



KONSEPTBESKRIVELSE

FOR

MASFJORDEN FLYTEBRO

Dok. nr.: 369009-RE-100-Z-LMG-00002

Revisjon: 02

Bergen 30.11.2016

Klient : STATENS VEGVESEN
Nøkkelperson : ASBJØRN VALEN
Tittel : KONSEPTBESKRIVELSE
Prosjektnavn : MASFJORDEN FLYTEBRO
Prosjektnummer : 369009
Internt dokumentnummer : 369009-RE-100-Z-LMG-00002
Ekstern distribusjon : SVV, VEGDIREKTORATET, SMIAS
Gradering : FORTROLIG

THE DOCUMENT IS LMG MARIN'S PROPERTY AND SHALL NOT BE DISTRIBUTED AS A WHOLE OR IN PARTS TO ANY OTHER THAN THOSE EXPLICITLY IDENTIFIED FOR EXTERNAL DISTRIBUTION ABOVE. EXCEPTIONS CAN ONLY BE MADE WITH PRIOR WRITTEN PERMISSION FROM LMG Marin AS

02	30.11.2016	CPED	GLK	TB	Utgitt for kommentarer
01	02.11.2016	CPED	GLK	TB	Utgitt for kommentarer
Revisjon	Dato	Forfatter	Verifisert	Godkjent	Kommentarer

OPPDATERINGER I REVISJON 2

Kapittel	Endringer/oppdateringer fra revisjon 1
2. Sammendrag	Skrevet om og oppdatert
3. Konseptbeskrivelse	
3.10	Tverrfall endret
3.12	Vippebro oppdatert med fler detaljer
3.15	Bolteforbindelser oppdatert med fler detaljer
3.18	Sammenstilling av brosegmenter oppdatert med fler detaljer
5. Metodikk	
5.14	Oppdatert tverrsnittsdata for brobjelken
7. Lastvirkninger	Hele kapittelet er skrevet om og tar hensyn til: <ul style="list-style-type: none"> - Oppdatert egenvekt og stivhet av brobjelke - Ny beregning av temperaturlaster - Korrigert ulykkeslast
8. Lastkombinasjoner og spenningsfordeling	Nytt kapittel er inkludert for å beskrive spenningsfordeling ved ulike lastkombineringer, samt dimensjonerende krefter for ulike snitt
9. Kritiske komponenter og snitt	Tilsvarende kapittel 8 i revisjon 01
9.1-4	Oppdatert for nye laster
9.5	Beregninger av oppløft fra relativ torsjon VS elastisk deformasjon inkludert
10. Sensiviteter	Tilsvarende kapittel 9 i revisjon 01
10.1	Vurdering av vannstandsstigning oppdatert
10.4	Alternativ vindmodellering inkludert for å verifisere størrelsesorden på vertikale bøyemoment
Vedlegg C	Oppdatert for nye laster
Vedlegg D	Oppdatert med nytt design
Vedlegg E	Oppdatert for nye laster
Vedlegg F	Oppdatert for nye laster
Vedlegg G	Nytt vedlegg med temperaturlaster

RELEVANTE OPPDATERTE TEGNINGER

Tittel	Nr	Revisjon
Masfjorden Floating Curved Bridge	369009-DW-101-C-LMG-00001	03
Principle Sketch Bascule Bridge	369009-DW-201-N-LMG-00006	01
Principle Sketch Flange Connection	369009-DW-201-N-LMG-00008	03
Seilingsløp - Pongtong og bjelke	K120	02

INNEHOLDSFORTEGNELSE

1. FORORD -----	1
1.1 BEMERKNINGER	1
2. SAMMENDRAG -----	2
3. KONSEPTBESKRIVELSE -----	4
3.1 INNLEDNING – BAKGRUNN	4
3.2 HOVEDDATA	5
3.3 RADIUS	5
3.4 BROSPENN OG ANTALL PONGTONGER.....	5
3.5 BROBJELKE	6
3.5.1 <i>GENERELT TVERRSNITT</i>	6
3.5.2 <i>VED OPPLAGRE FLYTERE, SKIPSPASSASJE OG LANDFESTER</i>	7
3.5.3 <i>VED BOLTEFORBINDELSER</i>	7
3.6 OPPLAGRE.....	8
3.7 PONGTONGER.....	8
3.8 LANDFESTER	8
3.9 VEIBANE	9
3.10 AVRENNING.....	9
3.11 SKIPSPASSASJE	9
3.12 VIPPEBRO.....	10
3.13 FUGER	12
3.14 FENDERE	12
3.15 BOLTEFORBINDELSER.....	13
3.16 UTRUSTNING	15
3.16.1 <i>LYS OG VARSLING</i>	15
3.16.2 <i>BALLAST</i>	15
3.16.3 <i>LENSING OG DRENERING</i>	15
3.16.4 <i>REKKVERK</i>	15
3.16.5 <i>STRØMTILFØRSEL OG ELEKTRISKE FORBRUKERE</i>	15
3.17 MATERIALER OG OVERFLATEBEHANDLING.....	15
3.18 FABRIKASJON OG SAMMENSTILLING	16
3.18.1 <i>INSTALLASJON</i>	16
3.18.2 <i>SAMMENKOBLING AV BROSEGMENTENE</i>	17
3.19 FORVALTNING, DRIFT OG VEDLIKEHOLD	19
3.19.1 <i>PONGTONGER</i>	19
3.19.2 <i>SKIPSPASSASJE</i>	20
3.19.3 <i>BOLTEFORBINDELSER</i>	20
3.19.4 <i>LANDFESTER</i>	20

4. REGELVERK	21
4.1 AVVIK	21
5. METODIKK	22
5.1 MODELL	22
5.2 METODE	22
5.3 NATUR	22
5.4 BROBJELKE	24
5.5 MERKNADER	24
6. EGENFREKVENSER	25
6.1.1 HIV	25
6.1.2 SVAI	26
7. LASTVIRKNINGER	27
7.1 EGENVEKT	27
7.2 TRAFIKKLASTER	28
7.3 NATURLASTER	29
7.4 TEMPERATURLASTER	31
7.5 ULYKKESLASTER	32
7.5.1 GLOBAL KAPASITET VED SKIPSSTØT	33
7.5.2 FYLLING AV TO SEKSJONER I SKIPSPASSASJEN	35
7.5.3 FYLLING AV TO SEKSJONER I PONGTONG	36
8. LASTKOMBINASJONER OG SPENNINGSFORDELING	38
9. KRITISKE KOMPONENTER OG SNITT	40
9.1 OPPLAGER PONGTONG	40
9.2 OPPLAGER SKIPSPASSASJE	41
9.3 SKIPSPASSASJE	42
9.4 BOLTEFORBINDELSER	44
9.5 VIPPEBRO	45
10. SENSITIVITETER	47
10.1 VANNSTANDSSTIGNING	47
10.2 VIND- OG BØLGERETNING	47
10.2.1 45, 60, 75 OG 90 GRADER	48
10.2.2 270 GRADER	49
10.3 USYMMETRISK STRØMLAST	49
10.4 ALTERNATIV VINDMODELERING	50

11. REFERANSER	52
VEDLEGG A: SAMMENSTILLING, ALTERNATIV 1	53
VEDLEGG B: SAMMENSTILLING, ALTERNATIV 2	56
VEDLEGG C: KAPASITET BOLTER	58
VEDLEGG D: VIPPEBRO	59
VEDLEGG E: OPPLAGERKREFTER	60
VEDLEGG F: KAPASITETSKONTROLL SKIPSPASSASJE	61
VEDLEGG G: TEMPERATURLASTER	62

1. FORORD

I denne rapporten presenteres konseptbeskrivelse av flytebro med midtfjords skipspassasje for krysningen Masfjordnes – Duesundøyna i Masfjorden kommune.

Rapporten bør sees i sammenheng med tegning 369009-DW-101-C-LMG-00001 *Masfjorden Floating Curved Bridge*, revisjon 3.

Hensikten er å vise med tilstrekkelig sikkerhet at konseptet er *prinsipielt løsbart*, og detaljnivået er derfor valgt deretter. Elementer som består av kjent teknologi, eller som ikke ansees som kritisk for konseptets levedyktighet, vil ikke bli beskrevet nærmere.

1.1 BEMERKNINGER

- Dynamiske analyser er utført i tidsplanet med bølger og vind påsatt som uavhengige tidsserier generert fra spektre beskrevet ved hver av komponentenes 100 års returverdier. Disse er videre koblet med 100 års returverdi for strøm. Bølgene ved denne krysningen er bare vindgenererte, og det kan derfor antas høy korrelasjon mellom bølgehøyde og vindhastighet. Strøm derimot har også en betydelig tidevannskomponent, slik at det må sees på konservativt at 100 års verdier for samtlige komponenter kobles i samme analyse.
- Broen er kun modellert med én opplagerakse midt på hver flyter, mens det er i virkeligheten er to – en i hver ytterkant av den aktuelle flyteren. Bøyemoment er som kjent proporsjonalt med spennlengde i annen, slik at resultatene kan antas å være betydelig overestimert. Vi har tillatt dette med hensikt for å regne konservativt.
- Dynamiske maksimalverdier er presentert som grensekurver for én 3 timers analyse, som beskrevet over. Ved videre arbeid bør flere slike analyser kjøres, slik det kan dannes ekstremverdifordelinger for hver respons hvor forventningsverdier kan avledes. Denne jobben har på dette stadiet vært ansett som for omfattende.

2. SAMMENDRAG

Broen vil bestå av en kontinuerlig brobjelke utformet i en bue vendt inn i fjorden. I hver ende er broen horisontalt fast innspent, med mulighet for fri rotasjon om transvers akse for å tillate tidevannsvariasjon. Broen er videre vertikalt opprettholdt av seks pongtonger, tre på hver side av skipspassasjen, plassert med ca 87 meters mellomrom. Pongtongene er tilvirket i stål, med seksjonsinndeling for å tillate fylling av inntil 2 seksjoner. Skipspassasjen består av en u-formet konstruksjon hvor de globale lastene går under vann. En vippebro plasseres i kjørebanelen for å tillate trafikk, samt åpning ved passering av skip. Skipspassasjen tilvirknes i armert betong, mens vippebroen tilvirknes i stål med motvekt i betong og hydrauliske sylindere for åpning. Relevante krav fra Statens Vegvesens Håndbok N400 *Bruprosjektering* vil være gjeldene.

I hovedsak er programvarene Simo og Reflex benyttet til modellering og analyse av broen. Ved å kjøre disse programmene sammen er det mulig å kjøre koblete analyser. En koblet analyse vil si at flyternes bevegelser og de dynamiske lastene i bjelkene beregnes samtidig, slik at full interaksjon mellom flyternes bevegelser og bjelkenes stivheter oppnås. Analysene kjøres videre i tidsplanet for å få med full interaksjon mellom de ulike miljøkreftene – strøm, bølger og vind.

Resultat fra egenfrekvensanalyse viser at egensvingeperioden i hiv (ca 6 sekund) ligger over perioder som kan forventes for bølger generert av vind over de aktuelle strøklengdene.

Statiske analyser er basert på påsatte strømlaster, egenvekt og trafikklast, og viser at horisontalt bøyemoment er den kritiske kraftkomponenten. Maksimal horisontal bøyemoment langs brobjelken med/uten trafikklast er 93/70 MNm. Temperatur gir maks moment på 28/124 MNm om svak/sterk akse.

Dynamiske analyser er basert på 3 timers stormkondisjoner med 100 års returverdier for vind og bølger. Egenvekt er inkludert. Maksimal bøyemoment langs brobjelken er 104/58 MNm om svak/sterk akse.

Ulykkestilfeller er vurdert ved vurdering av global kapasitet mot skipsstøt og respons ved fylling av to seksjoner i pongtong eller skipspassasje. Skipstøt er basert på kollisjonsenergi beregnet av DNV GL utfra størrrelser på skip som trafikkerer området, samt forventet hastighet. Ved skipskollisjon oppstår aksialkraft i brobjelken på 26 MN, samt bøyemoment om sterk akse på 328 MNm. Skadde flytere gir et noe annerledes kraftbilde for brosegmentene i direkte tilknytting til den aktuelle flyteren, mens globale maksima ikke ser ut til å forandre seg nevneverdig.

Lastkombinering gir lokal topp på 378 MPa ved skipspassasje. Spenningen er resultat av koblet maksverdier for aksialkraft og bøyemoment om begge akser, og ansees som konservativt, da det er uten hensyn til samtidighet/sammenfall i tid. Kritiske snitt og komponenter er vurdert basert på kombinerte maksimale statiske og dynamiske krefter, dvs. fra lastifelle LC04 – Ulykke.

Effekt av vannstandsstigning, hovedretning av naturlaster, samt usymmetrisk strømprofil (langs brolengden) er vurdert. Vannstandsstigning vil gi økt bøyemoment i brobjelken over første pongtong fra land på ca 39 MNm. Endring av hovedretning for naturlast vil påvirke kreftene noe, men lite i størrelsesorden på maksimalverdier. Konstant strømhastighet lang hele lengden viser seg å gi høyest aksialspenninger. Alternativ vindmodellering er også inkludert for å verifisere størrelsesorden på vertikale bøyemoment

Konklusjonen er at laster som oppstår er innenfor forventet kapasitet, og at konseptet er gjennomførbart.

3. KONSEPTBESKRIVELSE

3.1 INNLEDNING – BAKGRUNN

Flytebruen som i denne rapporten er foreslått for Masfjorden henter viktige erfaringer fra den vellykkede driften av Nordhordlandsbruen nord for Bergen. Denne har en flytelengde på ca 1 km og har vært i kontinuerlig drift siden åpningen i 1994. Denne har en horisontal brubjelke utformet som en lukket struktur-boks.

Det har i langt tid vært et ønske om å kunne øke lengden på flytebruer og samtidig tilby skipspassasje gjennom flytebruen. For denne mulighetsstudien er LMG Marins patentsøkte skipspassasje utredet med tanke på anvendelse for Masfjorden-sambandet. Videre er en bolteflensløsning utredet for å utnytte muligheten for prefabrikasjon av moduler og rask sammenstilling på stedet.

Det generelle prinsipp som flytebru baseres på er at det konstrueres en kontinuerlig styrkeboks i form av brubjelke som holdes flytende av jevnt fordelte flytelegemer (eller pongtonger).

Videre er det funnet gunstig at flytebrua arrangeres i en stabiliserende bue hvor den orienteres slik at de største miljølastene virker inn i buen.

Midtjords skal det være en flytende skipspassaseløsning for at skipstrafikken i området skal gå tilnærmet uhindret. Skipspassasjen vil ha en U-form hvor global kapasitet opprettholdes av undervannsdelen. I veibanen vil det være en klaffebro som heves ved behov.

3.2 HOVEDDATA

Hoveddata	
Lengde kryssning, tilnærmet (korteste basert på rettlinje mellom landkar)	709 m
Lengde bro, tilnærmet (langs kurve)	733 m
Antall pongtonger	6
Lengde frie spenn	87 m
Plassering skipspassasje	Midtfjords
Lengde seilingsled	25 m
Dybde seilingsled	10 m

Tabell 3-1: Hoveddata flytebro

Se tegning 369009-DW-101-C-LMG-00001 *Masfjorden Floating Curved Bridge* for detaljer.

3.3 RADIUS

Radius for broen er satt til 800 meter. En slik radius:

- Ivaretar effekt av å overføre miljølaste som strekk/trykk i brobjelken
- Gir liten offsett av kontinuerlig kurvatur i veibanen ved bruk av prefabrikkerte seksjoner (se 3.4)
- Godt tilpasset kurvatur av eksisterende vei og geografi

3.4 BROSPENN OG ANTALL PONGTONGER

Midtfjords skipspassasje og ønske om symmetri gir alternative spennlengder på 69, 87, 116 eller 174 meter avhengig av antall pongtonger, henholdsvis 4, 3, 2 eller 1 per side.

Fordelen med lavere spennlengder er at behovet for stivhet, og dermed stål, i brobjelken reduseres, mens ulempen er at mengden pongtonger øker. Samtidig vil størrelsen på pongtongene kunne reduseres.

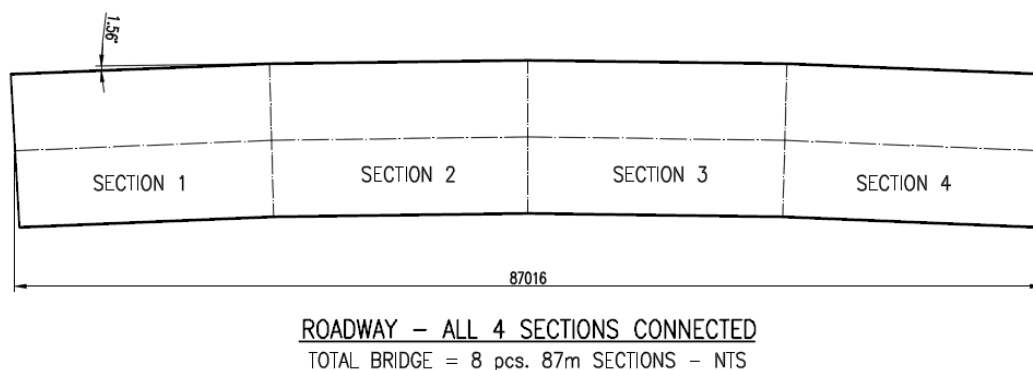
Norhordalandsbroen har en spennlengde på 113 meter og en høyde på brokassen på 5 meter, som gir et lengde/høyde- forhold på ca 22.

Krav til veistandard åpner for muligheten til å gjøre tverrsnittet en del mindre enn for Norhordalandsbroen. Ved å bruke tverrsnittshøyde på 4 meter og spenn på 87 meter, oppnås omtrentlig samme lengde/høyde- forhold. Dermed blir det totalt seks pongtonger, tre på hver side av skipspassasjen.

3.5 BROBJELKE

Brubjelken tar opp globale horisontalkrefter hvor de vertikale sidene vil absorbere trykk/strekk fra vertikale bøyemoment, og hvor horisontale sider vil absorbere skjærkrefter. Brobjelken absorberer også horisontale bøyemomenter og skjærkrefter over spennet mellom pongtonger fra egenvekt og trafikklast.

Brobjelken prefabrikeres i segmenter på ca 87 meter, sammensatt av fire seksjoner som vist i Figur 3-1, med bolteflens i hver ende. Dermed oppnår man global kurvatur av brobjelken, men forenkler pre-fabrikkering til rette seksjoner som sveises sammen.

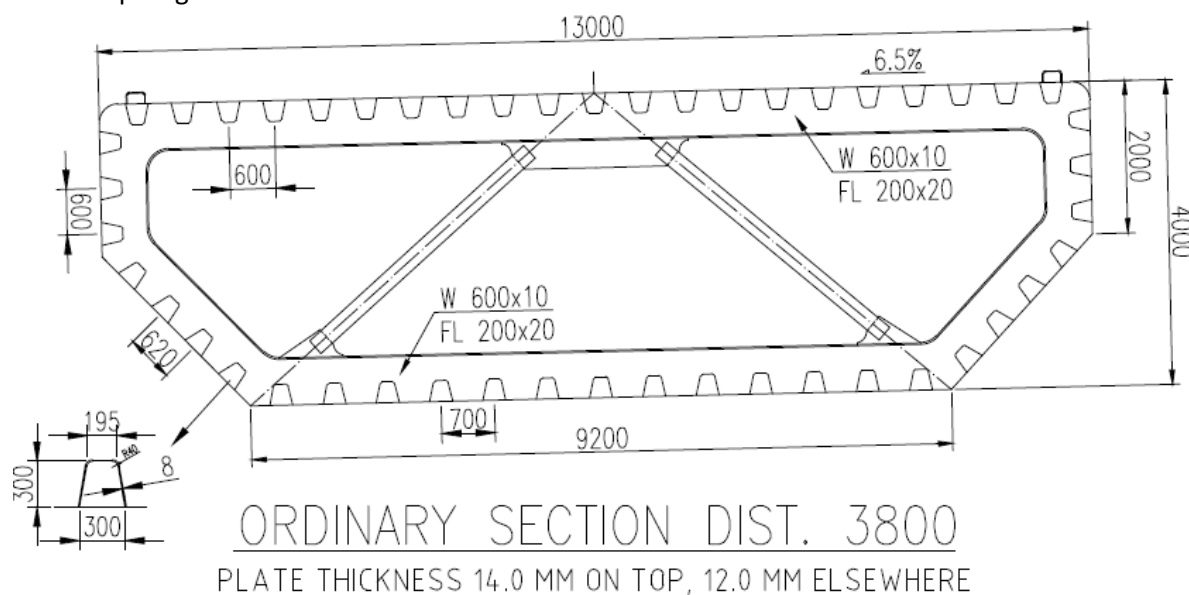


Figur 3-1: Brosegment

Under sammenstilling boltes brosegmentene sammen slik beskrevet i 2.12.

3.5.1 GENERELT TVERRSNITT

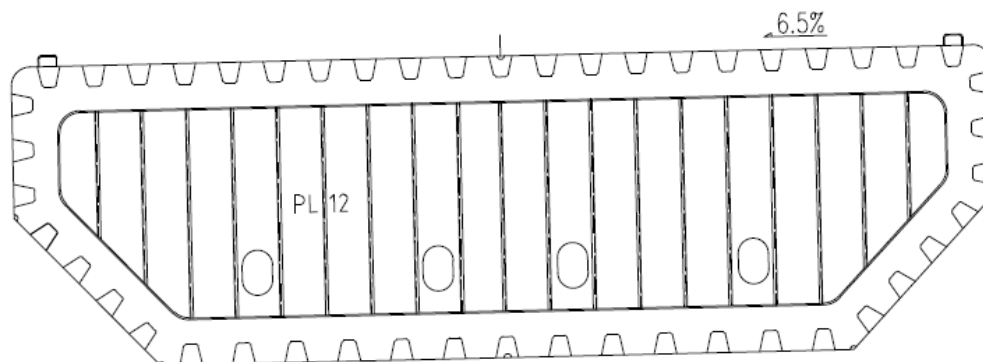
Brokassen er et lukket tverrsnitt med ytre dimensjoner 13x4 meter. Langsgående avstivet med trapesprofiler som er delvis innfestet i tverr-rammer hver 3.8. meter. Under veibanen er det ingen sveis mellom bunn av trapesprofil og tverr-ramme. Dette er for å unngå utmattningsproblemer fra lokale bøyemomenter skapt av trafikk. Brokassen har videre skråstag for rotasjonsavstivning. Dimensjoner som vist på Figur 3-2.



Figur 3-2: Ordinært tverrsnitt

3.5.2 VED OPPLAGRE FLYTERE, SKIPSPASSASJE OG LANDFESTER

Ved opplagre stives brokassen ytterligere opp med mer i stål i tverrammen, i form av vertikalt avstivet 12 mm plater. Dimensjoner for øvrig uendret fra det ordinære tverrsnittet. Ytterligere lokal avstivning for og effektivt å fordele opplagerkrefter kan detaljeres ved dimensjonering senere.

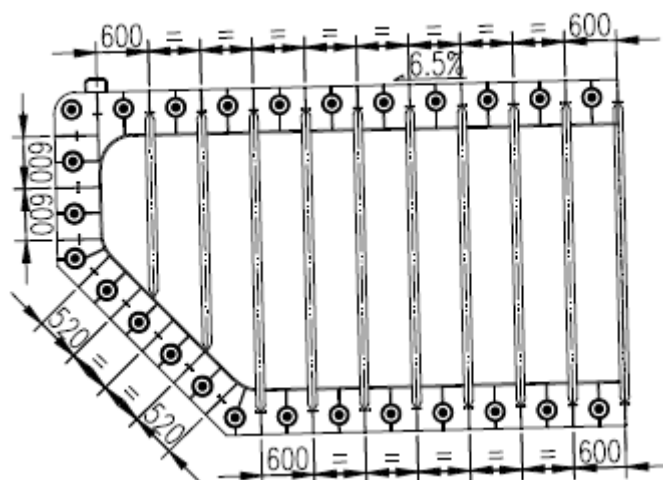


TYPICAL TRANSVERSE SECTION ABOVE PONTOON

Figur 3-3: Tverrsnitt ved opplagre

3.5.3 VED BOLTEFORBINDELSER

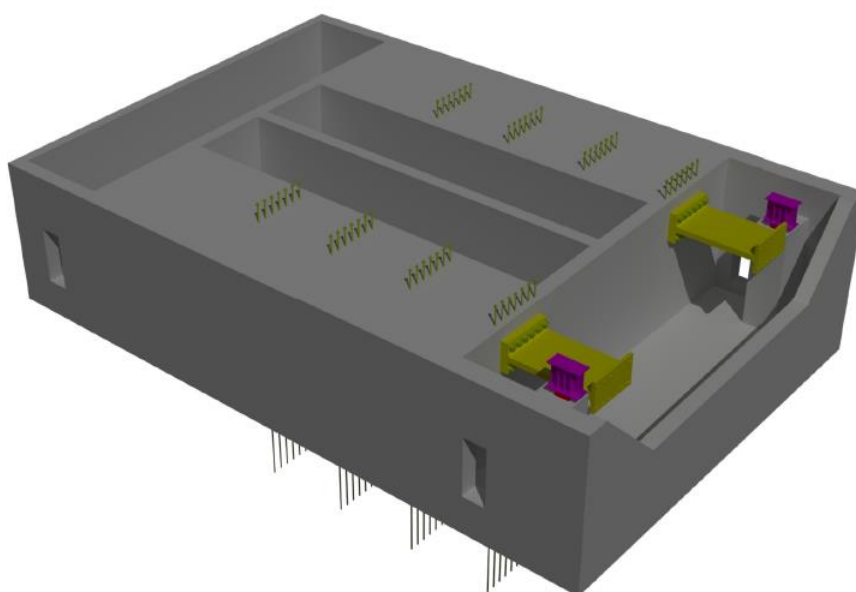
Tverrsnitt med boltehylder og tilpasset lokal avstivning plasseres i endene av hvert brosegment som vist i Figur 3-4. Se 3.14 for detaljer rundt boltene.



Figur 3-4: Tverrsnitt bolteforbindelser

Landkar utformes som tradisjonelle kasselandskar fundamentert direkte på berg. Det er synlig berg i dagen ved begge landfester. Landkarene blir utformet med adkomst og inspeksjonsrom for brolager og fuger. Prinsippet i løsningen er tilsvarende som for Nordhordlandsbrua, se Figur 3-6, da erfaringene herfra er positive.

Brobjelken holdes fast mot landfestene med smidde fleksible platestag som overfører bøyemoment om vertikal akse, samt aksial- og skjærkrefter. Platestagene er fleksible om horisontal transvers akse (normalt på brobjelken), som dermed gir rotasjonsfrihet for å tillate tidevannsendringer. Vertikal skjærkraft og torsjon tas opp av separate lagre i neopen.



Figur 3-6: Prinsippkisse landkar

3.9 VEIBANE

Veibanen bygges rett på brokassen i hovedsegmentene av flytebro på tilsvarende vis som Norhordalandsbroen.

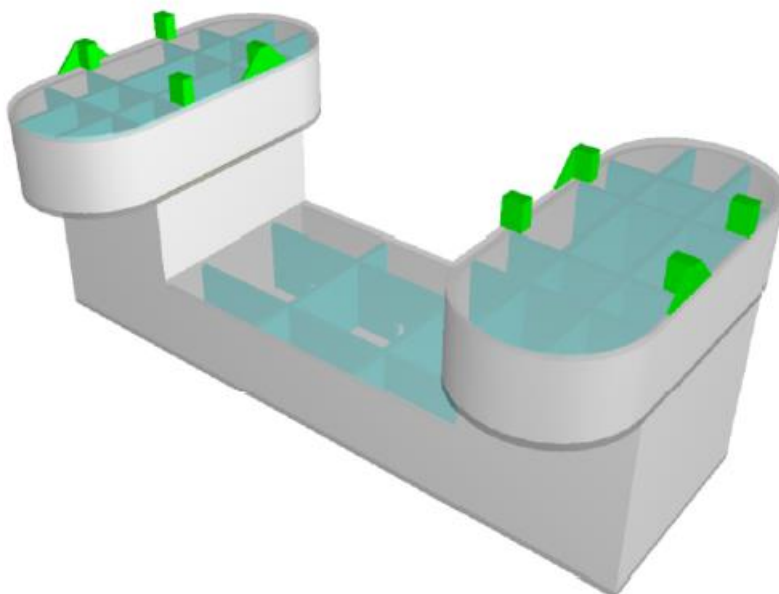
3.10 AVRENNING

For avrenning på tvers av kjørebane tiltes brotverrsnittet 6.5 % på tilsvarende vis som Norhordalandsbroen.

3.11 SKIPSPASSASJE

Den foreslåtte skipspassaseløsningen har en ubegrenset seilingshøyde, en seilingsdybde på 10 meter og en fri bredde på 25 meter. Som for resten av broen arrangeres bredde for 2 kjørefelt samt gang og sykkelsti.

Løsningen er utformet slik at kraftgangen i de globale belastningene følger konstruksjonen horisontalt frem til skipspassasje og deretter under vann. Skipspassasjen konstrueres i sin helhet i som et lukket volum i armert betong.



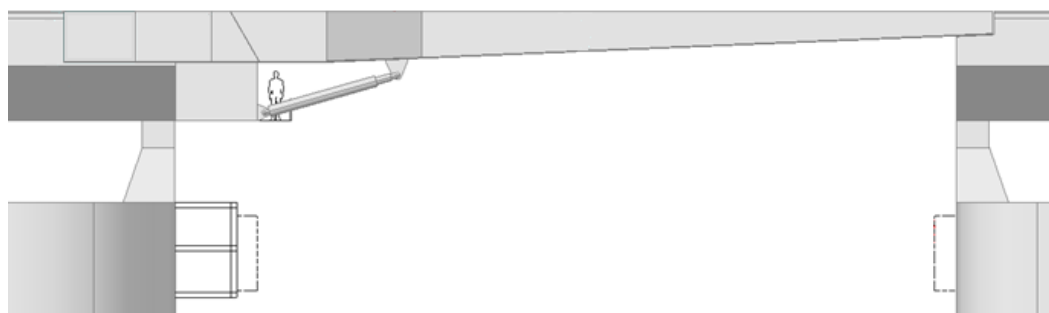
Figur 3-7: Skipspassasje

I horisontalplanet er flytebroen arrangert i en bue, mens selve skipspassasje vil være rett. En rett skipspassasje er fordelaktig rent byggeteknisk i tillegg til at en unngår usymmetriske krenagemoment relatert til oppdriftskrefter.

For å sikre tilstrekkelig oppdrift og stabilitet mot krenkning brukes tilsvarende vannlinjeareal og skottinndeling som for pongtongene for hver ende av skipspassasjen.

3.12 VIPPEBRO

Klaffebruene er utformet etter samme prinsipper som den mekaniske anordningen for baugvisiret på de største fergene, men hvor en i tillegg legger inn motvekt for å redusere behovet for hydraulisk løftekraft. Fergene er mer fleksible og utsatt for mer dynamikk enn skipspassasjen. Skipspassasjen er utformet i betong med vesentlig høyere deplasement enn fergene og et totalt dyppgående på nær 15 meter.



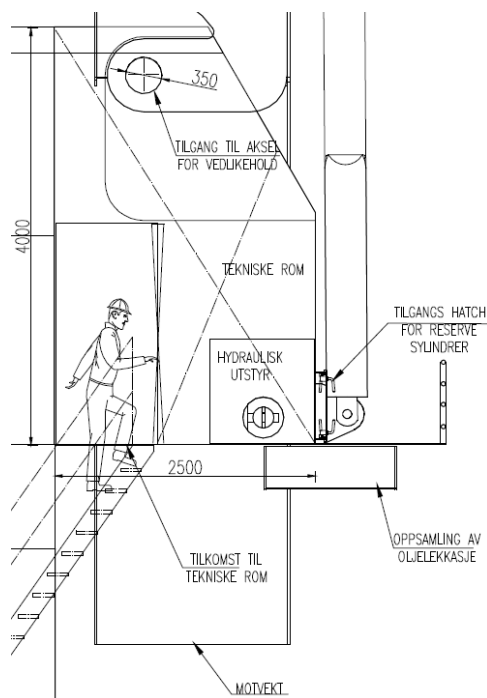
Figur 3-8: Vippebro - profil

I utformingen av klaffebroen har en tatt hensyn til erfaringer fra design av løfteanordninger for baugvisir for store ferger og vi har i tillegg hatt nær kontakt med leverandører av store vinsjer og tilhørende hydrauliske systemer, spesielt fra offshore-sektoren, der høy pålitelighet, driftssikkerhet og vedlikeholdsvennlighet er grunnleggende krav. (En av de norske leverandørene har p.t. leveranse verdens største vinsjer for offshore kranlektene med en kapasitet på 20.000 tonn offshore kranløft...)

Løfteanordningene for baugvisiret for fergene har vist seg svært pålitelige med stor driftsbelastning per år. Hver av de store, mer tradisjonelle fergene for f.eks. Halhjem – Sandvikvåg har 15 turer per dag, med tilsvarende antall heving/senkning av baugvisiret. Med 340 operasjonsdager i året blir dette ca 5.000 bevegelser av operasjonelle bevegelser per år. En klaffebru for Masfjorden vil ha et antall operasjonelle bevegelser på 20-100 per år. Vi anser derfor at erfaringer fra design av løfteanordninger for baugvisir på ferger med fordel kan anvendes for klaffebru.

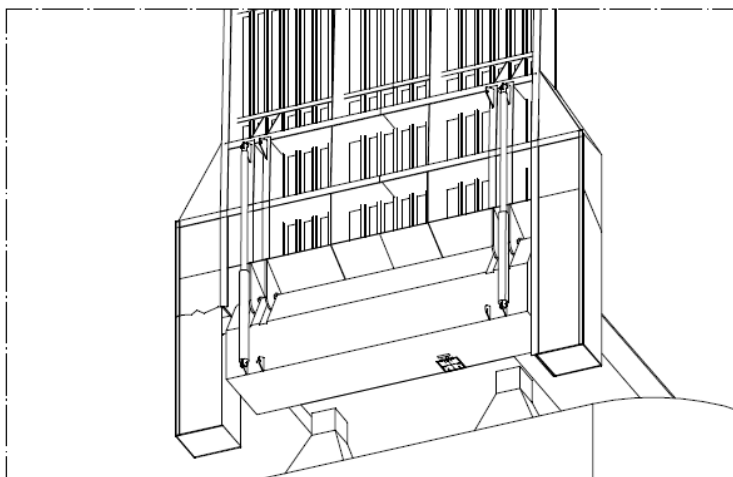
Utifra tegning 369009-DW-201-N-LMG-00006, revisjon 2, så vil en se noen av prinsippene for klaffebru:

- Skipspassasjeflyteren i betong understøtter klaffebru, og er utformet slik at den gir minimal dynamisk respons under drift, selv under de mest ekstreme lastkondisjonene. En forutsetning for denne konstruksjonen er at relative bevegelser tas som elastisk tøyning i vippebru. Dette er realistisk da de er resultat av tøyning i skipspassasjen undervannsdelen, som er en konstruksjon med mye høyere stivhet. Se 9.5 for mer detaljer.
- Klaffebru er en integrert del av brobjelken, med et eget skjermet mekanisk/maskinrom, der klaffebru er hengt opp utenfor de belastede områdene hvor brobjelken understøttes av skipspassasjeflyteren.
- Bevegelige deler i forbindelse med akslingen befinner seg i innelukket rom, med lett adgang for vedlikehold, utskifting og reparasjon, - tilsvarende prinsipper som brukes på maskinrom på skip.



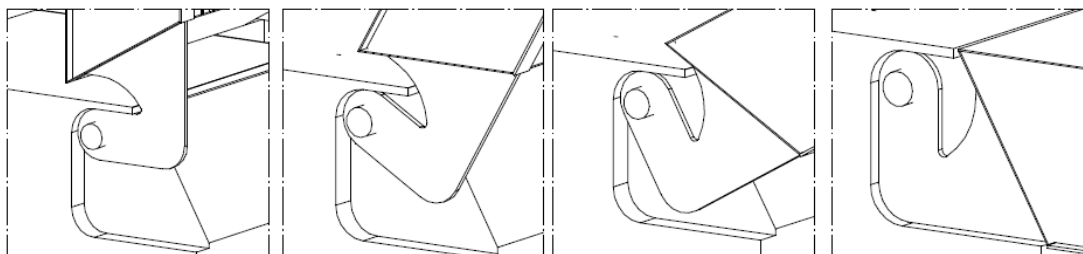
Figur 3-9: Vippebro - Teknisk rom

- To hydrauliske sylindre benyttes for å bevege klaffebroen. Hver av sylindrerne har plass for installasjon av nabosylinder i tilfelle skade, der erstatnings-sylinder(e) oppbevares i maskinrommet. Utsifting kan gjøres med bruk av lokale håndvinsjer.



Figur 3-10: Vippebro - Hydrauliske sylindre

- Bruk av sfærisk leddlager i hver ende av sylinder er anbefalt av leverandør for å unngå kantpress på sylindrestenger, pakkboks, mv.
- Braketter er utført slik at åpning til enhver tid under åpning/lukking er mindre enn 100 mm.



Figur 3-11: Vippebro - Braketter

3.13 FUGER

Standard fuger på tvers av veibanen plasseres i hver enda av vippebroen for å ta av relativ horisontal deformasjon. Dette anses som kjent teknologi og vil ikke detaljeres videre på dette stadiet.

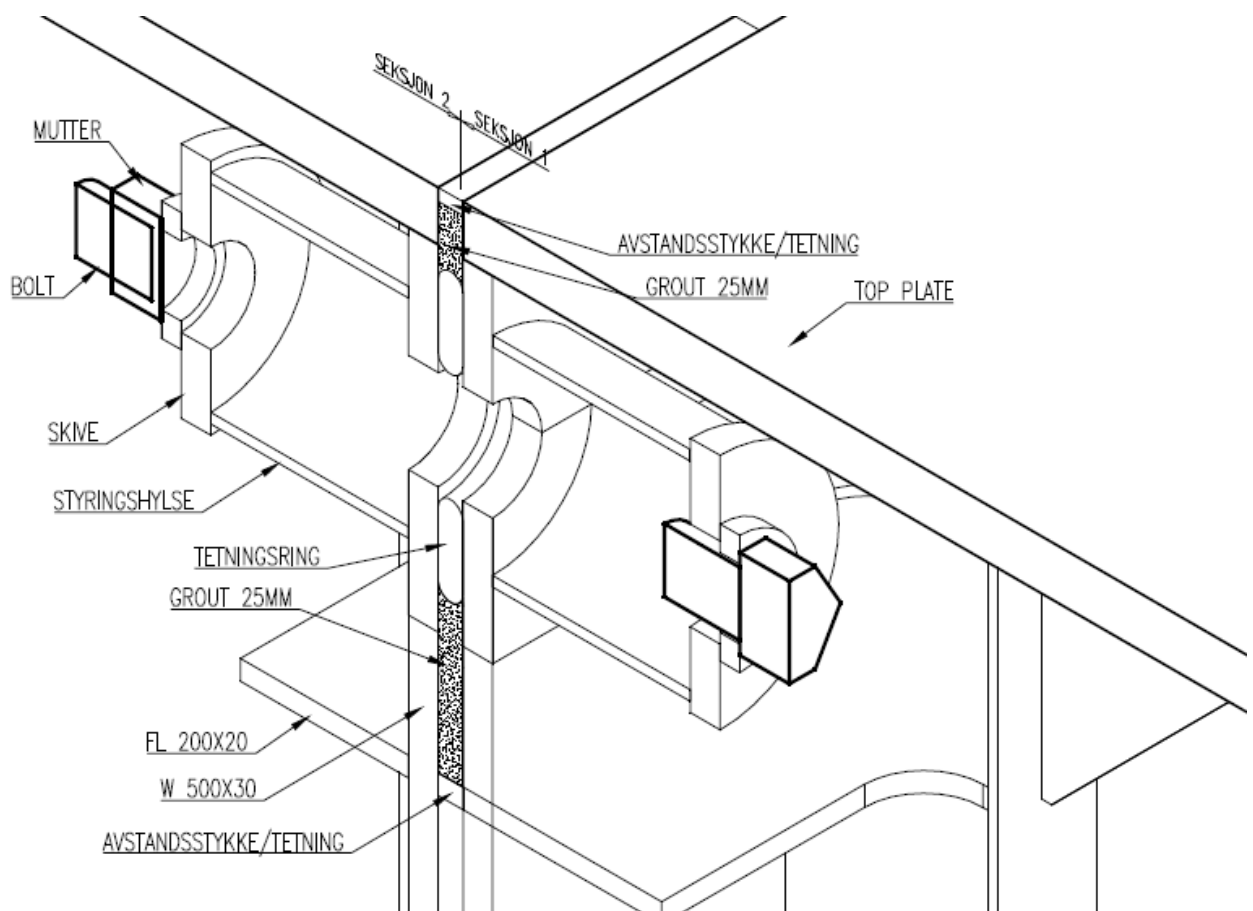
3.14 FENDERE

Skipspassasjen vil være mer utsatt for skipskollisjoner enn andre pongtonger i flytebruen og vil derfor være dimensjonert for å ta skipsstøt som er representativt for ulykker som kan oppstå med de skipstypene som trafikkerer Masfjorden. Skipspassasjen vil i tillegg bli utrustet med kombinasjoner av fendersystemer som er tilpasset energien som forventes å oppstå ved skipskollisjon mot skipspassasjen. Dette vil normalt være typisk a) elastiske, luft fylte fendere og b) kollapsbare fendere i stål som skiftes ut etter deformasjon som følge av kollisjon, c) flytende fendere som er en kombinasjon av a) og b).

På dette stadiet vil kapasitets mot skipskollisjon baseres på uforminskede kollisjonsenergier. Med andre ord er ikke fending tatt med i beregningene, og fenderesystem er derfor ikke detaljert på dette stadiet.

3.15 BOLTEFORBINDELSER

Brosegmentene er foreslått forbundets med et system av forspente bolter og trykkbelastet "grout"/betong som vist i prinsipptegning i Figur 3-12. Bolting av brosegmentene er et alternativ til tradisjonell sveising av segmentene til en komplett brobjelke. Metoden er foreslått for å redusere monterings tiden av flytebroen på installasjonsstedet, samtidig som konsekvensene på kostnader ved pre-fabrikasjon av broelementene blir små.



Figur 3-12: Bolteforbindelser

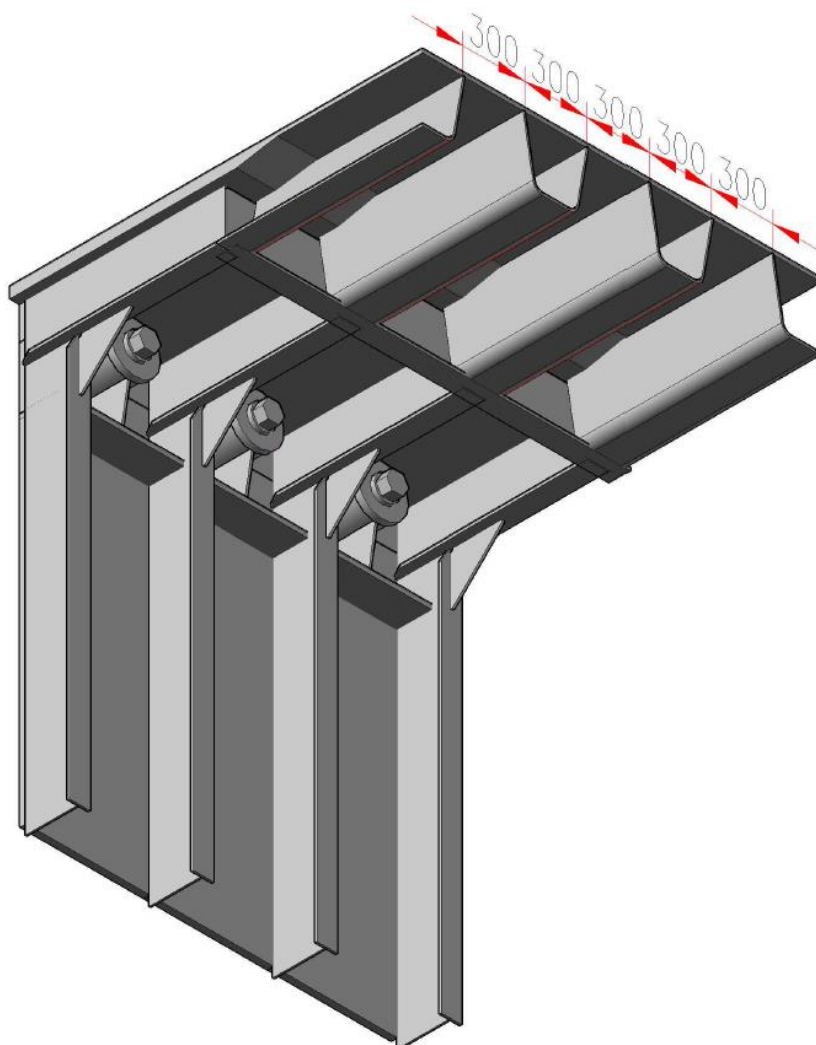
Bruk av grout/betong skal sikre god skjærforbindelse mellom de to flensflatene i flensplanet, f.eks. ved at flensflatene gis en ru overflate tilsvarende armeringsjern.

Samtidig vil bruk av grout/betong gjøre det mulig å prefabrikere brosegmentene med normale, kjente krav til toleranser

Boltene er i foreliggende forslag valgt plassert med en avstand på cc = 600 mm rundt hele bolteflensen. Antall bolter, plassering og dimensjoner vil kunne optimaliseres senere, bl.a. ved at bolteflensene plasseres i en avstand fra opplagringspunktet på pongtongene, der bøyemomentet for brobjelken er lavere.

Tradisjonelle T-profiler har gunstige utmattingssegenskaper og ansees anvendbare i store deler av brobjelken. T-profiler kan tilpasses velkjente metoder for tosidig sveis, med effektiv fabrikasjon, kontroll og sertifisering.

Med unntak av områdene nærmest boltene vil det være mulig å tilpasse bruk av trapesprofiler for resten av brobjelken som et alternativ til T-profiler, se Figur 3-13.



Figur 3-13: Overgang fra T- til trapesstivere

For å ha lett tilkomst til boltene med tiltrekkingsredskap er det foreslått å anvende T-profiler med innbyrdes avstand på 600 mm nær bolteflensene og i en lengde på ca 1.0 meter fra bolteflensene.

For å kompensere for utmatting i topp-platen som følge av fluktuerende nedbøying fra biltrafikk, foreslås det at tykkelsen på topp-platen økes til ca 50 mm i en lengde på i overkant av 1.0 meter fra bolteflensene, hvorpå topp-platens tykkelse gradvis reduseres ned mot topp-platens tykkelse for resten av topp-platen (ca 15 mm.)

I de øvrige områdene av topp-platen som er utsatt fra spenningsvariasjoner fra biltrafikk, holdes innfestingsavstand for stiverne til ca 300 mm. Med en innfestingsavstand for stiverne på 300 mm, ansees både trapesprofiler og T-profiler å ha tilfredsstillende utmattingssegenskaper mhp biltrafikk.

Vanntetthet kan oppnås ved at det ytre avstandstykket/tetning som vist på Figur 3-12, anordnes i hele bolteflensens ytterhud, slik at den fungerer også som pakning mot vanninntrenging fra utsiden. Både det ytre og det indre avstandstykket/tetning vil etter herding beskytte den herdede mørtelen mot eksponering mot luft. I tillegg vil den herdede mørtelen etter kjente teknikker også kunne komponeres til å ha vanntettende egenskaper

3.16 UTRUSTNING

3.16.1 LYS OG VARSLING

For skipspassasjeløsninger arrangeres lanterner og eventuelt fyrtårn etter Kystverkets anvisninger. Bru kan også arrangeres med trafikklys/bom for eventuell kontroll med trafikk ved ulykker og/eller under ekstreme værforhold. Ved varsling om innkommende skip stenges bom ved land i god tid før broen åpnes.

3.16.2 BALLAST

Det vil i utgangspunktet kun være behov for permanent ballast i pongtonger og skipspassasje i form av skrapjern eller lignende. Dersom det vil være behov for andre ballastering, f.eks. ved stigning av havnivå, vil gjøres med portabelt utstyr.

3.16.3 LENSING OG DRENERING

Det legges ikke opp til permanente lense-system om bord på pongtongene eller i skipspassasje. Alle flyterne vil bli konstruert slik at flytebroen skal overleve en vilkårlig skade som gir vannfylling.

3.16.4 REKKVERK

Rekkverk langs sider og separering mellom kjøretøy og gang/sykelsti gjøres etter standard prinsipper for alle deler av bro iht. håndbok *N101 Rekkverk og vegens sideområder*.

3.16.5 STRØMTILFØRSEL OG ELEKTRISKE FORBRUKERE

Strømtilførsel besørages med kabling fra land. Dette kan gjøres som dobbel forsyning for kritiske forbrukere med tilførsel fra begge sider.

Aktuelle elektriske forbrukere er:

- Belysning
- Eventuell ventilasjon
- Eventuelle lensepumper
- Eventuelt nødutstyr (telefoner, alarmer, sensorer ...)

3.17 MATERIALER OG OVERFLATEBEHANDLING

Brokassen konstrueres i stål med normverdi flytgrense på 355 MPa. Utvendig overflatebehandling i overenstemmelse med håndbok R762 Prosesskode 2, prosess 85.3, system 2. Innvendige utrustes brokassen med avfuktingsanlegg.

Pongtongene tilvirkes i stål med normverdi flytgrense på 355 MPa. Utvendig overflatebehandling blir en kombinasjon av

- Korrosjonstillegg i skvalpesonen
- Epoxybasert maling
- Offeranoder

Innvendig utrustes pongtongene med avfuktingsanlegg.

Skipspassasje konstrueres i slakkarmert betong i henhold til krav i Håndbok R762 prosesskode 2.

Boltstandard bestemmes etter detaljert dimensjonering, og skal følge krav i Håndbok H400 kapittel 8.8.

3.18 FABRIKASJON OG SAMMENSTILLING

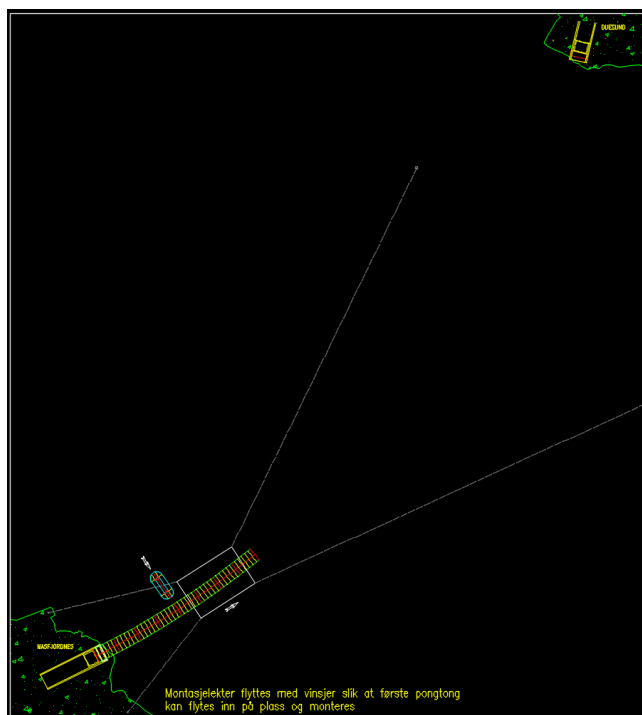
3.18.1 INSTALLASJON

Hvert av brosegmentene for Masfjorden ferdigstilles ved verft og har en lengde på ca 87 meter. Tilsvarende prefabrikkeres pongtongene med opplagre og flytes på plass, eventuelt leveres på leker. Skipspassasje pre-fabrikkeres i sin helhet med kjente prinsipper for glideforskaling. Vippebro og opplagre monteres på verft, og skipspassasjen flytes til feltet.

To alternative metoder for sammenstilling er foreslått på dette stadiet. Begge alternativer bygger på kjente metoder fra offshore sammenstilling av større flytende konstruksjoner, som *float-over*, *wet-towing* og *guide-pin*-systemer.

Alternativ 1:

Brosegmentene sammenkobles ved hjelp av en montasjелеkter og bygges direkte på plass, ved at første segment kobles til landfeste. En transportleker frakter så neste brosegment på plass før segmentene. Montasjелеkteren vinsjes så frem og en pongtong kan ballasteres ned og flytes på plass, før den de-ballasteres og "merges" med brobjelken. Slik bygges broen frem mot til skipspassasjen, som i sin tid flytes på plass og fortøyes. Deretter fortsetter installasjonen fra motsatt landfeste på tilsvarende måte. Utdrag fra installasjonssekvens er vist i Figur 3-14, som kan sees i sin helhet i Vedlegg A.



Figur 3-14: Alternativ 1

Alternativ2:

Her monteres broen i sin helhet ved kai ved hjelp av landbasert kran. For øvrig er metoden lik forrige alternativ, med bruk av montasjelekker med vins. Dette alternativet krever noe mer fortøyning, men gjør også at montasjen ikke er til hinder for den nåværende kabelfergen. Når hele broen er ferdig sammenstilt slepes den på plass og kobles mot landfestene. Installasjonssekvensene kan sees i sin helhet i Vedlegg B.

3.18.2 SAMMENKOBLING AV BROSEGMENTENE

Brosegmentene kan enten sveises sammen etter velkjente teknikker som er anvendt for Nordhordlandsbrua, eller boltes. En teknikk med bolting er presentert som et alternativ der brosegmentene monteres sammen ved hjelp av boltede flenser som vil befinne seg på innsiden av brobjelken for å sikre lett tilgang for montasje, vedlikehold og utskiftinger.

Motivet for å utvikle en alternativ montasjemetode basert på bolting har vært å redusere tid og kostnad for montasje lokalt, samtidig som konsekvensene på prefabrikasjons-kostnadene på broelementene er små. I tillegg reduseres risiko for overskridelse av montasjetid, noe som sett fra entreprenørens side vil kunne åpne for konkurransedyktige fastpriskontrakter for leveranse av hele flytebroen.

Hver av brosegmentene for Masfjorden planlegges ferdigstilt ved verft og med en foreslått lengde på ca 87 meter. For boltealternativet vil begge de to endene av hvert brosegment prefabrikeres med en innvendig ende-flens.

Brosegmentene er for boltealternativet foreslått forbundet med et system av forspente bolter og trykkbelastet "grout"/mørtel som vist i prinsipptegning i Figur 3-12. Hver av flensene vil ha et antall boltehull der antall, dimensjon og plassering er forhåndsberegnet.

Bruk av mørtel skal sikre god skjærforbindelse og bidra til å eliminere relativ bevegelse mellom de to flensflatene i flensplanet, bl.a. ved at flensflatene kan gis en ru overflate tilsvarende armeringsjern. I tillegg vil bruk av mørtel gjøre det blir mulig å prefabrikkere brusegmentene på en kostnadseffektiv måte med normale, kjente krav til fabrikkasjonstoleranser.

Etter konsultasjon med potensielle verft/entreprenører, så vil forhånds-utboring av samtlige boltehull over hele flensflaten kunne gjøres med en c-c toleranse på +/- 10 mm, totalt 20 mm. Skjevheter og ujevnheter i flensplanene, kombinert med behov for tetthet mot vanninntrenging, vil kunne fanges opp med bruk av kombinasjon av avstandsstykker og tynne pakninger, og bruk av mørtel.

Bolteflensene vil ha en forhåndsberegnet, innbyrdes avstand som vil sikre at mellomrommet mellom de to flensflatene kan etterfylles med ønsket type mørtel. Avstanden mellom flensflatene sikres med et antall avstandsstykker mellom flensene og avstanden foreslås på dette stadiet å være ca 25 mm. Denne innbyrdes avstanden har for andre stålkonstruksjoner vist seg å fungere godt for å sikre god skjærkraft-forbindelser selv ved overføring av store skjærkrefter, bl.a. ved store, pelede offshore stålplattformer. Levetiden for denne type konstruksjoner er allerede 40-50 år, selv i ekstreme miljøforhold som på dypt vann i Nordsjøen

Avstandsstykker vil bli forhåndsmontert kontinuerlig i hele bolteflensenes ytter- og innerkrets, for at de også skal fungere som forskaling under gyseprosessen, når mørtelen pumpes inn mellom flensene, og under herdeprosessen for mørtelen, og til slutt som beskyttelse av den herdete mørtelen mot vær og vind i broens driftsperiode.

I tillegg vil flenserommet ved hjelp av avstandsstykker kunne deles inn i flere «gyserom» for mørtel, for å sikre en kontrollert innføring av mørtel mellom flensrommet, - i flere omganger. Et antall på 6-7 gyserom mellom flensene vil kunne gi en svært god kontroll på selve gyseprosessen.

Gysing av mørtel vil kunne gjøres etter kjente teknikker der mørtelen pumpes inn nedenfra inntil den flyter ut fra et utvalgt sted lenger opp i flensrommet.

Boltene vil penetrere flensene perpendikulært på flensen, gjennom overdimensjonerte hull for å redusere krav til nøyaktighet i fabrikasjon samt for unngå at skjærkrefter tas i boltene. Boltene er understøttet av styringshylser på hver side av de to bolteflensene, og forspent i tilstrekkelig grad slik at globale bøyemomenter og aksialkrefter i brubjelken aldri gir kompresjonskrefter i boltene. Boltene skal under alle operasjonelle forhold holdes i strekk og samtidig sikre at den herdete mørtelen alltid holdes under trykk.

For å unngå at høye spenningskonsentrasjoner lokalt i flensflatene mellom de to styringshylsene medfører uønsket de-stabilisering og knusing av den herdete mørtelen, er det introdusert en tetningsring/skive i høyfast stål i flensrommet rundt boltene. Tegningsringen/skiven har en større diameter enn styringshylsene, samtidig som dens indre diameter følger boltehullet i flensen, slik at de lokale innspenningskreftene fra boltene føres inn og fordeles i denne tetningsringen/skiven.

Kompresjon- og skjærkrefter tas gjennom betongen som trykk og friksjon. Selve bolteforbindelsen holdes fri for mørtel og skal ikke oppta skjærkrefter. Boltene vil bli montert sammen i et mer tradisjonelt bolt/hylse/skive-system, som vil gi boltelengder på ca 50+ cm lengde. Boltedimensjoner vil kunne holdes innenfor kjente, kommersielt tilgjengelige størrelser.

Montasje av de to flensene mot hverandre vil foregå etter kjente prinsipper, bl.a fra offshore installasjon av store plattformer og ved installasjon av undervannsinstallasjoner på dypt vann, med bruk av ledepinner (guide pins) som sikrer stor presisjon i montasjen. Ledepinnene kan om ønskelig

dimensjoneres for å oppta skjærkrefter mellom de to flensene i montasjefasen, i tillegg til de skjærkrefter som opptas av den herdede mørtelforbindelsen.

Før gysing vil en andel av boltene være innmontert og tilstrammet for å sikre mot relativ bevegelse av de to flensflatene under herdeprosessen. Etter ferdig herdeprosess vil samtlige bolter være tilgjengelig for å reinstallerer og deretter strammes til ønskede verdier.

Velkjente typer mørtel kan anvendes som gysemateriale, og operasjonen vil kunne gjennomføres av erfarne spesialister som er tilgjengelig fra flere leverandørfirma.

3.19 FORVALTNING, DRIFT OG VEDLIKEHOLD

Utformingen av den foreslåtte flytebruen for Masfjorden vil gjøres slik at den møter kravene og retningslinjene for Forvaltning, Drift og Vedlikehold som er nedfelt i Statens Vegvesens Håndbok 147, samt annen relevant styringsdokumentasjon. En vil for denne Masfjordbroen kunne trekke erfaringer fra over 20 års drift av andre flytebroer, i første rekke Nordhordlandsbrua.

Flytebroen vil bli utformet slik at en i størst mulig grad kan gjennomføre det meste av vedlikehold på broen lokalt. Det er lagt vekt på at en har tilgang til alle styrkebærende elementer for å gjennomføre tilstandsbasert inspeksjon, vedlikehold og eventuell reparasjon. Dette vil omfatte både løpende, planlagt og periodisk vedlikehold for å opprettholde broens standard i broens levetid.

Det er i tillegg gjort mulig at viktige elementer av broen skal kunne repareres eller skiftes ut lokalt i tilfelle skade. Planlagte tiltak skal kunne legges inn for å få gjenopprettet funksjonsdyktighet av skadete elementer. Dette gjelder for eksempel reparasjon/utskifting av fuger, rekkverk, opplagringssystemer, men vil også kunne omfatte eksempelvis flytebroens pongtonger, dersom en av disse skulle bli skadet som følge av skipskollisjon. Flytebroen vil i driftsfasen også kunne fornyes i form av rehabilitering, utbedring og modernisering.

3.19.1 PONGTONGER

Erfaringer fra offshore industrien viser at vil være mulig å oppnå en levetid for stålpongtonger på 100 år ved kombinasjon av forskjellige tiltak, herunder valg av stål kvalitet, bruk av korrosjonstillegg, spesialmaling, katodisk beskyttelse og i noen tilfeller påtrykt spenning, kombinert med jevnlig inspeksjon og tilstandskontroll, og muligheter for reparasjon/utskifting av deler av stålstrukturene.

Dersom større skader skulle oppstå på en av pongtongene, enten som følge av kollisjon eller andre årsaker, så kan pongtongene etter kjente teknikker kunne repareres ved bruk av flytende habitat, der hele pongtongen i reparasjonsperioden holdes tørr. Alternativet er at en pongtong ved større skader kan skiftes ut i løpet av kort tid.

Ved utforming av pongtongene i stål, så vil alle indre rom i pongtongene være tilgjengelig til enhver tid for fysisk inspeksjon og tilstandskontroll, herunder tykkelsesmåling og sprekkidentifikasjon av strukturstålet. Ankomst fra luker på dekk som, pga det store fribordet, vil være tilgjengelig til enhver tid. Luften i pongtongene kan fortrinnsvis ventileres med sirkulerende, tørket luft som tilføres fra den tørkede luften i brobjelkens indre rom, slik at korrosjon innenfra blir minimalisert. De store internasjonale classeselskaper, slik som DNV-GL, ABS og andre har på bakgrunn av mange års forskningsarbeid og erfaring, utviklet koder og retningslinjer for å maksimere levetiden på flytende stålstrukturer.

3.19.2 SKIPSPASSASJE

Ved skipskollisjoner mot betongveggene i skipspassasjen vil det kunne oppstå avskallinger i betongoverflaten. Med den foreliggende utformingen så vil denne type skader kunne repareres etter kjente teknikker.

Også skipspassasjen indre rom vil til enhver tid være tilgjengelig for fysisk inspeksjon og tilstandskontroll. Tilsvarende som for pongtongene kan luften i skipspassasjen ventileres med sirkulerende, tørket luft. Tilgang for inspeksjon anordnes med mannhull i skott og indre dekk, samt stiger for enkel manøvrering.

Den flytende skipspassasjen vil bli utrustes med en vippebro i stål. Utformingen av denne er i noen grad basert på erfaring fra drift og gjentatt løfting av baugvisiret på tradisjonelle ferger. Betongskipspassasjen er utformet som et svært stiv, flytende konstruksjon med liten deformasjon ved operasjon av vippebroen. Forvaltning, drift og vedlikehold av vippebroen vil dermed også kunne gjøres på samme måte som for en landbasert vippebro.

3.19.3 BOLTEFORBINDELSER

Flytebruen for Masfjorden er foreslått sammenstilt ved bruk av boltede flenser, der flensene i sin helhet vil befinne seg på innsiden av brubjelken, inne i et rom som vil bli driftet med lav luftfuktighet for å redusere innvendig korrosjon. Den foreslåtte boltingen har likhetstrekk med den boltede opphengingen av Nordhordlandsbruen mot de to landfestene. Samtlige bolter vil være tilgjengelig for vedlikehold, inspeksjon og utskifting, gjerne med bruk bevegelig kurvlift, som vil kunne gi tilgang til samtlige bolter innenfra.

3.19.4 LANDFESTER

Landfestene for Masfjordbrua vil kunne utformes på samme måte som for Nordhordlandsbrua og samme metoder for tilsyn, drift og vedlikehold vil kunne anvendes.

4. REGELVERK

Relevante krav fra Statens Vegvesens Håndbok N400 *Bruprosjektering* vil være gjeldene, herunder konstruksjonsspesifikke krav til flytebroer gitt i kapittel 13.12.

Eurokodene brukes for beregning, dimensjonering og utforming av broen.

Eurokode	Tittel
SVV Håndbok N400	Bruprosjektering
NS-EN 1990:2002/A1:2005+NA:2016	Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner, 2016
NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009	Eurokode 1: Laster på konstruksjoner – Del 1-4: Allmenne laster – Vindlaster, 2009
NS-EN 1991-1-5:2003+NA:2008	Eurokode 1: Laster på konstruksjoner – Del 1-5: Allmenne laster – Termiske påvirkninger, 2008

Tabell 4-1: Relevante regelverk

Anerkjente metoder for modellering av miljø- og miljølaster baseres på DNV GLs anbefalinger i DNV-RP-C205 *Environmental Conditions and Environmental Loads*.

4.1 AVVIK

Strekraft i opplager ved pongtong og skipspassasje er et avvik i henhold til Håndbok N400 kapittel 12.4.4.

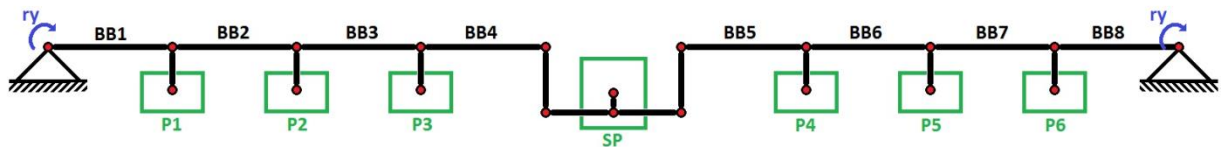
5. METODIKK

I det følgende kapittel vil det gis en kort forklaring av metode og programvare brukt for å modellere broen og lastene.

5.1 MODELL

Broen er modellert som bjelkeelementer med to symmetriakser. Elementene er tilegnet tverrsnittsegenskapene til brokassen. I hver ende av broen er bjelkeelementene fast innspente, med unntak av rotasjon om y -retning, for å tillate tidevannsbevegelser. Totalt er det åtte brospenn, benevnt BB1 til BB8 i Figur 5-1 og i samtlige figurer videre. Nodene i forbindelsen mellom hvert brospenn er rotasjonsstive for å ivareta at broen er kontinuerlig. Disse nodene er igjen slaver til noder i massesentrene til pongtongene, benevnt P1 til P6, som er fri til å bevege seg basert på modellerte naturlaster.

BB4 og BB5 er brospennene i direkte tilknytning til skipspassasjen. Disse er forbundet til en node i skipspassasjen, SPs, massesenter via bjelker med tilegnede tverrsnittsegenskaper lik de forskjellige snittene i skipspassasjen. Det er med andre ord ikke et master-slave forhold som for pongtongforbindelsene, da det er viktig å få med relativ bevegelse mellom endenodene til BB4 og BB5.



Figur 5-1: Modell

5.2 METODE

Programvare brukt til å utføre analyser er *Genie*, *Wadam*, samt modulene *Simo* og *Riflex* i *Sima*.

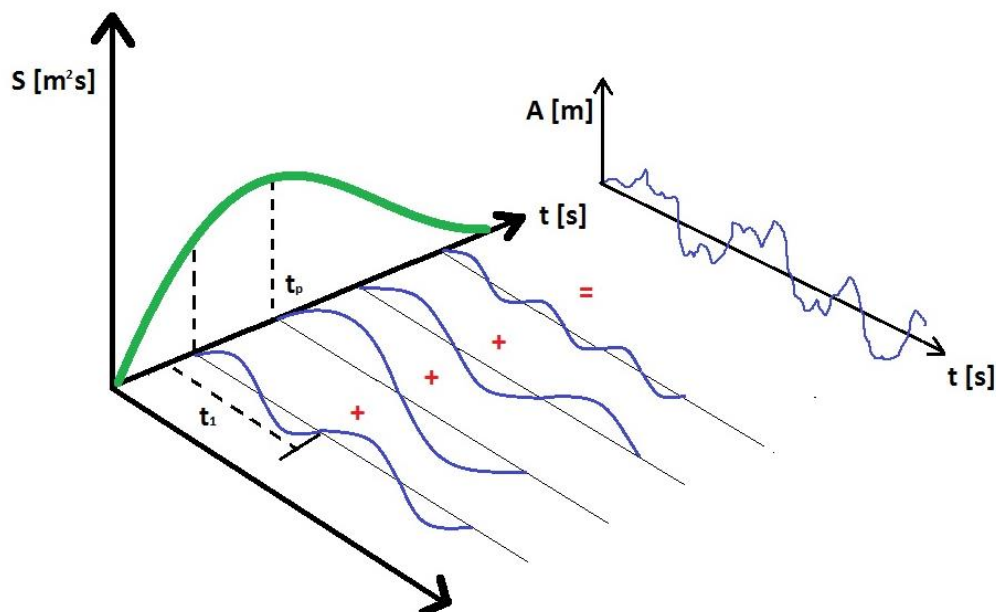
Genie brukes til å modellere flyterne for å lage panelmodeller, massemodeller og seksjonsinndeling. *Wadam* brukes så til å beregne hydrodynamisk masse, hydrostatisk stivheter, potensiell demping, 1. ordens eksitasjonskrefter, samt bølgedrift basert på trykkintegrasjon.

Simo er et program ment for å simulere bevegelsene til et komplekst system av flytende enheter, mens *Riflex* er et program ment for statiske- og dynamiske analyser av slanke marine strukturer ved hjelp av bjelketeori. *Simo* har som oppgave å beregne kreftene på hver av flyterne (eksitasjonskrefter, bølgedriftskrefter, vind og strømkrefter), mens bjelkeelementene som forbinder dem etableres i *Riflex*. Ved å kjøre disse programmene sammen er det mulig å kjøre koblete analyser. En koblet analyse vil si at flyternes bevegelser og de dynamiske lastene i bjelkene beregnes samtidig, slik at full interaksjon mellom flyternes bevegelser og bjelkenes stivheter oppnås.

Sima er et grafisk brukergrensesnitt som tillater koblet kjøring av *Simo* og *Riflex*. Postprosessering av resultater er også tilgjengelig her.

5.3 NATUR

Simo generer tidsserier for irregulær overflateheving og vindkast som varierer i tid og rom, basert på input i spekter-form.



Figur 5-2: Frekvensplan til tidsplan

Spekter for strøm og vind er gitt 100 års returverdier som beskrevet i *Prosjekteringsgrunnlaget /10/*. Strøm er påsatt med konstant hastighet langs hele brotverrsnittet hvis ikke annet er spesifisert.

Naturlast	Beskrivende parametere
Bølger	$H_s = 1.4 \text{ m}^{1)}$, $T_p = 3.1 \text{ s}$ JONSWAP spekter, $\gamma = 3.3$, \cos^2 bølgespredning
Vind	Middelvind = 31.7 m/s NPD spekter
Strøm	$1 \text{ m/s}^{2)}$ konstant

Tabell 5-1: Naturlaster

¹⁾ 17 % høyere enn største 50 års verdi uansett retning (1.2 m)

²⁾ 22 % høyere enn største 50 års verdi uansett retning (0.81 m/s)

5.4 BROBJELKE

I Reflex modelleres brokassen som bjelker med egenskaper gitt i Tabell 5-2.

Bjelkeegenskaper	
Egenvekt, stål, m_{e0}	6.06 tonn/m
Egenvekt slitelag og rekkverk, m_{e1}	2.78 tonn/m*
Trafikklast, m_t	3.20 tonn/m**
Aksiell stivhet, EA	1.43×10^{11} N
Bøyestivhet om horisontal akse, EI_{yy}	4.18×10^{11} Nm ²
Bøyestivhet om vertikal akse, EI_{zz}	2.36×10^{12} Nm ²
Kvadratisk drag koeffisient vind horisontal på probjelken, C_{Dy}	1.5
Kvadratisk drag koeffisient vind vertikalt på probjelken, C_{Dz}	0.9

Tabell 5-2: Egenskaper brobjelker

* Masse av slitelag og rekkverk: $\text{kN/m}^2 \cdot 7.5 \text{ m} + 1.5 \text{ KN/m} \cdot 3 \text{ m} + 2 \cdot 1.5 \text{ kN/m} + 1 \cdot \text{kN/m}$ / $9.8 \text{ kN/tonn} = 2.78 \text{ tonn/m}$

** Masse fra jevnt fordelt trafikklast: $(16.2 \text{ kN/m} + 2 \cdot 300 \text{ kN} / 700 \text{ m} + 7.5 \text{ kN/m} + 2 \cdot 200 \text{ kN} / 700 \text{ m} + 3.75 \text{ kN/m} + 2.5 \text{ kN/m}) / 9.8 \text{ kN/tonn} = 3.20 \text{ tonn/m}$

5.5 MERKNADER

- Alle naturlastene virker samtidig og propagerer i samme hoved retning, normalt på brobjelkens innside, hvis ikke annet er spesifisert. Dette er en konservativ fremgangsmåte, da det ikke er gitt at de forskjellige 100 års-lastene vil virke samtidig.
- De frie brospennene i modellen er lengre enn de vil være i virkeligheten pga. opplagrenes plassering. Da bøyemoment er proporsjonalt med lengden opphøyd i andre, vil dette gi konservative estimater for bøyemomentene.

6. EGENFREKVENSER

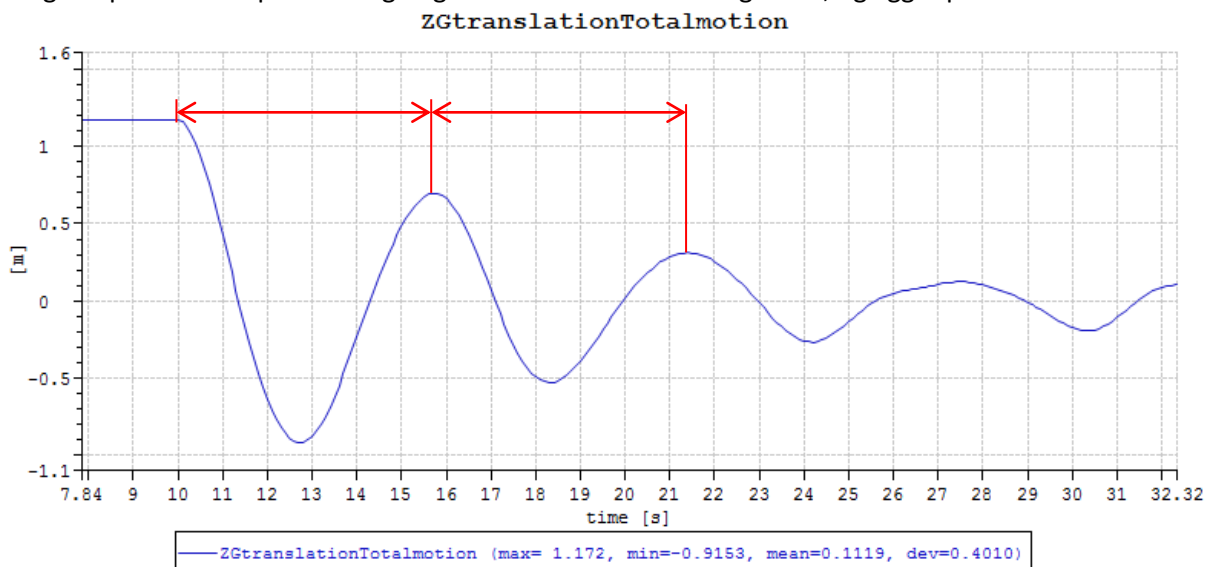
Beregning av egenfrekvenser, eller egensvingeperioder, er kritisk for å forstå broen oppførsel for dynamisk belastning.

Egensvingeperiodene beregnes ved å kjøre en tidsplananalyse uten påsatte naturlaster. Videre påføres en konstruert last i konstruksjonens midtpunkt (ved skipassasjen) for å produsere en tvungen forskyvning de første 10 sekundene. Deretter fjernes denne lasten, og konstruksjonen svinger fritt.

6.1.1 Hiv

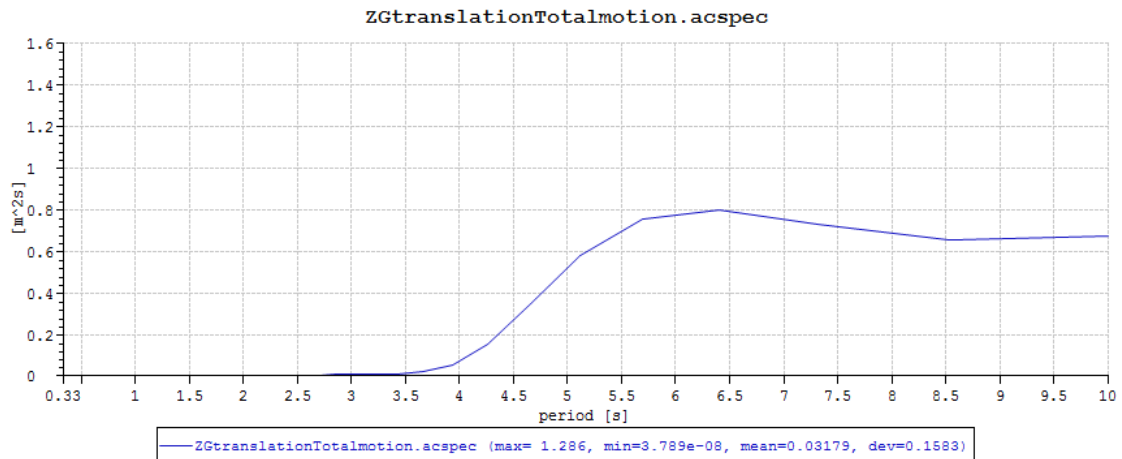
For vertikal hiv bevegelse er vi spesielt ute etter perioder som kan sammenfalle med perioder i bølgespekteret. Topphetsperioden i bølgespekteret brukt for 100 års storm er 3.1 sekund. Egenfrekvensen styres av i hovedsak to effekter, vannplanstivheten til flyterne og stivheten til brobjelken.

Lengden på hver komplette svingning er markert med rødt i Figur 6-1, og ligger på ca 6 sekund



Figur 6-1: Fri svingning hiv

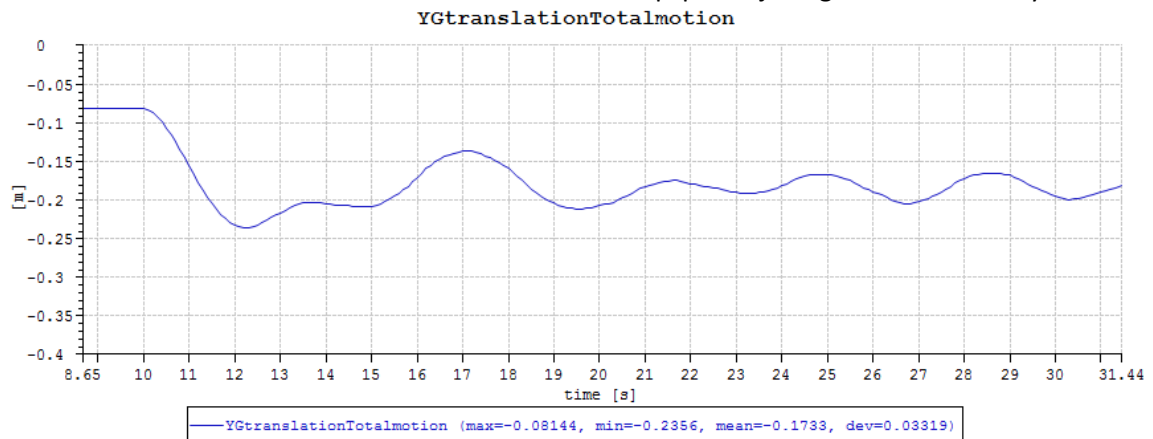
Dette blir videre bekreftet ved å etablere et responsspekter for nettopp dette utslaget, hvor topphetsperioden er 6.4 sekund. Videre ser vi av Figur 6-2 at energien i spekteret er tilnærmet lik 0 for periode på 3.1 sekund, dvs utslag her vil være svært små.



Figur 6-2: Responsspekter, hiv

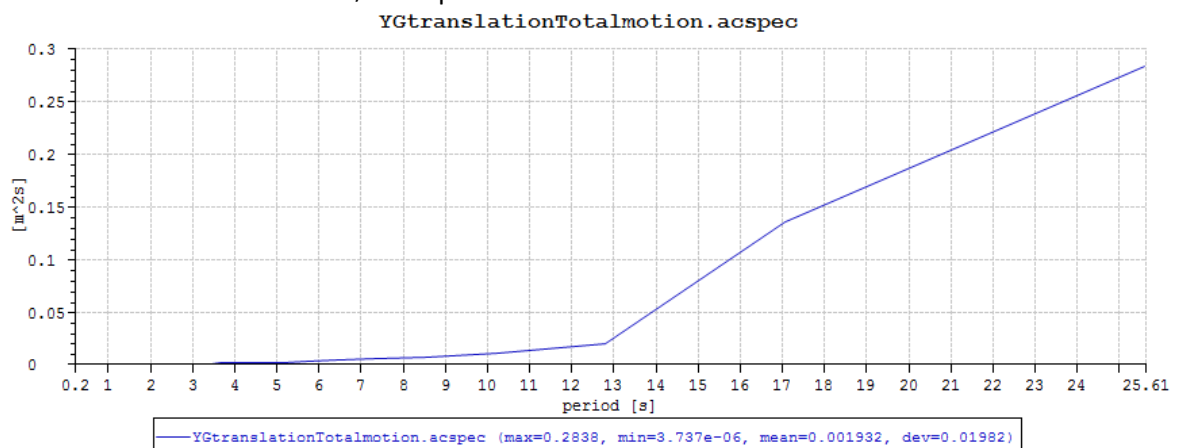
6.1.2 SVAI

For horisontal svaibevegelse, svingning på tvers av broen lengderetning, er bildet noe mer uklart. Årsaken ligger trolig i ulik oppførsel fra brobjelken når det gjelder svingning inn eller ut av buen. Videre er det større ulikhet mellom svaistivheten til skipspassasjen og de resterende flyterne.



Figur 6-3: Fri svingning sva

Responsspekteret viser likevel neglisjerbar energi ved perioder under 13 sekund. Dvs at det må påføres ekstremt store laster for å utløse respons.



Figur 6-4: Responsspekter, sva

7. LASTVIRKNINGER

I det følgende kapittel presenteres global kraftfordeling i broen som resultat av forskjellige laster. Alle krefter er presentert som nominelle verdier uten lastfaktorer.

Bøyemomentfordelingen er basert på en opplagsakse per pongtong og skipspassasjeforbindelse, mens der i virkeligheten vil være to akser. Dette antas å gi konservative resultater, da spennlengdene er lengre.

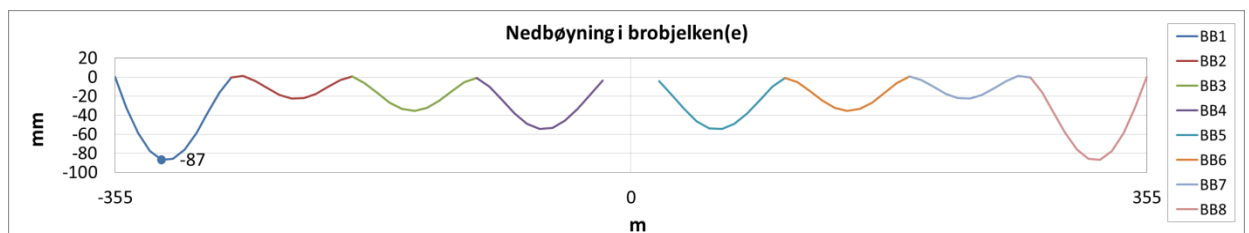
Hensikten med kraftfordelingen er å illustrere på overordnet nivå størrelsesorden på de krefter som oppstår i brobjelken.

7.1 EGENVEKT

Statisk beregning basert på egenvekt av brokassen slitelag og rekkverk, og gir nedbøyning, aksialkraft og momentfordeling i langs brobjelkene som presentert i Figur 7-1 til Figur 7-3.

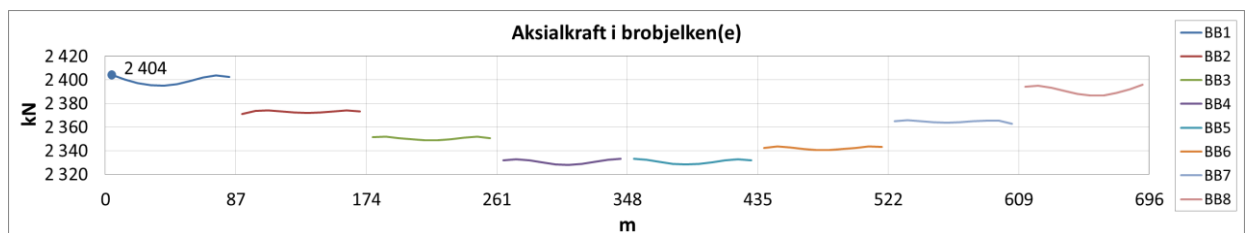
Samtlige flytere er ballastert til å flyte med 3 meter fribord for bro uten trafikk. Maksimal nedbøyning skjer ved brobjelkene mot land (brobjelke 1 og 8) pga fri rotasjon om transvers akse i landfestene.

Egenvekt alene gir maksimal nedbøyning på 62 mm, som gir utnyttelse på 0,25 i forhold til krav på $L/350$ iht. 3.6.1 /1/.

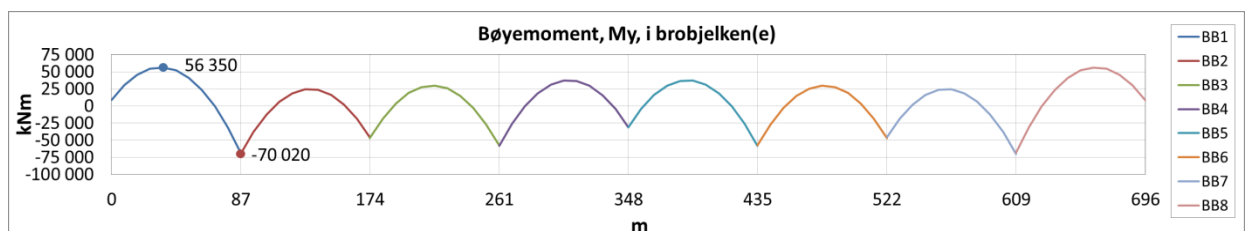


Figur 7-1: Nedbøyning, egenvekt

Størst aksialkraft oppstår i brobjelkene mot land, som en følge av at brokassen er fastholdt mot rotasjon om vertikal akse.



Figur 7-2: Aksialkraft, egenvekt



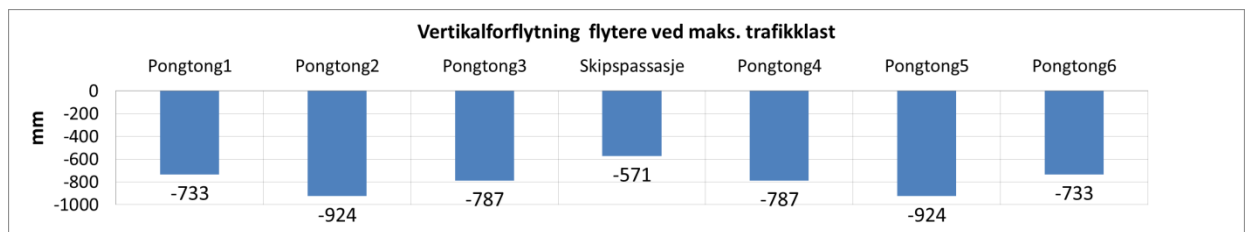
Figur 7-3: Bøyemoment M_y , egenvekt

7.2 TRAFIKKLASTER

Statisk beregning basert på egenvekt av brokassen + trafikklast gir vertikal forskyvning, nedbøyning, aksialkraft og momentfordeling i langs brobjelkene som presentert i Figur 7-4 til Figur 7-7.

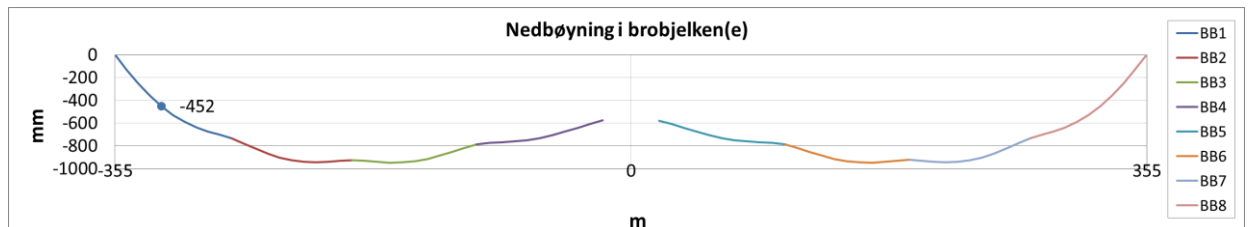
For det globale lastbilde er trafikklast påført langs hele bro lengden som forklart i 0. Dette tilsvarer 3.2 tonn per meter, noe som er en urealistisk høy trafikklast for den aktuelle veistrekningen. Resultatene gir likevel verdifulle illustrasjoner om kraftgangen i konstruksjonen.

Da flyterne er ballastert for fribord på 3 meter uten trafikklast, vil fribordet reduseres ved påsatt trafikklast. Merk at dette kun gjelder i modellen, da det er hensiktsmessig for å illustrere relativ effekt av forskjellige lastkomponenter. I praksis vil flyterne ballasteres til korrekt fribord for en realistisk trafikklast.



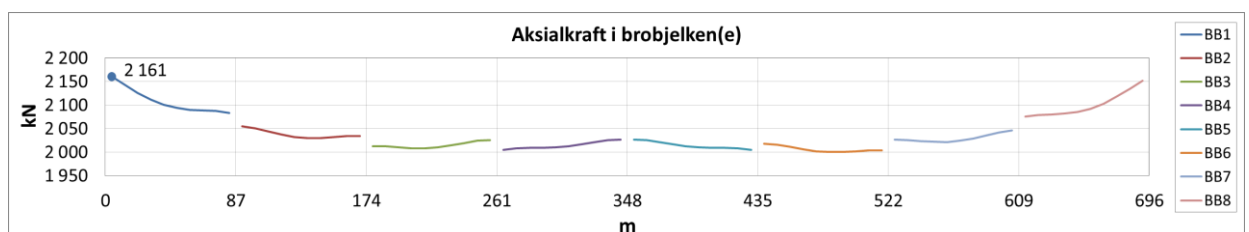
Figur 7-4: Vertikalforflytning, trafikklast

Global nedbøyning av brobjelken er i stor grad styr av vertikalforflytningen til flyterne. Den relative deformasjonen av hvert spenn er fortsatt vel innenfor kravet på $L/350$.



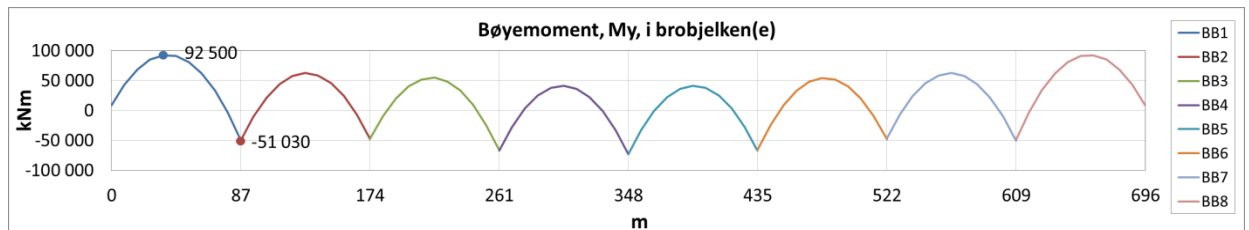
Figur 7-5: Nedbøyning, trafikklast

Statisk aksialkraft i brobjelken er tilnærmet upåvirket av trafikklasten, se Figur 7-6 i forhold til Figur 7-2, da denne er skapt av strøm.



Figur 7-6: Aksialkraft, trafikklast

Pga vertikalforskyvningen av flyterne øker det positive bøyemomentet, mens det negative bøyemomentet reduseres. Unntaket er for innfestningen mot skipspassasjen, fordi den har en relativt mindre vertikalforskyvning.



Figur 7-7: Bøyemoment M_y , trafikklast

7.3 NATURLASTER

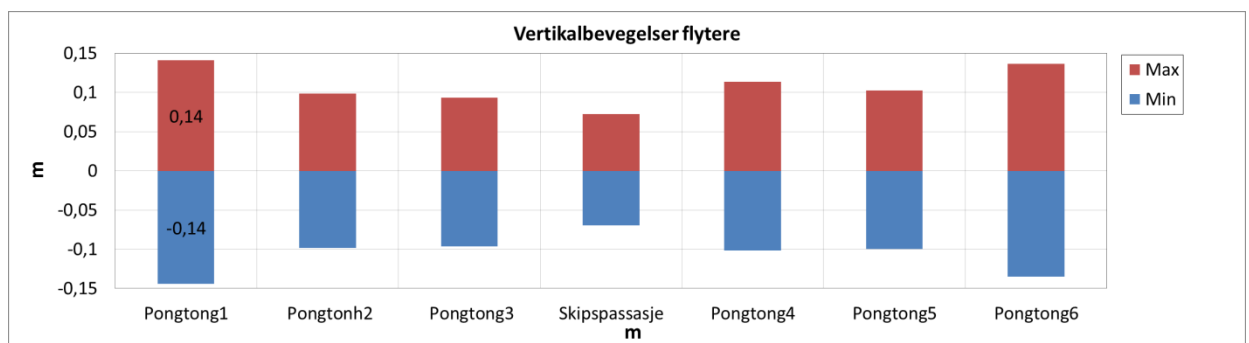
Maksimum- og minimumsverdier for nedbøyninger og krefter er etablert for en 3 timers stormkondisjon, og presentert ved såkalte grensekurver langs broen i Figur 7-9 til Figur 7-12. For aksialkraft og bøyemoment er statiske verdier for egenvekt alene inkludert i plottene for å illustrere den relative effekten av naturlastene.

Stormkondisjonen er basert på 100 års verdier for bølger, vind og strøm. Analysen er kjørt i tidsplanet for å ta hensyn til koblet effekt mellom lastkomponenter. Egenvekt er inkludert.

Samtlige naturlaster er representert ved sin 100 års verdi og samtlige virker normalt på brobjelkens konkave side.

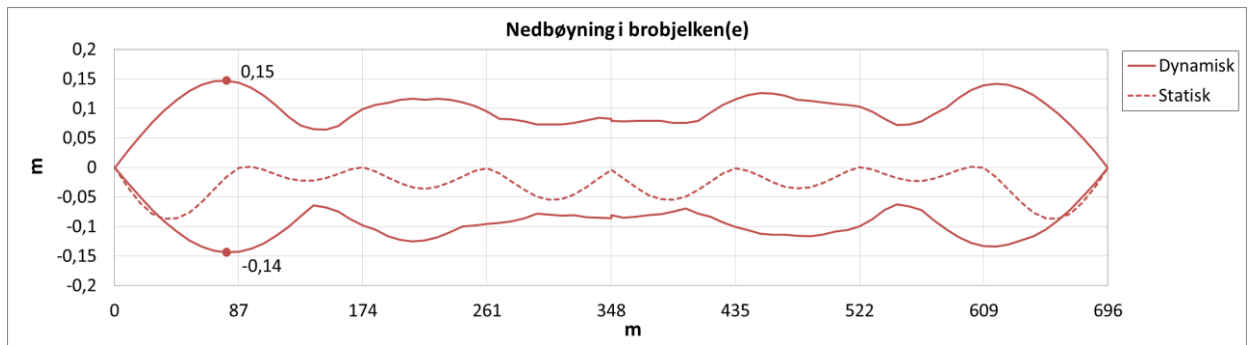
Tidsserier for bølgeheving og vindhastighet generes ved å koble en rekke sinusbølger fra spektre som beskriver 100 års stormen. Sinusbølgende kobles sammen med tilfeldige faser bestemt av et såkalt *frøtall*. For å etablere forventet maksimalverdi ved 100 års storm bør det kjøres en rekke slike 3-timers tidsplananalyser med forskjellige frøtall, slik at det kan etableres en sannsynlighetsfordeling for maksimale responser. Hensikten med denne rapporten er å dokumentere at konseptet er sannsynlig gjennomførbart. Vi mener det dermed er nok i denne omgang å vise dynamiske resultater fra *en* slik kjøring.

Flyterne svinger om nullpunktet (som tilsvarer 3 meter fribord).



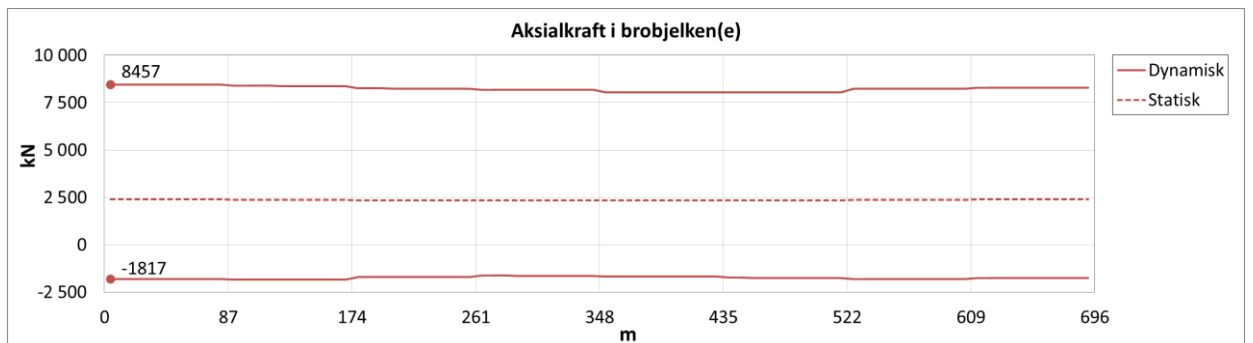
Figur 7-8: Maks./min. dynamisk vertikalforflytning flytere

Dynamisk nedbøyning er i stor grad styrt av bevegelsene til flyterne. Eksempelvis er maksimal nedbøyning for *brosegment 1* 14 cm. Dette har trolig inntruffet i et øyeblikk da tilstøtende flyter, *Pongtong 1*, har en negativ vertikalforflytning nær sin maksverdi som også er 14 cm. Hvis vi likevel antar at *Pongtong 1* er i likevektposisjon da dette inntreffer, er fortsatt nedbøyningen innenfor kravet om $L/350$ (som tilsvarer 25 cm).



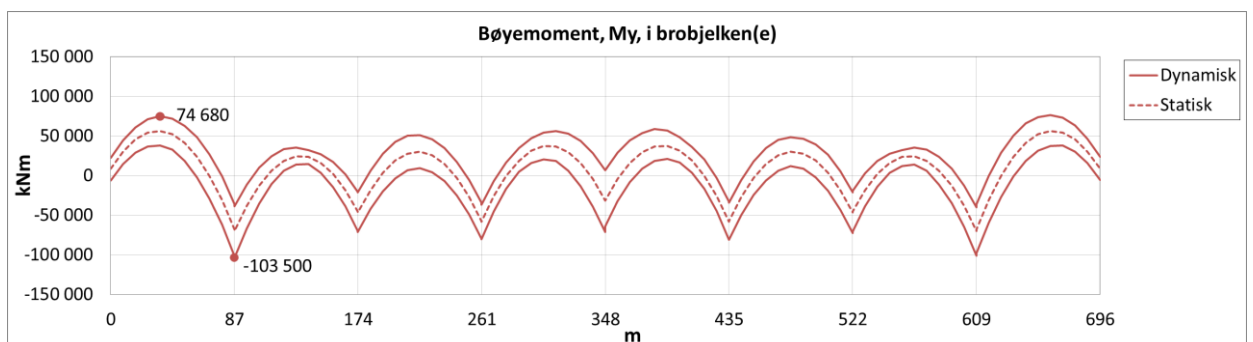
Figur 7-9: Grensekurver, nedbøyning

Vind og strøm gir økte horisontalkrefter i brobjelken, men normalspenningene isolert sett er fortsatt på relativt lave nivåer.



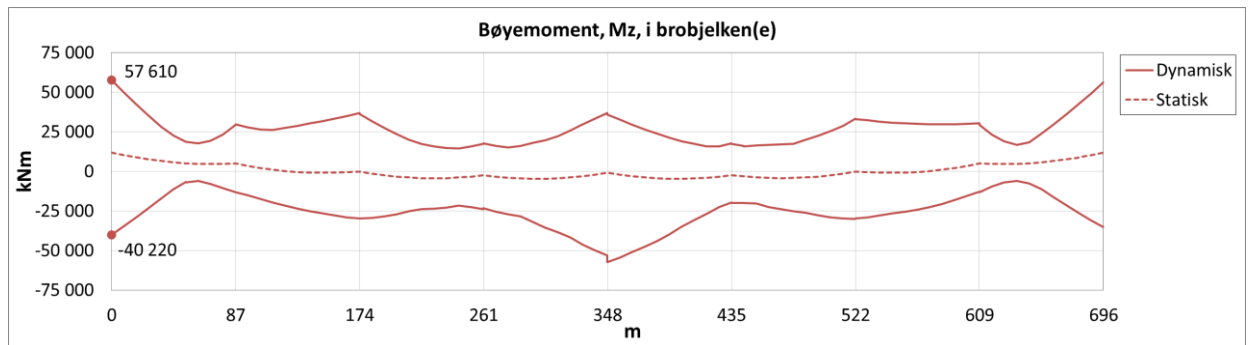
Figur 7-10: Grensekurver, aksialkraft

Dynamiske horisontale bøyemoment induseres i brobjelken som resultat av bølgekreftene på flyterne. Største momenter oppstår ved innfestningene mot skipspassasjen pga den relativt høye stivheten i innfestningen her relativt til de andre flyterne.



Figur 7-11: Grensekurver, bøyemoment M_y

Vertikalt bøyemoment er den kraftkomponenten som er relativt sett mest påvirket av de dynamiske naturlastene, hovedsakelig pga. de horisontale vindlastene, men også på grunn av horisontal bevegelse av flyterne som følge av strøm og bølgedrift.



Figur 7-12: Grensekurver, bøyemoment M_z

7.4 TEMPERATURLASTER

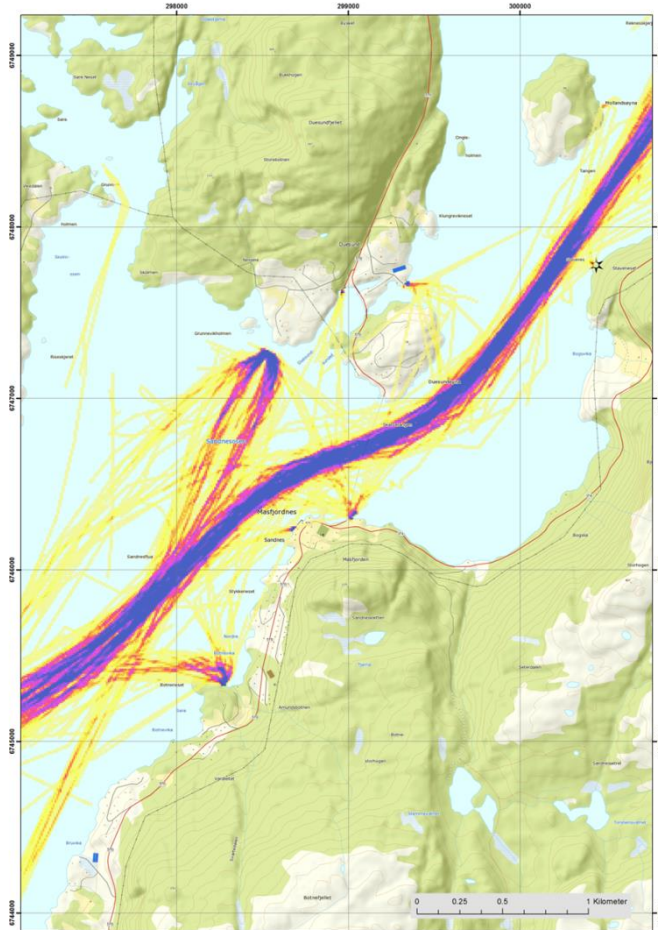
Krefter i brobjelken som følge av en temperaturvariasjon på 40 grader er gitt i Vedlegg G.

Krumming av tverrsnitt som følge av temperaturgradient, gir maksimalt moment om horisontal akse, M_y , på 28 800 kNm i brobjelken mot land og 21 300 kNm ved skipspassasjen.

Utvidelse av broen i lengderetning som følge av temperaturgradient skjer ved utbøyning av broens kurve. Aksialkraft som oppstår er 2 900 kN ved land, og 3 000 kN ved skipspassasjen, mens maksimalt moment om vertikal akse er hhv 124 000 kNm ved land og 65 000 kNm ved skipspassasjen.

7.5 ULYKKESLASTER

DNV GL har etablert kollisjonsenergiene basert på en risikovurdering av skipstrafikken i området /9/. De etablerte energiene er basert på en vurdering av sannsynlige operasjonsmønstre kombinert med faktisk registrert skipstrafikk ved den aktuelle kryssningen. Skipstrafikken er hentet fra AIS-tall fra perioden mellom 1. januar 2012 og september 2016.



Figur 7-13: AIS tetthetsplott for årene 2012-2016

Etablerte verdier for kollisjonsenergiene er presentert i Tabell 7-1. Videre har vi en uttalelse fra DNV GL om at 9 knop er lite realistisk med skipspassasjebredde på 25 meter /11/. Last basert på hastighet på 7 knop blir derfor vurdert i denne fasen.

Konsekvens ved kollisjon ved feilnavigasjon	Kollisjonsenergi
Feilnavigasjon – 5 kts	10,1 MJ
Feilnavigasjon – 7 kts	19,8 MJ
Feilnavigasjon – 9 kts	32,7 MJ

Tabell 7-1: Kollisjonsenergiene

7.5.1 GLOBAL KAPASITET VED SKIPSTØT

Global kapasitet vurderes ved å anta at all energi påføres modellen som impulslast, og tas opp som akselerasjon av broen. Dette antas konservativt da kollaps av fendersystem, lokal skade av flyter og deformasjon av skipsskrog i virkeligheten vil "spise opp" deler av energien.

Kraften utledes fra den impulslast som gjør at skipets bevegelsesenergi går til 0 over impulslastens tid:

$$I = \Delta p = mv - 0 = mv \quad (1)$$

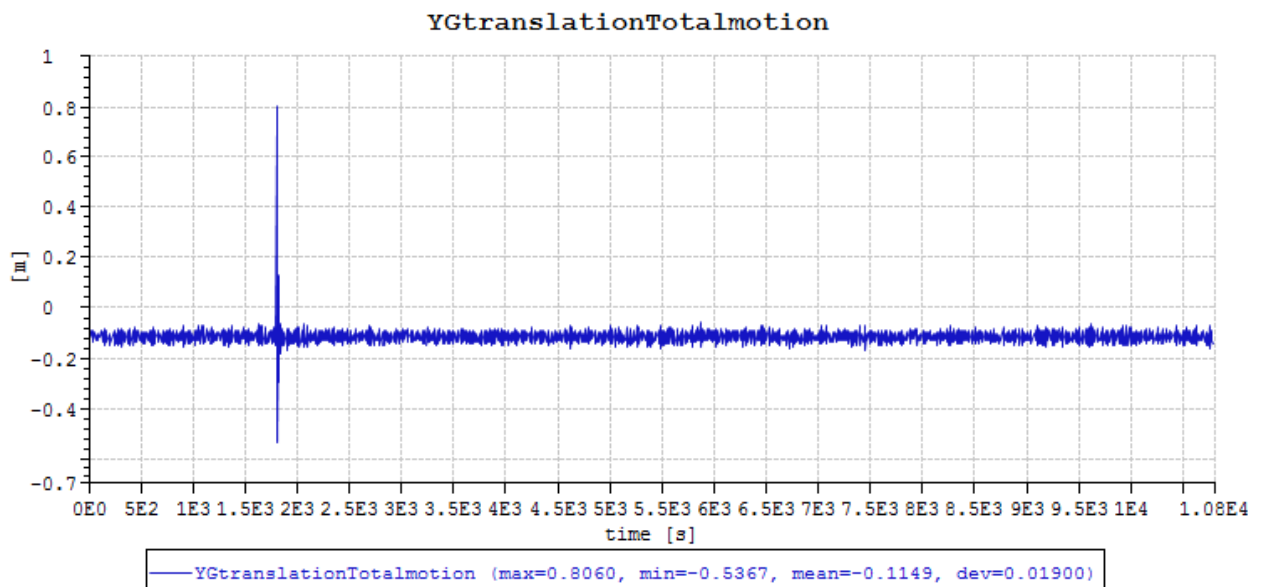
$$I = \int F(t)dt = Ft \quad (2)$$

$$(1) = (2) \rightarrow F = \frac{mv}{t}$$

Konsekvens ved kollisjon ved feilnavigasjon	Kollisjonskraft (1 sek)
Feilnavigasjon – 5 kts	7 854 kN
Feilnavigasjon – 7 kts	10 998 kN
Feilnavigasjon – 9 kts	14 126 kN

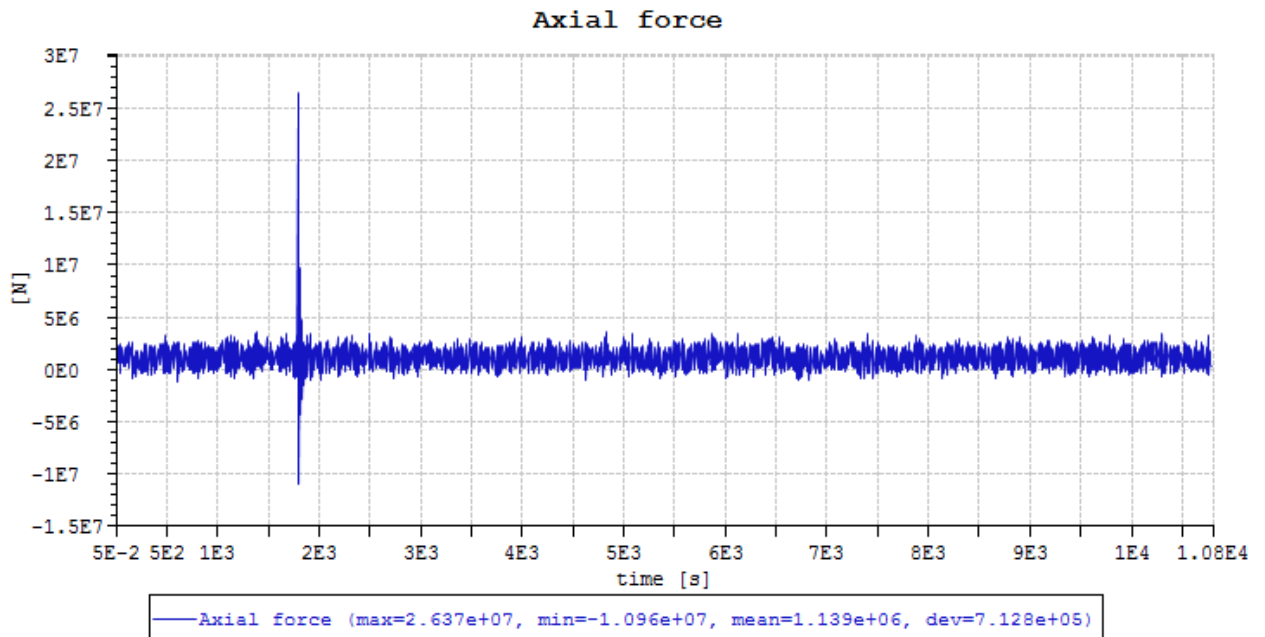
Lasten påføres høyre side av skipspassasjen.

Tidsserier for horisontal forflytning av skipspassasjen, aksialkraft og vertikalt bøyemoment i den tilstøtende brobjelken er presentert i Figur 7-14 til Figur 7-16 og viser effekten av kollisjonen.



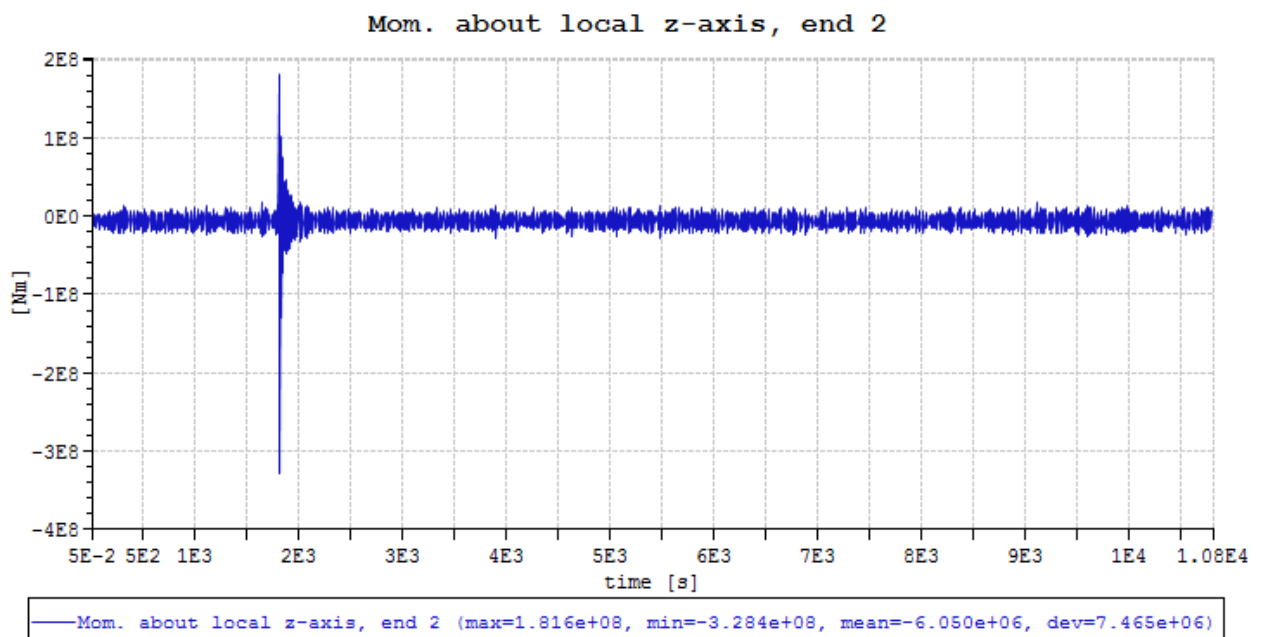
Figur 7-14: Horisontal forflytning av skipspassasje ved skipstøt

Maks horisontal forskyvning av skipspassasjen fra middelposisjon som følge av skipstøt er: 0.81 - -0.12 = 0.93 m.



Figur 7-15: Aksial kraft i tilstøtende brobjelke ved skipsstøt i skipspassasjen

Forskyvningen gir strekk i hele brobjelken, dermed økt aksialkraft. Maks aksialkraft er 26 370 kN.

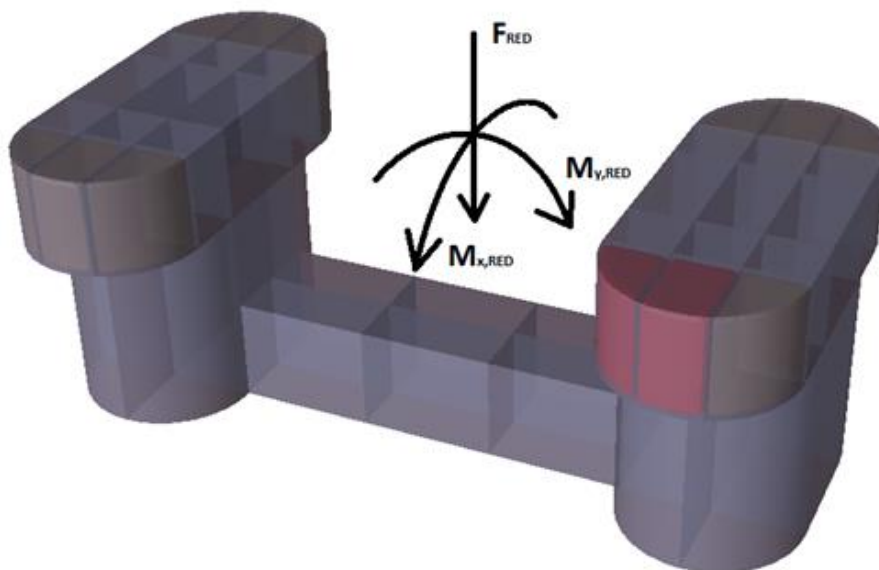


Figur 7-16: Vertikalt bøyemoment i tilstøtende brobjelke ved skipsstøt i skipspassasjen

Vertikalt bøyemoment i brobjelkene nærmest skipspassasje øker betydelig som følge av kollisjon og oppnår en maksimalverdi ved innspenningen til skipspassasjen på -328 400 kNm.

7.5.2 FYLLING AV TO SEKSJONER I SKIPSPASSASJEN

Fylling av to seksjoner antas å være en realistisk konsekvens av skipsstøt. Det vil da ikke være trafikk på broen pga bommer inne ved land går ned i god tid før en skipspassering som fører til skade kan finne sted. Det legges til i modellen en kraft tilsvarende vekt/reduert oppdrift av to fylte seksjoner. Videre legges også inn krenagemomenter i rull og stamp basert lokasjonen til de fylte seksjonene. Resultatet vil dermed at skipspassasjen får redusert oppdrift, samt krengeving om begge horisontale akser.



Figur 7-17: Illustrasjon fylling av seksjoner skipspassasje*

*Illustrasjonen av undervannsbjelken i skipspassasjen er fra en tidligere revisjon, og er dermed ikke korrekt mhp geometri eller dimensjoner

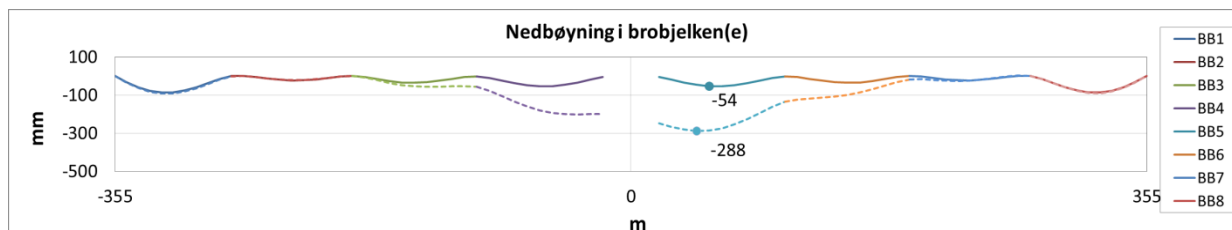
Reduksjonen i oppdrift gir redusert fribord og krengevinkler gitt i Tabell 7-2. Pga det store totale oppdriftsvolumet er reduksjonen i fribord liten. Videre gjør den høye rullstivheten, som er et kombinert resultat av vannplanstivheten mot rull og rotasjonsstivheten til brobjelken, at også krengevinkelen i rull er lav. Krengevinkel i stamp er neglisjerbar.

Konsekvens ved fylling av to seksjoner	Utslag
Redusert fribord	- 0.22 meter
Krengevinkel rull	0.45 grader
Krengevinkel stamp	0.08 grader

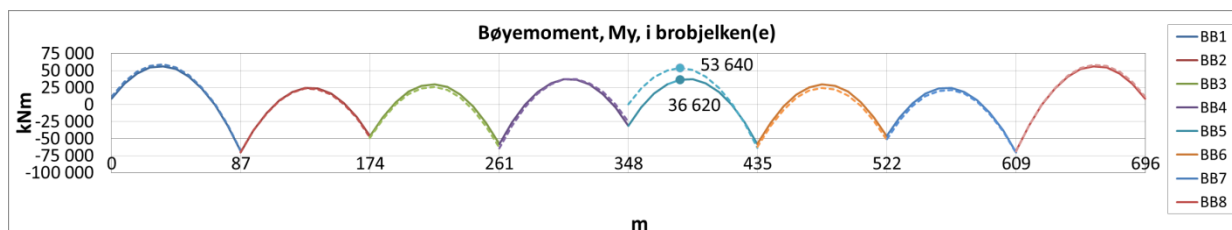
Tabell 7-2: Konsekvens fylling av to seksjoner, skipspassasje

Den reduserte oppdriften, samt krengevingen, av skipspassasje gir utslag på de statiske resultatene. Verdier for skadet tilstand er plottet som stiplede kurver i Figur 7-18 og Figur 7-19, mot heltrukne linjer for intakt tilstand.

I tillegg til økt nedbøyning øker det horisontale bøyemomentet i brobjelken tilstøtende høyre side av skipspassasjen mest (hvor skipskollisjonen, og medfølgende fylling av seksjoner skal finne sted). Momentet er likevel av en størrelsesorden som er godt innenfor kapasiteten til brobjelken.



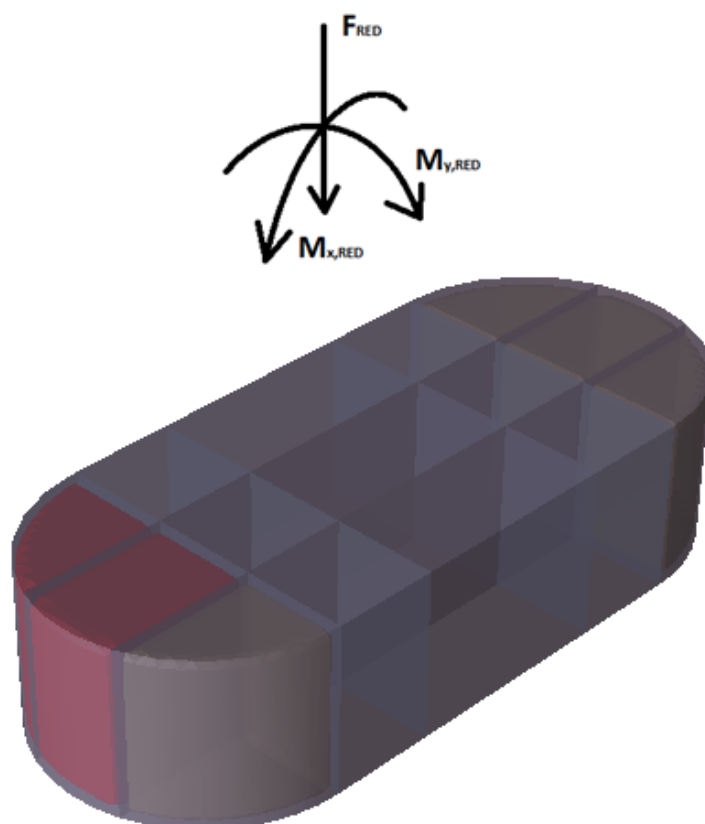
Figur 7-18: Nedbøyning, skadet skipspassasje



Figur 7-19: Bøyemoment M_y , skadet skipspassasje

7.5.3 FYLLING AV TO SEKSJONER I PONGTONG

Fylling av to seksjoner i pongtongene modelleres på tilsvarende måte som for skipspassasjen. Resultater for pongtongen midt mellom land og skipspassasje på høyre side er presentert.



Figur 7-20: Illustrasjon fylling av seksjoner pongtong

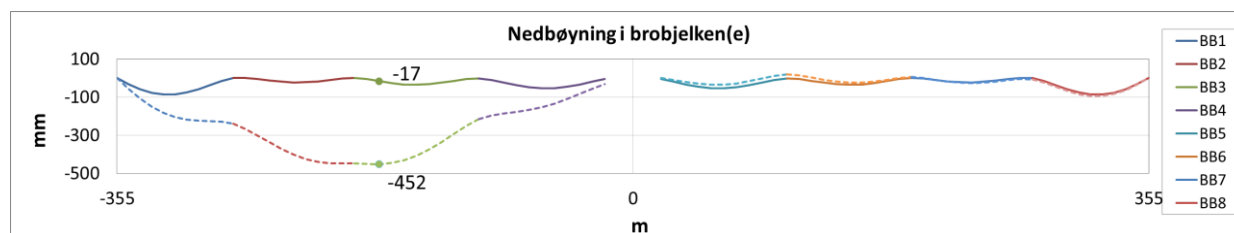
Reduksjon i fribord er større enn for skipspassasjen pga mindre totalt oppdriftsvolum, mens krengevinklene er veldig like.

Konsekvens ved fylling av to seksjoner	Utslag
Redusert fribord	- 0.45 meter
Krengevinkel rull	0.44 grader
Krengevinkel stamp	0.01 grader

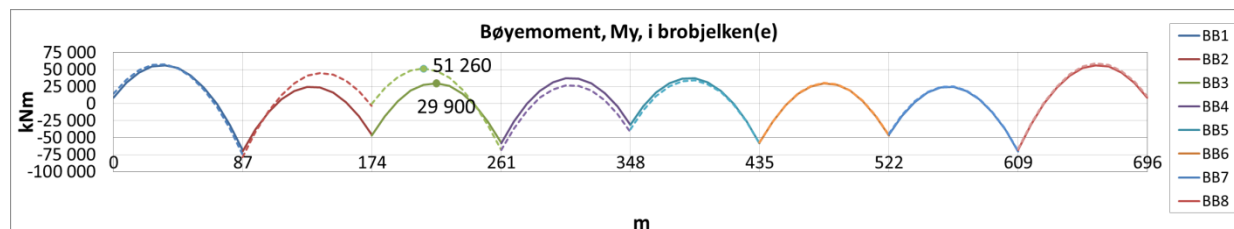
Tabell 7-3: konsekvens ved fylling av seksjoner, pongtong

Den reduserte oppdriften, samt krengingen, av skipspassasje gir utslag på de statiske resultatene. Verdier for skadet tilstand er plottet som stiplede kurver i Figur 7-21 og Figur 7-22, mot heltrukne linjer for intakt tilstand.

I tillegg til økt nedbøyning øker det horisontale bøyemomentet i brobjelkene tilstøtende den skadete pongtongen. Momentet er likevel av en størrelsesorden som er godt innenfor kapasiteten til brobjelken.



Figur 7-21: Nedbøyning, skadet pongtong



Figur 7-22: Bøyemoment M_y , skadet pongtong

8. LASTKOMBINASJONER OG SPENNINGSFORDELING

I det følgende kapittel presenteres global kraftfordeling i broen som resultat av forskjellige lastkombinasjoner.

Følgende metode er fulgt for tilegning av lastfaktorer på enkelte lastkomponenter:

- Masser er økt tilsvarende den gitte lastfaktor
- For naturlaster er bølgehøyden og multiplisert med lastfaktor, mens strøm- og vindhastighet er multiplisert med roten av lastfaktoren da strøm- og vindlast er proporsjonal med hastigheten i annen.
- Temperaturkreftene er beregnet separat og multiplisert med lastfaktor
- Ingen lastfaktor er lagt på ulykkeslast

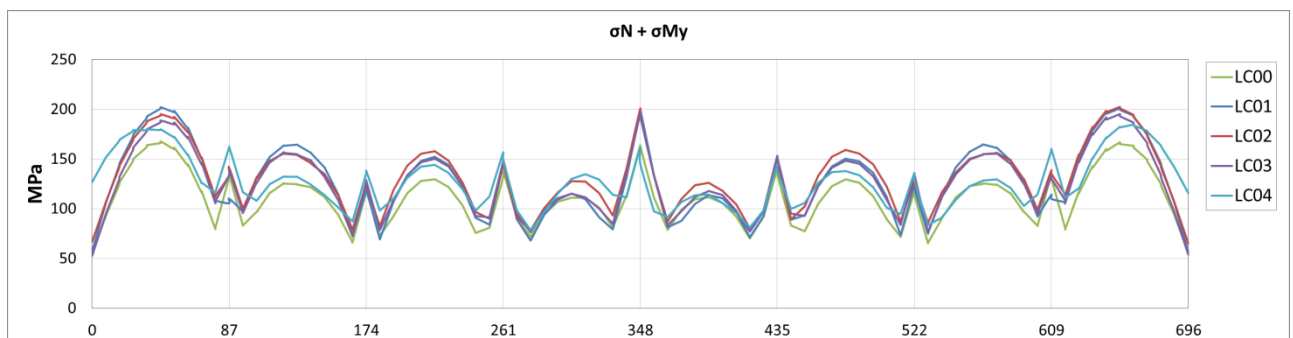
Lastkombinasjoner er basert på bruddgrenser og lastfaktorer gitt i /4/ tillegg A2, og som beskrevet i Prosjekteringsgrunnlaget /10/.

Lastkombinasjon	Egenvekt	Trafikk	Natur	Temp	Ulykke
LC00 – Karakteristisk	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
LC01 – Trafikk	1.20	1.35	1.12	0.84	0.00
LC02 – Natur	1.20	0.95	1.60	0.84	0.00
LC03 – Temp	1.20	0.95	1.12	1.20	0.00
LC04 – Ulykke	1.00	0.50	0.50	0.50	1.00

Tabell 8-1: Lastkombinasjoner

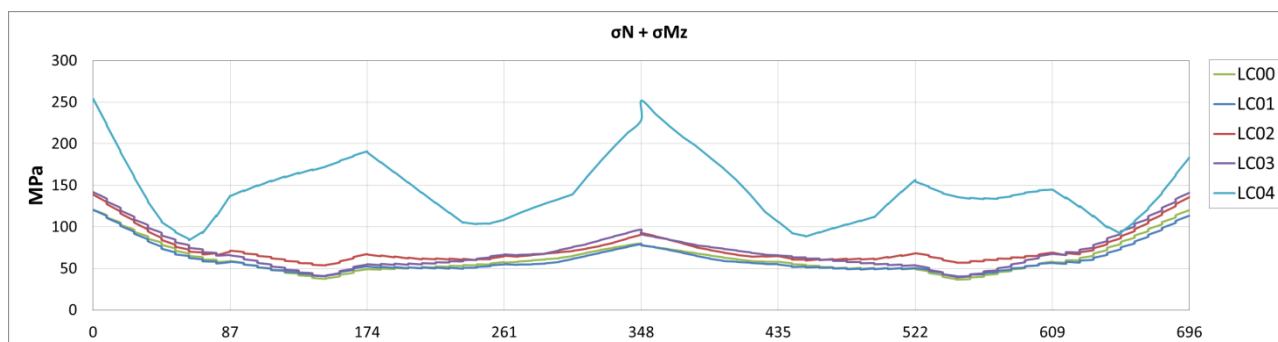
Spenningsfordeling langs broen er vist i Figur 8-1 til Figur 8-3.

LC01, lastilfelle hvor trafikklasten er skalert opp 1.35, gir høyest bøyenspenning om svak akse. Også lastilfelle LC02 hvor naturlastene er skalert opp 1.60 gir store spenninger.



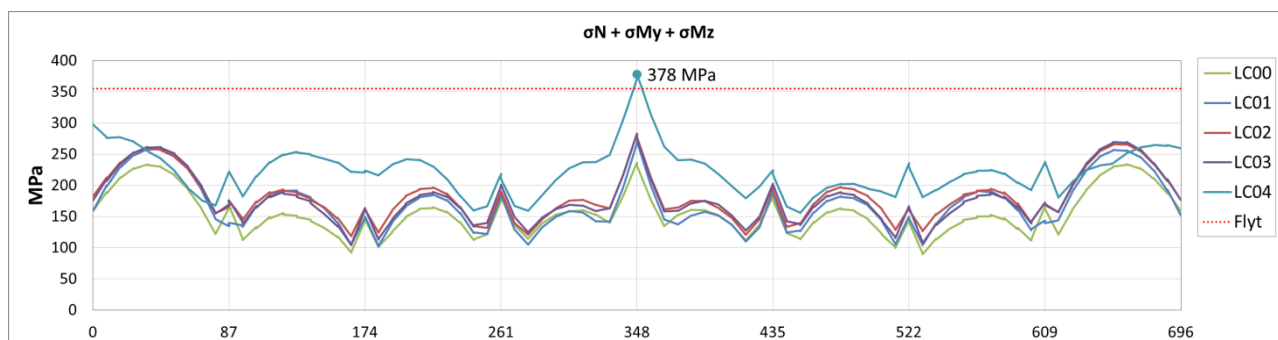
Figur 8-1: Spenningsfordeling svak akse

LC04, dvs lastilfelle med skipsstøt, gir størst maksimal spenning fra bøyemoment om sterk akse.



Figur 8-2: Spenningsfordeling sterk akse

Absolutt maks spenning oppstår ved skipspassasjen ved skipsstøt. Verdien anses som konservativ da den er en kombinasjon av absolutt maxima for normalspenning og bøyenspenning om begge akser. Vi anser videre at denne lokale toppen er innenfor hva som kan håndteres med mindre lokal oppdimensjonering.



Figur 8-3: Total spenningsfordeling

Dimensjonerende krefter for de forskjellige opplagre er tabulert i Tabell 8-2 med tilhørende lasttilfelle.

Snitt/komponent	Opplager pongtong		Opplager skipspassasje		Opplager landfeste	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Lasttilfelle	LC04		LC04		LC04	
Kraftkomponent	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Aksialkraft [kN]	29 434	-13 818	27 880	-12 462	29 569	-13 840
Horizontal skjærkraft [kN]	5 798	-2 796	2 019	-3 118	6 317	-3 509
Vertikal skjærkraft [kN]	-3 946	-5 855	-2 781	-5 069	4 312	2 000
Torsjonsmoment [kNm]	127 458	-68 770	81 984	-50 224	172 508	-82 706
Horisontalt bøyemoment [kNm]	10 406	-123 004	19 074	-124 592	0	0
Vertikalt bøyemoment [kNm]	161 857	-103 285	181 956	-328 766	244 035	-401 925

Tabell 8-2: Dimensjonerende krefter

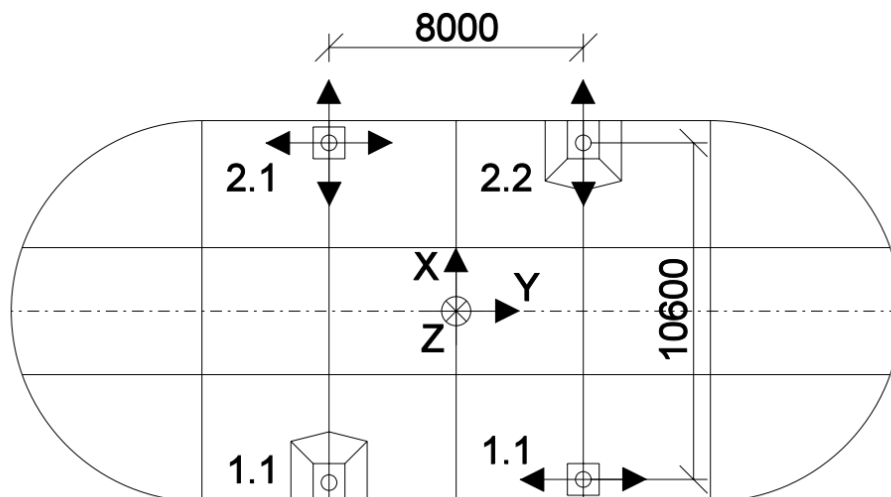
9. KRITISKE KOMPONENTER OG SNITT

I det følgende kapittel er beregninger og vurderinger gjort av forskjellige kritiske komponenter og snitt i broen.

9.1 OPPLAGER PONGTONG

Kraft- og momentkomponentene er lest av ved enden av bjelkeelementene som er koblet til pongtong nr. 3 fra land for LC04, se Tabell 8-2. Denne pongtongen er valgt fordi største kraftkomponent, horisontalt bøyemoment, er høyest her. Merk at dette er maksverdi i løpet av en tre timers kjøring for hver enkelt komponent. I virkeligheten vil ikke disse kreftene sammenfalle i tid, og beregninger hvor samtlige kombineres må derfor anses som svært konservative.

Lagerplassering og bevegelsesretninger fremgår på Figur 9-1. Oppleggspunktene er her tenkt ivarettatt med typiske brulager som også må overføre strekkrefter.



Figur 9-1: Lagerplassering og bevegelsesretninger

Globale oppleggskrefter er i etterfølgende sammenstilling regnet om til krefter per lager i henhold til skisse i Figur 9-1. Ekstremverdier i lager presentert i Tabell 9-1. Beregninger vedlagt i Vedlegg E.

Kraftkomponent	F_z	F_{xy}
Maksimal trykk med samtidig resulterende horisontalkraft	15 277 kN	27 016 kN
Maksimal trykk med samtidig resulterende horisontalkraft	-12 327 kN	27 016 kN

Tabell 9-1: Lagerkrefter pongtong

Trykkraft og tilhørende horisontalkraft kan tas opp i lager med en separat skjærforbindelse i henhold til diskusjon med mulig leverandør. Strekkraft kan tas opp med f. eks. 18 stk M39 bolter, alternativt kan færre og grovere bolter benyttes, f. eks. grove strekkstag som anordnes i senter av oppleggsaksen.

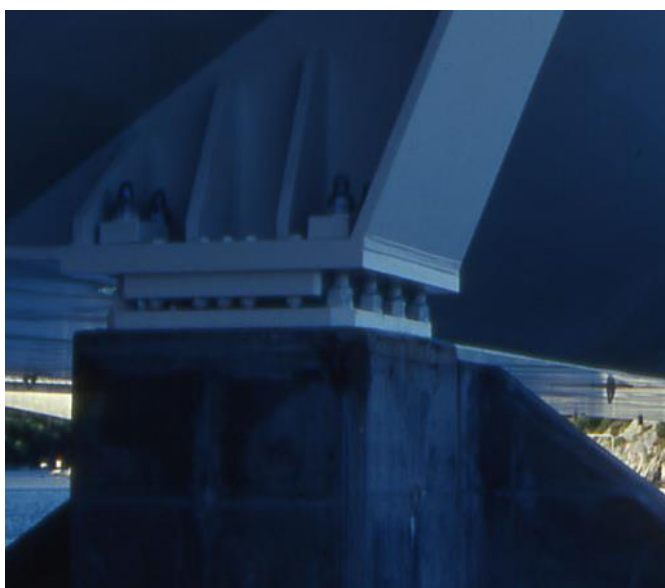
Årsak til strekkraft:

Det ses at strekk skyldes M_x (torsjon) i brobjelken samt M_y (horisontalt bøyemoment fra vertikale laster). Bidragene er av størrelsesorden like store. Bjelken er i analysene modellert med et sentrisk momentstivt opplegg på pongtong. Ved å innføre to opplegg på pongtong i samsvar med tegning, vil bidraget til strekkraft fra M_y bli betydelig redusert. Likeledes forventes en mer detaljert vurdering av

kreftenes samtidighet i tid å redusere strekkraften. Det må likevel påregnes at et visst behov for strekk i lager vil bestå. Prinsippet er et fravik fra krav i Håndbok N400 kapittel 12.4.4. angående opptredende last i lager.

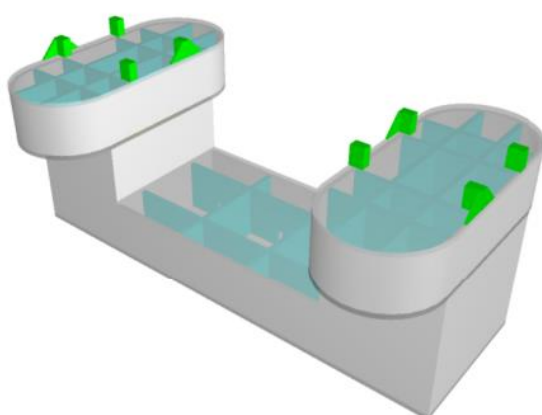
Det ses også at horisontalkraften er av betydelig størrelse. Den har sin hovedårsak fra F_x samt M_z . F_x trenger en strengt tatt ikke føre ned i pongtongene, og betraktning er derfor betydelig til sikker side.

Forholdet oppfattes som noenlunde tilsvarende situasjonen som en har på Nordhordlandsbrua. Der er også benyttet strekkager med bolter i denne posisjonen, se Figur 9-2.



Figur 9-2: Lager Norhordlandsbroen

9.2 OPPLAGER SKIPSPASSASJE



Figur 9-3: Opplager skipspassasje

Kraft- og momentkomponentene er lest av ved enden av bjelkeelementet som er koblet til skipspassasjen for LC04, se Tabell 8 2. Merk at dette er maksverdi i løpet av en tre timers kjøring for hver enkelt komponent. I virkeligheten vil ikke disse kreftene sammenfalle i tid, og beregninger hvor samtlige kombineres må derfor anses som svært konservative.

Kraft- og momentoverføring fra brobjelke til pongtong ivaretas ved 4 oppleggspunkt. I oppleggspunktene blir kraftoverføring ivaretatt med hjelp av kontaktrykk og/eller bolter. Oppleggspunktene er i denne fasen plassert geometrisk likt som på de typiske pongtongene, se Figur 9-1. Dette valget bør vurderes nærmere og optimaliseres videre i en eventuell senere fase.

Globale oppleggskrefter er i etterfølgende sammenstilling regnet om til krefter pr punkt. Ekstremverdier i lager presentert i Tabell 9-2. Beregninger vedlagt i Vedlegg E.

Kraftkomponent	F_z	F_{xy}
Maksimal trykk med samtidig resulterende horisontalkraft	12 296 kN	19 203 kN
Maksimal trykk med samtidig resulterende horisontalkraft	-9 746 kN	19 203 kN

Tabell 9-2: Lagerkrefter skipspassasje

Kreftene er tenkt overført via fastboltet konsoll. Trykk- og horisontalkraft overføres direkte mellom stålplate og betong, mens strekkraft overføres vi bolter, f. eks. 14 stk M39 bolter pr lagerpunkt.

Overføring av M_y fra brobjelke til oppleggspunkter på pongtong krever at det anordnes langsgående indre skott i brobjelke for lokal avstiving av denne. Fortrinnsvis over lengde mellom opplagerakse 1 og 2 i skisse på Figur 9-1 samt videreføring anslagsvis 4-6 meter. Langsgående skott kommer i tillegg til typiske tverrskott som anordnes over oppleggsakse på hver pongtong.

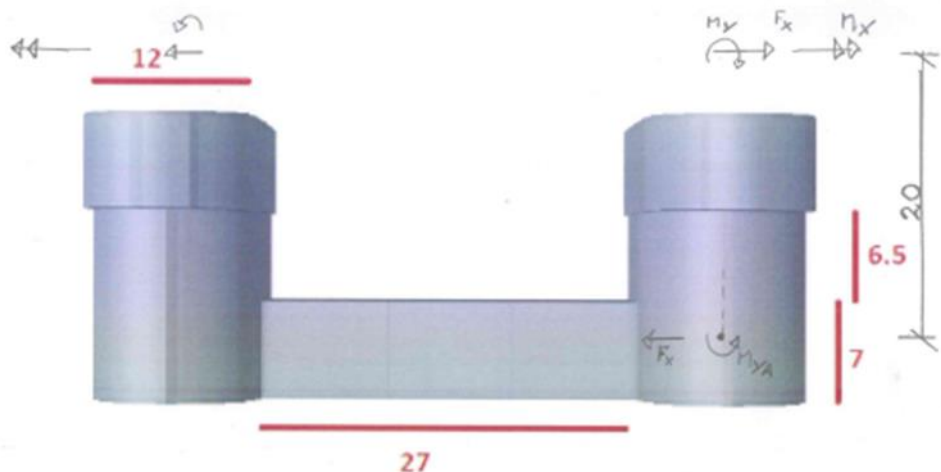
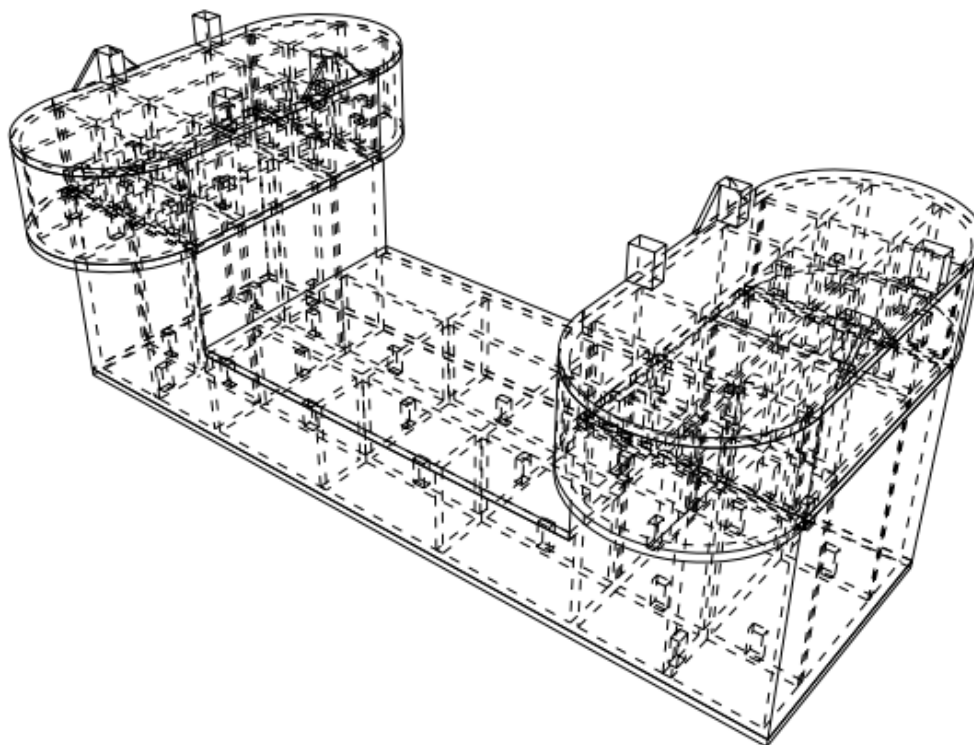
9.3 SKIPSPASSASJE

Kapasitetskontroll av skipspassasje baseres på samme krefter som opplagrene, se Tabell 8-2. Nok en gang presiseres dette at individuelle ekstremverdier er påført uten hensyn til samtidighet/sammenfall i tid, og at dette må antas konservativt.

Bjelken (undervannsdelen av skipspassasjen) kontrolleres konservativt mot opptredende laster i brobjelke. Likeledes er moment i nedsenket bjelke beregnet som moment i ved brobjelke pluss kraft i brobjelke multiplisert med arm.

Laster i innfesting fra klaffebro er ikke inkludert i ovenstående. Lastene fra klaffebro opptrer i svært liten grad samtidig med de opplistede lastene fra brobjelken for øvrig. En enkel vurdering viser da at laster fra klaffebro ikke blir kritiske for den nedsenkete bjelkens kapasitet.

System og lastprinsipper fra brobjelke fremgår i Figur 9-4Figur 9-1Figur 3-1. Det er lagt til grunn av det anordnes indre skott i pongtonger som plasseres i samsvar med oppleggspunkt mot brobjelke. Skottene vil dermed kunne overføre lastvirkning som skivekrefter. Nedsenket bjelke og pongtonger anordnes med langsgående skott på flenser slik at kapasitet for disse kan medtas med nødvendig medvirkende flensbredde. Det er lagt til grunn tykkelse 500 mm av yttervegger.



Figur 9-4: Skisse av skipspassasje med hovedmål og snittkrefter

Det er i etterfølgende oppstilling gjort en konservativ kontroll av kapasitet for nedsenket bjelke, se Vedlegg F for detaljer.

Konklusjoner:

- Nedsenket bjelke har kapasitet for bøyning M_y om brubjelkens svake akse. Armeringsbehov i bruddgrense for overføring av bøyemoment i punkt a fra M_y og F_x tilsvarer slakkarmering $\varnothing 32$ c100 i to lag i bjelkens topp- og bunnflens. En slik slakkarmering er lite hensiktsmessig å legge inn, og det anbefales derfor at det brukes spennkabler. 19 taus kabler cc 600 mm har kapasitet for opptak av full ytre kraft. Kombinasjon av F_x og M_y oppfattes som utført konservativt.
- Overføring av strekkraft F_x gir liten tilleggsarmering i bjelken.

- Nedsenket bjelke har kapasitet for overføring av torsjonsmoment M_x fra brubjelken. Nødvendig areal torsjonsarmering utgjør cirka 4000 mm²/m basert på trykkdiagonal 45 grader. Mengde kan reduseres ved å hensynta spennarmering eller ved å endre beregningsvinkel for trykkdiagonal.
- Nødvendig areal torsjonsarmering utgjør cirka 2000 mm²/m basert på trykkdiagonal 45 grader.
- M_z i brubjelke kan overføres med tilsvarende prinsipp som for M_y . Kraft-/armeringsbehov i bjelkens vertikale sideflater er betydelig lavere enn i bjelkens topp- og bunnflens.

9.4 BOLTEFORBINDELSER

Prinsippet i bolteforbindelsene bygger på to forutsetninger:

- 1) Boltene skal være forspent i tilstrekkelig grad, slik at de alltid står i strekk
- 2) All trykk- og skjærkraft skal tas av grout/betong

Pga det store arealet vil det være tilstrekkelig kapasitet i grout/betong til å oppfylle forutsetning nr 2.

Dimensjonerende krefter for bolteforbindelsene vil være lik som for opplager over pongtongene, se Tabell 8-2.

Ekstremverdier i bolter oppsummert i Tabell 9-3 (bruddgrense basert på midlere lastfaktor 1.35). Beregninger vedlagt i Vedlegg C.

Dimensjonerende krav kritisk bolt	
Forspenning [kN] for å unngå trykk	3 020 kN
Kapasitet [kN]	7 915 kN

Tabell 9-3: Dimensjonerende krav bolter

Her kan optimalisering av antall bolter og plassering gjøres på et senere tidspunkt. Det må også gjøres lokalvurdering av struktur i tilknytning boltene mtp. bearing, tear-out osv., men på nåværende tidspunkt anses dette som tilstrekkelig for å vise at bolteforbindelser er prinsipielt løsbart.

MERK: Beregninger er gjort for bolteforbindelser rett over pongtongene. På et senere stadium vil plassering av skjøtene andre steder vurderes, typisk i null-punkt for bøyemomenter. Det vil trolig gi betydelig mindre krefter i boltene. Med andre ord er det ikke avgjørende for konseptet at skjøtene er plassert rett over pongtongene.

Bolteforbindelsen kan dermed eksempelvis bestå av 48 stk M100 bolter per skjøt.

9.5 VIPPEBRO

Statiske beregning av hydraulisk kraft, motvekt og fortunghet er presentert i Vedlegg D.

For å unngå kiling i situasjoner hvor vippebroen skal åpnes/lukkes er relativ bevegelse mellom opplagerpunkter studert for en maks tillatt miljøkondisjon på følgende måte:

- Grense vind åpning av vippebro, $U = 20 \text{ m/s}$
- Justert vindhastighet for beregning av bølgehøyde, $U_A = 0.71U^{1.23} = 28.3 \text{ m/s}$
- Strøklengde brukt for beregning av bølgehøyde*, $F_e = 2\,502 \text{ m}$
 *Lengste strøklengde fra Noomas lokalitetsrapport Duesund.
- Signifikant bølgehøyde gitt ved $H_s = 5.112 \times 10^{-4} U_A \sqrt{F_e} = 0.7 \text{ m}$
- Tilhørende topphetsperiode $T_p = 0.06238^3 \sqrt{U_A F_e} = 2.6 \text{ s}$
- Koblet med 10 års strøm, $U_{strøm} = 0.72 \text{ m/s}$

Relativ bevegelse mellom opplagerakser	
Forlengelse/kompresjon	+/- 9 mm
Torsjon	1.10 grader
Rotasjon om vertikal akse	0.01 grader

Tabell 9-4: Relative bevegelser

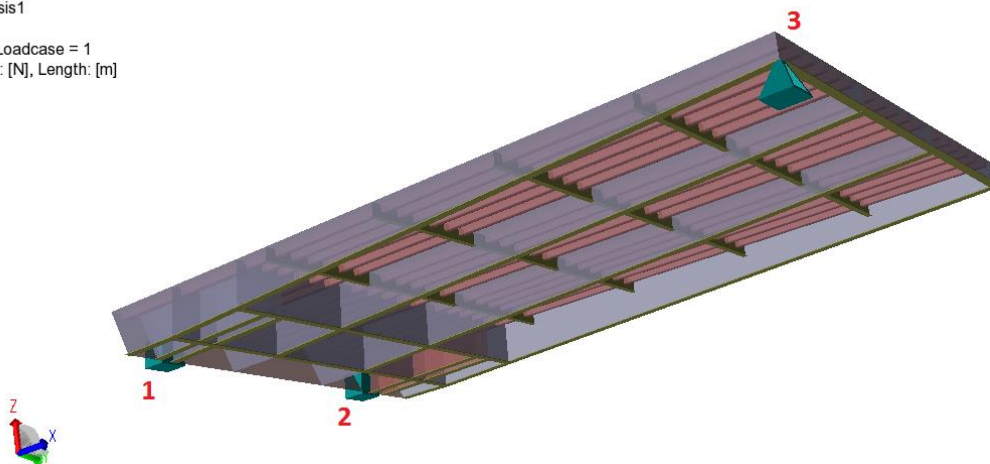
Forlengelse/kompresjon, samt rotasjon om vertikal akse, blir tatt opp av tverrfuger. Torsjon må vurderes mot elastisk deformasjon, for å vurdere om oppløft vil finne sted.

Ved antagelse om uendelig stiv vippebro, vil relativ rotasjon på 1.1 grader gi oppløft i ett hjørne:

$$\Delta z_{TORSJON} = b \times \sin(\alpha) = 13 \text{ meter} \times \sin(1.1) = 250 \text{ mm}$$

Antagelsen er at dette oppløftet er innenfor elastisk nedbøyning av vippebroen. For å få bekreftet dette er rampen av vippebroen modellert med opplagre som vist i Figur 9-5.

28 Nov 2016 10:30
 vippebro
 Analysis1
 LC1
 FEM Loadcase = 1
 Force: [N], Length: [m]



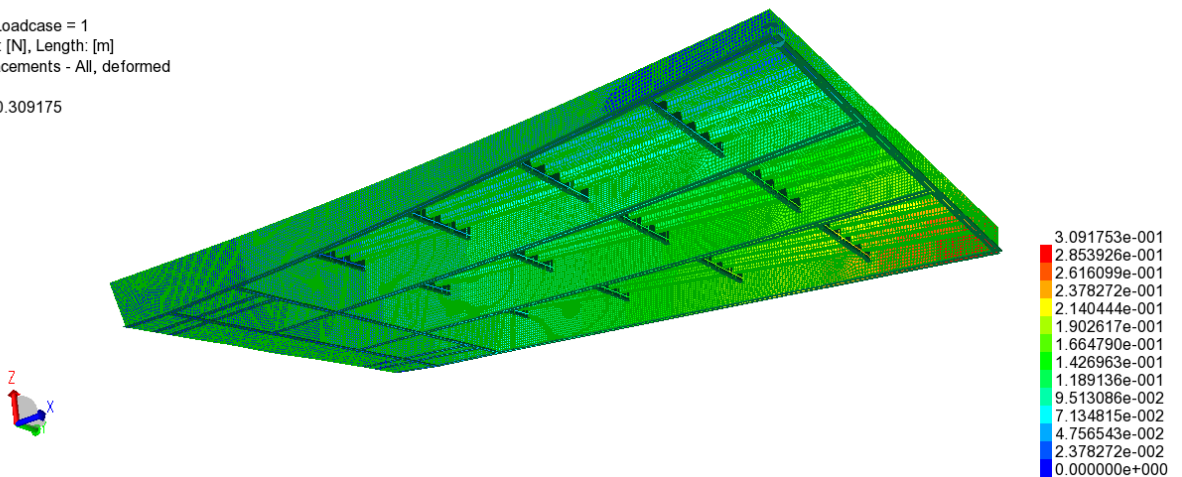
Figur 9-5: Modell vippebro

- 1 og 2: Fast innspent
3: Rotasjonsfri

Nedbøyning av motsatt hjørne fra opplager 3 som følge av egenvekt alene, $\Delta z_{EGENVEKT}$, er 309 mm, se Figur 9-6.

$\Delta z_{EGENVEKT} > \Delta z_{TORSJON} \rightarrow$ Torsjonen er innenfor elastisk kapasitet av vippebroen.

28 Nov 2016 10:34
vippebro
Analysis1
LC1
FEM Loadcase = 1
Force: [N], Length: [m]
Displacements - All, deformed
Min: 0
Max: 0.309175



Figur 9-6: Nedbøyning vippebro

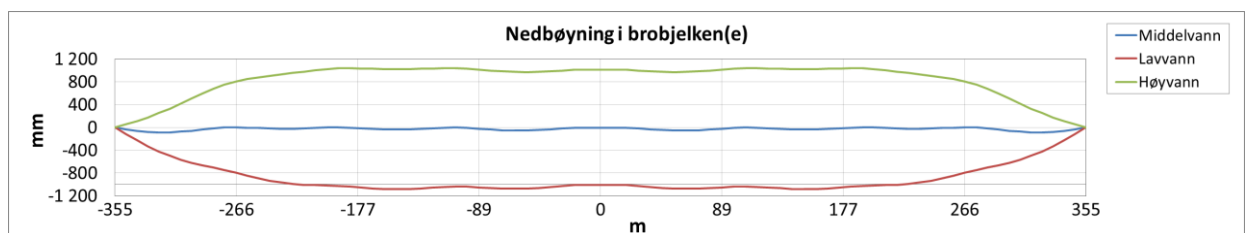
10. SENSITIVITETER

10.1 VANNSTANDSSTIGNING

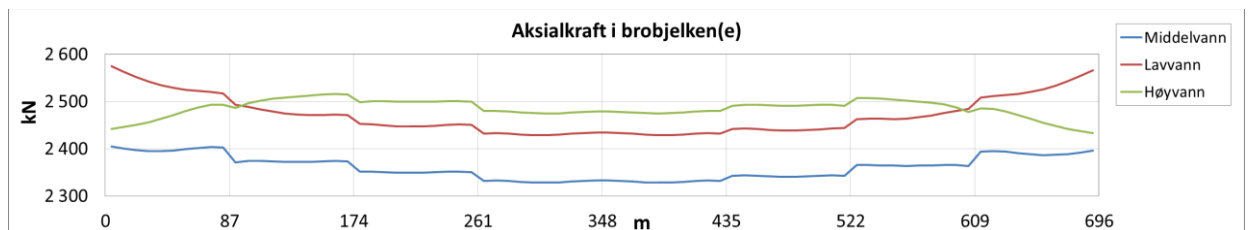
Høy- og lavvann er undersøkt ved å påføre økt/-redusert oppdrift på pongtongene og skipspassasjen tilsvarende +/- 1 meter vannstand. Statistiske resultater er presentert i Figur 10-1 til Figur 10-3.

Fribord for første pongtong ved land vil økes/reduceres med ca 20 cm ved lav/høyvann.

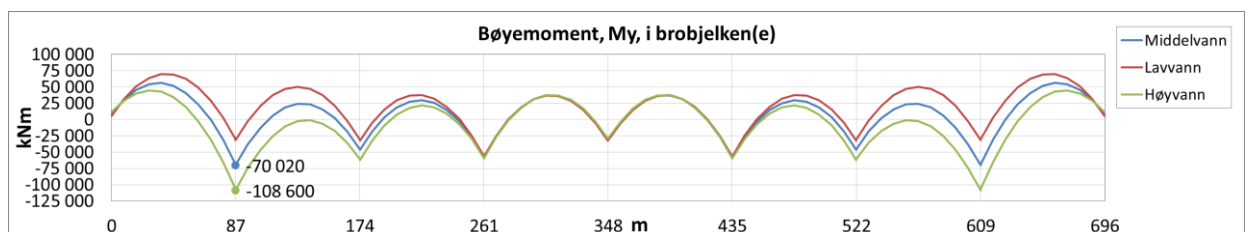
Kritisk lastkomponent og lokasjon er horisontalt bøyemoment over første pongtong fra land. Her øker momentet med ca 38 500 kNm ved høyvann. Dette vil indusere ca 40 MPa i brobjelken, og er derfor innenfor kapasitet (se Figur 8-3).



Figur 10-1: Vannstands nivå, XZ



Figur 10-2: Vannstands nivå, Fx



Figur 10-3: Vannstands nivå, My

10.2 VIND- OG BØLGERETNING

MERK: Uendret fra revisjon 1. Tallverdien er ikke dermed ikke oppdaterte, men den relative effekten er uendret.

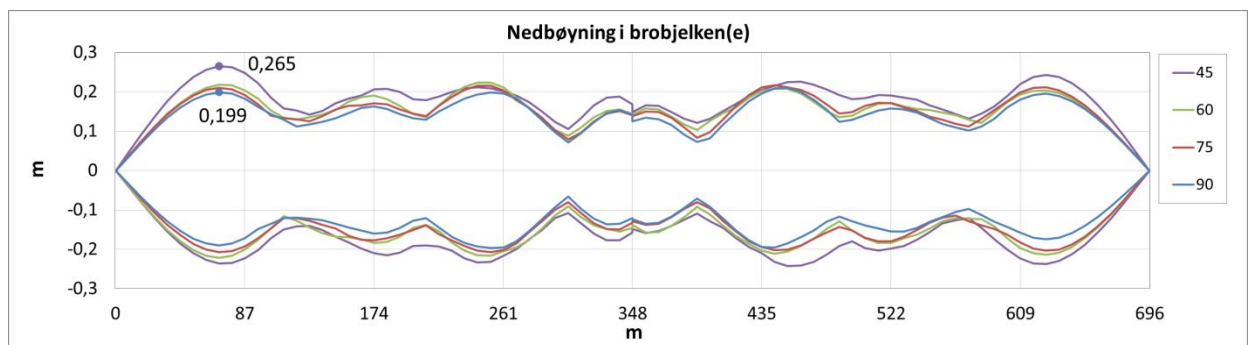
Sensitivitetsstudie har blitt utført på hovedretning for vind- og bølgelaster.

10.2.1 45, 60, 75 OG 90 GRADER

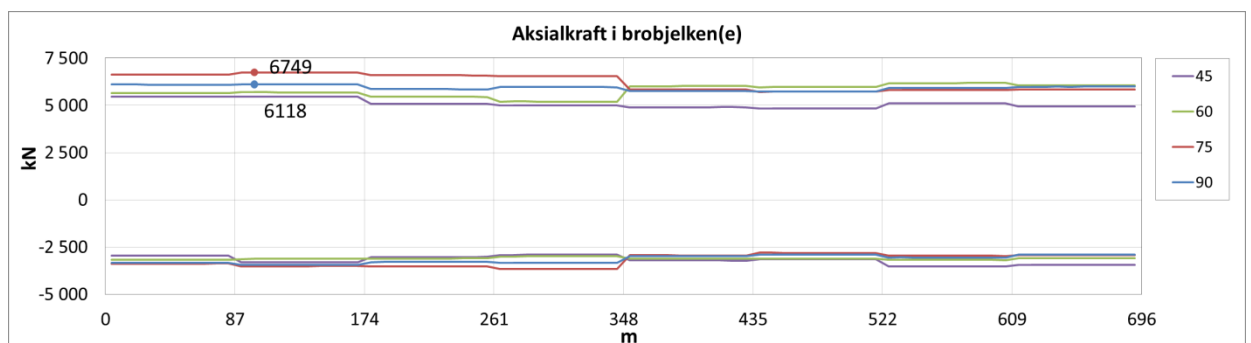
Retningene 45, 60, 75 og 90 grader er studert, hvor 90 grader er normalt på brobuens inside. Maksimum- og minimumsverdier for nedbøyninger og krefter er etablert fra 3 timers stormkondisjoner. Merk at samme 100 års returverdier for vind og bølgehøyder (tilsvarende geografisk retning sørvest /5/) er brukt for alle fire retninger for å illustrere den relative effekten av retningsforskjellene. Resultatene er presentert ved grensekurver langs broen i Figur 10-4 til Figur 10-7.

Resultatene viser generelt at utslagene øker noe for skrå belastning, samtidig som det varierer noe mellom hvilken retning som gir de største verdiene. I de tilfeller hvor kreftene øker som et resultat av at lastene ikke står normalt på broen, er dessuten økningene små. Videre viser det seg at for retningene 60, 75 og 90 grader er resultatene tilnærmet like, og vi vet at pga begrensningene i fjorden er det usannsynlig å få bølger av denne størrelsen fra 45 grader/5/.

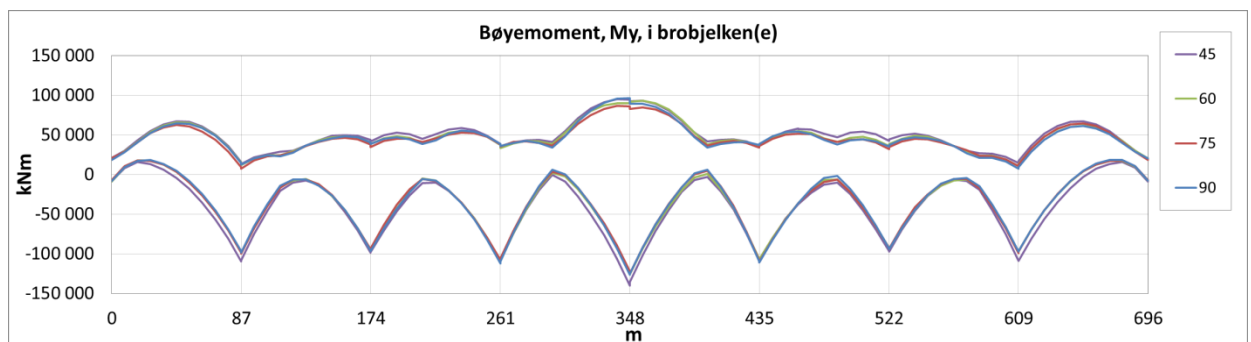
For å beskrive konseptets dynamiske kapasitet antas dermed miljølaster fra 90 grader, dvs normal på brobjelken, som gode nok. I en optimaliseringsprosess senere bør alle retninger, med tilhørende bølgehøyder og perioder studeres nærmere.



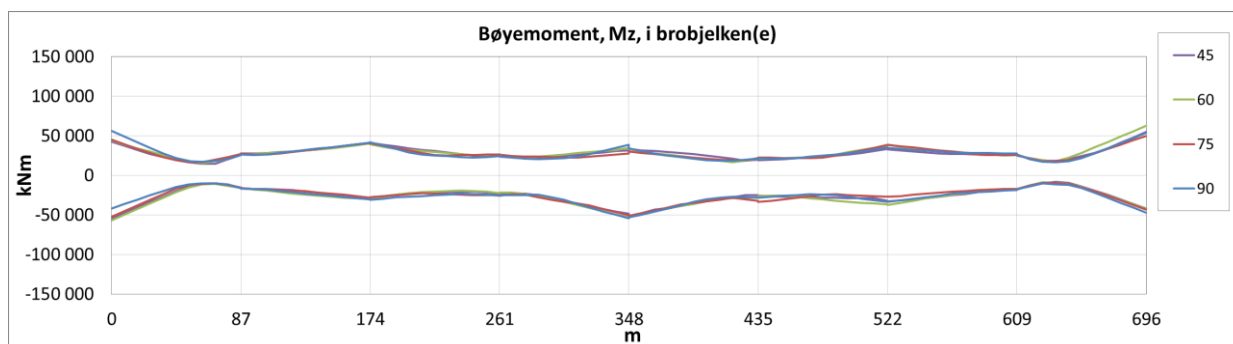
Figur 10-4: Nedbøyning, vind/bølgeretning 45-90 grader



Figur 10-5: Grensekurver aksialkraft, vind/bølgeretning 45-90 grader



Figur 10-6: Grensekurver bøyemoment M_y , vind/bølgeretning 45-90 grader



Figur 10-7: Grensekurver bøyemoment M_z , vind/bølgeretning 45-90 grader

10.2.2 270 GRADER

Vind- og bølger fra 270 grader, dvs normalt på brobuens utside, tilsvarer geografisk retning øst. Fra lokalitetsrapporten /5/ vet vi at forventet vindhastighet, bølgehøyder og -perioder fra denne retningen er betydelig mindre enn fra vest. Dette er også årsaken til at broen blir arrangert med buen vendt "inn" i fjorden.

Retning	Mot brobuens innside			Mot brobuens utside		
	NV	V	SV	NØ	Ø	SØ
Vind, 50 år [m/s]	30	30	30	18	24	30
Hs, 50 år [m]	0.6	1.0	1.2	0.2	0.5	0.8
Tp, 50 år [s]	1.8	2.6	3.1	1.2	1.9	2.4

Tabell 10-1: Utdrag fra lokalitetsrapport Duesund/5/

Da bølgelastene er proporsjonale med bølgehøyde, og vindlast med hastigheten opphøyd i andre, er det tydelig at miljølastene fra utsiden av buen er betydelig mindre. Det er på dette stadiet dermed ikke gjort analyser av disse retningene, da det ikke antas å gi kritiske utslag.

10.3 USYMMETRISK STRØMLAST

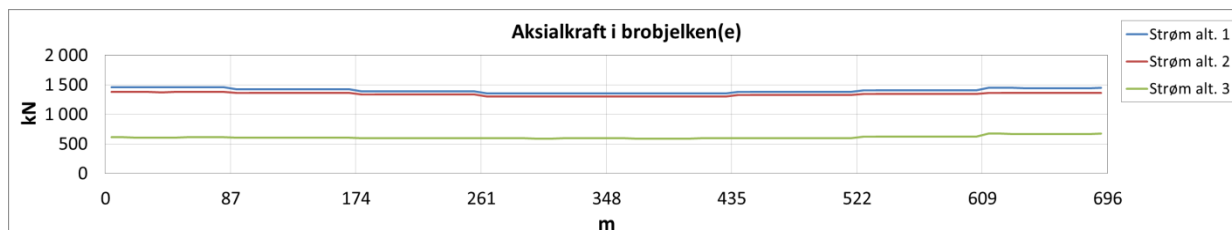
MERK: Uendret fra revisjon 1. Tallverdien er ikke dermed ikke oppdaterte, men den relative effekten er uendret.

Tre alternative strømprofiler er vurdert:

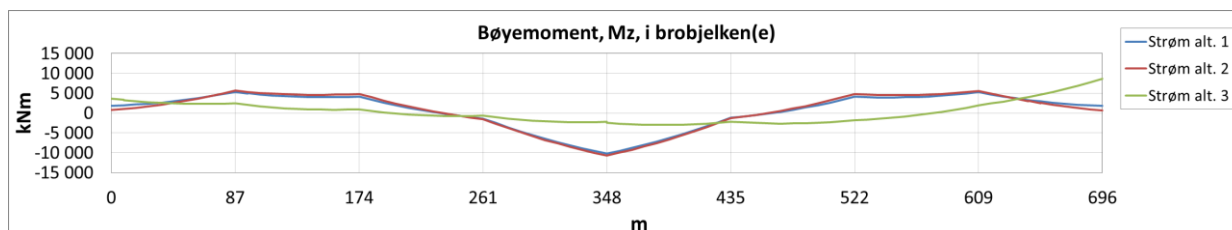
- 1) Jevn fordelt strømhastighet over hele lengden av broen
- 2) Jevn fordelt strømhastighet over midtre halvdel av broen
- 3) Skjærstrøm med jevn fordelt strømhastighet over hver halvdel av broen

Strømhastighet er satt til 1 m/s som beskrevet i Prosjekteringsgrunnlaget /10/.

Horisontale krefter fra statiske analyser av hvert tilfelle er vist i Figur 10-8 og Figur 10-9. De største kreftene forekommer ved jevnt fordelt last. Dette strømtilfellet antas dermed som dimensjonerende.



Figur 10-8: Aksialkraft, strømvariasjon



Figur 10-9: Vertikal bøyemoment Mz, strømvariasjon

10.4 ALTERNATIV VINDMODELERING

Det følgende beskriver øvelsen som ble gjort for å verifisere størrelsesorden av det vertikale bøyemomentet. Da dette i all hovedsak er induisert av vind og strøm, har det blitt gjort en alternativ vurdering av vindkraften som en statisk jevn fordelt last basert på forenklet metode angitt i NS-EN 1991-1-4:200+NA:2009 kapittel 8.3.2 (strøm er allerede påsatt som en statisk jevnt fordelt last).

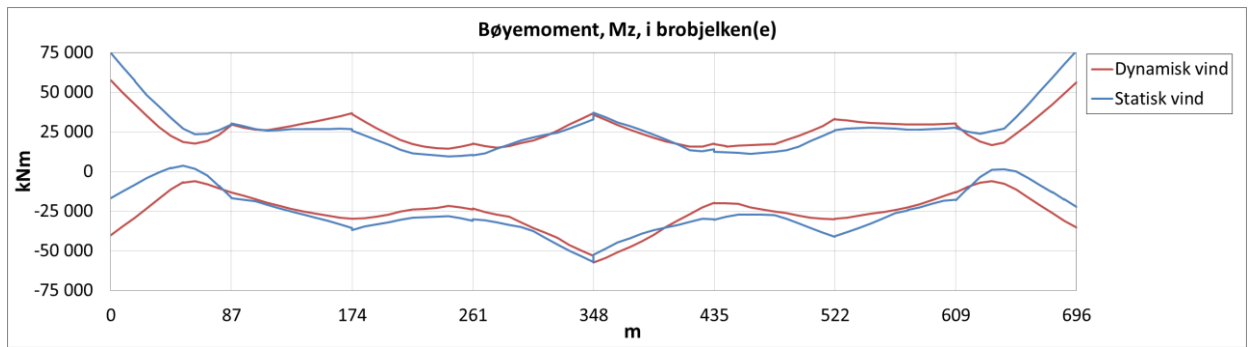
Vindkraften per lengdemeter av broen er i dette alternativet satt til:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho v_b^2 C A_{ref,x}$$

Hvor:

- $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$
- $v_b = 31.7 \text{ m/s}$ (100 års middelvind)
- $C = 4.26$ (utledet fra interpolasjon av verdier i Tabell 8.2, basert på B/D-forhold på $13/4 = 3.25$)
- $A_{ref,x} = 4 \text{ m}$ (høyde på tverrsnitt lik 4 meter, åpent rekkverk)

Grensekurver for fordeling av vertikalt bøyemoment for denne metoden vs. den vanlige dynamiske modelleringen (vind modellert som tidsserier) er vist på Figur 10-10. Andre laster inkluderer karakteristiske verdier av egenvekt, strøm og bølger. Som grafene viser er det ikke store forskjeller, noe som er med å underbygge at vindmodelleringen slik den opprinnelig er gjort er god nok på dette stadiet.

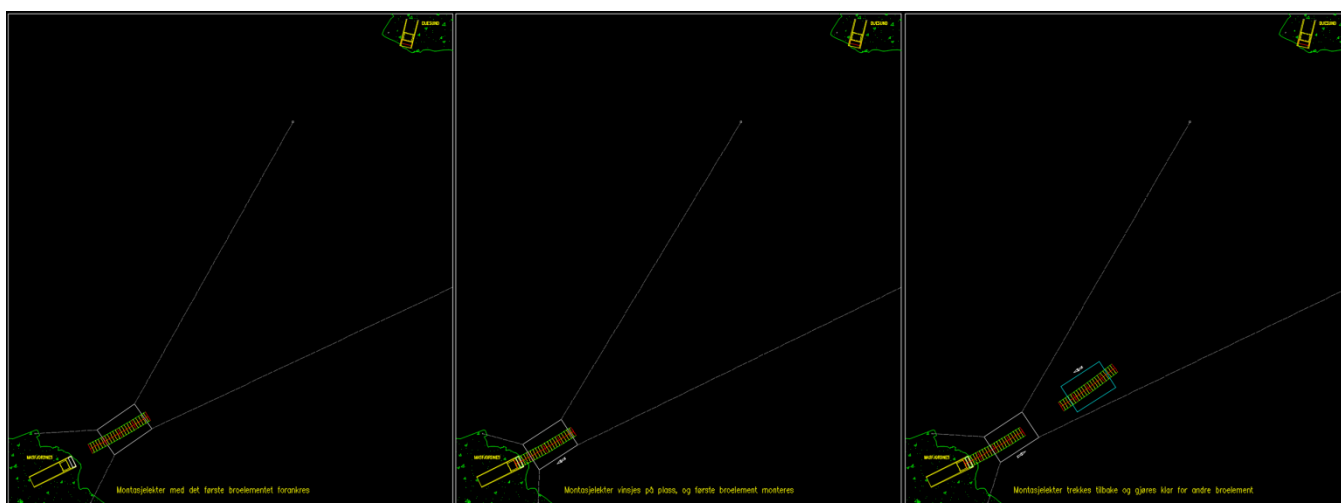


Figur 10-10: Alternativ vindmodellering

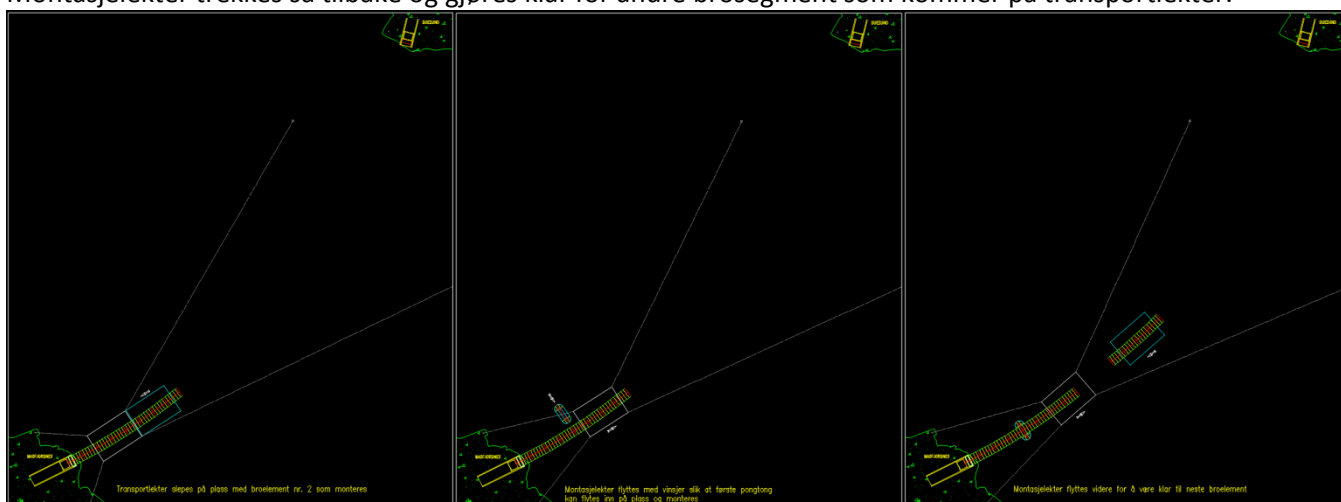
11. REFERANSER

- /1/ Håndbok N400 *Bruprojektering – Prosjektering av bruer, ferjekaier og andre bærende konstruksjoner*, Statens vegvesen, 2015
- /2/ NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009 *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner – Del 1-4: Allmenne laster – Vindlaster*, 2009
- /3/ NS-EN 1991-1-5:2003+NA:2008 *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner – Del 1-5: Allmenne laster – Termiske påvirkninger*, 2008
- /4/ NS-EN 1990:2002/A1:2005+NA:2016 *Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*, 2016
- /5/ *Lokalitetsrapport Duesund*, Noomas, 2012
- /6/ DNVGL-OS-C101 *Design of offshore steel structures, general – LRFD method*, DNVGL, 2016
- /7/ DNV-RP-C205 *Environmental Conditions and Environmental Loads*, DNVGL, 2014
- /8/ *Sea Level Change for Norway: Past and Present Observations and Projections to 2100*, Nansensenteret/Bjerknessenteret og Kystverket, 09.09.2015
- /9/ *Kollisjonslaster for skipspassasje i flytebro*, DNV GL, 19.10.2016
- /10/ *Prosjekteringsgrunnlag Forprosjekt*, Rev. 01, LMG Marin, 04.10.2016
- /11/ E-mail fra Arve Lepsøe, DNV GL, datert 21.10.2016

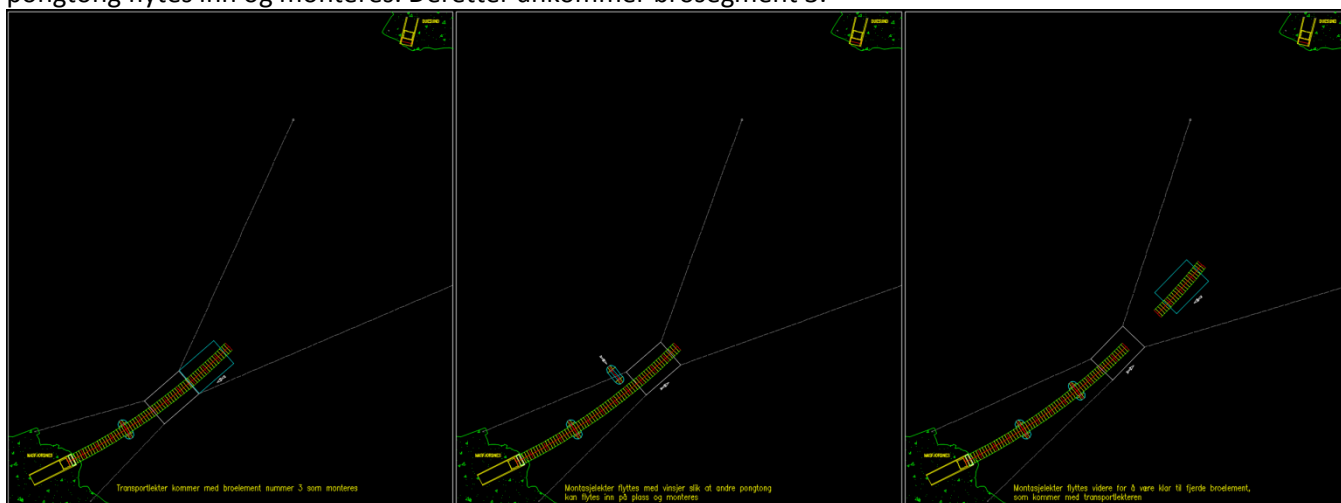
VEDLEGG A: SAMMENSTILLING, ALTERNATIV 1

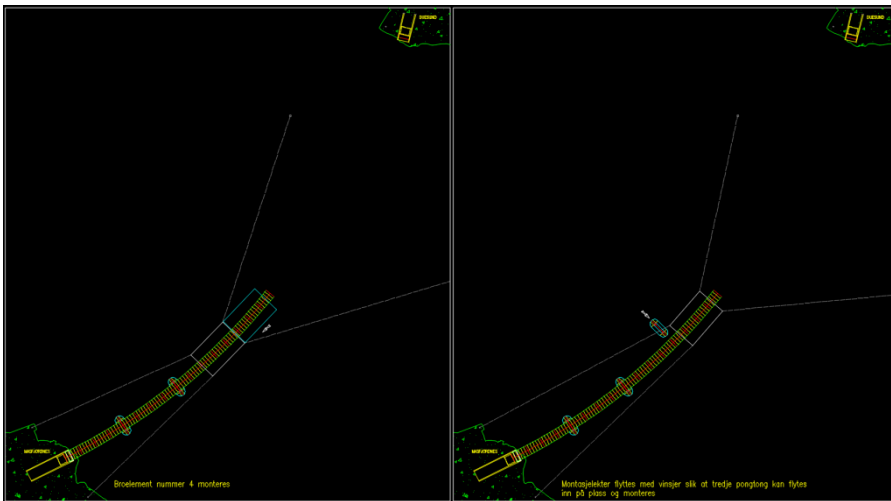


1 - 3) Montasjeleker med første brosegment forankres, vinsjes på plass og første brosegment monteres til land. Montasjeleker trekkes så tilbake og gjøres klar for andre brosegment som kommer på transportleker.



4 - 6) Transportleker slepes på plass med brosegment 2. som monteres. Montasjeleker vinsjes så ut og første pongtong flytes inn og monteres. Deretter ankommer brosegment 3.

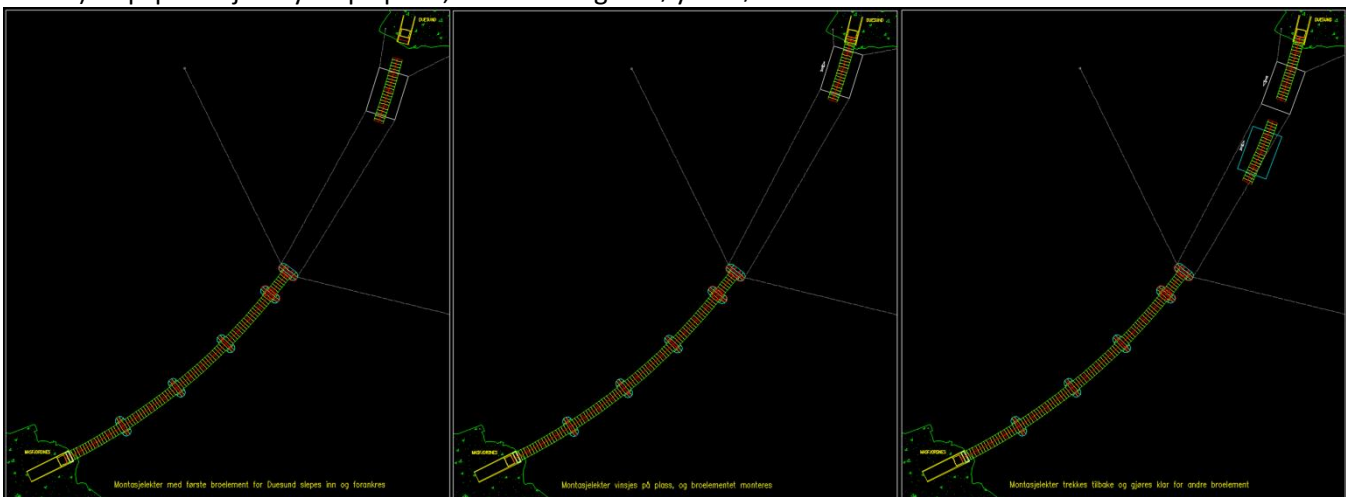


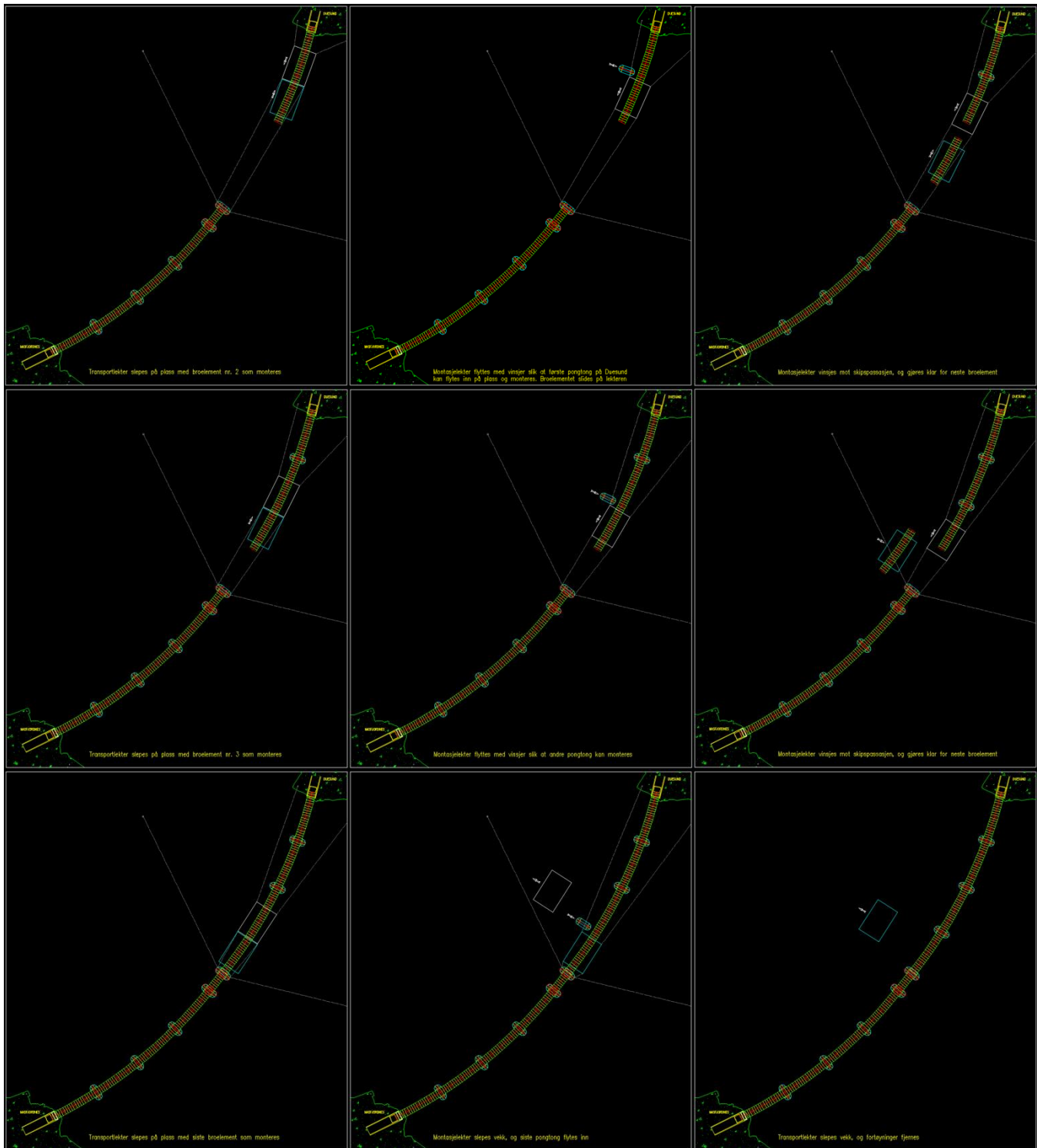


7 – 11) Brosegmenter og pongtonger monteres på tilsvarende vis



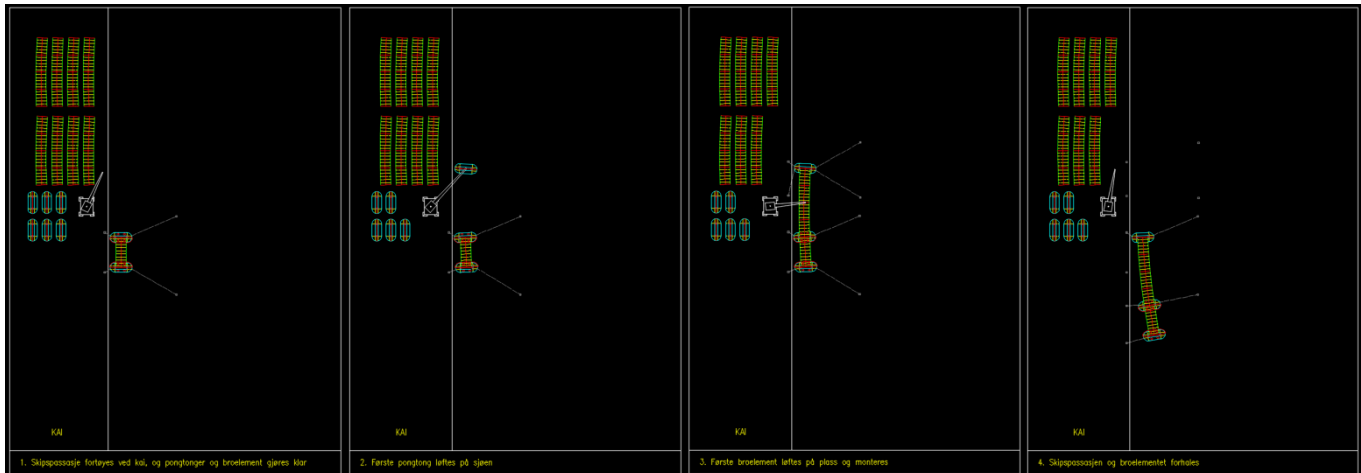
12 -15) Skipspassasjen flytes på plass, monteres og fortøyes. Første ende fra land er nå klar.



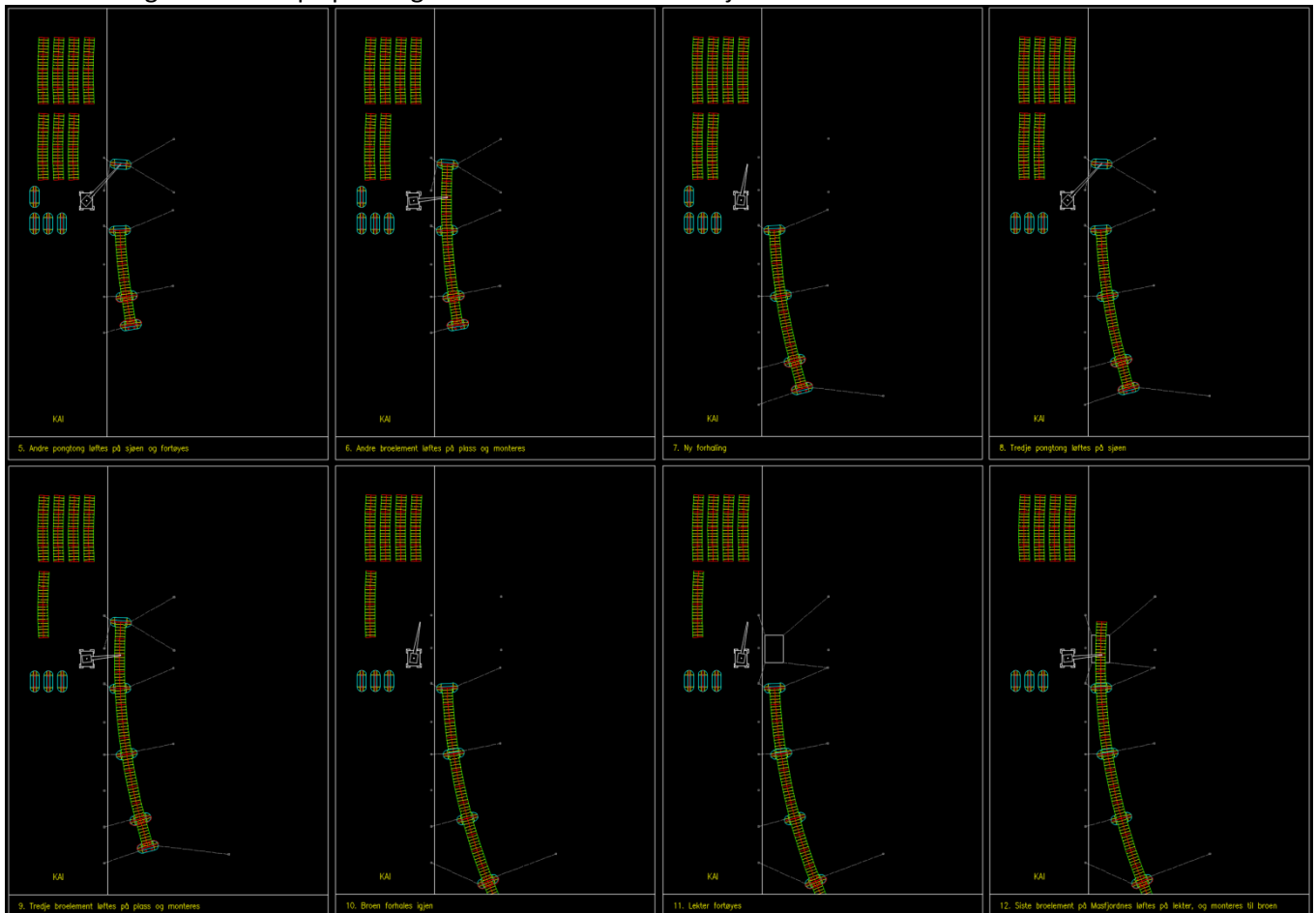


16 – 27) På tilsvarende vis monteres brosegmentene fra motsatt landfeste.

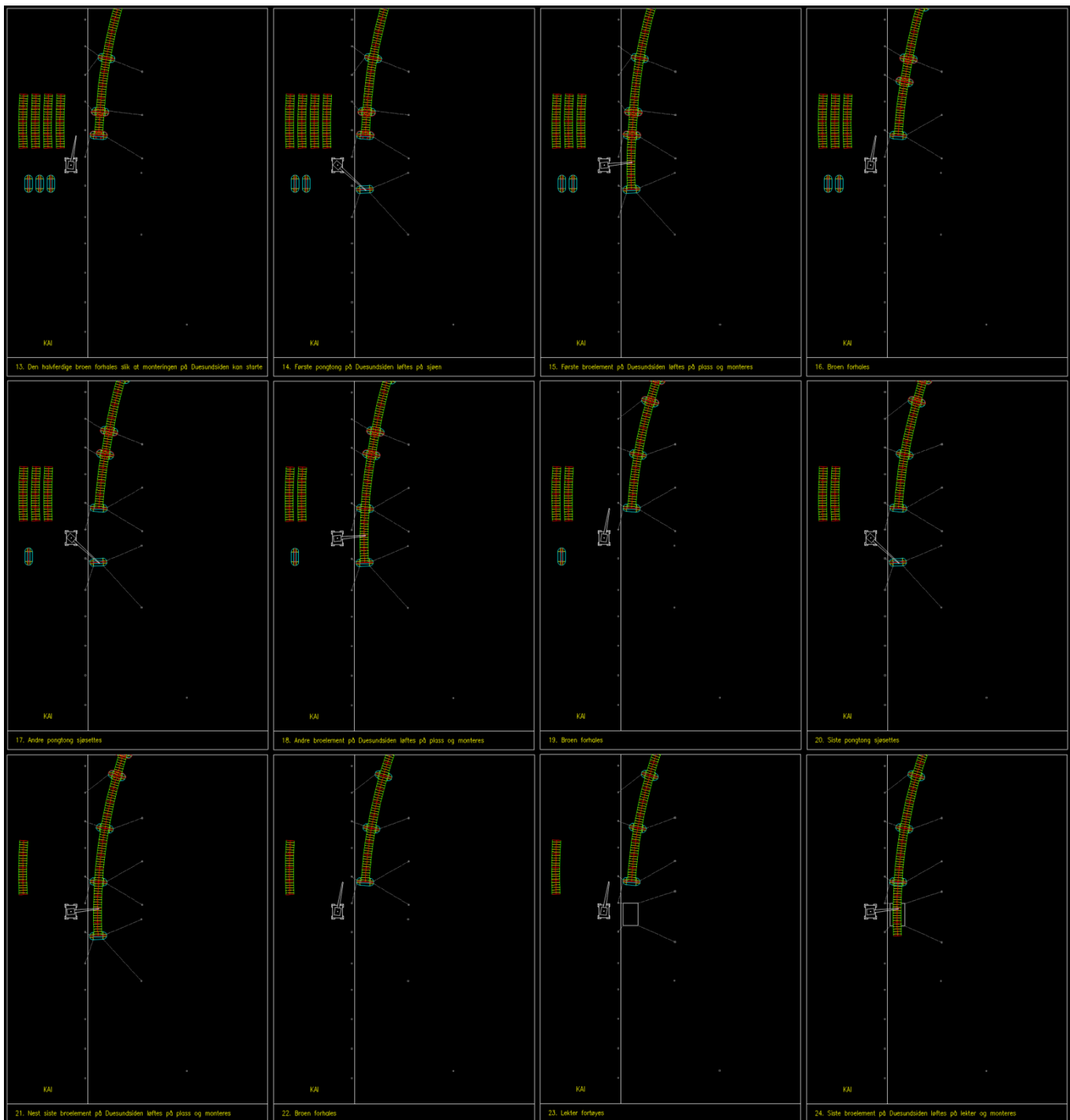
VEDLEGG B: SAMMENSTILLING, ALTERNATIV 2



1 – 4) Skipspassasje fortares ved kai, og brosegment og pongtonger gjøres klar. Første pongtong løftes på sjøen, før første brosegment løftes på plass og monteres. Hele konstruksjonen fortales.

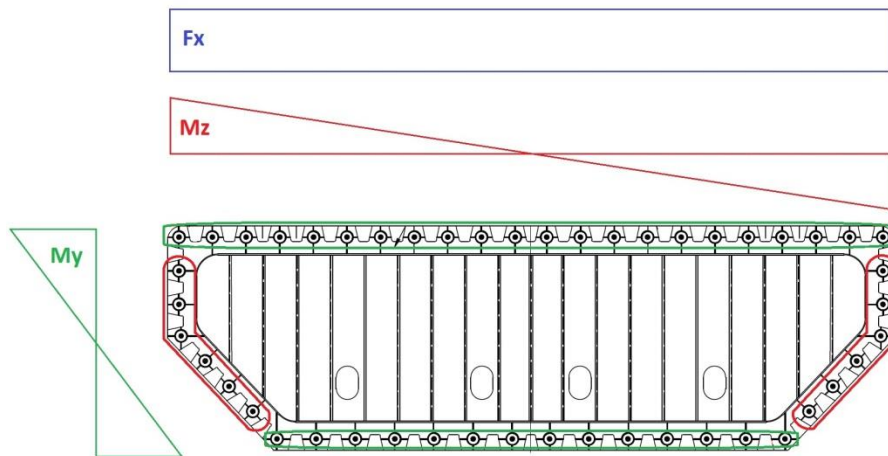


5 – 12) På tilsvarende vis løftes og monteres alle pongtonger og brosegment på plass.



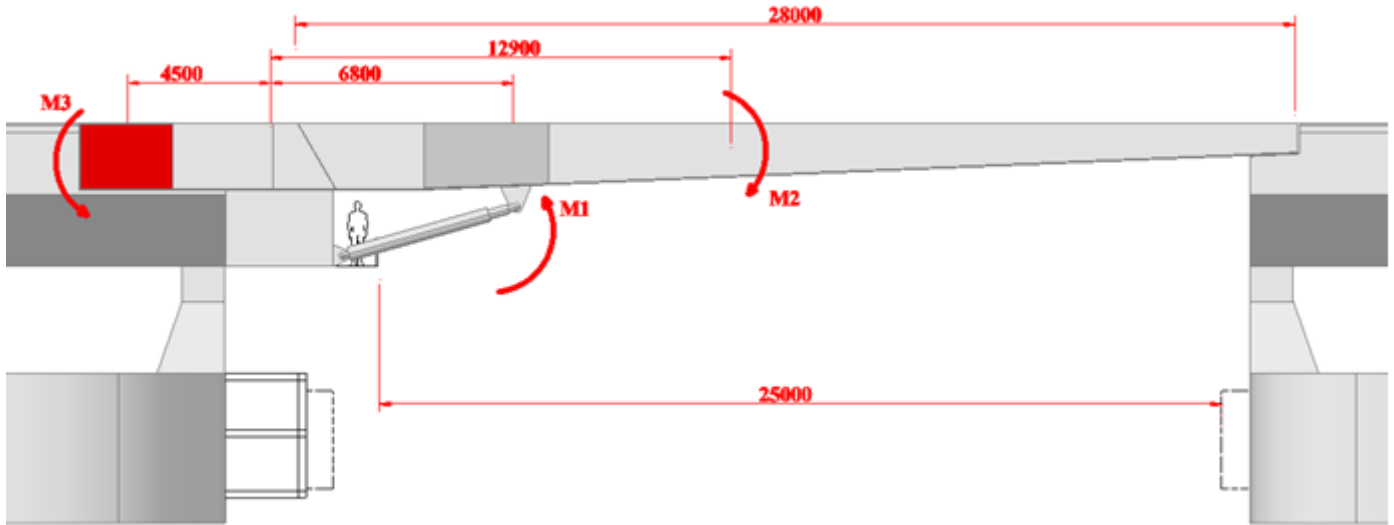
13 – 24) Når en side er ferdig forhalles den halvferdige broen slik at monteringen på den andre siden kan starte. Dette skjer så på tilsvarende vis til broen er komplett, før broen i sin helhet slepes på plass og monteres til landfestene i hver ende.

VEDLEGG C: KAPASITET BOLTER



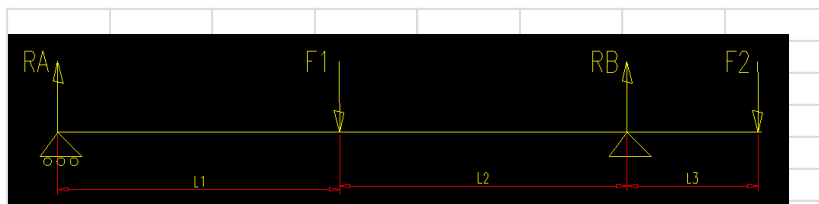
y_{NA}	6,3 m		
z_{NA}	1,8 m		
Total kraft:	F_x [N]	M_y [Nm]	M_z [Nm]
Max	29 434 000	10 406 000	161 857 000
Min	-13 818 000	-123 004 000	-103 285 000
F_x:			
Lastbærende bolter			48
Maks last per bolt [N]:			613 208
Min last per bol Min [N]			-287 875
M_y:			
		OPPE	NEDE
Lastbærende bolter:		22	14
Maks last per bolt [N]:		3 106 162	4 881 111
Min last per bol Min [N]		-262 778	-412 937
M_z			
		VENSTRE	HØYRE
Lastbærende bolter		6	6
Maks last per bolt [N]:		4 281 931	4 281 931
Min last per bolt [N]:		-2 732 407	-2 732 407
Total kraft kritisk bolt:		$F_x + M_y$	$F_x + M_z$
Maks kraft kritisk bolt [N]		5 494 319	4 895 140
Min kraft kritisk bolt [N]		-700 812	-3 020 282
Dimensjonerende krav			
Forspenning [N]:		700 812	3 020 282
Påkrevd kapasitet strekk[N]:		6 195 131	7 915 422
Eksempel boltestandard 12.9, M105 :			
Standard:	ISO 898-1:2009		
Property class:		42 623	
Bruddlast		8 070 kN	
Lastfaktor		1,00	
UF:		0,98	

VEDLEGG D: VIPPEBRO



Cylinder capacity	40 t	x 9,81=	392 kN
Amount of cylinders	2		
Cylinder arm	6,8 m		
Moment M1	5337 kN*m		
Bridge weight	110,0 t	x 9,81=	1079 kN
Bridge COG	12,5 m		
Moment M2	13489 kN*m		
Counterweight	195 t	x 9,81=	1913 kN
Counterweight COG	4,5 m		
Moment M3	8608 kN*m		
Volume	24,8 m ³		
Cast iron density	7,9 t/m ³		
M1+M3 > M2	456 kN*m		

Restmoment positivt → løftkraft sylinder ok!



F1	1079	kn	Bridge weight	
F2	1913	kn	Counterweight	
L1	14	m		
L2	14	m		
L3	4,5	m		
Rb=(F1*L1+F2*(L1+L2+L3))/(L1+L2)			2760	kn
Ra=(F1*L2+F2*L3)/(L1+L2)>100kN			232	kn
F=Ra-F1-F2+Rb			0	

Fortunghet på oppleggspunkt er >100kN

VEDLEGG E: OPPLAGERKREFTER

Lastvirkning på opplager typiske pontonger, akse 2-4, 7-9													
Positiv vertikallast = trykk													
Lager		1.1 Fx	1.1 Fy	1.1 Fz	1.2 Fx	1.2 Fy	1.2 Fz	2.1 Fx	2.1 Fy	2.1 Fz	2.2 Fx	2.2 Fy	2.2 Fz
Avstand tverretning bru, a	m	8											
Avstand lengderetning bru, b	m	10,6											
<i>Snittkrefter brobjelke (karakteristiske)</i>													
Aksialkraft Hx	kN	29 500											
Horisontal skjærkraft Vy	kN	5 800											
Vertikal skjærkraft Vz (pos Vz gir trykk i lager)	kN	5 900											
Torsjonsmoment, Mx	kNm	128 000											
Bøyemoment om horisontal akse, My	kNm	123 000											
Bøyemoment om vertikal akse, Mz	kNm	162 000											
<i>Bidrag til lagerkraft</i>													
Fx, lengderetning bru, fra Hx/2 eller 0	kN	14 750			14 750			0			0		
Fy, tverretning bru, fra Vy/2 eller 0	kN		2 900									2 900	
Fz, vertikalt, fra Vz/4	kN			1 475			1 475			1 475			1 475
Fz, vertikalt, fra Mx/(2xa). Fortegn +-	kN			8 000			8 000			8 000			8 000
Fz, vertikalt, fra My/(2xb). Fortegn +-	kN			5 802			5 802			5 802			5 802
Fx, lengderetning bru, fra halve Mz, Mz/(2a) eller 0	kN	10 125			10 125								
Fy, tverretning bru, fra halve Mz, Mz/(2b) eller 0	kN		7 642									7 642	
Sum maks kraftverdier i lager	kN	24 875	10 542	15 277	24 875	0	15 277	0	0	15 277	0	10 542	15 277
Maksimal strekkverdi	kN			-12 327			-12 327			-12 327			-12 327
Lastene over er karakteristiske ekstremalverdier fra dynamisk analyse av brobjelke. Ekstremalverdier opptrer ikke samtidig, men i oppstilling er samtidighet til sikker side benyttet.													
Lastverdier i bruddgrense i hht NS-EN 1990													
			Fz	Fxy									
Maksimal trykk med samtidig resulterende horisontalkraft			15 277	27 016									
Maksimal strekk med samtidig resulterende horisontalkraft			-12 327	27 016									
Opptak strekkkraft: bolt M39, fasthet 10.9, Nr	kN	703											
Antall bolter strekkraft	n	17,5											

Lastvirkning på oppleggspunkter pontong ved seilingsløp, akse 5 og 6													
Positiv vertikallast = trykk													
Lager		1.1 Fx	1.1 Fy	1.1 Fz	1.2 Fx	1.2 Fy	1.2 Fz	2.1 Fx	2.1 Fy	2.1 Fz	2.2 Fx	2.2 Fy	2.2 Fz
Avstand tverretning bru, a	m	8											
Avstand lengderetning bru, b	m	10,6											
<i>Snittkrefter brobjelke (karakteristiske)</i>													
Aksialkraft Hx	kN	28 000											
Horisontal skjærkraft Vy	kN	2 100											
Vertikal skjærkraft Vz (pos Vz gir trykk i lager)	kN	5 100											
Torsjonsmoment, Mx	kNm	82 000											
Bøyemoment om horisontal akse, My	kNm	125 000											
Bøyemoment om vertikal akse, Mz	kNm	330 000											
<i>Bidrag til oppleggskraft i opplagerpunkter:</i>													
Fx, lengderetning bru, fra Hx/2 eller 0	kN	7 000			7 000			7 000			7 000		
Fy, tverretning bru, fra Vy/2 eller 0	kN		525			525			525			525	
Fz, vertikalt, fra Vz/4	kN			1 275			1 275			1 275			1 275
Fz, vertikalt, fra Mx/(2xa). Fortegn +-	kN			5 125			5 125			5 125			5 125
Fz, vertikalt, fra My/(2xb). Fortegn +-	kN			5 896			5 896			5 896			5 896
Fx, lengderetning bru, fra halve Mz, Mz/(4a) til 4 punkttopplegg	kN	10 313			10 313			10 313			10 313		
Fy, tverretning bru, fra halve Mz, Mz/(4b) til 4 punkttopplegg	kN		7 783			7 783			7 783			7 783	
Sum maks kraftverdier i lager	kN	17 313	8 308	12 296	17 313	8 308	12 296	17 313	8 308	12 296	17 313	8 308	12 296
Maksimal strekkverdi	kN			-9 746			-9 746			-9 746			-9 746
Lastene over er karakteristiske ekstremalverdier fra dynamisk analyse av brobjelke. Ekstremalverdier opptrer ikke samtidig, men i oppstilling er samtidighet til sikker side benyttet.													
Lastfaktor i bruddgrense i hht NS-EN 1990													
			Fz	Fxy									
Maksimal trykk med samtidig resulterende horisontalkraft			12 296	19 203									
Maksimal strekk med samtidig resulterende horisontalkraft			-9 746	19 203									
Opptak strekkkraft: bolt M39, fasthet 10.9, Nr	kN	703											
Antall bolter strekkkraft	n	13,9											

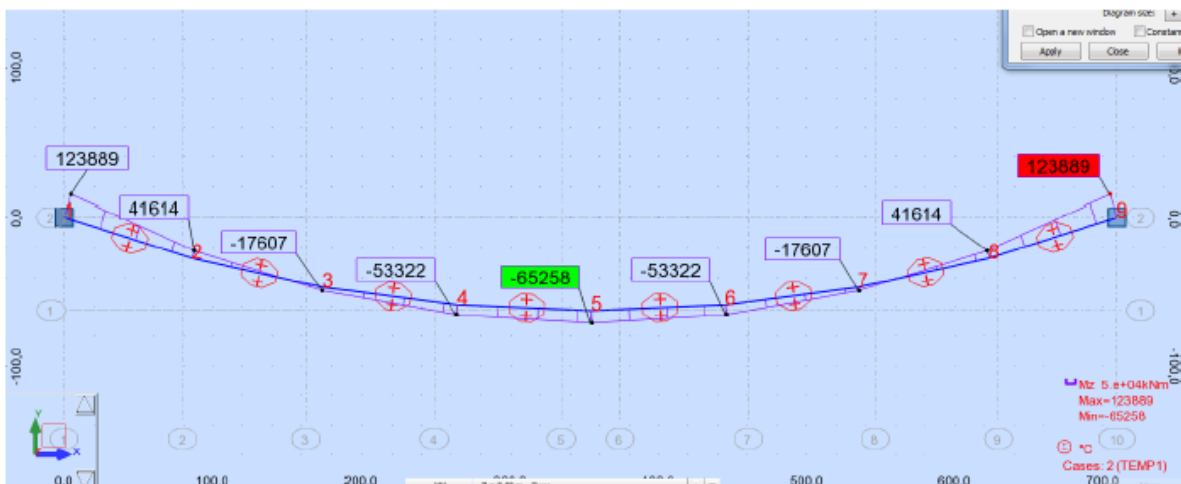
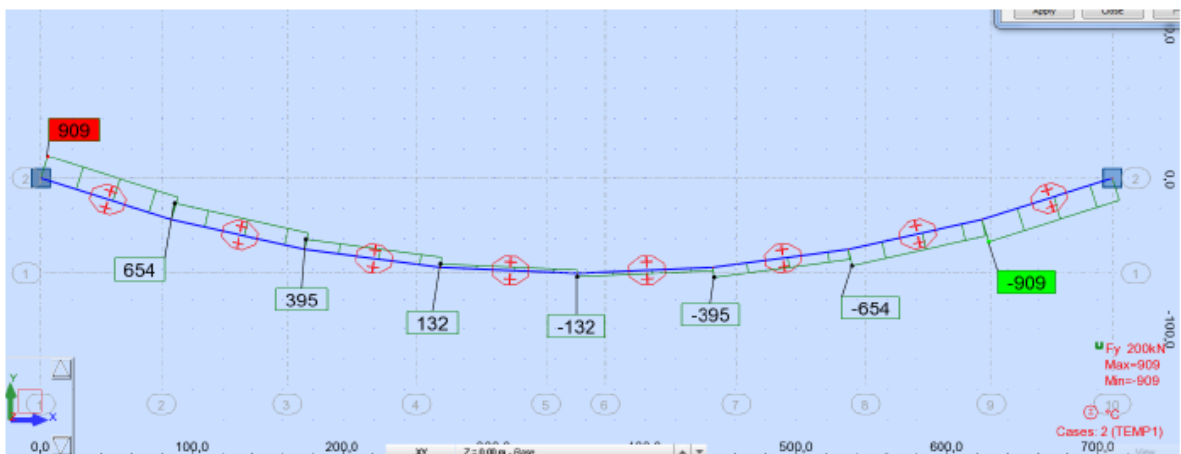
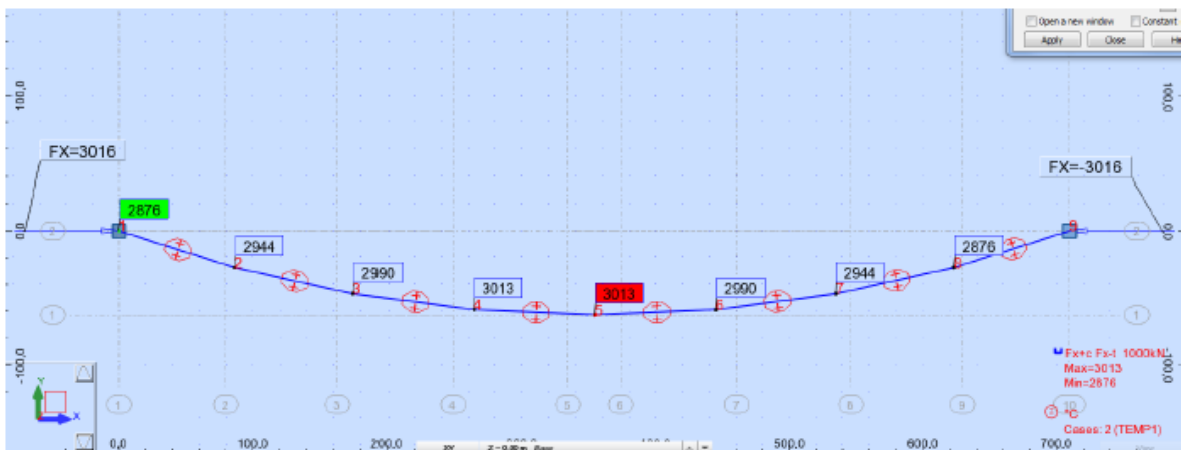
VEDLEGG F: KAPASITETSKONTROLL SKIPSPASSASJE

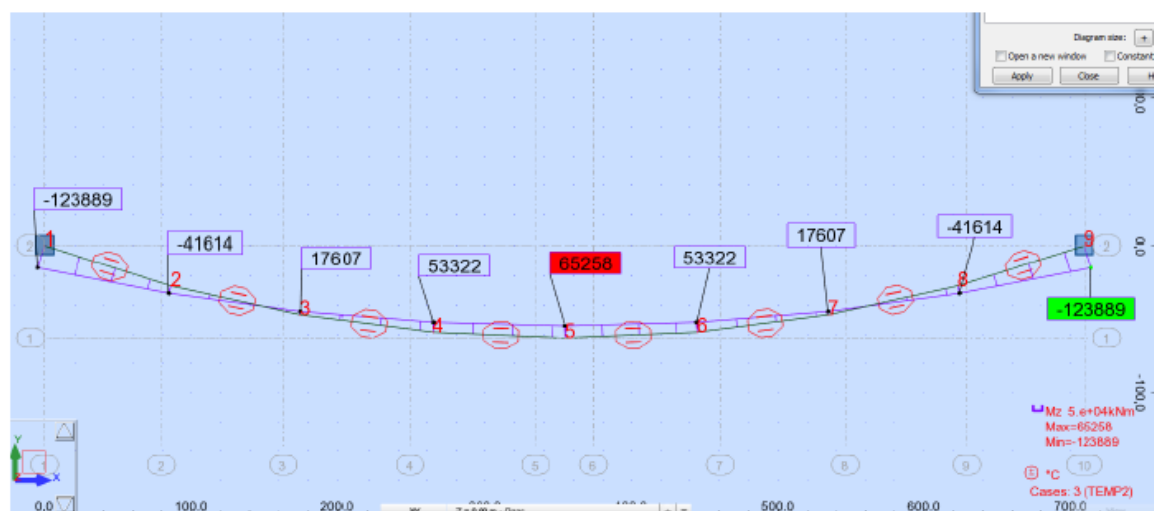
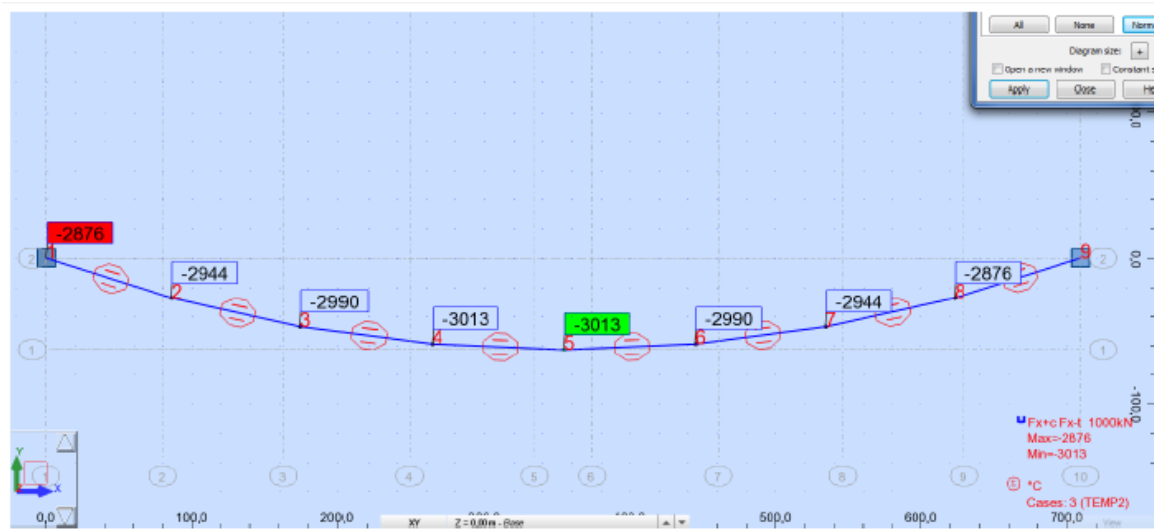
Kontroll av lastoverføring bjelke seilingsløp			
Avstand fra tyngepunkt brobjelke til tyngdepunkt nedsenk bjelke, a	m	20	
Tverrsnittshøyde nedsenket bjelke, senter toppflens - bunnflens, d	m	6	
Bredde nedsenket bjelke	m	12	
<i>Snittkrefter brubjelke (karakteristiske)</i>			
Aksialkraft Hx	kN	5 900	
Torsjonsmoment, Mx	kNm	32 000	
Bøyemoment om horisontal akse, My	kNm	127 000	
Moment og momentkapasitet i bjelke punkt a (se skisse)			
Mya (konservativ $F_x \cdot a + M_y$)	kNm	245 000	
Lastfaktor, midlere faktor miljø-, nytte- og varige laster		1,35	
Mya, bruddgrense	kNm	330 750	
Strekk-/trykkresultant i flenser bjelke under seilingsløp, T/S	kN	55 125	
Kraft kan fordeles over flenser med bredde b	m	12	
Kraft i flenser pr breddeenhet	kN/m	4 594	
Armering i strekkflens, fordelt til to lag	mm ² /m	5 280	Tilsvarende Ø32 c150
Aksialkraft i nedsenket bjelke			
Kraft pr 1m flens	kN/m	164	
Areal strekkarmering, pr flens pr lag	mm ² /m	188	OK, lite bidrag
Lastene over er karakteristiske ekstremalverdier fra dynamisk analyse av brobjelke. Ekstremalverdier opptrer ikke samtidig, men i oppstilling er samtidighet til sikker side benyttet.			
Kontroll av bjelke for torsjon:			
Torsjonskontroll av bjelke gjøres for Mx fra brubjelke			
Nedsenket bjelke bxd=12x7 meter med veggtykkelse 0,5 m			
Trykkapasitet 115000 kNm >> 5900, OK			
Beregnet torsjonsarmering: 4000 mm ² /m som kan fordeles til to lag i hver flens (vinkel trykkdiagonal 45 grader)			

VEDLEGG G: TEMPERATURLASTER

Resultater - jevnt fordelt temperaturvariasjon

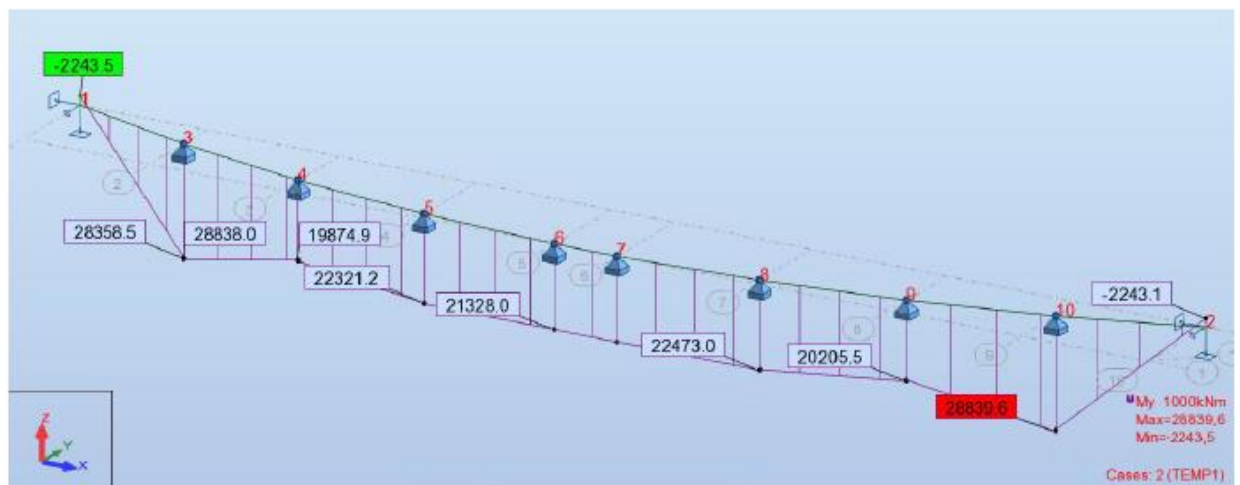
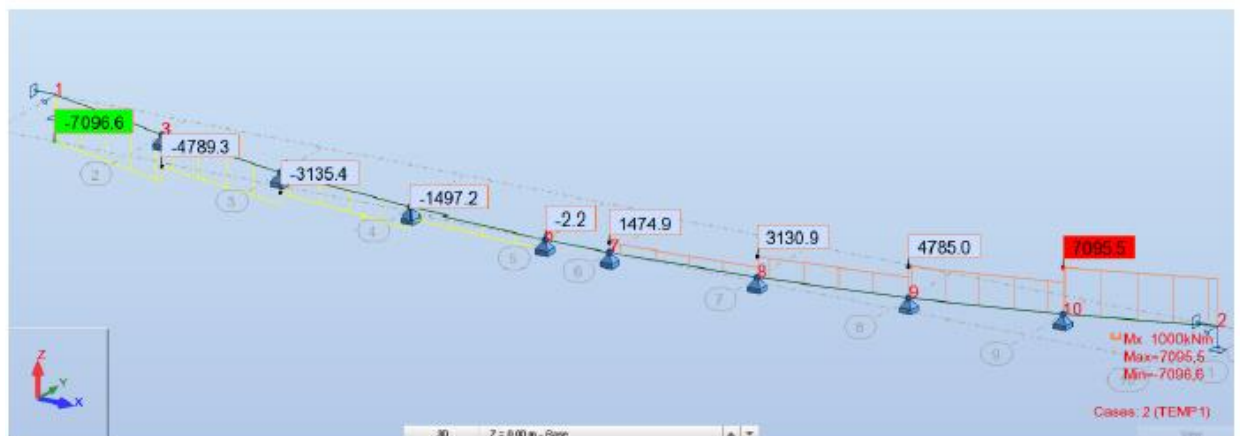
Case	Load type	List				
2:TEMP1	thermal load	4to11	TX=40,00	TY=0,0	TZ=0,0	MEMO:
3:TEMP2	thermal load	4to11	TX=-40,00	TY=0,0	TZ=0,0	MEMO:
4:TEMP3	thermal load	4to11	TX=0,0	TY=5,00	TZ=0,0	MEMO:

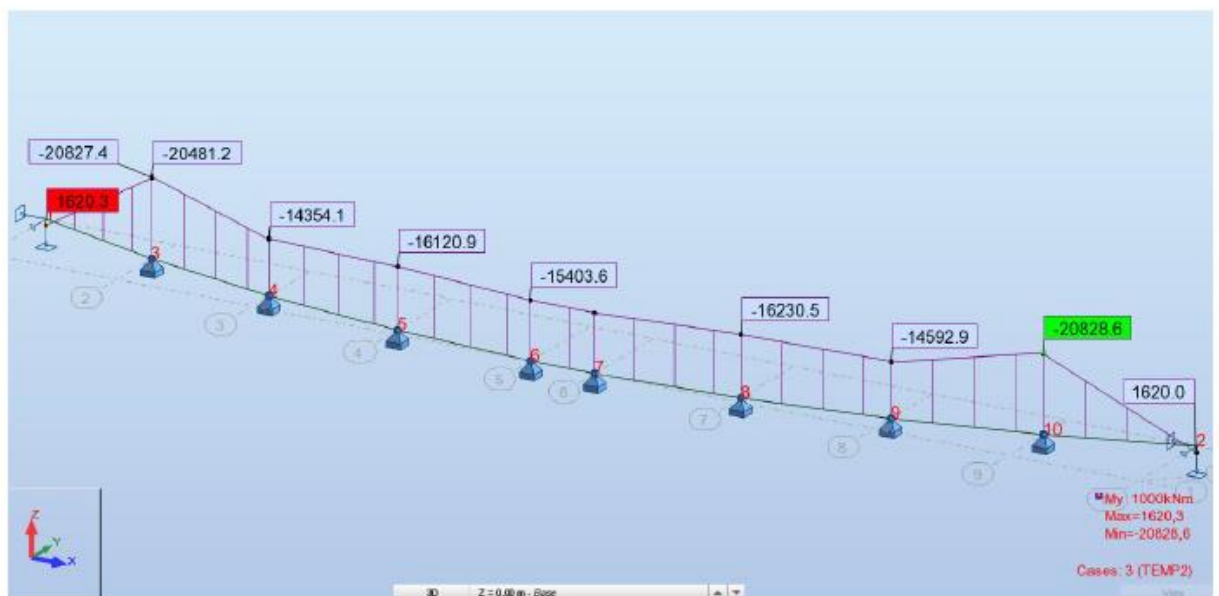




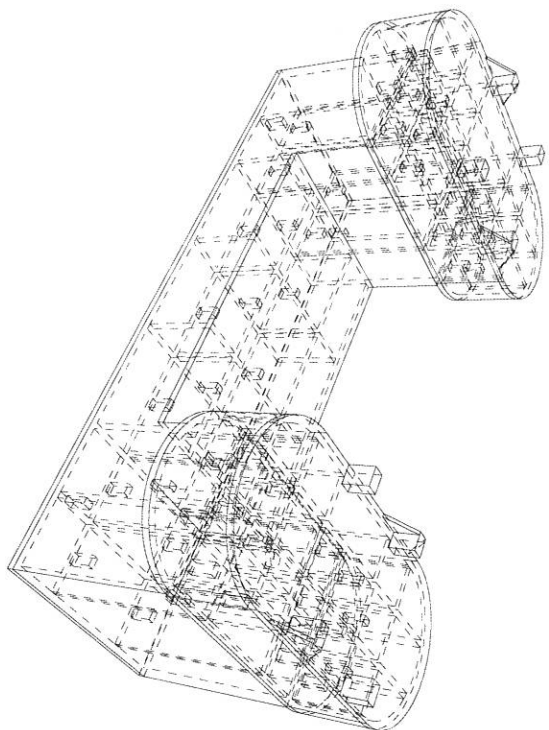
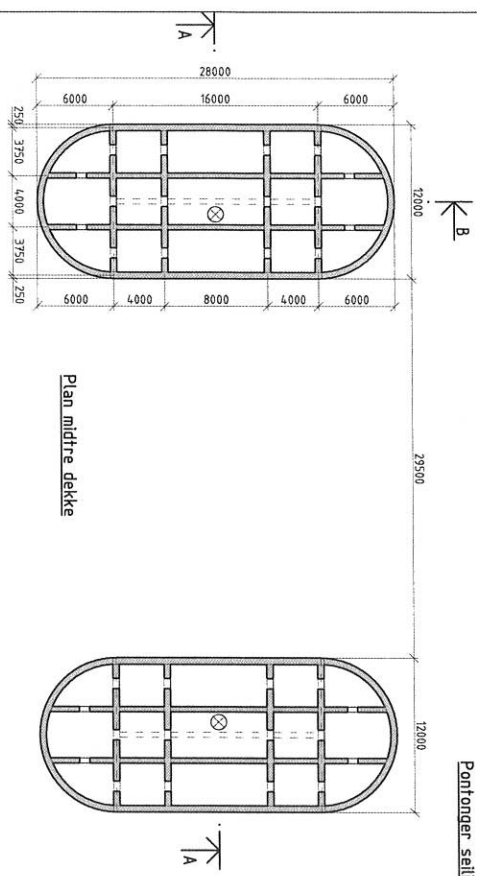
Resultater - vertikal temperaturvariasjon mellom topp-bunn

Case	Load type	List					
2:TEMP1	thermal load	1to9	TX=0,0	TY=0,0	TZ=18,00	MEMO:	
3:TEMP2	thermal load	1to9	TX=0,0	TY=0,0	TZ=-13,00	MEMO:	



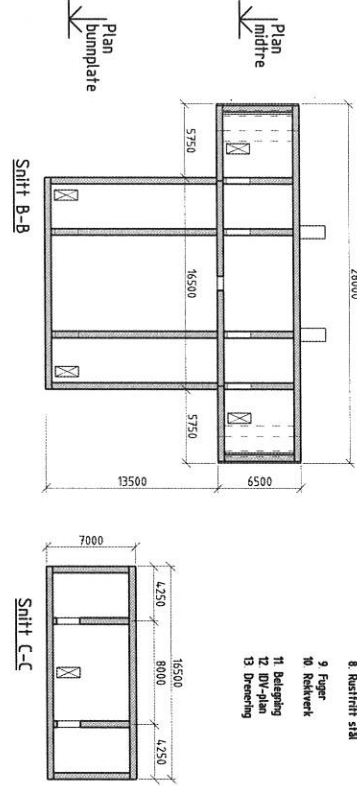
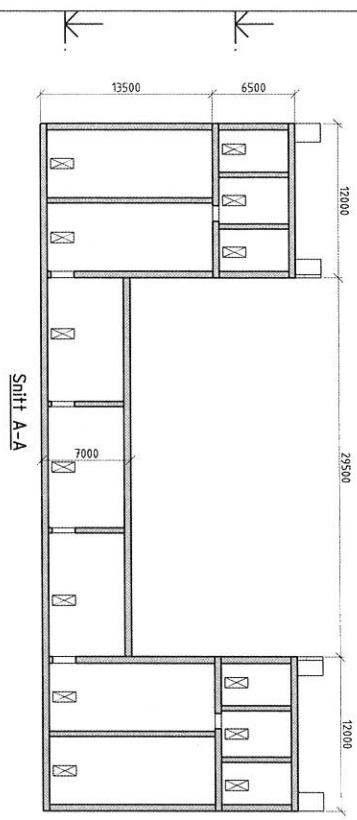


Pontonger sæltningsløp



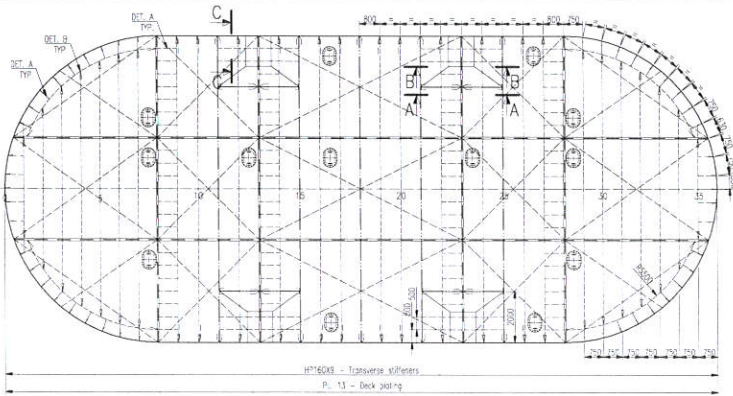
ANMERKINGER

0. Generelt
 1. Grunding
 2. Fundamentering
 3. Konstruksjonsstål
 4. Korrosjonsbeskyttelse
 5. Beløgningsværlite
 6. Armering
 7. Betongoverdekning
 8. Rustfritt stål
 9. Fuger
 10. Rektvink
 11. Beløgning
 12. DIV-plan
 13. Dreining
- Flyfoto Stillbilde som ligger tilknyttet til klasse på pontonger.
 Vekt forårsaken 60 kn/m², AOT 4000, Vekttype H1
 Bruksgradering HB N400 2015
 Landet: Ståle på berg P4 tryklike pontonger - bruktype 1 to akser pr. pontong
 P4 pontonger sæltningsløp - Fastpunkt 1 to akser pr. pontong
 Klutfrøse Stålskaling i brokkule krosser i anlegg Klutfr
 Flyvegreie S335 Se for avrig HB R762 prosess 851
 Uverdig System 2 i Ht HB R762 prosess 853
 Uverdig Grunding og avtelling
 R45 SV-Standard
 Sikkerering B500K, MS37K-3
 Spennering pontonger - Stålværlite 630/1800 N/mm²
 HB N400 f. Ht HB R762 prosess 851
 HB N400 f. Ht HB R762 prosess 851
 Konstruksjonsanlegg 120 mm, annerligere 100 mm
 Tilrette avne konstruksjonen --20 mm, annerligere --5 mm
 I Ht NS-EN 10088 nummer 1444,
 Bolter/Skiver/muttre A4-80 I Ht NS-EN ISO 2306
 Ved lander: Laneltuger, Ved kløttere: Apne fuger
 Brukervert i Ht HB V161 Strykelasse HZ
 Varmetvirket i Ht HB V161 Strykelasse HZ
 Generelt type A3-4, Maksimal vekt beløgning 2 MW/m²
 Utløst i Ht HB N400 punkt 14.7
 Pakkrisik dra ca 20 m Feres fra side til side via lukket rør

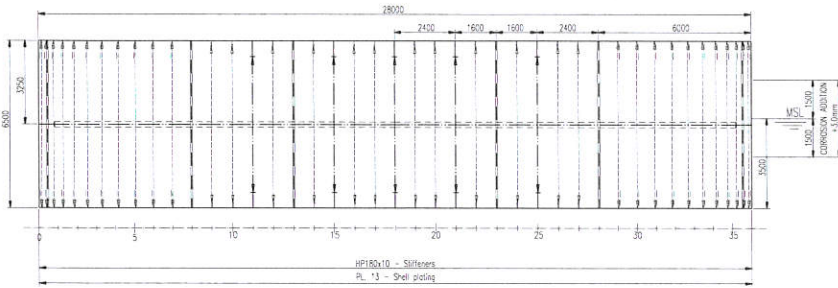


NO	REVISJON	AV	AVT	AVT	AVT	AVT	AVT	AVT	AVT
01									
02									
03									
04									
05									

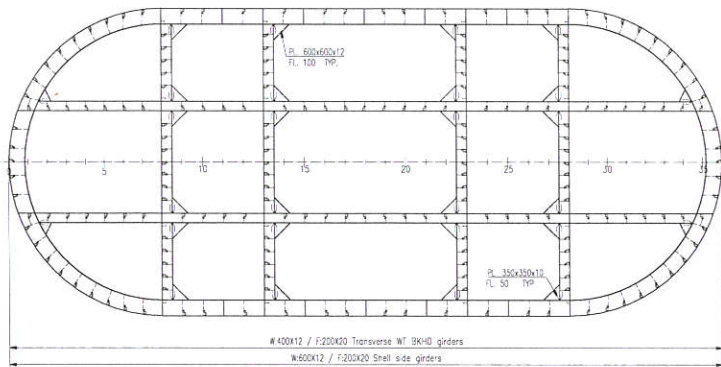
PROSJEKT
 311003-DW-101-C-LMG
PROSJEKTLEDER
 PONTON MAR
MASTLØRDNES - DUESUND
 Sæltingsløp
 Pontong og blikke
K-120



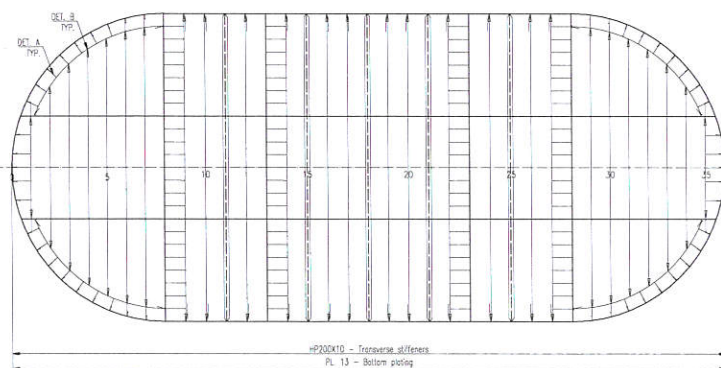
TOP VIEW ON PONTOON



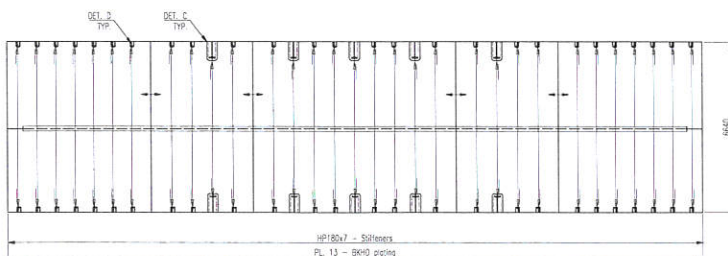
SIDE VIEW ON PONTOON



MID HEIGHT GIRDERS



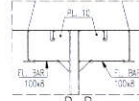
TOP VIEW ON BOTTOM



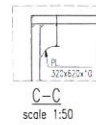
LONGITUDINAL WT BKHD



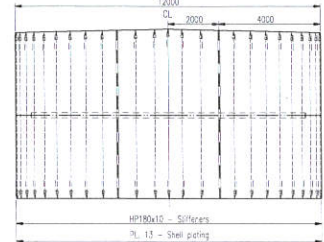
A-A scale 1:50



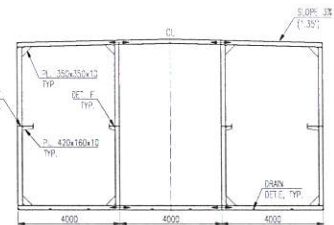
B-B scale 1:50



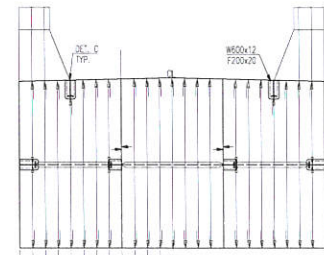
C-C scale 1:50



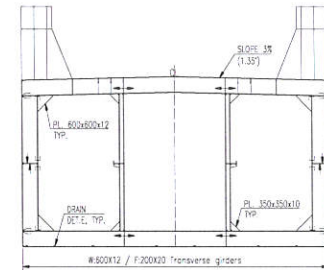
END VIEW ON PONTOON



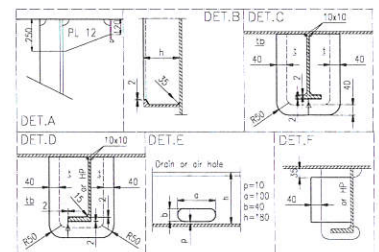
TYPICAL STIFFENER SECTION



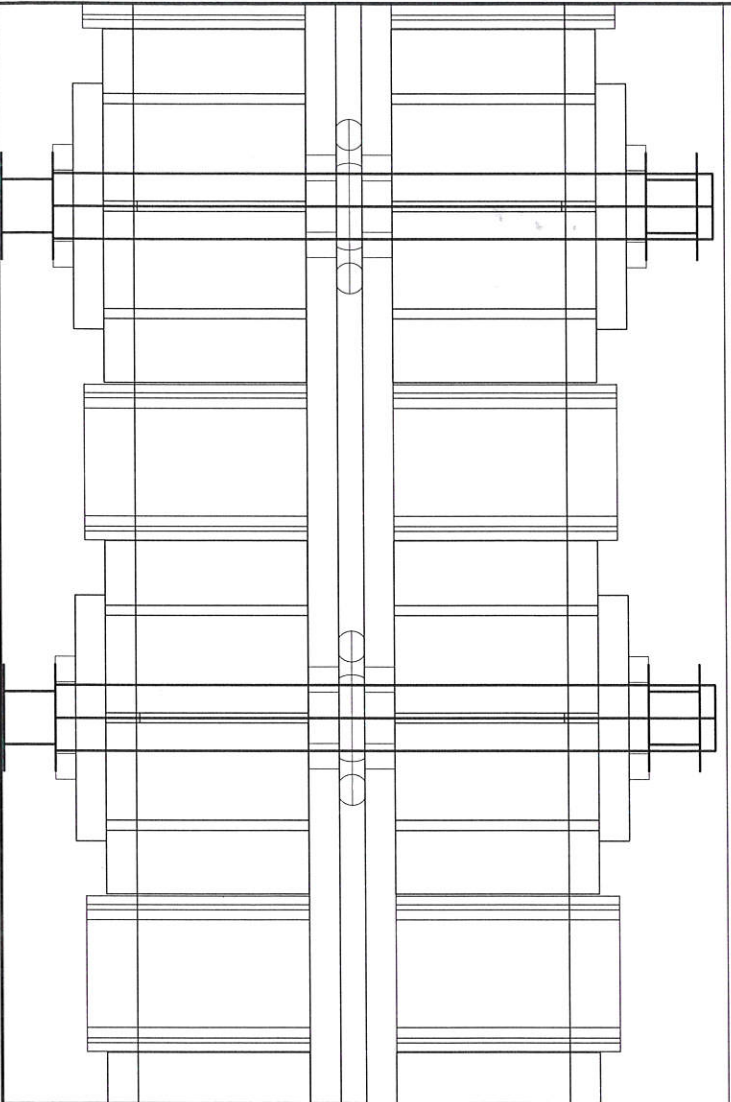
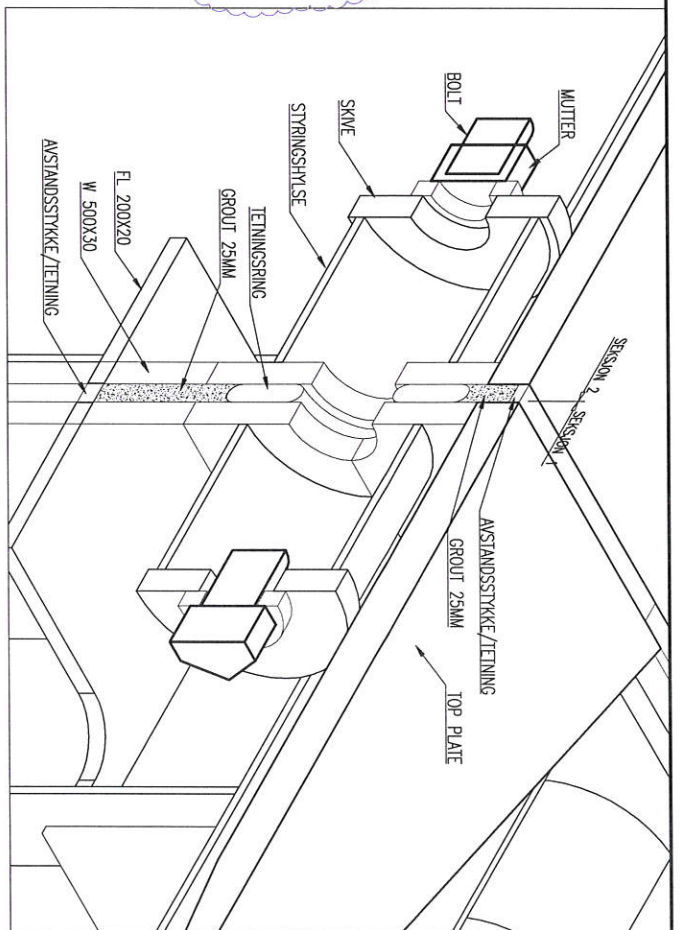
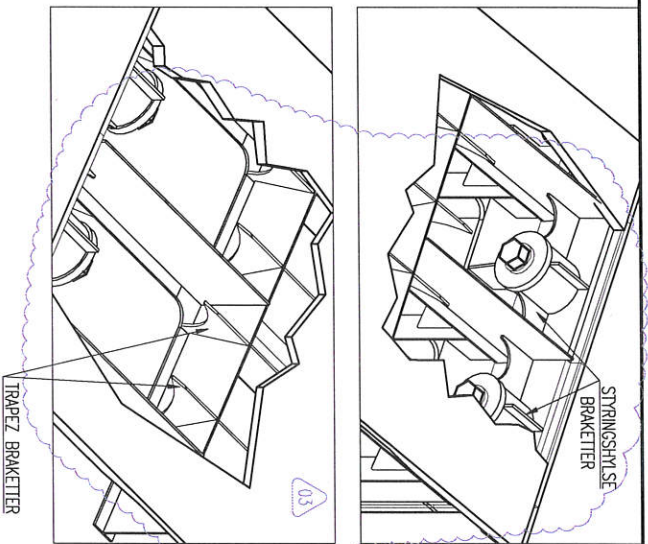
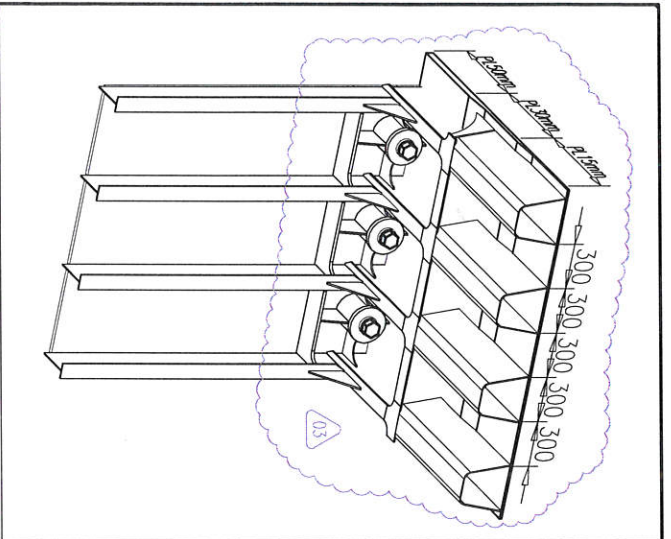
WT BKHD, FR.23
FR.8, 13, 28 SIMILAR



TYPICAL GIRDER SECTION



Q1	ISSUED FOR INFORMATION	03.11.2018	PABL	CPLD	GLK
REV	TEXT	REV.DAT	DRAWN	CHECK	APP.
THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF LMG MARIN AS. THE DRAWING SHALL NOT BE DISCLOSED TO ANY THIRD PARTY WITHOUT THE WRITTEN PRIOR CONSENT OF LMG MARIN AS.					
		NAVARCHITECTS & ENGINEERS LMG MARIN AS 369009-DW-201-N-LMG-00002 Tel: +47 55 59 40 00 E-mail: info@lmgmarin.no Web: www.lmgmarin.no			
PROJECT		MASFJORD FLYTEBRO			
CLIENTS ENG. NO.		FILE			
REPLACEMENT FOR		TITLE			
DATE		SCALE			
03.11.2018	1:100	Sheet 13	Sheet	1 of 1	
STEEL ARRANGEMENT PONTOONS					



05					
04					
03	FLANGE CONNECTION WAS UPDATED	29.11.2016	PABE	CHPE	GLK
02	ADDED COVER PLATE	16.11.2016	STI	CHPE	GLK
01	ISSUED FOR INFORMATION	11.10.2016	STI	CHPE	GLK
REV.	TEXT	REV.DATE	DRAWN	CHECK	APP.

THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF LMG MARIN AS. THE DRAWING SHALL NOT BE DISCLOSED TO ANY THIRD PARTY WITHOUT THE WRITTEN PRIOR CONSENT OF LMG MARIN AS.

LMG MARIN AS
ENGINEERS & ARCHITECTS
 LMG MARIN AS
 BERGEN - NORWAY
 Tel: +47 55 59 40 00
 E-mail: office@lmgmarin.no
 Web: www.lmgmarin.no

LMG MARIN AS
 DRAWING NO. **369009-DW-201-C-LMG-00008**
 PROJECT NO. _____
 DOC. TYPE _____
 SFT NO. _____
 DISC. CODE _____
 ORIGINATOR CODE _____
 SECURITY NO. _____

CLIENT: **MASFJORD FLYTEBRO**

CLIENTS DWG. NO. _____

REPLACEMENT FOR: _____

CAD TOOL: ACAD 2015

PRIMARY SCALE: 1:5

SHEET SIZE: A3

SHEET: 1 of 1

TITLE: **PRINCIPLE SKETCH
 BOLTED FLANGE CONNECTION
 WITH TRAPEZ PROFILES**

Memo til:

LMG Marin

Memo Nr.:

1129I800-2/ PHOFF

Fra:

Peter Nyegaard Hoffmann

Dato:

2016-10-19

Skrevet av:

Arve Lepsøe og Gjermund Gravir

Kopiert til:

[Copied to]

Kollisjonslaster for skipspassasje i flytebro**Oppdrag**

Oppdraget som omhandler utredning av realistiske kollisjonslaster for ett flytebrokonsept med skipspassasje sluseløsning i Masfjorden ble løst med følgende fremgangsmåte:

1. AIS data for området ble innhentet og bearbeidet for å skaffe et representativt bilde av trafikk som vil være styrende for beregning av kollisjonslaster.
2. Basert på AIS data og sjøkart som viser hjelpemiddel for navigasjon som er installert i området ble den nautiske nå-situasjonen beskrevet.
3. Vind, strøm og vær ble kartlagt ut fra tilgjengelige vind/ vær statistikker for nærliggende områder samtidig som lokale effekter av skjerming/ topografi samt lokale fenomen ble undersøkt i Den Norske Los og ved telefonsamtale med mannskap på kabelfergen som trafikkerer ruten mellom Masfjordnes og Duesund. Losoldermann ved Fedje ble kontaktet, men pga svært få losinger i området, henviste han til mannskap på kabelfergen.
4. Vurdering og beskrivelse av sannsynlige operasjonsmønstre for fartøy som skal passere sluseåpningen i en evt. flytebro tok utgangspunkt i mottatt tegning av flytebroen samt de stedlige forholdene som ble kartlagt under 2 og 3 over.
5. Kollisjonslaster ble estimert på bakgrunn av fartøysinformasjon funnet i AIS data der bruttotonnasje fremkommer. Videre ble hastighetsestimatene fra punkt 4 over brukt.
6. Tilslutt ble noen vurderinger gjort underveis listet opp.

AIS data og seilingsmønstre

Det er lastet ned AIS-data fra 1. jan 2012 til september 2016. Dvs. tallene for 2016 er kun for de 8 første månedene av året.

Side 2 av 6

Skipstype (Lloyds kat. 4)	Sum	2012	2013	2014	2015	2016
Buoy_Lighthouse Vessel	3		3			
Cable Layer	1			1		
Chemical Tanker	9	2	5	2		
Crane Ship	1				1	
Fishing Support Vessel	11		3		8	
General Cargo Ship	268	99	69	29	41	30
Live Fish Carrier	170	38	30	36	47	19
Offshore Support Vessel	4					4
Palletised Cargo Ship	3		3			
Patrol Vessel	4	2		2		
Pollution Control Vessel	3	3				
Ro-Ro Cargo Ship	40	8	19	8	5	
Trawler	133	11	30	29	27	36
Tug	2				2	
Unspecified	58	14	8	4	21	11
Utility Vessel	2				2	
Totalt	712	177	170	111	154	100

Fig. Antall skip fordelt på skipstyper og år som har passert området for den planlagte brua.

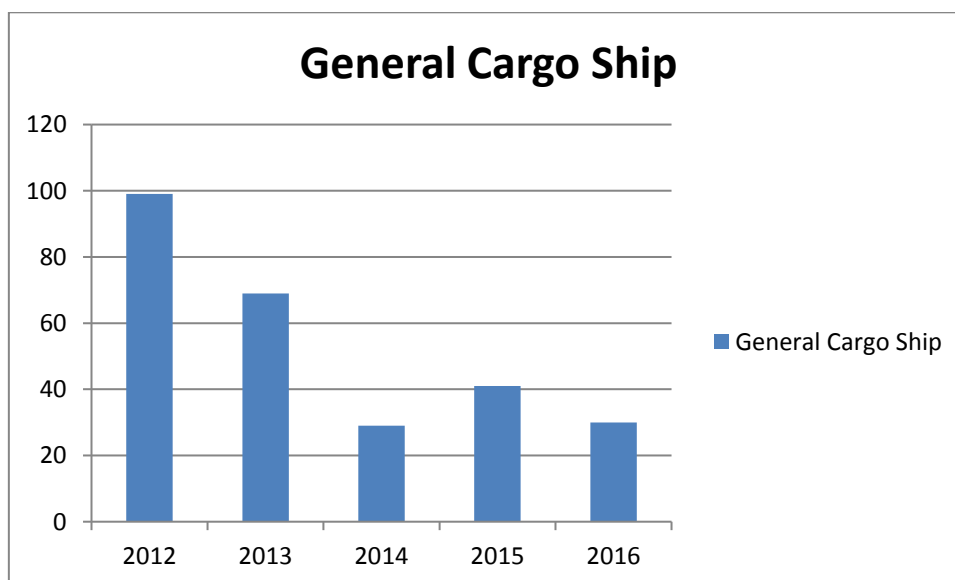


Fig. Årlige passeringer av General Cargo-skip

Gjennomsnittlig lengde for General Cargo-skipene er 60 m (fra 37.5 til 80 m) og gjennomsnittlig størrelse 1304 GT (fra 457 til 1884). Det er antall passering gjennom sundet der bru er planlagt som tatt med i tabellen. Det er få unike skip som passerer. F.eks. er det i 2015 (totalt 41 passeringer) bare 4 unike General Cargo-skip.

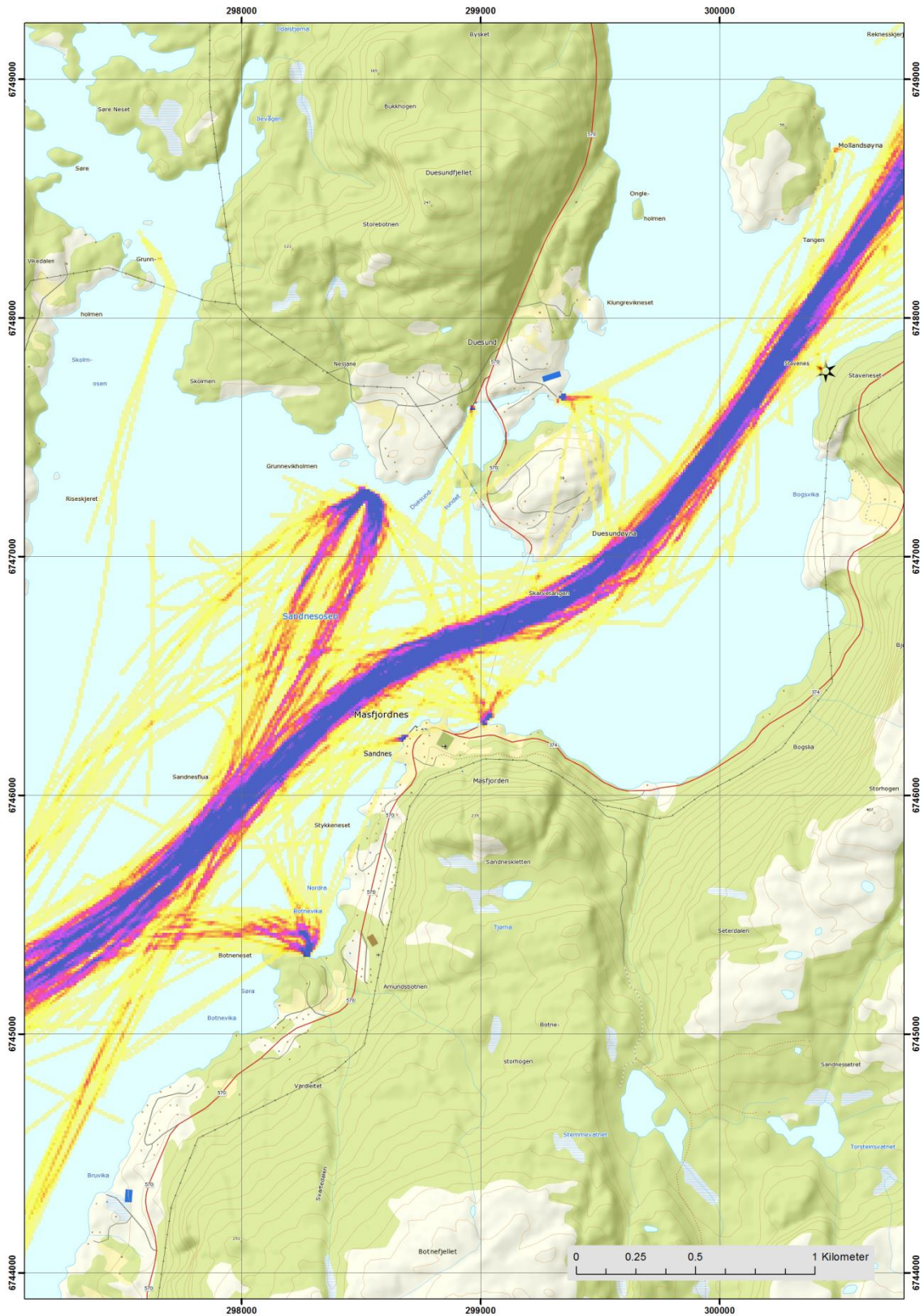


Fig. AIS tetthetsplot av alle skip for årene 2012-2016.

Side 4 av 6

Fra AIS plot fremkommer at trafikken inn/ ut av Masfjorden ved Masfjordnes følger ett svært homogent mønster og kommer fra/ seiler mot Fensfjorden i sør. Tilgjengelig seilingsbredde i sundet mellom Masfjordnes og Skarvetangen er 500-600 meter. Trafikken følger en seilingskorridor med ca. 150m bredde og går noe tettere land på nordsiden enn på sørsiden, noe som antatt skyldes grønn blinken på Masfjordnes i sør. Plotene viser videre at fartøy på vei inn Masfjorden gjør en 30 graders kursforandring (fra 040 – 070) ved Masfjordnes og etter ca. 1000 meter en 30 graders kursforandring (tilbake til 040) ved Duesundøya. Tilsvarende, men motsatte, kurser følges av fartøy på vei ut av Masfjorden. Foruten den nevnte grønn-blinken på Masfjordnes er sektorlyktene på Stavenes i nordøst og Kvamsøya i sørvest til hjelp for navigasjon inn og ut av Masfjorden.

Vind og strøm

Vindstatistikk for sundet mellom Masfjordnes og Skarvetangen har ikke vært tilgjengelig under denne vurderingen, men det antas at vindrose for Fedje kan gi en pekepinn på hvilke vindretninger som er dominerende også for dette området. Som vindrosen under viser, er det ventet at vind fra sørøst til sør samt fra nord nordvest til nord er dominerende for området. På grunn av terrengets utforming i området er det ventet at dominerende vindretning vil være noe endret i sundet ved at vinden vil dreie noe med terrenget. Dette kan medføre at vindretningen kan være noe varierende underveis i seilasen inn/ ut av Masfjorden. Det er også ventet at terrenget gir betydelig reduksjon i vindstyrke sammenlignet med Fedje og det er ventet at vindstyrken vil være 10-50% lavere ved Masfjordnes/ Skarvetangen enn på Fedje, avhengig av vindretning.

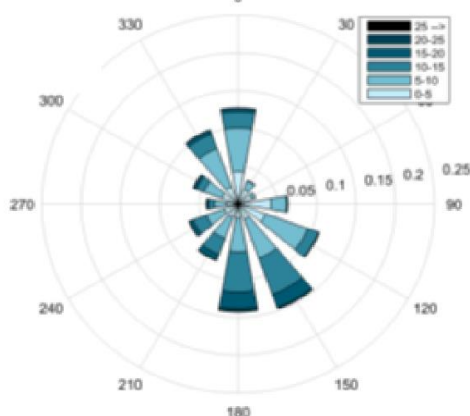


Fig. Vindrose for Fedje (2005-2013), korrigert til Hellisøy og utvidet til 1982-2014.

Kastevinder er rapportert å være en utfordring for navigasjon i dette spesifikke området. Fra Den Norske Los fremkommer følgende: *Fjorden er ofte utsatt for sterke kastevinder fra N og NE.* For ytterligere å kartlegge lokale vær og strømfenomen ble mannskap på Kabelfergen som trafikkerer Masfjorden kontaktet pr. telefon. Under denne telefonsamtalen ble informasjonen fra Den Norske Los bekreftet samtidig som at også kastevinder fra E og SE ble nevnt som et lokalt fenomen i den midtre og søndre delen av sundet. Et eksempel som ble nevnt var at det ved ett tilfelle ble målt 15 m/s ved avgang Duesund mens en kastevind som traff fergen i søndre del av overfarten ble målt til 42 m/s.

I følge Den Norske Los er strømmen i Masfjorden normalt ikke ventet å være sterk: *Tidevannstrømmen er ikke særlig sterk og strømforholdene blir derfor mye avhengig av vær og vind, samt tilstrømming av ferskvann.* I samtale med mannskap på kabelfergen mellom Masfjordnes og Duesund fremkommer derimot at strømmen til tider kan være kraftig, særlig i nordlige deler av sundet og i vestlig retning. Det er antatt at slike tilfeller med kraftig vestlig strøm skyldes kombinasjon av ebbe og stor tilstrømming av ferskvann.

Det ble ikke funnet indikasjoner i Den Norske Los på at det er vesentlige lokale fenomen knyttet til sikt. Dette ble støttet av mannskap på Kabelferge som ikke hadde inntrykk av at dårlig sikt, f. eks. ved tåke, var ett hyppigere problem i Masfjorden/ Masfjordnes enn øvrig i området.

Effekt på seilingsmønster ved installasjon av flytebro med sluse

På mottatt tegning «Curved Floating Bridge w/ swing lane Masfjordnes – Duesund» vises en kurvet flytebro med sluseåpning for skipstrafikk på 75 m bredde i retning 105/ 285 grader. Både slusens bredde, retning og plassering vil føre til endring i seilingsmønsteret inn/ ut av Masfjorden.

Side 5 av 6

Endelig plassering av sluseåpningen og retningen vil selvsagt påvirke seilingsmønsteret, men slik det er vist på tegningen synes det nødvendig at fartøy på vei inn Masfjorden vil måtte foreta en betydelig større kursforandring ved Masfjordnes (fra 040 – 105) for så å gjøre en kursforandring tilbake (fra 105 til 030) etter passering slusa. Det er også ventet at fartøy må legge inn en ny kursforandring ved Stavenes som følge av at fartøyene må følge en rute noe lenger øst etter slusa er passert enn den opprinnelige seilingsruten. Antatt seilingsrute ut fra Masfjorden er ventet å følge en noe lik korridor som beskrevet over, men samtidig ventes det at fartøyene vil planlegge kursforandringen enda lenger øst av slusa på vei ut Masfjorden enn tilsvarende kursforandring etter slusa på vei inn fjorden. Dette for at en kursforandring ikke skal komme umiddelbart før passering av slusa samtidig som fartøyene lettere kan vurdere sin sideveis avdrift når de ligger på den relevante kursen over noe tid før den kritiske slusepasseringen.

Både de økte kursforandringene, slusebredden og de korte avstandene mellom sluse og kursforandring øker navigasjons kompleksitet for dette området. Dette kan ventes å føre til økt årvåkenhet og bruk av lavere hastighet enn ved dagens situasjon. Samtidig kan det også antas at den økte kompleksiteten medfører noe økt sannsynlighet for feil navigering med påfølgende grunnstøting. En hastighet mellom 6-9 knop er ansett som sannsynlig under normale vær, strøm og siktforhold. Ytterligere hastighets reduksjon (5-7 knop) kan antas i situasjoner med mye vind, mye strøm og/ eller liten sikt.

Seilingsmønsteret er også ventet endret av prosedyren for åpning av broen. Fartøyene må, på ett eller annet tidspunkt, ta kontakt med operatør av svingbroen for så å avtale tidspunkt for åpning. Hvordan dette påvirker seilingsmønsteret vil avhenge av prosedyren som blir innarbeidet, men det er antatt at fartøy i noen/ mange tilfeller må vente eller redusere fart, i påventa av åpning av broen, og dermed ha redusert fart ved passering.

Som trafikk tettheten indikerer er det svært lite sannsynlig at skip som er i ferd med å passere slusen vil møte annen trafikk.

Kollisjonslaster

Kollisjon av ett fartøy på vei inn i eller ut fra Masfjorden utgjør den største risikoen for en eventuell flytebro mellom Masfjordnes og Skarvetangen. Selv om fartøy som passerer inn ut av Masfjorden er relativt små, og er antatt å holde en begrenset hastighet, er disse fartøyene også antatt å gi den største energien ved en eventuell kollisjon med flytebroen. Det synes usannsynlig at større fartøy som opererer lenger sør kan drive opp mot – og inn i flytebroen slik den er tenkt plassert.

Målt i fartøys dødvekt (dwt) finner vi fra AIS dataene at det største General Cargo-skipet har en dwt på 2200 t. Ved å bruke en noe konservativ omregningsrate dwt/ deplasement på 0,75 får vi at det største General Cargo-skipet har en vekt på 2933 tonn.

Kollisjonslasten er det samme som skipets bevegelsesenergi da det treffer broen og beregnes ved ligningen:

$$E = \frac{1}{2} (M+m) v^2, \text{ der}$$

E er energi


M er skipets masse

m er hydrodynamisk medrevet masse

v er farten til skipet

m vil avhenge av skrogform, hastighet med videre, men er her estimert til 10 % av skipets masse.

Konsekvens ved kollisjon ved feilnavigasjon	Kollisjonslast
Feilnavigasjon – 5 kts	10,1 MJ
Feilnavigasjon – 7 kts	19,8 MJ
Feilnavigasjon – 9 kts	32,7 MJ



Side 6 av 6

Vurderinger

Noen tiltak som kan vurderes for å bedre risikobildet med installert flytebro:

- Navigasjonshjelpemidler bør vurderes for å hjelpe fartøy å følge de anbefalte og antatte seilingsrutene i området rundt flytebroen. God merking av selve broåpningen samt sektorlykter eller overrett merker for å hjelpe fartøy å oppdage/ kompensere sideveis avdrift ved passering gjennom broåpningen kan være effektive tiltak.
- Plassere slusen/ åpning lenger nord. En slik endring vil føre til at seilingsruta blir nær uforandret fra dagens rute og fartøy slipper de store kursforandringene før og etter passering. I tillegg unngås at seilingsruta går så langt øst (sørøst) i området på østsiden av broen. Området i nord er, som nevnt over, også mindre utsatt for sterke kastevinder. En ulempe ved å plassere slusen lenger nord vil dog være at strømmen setter noe kraftigere i denne delen av sundet.
- Vurdere om det skal legges begrensning på bropassering ved tilfeller av dårlig sikt, mye vind og/eller sterk strøm.