikrer at oppdrettsanlegg opererer i samsvar med strenge standarder for miljøhensyn, dyrevelferd og mattrygghet. Kravene til rapportering, dokumentasjon og overvåking av oppdrettsaktiviteten bidrar til ansvarlig drift og kontroll med næringens påvirkning på økosystemene.

5.2.4 Nedsenkbare merder

Nedsenkbare merder er en spesiell type oppdrettsmerd som skiller seg fra konvensjonelle merder ved at biomassen senkes ned under vannoverflaten. Det er forskjellige teknologiske løsninger som vil bli nærmere beskrevet i kapittel 7. Felles for dem er at de har et tak på noten og de som skal benyttes til oppdrett av laksefisk har en innretning som gir fisken mulighet til å fylle svømmeblæren med luft. Det har blitt forsket på nedsenkbare merder siden 1980-tallet og forskere fra Havforskningsinstituttet har gjort forsøk med laks i nedsenket oppdrett som har gitt oppdrettere et grunnlag når de skal utvikle teknologi for kommersialisering av nedsenket oppdrett.

Atlantis er et prosjekt som startet i 2014 som et samarbeid mellom AKVA group, Sinkaberg Hansen og Egersund not for å utvikle nedsenkbare oppdrettsanlegg for lakseoppdrett. Atlantis

fikk tildelt én utviklingstillatelse for å teste ut teknologien i stor skala. Teknologien bygger på kjente komponenter fra kommersielle oppdrettsanlegg og det var et mål for Atlantis at merdene skulle kunne plasseres i en vanlig rammefortøyning, med noen modifikasjoner. Dette for å gjøre terskelen for å ta i bruk systemet så lav som mulig. Hovedelementene som teknologisk skiller Atlantis fra kommersiell oppdrett er at flytekragen har et reguleringsystem for heving og senking. I tillegg har den en luftkuppel med vannføringsenhet og oppheng for kamera, lys og annen sensorikk. Et fortøyningssystem med regulerbare bøyer er også blitt utviklet samt at merdene har et nottak. Luftkuppelen som har en diameter på ca. $4m$ er en sentral enhet som danner en luftlomme i dypet som laksen er helt avhengig av. Mer om det i kapittel 5.3. Luftkuppelen er festet i nottaket som har innlagt krysstau som går inn til flytekragen. Prinsippet for nedsenking er så enkelt som at flytekragen fylles med vann når den senkes og den fylles med luft for å heves. Selve fortøyningssystemet er en vanlig rammefortøyning der oppdriften i bøyene er regulerbar (Olafsen *et al.*, 2021b).

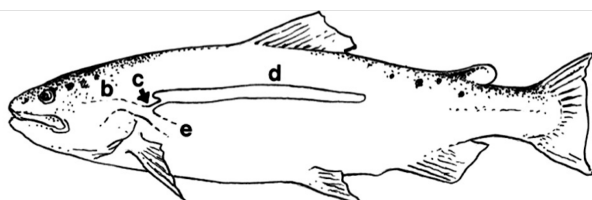
Nekst AS har et annet konsept for nedsenket oppdrett under utvikling. Dette er et steg lenger fra den kommersielle oppdretten vi kjenner i dag. Konseptet består av merd med flytekrage, notpose, tilhørende rammefortøyning og en sentral forflåte. Konseptet skiller seg derimot fra tradisjonelle oppsett på grunn av muligheten for nedsenking og at flytekragen er laget av stål. Nedsenkingen skal gjøres med en bunnfast vinsj (Thorbjørnsen og Fossan, 2020). Merden skal ha en stiv rammekonstruksjon med en integrert luftkuppel. Diameteren på merden skal være omtrent $60m$ med notdybde på omtrent $30m$. Videre skal merden ha dobbel not med tak som holdes i spenn ved bruk av en bunnring. Den bunnfaste vinsjen skal drives av en elektrisk motor og skal kompensere linestrekking fortløpende. Det skal installeres to vinsjer per merd for å sikre redundans og Nekst skal utvikle en AUV for kontinuerlig inspeksjon av anlegget og fisken samt overvåking av vannparametre. Merden skal kunne driftes i både hevet og senket tilstand. Nekst planlegger at merden skal senkes til omtrent 20 meter ved situasjoner med økt risiko for lusepåslag og ved $H_S > 3m$. Merden dimensjoneres for maksimal $H_S = 5m$ og en maksimal strømhastighet på $1m/s$ i både overflate og neddykket tilstand.

5.3 Biologi

5.3.1 Atlanterhavslaks

Atlanterhavslaks (*Salmo Salar*) er en anadrom fiskeart som betyr at den vandrer mellom ferskvann og saltvann gjennom livet. Den tilbringer sin tidlige livsfase i elver og bekker før den vandrer ut i havet, hvor den vokser og modnes. Når laksen er kjønnsmoden, vender den tilbake til elven og ferskvann for å gyte og fullføre livssyklusen (Hansen *et al.*, 1998). Denne tilpasningen til to forskjellige miljøer krever at fisken gjennomgår smoltifisering, som er en tilpasning i fysiologi og atferd. Overgangen fra ferskvann til saltvann kan også føre til utfordringer knyttet til økt salinitet og patogen- og predatorrisiko. I oppdrett blir laksen utsatt for både ferskvanns- og saltvannsfaser, og disse fasene kan manipuleres og kontrolleres for å forbedre produksjonen. For å smoltifisere må fisken ha oppnådd en kritisk størrelse og vekst, og dette kan reguleres slik at man kan gjennomføre smoltutsettet på både vår og høst. Smolten settes ut i merder i saltvann, hvor fisken vil vokse til den når en slaktevekt på rundt 3 – 6kg i løpet av 12 – 18 måneder, avhengig av ulike faktorer som vanntemperatur, fôring og fiskehelse. Valg av lokalitet for oppdrett er viktig med tanke på forurensning, temperatur, smittefare og vannkvalitet da dette er svært viktig for fiskevelferden.

Laksens svømmeblære er et gassfylt organ som ligger i bukhulen hos laksen. Hovedfunksjonen til svømmeblæren er å kontrollere fiskens oppdrift og dermed dens posisjon i vannsøylen. Svømmeblæren tillater fisken å opprettholde en stabil dybde uten å bruke energi på å svømme aktivt. Laksen har en luftkanal mellom spiserøret og svømmeblæren som vist på figur 2. Dette gjør laksen avhengig av å jevnlig svømme opp til overflaten for å snappe luft for å opprettholde nøytral oppdrift.



Figur 2: Illustrasjon av laksens svømmeblære c = luftkanal, d = svømmeblære (Mortensen, 2021)

5.3.2 Lakselus

Lakselus (*Lepeophtheirus salmonis*) er en vanlig ektoparasitt på oppdrettet og vill laksefisk (Jones og Johnson, 2015). Parasitten kan forårsake betydelige økonomiske tap og påvirke villaksbestander. Biologien til lakselus, inkludert dens livssyklus og næringsvaner, er etter hvert grundig studert for å bedre forstå deres innvirkning på laksebestandene.

Lakselus har en livssyklus som består av åtte stadier. De to første stadiene kalles de naupliuslarver

og er frittlevende, mens de i det tredje stadiet infiserer en vert. Under alle disse tre stadiene er lusen mindre enn 1mm lang. De voksne hannene blir 5 – 6mm lange, og hunnene blir 10 – 12mm (Søvik, 2022). Livssyklusen til lakselus er sterkt påvirket av temperatur og fotoperiode, der varmere vanntemperaturer og lengre fotoperioder akselererer utviklingen (Jones og Johnson, 2015). Voksenstadiet er mest skadelig for laksefisk, da lusa fester seg til huden og spiser av vertens slim, vev og blod. Store påslag av lus kan forårsake fysisk skade på huden og gjellene, forstyrre fiskens evne til å regulere salt- og vannbalanse og føre til infeksjoner (Jones og Johnson, 2015). Det har blitt observert at lakselusen har en tiltrekning mot lyset og har utviklet seg til å posisjonere seg i de øverste vannmassene for å øke sannsynligheten til å treffe på en vert (Johannessen, 1977). Dette øverste vannlaget er det vi kaller lusebeltet.

5.3.3 Tiltak mot lakselus

Kontrolltiltak mot lakselus inkluderer bruk av medikamentelle behandlinger, ikke medikamentelle behandlinger, renseskisk og fysiske barrierer. De medikamentfrie behandlingsmetodene har dominert siden 2016 da utstrakt resistensutvikling mot medikamentene samt det miljømessige aspektet ved bruk av legemidler gjør at bruken ble kraftig redusert (Bornø *et al.*, 2023). De ikke medikamentelle metodene (termisk og mekanisk avlusing) krever mest håndtering av fisken. Dette medfører at det er disse metodene som i størst grad fører til negative helse- og velferdseffekter hos fisken. Biologisk kontroll, som bruk av renseskisk til å konsumere lus, har vist lovende resultater, men deres effektivitet varierer avhengig av arten av renseskisk som brukes og miljøforholdene. I tillegg stilles det spørsmål om bruk av renseskisk er etisk forsvarlig. Bruk av renseskisk på et anlegg er som regel ikke nok i seg selv for å få bukt med lakselusproblematikken men brukes gjerne i kombinasjon med blant annet fysiske barrierer. Fysiske barrierer, som luseskjørt eller snorkel, kan hindre lus fra å komme inn i merden og infisere fisken, men kan også påvirke vannstrømmen og oksygenivået i merden negativt.

5.3.4 Laksens interaksjon med nedsenkede merder og luftkuppel

Det har tidligere blitt gjort forsøk for å undersøke hvordan laksen håndterer å holdes nedsenket i kortere perioder og over lengre perioder (uker til måneder). Noen av disse studiene har undersøkt luftkuppel i nedsenkede merder og blant de første ble gjort tilbake i 1989 (Dempster *et al.*, 2020). Det første studiet som gjorde forsøk med å holde laksen nedsenket gjennom en hel produksjonssyklus på 12 mnd fastslo at laksen klarte å opprettholde normal svømmeadferd som følge av at den benyttet seg av luftlommen (Dempster *et al.*, 2022). Merdene som var nedsenket på 15m hadde også langt mindre lusepåslag sammenlignet med kontrollmerdene som lå i overflaten, men det dukket opp nye problemer. Fisken i de nedsenkede merdene hadde lavere vekst, høyere dødelighet og dårligere generell helsetilstand. Dette hadde tett sammenheng med de sub-optimale miljøforholdene lenger ned i vannsøylen, da spesielt den lavere temperaturen og mengde oppløst oksygen (Dempster *et*

al., 2022).

I Atlantis Farming sitt siste utsett ble totalt 340 000 fisk satt ut i to Atlantismerder 26. april 2021. Merdene ble slaktet ut i månedsskiftet september/oktober samme år. I forbindelse med Atlantis prosjektet ble det utført et måleprogram som omfattet registreringer knyttet til fiskevelferd, miljø, lusetelling, fiskeadferd og produksjonsdata. Hensikten med måleprogrammet var å bidra til å finne ut om prosjektet var en suksess opp mot målsettingen som var utarbeidet. Eksempelvis var det å finne ut om bruken av Atlantismerdene gjorde at fisken fikk færre lus og at fiskens velferd samtidig ble opprettholdt. Atlantismerdene ble sammenlignet i «Atlantis produksjonsrapport Otervika» med to kontrollmerder i samme anlegg. Resultatene fra prosjektet viste at det ikke ble registrert noen systematiske tegn på nedsatt velferd i Atlantismerdene sammenlignet med kontrollmerdene så lenge fiskens generelle helse var god. Den eneste velferdsindikatoren som ble sett oftere i Atlantismerdene enn kontrollmerdene var snutesår. Det ble i rapporten foreslått en mulig forklaring som var at fisken søkte opp mot overflaten etter heving av merden og «stanget» mot nottaket. Kontrollmerdene ble avlusert flere ganger enn Atlantismerdene og velferden ble vurdert til å være bedre i Atlantismerdene med tanke på skinnhelse. Det ble presisert i rapporten at det var viktig å vurdere fiskens generelle helsetilstand når merden skulle senkes, fordi en slik miljøendring var en utfordring for fisken. Dersom fiskens generelle helse var god så den ut til å håndtere prosessen godt. Resultatene tyder på at fiskens velferd er like godt ivaretatt i nedsenket merd, som i kommersiell merd (Olafsen *et al.*, 2021a). Fiskens adferd ble overvåket under heving og senking av merdene. Det ble registrert noen tegn på økt stressnivå under selve operasjonen, men at fisken raskt hentet seg inn igjen og tok i bruk luftkuppelen for å snappe luft samt å spise fôr. Svømmehastighet ble målt for å gi en indikasjon på om fisken tok i bruk svømmeblæren, da fisken kompenserer for tapt oppdrift ved å øke svømmehastigheten. De målte svømmehastighetene ble vurdert til å ligge godt innenfor det som ansees som normalt. Lusesituasjonen ble overvåket med kamera godkjent av mattilsynet for å unngå å heve merden til overflaten for å utføre lovpålagt lusetelling. Atlantismerdene unngikk de største lusepåslagene da kontrollmerdene hadde to avlusninger før Atlantismerdene også fikk behov for avlusning. I rapporten antas det at lusepåslaget i Atlantismerdene skyldes overføring av lus i vannmassene fra kontrollmerdene i forbindelse med avlusning på kontrollmerdene. Siden temperaturen lenger ned i vannsøylen er lavere enn i overflaten gjennom produksjonsperioden ble tilveksten på fisken i Atlantismerdene noe lavere enn i kontrollmerdene. Om man justerte tilvekstmodellen etter temperatur var tilveksten normal. Det er verdt å nevne at om vinteren vil temperaturen være høyere lenger ned i vannsøylen, som vil kunne ha positiv innvirkning på tilveksten. Avslutningsvis i rapporten nevnes det at erfaringene fra utsettet tilsier at der er fullt mulig å holde fisken i dypet det aller meste av produksjonstiden (Olafsen *et al.*, 2021a).

5.4 Marint miljø

5.4.1 Strøm og bølger på fisk og anlegg

De største belastningene som virker på tradisjonelle fiskeoppdrettsanlegg er bølger og strøm. Vind gir også belastninger, men ikke i like stor grad. I NS9415 blir det stilt krav om at akvakulturanlegg skal dimensjoneres mot bølger, vind og strøm i minimum 8 forskjellige retninger på akvakulturanlegget. På enkelte anlegg så må man også ta hensyn til andre miljølaster, som is og snø.

Selv om bølger og strøm gir store belastninger på fiskeoppdrettsanlegg er det nødvendig med strøm for å sikre god fiskevelferd. God vanngjennomstrømming i en merd sørger for høyere utskifting av vann som gir bedre oksygenmetning og effektiv transport og fortykning av avfallsstoffer (Folkedal, Hvas og Oppedal, 2019). Det kan likevel bli for mye av det gode. Dersom fisken blir eksponert for store strømhastigheter vil de nå det som kalles for kritisk svømmehastighet. Dette er den maksimale hastigheten fisken kan svømme før den ikke klarer å motstå strømhastighetene. ”Hvis strømmen overgår fiskens svømmekapasitet, blir den utmattet, stresset, danner melkesyre i muskulaturen og vil over tid dø” (Folkedal, Hvas og Oppedal, 2019). Kritisk svømmehastighet varierer mest utifra størrelse på fisken, men det er også stor variasjon mellom fisk på samme størrelse. Fisken er kun i stand til å opprettholde den kritiske svømmehastigheten i få minutter, som fører til at langvarig svømming kun er mulig ved lavere hastigheter.

Dette er særlig relevant når det kommer til eksponerte fiskeoppdrettsanlegg, ettersom eksponerte lokaliteter opplever sterkere strøm- og bølgekrefter. Eksponerte fiskeoppdrettsanlegg har blitt mer og mer utprøvd de siste årene og det er også dette som blir vurdert i denne rapporten med nedsenkbare merder. En fordel med nedsenkbare merder er at strømhastigheten i vannet blir lavere jo lenger ned i vannsøylen man kommer. Man kan derfor til en viss grad justere strømhastigheten fisken opplever ved å heve og senke merden. Det er også viktig å passe på at strømhastighetene ikke blir for lave. Lave strømhastigheter resulterer i feitere fisk med mindre proteiner, mens moderate vannstrømmer gir best fiskevelferd og muskelvekst på laksen (Solstorm, 2017). Man ønsker derfor en viss strømhastighet i anlegget.

Bølger derimot gir ingen positive effekter. Det er foreløpig lite informasjon om hvorvidt fisken blir påvirket av sterke bølgekrefter, men de gir store krefter og forskyvninger på fiskeoppdrettsanlegg. Dette gjør arbeidsoperasjoner på merd svært krevende og tidvis uforsvarlig. Dette kan påvirke operasjoner som inspeksjon, lusetelling og avlusing negativt.

Det finnes to hovedtyper bølger, dønninger og vindgenererte bølger. Dønninger er bølger som dannes av vind på åpne havområder. Disse har lange bølgelengder og mindre bølgetopper. Lange bølgelengder gjør at disse bølgene beveger seg raskt, og de vil miste lite energi etter hvert som de beveger seg (Lundby, 2014). Dette gjør at dønninger kan bevege seg over store områder og treffe

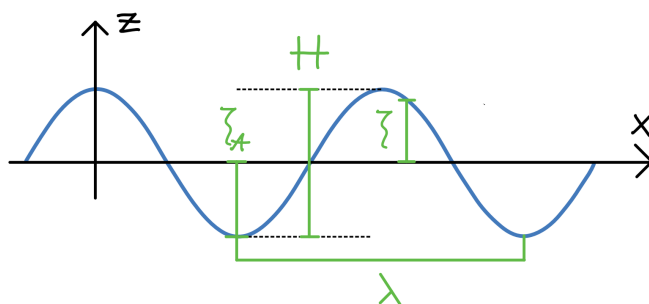
kysten. Dønninger blir dannet av vind, men de vil forplante seg videre utover vindens virkeområde. Vindgenererte bølger blir dannet over områder der vinden virker, og har lavere bølgelengde og høyere frekvens enn dønninger. Vindgenererte bølger er gjerne mer ujevne og uregelmessige enn dønninger. På eksponerte områder vil man ha en god blanding av dønninger og vindgenererte bølger.

Siden bølger kan ha svært varierende bølgelengde, bølgehøyde og frekvens er det vanlig å dimensjonere akvakulturanlegg etter signifikant bølgehøyde, H_S . Signifikant bølgehøyde er gjennomsnittsbølgehøyden for den tredjedelen av bølger med høyest bølgehøyde over en periode. I NS9415 regner de signifikant bølgehøyde for en sjøtilstand med en varighet på tre timer og en returperiode på 50 år (Standard Norge, 2021). Med returperiode 50 år menes det at en spesifikk hendelse vil forekomme i gjennomsnitt en gang per 50 år. Returperiode blir beregnet ut ifra historiske data og statistiske modeller, som alltid vil føre til en viss usikkerhet rundt prognosene.

Dersom man har en gitt signifikant bølgehøyde kan man gjøre et anslag for å finne den største bølgehøyden i en periode. I NS9415 setter de $H = H_{maks} = 1,9H_S$ ved regulær sjø. Ved regulær sjø antar man at bølgeforholdene i havet er relativt stabile, forutsigbare og ikke ekstreme, altså at bølgene har karakteristiske bevegelser. Det er verdt å nevne at dette er en empirisk tilnærming, og det finnes flere måter å beregne både H_S og H_{maks} . Som regel gir metodene ganske like resultater.

5.4.2 Bølgeteori

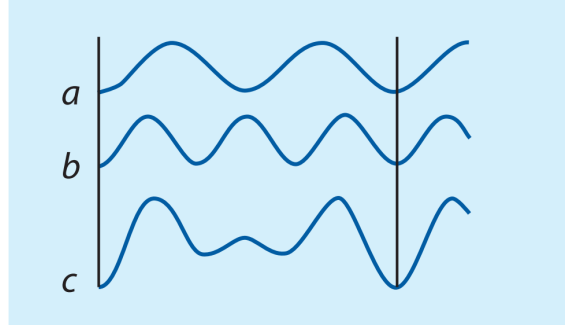
Det har blitt skrevet en del om bølger og bølgehøyde og hvor varierende bølgene i sjøen kan være. Her blir det tatt for seg hvordan man kan matematisk modellere to-dimensjonale bølger som en sinuskurve. Vi skal straks se hvordan bølgehøyde, bølgelengde og frekvens hører sammen, men først er det viktig å forklare hva som menes med dette. På figur 3 er det illustrert en bølge og dens egenskaper.



Figur 3: Illustrasjon av en regulær bølge

Bølgehøyden, H , er den vertikale avstanden fra bølgekam til bølgedal, mens amplituden, ζ_A , er den vertikale avstanden fra topp- eller bunnpunkt til stille vannsnivå. Vi får derfor følgende sammenheng: $H = 2\zeta_A$. Bølgelengden, λ , er den horisontale avstanden fra et punkt på bølgen til

det samme punktet på neste fase. Denne blir typisk målt fra bølgetopp til påfølgende bølgetopp. ”Bølgeperioden, T , er tiden det tar for en bølgelengde å flytte seg i bølgeretningen forbi et tenkt, stillestående punkt” (Lundby, 2014). ζ er amplituden ved et gitt tidspunkt, t , og en posisjon, x . Bølgeprofilen er gitt som $\zeta = \zeta_A \cos(kx - \omega t)$. Bølgetallet, k , er gitt ved $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ og frekvensen, ω , er gitt ved $\omega = \frac{2\pi}{T}$. I den virkelige verden er det ingen bølger som vil ha et perfekt bevegelsesmønster som har blitt beskrevet. Man kan likevel danne uregelmessige bølger ved å addere flere regulære bølger som alle har forskjellige bølgelengder, amplituder og perioder. Da kan man få en bølge som er illustrert på figur 4 og på side 1-17 i *Havromsteknologi* (Lundby, 2014).



Figur 4: Uregelmessig bølge dannet av to regulære bølger

Bølger har også et hastighetspotensial som blir bestemt av hydrodynamiske krav og grensebetingelser. Det blir ikke gått noe mer inn på disse kravene, men utledningen er vist på side 1-27 til 1-31 i *Pensumhefte, Marin teknikk 3 Hydrodynamikk* (Pettersen, 2018). Hastighetspotensialet er gitt som følger:

$$\phi = \frac{g\zeta_A}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

Her er h høyden fra bunnen til vannoverflaten, og z er dybden nedover i vannsøylen. Av samme grensebetingelser får man dispersjonsrelasjonen, som gir en sammenheng mellom frekvens og bølgelengde. Dispersjonsrelasjonen sier:

$$\omega^2 = kg \tanh kh \quad (2)$$

Disse formlene gjelder for alle vanddybder. Dersom man har dypt vann blir h stor som resulterer i større kh . Dersom man bruker definisjonene for $\sinh(x)$, $\cosh(x)$ og $\tanh(x)$ kan man forkorte uttrykkene, og man vil få forenklete formler for hastighetspotensial og dispersjonsrelasjon:

$$\phi = \frac{g\zeta_A}{\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (3)$$

$$\omega^2 = kg \quad (4)$$

Generelt sett så er det trygt å anta at man har dypt vann når $\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$ (Pettersen, 2018). Et annet viktig forhold å bemerke seg er forholdet mellom bølgehøyde og bølgelengde. Dersom bølger blir

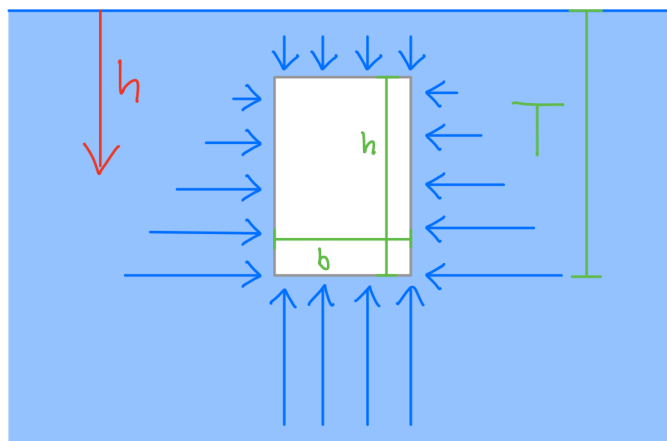
bratte nok så vil bølgene bryte, noe som resulterer i lavere energiinnhold og bølgehøyder (Lundby, 2014). Den maksimale helningen bølger kan ha er funnet å være rundt $\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{7}$. Dersom forholdet blir større enn dette vil bølgen bryte.

5.4.3 Hydrostatisk trykk

Hydrostatisk trykk er læren om trykk i væske uten bevegelse (Lundby, 2014). Trykk er definert som $p = \frac{F}{A}$, der p er trykk og F er kraften som virker på overflaten A . Trykk får dermed benevnningen N/m^2 . Trykket i vann blir definert som følger:

$$p = p_0 + \rho gh \quad (5)$$

Der gravitasjonskonstanten, g , er lik $9,81m/s^2$, h er dybden nedover i vannsøylen og ρ er tettheten til vannet. Ferskvann har tetthet $\rho = 1000kg/m^3$, mens saltvann har tetthet $\rho = 1025kg/m^3$. p_0 er lufttrykket. Trykket i vann er altså avhengig av dybden. På figur 5 kan man se at trykket øker jo dypere man går.



Figur 5: Illustrasjon av trykk på en kloss under vann

5.4.4 Oppdrift

Oppdrift er en kraft som virker på legemer som er nedsenket i en væske, og avgjør om et objekt synker eller flyter. Oppdriftskraften oppstår på grunn av trykkforskjeller i væsken og virker oppover på objektet. Arkimedes lov sier at oppdriftskraften til et objekt er lik vekten til volumet av det fortrenge fluidet. Dersom vi tar utgangspunkt i figur 5 kan vi finne et uttrykk for oppdriftskraften, som også blir utledet i *Havromsteknologi* på side 2-9 (Lundby, 2014).

Objektet har bredde, b , høyde, h , og lengde, l , inn i planet. Klossen har en dypgang lik T . Siden trykket på siden av klossen er like stort og virker i motsatt retning av hverandre annullerer de hverandre. Det er da kun forskjellen i trykket på oversiden og undersiden av klossen som gir

oppdriftskraft på klossen. Vi setter inn i likning 5 og får følgende:

$$p_1 = p_0 + \rho g(T - h)$$

$$p_2 = p_0 + \rho gh$$

Der p_1 er trykket på oversiden og p_2 er trykket på undersiden. Siden trykk er gitt av $p = \frac{F}{A}$ har vi $F = p \cdot A$, og $A = b \cdot l$. Oppdriftskraften, F_B , på klossen blir som følger:

$$F_B = F_2 - F_1$$

$$F_B = bl(p_0 + \rho gT) - bl(p_0 + \rho g(T - h))$$

$$F_B = blh\rho g$$

Volumet av klossen er lik blh , som i dette eksempelet er det samme som volumet av det fortrenget vannet. Volumdeplasement bruker ofte symbolet ∇ . Oppdriftskraften blir dermed:

$$F_B = \rho \nabla g \quad (6)$$

5.4.5 Morisons likning

Morrisons likning blir mye brukt for å beregne bølgekrefter på strukturer som er plassert i vann. Den totale kraften består av et dragledd og et masseledd med tilhørende konstanter. Formelen er gitt som følger:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A u |u| + \rho C_M V a_x \quad (7)$$

Her er C_D dragkonstanten og C_M er massekonstanten. Konstantene C_D og C_M vil ikke alltid være konstante over dybden, og dragkonstanten avhengig av Reynoldstallet, $Re = \frac{UL}{\nu}$ (Pettersen, 2018). Her er U vannstrøms hastighet, L er karakteristisk lengde (for rør: $L = D$), og ν er kinematisk viskositet. Det er vanlig å benytte seg av konstantene $C_D = 1,2$ og $C_M = 2,0$ når man beregner krefter på sylindere. For andre former tverrsnitt blir det benyttet andre verdier. A er det projiserte arealet på sylindere som bølger treffer, og V er volumet til sylindere. u er den horisontale farten til bølgepartiklene og a_x er den horisontale bølgepartikkelakselerasjonen. Grunnen til at bølgepartikkelhastighetene står ført som $u|u|$ er for å bevare retningen på kraften. Man kan finne u og a_x ved å partiellderivere hastighetspotensialet til en bølge, først med hensyn på horisontal bevegelse, x , og deretter tiden, t . Følgende uttrykk er funnet fra hastighetspotensialet til bølger ved dypt vann:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{kg\zeta_A}{\omega} e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = kg\zeta_A e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (9)$$

5.4.6 Dynamisk respons

Dynamisk respons er en avgjørende egenskap som må vurderes nøye under design og konstruksjon av marine strukturer. Marine konstruksjoner, som plattformer, broer, vindturbiner og ikke minst akvakulturanlegg, er utsatt for ekstreme belastninger fra bølger, vind, havstrømmer og andre miljøfaktorer. Disse påkjenningene kan forårsake resonans i konstruksjonene, som igjen fører til økt belastning, strukturell svikt og fare for sikkerheten til personell som arbeider på konstruksjonene. Egenfrekvens er en viktig parameter som påvirker dynamisk respons for marine konstruksjoner. Egenfrekvens refererer til den naturlige frekvensen en konstruksjon svinger fritt uten ytre belastninger. Denne frekvensen avhenger av konstruksjonens masse, stivhet og demping. Egenfrekvensen er viktig fordi den forteller hvor raskt eller langsomt en konstruksjon reagerer på dynamiske belastninger, som for eksempel bølger, strøm og vind. Hvis den påførte belastningen har en frekvens som er nær eller i nærheten av konstruksjonens egenfrekvens, kan resonans oppstå, noe som kan forårsake overdreven bevegelse og belastning. Derfor er det viktig å beregne egenfrekvensen til en marin konstruksjon for å unngå potensielle resonansproblemer og sikre dens stabilitet og sikkerhet under dynamiske påkjenninger. Man kan beregne egenfrekvens med følgende formel, som er nærmere forklart i kapittel 3 av *Pensumhefte, Marin teknikk 3 Hydrodynamikk* (Pettersen, 2018).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{C}{m} - \left(\frac{B}{2m}\right)^2} \quad (10)$$

Hvor massen, m , består av to ledd, $m = M + A$, der M er massen til konstruksjonen og A er tilleggsmassen som oppstår av hydrodynamiske egenskaper. C er fjærkonstanten og B er dempingen til systemet. Fjærkonstanten er gitt ved $F = C \cdot r$, der F er kraften som virker på "fjæren", og r er forskyvningen til denne. Ofte blir B neglisjert siden det første leddet blir mye større i forhold, og ved praktiske problemer blir ω tilnærmet lik den udempede frekvensen (Pettersen, 2018).

6 Metode

6.1 Designprosessen

Neddykking – Litteratursøk

I neddykkingsfasen brukte kandidatene mye tid på å lete opp relevant litteratur og å sette seg inn i problemstillingen. Dette innebar blant annet å undersøke hvilken teknologi som eksisterte allerede og som var nærliggende til problemstillingen.

Idégenerering

I idégenereringsfasen ble informasjon som ble innhentet i neddykkingsfasen kombinert og sett opp mot kravspesifikasjonen for å skape idéer som samlet skulle løse problemstillingen.

Konseptutvikling

I konseptutviklingsfasen ble idéene videre analysert for å avgjøre om de var realiserbare. Ulike løsninger ble sammenlignet med hverandre og enkelte løsninger ble videreutviklet. De endelige løsningene ble satt sammen til et konsept.

I praksis flyter disse stegene mer sammen i hverandre. Designprosessen er en iterativ prosess som vil si at en flere ganger går tilbake og gjentar tidligere steg for å endre eller forbedre løsningen etter hvert som nye idéer og utfordringer dukker opp.

6.2 Avgrensning

For dette bachelorprosjektet har det blitt gjort noen avgrensinger av prosjektets omfang. Avgrensingene er gjort etter samtaler og diskusjoner med veiledere og internt i bachelorgruppen. Faktorer som har påvirket avgrensingene i dette prosjektet er hovedsakelig tid og kunnskap.

6.3 Beregne responser for valgt konsept

6.3.1 AquaSim

I denne rapporten blir programvaren AquaSim brukt for å komme frem til ønskede resultater. Det skal undersøkes om merden tåler miljølastene i tillegg til å velge form på merden. AquaSim er et digitalt verktøy som er utviklet av Aquastructures AS, og blir mye brukt innenfor fiskeoppdrettsnæringen, ettersom den gir realistiske resultater på marine konstruksjoner. AquaSim beregner blant annet krefter, spenninger og forskyvninger som oppstår i diverse komponenter i en konstruksjon som følge av miljølaste som strøm, bølger og vind.

AquaSim benytter Finite Element Method (FEM) samt en rekke andre hydrodynamiske formler for å analysere en konstruksjon. FEM går ut på å dele opp en konstruksjon i et endelig antall elementer

for å oppnå likevekt i et gitt tidspunkt for statiske eller hydrodynamiske analyser (Berstad, 2023). For å oppnå likevekt må alle indre krefter i komponentene være lik alle ytre krefter. Indre krefter går ut på samme prinsipp som ble beskrevet i teorikapittelet angående fjærkonstanten. Den sa at $F = C \cdot r$, der F er kraften, C er fjærkonstanten, og r er forlengelsen av elementet. Likningen kalles for Hookes lov, og er sann for alle lineært elastiske eller Hookeske materialer (Berstad, 2023). For materialer av metall kan likningen kun brukes opp til et visst punkt der forskyvningen og kraften fremdeles er lineært proporsjonale.

I AquaSim skal det utføres statiske og dynamiske analyser. Statiske analyser går ut på å finne likevekt for komponentene uten påsatte miljølaste, som vil si strøm og bølger i dette tilfellet. Ved dynamiske analyser ser man på likevekt når det er satt på bølge- og strømkrefter. Dette gir økte belastninger på komponentene som analyseres.

For å kontrollere at AquaSim beregner riktige responser vil det bli gjort ulike beregninger for hånd ved hjelp av teorien som ble beskrevet i kapittel 5. Dette vil i hovedsak bli gjort for de statiske analysene ettersom de dynamiske analysene fort kan bli veldig kompliserte. En enkel modell blir regnet på for hånd og i AquaSim ved hjelp av morisons likning (7).

7 Design av merd

7.1 Kravspesifikasjon

7.1.1 Funksjonskrav

Funksjonskravene er kravene designet må innfri for at merden skal fungere til å produsere fisk som både er økonomisk lønnsom og samtidig ivaretar fiskevelferden.

-Produksjonsvolumet skal senkes ned ved $H_S > 2,5m$.

-Løsningen må designes slik at fisken kan benytte seg av luftkuppelen for å fylle svømmeblæren.

-Merden må designes slik at den kan driftes på en forsvarlig og hensiktsmessig måte. Da også med tanke på at man skal kunne benytte seg av brønnbåter og andre fartøy som eksisterer i dag.

7.1.2 Konstruksjonskrav

Konstruksjonskravene er kravene for at designet skal kunne tåle belastningene den skal utsettes for, samtidig som produksjonskostnaden holdes lavest mulig.

Følgende dimensjonerende miljølast er gitt av oppdragsgiver: $H_S = 6m$ med realistisk H_S/T_P forhold. Strømprofil $1m/s$ i overflate, lineært avtakende til 0 på 100 meters dyp. 100 meters havdyp på lokalitet.

For å finne fram til perioder for de signifikante bølgehøydene blir NS9415 og teorikapittelet benyttet. Vi har:

$$H = 1,9 \cdot H_S$$

$$\lambda = 7H$$

$$\omega^2 = kg$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \implies T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}$$

For $H_S = 6m$ finner vi $H = 11,4m$, $\lambda = 79,8m$ og $T = 7,15s$. For $H_S = 2,5m$ finner vi $H = 4,75m$, $\lambda = 33,25$ og $T = 4,61s$. For disse utregningene har det blitt antatt dypt vann, som man kan anta når $\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$. Vi ser at $\frac{100m}{33,25m} > \frac{100m}{79,8m} > \frac{1}{2}$, som medfører at det er trygt å anta dypt vann.

7.2 Rammer for konseptene

Felles for alle konseptene er at merden må ha en luftlomme, slik at laksen har mulighet til å fylle svømmeblæren med luft.

I følge akvakulturdriftsforskriften §68 kan det i særlige tilfeller gis fritak fra akvakulturdriftsforskriften §47a krav om at antall fisk per produksjonsenhet i sjø ikke skal overstige 200 000 (Akvakulturdriftsforskriften, 2008). Fritaket gis gjerne i forbindelse med utviklingskonsesjoner når oppdrettere tar i bruk ny merdteknologi. For enkelhets skyld har gruppen i samråd med ekstern veileder valgt å begrense antallet fisk i produksjonsenheten til 200 000. Ved å gjøre dette vil man ikke behøve å legge inn ekstra sikkerhet mot rømming som for eksempel dobbel not.

Når maks antall fisk er bestemt kan man beregne hvor stort notvolum som trengs. Oppgaven spesifiserer at 4 millioner fisk skal produseres i anlegget. Det er vanlig å anta at laksen blir opp til 5kg før den slaktes. Dermed vil anlegget få totalt 20 millioner kg fisk å håndtere. Med maksimalt 200 000 fisk per merd gir det 20 merder i anlegget. Hver enkelt merd vil da ha 1 million kg biomasse. I akvakulturdriftsforskriften §25 står det at maksimal tetthet for fisk i merd er på $25\text{kg}/\text{m}^3$ (Akvakulturdriftsforskriften, 2008). Minste notvolum på en enkelt merd blir da $\frac{1000000\text{kg}}{25\text{kg}/\text{m}^3} = 40000\text{m}^3$. For manglekantede flytekrager antas det sirkulær not fram til innsnevringen. Minste notvolum vil legges til grunn når dimensjonering av flytekrage skal utføres.

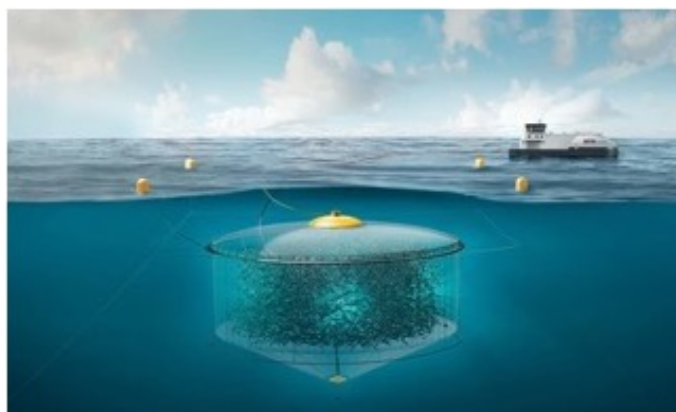
Stålkvaliteten til flytekragen og luftlommeinnfestingen har blitt foreslått av ekstern veileder til å være vanlig svartstål, S355. Dette er den stålkvaliteten som er vanligst å bruke når man har med fiskeoppdrettsmerder i stål å gjøre. Stålet har en minste flytegrense på 355MPa . Flytegrensen er den største spenningen et metall kan ha før metallet blir permanent deformert. Det er derfor viktig å ikke få høyere spenninger enn hva flytegrensen tilsier. I denne rapporten er det flytekragen og luftlommeinnfestingen som blir analysert i størst grad. Det forutsettes derfor at de andre hovedkomponentene utfører den funksjonen de skal ha uten at det blir nødvendig å kontrollere grensetilstander. Dette dreier seg om komponentene not, bunnring, forankring av anlegget og nedsenkingsmetode.

7.3 Aktuelle konsepter og løsninger

7.3.1 Merdkonsept

Helt nedsenket

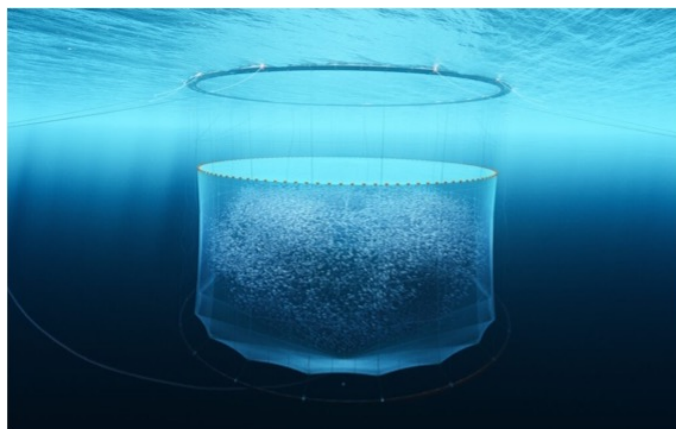
Dette konseptet går ut på at hele merden fullstendig nedsenkes under vann. Dette prinsippet er aktuelt for både merder i konvensjonell størrelse laget i plast og større merder basert på stål. For eksempel har Atlantis Subsea Farming tilpasset konvensjonelle merder i plast og anvendt de som helt nedsenkbare merder (Figur 6). En stor fordel med konseptet er at når hele strukturen er nedsenket unngår man at den påvirkes av de største kreftene som oppstår nærmere overflaten. Dette gjør konseptet spesielt aktuelt for mer eksponerte lokaliteter. En ulempe med dette konseptet er at man ikke vil ha fysisk tilgang til komponentene som er installert på merden når merden er nedsenket. Det kan gjøre det umulig å utføre vedlikehold på for eksempel kamerasystem, førsystem og annen sensorikk i lengre perioder.



Figur 6: Illustrasjon av helt nedsenket merd fra Atlantis Subsea Farming (*Atlantis-konseptet* 2023)

Nedsenket not

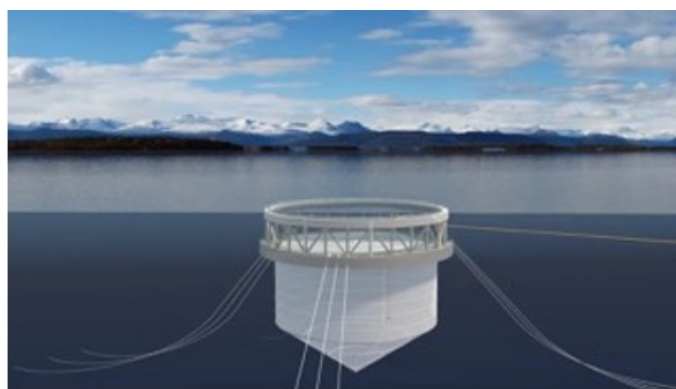
Et annet konsept er der flytekragen til enhver tid flyter i overflaten og noten senkes ned i vannsøylen. De tidlige forskningsprosjektene som handlet om nedsenking av laks benyttet denne typen teknologi. Flere leverandører har slike konsept for kommersiell drift under utvikling. Fordelen med dette konseptet er at man har enkel tilgang til komponentene som er installert på merden. I tillegg krever dette konseptet et mindre avansert system for nedsenking av produksjonsvolumet da det kun er noten som skal senkes ned og vinsjene kan monteres på flytekragen. Det er også lite som begrenser hvor dypt man kan senke noten. En ulempe med dette konseptet er at flytekragen vil utsettes for store krefter fra bølger i overflaten og må derfor dimensjoneres deretter. Det vil også oppstå et problem med hvordan flytekragen overfører krefter til noten. Her vil det altså være nødvendig å finne en løsning som gjør at flytekragen ikke påfører noten store akselerasjoner. Dette gjør at konseptet er mindre egnet ved eksponerte lokaliteter.



Figur 7: Illustrasjon av merd fra Scale AQ med nedsenket not (*Subsea system 2023*)

Delvis nedsenket

En merd som senkes ned, men der øverste del av merden alltid er over vannlinjen kalles ofte en delvis nedsenkbar merd. Dette konseptet er ofte forbundet med avanserte ballastsystemer og større merder enn det som er vanlig i dag. Også med dette konseptet har man fordelen ved enkel tilgang til komponenter på merden selv i nedsenket posisjon. En ulempe med dette konseptet er at det fort blir en stor struktur som vil kreve et avansert nedsenkingssystem. Med dette konseptet er det også noe mer som begrenser hvor dypt man kan senke merden. Om produksjonsvolumet skal senkes dypere medfører det at det kreves langt mer stål i konstruksjonen. Stabiliteten vil også påvirkes negativt når strukturen blir høyere. Dette konseptet anses som bedre egnet ved design av større merder enn det gruppen ser på i denne oppgaven.



Figur 8: Illustrasjon av delvis nedsenket merd fra Arctic Offshore Farming (*Arctic offshore farming 2019*)

Valg av merdkonsept

Siden merdene i oppgaven skal plasseres på eksponerte områder er det liten hensikt å gå for konseptet med nedsenket not og la flytekragen flyte i vannoverflaten, siden det er her miljølastene er størst. Det delvis nedsenkbare konseptet vil også kreve større stålmengde for å produseres, og

i tillegg er nedsenkingsdybden begrenset. For å være sikre på at produksjonsvolumet går under lakselusbeltet og å redusere kreftene på flytekragen mest mulig har det blitt valgt å gå for en fullstendig nedsenkbar merd.

7.3.2 Nedsenkingsmetode

Løsning 1 – vinsj

Prinsippet med vinsj som nedsenkingsmetode for nedsenkbare oppdrettsanlegg involverer bruk av et vinsjssystem for å senke og heve oppdrettsmerdene i vannet. Et slikt kan for eksempel bestå av en vinsj som er festet på havbunnen under merden og er utstyrt med en vaier eller tau som er festet til bunnen av merden. Fordelen med bruk av vinsj som nedsenkingsmetode er at man har presis kontroll over dybden på oppdrettsmerden, som gjør at man kan justere hvor dypt merden skal stå for å oppnå de beste miljøforholdene for fisken.

Løsning 2 – ballastering

Prinsippet med ballastering som nedsenkingsmetode for nedsenkbare oppdrettsanlegg involverer bruk av ballasttanker for å regulere oppdrift og senke merden ned i vannet. For å senke merden åpnes ventiler, eller pumper aktiveres for å fylle ballasttankene med vann. Dette øker vekten av merden og reduserer oppdriften, noe som gradvis senker merden ned i vannet. Et ballasteringsbasert nedsenkingssystem vil for en delvis nedsenket merd kunne gi mulighet for å justere dypgang av merden til ønskelig nivå. Dette fordi det da alltid er en del av merden som sørger for reserveoppdrift. For en helt nedsenket merd vil det derimot ikke være praktisk mulig å fritt velge dypgang kun med et nedsenkingssystem basert på ballastering. Man vil da være avhengig av noe som hindrer merden i å synke ukontrollert med en gang den får negativ oppdrift. Dette kan for eksempel være bøyer som merden «henger» fra.

Valg av nedsenkingsmetode

Ettersom merden designes for å romme 200 000 fisk vil det være behov for flere merder på oppdrettsanlegget gitt i oppgaven. Det vil være dyrt å utvikle kompliserte systemer for ballastering for hver enkelt merd. Ballastering anses derfor som mer aktuelt for større merder enn det gruppen tar for seg i denne oppgaven. Et vinsjssystem anses som den beste løsningen som nedsenkingsmetode da man også vil ha mulighet til å velge hvor dypt produksjonsvolumet skal stå etter hvor de beste miljøforholdene for fisken er.

7.3.3 Innfesting luftlomme

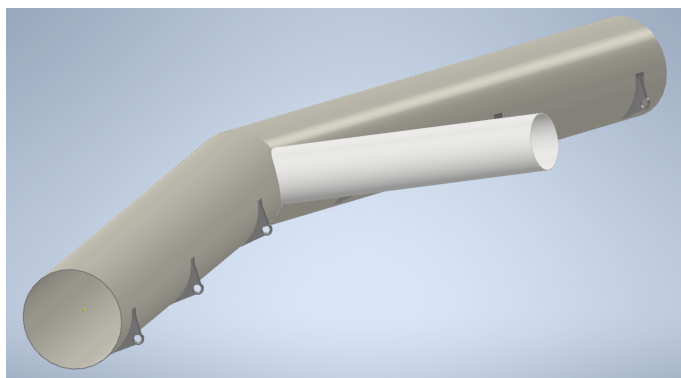
Løsning 1

Tau som innfestning er en løsning som tidlig ble foreslått og som lenge ble ansett som aktuell, var å designe en fleksibel innfesting til luftlommen. En fleksibel innfesting bestående av tau som gikk fra flytekrage til luftkuppel ble ansett som enkel å konstruere. I tillegg ville den under driftsfasen

være mulig å fjerne ved operasjoner som uttak av fisk osv. En fleksibel innfesting ville hatt fordeler ved at den unngikk problematikk som en stiv innfesting ville fått med overføring av krefter fra flytekrage. Etter dialog med ekstern veileder ble det konkludert med at ved å velge en fleksibel løsning ville hensikten med å designe flytekragen i stål reduseres, da man ikke ville ha utnyttet den stive flytekragens egenskaper.

Løsning 2

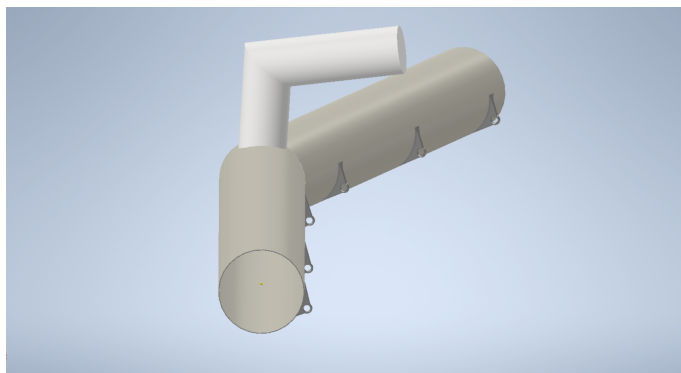
Ettersom gruppen gikk bort fra løsning 1 med en fleksibel innfesting ble det foreslått en fast innspent luftlommeinnfesting av hule stålprofiler som var festet direkte i flytekragevinkel (figur 9). Denne løsningen har som fordel at det gir en solid struktur med gunstig kraftoverføring mellom flytekrage og luftlomme. Samtidig vil denne innfestingsløsningen gjøre at det kan oppstå et driftsmessig problem ved at notinnfestingen må plasseres lenger ned på flytekragen. Det kunne også oppstått en utfordring med kontakt mellom not og luftlommeinnfesting.



Figur 9: Illustrasjon løsning 2 luftlommeinnfesting

Løsning 3 – endelig løsning

For å ta hensyn til innfestingen av noten ble en ny løsning foreslått. Den skulle i likhet med løsning 2 være fast innspent med hule stålprofiler, men i stedet for et rett rør fra flytekrage til luftlomme, skulle innfestingen ha en vinkel. Innfestingen skulle bestå av et vertikalt rør festet til flytekragen og en skråbrace av samme dimensjon festet til det vertikale røret og luftlommen (figur 10). Vinkelen som oppstår gjør strukturen noe svakere. Derfor skulle det sveises en stålplate i z-kvalitet mellom rørene i vinkelen for å forsterke knutepunktet. Stål i z-kvalitet er stål som er sjekket mod delaminering og benyttes der det kan oppstå spenninger på tvers av platen (Standard Norge, 2009).

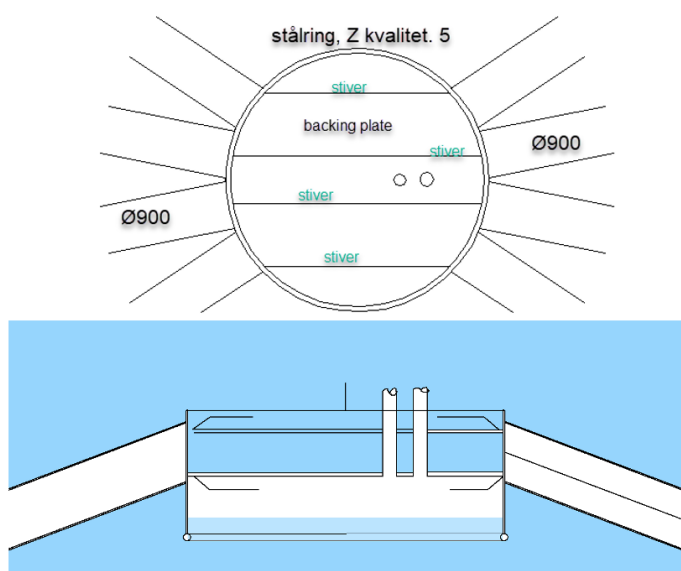


Figur 10: Illustrasjon løsning 3 luftlommeinnfesting

7.3.4 Luftlomme

Løsning 1

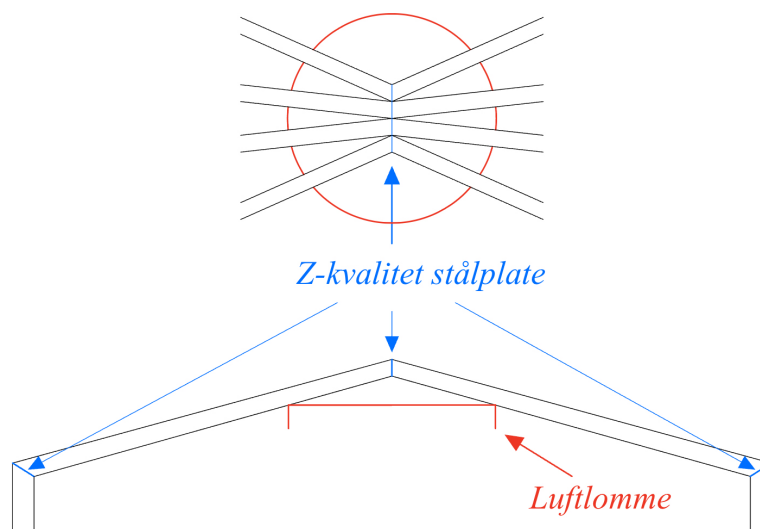
En løsning som ble foreslått av ekstern veileder var å integrere luftlommen i knutepunktet mellom skråbracene. Skråbracene ville da blitt sammenføyd i en stålring av z-kvalitet med så stor diameter at rørene ikke behøvde å sveises til hverandre, som vist på figur 11. For å unngå det ville ringen måtte ha en diameter på ca. 4560mm med skråbracer med diameter 900mm . Stålringen måtte ha hatt en så liten diameter som mulig og hatt avstivere på innsiden for å ivareta strukturell styrke. Ringen måtte i tillegg ha hatt to backingplater, den ene over den andre, der den nederste av platene ble sveist helt tett mot ringen og dannet taket i luftkuppelen. Ved å forlenge ringen nedover ville dette ha dannet veggene av luftkuppelen. Størrelsen på luftlommen vil derimot begrenses ved at man ønsker en så liten diameter på ringen som mulig for å lage et sterkt knutepunkt.



Figur 11: Illustrasjon løsning 1 luftlommeinnfesting knutepunkt sett ovenfra og fra siden (Illustrasjon: Fredborg, A.J.F.)

Løsning 2 – valgt løsning

Et annet forslag for å oppnå en sterk struktur i knutepunkt av skråbracer er å designe knutepunktet slik at skråbracene går helt inn til senter. Da vil systemlinjene gå gjennom samme punkt for å unngå eksentrisiteter. Ulempen med dette er at det ville blitt vanskelig å produsere med svært kompleks sveising. Derfor ble det foreslått av ekstern veileder at skråbracene ble sammenføyet med offset med en stålplate i z-kvalitet mellom. Det er en nødvendighet å legge en stålplate i z-kvalitet i knutepunktet for å forbedre kraftgangen gjennom forbindelsen. Luftlommen vil med denne løsningen kunne ha formen som lokket på et syltetøyglass, altså et sylindrisk rør som var blendet i øvre ende. Luftlommen kan festes til skråbracene som vist på figur 12. Langs kanten på luftlommen som vender ned mot fisken bør det sveises på et rør med diameter ca. 10 – 30mm for å unngå en skarp kant som fisken kan skade seg på. I tillegg må taknoten festes til luftlommen. Denne løsningen har fordelen at man kan skalere opp diameter på luftlomme uten at det påvirker knutepunktet negativt. Etersom det eneste gjennomførte forsøket med nedsenkbare merder for oppdrett av laks i stor skala benyttet seg av en luftkuppel med diameter 8m, har gruppen ansett løsning 2 som beste alternativ. Dette fordi løsning 1 anses som bedre egnet for mindre luftkupper.



Figur 12: Illustrasjon løsning 2 luftlommeinnfesting knutepunkt sett ovenfra og fra siden

7.3.5 Innfesting not

En løsning for innfesting av not ble et resultat av noe som i utgangspunktet ble foreslått som del av den fleksible innfestingen av luftlommen. Notinnfestingen består av en kurvet stålplate med et påsveiset øre for innfesting av not, som illustrert på figur 13. Denne notinnfestingsløsningen har likhet med klammer som benyttes på konvensjonelle plastmerder for innfesting av haneføtter i forankring. Denne notinnfestingsløsningen kan enkelt utformes med tilstrekkelig styrke.



Figur 13: Illustrasjon notinnfesting

7.4 Analyse av form

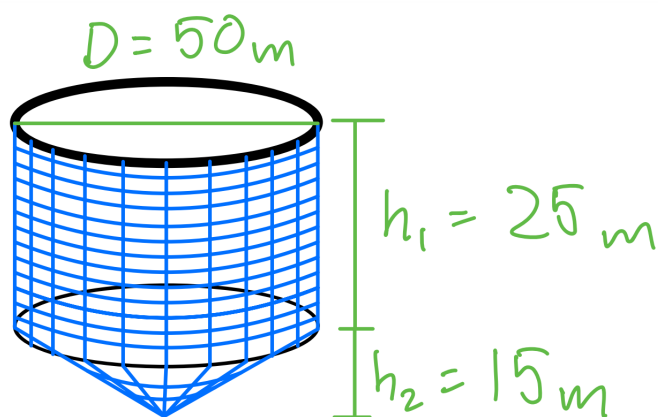
I konvensjonelle merder blir flytekragen konstruert av plast, og de egner seg derfor godt til å ha sirkulære former. Denne oppgaven tar utgangspunkt i en flytekrage av stål. Det mest gunstige ville vært å ha en stålmerd med samme form, ettersom runde flytekrager ikke har noen kritiske punkter. Problemet oppstår ved konstruksjon av flytekragen. Det kan bli komplisert og dyrt å lage sirkulære flytekrager av stål, spesielt med antallet merder som kreves i denne oppgaven. Det at flytekragen skal være laget av stål åpner opp for konstruksjon av mange ulike former på flytekragen. I denne oppgaven har det blitt valgt å sammenlikne kvadratisk og 16-kantet flytekrage. Kvadratisk merd vil være lettere å konstruere, mens en 16-kantet merd vil få en tilnærmet sirkulær form som har mange fordeler. Blant annet har sirkulær geometri den fordel at den rommer størst areal for en gitt omkrets. Dette vil føre til større produksjonsvolum per lengde flytekrage.

For å finne fram til den mest egnede formen, blir en rekke egenskaper analysert og vurdert opp imot hverandre. I denne oppgaven blir det sett på produksjonsvolum for de ulike formene opp mot prisen på fabrikkert stål. Prisen på stål er mest avhengig av massen til det produserte stålet, men det er også andre faktorer som påvirker prisen, slik som kompleksitet og antall sveiser på flytekragen. Dette er årsaken til at sirkulær flytekrage blir utelukket. Begge formene må tåle belastningene i nedsenket og overflate posisjon. Siden det har blitt bestemt å gå for en fast innspenning av luftlomme må disse rørene også tas med i betrakning når det kommer til pris og beregning av spenning og oppdrift i merden.

7.4.1 Dimensjoner

Notvolum

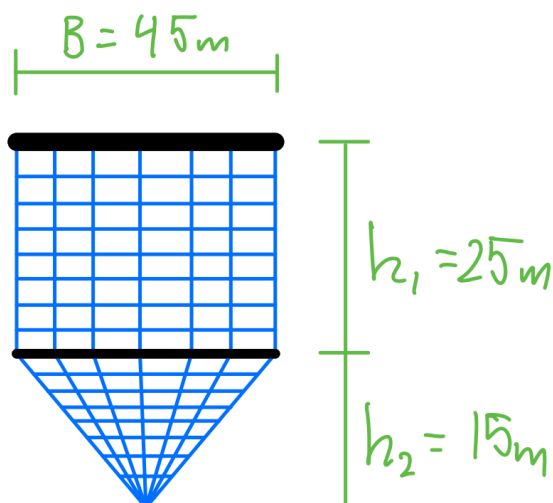
Det har blitt tatt utgangspunkt i 200 000 fisk per merd, og da ble det tidligere funnet at minste notvolum kunne være $40000m^3$. Det tas videre utgangspunkt i sirkulært notvolum, med standard merd-diameter $50m$. Dersom nothøyde fra flytekrage til bunnring settes lik $25m$ og avstanden fra bunnring til spiss settes lik $15m$ kan man regne ut notvolum. Se figur 14.



Figur 14: Illustrasjon av dimensjoner på rund merd

Det er vanlig å kun regne ut notvolum på delen mellom flytekrage og bunnring, som her har form som en sylinder. Formelen for å regne ut volumet av nota blir da: $V = \frac{\pi}{4}D^2 \cdot h_1$. Volumet blir dermed $V \approx 49087\text{ m}^3$, som er godt over minste notvolum. Det har blitt valgt å beholde dette notvolumet ettersom det vil gi bedre fiskevelferd. I tillegg vil noten til en viss grad deformeres når merden blir utsatt for strøm- og bølgekrefter, som vil redusere notvolumet. Selv om flytekragen her er en sirkel og det blir tatt for seg en 16-kantet flytekrage i denne rapporten, så vil noten over ha tilnærmet lik form i den 16-kantede merden på grunn av at noten vil bli utstrakt.

For den kvadratiske flytekragen blir det annerledes. Det blir forsøkt å få tilnærmet likt notvolum på den kvadratiske merden. Høydene fram til innsnevring og spiss er de samme som på figuren over for å kunne sammenlikne bedre. Bredden på den kvadratiske flytekragen settes lik $B = 45\text{ m}$, og man kan regne ut notvolumet. Se figur 15.



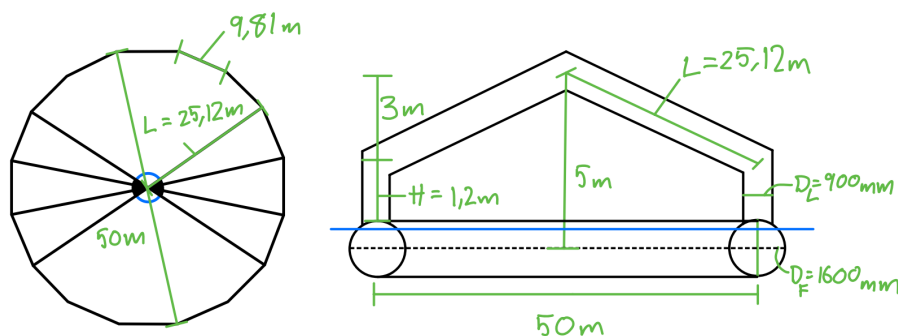
Figur 15: Illustrasjon av dimensjoner på kvadratisk merd

For denne merden blir bunnringen også kvadratisk. Dermed får hoveddelen av nota form som et prisme. Notvolumet av denne merden blir: $V = B^2 \cdot h_1$. Regner ut og får $V = 50625m^3$. Dette er noe større volum enn den forrige har, men det ble bestemt å beholde et rundt tall på bredden av praktiske årsaker. I tillegg har det her blitt gjort den forenklingen at noten går til sentrum av røret til flytekragen. I praksis blir nota gjerne festet på innsiden av flytekragen, slik at notvolumet for begge formene blir noe lavere. Notvolumet over flytekragen opp til luftlommen har også blitt neglisjert for begge formene.

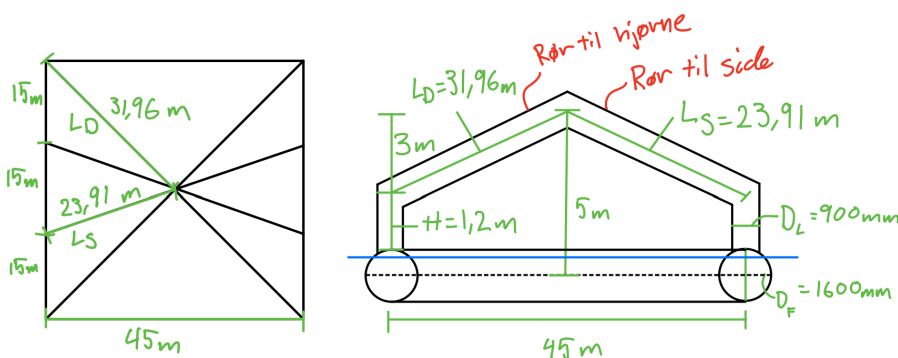
Rørlengder – flytekrage og luftlomme-innfesting

For å finne sidelengder på den 16-kantede flytekragen tas det utgangspunkt i en sirkel med diameter lik $50m$. Omkretsen av sirkelen blir: $50m \cdot \pi \approx 157m$. Fordelt på 16 sider får hver side en lengde på rundt $9,81m$. For den kvadratiske flytekragen ble det funnet sidelengder lik $45m$. Rørdimensjonene til flytekragen ble foreslått av ekstern veileder til å ha diameter og tykkelse: $\varnothing_F = 1600 \times 15mm$.

Innfestingen av luftlommen består av 4 rør som strekker seg fra hver sin side på flytekragen, litt oppover, før de møtes på et punkt på midten av merden. Dette punktet har blitt satt til å ligge 5 meter over flytekragen. Rørdimensjonene til innfestingsrørene ble foreslått av ekstern veileder til å ha diameter og tykkelse: $\varnothing_F = 900 \times 12mm$. Innfestingen vil i prinsippet være den samme for begge flytekrage, men rørene vil ha forskjellige lengder. Etter trigonometriske beregninger ble det funnet frem til lengder som er vist på figurene nedenfor.



Figur 16: Illustrasjon av rørlengder på 16-kantet flytekrage, sett ovenfra og fra siden



Figur 17: Illustrasjon av rørlengder på kvadratisk flytekrage sett ovenfra og fra siden

7.4.2 Oppdrift

Det kan nå beregnes oppdrift for merden. Oppdriften må være i balanse med massene i merden og merden må kunne holdes i posisjon kun ved hjelp av oppdriften til flytekragen. Vår eksterne veileder kom med et forslag til vektorer i merden som er vist på tabell 1. Komponenter som bidrar til oppdrift er flytekragen og bunnringen. Innfesting av luftlomme gir oppdrift når merden er nedsenket, men ikke i overflateposisjon.

Tabell 1: Forslag til masse på de viktigste komponentene

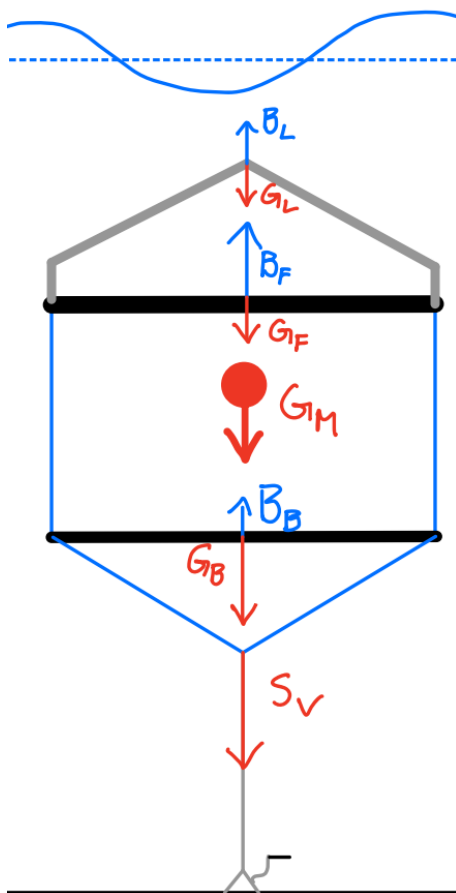
Masse komponenter	kg
Bunnring	11 000
Konisk bunn	10 000
Utrustingsstål	50 000
Hang-off	3 000
Utstyr og systemer	5 000
Rør	2 000
Not	4 000
Forankring	4 000
Margin ("reserve kapasitet")	8 000
Marin begroing på struktur og not	15 000

Disse vektene er riktignok beregnet for en merd med diameter $60m$. Det er likevel disse vektene som blir brukt i videre beregninger for å ha en ekstra margin. Den eneste endringen som ble gjort var på bunnringen. Bunnringen ble satt til å ha rørdiameter på $400mm$, som er en ganske standard størrelse. Det ble da vanskelig å få nok nedtrekk i bunnringen ettersom den vil ha en del oppdrift. For å få tilstrekkelig nedtrekk i bunnringen ble det satt en vekt på $170kg/m$ bunnring.

For å beregne oppdriften til stålrørene kan man bruke likning 6. Volumdeplassementet per meter rør er avhengig av rørdiameter, D_R , og totale rørlengder, L , som ble gitt på illustrasjonene ovenfor. Vi får: $\nabla = \frac{\pi}{4} D_R^2 L$, og total oppdriftskraft: $F_B = \rho \nabla g$. Vi må også regne ut massen til rørene. Massen til rørene er avhengig av ytre diameter, D_R , tykkelse, t_R , og totale rørlengder, L . Vi finner: $m_R = \pi(D_R t - t^2)L \cdot \rho_{\text{stål}}$. Detaljerte utregninger for volumdeplassement og masse er gitt på vedlegg 1. Tettheten til stålet, S355, er $\rho_{\text{stål}} = 7850kg/m^3$. For bunnringen blir total masse lik $170kg/m \cdot L$. Med disse beregningene har det ikke blitt tatt hensyn til overlappingen i koblingspunktet mellom rørene, men det antas at området uten overlapping er rundt like stort som området der rørene overlapper. Dette er forsøkt illustrert øverst på vedlegg 1.

Dersom vi tar summen av alle tyngdekraftene og oppdriftskraftene skal man stå igjen med netto positiv oppdrift. Nettokraften blir lik forspenningen i vaieren siden merden står i ro. Kraftene som virker på merden i nedsenket posisjon er illustrert på figur 18. Det tas ikke med strøm- og bølgekrefter i disse beregningene. I nedsenket posisjon gir hele flytekragen og luftlommeinnfestingen oppdrift. I overflateposisjon antas det at rundt 85% av flytekragen ligger under vann, og resten ligger over vannflaten. Dette fører til at innfestingen til luftlommen og deler av flytekragen ligger over vannflaten, og gir ingen oppdrift. Hele merden må derfor kunne flyte på oppdriftskraften fra

flytekragen alene. Samtidig må vinsjen alltid være i strekk. For enkelthets skyld ble det valgt å neglisjere oppdriften til luftlommen, ettersom denne ville gitt liten oppdrift i forhold til de andre komponentene.



Figur 18: Illustrasjon av de statiske kreftene som virker på merden i nedsenket posisjon

Vi regner ut og får beregnede resultater på kvadratisk og 16-kantet merd som er vist på tabell 2 og 3.

Tabell 2: Likevektsberegning på kvadratisk merd

Nedsenket posisjon, kvadratisk merd			
Komponenter	Masse [kg]	Tyngde [N]	Oppdrift [N]
Flytekrage (Ø1600x15)	105539	1035337	3639110
Innfestingsrør (900x12)	61252	600880	1490983
Bunnring (Ø400)	30600	300186	227444
Konisk bunn	10000	98100	0
Utrustingsstål	50000	490500	0
Hang-off	3000	29430	0
Utstyr og systemer	5000	49050	0
Rør	2000	19620	0
Not	4000	39240	0
Forankring	4000	39240	0
Margin ("reserve kapasitet")	8000	78480	0
Marin begroing på struktur og not	15000	147150	0
Sum krefter (strekk i vinsj):	2430325 N		

Hevet posisjon, kvadratisk merd			
Komponenter	Masse [kg]	Tyngde [N]	Oppdrift [N]
Flytekrage (Ø1600x15)	105539	1035337	3093244
Innfestingsrør (900x12)	61252	600880	0
Bunnring (Ø400)	30600	300186	227444
Konisk bunn	10000	98100	0
Utrustingsstål	50000	490500	0
Hang-off	3000	29430	0
Utstyr og systemer	5000	49050	0
Rør	2000	19620	0
Not	4000	39240	0
Forankring	4000	39240	0
Margin ("reserve kapasitet")	8000	78480	0
Marin begroing på struktur og not	15000	147150	0
Sum krefter (strekk i vinsj):	393476 N		

Tabell 3: Likevektsberegning på 16-kantet merd

Nedsenket posisjon, 16-kantet merd			
Komponenter:	Masse [kg]	Tyngde [N]	Oppdrift [N]
Flytekrage (Ø1600x15)	92030	902814	3173304
Innfestingsrør (Ø900x12)	55334	542823	1346926
Bunnring (Ø400)	26683	261762	198332
Konisk bunn	10000	98100	0
Utrustingsstål	50000	490500	0
Hang-off	3000	29430	0
Utstyr og systemer	5000	49050	0
Rør	2000	19620	0
Not	4000	39240	0
Forankring	4000	39240	0
Margin ("reserve kapasitet")	8000	78480	0
Marin begroing på struktur og not	15000	147150	0
Sum krefter (strek i vinsj):	2020352 N		

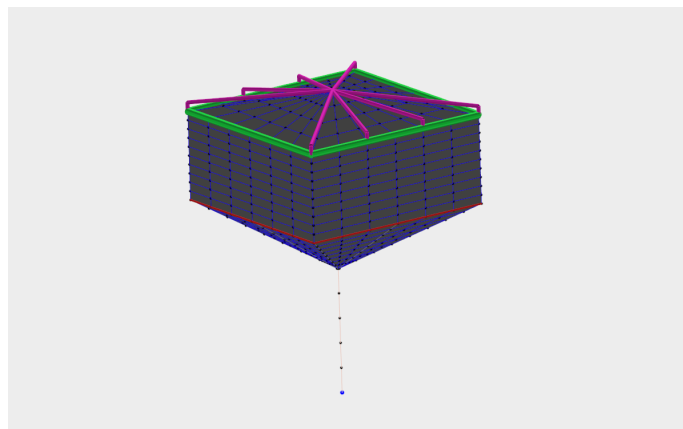
Hevet posisjon, 16-kantet merd			
Komponenter:	Masse [kg]	Tyngde [N]	Oppdrift [N]
Flytekrage (Ø1600x15)	92030	902814	2697309
Innfestingsrør (Ø900x12)	55334	542823	0
Bunnring (Ø400)	26683	261762	198332
Konisk bunn	10000	98100	0
Utrustingsstål	50000	490500	0
Hang-off	3000	29430	0
Utstyr og systemer	5000	49050	0
Rør	2000	19620	0
Not	4000	39240	0
Forankring	4000	39240	0
Margin ("reserve kapasitet")	8000	78480	0
Marin begroing på struktur og not	15000	147150	0
Sum krefter [N] (strek i vinsj):	197431 N		

Fra tabellene kan man se at vi står igjen med en positiv kraft på begge merdene, som blir strekkraften i vaieren til vinsjen. Man ser også at strekkraften i vinsjen til den kvadratiske merden er dobbelt så stor som strekkraften til den 16-kantede merden, som skyldes lengre omkrets på flytekragen. Med råd fra ekstern veileder så bør ikke vinsjen ha noe lavere strekkraft enn 15 til 20 tonn i overflateposisjon. For den firkantede merden vil denne kraften være rundt 40 tonn, og den 16-kantede vil ha strekkraft på rundt 20 tonn. Samtidig så bør ikke strekkraftene bli for store, som det antas at den firkantede merden har overstiget. Firkantmerden bør derfor flyte noe høyere enn den 16-kanta merden, men strekket vil få store variasjoner med en gang de blir utsatt for dynamiske laster, bølger og strøm. Det blir konkludert med at disse dimensjonene vil gi tilstrekkelig oppdrift i merdene, og disse blir benyttet i videre simuleringer og beregninger av spenning.

7.4.3 Analyse av kvadratisk merd

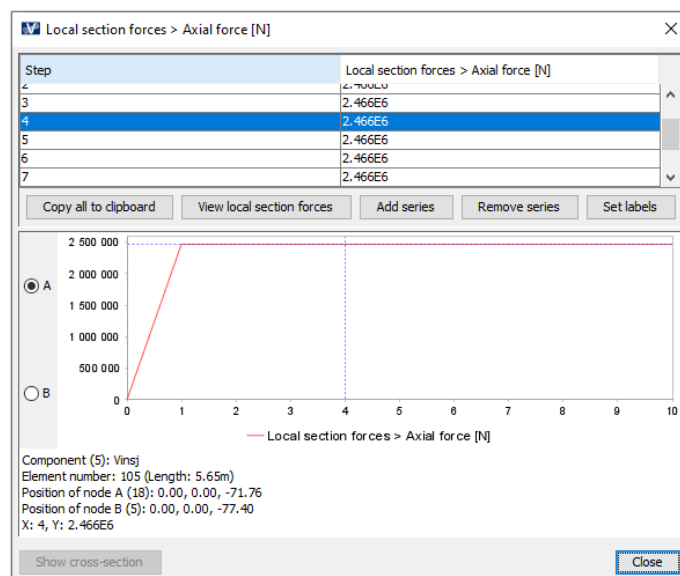
Statisk analyse

For å kontrollere håndberegningene blir det utført en statisk analyse av modellen i AquaSim med samme komponenter i nedsenket posisjon. Modellen er avbildet på figur 19. De grønne elementene er flytekragen, de rosa elementene er luftlommeinnfestingen og det røde er bunnringen. De mørke områdene på modellen er noten på merden, og nederst er vaieren som går fra notspiss til havbunn. I begge modellene som blir laget har nota dybde 20 og 15 meter, som blir senere forklart årsaken til. Den blå prikken nederst betyr at noden er fast innspenst mot bevegelse i alle seks frihetsgrader. Egenskapene til noten og vinsjen er hentet fra AquaStructures AS sine veiledningsmanualer. Noten har soliditet på 15,4% og vaieren har diameter lik 60mm og E-modul $1,0 \cdot 10^5 MPa$. For å ta hensyn til tilleggsmassene i merden har disse blitt jevnt fordelt i bunnringen på modellen.



Figur 19: Illustrasjon av den kvadratiske modellen i AquaSim

Modellen blir kjørt uten dynamiske laster og finner likevekt. Strekkraften til vaieren like under notspissen er vist på figur 20. For enkelthetens skyld blir den statiske analysen foretatt i nedsenket posisjon.



Figur 20: Statisk strekkraft på vaieren til kvadratisk merd

På tabellen nedenfor blir resultatene for tyngde, oppdrift og strekkrefter sammenliknet med resultatene håndberegningene ga. Bunnringen blir ikke sammenliknet, siden massen er mye større i modellen enn håndberegningene.

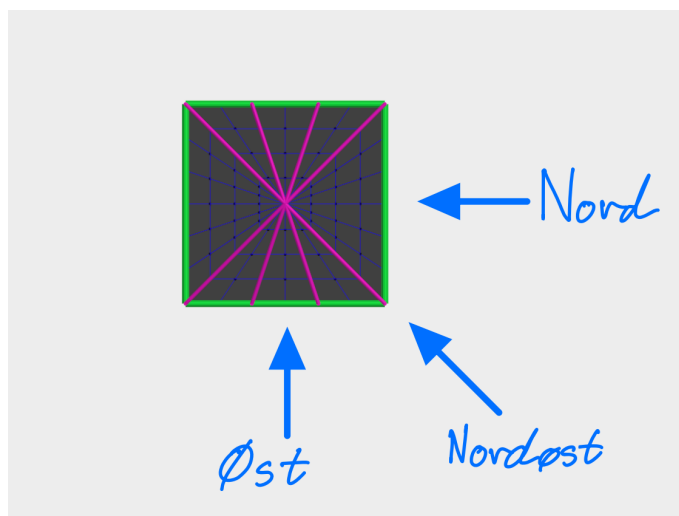
Tabell 4: Avvik for aktuelle statiske krefter på kvadratisk merd

Komponenter	Flytekrage (Ø1600x15)		Innfestingsrør (Ø900x12)		Vaier
Resultater	Tyngde [N]	Oppdrift [N]	Tyngde [N]	Oppdrift [N]	Strekkraft [N]
Håndberegninger	1035338	3639110	600882	1490983	2430325
AquaSim	1035000	3639000	617300	1532000	2466000
Avvik	-0,03 %	0,00 %	2,66 %	2,68 %	1,45 %

Man ser at håndberegningene og AquaSim sine utregninger er svært sammenfallende. En av årsakene til avvikene er avrundingsforskjeller, siden AquaSim sine resultater er gitt med fire gjeldende siffer på standardform. Hovedårsaken til de større avvikene på innfestingsrørene er at man i modellen må tegne rør fra node til node. Disse nodene er plassert i sentrum langs rørene, så de vertikale innfestingsrørene er $2m$ høye i modellen, mens de egentlig vil være $1,2m$ høye. For vaieren vil avvikene trolig skyldes at det ikke har blitt tatt hensyn til de ekstra komponentene som har blitt tegnet i modellen. Dette gjelder noen tau fra bunnring til notspiss, egenvekten til vaieren, samt forholdene rundt de vertikale innfestingsrørene. Beregningene hittil er gjort med tilstrekkelig nøyaktighet, og det er klargjort for analyse påsatt dynamiske laster.

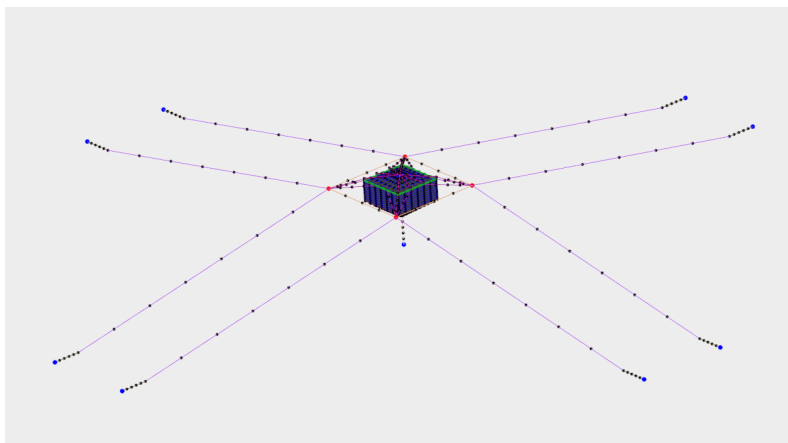
Dynamisk analyse

Her blir krefter og spenninger på merden beregnet. Dette vil bli gjort med fokus på flytekragen og innfestingen, hvor disse elementene må tåle belastningene fra strøm og bølger. Selv om konstruksjonen skal være nedsenket ved $H_S > 2,5m$, så må den dimensjoneres for $H_S = 6m$ og strømhastighet $1m/s$ i overflateposisjon. Siden det kreves i NS9415 å analysere anlegg i minst 8 forskjellige retninger, må også disse modellene utsettes for laster i forskjellige retninger. Ettersom det tas utgangspunkt i én relativt symmetrisk merd er det ikke nødvendig å utsette merden for last i 8 retninger. Det blir antatt at 3 ulike retninger vil være tilstrekkelig for å få nok resultater på grunn av modellens symmetri. Disse lastene vil komme fra nord, nordøst og øst og er illustrert på figur 21.



Figur 21: Illustrasjon av lastretninger i forhold til merd sett ovenfra

For å kunne motstå strøm- og bølgekrefter har det i tillegg blitt modellert standard forankring bestående av rammetau, haneføtter, forankringslinjer, bunnkjetting og bøyer i rammehjørnene, som illustrert på figur 22.



Figur 22: Illustrasjon av kvadratisk merd med forankring

Modellen simuleres i hevet og nedsenket posisjon med like laster, $H_S = 6m$ og strømhastighet $1m/s$ ved vannlinjen i de tre retningene. Det blir funnet frem til maksimale spenninger på komponentene, som er vist på tabell 5.

Tabell 5: Spenninger på komponentene for ulike lastretninger på kvadratisk merd

Maksimale spenninger - kvadratisk merd [MPa]				
Lastretning	Komponent	Hevet	Nedsenket	Differanse
Nord	Flytekrage (Ø1600x15)	113	53	60
	Innfestingsrør (Ø900x12)	133	128	5
Nordøst	Flytekrage (Ø1600x15)	129	43	86
	Innfestingsrør (Ø900x12)	158	127	31
Øst	Flytekrage (Ø1600x15)	83	43	40
	Innfestingsrør (Ø900x12)	140	127	13

Man ser at innfestingsrørene får høyest spenninger, både i hevet og nedsenket posisjon. Dette er et forventet resultat, ettersom disse rørene har spinklere dimensjoner. I tillegg bidrar innfestingen til å avstive flytekragen, som fører til kraftoverganger fra flytekragen til innfestingsrørene. Det blir også observert at de maksimale spenningsene for disse komponentene blir lavere i nedsenket posisjon, som også er forventet, ettersom det er lavere miljølaste lenger ned i vannsøylen. Det er likevel ikke så store forskjeller på innfestingsrørene, som kan ha med tidligere nevnte årsaker å gjøre. I tillegg kan man se at de største spenningsene oppstår når miljølastene kommer fra nordøst. Da vil bølgene og strømmene komme direkte inn mot hjørnet av flytekragen, som naturlig nok ikke er den sterkeste siden av den kvadratiske merden. De største spenningsene oppstår i de diagonale innfestingsrørene som går parallellt med miljølastene.

Egenperiode

For å beregne egenperioden til den firkantede merden blir resultatene fra den statiske analysen og likning 10 brukt. Det ble funnet at strekkraften i vaieren var lik $2466000N$. For å finne fjærkonstant

trengs forskyvningen i snoren. Denne blir målt til å være $r = 0.244m$ ved likevekt. Vi finner fjærkonstanten: $C = \frac{2466000N}{0,244m} = 10106557N/m$. Massen av hele konstruksjonen i AquaSim er $m = 300031kg$. I disse beregningene blir tilleggsmassene og dempingsleddet neglisjert, som gjør beregningene sterkt forenklet. Vi finner at egenperioden blir:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$$

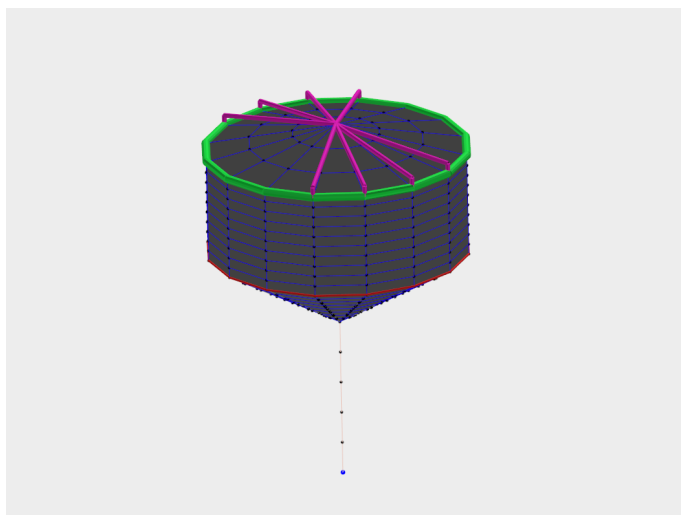
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{300031kg}{10106557N/m}}$$

$$T = 1,083s$$

7.4.4 Analyse av 16-kantet merd

Statisk analyse

Analysen av den 16-kantede merden vil foregå på samme vis som den kvadratiske. Modellen vises på figur 23, og blir modellert med de samme komponentene og dimensjonene som den firkantede merden.



Figur 23: Illustrasjon av den 16-kantede modellen i AquaSim

Denne modellen blir analysert uten påsatte miljølaste og finner likevekt. Det undersøkes de samme statiske kreftene som for den kvadratiske, som vist på tabell 6.

Tabell 6: Avvik for aktuelle statiske krefter på 16-kantet merd

Komponenter	Flytekraige (Ø1600x15)		Innfestingsrør (Ø900x12)		Vaier
Resultater	Tyngde [N]	Oppdrift [N]	Tyngde [N]	Oppdrift [N]	Strekraft [N]
Håndberegninger	902814	3173304	542823	1346923	2020352
AquaSim	897800	3155000	560600	1391000	2060000
Avvik	-0,56 %	-0,58 %	3,17 %	3,17 %	1,92 %

Fra tabellen observerer man større avvik enn for den kvadratiske merden. Det kan igjen ha noe

med forskjeller i avrundinger å gjøre. På denne modellen har man flere sidelengder som kan føre til hyppigere avrundinger i beregninger. Årsaken til de større avvikene for innfestingsrørene er av samme forhold rundt de små vertikale rørene som ble nevnt tidligere, i tillegg til avrundingsforskjeller. For vaieren oppstår avvikene av samme grunner som for den firkantede. Det er likevel såpass små avvik at analysen kan fortsette uten å måtte gjøre endringer.

Dynamisk analyse

For å kunne sammenlikne spenninger for de ulike merdene må de utsettes for like miljølaster. Det settes på $H_S = 6m$ og strømhastighet $1m/s$ i overflaten fra de forskjellige retningene nord, nordøst og øst. I tillegg har merden fått samme standard forankring som den kvadratiske. Resultatene fra simuleringene er gitt på tabell 7.

Tabell 7: Spenninger på komponentene for ulike lastretninger på 16-kantet merd

Maksimale spenninger - 16-kantet merd [MPa]				
Lastretning	Komponent	Hevet	Nedsenket	Differanse
Nord	Flytekrage (Ø1600x15)	124	64	60
	Innfestingsrør (Ø900x12)	158	116	42
Nordøst	Flytekrage (Ø1600x15)	137	63	74
	Innfestingsrør (Ø900x12)	168	116	52
Øst	Flytekrage (Ø1600x15)	97	63	34
	Innfestingsrør (Ø900x12)	135	117	18

Man observerer lignende resultater for den 16-kantede merden som for den kvadratiske merden. Spenningene er høyest hos innfestingsrørene og avtar med dybde. For begge merdene blir spenningene lavest når lastene kommer fra øst. Da går lasten mest parallellt med innfestingsrørene, og kreftene blir jevnere fordelt mellom innfestningsrørene. Spenningene blir høyest når miljølastene kommer fra nordøst, som gjelder for begge merdene. Dette er trolig fordi de to diagonale innfestingsrørene som går parallellt med miljølastene tar opp mesteparten av kreftene og gir kraftoverføring til flytekragen. Generelt sett får den 16-kantede merden høyere spenningsnivå med unntak av innfestingsrørene i nedsenket posisjon, som er et uforventet resultat. Man skulle trodd at den 16-kantede merden ville kunne fordele kreftene bedre mellom sidene enn den kvadratiske merden. En av årsakene til dette resultatet kan ha med forankringen av merdene å gjøre. Haneføttene vil gi større krefter på flytekragen, der kreftene kan ha påvirket flytekragene ulikt. Fra resultatene blir det også observert at når merdene er nedsenket spiller det liten rolle hvor miljølastene kommer fra.

Egenperiode

Egenperioden for den 16-kantede merden blir beregnet på samme vis som den firkantede. Total masse for den 16-kantede merden er i AquaSim $m = 275678kg$. Det ble tidligere funnet at snordraget i vaieren er $2060000N$. Finner forskyvningen til vaieren og ser at denne blir

$r = 0,222m$. Fjærkonstanten her blir $C = \frac{2060000N}{0,222m} = 9279279N/m$, som er et godt stykke unna fjærkonstanten til vaieren for det firkantede merden. Fjærkonstanten burde vært relativt lik for begge merdene, siden vaierene er like i begge modellene. Det er altså stor unøyaktighet i disse beregningene som kan skyldes for store avrundinger eller utilstrekkelig diskretisering av modellen. Egenperioden til den 16-kantede merden beregnes likevel med samme fremgangsmåte:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{275678kg}{9279279N/m}}$$

$$T = 1,083s$$

Egenperiodene er altså identiske for begge merdene. Det har blitt gjort større antakelser ved disse beregningene og enkelte resultater viste stor unøyaktighet. Disse resultatene er muligens ikke realistiske, så det er derfor vanskelig å anslå om man vil få resonansproblemer i merdene. Dersom man velger å stole på resultatene kan man konkludere med at periodene er såpass lave at egenperiodene trolig ikke vil skape resonansproblemer med miljølastene. Dette bør undersøkes nærmere ettersom resonansproblemer er svært uheldig for konstruksjonen.

7.4.5 Håndberegning på sylinder

For å kontrollere at AquaSim regner riktig blir en enkel modell analysert i AquaSim, som enkelt lar seg regne på ved hjelp av bølgeteori og Morrisons likning. Her skal vi finne kreftene som virker på en horisontal sylinder på 30 meters havdyp utsatt for bølge og strømkrefter; $H_S = 6m$ og strømhastighet lineært avtagende fra $1m/s$ på vannoverflaten til $0m/s$ ved havbunnen. Disse kreftene går normalt på modellen. I videre beregninger blir det for enkelthetens skyld funnet den maksimale kraften som virker på modellen. Det blir tegnet en horisontal sylinder med like dimensjoner som den ene siden i den kvadratiske flytekragen. Lengde, $L = 45m$ og diameter, $D = 1,6m$. Fra likning 7 har vi:

$$F = \frac{1}{2}\rho C_D A u |u| + \rho C_M V a_x$$

Siden det skal finnes fram til maksimal kraft, kan man se bort fra retningen i dragledet i denne sammenhengen. C_D blir satt lik 1,2 og C_M blir satt lik 2,0. Det er også disse verdiene som har blitt brukt i analysene i AquaSim. Siden det skal beregnes krefter på en sylinder får vi:

$$F = \frac{1}{2}\rho C_D D L u^2 + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} L a_x$$

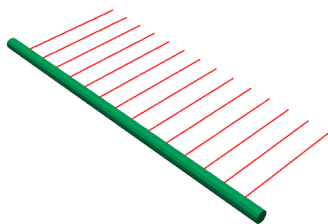
Fra likning 8 og 9 kan man finne horisontal bølgepartikkelhastighet og akselerasjon. Siden vi er ute etter maksimal kraft må vi finne maksimal hastighet og akselerasjon, som blir størst når cosinus og sinusleddet er lik 1. Fra tidligere blir bølgehøyden ved $H_S = 6m$ lik $H = 11,4m$ og $\lambda = 79,8m$. Vi får bølgetall, $k = 0,0787/m$, og frekvens, $\omega = 0,879/s$. På konstant dybde, $z = -30m$, vil man ikke få avtakende horisontal bølgepartikkelhastighet og akselerasjon. Disse

verdiene gir $u_{\text{bølge}} = 0,9445\text{m/s}$ og $a_x = 0,8302\text{m/s}^2$. Se vedlegg 1 for nærmere utregninger. I tillegg til bølgepartikkelhastigheten må man ha strømhastigheten på 30 meters havdyp, som er lik $u_{\text{strøm}} = 0,7\text{m/s}$. Dermed blir $u = u_{\text{bølge}} + u_{\text{strøm}} = 1,6445\text{m/s}$. Vi får at maksimal kraft på sylindere blir:

$$F = \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot 1,2 \cdot 1,6 \cdot 45 \cdot 1,6445^2 + 1025 \cdot 2,0 \cdot \frac{\pi \cdot 1,6^2}{4} \cdot 45 \cdot 0,8302$$

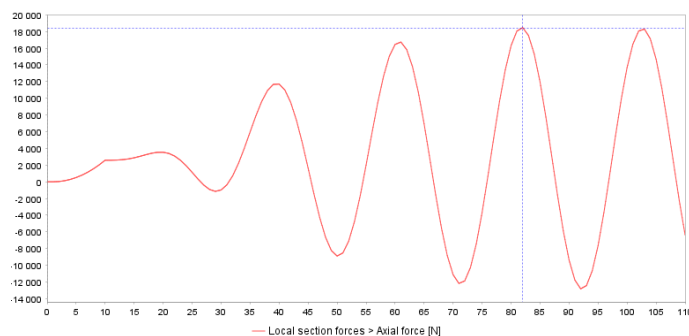
$$F = 273735\text{N}$$

Modellen av sylindere i AquaSim er vist på figur 24.



Figur 24: Illustrasjon av sylindere som blir regnet krefter på

Den grønne komponenten er sylindere og de røde strekene er tau som blir brukt for å måle kreftene på sylindere. Sylindere er bare fri til å bevege seg i horisontal x-retning. Kjører modellen med miljølast og finner maksimal strekkraft i tauet, som vist på figur 25.



Figur 25: Illustrasjon av maksimal aksialkraft på et tau i sylindere

Man finner at den største aksialkraften er 18463N , og ganger dette med totalt 14 tau. Total kraft i tauene blir det samme som kraften som virker på sylindere: $14 \cdot 18463\text{N} = 258482\text{N}$. Dette resultatet er ganske likt resultatet som først ble beregnet, med et avvik på 5,57%. En årsak til at dette avviket kan være fordi AquaSim tar hensyn til sylindere horisontale bevegelser i forhold til vannstrømmen. Det blir konkludert at AquaSim sine beregninger er nøyaktige og gir realistiske resultater i denne oppgaven.

7.5 Drifting av merden

7.5.1 Fôring av fisk

I tradisjonelle merder blir laksen matet ved hjelp av fôrsprede som flyter på vannoverflaten. Dette vil ikke være mulig i nedsenkbare merder. Det må derfor benyttes en annen måte å fôre på. Prosjekt Atlantis har siden første utsett benyttet seg av vannbåren fôring, som har fungert greit i løpet av prosjektet. Med vannbåren fôring blir fôret blandet med vann på fôrflåten før det går til merdene. Det fungerte såpass bra at Akva group utviklet en fôrflåte med totalintegrert system for vannfôring (Olafsen *et al.*, 2021b). Vannbåren fôring gir store besparelser i energikostnader, mindre slitasje på fôringsrør, redusert støy, i tillegg til at man unngår påvirkning av vannstrøm ved fôring på ønsket dybde (Akva group, u.å.). AKVA group har utviklet et system for effektiv undervannsfôring som egner seg for fôring under vann, som kalles for Sjøstjerna. Denne plasseres på egnet dybde og sørger for god spredning av fôr i merden, der fôret fordeles ved hjelp av seks fordelingsrør (Akva group, u.å.). Sjøstjerna bør være utstyrt med lys for at fisken skal kunne se fôret og med hensyn på kameraovervåkning. Dette er spesielt viktig for nedsenkede merder siden det blir mørkere lenger ned. Disse metodene for vannbåren fôring og fôring under vann ved hjelp av Sjøstjerna er svært egnet for merden som designes i dette prosjektet, og det blir derfor foreslått å benytte seg av disse.

7.5.2 Uttak av dødfisk

For å opprettholde god vannkvalitet og fiskevelferd samt redusere risiko for smittespredning må man fjerne dødfisk fra merden. Vanlig metode for uttak av dødfisk er bruk av lift-up, som går ut på å pumpe dødfisken gjennom en slange opp fra notspissen og til videre behandling ved overflaten. Dette er en av årsakene til at avstanden mellom bunnring og notspiss er 15m. Dette gir en bratt vinkling som gjør det lettere for dødfisk å samle seg ved notspissen. Lift-up har også blitt benyttet i Atlantis-prosjektet med varierende resultater. De opplevde utfordringer med å få en jevn strøm av vann og fisk på grunn av for store vinkler som oppstår i slangen ved flytekragen (Olafsen *et al.*, 2021b). For å unngå dette forteller Atlantis at det er nødvendig å finne korrekt lengde på denne slangen før montering for å unngå knekkene. For å løse dette konstruerte Atlantis en mindre dødfiskflåte som lå et stykke fra merdene for å redusere risiko for at noe skulle gå galt, som opplevdes positivt (Olafsen *et al.*, 2021b). Selv om det oppstår enkelte problemer med denne metoden for uttak av dødfisk anser gruppen dette som den mest egnede måten å fjerne dødfisk på såpass store havdybder som det er snakk om i denne oppgaven. Pumpekapasiteten til slangen må være stor nok spesielt på grunn av de større dybdeforskjellene som oppstår når merden er nedsenket.

7.5.3 Behandling

Selv om nedsenkbare merder har gitt veldig gode resultater på antall lakseluspåslag vil det fremdeles forekomme tilfeller av lakselusinfestasjoner. Disse påslagene må behandles for å hindre videre spredning av lakselus. Tradisjonelle metoder for avlusning gir store påkjenninger for laksen som involverer økt stress, sår, dødelighet og dårlig fiskevelferd. Disse metodene kan være mekaniske, kjemiske og termiske avlusingsprosesser. Rensefisk er også mye brukt, da disse fiskene spiser lakselusen direkte av laksen. Ingen av disse metodene vil være gode metoder for behandling av lakselus for merden i denne oppgaven. Avlusingsprosessene krever at merden heves slik at man kan hente ut fisken. Dette bør unngås så langt det lar seg gjøre for å unngå at fisken oppholder seg i lakselusbeltet ved overflaten. Rensefisk er heller ikke en god behandlingsstrategi fordi disse fiskene er mye mindre enn laksen og er ikke i stand til leve i de tøffe miljøforholdene der merden i oppgaven skal plasseres. I tillegg blir rensefisk mindre og mindre brukt i fiskeoppdrettsnæringen i dag, av hensyn til fiskevelferd og mindre tilgang på rensefisk.

Gruppen tar derfor sikte på en nyere behandlingsmetode som fjerner lakselus ved hjelp av laser. Denne teknologien er levert av Stingray Marine Solutions AS og høres veldig lovende ut. Metoden går ut på å drepe lakselus ved hjelp av en optisk laser. Lakselusen absorberer lyset og energien i laserstrålen og vil dø, mens laksen reflekterer laserstrålen, og vil ikke bli påvirket av strålen (Stingray, u.å.). Laseren tar bilde av laksen før og etter den blir skutt av laseren for å bekrefte at lakselusen dør. Avlusning med laser har en rekke fordeler, som null håndtering, null kjemikalier, null skade på fisk og miljø og null dødelighet (Stingray, u.å.). Dette medfører at det ikke er nødvendig å heve merden for å fjerne lakselus, som er svært ideelt for nedsenkbare merder. Luselaseren er plassert inni merden og er i drift året rundt, uten at fisken blir forstyrret på noe vis. I en samtale med ansatte fra Stingray på karrieredagen til havbruksingeniørlinjen den 20. april 2023 ble det fortalt at to luselaserer er mest egnet i tradisjonelle fiskemerder. Flere enn dette gir ikke like gode resultater i forhold til hva innkjøpsprisen til luselaseren tilsier. For nedsenkbare merder skal lusepåslaget være mye lavere enn tradisjonelle merder. Man kan derfor tenke seg at det vil være tilstrekkelig med én luselaser i merden, ettersom antall fisk er begrenset til 200 000 i merdene.

7.5.4 Overvåking

Det er spesielt viktig med god overvåking av fisk på nedsenkbare merder, siden man ikke kan se noe fra overflaten når merden er nedsenket, som den er mesteparten av tiden. Viktige parametere å overvåke for fisken er antall lakselus, om fisken blir over- eller underfôret, vannstrøm i merden, oksygenmålere, salinitet og temperatur. I tillegg må tilstanden til luftlommen og hele merden overvåkes.

Luselaseren er utstyrt med kameraer som rapporterer antall lus på laksen i merden. Denne lusetellingen blir gjort på minst 100 fisk hver dag, som gir en mye mer representativ

tilstandsmåling enn manuell lusetelling (Stingray, u.å.). Kameraene blir også brukt til å ta video av laksen i merden. Ved hjelp av videoene kan oppdretter analysere adferden til fisken og avgjøre om det skal føres eller ikke. Man vil også kunne få informasjon om hvorvidt det blir over- eller underfôret. Det er også viktig med sensorer som måler tilstand på oksygeninnhold, temperatur og salinitet på sjøvannet siden disse parameterene påvirker fiskeadferd. Temperaturene kan bli spesielt lave lenger ned i havdybden, så disse bør plasseres i øvre og nedre sjikt av merden. Man bør også måle vannstrømmen i sjøen. Her er det viktig at strømmålere plasseres både inni og utenfor merden, siden vannstrømmen kan bli redusert av nota og laksestimen. Ved å måle vannstrøm inni og utenfor merden kan man også få informasjon om hvor mye begroing det er på nota og avgjøre om denne bør rengjøres eller ikke, men dette kan også gjøres med kameraer.

For å vite om merden kan bli hevet eller ikke, er det nødvendig med bølgehøydemålere som kan gi et estimat på signifikant bølgehøyde på et gitt tidspunkt. Disse bør også måle retning og periode på bølgene for å få best mulig oversikt over bølgemiljøet. Merden bør ikke heves med mindre signifikant bølgehøyde er lavere enn 2,5m. For å finne signifikant bølgehøyde må målingene utføres regelmessig over en periode. Sammen med programvare og statistiske modeller kan man anslå den signifikante bølgehøyden fra målingene.

Tilstand på luftlommen er spesielt viktig, siden dette er den mest avanserte komponenten på merden. For denne er stabilitet sentralt, men luftlommen i denne oppgaven vil være stabil så lenge flytekragen er stabil. For å måle krengevinkel på flytekragen kan man plassere dybdemålere på hver sine sider av flytekragen, hvis dette er nødvendig. Uansett bør man ha dybdemålere plassert omkring merden for å vite med sikkerhet hvor dypt merden ligger, og gjøre eventuelle justeringer basert på andre målte parametere, som strømhastighet og temperatur. Den viktigste tilstandsmålingen man må ha på luftlommen er mengde luft. For å måle dette kan man ha oksygenmålere i luftlommen og avgjøre om det må etterpåfylles luft eller ikke. Det bør også installeres et kamera i luftlommen for å få informasjon om laksens tilvenning til luftlommen og hvor ofte laksen fyller svømmeblæra, som kan brukes til videre forskning.

8 Resultater

8.1 Bestemmelse av form

For å bestemme form ble det tidligere nevnt at det skal sammenliknes produksjonsvolum og pris på fabrikkert stål. Før dette blir gjort må det vurderes om spenningene som ble funnet i forrige kapittel er under kapasiteten til stålet. Flytegrensen til stålet i denne oppgaven, S355, er på $355MPa$, som ved første øyekast er langt over de største spenningene som ble funnet fra analysen. I NS9415 blir sikkerhetsfaktorer mye brukt for å bestemme øvre kapasitet på komponenter, og det blir også gjort her. Stålet får en lastfaktor og en materialfaktor. For flytekrager av stål står det spesifisert i NS9415 at materialfaktoren er 1, 1. Denne faktoren blir også brukt på innfestingen av luftlommen siden de er sveiset sammen. Siden AquaSim er en numerisk tilnærming som anses å ikke være helt korrekt i noen tilfeller, blir det benyttet en lastfaktor på 1, 3. Øvre grenseverdi for flytespenningen til stålet blir da: $\frac{355MPa}{1,1 \cdot 1,3} = 248MPa$. De maksimale spenningene som ble funnet i analysen er fremdeles et stykke unna den øvre grensen, og konstruksjonene vil tåle miljølastene i hevet og nedsenket posisjon. Det er derfor ikke behov for å endre dimensjoner på stålrørene, og det blir utført videre sammenlikninger. Totale notvolum og masse på fabrikkert stål til flytekrage og innfesting er gitt på tabell 8.

Tabell 8: Forhold mellom notvolum og fabrikkert stål på merdene

Kvadratisk merd		16-kantet merd	
Total masse stål [kg]	166791	Total masse stål [kg]	147364
Notvolum [m ³]	50625	Notvolum [m ³]	49087
Stål/notvolum [kg/m ³]	3,295	Stål/notvolum [kg/m ³]	3,002

Man ser at med de nåværende dimensjonene så blir det brukt rundt 9% mer stål for hver kubikkmeter produksjonsvolum på den firkantede merden. Dersom man skal ta i betraktning at prisen på stål vil øke med antall sveiser, så vil prisen på det fabrikkerte stålet bli noe høyere for den 16-kantede merden. I tillegg så man fra analysen at den kvadratiske merden generelt fikk lavere spenninger som følge av miljølastene. Man må derfor dimensjonere opp den 16-kantede merden for at spenningene får verdier som den kvadratiske merden. Dette vil føre til at stålmassen på den 16-kantede merden blir noe høyere, og fører igjen til at forskjellene i pris for hver merd blir lavere. Det kreves videre sammenlikninger for å avgjøre formen på merden.

Fordeler med kvadratisk flytekrage er at den er lettere å konstruere, i og med at den krever færre sveiser. I tillegg gjør de lange sidelengdene det lettere for fartøy å legge til for å utføre nødvendige drift- og vedlikeholdsoperasjoner på merden. Samtidig strekker luftlommeinnfestingen seg lenger ut på den kvadratiske merden, som kan gjøre det mer krevende å løfte noten. En annen ulempe med kvadratisk merd er at den har mindre mindre notvolum per meter flytekrage. I tillegg til dette vil laksen ende opp med å svømme i sirkler selv om nota er kvadratisk. Dette fører til at effektivt

notvolum blir noe redusert, men det er vanskelig å anslå akkurat hvor mye. Man finner da at den kvadratiske merden gir enda mindre produksjonsvolum i forhold til hvor mye stål man må bruke.

Den 16-kantede flytekragen har fordelene med at forskjellene i geometri fører til større produksjonsvolum i forhold til kvadratiske geometrier. Siden den 16-kantede flytekragen får sirkulært notvolum så vil fiskevelferden være bedre for denne formen, siden fisken vil utnytte hele notvolumet og gir bedre plass mellom hver fisk. Ulemper med en flytekrage med 16 kanter er flere sveiser, som blir noe dyrere å produsere. I tillegg så man fra analysene at den 16-kantede merden ble mer belastet av miljøkreftene enn den kvadratiske, som kan ha med forskjellene i luftlommeinnfestingene og forankringspåvirkning å gjøre.

Basert på disse refleksjonene blir det dannet en evalueringsmatrise som gjør det lettere å bestemme form. Det har blitt listet opp en rekke egenskaper for merdene, og disse blir rangert på en skala fra 0 til 6, der 6 er best, basert på vurderinger som har blitt gjort. Se tabell 9.

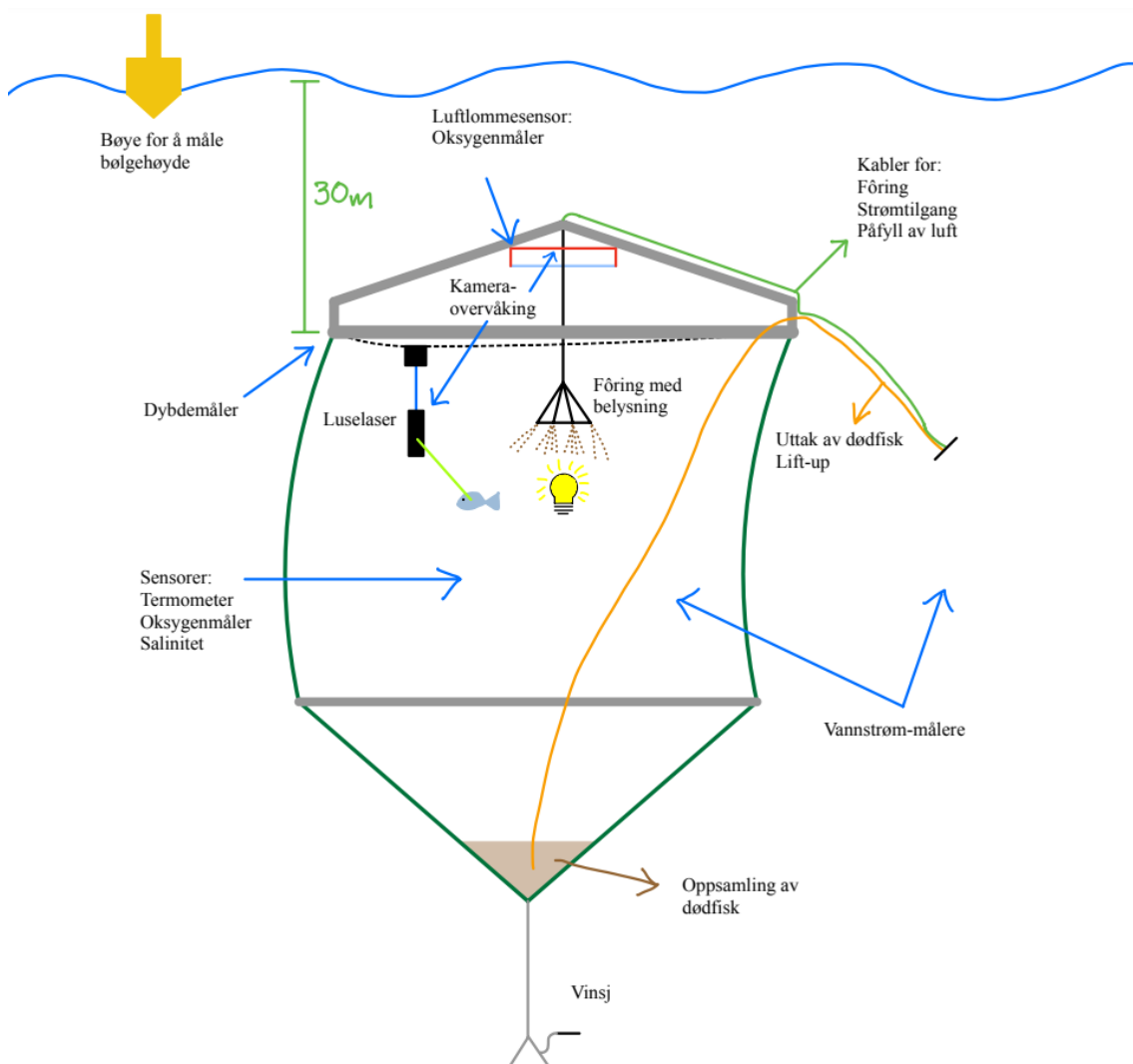
Tabell 9: Evalueringsmatrise for merdene

Merd-sammenlikning			
Egenskaper	Begrunnelse	Kvadratisk (0-6)	16-kantet (0-6)
Fiskevelferd	Laksen vil ende opp med å svømme i sirkler. Effektivt notvolum vil bli noe lavere på den kvadratiske merden, som kan gå på bekostning av fiskevelferd.	3	5
Driftsvennlighet	Lettere for fartøy å legge til kvadratisk merd. Noe større luftlommeinnfesting på kvadratisk merd kan gjøre det vanskeligere å f.eks løfte not.	5	5
Konstruksjonsvennlighet	Kvadratisk merd er lettest å konstruere. Færrest sveiser.	6	4
Rustet mot miljølast	Fra resultatene i AquaSim-analysen fikk den kvadratiske merden generelt lavere spenninger og er mer motstandsdyktig for miljølast.	5	4
Stål/notvolum	Fant at den kvadratiske merden krever mer stål i forhold til produksjonsvolumet. Produksjonsvolum blir noe lavere på den kvadratiske fordi hjørnene ikke blir brukt.	3	5
Total sum		22	23

Totalt sett får den 16-kantede merden en marginalt høyere poengsum for egenskapene som har blitt vurdert her. Poengene ble bestemt ut ifra hvor gode egenskaper merdene har i forhold til hverandre og tradisjonelle fiskeoppdrettsanlegg. Her ble vurderingene gjort med en del antakelser, men det er forsøkt å gi en begrunnelse for valg av poengsum for hver egenskap. Kun en av egenskapene gikk på fiskevelferd, som er en av de viktigste forholdene man må ta hensyn til i fiskeoppdrettsanlegg. Det kan være at denne burde blitt vektet høyere, som ville ført til større favør for den 16-kantede merden. Endelig valg av form blir en merd med 16 kanter, der rørdimensjoner for flytekragen og luftlommeinnfestingen er henholdsvis $\varnothing_F = 1600 \times 15mm$ og $\varnothing_L = 900 \times 12mm$. Notdybder er 25m fra flytekrage til bunnring og 15m fra bunnring til notspiss.

8.2 Drifting av merd

Endelig grovkonsept for drifting av merden blir illustrert på figur 26 og er basert på informasjonen som ble gitt i kapittel 7.



Figur 26: Illustrasjon av grovkonsept for drifting av merd

Når merden er nedsenket skal flytekragen være rundt 30 meter under vannoverflaten for å være sikre på at produksjonsvolumet unngår lakselusbeltet. For å kontrollere at merden overholder dette må det plasseres dybdemålere omkring flytekragen. Fôring blir gjort ved hjelp av Akva group sin Sjøstjerna, som fordeler fôret på 6 rør og gir god spredning i merden. Sjøstjerna festes til et rør som går fra toppen av luftlommeinnfestingen og gjennom luftlommen slik at fôret blir spredt ut fra midten av merden. Luftlommeinnfestingen går til et punkt øverst på merden som man kan benytte til innfesting av fôringssystem. Etersom fôringssystemet er plassert midt i merden må luselaseren monteres noe vekk fra senterlinjen for å unngå kollisjon med fôringen. Luselaseren har til en viss grad mulighet til å følge etter fisken, siden den kan bevege seg fritt bortover den stiplede

linjen og samtidig endre dypgang. Sensorer som måler temperatur, oksygeninnhold og salinitet bør plasseres rundt om merden der man ser behov. En oksygenmåler må monteres i luftlommen for å bestemme behovet for etterpåfylling av luft. På grunn av at hovedkomponentene i merden består av stål, forenkles monteringen av forskjellig utstyr, instrumenter og fôrsystemer på merden. Vannstrømmålere bør plasseres utenfor og inni merden siden hastighetene kan variere. Man kan for eksempel bruke bøylene som måler bølgehøyde til å måle vannstrøm i tillegg.

9 Diskusjon

De ekstra massene som ble foreslått av ekstern veileder ble lagt direkte inn i begge merdene uten å foreta noen vurderinger. Massene var beregnet for en sirkulær merd med diameter $60m$, og det burde muligens blitt gjort vurderinger på hvor store masser man får avhengig av størrelse på merd. Det er naturlig å tenke seg at enkelte masser, som marin begroing og utrustningsstål, vil variere avhengig av omkrets på flytekragen og overflaten til noten for de forskjellige merdene. I tillegg ble massen til nota gitt, men dette gjaldt kun for den tørre delen av noten. Delene av noten som er under vannoverflaten er nøytrale og vil ikke bidra til tyngde eller oppdrift. Det ble ikke tatt hensyn til dette da det ble beregnet oppdrift for merdene i hevet og nedsenket posisjon. Likevel er massen til denne ikke den største, og om det hadde blitt tatt hensyn til dette ville dimensjonene av rørene trolig forblitt de samme.

Diskretisering av modellen i AquaSim kan påvirke resultatene man får. Diskretisering går ut på å dele opp komponentene i et gitt antall elementer. Desto flere elementer man har, desto mer nøyaktige blir beregningene, men dette går på bekostning av tiden det tar å simulere modellene. Det kunne derfor blitt gjort flere analyser med ulikt antall elementer fram til man ser at resultatene konvergerer, men dette ville vært veldig tidkrevende. Det ble derfor brukt et større antall elementer fra starten av. Som med alle numeriske beregninger er det knyttet en viss usikkerhet rundt resultatene man får, som gjør at man ikke kan stole 100% på resultatene AquaSim gir. Det er derfor det blir benyttet en lastfaktor på 1,3 for å ha en sikkerhetsmargin mot resultatene.

I AquaSim ble luftlommen koblet i et felles punkt på toppen av merden. I virkeligheten bør denne innfestingen gjøres alternativt for å unngå komplekse sveiser, som tidligere beskrevet. Det kan derfor hende at modellen i AquaSim også burde ha blitt modellert slik at dette blir tatt hensyn til, og at man kanskje ville fått forskjellige resultater for spenningene. Likevel er det ikke store endringer, så resultatene ville trolig ikke endret noen beslutninger. Det har heller ikke blitt modellert noen braketter eller plater i Z-kvalitet i AquaSim, ettersom dette er mindre komponenter som kan være vanskelige å modellere, og gir trolig lite utslag på beregningne AquaSim utfører.

Da analysene i AquaSim ble kjørt gikk noten $20m$ fra flytekragen til bunnringen og $15m$ fra bunnring til notspiss. Årsaken til dette er knyttet til misforståelser rundt beregning av notvolum. Det ble antatt at notvolumet er volumet i både øvre og nedre del av merden, men det viste seg å ikke være tilfellet. Det er vanlig å kun regne volumet på den delen av nota som går fra flytekragen til bunnringen. Det ble derfor gjort et valg om å øke dybden på denne notdelen til $25m$ for å få tilstrekkelig volum. Dette ble oppdaget sent, som førte til at det ikke ble nok tid til å gjøre samme endringer på AquaSim-modellene og kjøre nye simuleringer, da disse er tidkrevende. Hvis det hadde vært mer tid så ville dette blitt gjort for å få mer nøyaktige resultater, ettersom økt notoverflate

gir større krefter. Likevel er endringen nokså liten og vil trolig gi lite utslag på spenningene som oppstår i flytekragen og luftlommeinnfestingen ettersom nota er nøytral i vann. Det bør likevel gjøres nye analyser ved eventuell videreføring av prosjektet.

I analysene for å beregne maksimal spenning på merdene ble det ikke tatt hensyn til vindkrefter eller ulykkesituasjoner som skipsstøt, men dette ble heller ikke gitt i oppgavebeskrivelsen. Det er likevel noe som må tas hensyn til, som det blir spesifisert i NS9415, og bør undersøkes nærmere ved videreføring av prosjektet, da spenningene muligens vil kunne gå over flytegrense til materialet som følge av flere forskjellige laster.

I håndberegningene og simuleringene i AquaSim ble Morisons likning brukt med konstantverdier $C_D = 1,2$ og $C_M = 2,0$. Disse ble antatt å være konstante over dybden. Det har ikke blitt gjort noen nærmere beregninger på verdiene av disse. Dette kunne ha blitt gjort en vurdering av Reynoldstall for å få mer nøyaktig verdi på dragkonstanten, og dermed mer realistiske resultater. Det ble tatt et valg om å ikke gjøre dette ettersom de brukte konstantene anses å være nøyaktige nok for sylindrene i merden i denne sammenhengen.

Tradisjonelt sett har det ikke vært nødvendig å regne ut egenperiode på konvensjonelle merder med flytekrage av plast og full vanngjennomstrømming. Dette er fordi disse merdene har liten masse som fører til at deres egenperioder blir veldig lave og vil ikke gi resonansproblemer. Siden det i denne oppgaven blir analysert merd med flytekrage av stål og fast innspent luftlomme får denne type merd en langt høyere masse. Gruppen så seg derfor nødt til å ta hensyn til egenperiode. Egenperioden ble regnet ut uten ekstra masse og dempingsledd som oppstår av hydrodynamiske egenskaper ved bevegelse. I tillegg ble beregningene gjort ved å analysere fjærstivhet i vaieren som holder merden nedsenket. Egenskapene til denne vaieren er hentet fra AquaStructures AS sine veiledningsmanualer og er muligens ikke er egnet for denne modellen, men dette blir antatt. Målingene som ble gjort viste større unøyaktighet og vil påvirke resultatene i større grad. Likevel ble det funnet at egenperiodene for den kvadratiske og 16-kantede merden er såpass lave at man kan konkludere med at man ikke vil få resonansproblemer i hiv, men dette bør undersøkes grundigere. Grundigere undersøkning vil inkludere beregning av egenperiode for alle de kritiske frihetsgradene, hiv, jag og svai, der man inkluderer dempingsledd, ekstra tilleggs masse, i tillegg til å inkludere fjærstivhet i alle forankringsselementene.

Endelig valg av merdform ble gjort ved hjelp av en evalueringmatrise, siden det ikke ble funnet så store forskjeller i produsert stål og produksjonsvolum på tabell 8 som først antatt. Poengsummene og begrunnelsene til disse ble i større grad gjort med antakelser og vurderinger med en viss usikkerhet knyttet til seg. Det kan hende at det ble gjort feil vurdering ved valg av merdform, og at den endelige merden burde være kvadratisk. Samtidig burde fiskevelferden muligens blitt vektet mer enn det som ble gjort, som ville gått i favør for den 16-kantede merden. Videre arbeid med konseptet burde derfor gjøres mer omfattende, der man også tar hensyn til blant annet forankringsmuligheter. Man bør også undersøke hvordan formene vil påvirke

fiskevelferden, som er det viktigste aspektet ved fiskeoppdrettsnæringen.

I oppgaven har det kun blitt analysert kvadratisk og 16-kantet form, hvor valget landet på den 16-kantede. I første omgang var planen å analysere og sammenlikne flere former, som 8-kantet og 12-kantet. Dette ble ikke gjort fordi arbeidsomfanget allerede var stort nok. I tillegg ville resultatene blitt noe repetitive, og forskjellene i de ulike parameterene for hver merd ville blitt lavere, som ville ført til enda større usikkerhet knyttet til valg av form. I videre undersøkning burde flere former analyseres for å komme fram til den mest egnede formen.

Når det kommer til drifting av merden ble det foreslått å benytte seg av luselaser som behandlingsmetode for å redusere antall lusepåsag. Denne løsningen vil være egnet for nedsenkbare merder, siden automatiserte avlusingsmetoder vil kunne fjerne behovet for andre behandlingsmetoder. Dette vil ha stor betydning for fiskevelferden. Det er likevel usikkerheter knyttet til effektiviteten av luselaseren, og om den vil kunne klare å holde lakselusbestanden nede på et akseptabelt nivå. Det ble foreslått at man kanskje ville kunne klare seg med en luselaser i den nedsenkbare merden, men siden det settes spørsmålsteget ved effektiviteten til denne så bør man kanskje ha to stykker.

Om nedsenkbare merder er fremtiden for norsk fiskeoppdrett gjenstår å se. Atlantis-prosjektet har produsert veldig lovende resultater og utviklet teknologiske løsninger som egner seg spesielt for nedsenkbar oppdrett. Siden nedsenkbare merder blir mindre påvirket av miljølaster er dette en god mulighet til å utnytte eksponerte sjøområder. Man kan da redusere miljøbelastningen som tradisjonell fiskeoppdrett er forbundet med, i tillegg til å redusere risikoen for lakselusspredning. Det er mange kommende prosjekter som omhandler nedsenkbar fiskeoppdrett, hvor noen av disse har blitt nevnt i rapporten. Disse prosjektene blir fulgt med stor interesse, og man må vente på resultatene av disse før man kan konkludere med om nedsenkbare fiskeoppdrett kan brukes i stor skala. Et mulig fremtidsproblem for nedsenkbar oppdrett er knyttet til lakselusens tilvenning. Dersom denne typen oppdrett blir utbredt så vil det oppstå en fare for at lakselusen trekker lenger ned i vannsøylen. Siden lakselusens reproduksjonsrate er såpass kort så kan denne tilvenningen skje veldig fort. Det finnes også enkelte lakselusarter som naturlig oppholder seg lenger ned i vannsøylen og om disse kan formere seg like raskt kan det gi problemer for nedsenkbar fiskeoppdrett.

Denne oppgaven vist seg å være svært spennende, lærerik, fremtidsrettet og relevant for fremtidig arbeid som havbruksingeniører. Oppgaven undersøker et relativt nytt konsept for lakseoppdrett, som forhåpentligvis blir mer og mer utprøvd i årene som kommer. Oppgaven går gjennom mange ulike temaer som er involvert ved utvikling av et fiskeoppdrettsanlegg. I løpet av studiet har det blitt undervist i mange ulike emner, og alle har vist seg å komme til god nytte ved utarbeiding av denne bacheloroppgaven. Det viser at havbruksnæringen er svært mangfoldig, og man må ta hensyn til mange ulike aspekter i fiskeoppdrettsnæringen. I løpet av oppgaven har gruppen lært seg å oppdage problemer og løsninger både fra biologiske og teknologiske perspektiver. Likevel har denne rapporten hatt et stort fokus på det tekniske knyttet til fiskeoppdrett.

Havbruksingeniørutdanningen ble opprettet med en tanke om at teknologi må utvikles på fiskens premisser. Det burde derfor undersøkes nærmere hvor godt laksens velferd ivaretas i forbindelse med å være nedsenket over lengre tid.

10 Konklusjon

Det har blitt designet en nedsenkbar merd i stål som er egnet til å motstå de gitte miljølastene som kan oppstå på eksponerte lokaliteter. Det har blitt tatt hensyn til mange aspekter ved utarbeiding av merden, som endte opp med en 16-kantet form og tilstrekkelig notvolum for å oppdrette 200 000 fisk. Fisken får tilgang til luft i luftlommen som blir fast innspent til flytekragen. Innfestingsrørene blir sveiset sammen til stålplater av Z-kvalitet i vinkel og til sammenføyingen øverst på midten av merden, som gir gode kraftoverføringer. Merden har blitt simulert i AquaSim og det ble konkludert med at de bestemte rørdimensjonene vil tåle miljølastene i hevet og nedsenket posisjon, i tillegg til å gi tilstrekkelig oppdrift. Det ble og foreslått en driftsmodell som vil egne seg for den nedsenkbare merden i oppgaven. Her ble det foreslått hvilke parametere som er viktige å overvåke, og hvordan man bør gjøre dette. For å redusere lakselusspredning ble det foreslått bruk av luselaser, som vil være svært egnet for nedsenkbare merder hvis man får dette til å fungere. Fôring blir gjort via vannføring og fordeles i merden ved hjelp av utviklede systemer for dette. Ved $H_S > 2,5m$ blir merden nedsenket ved hjelp av en vinsj til 30 meter under vannoverflaten for å unngå å ligge i lakselusbeltet.

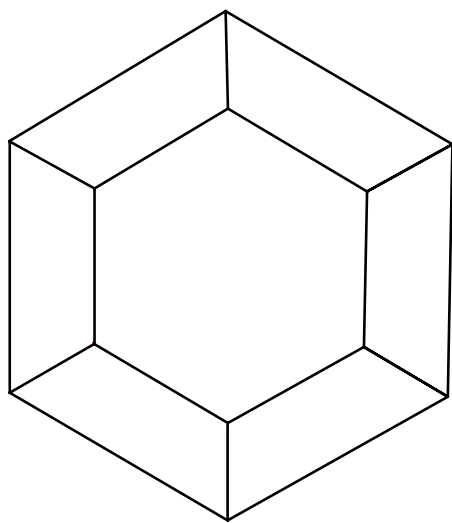
Nedsenkbare merder er absolutt en mulig løsning på lakselusproblemet i Norge i dag, men det kreves mer utprøving og dokumentasjon på området. Ved å forflytte lokaliteter lenger fra hverandre og på mer eksponerte områder vil også miljøbelastninger bli redusert. Merden i denne oppgaven vil kunne bidra til redusert lakseluspåslag og miljøbelastninger, men da kreves det grundigere undersøkning. Siden oppgaven var svært omfattende har det blitt gjort mange avgrensninger og antakelser for å kunne svare på de viktigste problemstillingene. Blant annet ble det gjort forbehold om at forankring, nedsenkingsmetode og diverse hovedkomponenter i merden var i orden. Man bør derfor videre analysere hvordan man kan forankre flere merder på en mest effektiv måte. Man bør og analysere flere ulike former på merden slik at man er sikre på at det blir funnet frem til den mest egnede formen. Da bør man også inkludere flere vurderingskriterier enn hva som ble gjort i oppgaven. Det må også vurderes hvordan alle komponentene i merden reagerer på belastningene på eksponerte områder og i havdypet. Det er spesielt viktig å undersøke hvordan fiskevelferden blir når man har nedsenket fiskeoppdrett på eksponerte områder. I tillegg er det svært viktig å overvåke lakselusens tilvenning til dyp drift ved videreføring av konseptet nedsenkbare merder.

Referanseliste

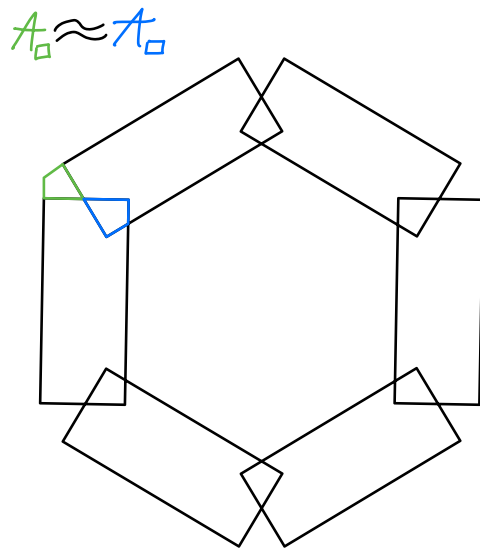
- Akva group (u.å.). *Vannbåren fôring*. Tilgjengelig fra: <https://www.akvagrroup.no/foringsanlegg-kategori/vannbaren-foring> (Hentet: 16.mai 2023).
- Akvakulturdriftsforskriften (2008). *Forskrift om drift av akvakulturanlegg*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2008-06-17-822> (Hentet: 25.februar 2023).
- Arctic offshore farming* (2019). [Digitalt bilde] Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/krevererstatning-etter-at-de-matte-nesten-halvere-arealet-til-offshoremerd/476579> (Hentet: 8.mai 2023).
- Atlantis-konseptet* (2023). [Digitalt bilde] Tilgjengelig fra: <https://atlantisfarming.no/forside> (Hentet: 8.mai 2023).
- Berstad, A.J. (2023). *The AquaSim Package Theory User Manual*. Trondheim: Aquastructures AS. Tilgjengelig fra: <https://aquasim.no/resources/documentation.html> (Hentet: 9. mai 2023).
- Bornø *et al.* (2023). *Fiskehelse rapporten 2022*. Veterinærinstituttet. Veterinærinstituttets rapportserie nr. 5a/2023, Tilgjengelig fra: <https://www.vetinst.no/rapporter-og-publikasjoner/rapporter/2023/fiskehelse rapporten-2022> (Hentet 13.april 2023).
- Dempster *et al.* (2020). *Atlantic salmon cope in submerged cages when given access to an air dome that enables fish to maintain neutral buoyancy*. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848619332399?via%3Dihub#bb0005> (Hentet: 15. mai 2023).
- (2022). *Full production cycle, commercial scale culture of salmon in submerged sea-cages with air domes reduces lice infestation, but creates production and welfare challenges*. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848621012333> (Hentet: 17. mai 2023).
- Folkedal, O., Hvas, M. og Oppedal, F. (2019). *Havbasert oppdrett – hvor mye vannstrøm tåler laks og rensefisk?* (Rapport fra havforskningen 2019-37). Bergen: Havforskningsinstituttet. Tilgjengelig fra: <https://www.hi.no/hi/nettrapporter/rapport-fra-havforskningen-2019-37> (Hentet: 8. mai 2023).
- Hansen *et al.* (1998). *Movement, migration, and smolting of Atlantic salmon (Salmo salar)*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 55, s. 77-92.
- Johannessen, A (1977). *Early stages of Lepeophtheirus salmonis (Copepoda, Caligidae)*. <https://doi.org/10.1080/00364827.1978.10411336> (Hentet: 2.mai 2023). Tilgjengelig fra.
- Jones, S. og Johnson, S. (2015). *Biology of sea lice, Lepeophtheirus salmonis and Caligus spp., in western and eastern Canada*.
- Lundby, L., red. (2014). *Havromsteknologi*. 2. utg. Bergen: Fagbokforlaget.
- Misund, B (2023). *Fiskeoppdrett*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/fiskeoppdrett> (Hentet: 2.mai 2023).

-
- Mortensen, S (2021). *Fysoklist fysostom eller ingen svømmeblære_Stein Mortensen_HI*. [Digitalt bilde] Tilgjengelig fra: <https://www.hi.no/hi/nyheter/2021/august/nedsenkede-merder-kan-vere-fremtiden-for-oppdrettsfisk> (Hentet: 8.mai 2023).
- NYTEK23 (2022). *Forskrift om krav til teknisk standard for akvakulturanlegg for fisk i sjø, innsjø og vassdrag*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2022-08-22-1484> (Hentet: 9.mai 2023).
- Olafsen *et al.* (2021a). *Atlantis produksjonsrapport Otervika*. Rørvik: Atlantis Subsea Farming AS. Tilgjengelig fra: <https://atlantisfarming.no/rapporter> (Hentet: 15. mai 2023).
- (2021b). *Sluttrapport Atlantis Subsea Farming*. Rørvik: Atlantis Subsea Farming AS. Tilgjengelig fra: <https://atlantisfarming.no/rapporter> (Hentet: 15. mai 2023).
- Pettersen, B. (2018). *Marin teknikk 3 Hydrodynamikk*. Trondheim: Akademika.
- Roaldsnes, K. (1999). *SOT535- Havbruksteknologi Naturlaster og Forankring*. Høgskolen i Bergen.
- Solstorm, F. (2017). *The effect of water currents on post-smolt Atlantic salmon, Salmo salar (L.)* PhD avhandling. Universitetet i Bergen.
- Standard Norge (2009). *NS-EN 1993-1-10:2005+NA:2009 Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-10: Materialets bruddseighet og egenskaper i tykkelsesretningen*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=379193> (Hentet: 20. mai 2023).
- (2021). *NS 9415:2021 Flytende akvakulturanlegg - Lokalitetsundersøkelse, prosjektering, utførelse og bruk*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1367329> (Hentet: 19. april 2023).
- Stingray (u.å.). *Stingray-systemet*. Tilgjengelig fra: <https://www.stingray.no/avlusing-med-laser/> (Hentet: 16.mai 2023).
- Subsea system* (2023). [Digitalt bilde] Tilgjengelig fra: <https://scaleaq.no/produkt/subsea-system> (Hentet: 8.mai 2023).
- Søvik, G (2022). *Lakselus*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/lakselus> (Hentet: 2.mai 2023).
- Thorbjørnsen og Fossan (2020). *Nekst AS - tilsagn om utviklingstillatelse*. Tilgjengelig fra: <https://www.fiskeridir.no/Akvakultur/Tildeling-og-tillatelse/Saertillatelse/> Utviklingstillatelse/Brev-og-vedtak (Hentet: 15.mai 2023).

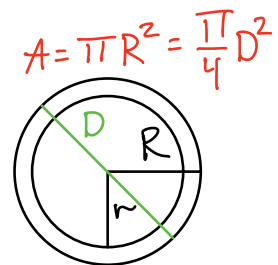
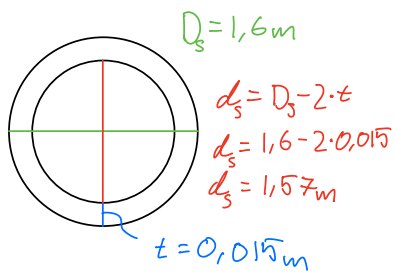
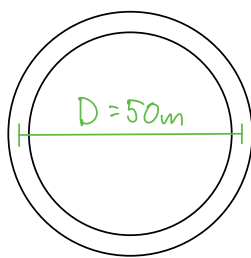
Vedlegg 1



$$A \approx A$$



Helt rund flytekrage:



∇ = volumedeplassement, Δ = masse

$$F_B = \rho \nabla g$$

$$\nabla = \pi \cdot D \cdot \frac{\pi D_s^2}{4} = \frac{D \cdot \pi^2 \cdot D_s^2}{4}$$

$$\frac{\nabla}{L} = \frac{\pi D_s^2}{4}$$

$$\Delta = \left(\frac{\pi D_s^2}{4} - \frac{\pi d_s^2}{4} \right) \cdot \pi \cdot D \cdot \rho_{\text{stål}}$$

$$\rho_{\text{stål}} \approx 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta = \frac{\pi}{4} (D_s^2 - (D_s - 2 \cdot t)^2) \cdot \pi \cdot D \cdot \rho_{\text{stahl}}$$

$$\Delta = \frac{\pi}{4} (D_s^2 - (D_s^2 - 4D_s t + 4t^2)) \cdot \pi \cdot D \cdot \rho_{\text{stahl}}$$

$$\Delta = \frac{\pi}{4} (4D_s t - 4t^2) \cdot \pi \cdot D \cdot \rho_{\text{stahl}}$$

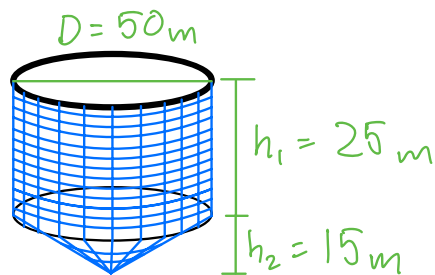
$$\Delta = \pi^2 (D_s t - t^2) \cdot D \cdot \rho_{\text{stahl}} \quad (\text{Sirk. mend})$$

Masse pro Länge:

$$\frac{\Delta}{L} = \pi (D_s t - t^2) \cdot \rho_{\text{stahl}}$$

Volum sirk. mend: $V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h_1$

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot h_1$$



$$V = 49087 \text{ m}^3$$

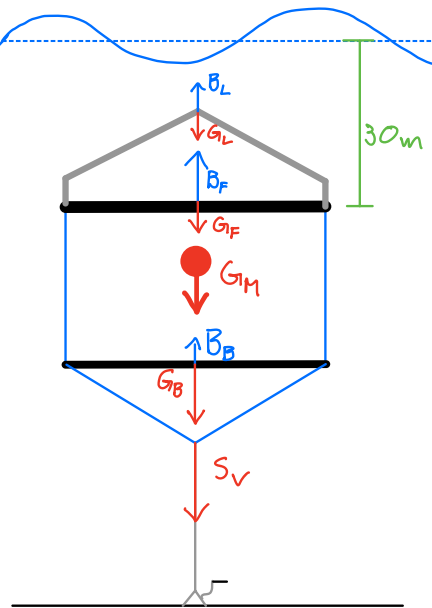
Sum krefter: Nedsenket posisjon;
 Hele flytekragen og innfesting gir oppdrift

$$\sum F = 0$$

$$\vec{G}_M + \vec{G}_F + \vec{G}_B + \vec{G}_L + \vec{B}_F + \vec{B}_B + \vec{B}_L + \vec{S}_V = 0$$

$$-G_M - G_F - G_B - G_L + B_F + B_B + B_L - S_V = 0$$

$$S_V = B_F + B_B + B_L - G_F - G_B - G_L - G_M$$



$$H_s = 6 \text{ m} \quad H = H_s \cdot 1,9$$

$$H = 6 \text{ m} \cdot 1,9 = 11,4 \text{ m}$$

$$\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{7} \Rightarrow \lambda = 7 \cdot H$$

$$\lambda = 7 \cdot 6 \text{ m} \cdot 1,9 = 79,8 \text{ m}$$

Antar dypt vann:

$$\omega^2 = kg, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{2\pi}{\lambda} g \Rightarrow g = \frac{2\pi}{T^2} \lambda$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \Rightarrow T = \sqrt{\frac{\lambda \cdot 2\pi}{g}} = \underline{7,15 \text{ s}}$$

$$H_s = 2,5 \text{ m}$$

$$H = 2,5 \text{ m} \cdot 1,9 = 4,75 \text{ m}$$

$$\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{7} \Rightarrow \lambda = 7 \cdot H$$

$$\lambda = 33,25 \text{ m}$$

$$\omega^2 = kg$$

$$T = \sqrt{\frac{\lambda \cdot 2\pi}{g}} = \sqrt{\frac{33,25 \cdot 2\pi}{9,81}} \text{ s}$$

$$T = 4,61 \text{ s}$$

Egen periode:

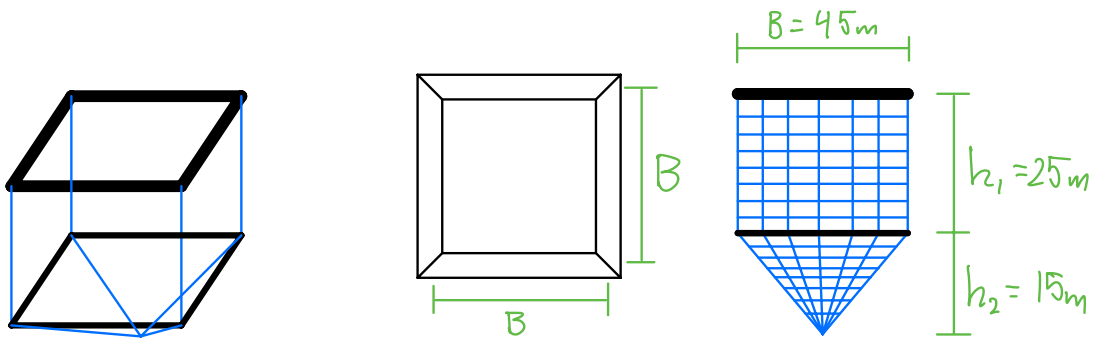
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} \Rightarrow 1 = \frac{T}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}}$$

$$\sqrt{\frac{c}{m}} \cdot T = 2\pi$$

$$\frac{c^{\frac{1}{2}}}{m^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{m^{\frac{1}{2}}}{c^{\frac{1}{2}}} T = 2\pi \cdot \frac{m^{\frac{1}{2}}}{c^{\frac{1}{2}}} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}}$$

FIRKANTET FLYTEKRAGE:



$$V_{\square} = B \cdot B \cdot h_1$$

$$V_{\square} = B^2 \cdot h_1$$

$$V_{\square} \approx 49\,087 \text{ m}^3$$

$$h_1 = 25 \text{ m}, h_2 = 15 \text{ m}$$

$$B = \sqrt{\frac{V_{\square}}{h_1}} = \sqrt{\frac{49087}{25}} = 44,31 \text{ m}$$

$$\underline{B \approx 45 \text{ m}}, \quad \underline{V_{\square} = 50625 \text{ m}^3}$$

$$\Delta = 4B \pi (D_s t - t^2) \cdot \rho_{\text{stål}}$$

$$\nabla = \frac{\pi D^2}{4} \cdot 4B = B \pi D^2 \quad (\text{Nedsenket})$$

$$F_B = \rho \nabla g$$

16-KANTET FLYTEKRAGE

Antar sirkulært notvolum

$$D = 50 \text{ m}, h_1 = 25 \text{ m}, h_2 = 15 \text{ m}$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h_1$$

$$V = 49087 \text{ m}^3$$

$$\text{Omkrets} = \pi \cdot D = \pi \cdot 50 = 157 \text{ m}$$

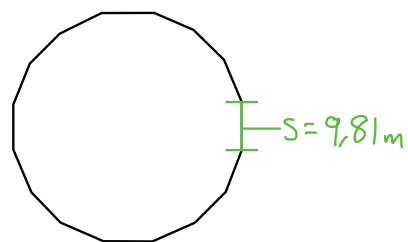
Finne sidelengde, Omkrets fordelt på 16 sider:

$$\frac{\text{Omkrets}}{16} \approx 9,81 \text{ m}$$

$$S = 9,81 \text{ m}, V = 49087 \text{ m}^3$$

$$\Delta = \frac{16S\pi(D_s t - t^2) \cdot \rho_{\text{stål}}}{4}$$

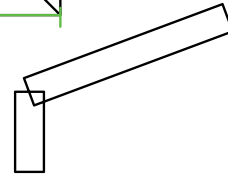
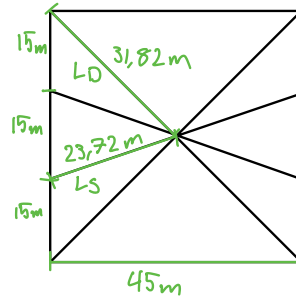
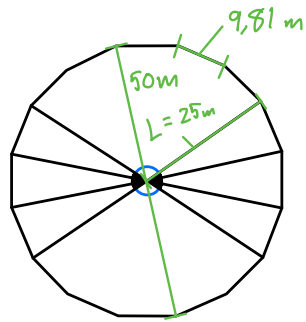
$$\nabla = \frac{\pi D^2}{4} \cdot 16S = \underline{45\pi D^2 S}$$



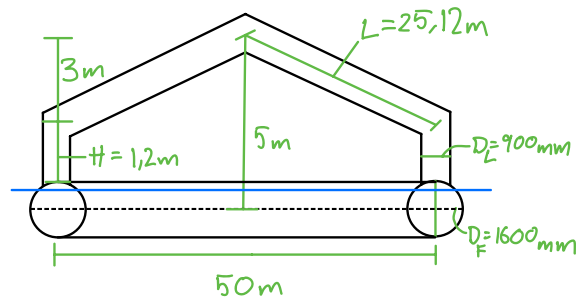
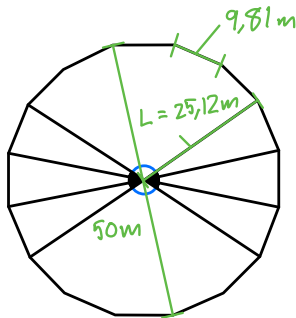
$$F_B = \rho \nabla g$$

LUFTLOMME

Overfra:



Fra siden 16-kantet:

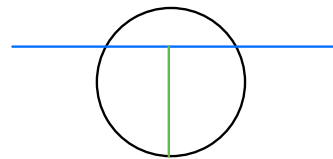


$$\nabla_{L16} = \nabla_{LV} + \nabla_{LS}$$

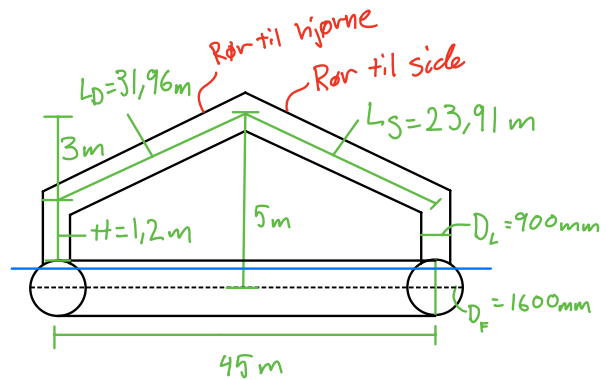
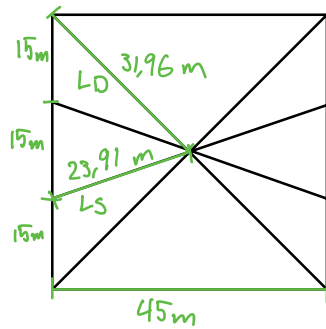
$$\nabla_{L16} = \frac{\pi D_L^2}{4} \cdot 8 \cdot H + \frac{\pi D_L^2}{4} \cdot 8 \cdot L$$

$$\nabla_{L16} = 2\pi D_L^2 (H + L)$$

$$\Delta = 8 \pi (D_L t_L - t_L^2) \cdot \rho_{\text{stål}} (H + L)$$



Fra siden 4-kantet:



$$V_{L\Box} = V_H + V_{LD} + V_{LS}$$

$$V_{L\Box} = \frac{\pi D_L^2}{4} \cdot 8 \cdot H + \frac{\pi D_L^2}{4} \cdot 4 \cdot L_D + \frac{\pi D_L^2}{4} \cdot 4 \cdot L_S$$

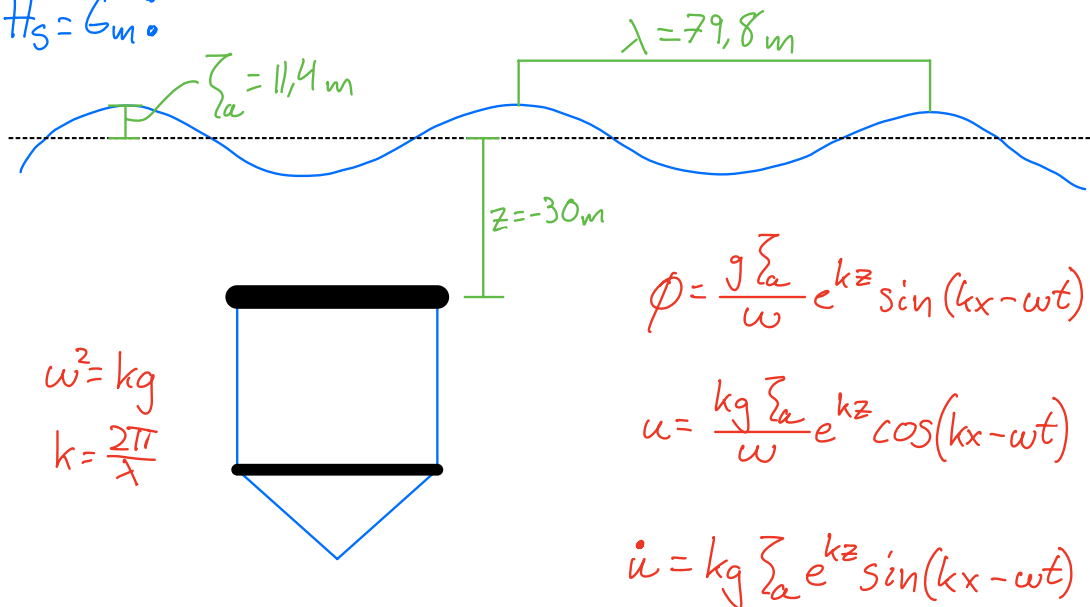
$$V_{L\Box} = 2\pi D_L^2 \cdot H + \pi D_L^2 \cdot L_D + \pi D_L^2 \cdot L_S$$

Maksimal spenning: $\frac{355 \text{ MPa}}{1,3 \cdot 1,1} = 248 \text{ MPa}$

Last faktor
Material faktor

MORRISONS LIKNING

$$H_s = 6 \text{ m}$$



$$\omega^2 = kg$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Morrisons likning:

$$F_{\text{tot}} = F_D + F_M = \frac{1}{2} \rho C_D A u |u| + \rho C_M V \dot{u}$$

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D L u |u| + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} L \dot{u}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 9,81}{79,8}} = 0,879 \text{ s}^{-1}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{79,8} = 0,0787 \text{ m}^{-1}$$

Maksimal horisontal bølgehastighet:

$$u = \frac{kg \zeta_a}{\omega} e^{kz} = \frac{0,0787 \cdot 9,81 \cdot 11,4}{0,879} \cdot e^{-0,0787 \cdot 30} = \underline{\underline{0,9445 \text{ m/s}}}$$

Maksimal horisontal bølgeakselerasjon:

$$\dot{u} = k_g \sum a e^{kz}$$

$$\dot{u} = 0,0787 \cdot 9,81 \cdot 11,4 \cdot e^{-0,0787 \cdot 30} = \underline{0,8302 \text{ m/s}^2}$$

$$U = (0,9445 + 0,7) \text{ m/s} = 1,6445 \text{ m/s}$$

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D L U |U| + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} L \dot{u}$$

$$C_D = 1,2, C_M = 2, \rho = 1025 \text{ kg/m}^3, D = 1,6 \text{ m}, L = 45 \text{ m}$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot 1,2 \cdot 1,6 \cdot 45 \cdot 1,6445^2 + 1025 \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot 1,6^2}{4} \cdot 45 \cdot 0,8302$$

$$F = 273735,1 \text{ N}$$

$$F_{AS} = \frac{1}{2} \rho C_D D L_0 U \cdot |U| + \rho (1 + C_M) \frac{\pi D^2}{4} L_0 \cdot a_2$$

