

Konstruksjon av skipsmodell for å visualisere stabilitet, trim og krenkning

FREDRIK BERVEN
MARIUS HAUKAAS NORDØEN

Bacheloroppgave i Marin Teknikk
Bergen, Norge 2019



Konstruksjon av skipsmodell for å visualisere stabilitet, trim og krenkning

Fredrik Berven
Marius Haukaas Nordøen

Institutt for Maskin- og Marinfag
Høgskulen på Vestlandet
NO-5063 Bergen, Norge

Høgskulen på Vestlandet
Fakultet for Ingeniør- og Naturvitskap
Institutt for maskin- og marinfag
Inndalsveien 28
NO-5063 Bergen, Norge

Omslag fotografi © Norbert Lümmen

English title: Construction of a ship model for visualizing stability, pitch and roll

Forfatter(e), studentnummer: Fredrik Berven, h150191
Marius Haukaas Nordøen, h150104

Studieprogram: Marin Teknikk
Dato: Mai 2019
Rapportnummer: IMM 2019-M33
Veileder ved HVL: Mons Monstad
Oppdragsgiver: Høgskulen på Vestlandet - Haugesund
Oppdragsgivers referanse: Capt. Jone Abotnes

Antall filer levert digitalt: 1

Forord

Denne oppgaven er et bacheloroppgaveprosjekt på linjen Marinteknikk ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet (HVL). Hovedtemaene for oppgaven er modellbygging og stabilitetstesting. Veileder fra Institutt for Maskin- og Marinfag er Mons Monstad. Denne oppgaven er skrevet i samarbeid med Høgskulen på Vestlandet i Haugesund. Ekstern veileder fra Haugesund er høyskolelærer ved Institutt for maritime studium Capt. Jone Abotnes.

Takk til

I dette prosjektet har vi fått hjelp og veiledning av flere personer og vi ønsker derfor å takke dem som har hjulpet oss.

Mons Monstad, intern veileder, for veiledning og gode ideer gjennom hele prosjektet

Capt. Jone Abotnes, ekstern veileder, for veiledning gjennom hele prosjektet

Dr. Gloria Stenfelt, studiekoordinator, for veiledning

Harald Moen, overingeniør, for veiledning ved modell- og tankbygging

Sergio Victor Martinez Castro, teknikker, for veiledning og sveising ved tankbygging

Nafez Ardestani, avdelingsingeniør, for hjelp til fresing og bygging av modell

Bernt Hustad Hembre, avdelingsingeniør, for veiledning ved modellbygging

Capt. Kenneth Haukaas, kaptein, shuttle tankskipet Navion Oceania



Sammendrag

Denne bacheloroppgaven består i hovedsak av å bygge en skipsmodell til HVL Haugesund. Utgangspunktet for modellen er shuttle tankskipet Elisabeth Knutsen som ble skalert til 1:150. Modellen ble først tegnet i et CAD-program før den ble frest ut. Det ble plassert 12 tanker i modellen som skal virke som lastekammer. I hver av disse ble det koblet en slange som går bak til hekken hvor det ble plassert en pumpe som fyller og tømmer alle tankene. Skrogets sider er det mulig å se gjennom ved hjelp av lexanplater, slik at observasjoner av last kan gjøres ved ulike forsøk. To tanker for statisk stabilitetstesting ble konstruert, hvor det også ble gjennomført styrkeberegninger av tankene. Tankene består av tre sider med lexanplater for å kunne få bedre innsikt til modellene som ligger i tankene.

Modellen ble testet ved å gjennomføre krengeprøver, der hensikten er å innhente informasjon for å gjøre beregninger på det vertikale tyngdepunktet. Krengeprøvene gjennomføres ved tre ulike lasttilstander. Ved den første prøven ble modellen lastet til normal ballastkondisjon, i den andre prøven ble tankene lastet halvfulle, og ved den tredje testen ble tankene lastet fulle. Testene gjennomføres ved å flytte krengevekter stegvis tverrskips langs dekket for å skape kregende momenter på modellen. Fra resultatene vil det vertikale tyngdepunktet flytte seg oppover når modellen blir lastet, noe som vil gi modellen dårligere stabilitet.

Abstract

This bachelor thesis mainly consists of building a ship model for Western Norway University of Applied Sciences in Haugesund. The model is based on the shuttle tanker Elisabeth Knutsen and was scaled 1:150. A CAD-program was used to draw the model before it was cut out. 12 tanks were placed in the model to act as cargo tanks. Each of these tanks were linked with a small hose to the stern where a pump was placed. The pump loads and discharges the tanks. It is possible to see through the ships hull because of sides made of lexan plates. This allows students to observe the cargo in different tests. Two water tanks for static stability testing were also constructed. In this context strength calculations were also conducted. Three of the water tanks sides is made out of lexan plates to get a better view of models testet in the tanks.

The model was tested by conducting roll tests, where the purpose of these tests is to calculate the vertical center of gravity. The model was tested with three different load conditions. In the first test, the model was loaded to normal ballast condition. In the second and third tests, the tanks were filled half full and full. The tests were conducted by moving weights step by step along the deck of the modell. This will apply rolling moments that makes the model roll. The results shows that the vertical center of gravity moves upwards when the model is loaded with more cargo. This will reduce the stability of the model.

Innhold

| | |
|---|----|
| Forord..... | 3 |
| Sammendrag..... | 5 |
| Abstract | 7 |
| 1. Innledning..... | 11 |
| 2. Metode..... | 13 |
| 2.1 Skipsmodell..... | 13 |
| 2.1.1 Modellering | 13 |
| 2.1.2 Bygging av modell | 14 |
| 2.1.3 Lasttanker | 16 |
| 2.1.4 Lasting og lossing..... | 17 |
| 2.1.5 Måling av væsknivå i tankene | 18 |
| 2.2 Tank til statisk testing..... | 19 |
| 2.2.1 Design av tanker..... | 19 |
| 2.2.2 Materialvalg..... | 20 |
| 2.2.3 Styrkeberegninger | 20 |
| 2.2.4 Byggeprosess..... | 23 |
| 2.3 Krengeprøve - Beregning av KG..... | 25 |
| 2.3.1 Teoretisk fremgangsmåte | 26 |
| 2.3.2 Eksperimentell metode | 29 |
| 2.4 Feilkilder | 31 |
| 3. Resultat..... | 34 |
| 4. Konklusjon | 36 |
| 5. Referanser..... | 37 |
| Liste over Figurer | 39 |
| Liste over Tabeller..... | 40 |
| Vedlegg 1: Resultater av krengeprøver | 41 |
| Vedlegg 2: Arbeidstegninger av tanker | 43 |
| Vedlegg 3: Dypgangsdata | 45 |

1. Innledning

For å jobbe på et lasteskip er det viktig å ha god kunnskap om hvordan forskjellige lastsituasjoner påvirker skipet. Det finnes flere eksempler på at feil lasting av skip har ført til ulykker enten ved at stille vannsbelastningene på skipet blir for store eller at skipet får dårligere stabilitet som følge av feil plassering av last. Stille vannsbelastninger er krefter som skip blir utsatt for når bevegelsene i vannet er små. De totale kreftene som virker på et skip er stille vannslaster i tillegg til bølgelaster [1].

Se for deg et kasseformet skip med mye last i midten av skipet. Lasten og skrogvekten vil være krefter som virker nedover. Oppdriften vil virke oppover. Resulterende belastning vil være at det virker en positiv skjærkraft mot hekken og mot baugen, mens i midten vil det være en skjærkraft som virker nedover. Dette vil føre til et bøyemoment som kan påføre båten sagging. Det vil heller ikke være gunstig å plassere for mye vekt i baug og hekk samtidig. Det vil da være resulterende oppdrift mot skipets sentrum, men i hekken og baugen vil det være en resultantkraft som virker nedover. Skjærkraften vil virke i samme retning, som fører til et moment som kan føre til hogging [2].

I hvilken rekkefølge tankene lastes er også viktig. Uavhengig av lastehastighet lastes tankpar samtidig (Dersom man har høy lastehastighet vil det være mulig å laste flere tankpar samtidig). Dette gjøres fordi det ikke er ønskelig med krenkning. Det vil også være naturlig å laste slik at stor trim unngås samtidig som det ikke kan være for mye last mot midten, fordi skipet dermed kan utsettes for sagging.

I denne sammenhengen ønsker Høgskulen på Vestlandet i Haugesund en modell som kan visualisere forskjellige lastsituasjoner for et tankskip. Modellen skal brukes av ingeniørstudiet i Nautikk, hvor den skal brukes i undervisning i forbindelse med skipsstabilitet og lasteteknikk. Skipet som brukes som mal er shuttle tankeren Elisabeth Knutsen, og modellen skal lages i skala 1:150. For at det skal være mulig å observere lasting og lossing av tanker vil deler av skroget utføres i lexan.

I hovedsak vil denne oppgaven gå ut på å bygge skipsmodellen. I tillegg skal det utformes en tank som kan brukes til statiske øvelser med modellen. Til slutt skal det gjennomføres krengeprøver på modellen ved forskjellige lastkondisjoner hvor det vertikale tyngdepunktet, KG, beregnes i hvert av tilfellene. Krengeprøvene gjennomføres på MarinLab på Høgskulen på Vestlandet i Bergen.



Figur 1-1: Skipsmodellen under krengeprøve

2. Metode

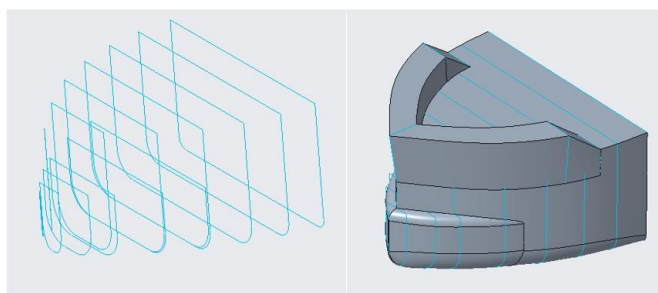
Denne delen av oppgaven gjennomgår byggingen av skipsmodell og tanker for statisk testing steg for steg. I tillegg blir det presentert bakgrunn, teori og utførelse av krengeprøve for modellen.

2.1 Skipsmodell

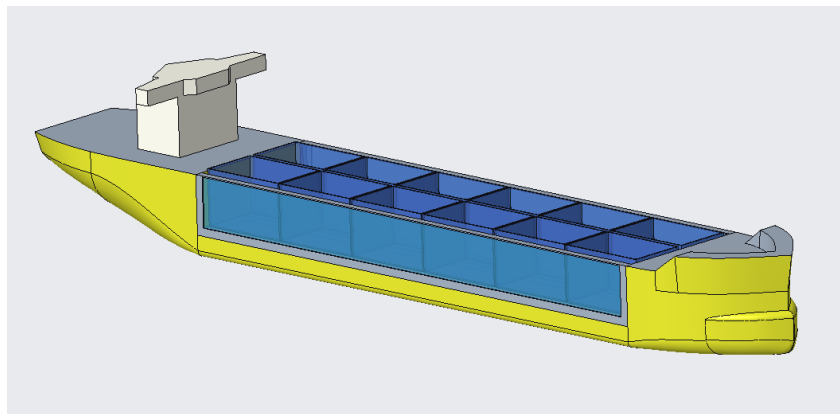
Hovedhensikten med oppgaven er å bygge en forenklet modell av Elisabeth Knutsen. Denne seksjonen inneholder byggeprosessen fra 3D-modellering til ferdig modell.

2.1.1 Modellering

Modellen blir modellert i CAD-programmet Creo Parametric. Utgangspunktet for modelleringen er tegninger av Elisabeth Knutsen som er gitt av oppdragsgiver. Tegningen som er mest gunstig å benytte, er linjetegninger av skipet, fordi de inneholder god beskrivelse av skipets skrog. Linjetegningene består av tre deler som standard. En profil som viser skrogets lengdesnitt, spanteriss som viser tverrsnitt av skroget både foran og bakfra, og det tredje er vannlinjeplan som er horisontale snitt av skroget som går parallelt med vannlinjen. Modellen blir noe forenklet siden den ikke skal slepes. Derfor blir ikke formen i hekken rundt propeller, akslinger og ror tatt med. Ved modelleringen av skipet blir den tegnet i flere snitt, og alle mål blir tatt ut fra linjetegninger. For å gjøre seksjonen komplett brukes funksjonen «blend» som vist i Figur 2-1.



Figur 2-1: Til venstre vises hvordan modellen blir tegnet i snitt, og hvordan modellen blir solid ved funksjonen «blend».



Figur 2-2: 3D-modell av Elisabeth Knutsen

2.1.2 Bygging av modell

I tillegg til en 3D-modell som viser det fremtidige resultatet, blir det også tegnet en modell som brukes til fresing. Modellen blir laget i 4 deler fordi baugen må deles i to slik at alle former rundt bulben blir frest. Denne modellen blir laget med offset verdi på 1 millimeter i forhold til den reelle modellen. Dette gjøres fordi modellen blir sparklet etter fresing, noe som vil etterlate et tynt lag utenpå den freste modellen.

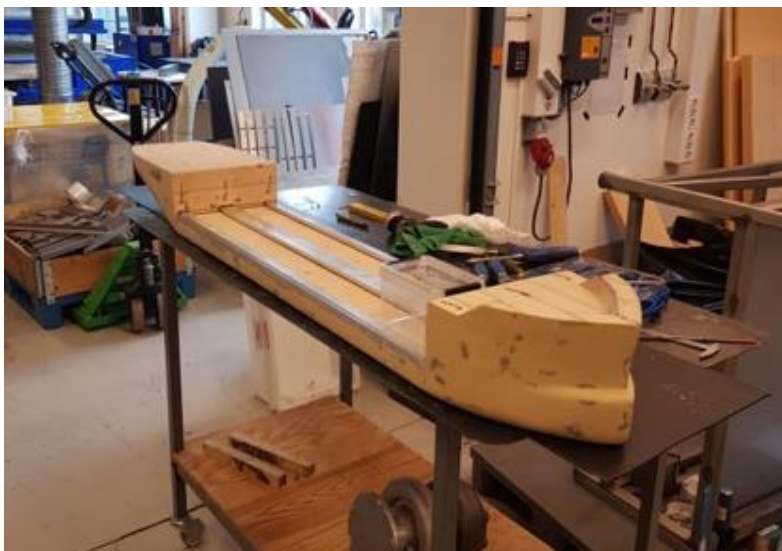
Materialet modellen bygges i og som freses ut kalles Divinycell H60. Divinycell H60 blir brukt fordi det er lett formbart ved bruk av fresen, har lav tetthet, og strukturen på materialet er lukket cellestruktur som gjør at det ikke tar til seg væske. Deretter legges det flere lag med sparkel. Sparkelen legges på for å gi skroget bedre styrke og få et finere resultat.



Figur 2-3: Modellen før og etter fresing

For å forsterke modellen limes det på fire rektangulære aluminiumsprofiler med mål 20x10x2 millimeter. En profil på hver side av midtseksjonen og to på midten. Disse profilene er litt lengre enn

selve midtseksjonen og fortsetter inn i både hekken og baugen. I tillegg vil profilene gjøre det lettere å lime sammen hele modellen korrekt. De delene av profilene som skal limes i modellen pusses ned for å få en røffere overflate, noe som vil gjøre at limen hefter seg bedre til underlaget. Deretter blir rammen, som lexanplaten skal stå i, laget og limt på modellen. Rammen består av vinkelprofiler av aluminium med størrelse 15x15x2 mm.



Figur 2-4: Forsterkning av skrog.

Etter arbeidet med sparkling og forsterkning ved midtdelen er gjennomført, blir hele modellen satt sammen. Når modellen blir limt sammen må den ligge i press slik at modellen limes sammen riktig. Etter at delene tørket var det oppstått to sprekker der hekken og baugen er limt fast i midtseksjonen. Derfor blir et nytt lag med polyestersparkel lagt over sprekken og andre steder det er nødvendig. Grunnen til dette er for å få en helt tett modell, og et så fint resultat som mulig. Sparkelen blir så pusset ned igjen til det er en jevn og fin overflate. Deretter lakkas modellen og til slutt festes lexanplatene.



Figur 2-5: Modellen blir limt sammen og påføres press med gaffateip. Det brukes maskeringsteip under fordi den ikke fester seg like godt som gaffateipen og ødelegger derfor ikke modellen.

2.1.3 Lasttanker

Ved valg av tanker som skal stå i båten er det flere mulige løsninger. Det første som blir vurdert er å lage tankene av lexanplater. Ved bruk av lexanplater er det mulig å lage de korrekte målene på tankene, men ulempen er at det krever mye arbeid. Det vil ta lang tid å kutte ut alle platene. I tillegg vil det være utfordrende og tidkrevende å lime lexanplatene sammen med tanke på at det må bli helt tett. Det blir derfor besluttet å gå for en løsning der ferdigproduserte plastbokser blir brukt. Disse vil ikke ha identiske skalerte mål som tankene i det originale skipet, men vil til gjengjeld kreve lite arbeid og være tette. Målene på tankene er 170x110x106 mm og de har volum 1,2 liter [3].

I hver av tankene blir det boret to hull i toppen. Det ene hullet brukes til tømning og fylling av tankene, mens det andre brukes til å måle væsknivået i tanken. Ved boring i plast er det viktig med høy hastighet på boret og lav mating for å unngå sprekke-dannelser. Tankene plasseres ved hjelp av hjørner som limes fast i bunnen av båten, som vist på Figur 2-6. Tankene kan dermed tas ut av modellen og enkelt settes på riktig plass igjen.



Figur 2-6: Hver tank har fast plass ved hjelp av hjørner som er limt fast.

2.1.4 Lasting og lossing

Ved tømning og fylling av tankene finnes det flere mulige løsninger. Siden tankene ikke er fast installert er den letteste løsningen å fylle de med en trakt, og når de skal eventuelt tømmes igjen løftes tankene ut av båten og tømmes. Problemet med denne løsningen er at det ikke er mulig å se hvordan båten oppfører seg etterhvert som tanken tømmes og det vil heller ikke være mulig med intern overføring mellom tankene.

Ejektør er en annen mulighet for tømning av tankene og det er flere grunner til å benytte seg av en ejektor. Ejektoren blir montert på et vannutløp som for eksempel en vask. Ved å skru på vannet vil det føre til at vann blir pumpet fra tankene til ejektoren gjennom slanger. Etter undersøkelser vil ejektor ikke kunne bli brukt da det ikke er tilstrekkelige forhold i Haugesund der modellen skal brukes.

En annen mulighet som blir tatt i betraktning er å bruke trykkluft til å tømme tankene. Det blir gjort ved å ha to åpninger i tankene, der det ene hullet har en slange som går ned til bunnen av tanken. Tanken blir da påført trykkluft fra en liten kompressor i det andre hullet, som vil gjøre at vannet går ut. Denne ideen blir utelukket, fordi kontrollen over hvor mye som tømmes blir sterkt redusert.

Muligheten til å bruke pumpe blir også vurdert. Her blir det vurdert forskjellige løsninger. Det kan brukes en elektrisk pumpe eller en manuell pumpe. Begge har fordeler og ulemper. Den manuelle pumpen har sin hovedfordel ved at det ikke er nødvendig å ha elektriske komponenter. For å få en pumpe som har tilstrekkelig slagvolum og som er enkel å håndtere, blir det vurdert å bruke en manuell

lensepumpe. Ulempen med denne pumpen er at den kun fungerer en vei, og dersom tanken skal tømmes kreves det at man bytter om slangene. I tillegg har den manuelle lensepumpen en åpning som krever en slange med diameter 34,5 mm. Dette vil være for stort for tankene i båten, og det kreves derfor at slangen strupes på en måte. Dette kan føre til at pumpens evne til å tømme tankene svekkes, og en løsning med elektrisk pumpe velges i stedet.

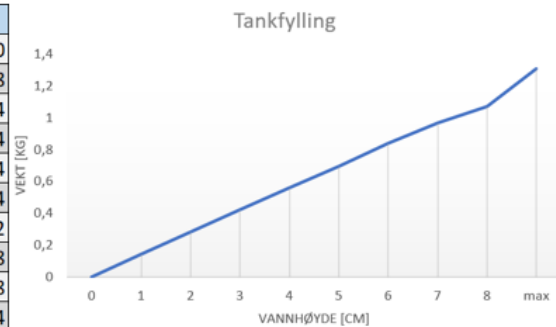
Pumpen som blir valgt er av typen spylervæskpumpe fra Biltema [4]. Denne pumpen gir tilstrekkelig kapasitet, med omtrent 3 l/min. For å drive pumpen trengs et batteri. Batteriet som blir valgt er 12V 4Ah gelebatteri [5]. Pumpen leverer en strøm på omtrent 2,5 A. Siden batteriet er 4 Ah, vil dette medføre en brukstid på rundt 1,5 timer.

Siden det er ønskelig å kunne laste og losse tankene på en enkel måte, må pumpen kunne reverseres. I utgangspunktet blir dette gjort ved å lage en enkel krets med et batteri, en pumpe og en av/på bryter [6]. Ved hjelp av disse komponentene er det mulig å kjøre pumpen i en retning. Ved å splitte ledningen to ganger, en gang på hver side mellom batteriet og pumpen, og koble om på ledningene i disse punktene, reverseres pumpen. For at det skal bli lettere å koble om ledningene blir koblingen laget ved hjelp av bananstifter [7]. Selv om dette er en fullt fungerende løsning, blir en løsning med en på/av/på bryter valgt i stedet [8]. Denne løsningen gjør lasting og lossing mer brukervennlig.

2.1.5 Måling av væsknivå i tankene

Ved å velge pumpe som metode for å laste og losse tankene, vil det være vanskelig å anta hvor mye last som er i hver tank. Det er derfor nødvendig å ha en metode for å måle væsknivået. Det blir limt et rør i toppen av hver tank som har ytre diameter 12 mm og indre diameter 7 mm [9]. Røret plasseres i midten av tanken slik at målingen av vannivået ikke blir påvirket av krenkning og trim i like stor grad. I røret plasseres et sugerør som har diameter 6 mm [10]. En flottør blir limt i bunnen av sugerørene slik at når tankene fylles eller tømmes vil sugerørene bevege seg. Vannmengden måles ved å lese av sugerørene da disse er markert for hver centimeter tankene blir fylt opp. Oversikt over hvor mye væske og vekt dette tilsvarer, er vist i Tabell 2-1.

| Vannhøyde [cm] | Vannmengde [l] | Vekt [kg] | Vekt 12 tanker [kg] |
|----------------|----------------|-----------|---------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,144 | 0,144 | 1,728 |
| 2 | 0,282 | 0,282 | 3,384 |
| 3 | 0,422 | 0,422 | 5,064 |
| 4 | 0,562 | 0,562 | 6,744 |
| 5 | 0,695 | 0,695 | 8,34 |
| 6 | 0,841 | 0,841 | 10,092 |
| 7 | 0,969 | 0,969 | 11,628 |
| 8 | 1,069 | 1,069 | 12,828 |
| max | 1,307 | 1,307 | 15,684 |



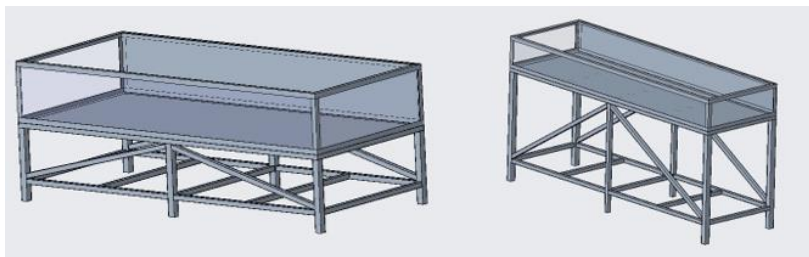
Tabell 2-1: Oversikt over vekt i tanker ved økende vannmengde.

2.2 Tank til statisk testing

I forbindelse med modellbyggingen skal det utformes en tank som skal brukes til statisk testing av modellen. Når det først lages en tank til høyskolen i Haugesund, ønsker også høyskolen i Bergen en tilsvarende tank. Ettersom tanken som blir stående i Bergen skal kunne brukes til flere forskjellige prosjekter og modeller, er det ønskelig at denne blir litt større enn den som skal stå i Haugesund. Designet er utenom skalering ganske likt.

2.2.1 Design av tanker

Tankene blir, i likhet med skipsmodellen, designet i Creo 5. Designet er todelt og relativt enkelt. Det består av en tank som lages av en ramme av rustfrie vinkelprofiler med dimensjoner 30x30x3 mm. Tankens bunn og en av dens vegger består av 2 mm rustfrie stålplater, mens de tre resterende veggene er av 6 mm lexan. Tanken står på en konstruksjon av kvadratiske profiler i rustfritt stål. Siden høyskolen i Haugesund ikke har tilgang på et sluk i gulvet for tømning, blir denne tanken konstruert en del høyere, slik at vannet kan renne ut i en vask. Siden tanken til Bergen skal kunne romme rundt 700 liter i forhold til 330 liter i tanken i Haugesund, vil utbøyingen blant annet i bunnplaten bli mye større. For å unngå at utbøyingen i platen blir for stor legges det inn ekstra bjelker på langs. Arbeidstegninger med eksakte dimensjoner er vist i Vedlegg 2.



Figur 2-7: Tank til HVL Bergen og HVL Haugesund

2.2.2 Materialvalg

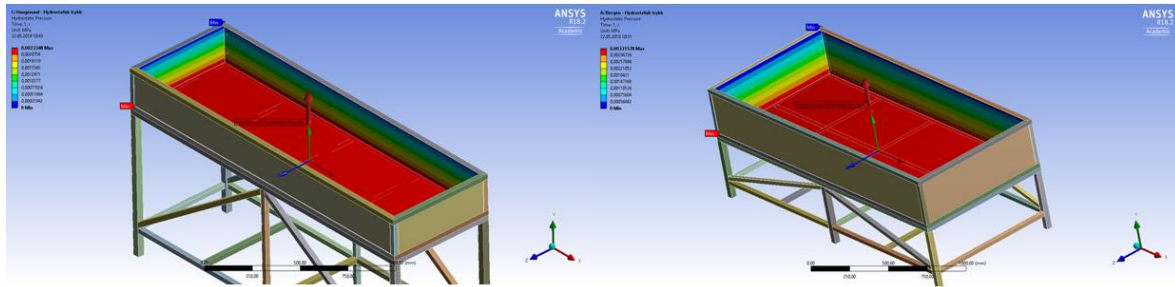
Ved bygging av tankene er valg av materiale som tankene bygges i en stor del av prosessen, særlig når det gjelder styrkeberegning og dimensjonering. Materialene som blir tatt i betraktning er aluminium, rustfritt stål og syrefast stål. Fordelen med aluminium er at vekten av tanken blir relativt lav. Aluminium blir likevel valgt bort av flere grunner. Når aluminium er i kontakt med vann over lengre tid er det fare for korrosjon og misfarging av materialet. I tillegg er aluminium svakere enn stål, og det vil dermed være nødvendig med mer material. Aluminium kan også være utfordrende å sveise, spesielt når det jobbes med tynne profiler. Rustfritt og syrefast stål har relativt lik styrke, og tåler større belastninger enn aluminium. Rustfritt er mer enn nok resistent mot korrosjon med tanke på omstendigheter tankene skal brukes i, og i tillegg vil syrefast bli betydelig dyrere. Tankene blir derfor konstruert i rustfritt stål.

2.2.3 Styrkeberegninger

Siden tankene skal romme et relativt stort volum, gjøres det beregninger av det hydrostatiske trykket som oppstår når tankene fylles med vann. Når tankene er fylt opp med vann vil dette utgjøre betydelig vekt i konstruksjonen. Det utføres derfor beregninger på hele strukturen. Analysene blir gjennomført i Ansys workbench 19.2. I tillegg skal det være mulig å flytte tankene. Det gjennomføres derfor analyser hvor det bekreftes at flytting ved hjelp av pallejekk er mulig. I figurene nedenfor blir resultater fra analysene presentert. Analysene for tankene til Haugesund og Bergen vil ligge på henholdsvis venstre og høyre side.

Hydrostatisk trykk

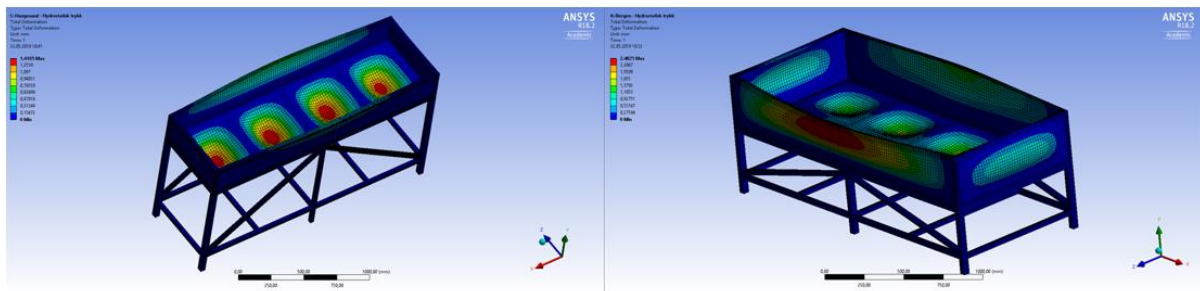
Vanntrykket øker med økende dybde. Det verste tilfellet vil derfor ligge på bunnen av tanken. Det hydrostatiske trykket gir en kraft som virker ut fra senter av tanken. Det hydrostatiske trykket i tanken til Bergen er større enn den til Haugesund. Dette kommer av at dybden av tanken er større, og ikke på grunn av vannlinjearealet.



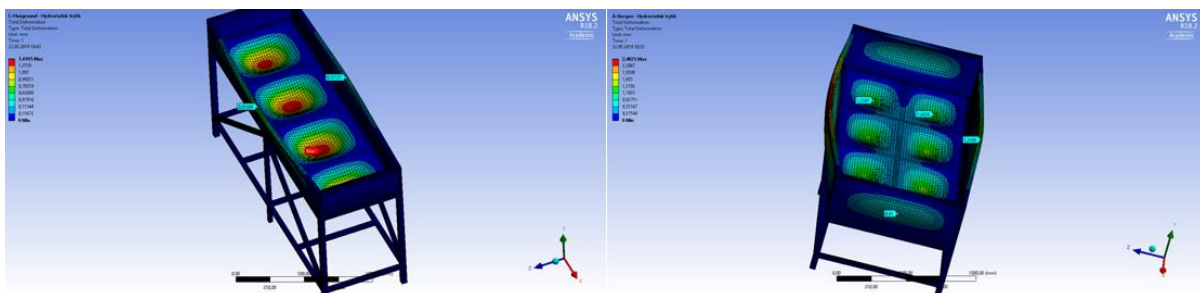
Figur 2-8: Hydrostatisk trykk. Trykket øker med økende dybde.

Deformasjon

Den største deformasjon for tanken til Haugesund er 1,4 mm, og oppstår i bunnplaten der det er høyest trykk. Tanken til Bergen vil ha den største deformasjonen på 2,5 mm i den lengste lexanplaten. Grunnen til at den største deformasjonen oppstår på forskjellige steder, er forsterkningen av konstruksjonen på tanken til Bergen. Der er det langsgående bjelker i bunnen som gir mer styrke, og dermed mindre utbøying.



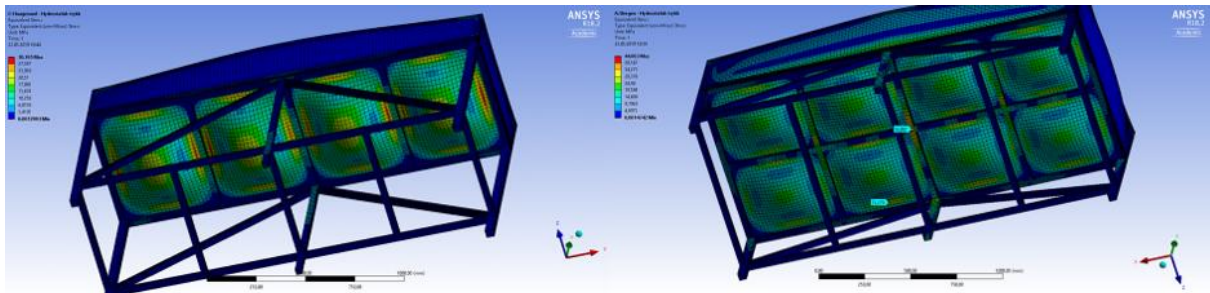
Figur 2-9: Deformasjon. Deformasjonen er klart størst i bunnplaten til venstre, mens den er størst i lexanplaten til høyre.



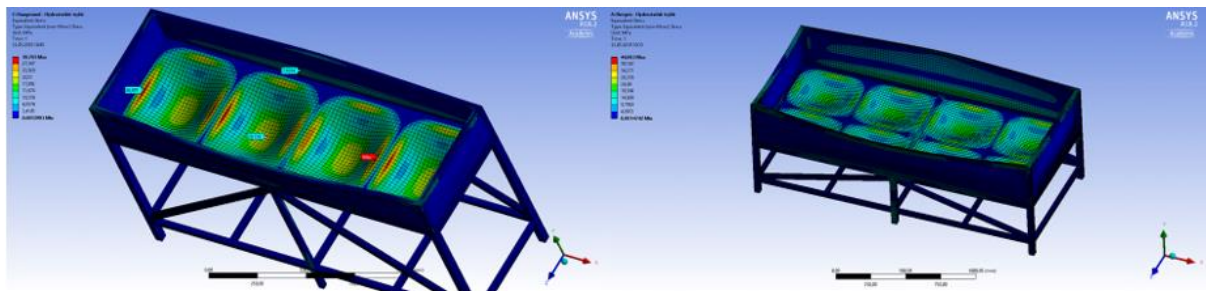
Figur 2-10: Deformasjon.

Spenning

Analysen oppgir at den høyeste spenningen oppstår i begge tankene mellom de tverrgående bjelkene og bunnplaten. Denne spenningen er for tanken til Haugesund på 30 MPa og 44 MPa for tanken i Bergen. Disse spenningene er langt under flytegrensen til rustfritt stål som er på 190 MPa [11].



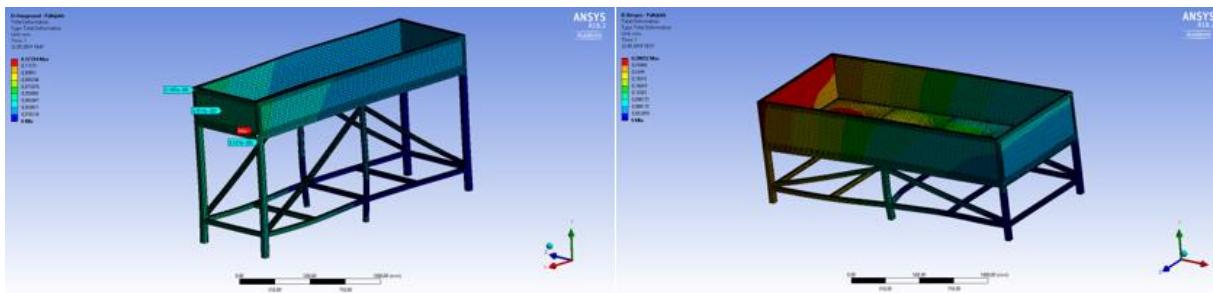
Figur 2-11: Spenning. De største spenningene opptrer på samme steder i begge tankene.



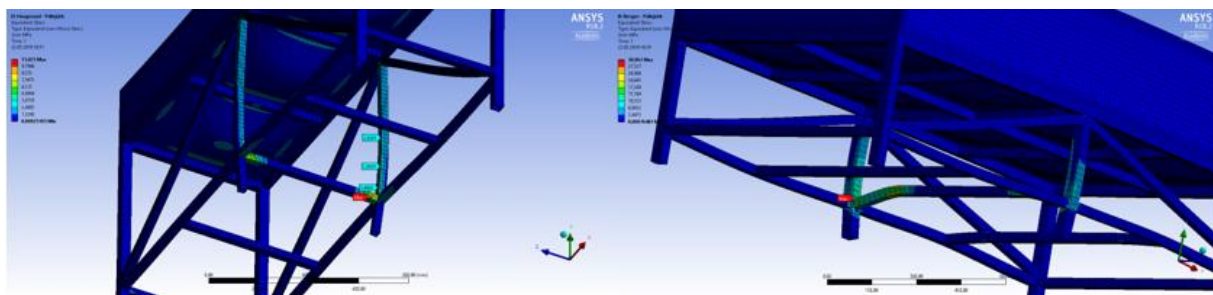
Figur 2-12: Spenning.

Løfting med pallejekk

Analysene som blir gjort med flytting av tankene viser til små deformasjoner og spenninger for begge tankene.



Figur 2-13: Deformasjon ved løfting med pallejekk.



Figur 2-14: Spenning ved løfting med pallejekk.

2.2.4 Byggeprosess

Tilsammen består begge tankene av over 60 separate deler som blir kappet opp til korrekte lengder. Stålplatene blir kuttet til riktige dimensjoner ved hjelp av en CNC-plasmakutter, mens lexanplaten blir kuttet med en stikksag. Bunnrammen blir sveist sammen av Sergio Martinez ved skolen.

I mange tilfeller kan underlaget være ujevnt. Det er derfor ønskelig å kunne justere høyden av hvert bein på tankene. Det blir gjort ved å sveise en mutter på en sirkel av 5 mm rustfritt stål som er nederste del av benene. I tillegg blir to plater av 5 mm rustfritt stål sveist sammen og gjenger blir laget i senter. Disse gjør at det er mulig å justere høyden av tankene. Den gjengede delen ble så sveiset i profilene.



Figur 2-15: CNC-plasmakutter

Neste steg er å sveise rammen til øverste del av tanken. Nederste del av rammen blir først sveist sammen og deretter sveist på nedre del av konstruksjonen. Deretter limes bunnplaten i rammen. Det blir brukt lim til dette og ikke sveising, fordi det er nødvendig at tanken blir tett. I tillegg vil sveising på tynne plater være utfordrende på grunn av fare for utbøyinger. Deretter sveises resten av rammen og sideplatene limes fast. Det skal være mulig å fylle og tømme tanken i bunn, derfor blir det boret et hull i det ene hjørnet der en slange med en stoppkobling blir montert. Dette gjør det mulig å tømme og fylle tankene ved hjelp av en skjøtekobling.



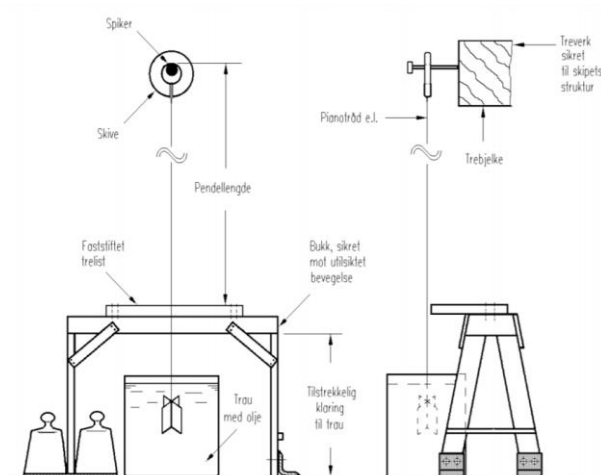
Figur 2-16: Sideplatene limes fast i rammen. Trykk påføres slik at platene ikke beveger seg.

2.3 Krengeprøve - Beregning av KG

I Haugesund skal modellen brukes i fagene stabilitet og lasteteknikk. Det blir derfor gjennomført relevante tester som kan brukes videre i undervisning. En av de mest grunnleggende testene innenfor stabilitet er krengeprøve. Krengeprøver blir gjennomført på alle nye skip og eldre skip som blir ombygd eller modifisert. De ansvarlige for å gjennomføre dette er ifølge *Norske Forskrifter* verkstedet dersom det blir gjort modifikasjoner i Norge, eller reder om skipet eller konstruksjonen kommer fra utlandet [12]. Hensikten med et slikt forsøk er hovedsakelig å finne skipets vertikale tyngdepunkt og i tillegg finne skipets lettskipsvekt. Det er viktig å gjennomføre slike forsøk så nøyaktig som mulig, siden plassering av tyngdepunktet er en viktig faktor i flere andre stabilitetsberegninger. Krengeprøvene blir ofte gjennomført rett etter sjøsetting eller før levering til eier [13] [12].

Før krengeprøver kan gjennomføres er det en del ting som må redegjøres for. Dette kan for eksempel være uønskede objekter på dekk, spesielt unødvendig last eller konstruksjoner som kan bevege seg. Under krenkning kan slike konstruksjoner få uønskede bevegelser og må sikres på hensiktsmessig måte. Om skipet ikke er helt komplett fra verft, skal mangler redegjøres for å bli tatt med i beregninger. Mangler av større konstruksjoner på skip vil gi større unøyaktighet under testing. Det skal heller ikke være unødvendig mannskap om bord som ikke er direkte ansvarlig for gjennomføring av krengeprøvene. Tanker som nødvendigvis ikke trenger å være væske eller last i, skal være helt tomme eller om nødvendig 100% fulle, ikke 98% som er vanlig for skip i drift. Når skipet er klargjort og alle unødvendigheter er gjort rede for kan krengeprøver starte [12].

Krengeprøver blir gjennomført ved å påføre ulike krenagemoment ved å flytte kjente laster bestemte avstander tverrskips. Det blir som oftest benyttet flere krengevekter langs skipet for å oppnå en jevn krenkning. Krengevektene skal veie tilstrekkelig slik at skipet kan oppnå krenkning på minimum 2 grader og maksimum 4 grader. Krenagemoment som oppstår grunnet flytting av vekter vil gjøre at skipet krenger og observasjonene rundt dette brukes videre til å bestemme tyngdepunkt og vektdeplasement. Krengevinkelen måles for hver gang krengevektene blir flyttet langs dekk. Vinkelen blir målt ved hjelp av en pendel som vist i Figur 2-17. Loddet som henger i pendelen blir lagt i oljebad for å minske uønsket bevegelse under testingen. Skipet må for hvert steg krengevektene flyttes, bli liggende en periode for at alt skal stabiliseres, og deretter blir det gjort en avlesning på en list som ligger noe høyere enn pendelvekten [12].



Figur 2-17: Oversikt over pendel ved krengeprøver [12].

Krengeprøvene som blir gjennomført på modellen følger samme framgangsmåte som i virkeligheten. Krengevinkelen kan måles på to ulike måter. Enten kan det gjøres med en pendel som vil bli plassert i baugen av modellen, eller kan et digitalt vinkelapparat bli brukt.

2.3.1 Teoretisk fremgangsmåte

Noe av det mest grunnleggende når det skal gjøres beregninger på flytende konstruksjoner som for eksempel skip eller andre konstruksjoner er Arkimedes lov. Den gjelder for fritt flytende konstruksjoner og er viktig i videre arbeid. Arkimedes lov består av volumdeplasement (∇), vektdeplasement (Δ) og tetthet (ρ):

$$\Delta = \rho \nabla \quad (1)$$

Arkimedes lov er helt avgjørende i alle krengeprøvene, da den er med å finne ballasten som modellen skal inneholde ved hver dyppang. Dette kan gjøres fordi vekten av hele modellen uten noe ekstra er målt fra før.

Hensikten med å utføre krengeprøver, er å finne det vertikale tyngdepunktet KG . For å komme fram til dette resultatet er det nødvendig med data fra andre parametere enn det krengeprøven gir, da uttrykket for vertikale tyngdepunktet ser slik ut:

$$KG=KB+BM-GM \quad (2)$$

Resultatene fra krengeprøvene vil gi data som brukes til å beregne GM. Utenom GM trenger man også data om KB og BM, som er henholdsvis avstand fra kjøll til oppdriftssenter og avstand fra oppdriftssenter til metasenter. Da modellen er skalert ned ganske nøyaktig, og hydrostatiske tabeller er tilgjengelig for det opprinnelige skipet, vil det være mulig å skalere ned de hydrostatiske tabellene slik at de kan brukes for modellen også. Det vil bety at KB og BM kan skaleres direkte ned fra de opprinnelige hydrostatiske tabellene og brukes til krengeprøvene.

| Original | | | | Modell | | | |
|-------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|
| Dypgang[mm] | KB [mm] | KM [mm] | BM [mm] | Dypgang [mm] | KB [mm] | KM [mm] | BM [mm] |
| 1000 | | | 0 | 6,7 | | | |
| 2000 | | | 0 | 13,3 | | | |
| 3000 | 1518 | 49246 | 47728 | 20,0 | 10,1 | 328,3 | 318,2 |
| 4000 | 2031 | 37859 | 35828 | 26,7 | 13,5 | 252,4 | 238,9 |
| 5000 | 2543 | 31203 | 28660 | 33,3 | 17,0 | 208,0 | 191,1 |
| 6000 | 3055 | 26982 | 23927 | 40,0 | 20,4 | 179,9 | 159,5 |
| 7000 | 3567 | 24161 | 20594 | 46,7 | 23,8 | 161,1 | 137,3 |
| 8000 | 4079 | 22196 | 18117 | 53,3 | 27,2 | 148,0 | 120,8 |
| 9000 | 4594 | 20797 | 16203 | 60,0 | 30,6 | 138,6 | 108,0 |
| 10000 | 5110 | 19791 | 14681 | 66,7 | 34,1 | 131,9 | 97,9 |
| 11000 | 5629 | 19059 | 13430 | 73,3 | 37,5 | 127,1 | 89,5 |
| 12000 | 6151 | 18536 | 12385 | 80,0 | 41,0 | 123,6 | 82,6 |
| 13000 | 6676 | 18168 | 11492 | 86,7 | 44,5 | 121,1 | 76,6 |
| 14000 | 7199 | 17922 | 10723 | 93,3 | 48,0 | 119,5 | 71,5 |
| 15000 | 7723 | 17771 | 10048 | 100,0 | 51,5 | 118,5 | 67,0 |

Tabell 2-2: Originale og skalerte hydrostatiske parametere.

Etter gjennomførte krengeprøver blir det ut fra data laget en punktgraf, der det også blir gjort en lineær tilnærming av alle punktene i hvert forsøk. Stigningstallet til de lineære grafene er nødvendig for videre beregning av det vertikale tyngdepunktet KG, fordi det vil gi verdier for GM. For å beregne KG blir et uttrykk for GM utledet ved hjelp av Figur 2-18. Under utførelser av krengeprøver vil det oppstå både kregende og rettende moment som er essensiell for videre utledning. Det rettende momentet vil oppstå grunnet bevegelse av oppdriftssenter ved krenkning, og kregende moment oppstår grunnet flytting av krengeveker tverrskips langs dekk. Utrykkene for momentene er:

$$M_R = GZ * \nabla * \rho * g \quad (3)$$

$$M_K = b * \cos(\varphi) * mg \quad (4)$$

Utrykkene er utledet ved hjelp av Figur 2-18, der b er avstanden vekten flyttes tverrskips, g er tyngdeakselerasjonen og m er masse som flyttes. Ved nøyaktige krengeprøver med stabil krengeing vil rettende og kregende moment bli lik hverandre, og dette vil være viktig for videre utledning av GM. Utledningen vil se slik ut:

$$M_R = M_K \quad (5)$$

$$GZ * \nabla * \rho * g = b * \cos(\varphi) * mg \quad (6)$$

Fra Figur 2-18 kan GZ utledes:

$$GZ = GM * \sin(\varphi) \quad (7)$$

GZ blir så erstattet:

$$GM * \sin(\varphi) * \nabla * \rho = b * \cos(\varphi) * m \quad (8)$$

GM løses ut:

$$GM = \frac{b * \cos(\varphi) * m}{\sin(\varphi) * \nabla * \rho} \quad (9)$$

$$GM = \frac{mb}{\Delta * \tan(\varphi)} = \frac{mb}{\tan(\varphi)} * \frac{1}{\Delta} \quad (10)$$

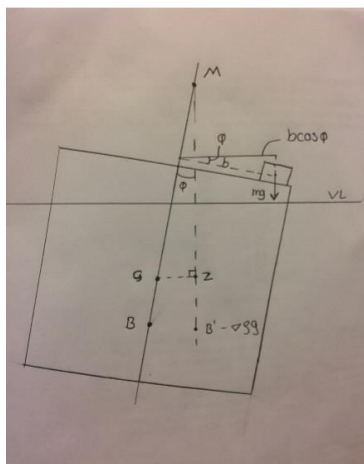
Stigningstallet kan skrives som:

$$a = \frac{mb}{\tan(\varphi)} \quad (11)$$

$$GM = \frac{mb}{\Delta * \tan(\varphi)} = \frac{mb}{\tan(\varphi)} * \frac{1}{\Delta} \quad (12)$$

Utrykket for avstand fra tyngdepunkt til metasenter blir:

$$GM = \frac{a}{\Delta} \quad (13)$$



Figur 2-18: Utledning av GM.

2.3.2 Eksperimentell metode

Ved gjennomføringen av krengeprøvene blir det brukt diverse utstyr. Modellen blir brukt sammen med ferdigkuttete ballastvekter som passer i bunnen av modellen samt i hekk og baug. Det brukes også et termometer for å måle temperaturen i vannet, fordi dette er nødvendig for å vite tettheten til vannet slik at modellen blir ballastert riktig. En digital vinkelmåler blir benyttet for å måle krengevinkelen til modellen. I tillegg til dette er det laget egne krengevekter som blir flyttet tverrskips for å påføre krengeomomentet.



Figur 2-19: Modellen før krengeprøve.

Krengeprøvene starter med å gå gjennom alt utstyr og kontrollere at det fungerer slik det skal. Videre blir temperaturen i vannet målt med et digitalt termometer og tettheten blir lest av fra tabell utgitt av ITTC (International Towing Tank Conference) [14]. De ulike testene vil ha utgangspunkt med forskjellige dypganger, så hvilken dypgang som skal brukes må avgjøres. Deretter beregnes vektdeplasement og hvor mye ballast modellen må ballasteres med. Vektdeplasementet ved ulike

dypganger vises i Vedlegg 3. Det er også viktig å ta med krengevektene i ballastberegningene, og plassere de på riktig posisjon på millimeterpapiret.

Vinkelmåleren plasseres og kalibreres ved null grader da modellen ikke skal ha krenkning ved start av testene. Forsøkene som blir utført vil kun innebære testing ved små vinkler grunnet videre beregning. Krengeprøvene starter ved å finne maks avstand krengevektene kan flyttes for å oppnå maks krengevinkel under 5 grader. Krengevektene blir så flyttet stegvis fra maks styrbord krenkning til maks babord krenkning. Krengevinkelen blir så lest av for hvert steg. Antall steg som blir brukt avgjør hvor god data som kan bli brukt videre, ved flere steg blir resultatene mer nøyaktig [14]. Tabell 2-3 viser hvordan krengevektene blir flyttet ved de ulike forsøkene.

| Forsøk 1 | | Forsøk 2 | | Forsøk 3 | |
|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|
| Steg | Avstand fra sentrum [cm] | Steg | Avstand fra sentrum [cm] | Steg | Avstand fra sentrum [cm] |
| 1 | 10 | 1 | 8 | 1 | 6 |
| 2 | 9 | 2 | 7 | 2 | 5,5 |
| 3 | 8 | 3 | 6 | 3 | 5 |
| 4 | 7 | 4 | 5 | 4 | 4,5 |
| 5 | 6 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| 6 | 5 | 6 | 3 | 6 | 3,5 |
| 7 | 4 | 7 | 2 | 7 | 3 |
| 8 | 3 | 8 | 1 | 8 | 2,5 |
| 9 | 2 | 9 | 0 | 9 | 2 |
| 10 | 1 | 10 | -1 | 10 | 1 |
| 11 | 0 | 11 | -2 | 11 | 0 |
| 12 | -1 | 12 | -3 | 12 | -1 |
| 13 | -2 | 13 | -4 | 13 | -2 |
| 14 | -3 | 14 | -5 | 14 | -2,5 |
| 15 | -4 | 15 | -6 | 15 | -3 |
| 16 | -5 | 16 | -7 | 16 | -3,5 |
| 17 | -6 | 17 | -8 | 17 | -4 |
| 18 | -7 | 18 | -9 | 18 | -4,5 |
| 19 | -8 | 19 | -10 | 19 | -5 |
| 20 | -9 | 20 | -11 | 20 | -5,5 |
| 21 | -10 | 21 | -12 | 21 | -6 |

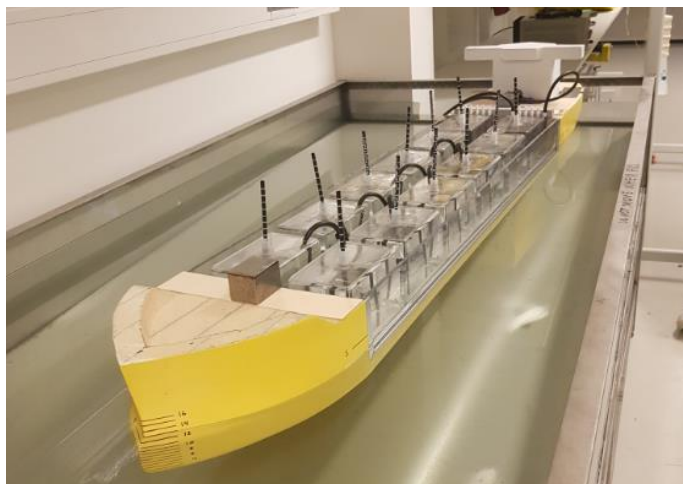
Tabell 2-3: Avstand for hvert steg krengevekter blir flyttet ved de forskjellige forsøkene.

I det første forsøket blir modellen ballastert til normal ballast tilstand. På det originale skipet medfører dette en dypgang på 7,25 m. Dette tilsvarer 48,3 mm på modellen og fører til at modellens vektdeplasement er 18,75 kg.

Det andre forsøket utføres ved å fylle opp tankene halvfulle. Det finnes forskjellige måter å gjennomføre dette forsøket på. Enten kan modellen ballasteres til samme dypgang som i forsøk 1. Dette tilsvarer modellens normale ballasterte dypgang uten last. Deretter fylles tankene halvfulle. En annen mulighet er å fylle tankene halvfulle og deretter beregne hvor mye ballast som trengs for å oppnå ønsket dypgang. I dette forsøket benyttes det første alternativet. Alle tankene fylles til 4 cm, som tilsvarer rundt 560 g med last for hver tank. Ballasten for original skipsdypgang på 10 m blir så beregnet og plassert i

modellen slik at null trim og krenkning oppnås. Modellens dypgang er i dette forsøket 66,7 mm og vektdeplasementet er 26,46 kg. Videre blir forsøket gjennomført på samme måte som ved tomme tanker.

Tredje og siste forsøk blir gjennomført med fullastede tanker. Fulle tanker tilsvarer rundt 1,3 kg med last, og modellen blir så ballastert til original skipsdypgang på 13 m og deretter blir krengeprøven gjennomført på samme måte som før. Ved dette forsøket er modellens dypgang 86,7 mm, noe som fører til vektdeplasement på 35,14 kg. Antall steg som krengevektene blir flyttet varierer noe mellom de ulike forsøkene fordi maks krenkning oppstår ved ulik forflytning av krengevektene. Ved det siste forsøket blir det bestemt å bruke halve steg noen steder for å få mer data til videre arbeid.



Figur 2-20: Krengeprøve nummer 3. Skipet har hatt normal ballasttilstand og deretter fylt tankene til maksimalt nivå.

2.4 Feilkilder

I dette avsnittet gjennomgås mulige feilkilder som kan ha påvirket prosjektet. Noen av feilkildene er av mindre betydning mens andre kan påvirke resultatene i større grad.

Ved tegning av modellen gjøres det enkelte forenklinger av skroget. Hekken forenkles ved å se bort fra akslinger og propeller. I tillegg vil ikke skrogsidene være helt identisk på grunn av rammen til lexanplaten. I løpet av byggingen kan det også oppstå unøyaktigheter, som at det vil være vanskelig å forutse hvor mye de forskjellige lagene med sparkel vil bygge. Tykkelsen på sparkellaget kan også variere. Modellen vil derfor ikke være en eksakt kopi av det virkelige skipet. I tillegg til dette vil vekter

være plassert på en annen måte enn de er på Elisabeth Knutsen. De hydrostatiske tabellene vil derfor ikke være helt korrekte, selv om de skaleres.

For å vite hvor mye last modellen har ombord, er det til enhver tid nødvendig å vite i hvor stor grad hver av tankene er fylt opp. På denne modellen ble det gjort ved å sette et merke for hver centimeter som fylles opp. Dette kan være en feilkilde, fordi det kan være usikkerhet knyttet til hvor nøyaktig avlesningene blir. En måte å unngå denne feilkilden på, kan være å måle vannhøyden med en målestokk. Avlesningene vil på den måten være mer korrekt.

En annen feilkilde er unøyaktige avlesninger av dypgang. Det kan være en feilmargin når fotmerkene tegnes på, men det kan også forekomme avlesningsfeil ved unøyaktige avlesninger. Dette vil være spesielt relevant dersom modellen har krenkning. Grunnet modellens form blir fotmerkene plassert litt lengre bort fra skipets hekk enn det de er i virkeligheten. Ved negativ og positiv trim vil dypgangen i hekken derfor være henholdsvis større og mindre enn det som er modellens virkelige dypgang.



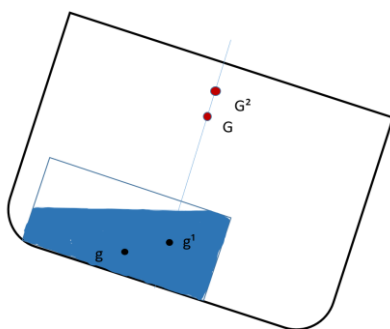
Figur 2-21: Elisabeths Knutsens fotmerker er plassert lengre mot hekken enn på modellen [15].

I dette prosjektet blir det brukt en elektronisk vinkelmåler for å måle modellens krenkning. Denne har lav feilmargin, men det hjelper lite dersom kalibreringen er feil eller unøyaktig. Ved å måle krenkning ved hjelp av pendel og millimeterpapir vil denne feilkilden forsvinne, men til gjengjeld vil det være en mulighet for menneskelig feil ved avlesning. Det er også viktig at modellen får tid til å finne sin likevektsposisjon ved hver av krenkningene. Dette kan være tidkrevende, men dersom modellen ikke ligger i ro kan det ha utslag på resultatene.

Før hvert forsøk ballasteres modellen til ønsket dypgang. Når modellen ballasteres er det viktig at den ikke har positiv eller negativ trim. Dersom modellen har trim under krengeprøven vil det føre til feil i resultatet. Ballasten festes ikke på noen spesiell måte, og det vil derfor være mulig at den flytter seg underveis, noe som kan påvirke resultatene. Sannsynligheten for at dette skal skje er lav, fordi ballasten har liten mulighet til å flytte seg tverrskips og vil ikke flytte seg langs skips med mindre skipet blir påført mye trim.

Å fylle tanker delvis fulle er ingen uvanlig situasjon for et tankskip. Dette kan være lastetanker, men også tanker med drivstoff eller ferskvann. Fri væskeoverflate kan betraktelig redusere et skips stabilitet. Dersom skipet begynner å krenge, flytter væsken seg til det laveste punktet i tanken som vist i Figur 2-22. Væskeforflytningen grunnet krengingen vil tilføre skipet et moment som vil forårsake at krengingen forsterkes. Tyngdepunktet til væsken vil forskyves som vist i Figur 2-22 og i teorien øke det krengende momentet. Siden dette er noe som skjer inne i skipet og ikke er forårsaket av noe utenfra, ser man på dette som en reduksjon av stabilitet. En slik reduksjon i stabilitet regner man som en liten heving av tyngdepunktet [16] [17].

Ved krengeprøver kan det ligge væske igjen i tankene hvor de egentlig skal være helt tomme. Dette kan føre til at fri væskeoverflate påvirker resultatene. Det samme vil gjelde dersom det ligger vann igjen i bunnen av skipet. Fri væskeoverflate kan også påvirke forsøk hvor skipet er fullastet. Dersom ikke tanken lastes 100 % fulle vil det ligge en luftlomme i tankens topp. Dette kan gi forsterket krenkning når luften flytter på seg, og dermed flyttes tankens tyngdepunkt.

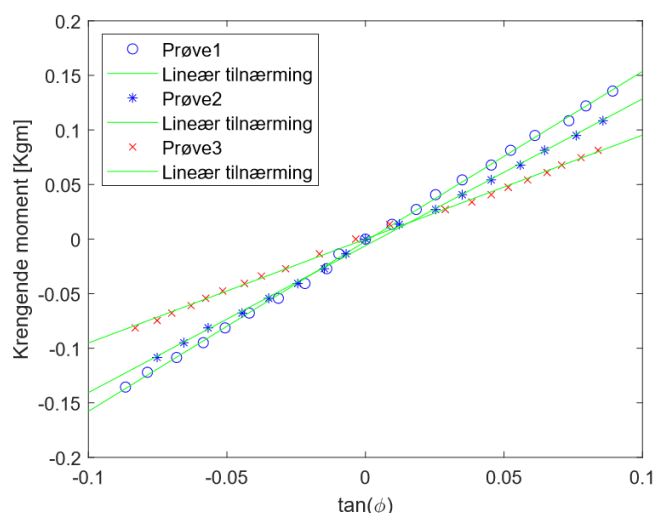


Figur 2-22: Fri væske overflate [18].

3. Resultat

I denne seksjonen presenteres resultatene fra forsøkene. Det presenteres først sammenhengen mellom kregmoment og krengevinkelen. Deretter blir det vertikale tyngdepunktet KG for de tre forsøkene sammenlignet. Oppdriftssenter KB og metasenter KM ved økende dypgang blir også tatt med i sammenligningen.

Ved å gjennomføre krengeprøver ved ulike lasttilstander blir det samlet opp data som brukes videre for å få fram resultater. Oversikt over all data vises i Vedlegg 1. Av dataen blir det tegnet grafer for kreggende moment på y-aksen og tangens av krengevinkel ($\tan(\phi)$) på x-aksen som vist i Figur 3-1. Verdier for styrbord krenkning er de positive verdiene i 1. kvadrant og verdier for babord krenkning er de negative verdiene i 3. kvadrant. Verdiene for de ulike forsøkene er markert med sirkel for forsøk 1, stjerne for forsøk 2 og kryss for forsøk 3.



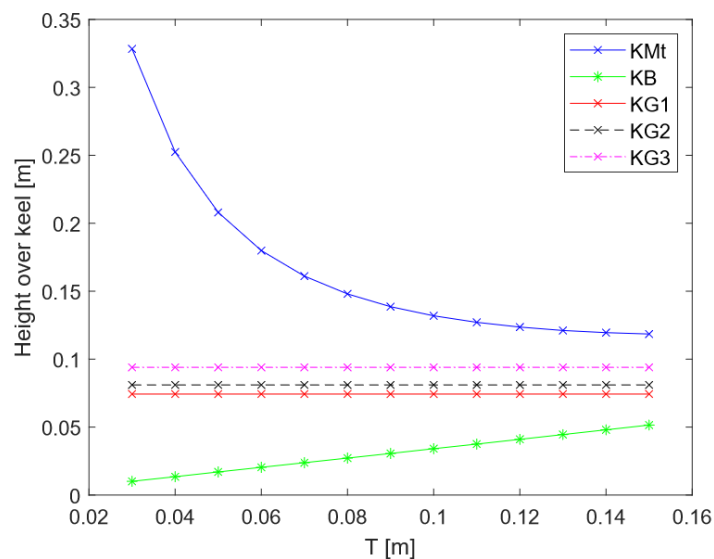
Figur 3-1: Kregmoment og resulterende krengevinkel for alle tre forsøk.

Hovedhensikten ved å gjennomføre krengeprøver er å beregne GM med data fra selve testene og deretter beregne det vertikale tyngdepunktet KG for modellen. For å beregne GM (13) benyttes stigningstallet a . Ut fra grafene i Figur 3-1 blir stigningstallet av de lineære kurvene beregnet og brukt til GM beregningene. Tabell 3-1 viser til stigningstall på 1,557 for forsøk 1, 1,345 for forsøk 2 og 0,952 for forsøk 3. Stigningstallene forteller mye om stabiliteten til skipet da et høyere stigningstall vil gi en høyere GM . I tillegg vil en høyere GM i de fleste tilfeller bety et lavere tyngdepunkt som vil gi bedre stabilitet.

| | Forsøk 1 | Forsøk 2 | Forsøk 3 |
|-------------------|----------|----------|----------|
| Stigningstall (a) | 1,55731 | 1,34537 | 0,95245 |
| GM [m] | 0,08308 | 0,05085 | 0,02710 |
| KG [m] | 0,07432 | 0,08105 | 0,09400 |

Tabell 3-1: Resultater fra krengeprøver

Grafene i Figur 3-2 viser til KMt og KB for modellen ved alle dypganger og i tillegg viser til de ulike KG verdiene for forsøkene. Her sammenlignes de ulike grafene og det observeres en økning av KG for de ulike lasttilfellene. Tyngdepunktet vil altså øke når tankene fylles opp grunnet plassering av masse høyere i modellen. I tillegg viser Figur 3-2 til KMt og KB der KMt synker og KB øker ved høyere dypgang. Dette vil si at metasenteret synker når oppdriftssenteret øker, og henger klart sammen siden metasenteret ligger i skjæringspunktet mellom ny og gammel oppdriftslinje når skipet krenger.



Figur 3-2: Sammenheng mellom KM, KB og KG.

4. Konklusjon

Hovedformålet med denne oppgaven var å lage en forenklet modell av Elisabeth Knutsen som kan brukes av Høgskulen på Vestlandet avdeling Haugesund. Modellen skal brukes i fag som stabilitet og lasteteknikk og blir bygget slik at læringsutbyttet ved bruk av modellen i disse fagene skal være så god som mulig. Modellen inneholder 12 tanker til last. Disse er mulig å tømme og fylle ved hjelp av en pumpe og et slangesystem. Det ble også laget to tanker til statiske forsøk av modeller, en til HVL Haugesund og en til HVL Bergen.

Det ble gjennomført tre krengeprøver med modellen ved forskjellige lasttilfeller. Hensikten med forsøket var å se hvordan det vertikale tyngdepunktet endret seg ved de forskjellige tilfellene. Ut fra resultatene fra de tre forsøkene observeres det at tyngdepunktet flyttes opp desto større andel av tankene som er fylt opp. Ved hjelp av krengevinkelene fra krengeprøven sammen med momentene fra krengevekter som flyttes, ble GM beregnet. GM gir en god indikasjon på modellens stabilitet. De tre forsøkene viser at GM reduseres etter hvert som tankene fylles opp. Redusert GM fører til høyere verdi for KG som vil gi dårligere stabilitet.

5. Referanser

- [1] Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, «ivt.ntnu.no,» [Internett]. Available: <http://www.ivt.ntnu.no/imt/courses/tmr4167/literature/Stillevannsbelastninger.pdf>. [Funnet 13 Mai 2019].
- [2] J. Amdahl, Havromsteknologi - Marine konstruksjoners styrke, Bergen: Fagbokforlaget, 2014.
- [3] MegaFlis, «Oslo oppbevaringsboks transparent 1.2l,» 20 Februar 2019. [Internett]. Available: <https://megafliis.no/oslo-oppbevaringsboks-transparent-1-2-l.html>.
- [4] Biltema, «Vindusspylerpumpe, universal,» 30 April 2019. [Internett]. Available: <https://www.biltema.no/bil---mc/bildeler/viskerutstyr/spylerpumpe/vindusspylerpumpe-universal-2000017965>.
- [5] Biltema, «MC-BATTERI SMF 12V 4AH,» 30 April 2019. [Internett]. Available: <https://www.biltema.no/bil---mc/mc/mc-deler/mc-batterier/mc-batteri-smf-12v-4ah-2000029837>.
- [6] Biltema, «Vippebryter LED,» 30 April 2019. [Internett]. Available: <https://www.biltema.no/bil---mc/elektrisk-anlegg/strombrytere/vippebryter-led-2000022304>.
- [7] Kjell & Company, «Bananplugg 4 mm,» 30 April 2019. [Internett]. Available: <https://www.kjell.com/no/produkter/elektro-og-verktoy/verktoy/maleinstrumenter/malekabler-sonder-kontakter/labkontakt-4-mm/bananplugg-4-mm-bla-p39914>.
- [8] R. Components, «Apem Double Pole Double Throw (DPDT) Toggle Switch, Momentary-Off-Momentary, Panel Mount,» [Internett]. Available: <https://no.rs-online.com/web/p/toggle-switches/1651474/>. [Funnet 13 Mai 2019].
- [9] vvskupp, «Sanipex RIR 12 mm,» 6 Mai 2019. [Internett]. Available: <https://www.vvskupp.no/produkter/r%C3%B8r-og-r%C3%B8rdeler/tappevannsystem/sanipex/r%C3%B8r/sanipex-rir-12-mm-selges-kun-i-hel-kveil-50-m-5111513-p0000005501>.
- [10] Staples, «Sugerør med bøy, 21 cm, sort,» 6 Mai 2019. [Internett]. Available: https://www.staples.no/sugeror-med-boy-sort-210-mm-6-mm-250/cbs/126133.html?Effort_Code=WW&Find_Number=126133&SearchEffort=12&Pro moCode=400600999.
- [11] Astrup, «Sammenligningstabell,» [Internett]. Available: [file:///C:/Users/47412/Downloads/Rustfritt+Sammenligningstabell%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/47412/Downloads/Rustfritt+Sammenligningstabell%20(1).pdf). [Funnet 23 Mai 2019].
- [12] Sjøfartsdirektoratet, «Prosedyre for utførelse av krengeprøver og deplasementsmålinger for norske skip,» 23 September 2013.
- [13] F. Berven og M. Nordøen, «Krengeprøve,» Høgskulen på Vestlandet, Bergen, 2017.
- [14] I. t. t. conferance, «Fresh Water and Seawater Properties,» pp. 16-30, April 2011.

- [15] Marine Traffic, «marinetraffic.com,» 17 Januar 2016. [Internett]. Available: <https://www.marinetraffic.com/no/photos/of/ships/shipid:193627/#forward>. [Funnet 22 Mai 2019].
- [16] S. O. Erikstad, «Effekt av fri væskeoverflate - skipsfart,» 22 April 2019. [Internett]. Available: https://snl.no/Effekt_av_fri_v%C3%A6skeoverflate_-_skipsfart.
- [17] H. Holm, Havromsteknologi - Oppdrift og stabilitet, Bergen: Fagbokforlaget, 2014.
- [18] Marfag, «Google,» [Internett]. Available: https://www.google.com/search?q=fri+v%C3%A6ske+overflate&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwihmNfnK_iAhWiw4sKHQW_C7UQ_AUIDigB&biw=1280&bih=578#imgrc=DqXn7C6bZBOiwM: [Funnet 30 April 2019].
- [19] Astrup, «Astrup Materialkalkulator,» 20 Februar 2019. [Internett]. Available: <https://astrup.no/materialkalkulator>.
- [20] Knutsen OAS Shipping, «Elisabeth Knutsen,» 20 Februar 2019. [Internett]. Available: <https://knutsenoas.com/shipping/shuttle-tankers/elisabeth-knutsen/>.
- [21] MarineTraffic, «Elisabeth Knutsen,» 20 Februar 2019. [Internett]. Available: <https://www.marinetraffic.com/no/ais/details/ships/shipid:193627/imo:9131357/mmsi:235064647/vessel:ELISABETH%20KNUTSEN>.
- [22] Biltema, «Forgreineringsrør for vindusspyler. 2 stk.,» 30 April 2019. [Internett]. Available: <https://www.biltema.no/bil---mc/bildeler/viskerutstyr/vindusspyler/forgreineringsror-for-vindusspyler-2-stk-2000017966>.
- [23] Sjøfartsdirektoratet, «Stabilitetsguide for mindre fartøy,» 30 April 2019. [Internett]. Available: <https://www.yrkesfisker.no/globalassets/publikasjoner/92275-stabilitetsguide.pdf>.
- [24] Marfag, «2. Tverrskipsstabilitet,» [Internett]. Available: <http://www.marfag.no/k12/2-tverrskipsstabilitet>. [Funnet 20 Februar 2019].

Liste over Figurer

| | |
|---|----|
| Figur 1-1: Skipsmodellen under krengeprøve | 12 |
| Figur 2-1: Til venstre vises hvordan modellen blir tegnet i snitt til venstre, og hvordan modellen blir solid ved funksjonen «blend»..... | 13 |
| Figur 2-2: 3D-modell av Elisabeth Knutsen..... | 14 |
| Figur 2-3: Modellen før og etter fresing..... | 14 |
| Figur 2-4: Forsterkning av skrog..... | 15 |
| Figur 2-5: Modellen blir limt sammen og påføres press med gaffateip. Det brukes maskeringsteip under fordi den ikke fester seg like godt som gaffateipen og ødelegger derfor ikke modellen..... | 16 |
| Figur 2-6: Hver tank har fast plass ved hjelp av hjørner som er limt fast. | 17 |
| Figur 2-7: Tank til HVL Bergen og HVL Haugesund | 20 |
| Figur 2-8: Hydrostatisk trykk. Trykket øker med økende dybde. | 21 |
| Figur 2-9: Deformasjon. Deformasjonen er klart størst i bunnplaten til venstre, mens den er størst i lexanplaten til høyre. | 21 |
| Figur 2-10: Deformasjon..... | 21 |
| Figur 2-11: Spenning. De største spenningene opptrer på samme steder i begge tankene..... | 22 |
| Figur 2-12: Spenning..... | 22 |
| Figur 2-13: Deformasjon ved løfting med pallejekk. | 23 |
| Figur 2-14: Spenning ved løfting med pallejekk. | 23 |
| Figur 2-15: CNC-plasmakutter..... | 24 |
| Figur 2-16: Sideplatene limes fast i rammen. Trykk påføres slik at platene ikke beveger seg. | 24 |
| Figur 2-17: Oversikt over pendel ved krengeprøver [12]..... | 26 |
| Figur 2-18: Utledning av GM..... | 29 |
| Figur 2-19: Modellen før krengeprøve..... | 29 |

| | |
|--|----|
| Figur 2-20: Krengeprøve nummer 3. Skipet har hatt normal ballasttilstand og deretter fylt tankene til maksimalt nivå. | 31 |
| Figur 2-21: Elisabeths Knutsens fotmerker er plassert lengre mot hekken enn på modellen [15]. | 32 |
| Figur 2-22: Fri væske overflate [18]. | 33 |
| Figur 3-1: Krenagemoment og resulterende krengevinkel for alle tre forsøk. | 34 |
| Figur 3-2: Sammenheng mellom KM, KB og KG. | 35 |

Liste over Tabeller

| | |
|--|----|
| Tabell 2-1: Oversikt over vekt i tanker ved økende vannmengde. | 19 |
| Tabell 2-2: Original og skalert hydrostatisk parameter. | 27 |
| Tabell 2-3: Avstand for hvert steg krengevekter blir flyttet ved de forskjellige forsøkene. | 30 |
| Tabell 3-1: Resultater fra krengeprøver | 35 |

Vedlegg 1: Resultater av krengeprøver

| Forsøk 1: Ingen last, normal ballast tilstand | | | |
|---|--------------------------|--------------|--------------------|
| Steg | Avstand fra sentrum [cm] | Krengevinkel | Krengemoment [Kgm] |
| 1 | 10 | 5,1 | 0,1356 |
| 2 | 9 | 4,55 | 0,12204 |
| 3 | 8 | 4,2 | 0,10848 |
| 4 | 7 | 3,5 | 0,09492 |
| 5 | 6 | 3 | 0,08136 |
| 6 | 5 | 2,6 | 0,0678 |
| 7 | 4 | 2 | 0,05424 |
| 8 | 3 | 1,45 | 0,04068 |
| 9 | 2 | 1,05 | 0,02712 |
| 10 | 1 | 0,55 | 0,01356 |
| 11 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | -1 | -0,55 | -0,01356 |
| 13 | -2 | -0,8 | -0,02712 |
| 14 | -3 | -1,25 | -0,04068 |
| 15 | -4 | -1,8 | -0,05424 |
| 16 | -5 | -2,4 | -0,0678 |
| 17 | -6 | -2,9 | -0,08136 |
| 18 | -7 | -3,35 | -0,09492 |
| 19 | -8 | -3,9 | -0,10848 |
| 20 | -9 | -4,5 | -0,12204 |
| 21 | -10 | -4,95 | -0,1356 |

Tabell Vedlegg 1-1: Data fra forsøk 1 som blir brukt i videre beregning.

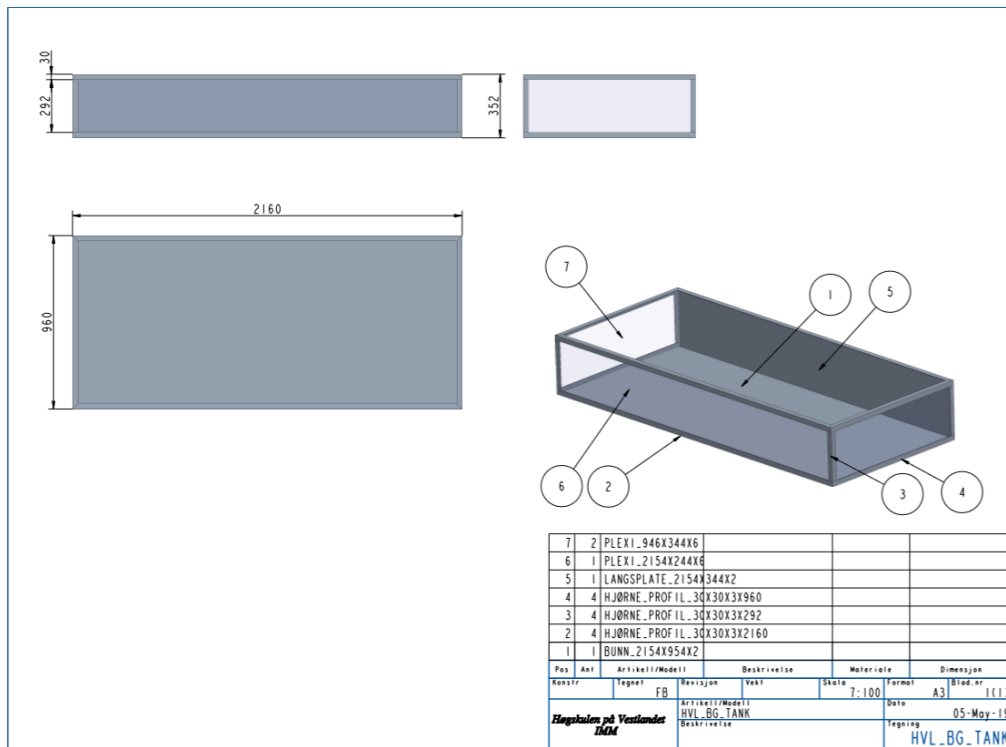
| Forsøk 2: Lastet 4cm i hver tank, normal ballast tilstand | | | |
|---|--------------------------|--------------|--------------------|
| Steg | Avstand fra sentrum [cm] | Krengevinkel | Krengemoment [Kgm] |
| 1 | 8 | 4,9 | 0,10848 |
| 2 | 7 | 4,35 | 0,09492 |
| 3 | 6 | 3,7 | 0,08136 |
| 4 | 5 | 3,2 | 0,0678 |
| 5 | 4 | 2,6 | 0,05424 |
| 6 | 3 | 2 | 0,04068 |
| 7 | 2 | 1,45 | 0,02712 |
| 8 | 1 | 0,7 | 0,01356 |
| 9 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | -1 | -0,4 | -0,01356 |
| 11 | -2 | -0,85 | -0,02712 |
| 12 | -3 | -1,4 | -0,04068 |
| 13 | -4 | -2 | -0,05424 |
| 14 | -5 | -2,55 | -0,0678 |
| 15 | -6 | -3,25 | -0,08136 |
| 16 | -7 | -3,75 | -0,09492 |
| 17 | -8 | -4,3 | -0,10848 |

Tabell Vedlegg 1-2: Data fra forsøk 2 som blir brukt i videre beregning.

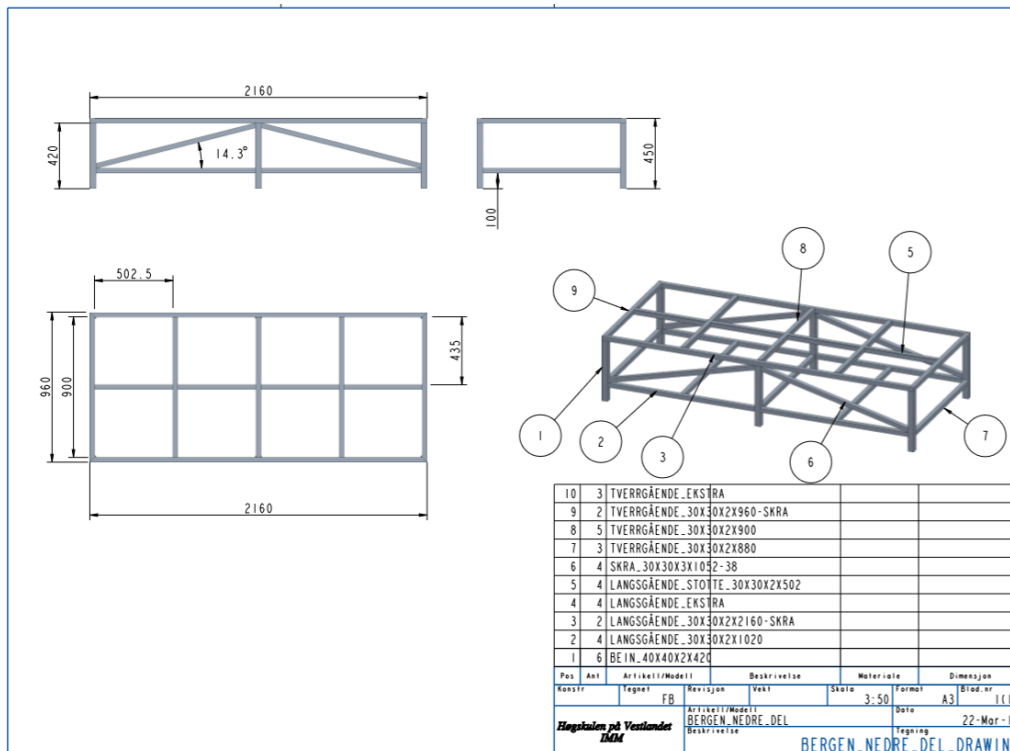
| Forsøk 3: Alle tanker lastet fullt, normal ballast tiltstand | | | |
|--|--------------------------|-------------|-------------------|
| Steg | Avstand fra sentrum [cm] | Krengvinkel | Krengemoment [Nm] |
| 1 | 6 | 4,8 | 0,08136 |
| 2 | 5,5 | 4,45 | 0,07458 |
| 3 | 5 | 4,05 | 0,0678 |
| 4 | 4,5 | 3,75 | 0,06102 |
| 5 | 4 | 3,35 | 0,05424 |
| 6 | 3,5 | 2,95 | 0,04746 |
| 7 | 3 | 2,6 | 0,04068 |
| 8 | 2,5 | 2,2 | 0,0339 |
| 9 | 2 | 1,65 | 0,02712 |
| 10 | 1 | 0,5 | 0,01356 |
| 11 | 0 | -0,2 | 0 |
| 12 | -1 | -0,95 | -0,01356 |
| 13 | -2 | -1,65 | -0,02712 |
| 14 | -2,5 | -2,15 | -0,0339 |
| 15 | -3 | -2,5 | -0,04068 |
| 16 | -3,5 | -2,95 | -0,04746 |
| 17 | -4 | -3,3 | -0,05424 |
| 18 | -4,5 | -3,6 | -0,06102 |
| 19 | -5 | -4 | -0,0678 |
| 20 | -5,5 | -4,3 | -0,07458 |
| 21 | -6 | -4,75 | -0,08136 |

Tabell Vedlegg 1-3: Data fra forsøk 3 som blir brukt i videre beregning.

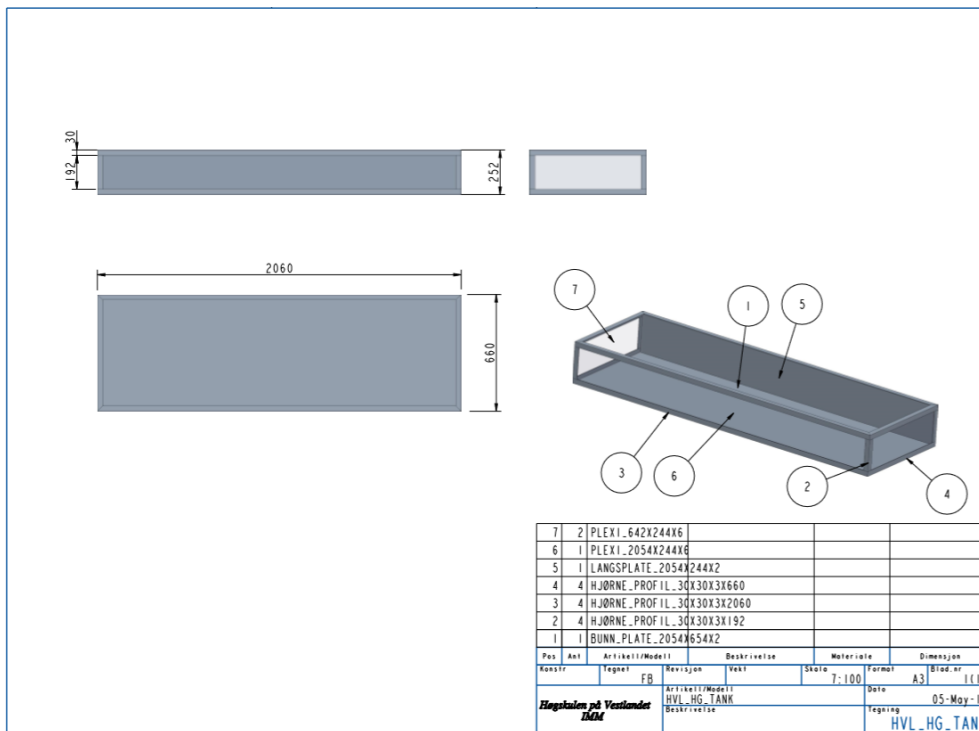
Vedlegg 2: Arbeidstegninger av tanker



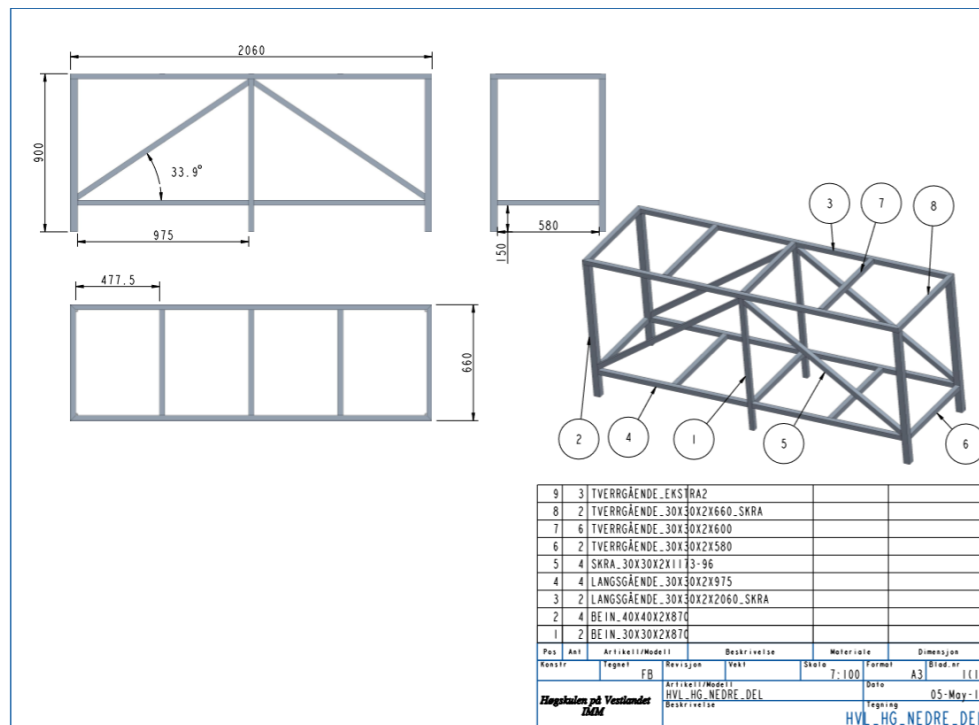
Figur Vedlegg 2-1: Arbeidstegning for øvre del av tank til HVL Bergen.



Figur Vedlegg 2-2: Arbeidstegning for nedre del av tank til HVL Bergen.



Figur Vedlegg 2-3: Arbeidstegning for øvre del av tank til HVL Haugesund.



Figur Vedlegg 2-4: Arbeidstegning for nedre del av tank til HVL Haugesund.

Vedlegg 3: Dypgangsdata

| Dypgang | | | | | |
|---------------|-------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------------|
| Original [mm] | Modell [mm] | Volumdeplasement [mm ³] | Volumdeplasement [m ³] | Tetthet [kg/m ³] | Vektdeplasement [kg] |
| 1000 | 6,7 | 2352942 | 0,002 | 998,599 | 2,350 |
| 2000 | 13,3 | 4860794 | 0,005 | 998,599 | 4,854 |
| 3000 | 20,0 | 7432646 | 0,007 | 998,599 | 7,422 |
| 4000 | 26,7 | 10048662 | 0,010 | 998,599 | 10,035 |
| 5000 | 33,3 | 12701169 | 0,013 | 998,599 | 12,683 |
| 6000 | 40,0 | 15387730 | 0,015 | 998,599 | 15,366 |
| 7000 | 46,7 | 18109028 | 0,018 | 998,599 | 18,084 |
| 8000 | 53,3 | 20866379 | 0,021 | 998,599 | 20,837 |
| 9000 | 60,0 | 23661363 | 0,024 | 998,599 | 23,628 |
| 10000 | 66,7 | 26495698 | 0,026 | 998,599 | 26,459 |
| 11000 | 73,3 | 29369919 | 0,029 | 998,599 | 29,329 |
| 12000 | 80,0 | 32272259 | 0,032 | 998,599 | 32,227 |
| 13000 | 86,7 | 35192477 | 0,035 | 998,599 | 35,143 |
| 14000 | 93,3 | 38132222 | 0,038 | 998,599 | 38,079 |
| 15000 | 100,0 | 41086842 | 0,041 | 998,599 | 41,029 |
| 16000 | 106,7 | 44052617 | 0,044 | 998,599 | 43,991 |

Tabell Vedlegg 3-1: Oversikt over vekt- og volumdeplasement ved forskjellige dypganger.

