



# UNDERSØKELSESRAPPORT

## VIKING POLARIS

### SHK PROSJEKT NR. 22/661



07	06.11.2023	Final A	JR	MB	JX
06	28.06.2023	Final	SS	MB	JR
05	16.06.2023	IFR	SS	MB	JR
04	31.05.2023	IFR	SS	MB	JR
03	26.04.2023	IFR	SS	MB	JR
02	08.03.2023	IFR	SS	MB	JR
01	03.03.2023	DRAFT	SS	JR	MA
Rev	Date	Description	Made by	Chkd by	Appr'd by
7Waves doc. No.: P196-7WS-SHK-RA-001			Client doc no.: P196-7WS-SHK-RA-001		
Project no.: P196			Client ref.: Statens havarikommisjon		
Project name: Bistand SHK Viking Polaris					
			Client: 		

## Contents

1.	Sammendrag .....	4
1.1	Konklusjon .....	4
1.2	Årsak .....	4
1.3	Anbefalinger for videre arbeid .....	5
1.4	Liknende hendelser .....	5
2.	Introduksjon .....	6
3.	Definisjoner .....	6
4.	Oppdraget .....	6
5.	Skipet .....	6
6.	Beskrivelse av skade og skadeområde .....	7
7.	Regelverk som gjelder for fartøyet .....	8
7.1	Skipsregler generelt .....	8
7.2	Oppbygning av skipsregler .....	9
8.	Regler for beregning av trykk på skuteseide og vinduer .....	10
8.1	Verifikasjon av designtrykk .....	11
8.2	Andre metoder for å beregne trykk fra bølgeslag .....	12
9.	Konstruksjonsgrunnlag for vinduer .....	13
9.1	Regler for vinduer .....	13
9.1.1	Generelt .....	13
9.1.2	Vinduers plassering .....	13
9.1.3	Glasstykkelse .....	13
9.1.4	Innfesting av vindusrute til vinduskarm .....	15
9.1.5	Innfesting av vinduskarm til skroget .....	15
9.2	Feilmoder .....	18
9.2.1	Nedre vinduer lugar 2012, 2014, 2016, 2018 og 2020 .....	18
9.2.2	Øvre vinduer lugar 2010, 2012, 2014 og 2016 .....	20
9.2.3	Nedre vinduer lugar 2008 og 2010 .....	20
9.3	Oppsummering feilmoder .....	20
10.	Tester utført i design-fasen .....	21
10.1	Generelt .....	21
10.2	Fullskala trykktest .....	21
10.3	Trykktest av glasset .....	22
10.4	Punch-test .....	22
10.5	Spyle-test .....	23
10.6	Støt-test .....	23

---

11.	Vær og bølgeforhold.....	24
11.1	Bakgrunn.....	24
11.2	Ulykkesbølgen.....	25
11.3	Relativ bølgeretning.....	25
11.4	Bølgeperiode.....	26
11.5	Bølgehøyde.....	27
11.6	Bølgekltring.....	29
11.7	Oppsummering bølgehøyde.....	29
12.	Vurdering av maskinloggen.....	29
13.	Vurdering av sjømannskap.....	31
14.	Kapasitet til omkringliggende stål.....	31
15.	Bibliografi.....	33
	Appendix A: generering av vilkårlig bølgetog, maksimal bølgehøyde.....	34

## 1. SAMMENDRAG

7Waves har på oppdrag fra Statens Havarikommisjon bistått med undersøkelser for SHK prosjekt nr.22/661, knyttet til ulykke på Viking Polaris 29.11.2022. 7Waves har bistått med undersøkelser av designgrunnlag, med søkelys på bølgebelastning og vindus design for lugarer på dekk 2.

Undersøkelsene bestod av regelgjennomgang, verifikasjon av regeltrykk beregning og design- og konstruksjonsgrunnlag, sammenlikning av bølgetrykk med beregningsmetoder fra bølgeteori og offshore regler.

### 1.1 Konklusjon

Konklusjoner fra undersøkelsen er som følger:

1. Vindu og tilstøtende skipsstruktur var designet i henhold til gjeldende regler. Noen mindre avvik ble funnet. Ingen av disse avvikene hadde betydning for ulykken.
2. Sjøtilstanden på ulykestidspunktet var innenfor sjøtilstandene definert i bølgescatterdiagrammet som skipet er dimensjonert for. Trykket fra den brytende bølgen var høyere enn det vinduene var dimensjonert for.
3. Skipsreglenes krav til designtrykk for vinduer i denne posisjonen gir for lave verdier for å kunne motstå trykkklaster fra brytende bølger innenfor regelverkets gyldighetsområde.
4. Det bør innføres ytterligere krav for å forsikre at områder på skutesiden blir dimensjonert for brytende bølger..

### 1.2 Årsak

Direkte årsak anses å være at skipet ble truffet av en stor langkammert brytende bølge ca 60-80grader fra babord side. Dette resulterte i en trykkbølge på skipsside og vinduer i skadeområdet som gjorde at flere vinduer knuste med påfølgende skader på innsiden av skipet.

Feilmodene for de ulike lugarvinduene kan oppsummeres som følger og er videre diskutert i kapittel 9.2:

- Trykket har vært høyest (>40kPa) på de nedre vinduene der karmstolpen har blitt slått inn for lugar 2012, 2014, 2016, 2018 og 2020.
- Glassrutene var det svakeste punktet nede i lugar 2008 og 2010 og oppe for 2010, 2012, 2014 og 2016.

Både vinduskarmer og vindusglass har hatt for liten styrke til å stå imot bølgetrykket, selv om de er designet etter skipsreglene. Dette viser at trykket fra den brytende bølgen var høyere enn designtrykkene.

Det er verdt å bemerke at de aktre delene av vinduene har blitt hardest belastet, dette skyldes trolig at skipets hastighet gjorde at trykkbølgen ble rettet bakover. Vinduenes utførelse var laget slik at nedre del dannet en recess inn fra skutesiden, bølgen fikk derfor «tak i» aktre vinduskarm. Hastigheten har også bidratt til å forsterke trykket. Det er uklart om hastighets- eller bølgeindusert trykk har bidratt mest.

Bilder av skaden viser at kun vinduene ble skadet, og ikke stålet i skipshuden. Dette til tross for at begge deler er designet etter samme krav til lokaltrykk. Grunnen til at kun vinduene ga etter, er at stålet er dimensjonert av et minimumstykkelseskrav (DNVGL-RU-SHIP Pt.3 Ch.6 Sec.3 [1]) som gir større styrke enn det lokale trykkkravet, som gjør at stållåten kan motstå større trykk enn vinduene. Reglene har også krav til minimumstykkelser på vinduer, men disse gir mindre styrke mot lateral trykk enn minimumskravene til stålets tykkelse. For design av minimum

tykkelse på vinduer inngår en sikkerhetsfaktor på 4 som er ment å hensynta de ulike materialegenskapene til glass og stål.

Regelgjennomgangen og undersøkelsene viser at vinduene er dimensjonert etter krav til et lokaltrykk. Dette gjorde at vinduene var svakere enn det omkringliggende stålet hvilket gjorde at de ga etter. Det er vurdert at det trykket fra den brytende bølgen lå i området 40kPa (trykktest utført på karm) til 107kPa (grovt anslått kapasitet til omkringliggende stål). Det kan ikke utelukkes at det maksimale slammingstrykket har vært større enn 107kPa over en veldig kort periode.

Andre medvirkende årsaker er:

- Vinduene var plassert langt ned på skroget.
- Vinduenes utførelse var laget slik at nedre del dannet en recess inn fra skutesiden, bølgen fikk derfor «tak i» aktre vinduskarm.
- Skipet holdt høy hastighet i sjøgang der bølgene traff 60-80grader fra babord, men at skipet var dimensjonert for å kjøre i denne hastigheten under slike værforhold.
- Skipet brukte aktiv rulle-demping med stabilisatorfinner og dermed har skipet ligget stabilt i vannet med lite rulle-bevegelse. Uten aktive stabilisatorfinner er det sannsynlig at kapteinen hadde valgt en annen kurs fordi båten ville hatt for store rullebevegelser.

Bølgehøyden og bølgeperioden var innenfor skipets fartsområde, dvs regelverkets definerte scatterdiagram med 25-års returperiode. Grunnen til at bølgen brøt er ikke helt fastslått, men det er sannsynlig at det skyldes en kombinasjon av interferens og sterk vind som har gjort bølgekammen ustabil slik at den har brutt.

### 1.3 Anbefalinger for videre arbeid

1. Gjøre flere undersøkelser for å fastslå karakteristikk på ulykkesbølgen både ved studier av eksisterende data og observasjoner samt kjøre en tidsdomene simulering av bølgeforholdene rundt skipet, for å bl.a. estimere trykket fra bølgen.
2. Gjøre en struktur analyse av vinduet for å teste hypotesen om brudd mekanismen for vinduet.
3. Kjøre en simulering av trykkimpuls for å øke kunnskapen om bølgekraften som forårsaket ulykken.

### 1.4 Liknende hendelser

Hendelsen med Viking Polaris har likhetstrekk med andre liknende hendelser som ulykken med Cosl Innovator [1], og VLCC Arafura [2]. Der førstnevnte likner fordi det i begge tilfeller angår vinduer over fribordsvannlinjen som ble slått i stykker av en brytende bølger. Sistnevnte likner fordi det inntraff i samme område under liknende værforhold og det handler om en brytende bølger som slår innover dekk.

## 2. INTRODUKSJON

Med referanse til SHK's tildelingsbrev datert 27.01.2023 SHK Dok nr. 23/67-9 har 7Waves AS fått i oppdrag å bistå SHK i forbindelse med undersøkelse av en ulykke om bord Viking Polaris 29.november 2022.

Denne delrapporten beskriver oppgaver, forutsetninger, metoder og resultater fra undersøkelsene.

## 3. DEFINISJONER

Definisjoner og forkortelser er gitt i Tabell 3-1.

Forkortelse	Forklaring
AP	Aktre perpendikulær
Cb	Blokkoeffisient
Cw	Bølgekoeffisient
FP	Fremre perpendikulær
Hs	Signifikant bølgehøyde
L.O.A.	Lengde over alt
Tp	«Peak» periode
VDR	Voyage data recorder

Tabell 3-1: Definisjoner og forkortelser

## 4. OPPDRAGET

Denne undersøkelsen skal adressere følgende aspekter ved ulykken:

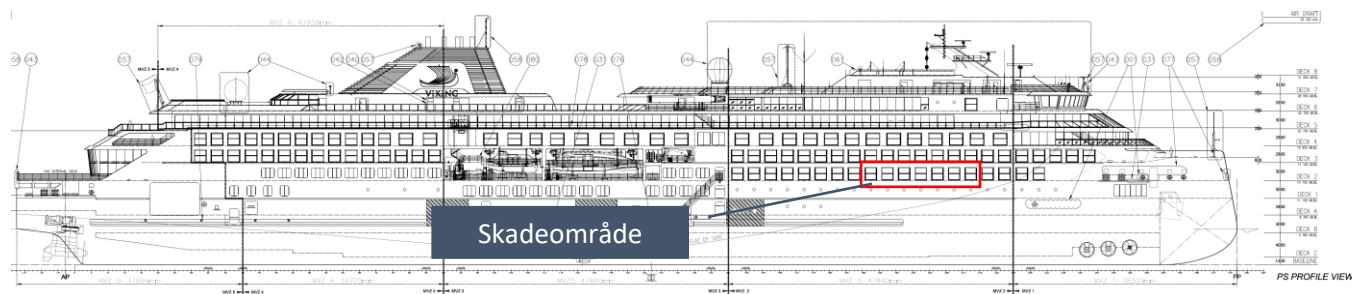
- 1) Forundersøkelse for å klarlegge hvilket designgrunnlag som har vært brukt for dimensjonering av skipsside og vinduer i skadeområdet.
- 2) Sammenlikning av beregninger av slammings-trykk for bølger ifølge Skipsregler [3] og offshore-regler [4].
- 3) Undersøke og beskrive bakgrunn for skipsreglens beregning av eksternt trykk fra bølger.
- 4) Med utgangspunkt i kunnskapen vi har om bølgeforholdene på ulykkestidspunktet gjøre en parameterstudie for å finne om det er mulig å gjenskape et eksternt trykk som kan forårsake tilsvarende skadeomfang.
- 5) Undersøke designgrunnlag for vinduene gitt i [5] og [6], herunder:
  - a. Test metoder og dokumentasjon av disse.
  - b. Verifisere om vindusglasset benyttet (type og tykkelse) og innfesting av vinduene var i henhold til beregnede laster.
  - c. Kontrollere om as-built tegninger var i henhold til strukturberegningene som var utført i design.
  - d. Bistand til å vurdere hvorvidt vinduer og innfestning var i henhold til as-built tegninger.

## 5. SKIPET

Viking Polaris er et cruiseskip bygget for arktiske ekspedisjoner og hadde på ulykkestidspunktet fullført flere seilinger i arktisk farvann.

Viking Polaris ble bygget og satt i drift høsten 2022. Skipet er designet etter DNV 's skipsregler fra januar 2018, [5].

Profil og General arrangement er vist i Figur 5-1. Skipets tekniske data og hoveddimensjoner er oppsummert i Tabell 5-1.



Figur 5-1: General Arrangement Profil av styrbord side der skadeområdet er vist. Merk at skaden inntraff på babord side selv om styrbord side er vist i denne figuren, og babord side har lik profil som styrbord.

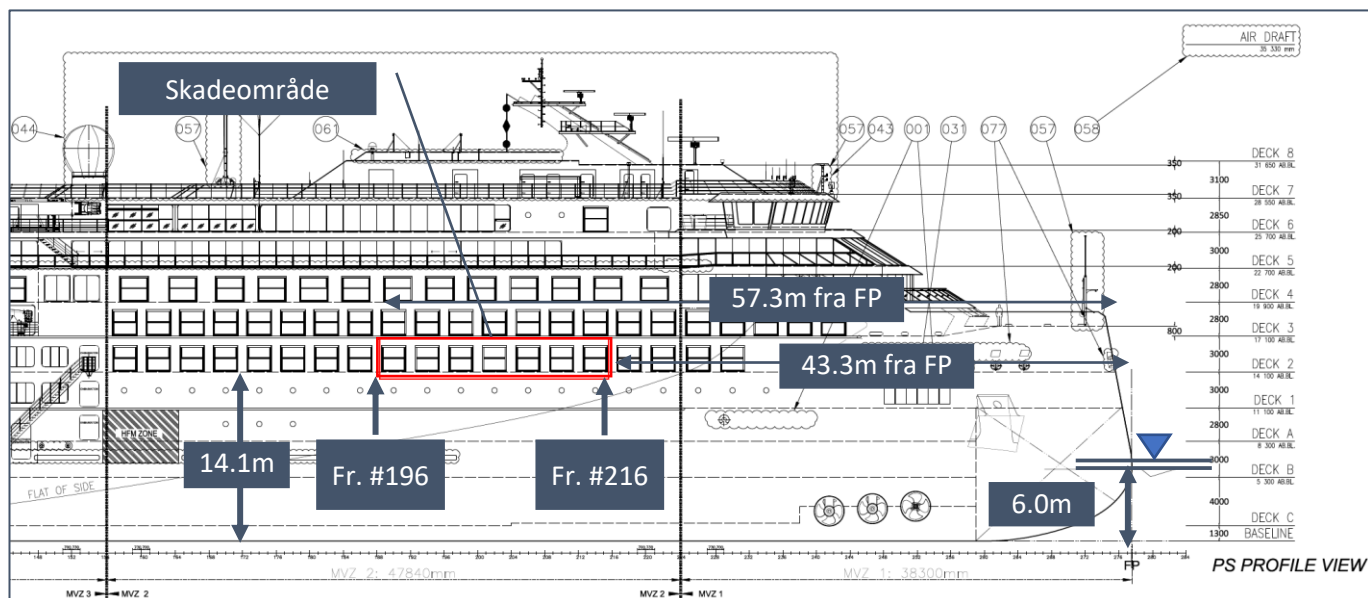
Tekniske data	
Design:	Vard 626
Klasseselskap:	DNV
Bygget:	2022-09
Klasseregler:	DNV-Rules for ships, januar 2018
Flagg:	Norsk, NIS
Verft:	Vard Søviknes
Navn:	Viking Polaris
Klasse notasjon:	+1A Passenger ship BIS BWM(T) Clean COMF(V1)
	DYNPOS(AUTS) E0 LCS(DC) NAUT(NAV)
	PC(6) Recyclable Silent(E)
L.O.A.	205.0 m
Bredde (MLD.)	23.5 m
Bredde Max.	23.7 m
Design Dypgang	6.0 m
Sommer dypgang	6.2 m
Pax. (189 kabiner)	378 pers.
Mannskap (157 kabiner)	262 pers.
Totalt personer ombord	640 pers.
Bølgekoeffisient, Cw	9.79

Tabell 5-1: Skipets tekniske data

## 6. BESKRIVELSE AV SKADE OG SKADEOMRÅDE

Skaden bestod av vinduer som var delvis knust og trykket inn, med påfølgende skader på inventar i lugarene. Skadeområdet var på dekk 2, 14.1 meter over kjølen og mellom 43 og 57 meter fra forskipet (FP). Minste stillevanns fribord på ulykkestidspunktet er estimert til cirka 8 meter.





Figur 6-1 Illustrasjon av skadeområde – illustrert fra styrbord side på tegning



Figur 6-2 Bilde av skader på Viking Polaris babord side, dk2, november 2022

## 7. REGELVERK SOM GJELDER FOR FARTØYET

### 7.1 Skipsregler generelt

Skipsregler er preskriptive, er delvis basert på erfaringer om design og operasjon av skip samlet gjennom 150 års virksomhet med klassifisering av skip [7]. En viktig kilde til utvikling av regler har vært erfaringer etter ulykkeshendelser.



Skipsreglene forutsetter at skipets hoveddimensjoner og proporsjoner er innenfor et bestemt gyldighetsområde. F.eks. slik som lengde/bredde forhold og dypgang/bredde forhold etc. Dette betyr at nye typer design ikke nødvendigvis er dekket siden reglene er retrospektive av natur.

Dette i motsetning til de risikobaserte offshore-standardene som ble utviklet til design av olje og gass installasjoner i Nordsjøen. Det vil si at dimensjonering av strukturen er basert på direkteberegning av prosjektspesifikke belastninger på det spesifikke fartøyet. I motsetning til skipsreglene som forutsetter skipsform etc. så kan offshore standardene i prinsippet brukes på alle typer flytende strukturer med vilkårlig geometri under alle værforhold og operasjoner. Målet er at designet uansett skal møte det samme sikkerhetsnivået.

For denne studien er det særlig det som knytter seg til regler for konstruksjon av vinduer, samt beregning av trykk på eksterne flater fra bølger, som er relevant. Både skips og offshore-reglene har beregningsmetoder og formelverk for slik beregninger.

Undersøkelsen viser at skipsreglenes formler for beregning av eksternt trykk ble lagt til grunn i dimensjonering av vinduer og skuteside i skadeområdet på Viking Polaris.

## 7.2 Oppbygning av skipsregler

Skipsreglene er laget for design av enkeltskrogsskip bygget i stål. For struktur/styrke-beregning er de bygget opp slik at det først spesifiseres hvordan designet skal arrangeres, med hensyn til definisjoner og generelle krav til arrangement av volum og tanker etc. Dette brukes til å fastsette skipets hoveddimensjoner og general arrangement. Neste del av reglene tar for seg definisjon og beregning av laster som designet skal tåle. For design av skip uten seilingsrestriksjoner, brukes et forhåndsdefinert sett med bølgedata som skal dekke alle forventede høyeste laster et skip kan møte i løpet av sin levetid (25 år).

For skip er dette et såkalt Nord Atlanter «scatterdiagram» med 25 års returperiode (exceedance probability of  $10^{-8}$ ), for nærmere informasjon om bølge «scatterdiagram» se DNV-RP-C205 Environmental conditions and environmental loads, Appendix C, tabell C-2 i [4]. Bølgedataene i DNV-RP-C205 er basert på IACS Rec.34 Standard Wave Data for Direct Wave Load Analysis. Scatterdiagrammet defineres med en bølgeperiode  $T_z$  og en signifikant bølgehøyde  $H_s$  og danner en kontur. Den høyeste signifikante bølgehøyden ( $H_s$ ) i 25-års konturen er  $H_s=16.1\text{m}$  (for nærmere detaljer om utregning se Sec.3 [3.6.2.1] og Tabell C-4 i [4]). Sjøtilstander med de høyeste bølgehøydene er typisk dimensjonerende for globale krefter, mens steile sjøtilstander langs konturen med betydelig lavere bølgehøyde og kortere perioder er dimensjonerende for lokale laster som baugslamming eller grønt vann på dekk.

Skipsreglenes krav til dimensjonering av f.eks. vinduer mot eksternt trykk er styrt av vinduets plassering på skipet. Det såkalte designtrykket øker mot baugen og ned mot vannlinjen. Verdien på hydrodynamisk sjøtrykk fra bølgen er beregnet ut ifra såkalte ekvivalente design bølger (EDW= Equivalent Design Waves). EDW er et sett med regulære bølger som skal representere designlastene et skip kan utsettes for i operasjon.

Dersom f.eks. vinduet er plassert tilstrekkelig langt nok akter, og langt nok opp fra vannlinjen, så gir reglene et så lavt hydrodynamisk sjøtrykk at det ikke lenger er dimensjonerende. I slike tilfeller benytter regelen i stedet et minimumstrykk ( $P_{S1}$ ) som kun er basert på bølge- og blokk-koeffisienten, se DNVGL-RU-SHIP Pt.3 Ch.4 Sec.5.

## 8. REGLER FOR BEREGNING AV TRYKK PÅ SKUTESIDE OG VINDUER

Det finnes to formler for å beregne designtrykkene til vinduene langs skroget der det høyeste designtrykket skal være dimensjonerende:

1.  $P_W$
2.  $P_{SI}$

$P_W$  er utviklet med hensyn på en 25 års returperiode der alle sjøtilstander og retninger er vurdert. Denne inkluderer også en operasjonell faktor (også såkalt sjømannsfaktor) som tar hensyn til headingen. Dette er typisk dimensjonerende i baugen på skipet.  $P_W$  er dimensjonerende for de deler av skipet som gjennom konvensjonelle metoder for bølgelaster på skip, blir utsatt for trykkpåkjenning fra bølgene. Dette inkluderer skroget under vannlinjen, samt den strukturen over vannlinjen der bølgene forventes å nå opp. I baugen vil laster fra baugslag/slamming normalt være dimensjonerende. Disse lastene er spesielt utviklet for å hensynta høye laster (inkludert brytende bølger) som kan forventes i røff sjø rett forfra.

$P_{SI}$  er et minimum designtrykk for yttersiden av superstruktur og er basert på erfaring og skipsbygningspraksis. Denne inkluderer ikke noen form for bølgeanalyse eller operasjonell faktor, se også kapittel 13.

Hverken  $P_W$  eller  $P_{SI}$  tar hensyn til brytende bølger.

I henhold til regelverket var vinduene på 2 dekk, som ble skadet, lokalisert så langt akter og så langt opp fra vannlinjen at bølgetrykk ikke lenger var dimensjonerende, dvs  $P_{SI} > P_W$ . Som følge av vinduenes plassering ble regelen om minimumstrykk vist i Figur 8-1 benyttet. Denne formelen er ikke definert som en EDW, men basert på erfaring og skipsbygningspraksis.

Vinduene og stålstrukturen i skipssiden ( huden ) på dekk 2 var derfor dimensjonert etter skipsreglene [3], DNVGL-RU-SHIP Pt.3 Ch.4 Sec.5 [3.3]<sup>1</sup> som vist i Figur 8-1:

### 3.3 Sides of superstructures

**3.3.1** The design pressure for the external sides of superstructures, in  $\text{kN/m}^2$ , shall not be taken less than:

$$P_{SI} = 3C_W(C_B + 0.7) - 2(z - T_{sc})$$

but shall not be less than:

- 0  $\text{kN/m}^2$  for direct strength analysis according to Ch.7
- 2.5  $\text{kN/m}^2$  for other cases.

Figur 8-1 Regeltrykk fra Pt3 Ch.4 Sec.5 [3.3]

Dette er det såkalte minimumstrykket omtalt i 7.2.

Disse spesifiserer at trykk skal beregnes for sidene av superstrukturen og gir et statisk designtrykk basert på vertikalposisjonen ( $z$ ) relativ til maks dypgang ( $T_{sc}$ ), skipets form ( $C_b$ ), og skipsreglernes bølgeparameter ( $C_w$ ), der sistnevnte er utledet fra Nord Atlanter-scatter med 25 års returperiode. Med superstruktur menes de delene av konstruksjonen som er plassert på fribordsdekket som i tillegg strekker seg fra styrbord til babord side. Designtrykk og andre designparametre for vinduene er gitt i Figur 8-2.

<sup>1</sup> DNVGL-RU-SHIP, Part 3 Hull, Chapter 4 Loads, Section 5 External Loads



Figur 8-2 Designparametere for vinduene.

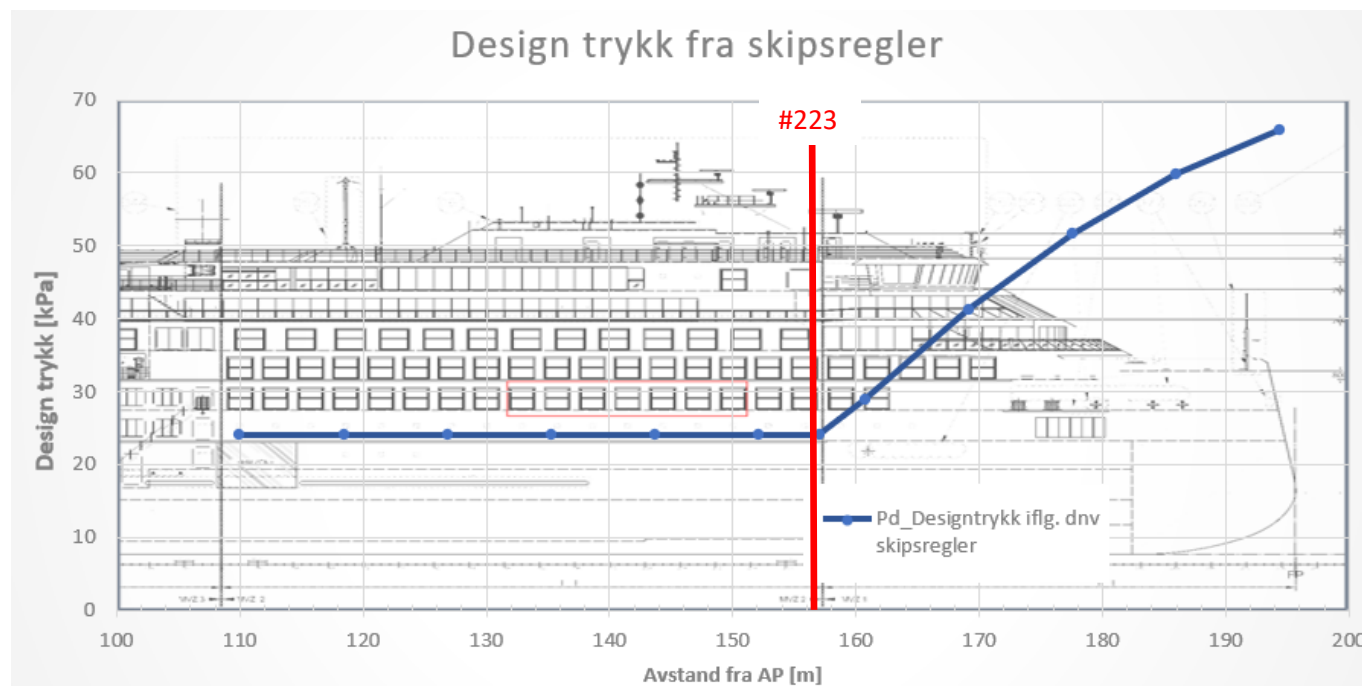
### 8.1 Verifikasjon av designtrykk

For å verifisere beregningen av designtrykk har det blitt kjørt en egen analyse i Skipsdesign verktøyet Nauticus Hull, for å undersøke verdien av eksternt trykk på ytterhuden mellom dekk 2 og dekk 3. Nauticus Hull ble også benyttet av verftet for beregning av designtrykk på Viking Polaris i designfasen.

Forenfor ramme #223 beregnes designtrykk ut fra designbølger for møtende sjø, hvilket gir økt krav til designtrykk, se Figur 8-3. Resultatene fra undersøkelsen er gitt i Tabell 8-1 viser god overenstemmelse mellom trykkene. Undersøkelsen konkluderer derfor med at designtrykket benyttet for konstruksjon og testing av vinduene og innfestinger er korrekt beregnet i henhold til skipsreglene.

Input:								
X-position, LCP [Frame No.]	#154	#166	#178	#190	#202	#214	#226	
Y-position, LCP [mm]		11750	11750	11750	11750	11750	11750	11750
Z-position, LCP [mm]		14180	14180	14180	14180	14180	14180	14180
Select position for load application	Superstructure, side	Superstructure, side	Superstructure, side	Superstructure, side	Superstructure, side	Superstructure, side	Superstructure, side	Superstructure, side
Select associated PSM (if applicable)	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->
Select compartment 1	External	External	External	External	External	External	External	External
Select compartment 2	No compartment	No compartment	No compartment	No compartment	No compartment	No compartment	No compartment	No compartment
Load scenario	-All-	-All-	-All-	-All-	-All-	-All-	-All-	-All-
Superstructure:								
Superstructure/Deckhouse Tier no.		3	3	3	3	3	3	3
b1 [m]		23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5
B1 [m]		23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5
zw [m]		14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18
Machinery casing		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Results:								
Information								
Design cases for Comp. 1	P_SI	P_SI	P_SI	P_SI	P_SI	P_SI	P_SI	ExtremeSea_SD_SEA-1,...
Design pressure, P, for Comp.1 [kN/m <sup>2</sup> ]		24.1	24.1	24.1	24.1	24.1	24.1	28.9
Design cases for Comp. 2								
Design pressure, P, for Comp.2 [kN/m <sup>2</sup> ]		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Max static+dynamic design press. [kN/m <sup>2</sup> ]		24.1	24.1	24.1	24.1	24.1	24.1	28.9
Max static design press. [kN/m <sup>2</sup> ]		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabell 8-1 Designtrykk for skadeområde fra skipsregler, beregnet med Nauticus Hull.



Figur 8-3 Regeltrykk for skipssiden.

## 8.2 Andre metoder for å beregne trykk fra bølgeslag

Regeltrykket som er benyttet til beregning av design trykk for vinduene (se Tabell 8-1) er som nevnt et såkalt minimumstrykk delvis basert på erfarings data.

Det finnes andre metoder for å beregne trykket fra en bølge som treffer en vertikal flate (slik som vinduene på Viking Polaris) som i større grad er basert på bølge kinematikk. Disse metodene tar utgangspunkt i den innkommende bølges hovedparametere som høyde, lengde og steilhet. Disse metodene er blant annet beskrevet i DNV's Recommended Practice [4], samt annen faglitteratur for prosjektering av skip og offshore strukturer som [8]. Felles for disse metodene er at de med bølgeparametere fra ulykkes tidspunktet vil gi vesentlig høyere trykk enn regeltrykket benyttet for design av vinduene i ulykkesområdet på Viking Polaris.

## 9. KONSTRUKSJONSGRUNNLAG FOR VINDUER

### 9.1 Regler for vinduer

#### 9.1.1 Generelt

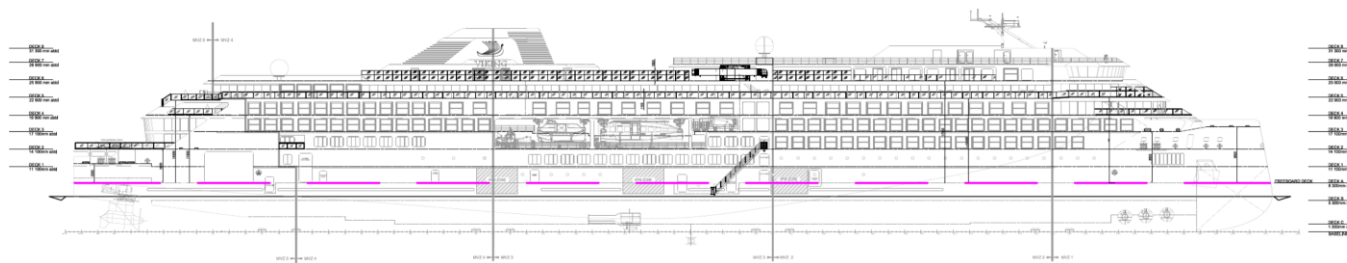
Skipsregler for vinduer er gitt i DNVGL-RU-SHIP Pt.3 Ch.12 Sec.6<sup>2</sup> og DNVGL-RU-SHIP Pt.5 Ch.4 Sec.2<sup>3</sup>. Skipsreglene gir føringer på plassering av vinduer, tykkelse og type glass, innfesting og testing av vindu inkl. karm. Skipsreglene som gjelder for de aktuelle vinduene, kan oppsummeres med følgende punkter:

- Vinduer skal ikke plasseres under fribordet
- Glassets tykkelse skal dimensjoneres i henhold til skipsregler Pt.3 Ch.12 Sec.6 [4]
- Herdet eller herdet laminert sikkerhetsglass skal brukes
- Glassruten skal supporteres langs alle sider
- Vinduer med glassrute over 1m<sup>2</sup> dekkes ikke av kjente standarder og skal derfor testes i henhold til skipsregler Pt.3 Ch.12 Sec.6 [6.1]

#### 9.1.2 Vinduers plassering

Begrensninger på plassering av værbestandige vinduer er basert på ICLL (International Convention of Load Lines). ICLL setter standarder for å beskytte de delene av fartøyet som bidrar til oppdrift fra å bli oversvømt, og er dermed ikke knyttet til sannsynligheten for sammentreff med bølger.

ICLL og skipsreglene til DNV sier at vinduer ikke skal plasseres under fribordet eller på superstrukturen som bidrar til oppdrift på dekk 1. Fribordet til Viking Polaris er på Dekk A (8300mm over kjølen) som vist i Figur 9-1 og dekk 1 er 11100mm over kjølen. De aktuelle vinduene er plassert over fribordet på dekk 2 og følger derfor DNVs skipsregler.



Figur 9-1 Fribordstegning

#### 9.1.3 Glasstykkelse

Kravene til minimum glasstykkelse for skipsvinduer har opphav i ISO standard nummer 21005 "Thermally toughened safety glass panes for windows and side scuttles". De fleste IACS-selskap, inkludert DNV, bruker denne standarden i sine regelverk. Selve glasset er generelt designet med en sikkerhetsfaktor på 4 sammenlignet med omkringliggende stål, se Tabell 5 i [9]. Det betyr at en sikkerhetsfaktor på 4 ligger innbakt i formelen for påkrevd glasstykkelse som presenteres nedenfor. Sikkerhetsfaktoren på 4 gjelder for statisk lastpåføring, og betyr at glasset skal tåle 4xdesigntrykk i en fullskala statisk trykktest. Denne sikkerhetsfaktoren er ment å hensynta de ulike materialegenskapene til glass og stål. Blant annet er glass sprøtt og knuses der stål deformeres og vil absorbere energi fra en brytende bølge.

<sup>2</sup> DNVGL-RU-SHIP, Part 3 Hull, Chapter 12 Openings and closing appliances, Section 6 Windows, side scuttles and skylights

<sup>3</sup> DNVGL-RU-SHIP, Part 5 Ship types, Chapter 4 Passenger ships, Section 2 Hull, 6 Glass structure

Reglene for designtrykk på skipssiden er basert på statisk trykk, og hensyntar ikke impulslaster fra brytende bølger. En brytende bølge som treffer skipssiden, vil gi en impulslast der trykket kan være høyere enn det statiske designtrykket uten at materialet går til brudd. Om materialet går til brudd avhenger av egenskapene til materialet i kombinasjon med impulslastens karakteristikk som maksimalt trykk og varighet.

I skipsreglene er påkrevd tykkelse,  $t_r$ , for et-lags glass gitt ved:

$$t_r = \frac{b}{200} \sqrt{\beta P}$$

Der:

$t_r$	=	påkrevd tykkelse
$b$	=	korteste lengde på vinduet, som er 928mm
$\beta$	=	faktor lik 0.6 avhenging av vindusstørrelse (1800mmx928mm)
$P$	=	designtrykk i kPa

For laminert sikkerhetsglass skal den totale ekvivalente tykkelsen,  $t_e$  (i mm), være i henhold til følgende formel, se Pt3, Ch.12, Sec. 6 [4.1.3]:

$$t_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n t_i^3}{t_{max}}} \geq t_r$$

Der:

$n$	=	antall laminerte lag, som er 2
$t_i$	=	tykkelse på hvert enkelt lag i mm
$t_{max}$	=	den største tykkelsen av $n$ lag i mm
$t_e$	=	ekvivalent tykkelse av laminert herdet sikkerhetsglass i mm og skal ikke være mindre enn 10mm.

Laminert 2-lags sikkerhetsglass er brukt på de aktuelle vinduene og SOMEK har designet glasstykkelsen i henhold til påkrevd tykkelse (se formel for  $t_r$ ), men ikke i henhold til ekvivalent tykkelse (se formel for  $t_e$ ). Skipsreglene åpner for å avvike formel for  $t_e$  dersom tester utføres i henhold til Pt3, Ch.12, Sec. 6 [5]. Av disse testene har ikke punkt 4, se Figur 10-2) blitt utført der glasset testes med 4xP trykk. I stedet har SOMEK dokumentert at det brukte 2-lags sikkerhetsglasset er like sterkt som et-lags glass i henhold til EN1288-3 (se side 104-111 i [10]) og designer derfor etter formelen for  $t_r$ . Dette skal i utgangspunktet ikke gå utover sikkerhetsnivået, nettopp fordi SOMEK har bevist at 2-lags glasset som brukes er like sterkt eller sterkere enn et-lags glass.

Det er likevel knyttet usikkerhet til om EN1288-3 testen gir samme sikkerhetsnivå for det laminerte glasset som testen beskrevet i Pt3, Ch.12, Sec. 6 [6] punkt 4). Spesielt fordi SOMEK antar at karakteristiske bruddstyrke på det monolittiske glasset er 120MPa, mens skipsreglene som henviser til ISO 11336-1 [9] legger til grunn en bruddstyrke på 160MPa i beregning av minimum tykkelse av monolittisk glass (formel 5 og Tabell 5 i ISO 11336-1). Dersom SOMEK hadde brukt 160MPa ville det laminerte glasset vært svakere enn monolittisk glass for 10+SG+8mm og 12+SG+12mm, mens resultatet ville vært uendret for 6+SG+6mm glass. Glasstykkelsene SOMEK har beregnet og resultatene er angitt i [10].

Laminert glass	Statisk kraft [N] som gir brudd			Status	
	4-punkts test (EN1288-3)	Monolittisk glass		SOMEK	7Waves
		120Mpa	160Mpa		
6+SG+6mm	7547	5184	6912	Godkjent	Godkjent
10+SG+8mm	15027	11664	15552	Godkjent	Underkjent
12+SG+12mm	24984	20736	27648	Godkjent	Underkjent

Tabell 9-1 Statisk bruddstyrke på laminert glass sammenlignet med monolittisk



Forskjell i statisk kraft som gir brudd for de nederste vinduene som knuste med glasstykkelse 10+SG+8mm er på 525N. Selv om disse resultatene viser avvik fra regelverket, og at uten dette avviket ville vindusglasset hatt høyere bruddstyrke, ville utfallet av ulykken vært den samme. Dette fordi det faktiske trykket som bølgen påførte var langt høyere enn designtrykket. Det svakeste punktet for flere av de nedre vinduene var karmsstolpen. Med høyere bruddstyrke på glasset ville karmstolpen likevel gitt etter og dratt med seg (og knust) vindusruten idet karmstolpen trykkes inn i lugaren, og dermed hadde ulykken hatt samme utfall.

#### 9.1.4 Innfesting av vindusrute til vinduskarm

Skipsreglene Pt3, Ch.12, Sec. 6 [5.1.3] krever en overlapp mellom glassrute og vinduskarm på minst 10mm eller  $b/75$ mm, der  $b$  er korteste lengde på vinduet.  $b$  er 804mm for de øvre og 928mm for de nedre vinduene. Overlappet trenger ikke være større enn 20mm. Det vil si at kravet er minimum 11mm overlapp for de øvre og 13mm for de nedre vinduene.

Overlappet på de aktuelle vinduene er 15mm (øvre) og 23mm (nedre), som er i henhold til skipsreglene.

#### 9.1.5 Innfesting av vinduskarm til skroget

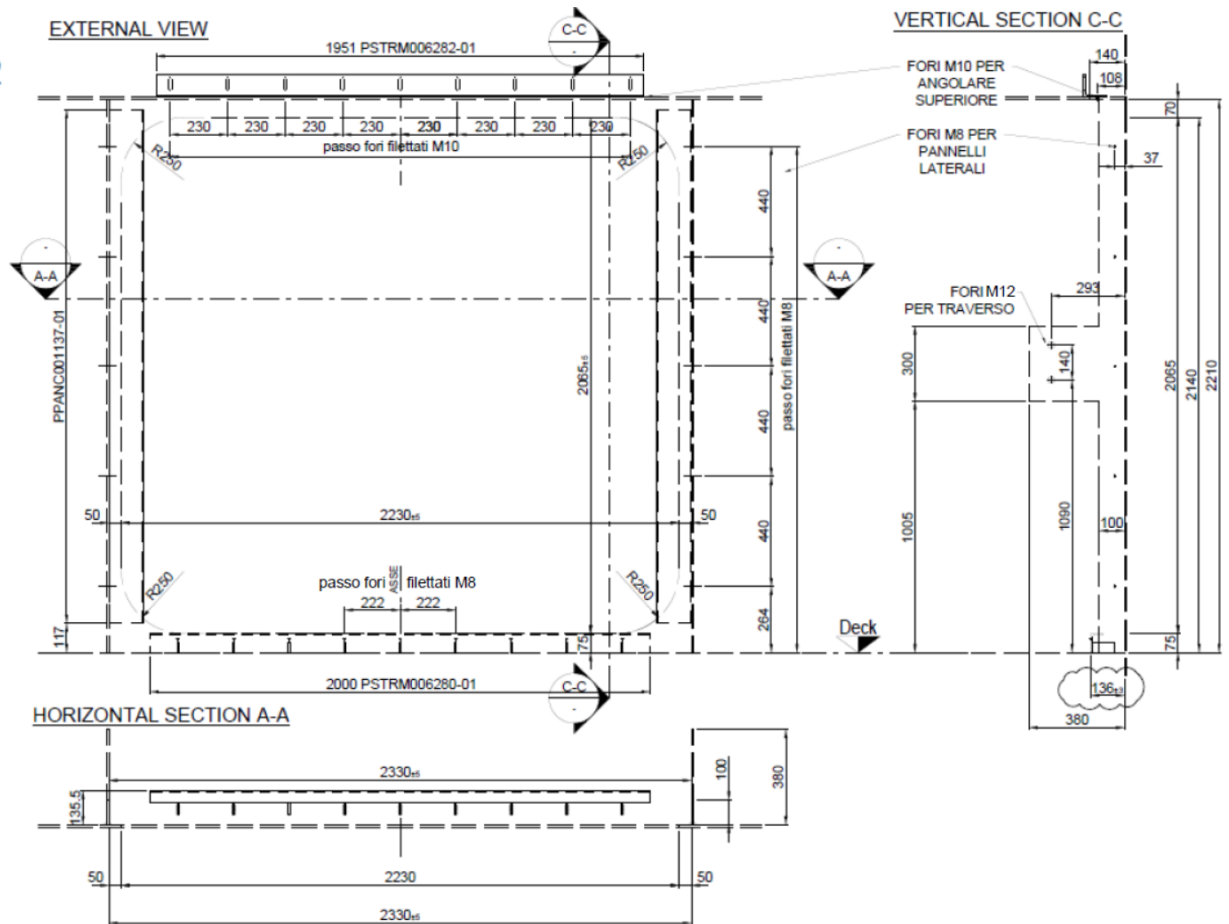
Vinduskarmer av metall kan boltes eller sveises til skutesiden i henhold til skipsreglene Pt.3 Ch.12 Sec.6 [5.1].

Avstanden mellom skruene som fester vinduskarmen til skipsstrukturen skal ikke være større enn 150mm. De aktuelle vinduene er festet med ulike skruer som også har ulik avstand. De lastbærende skruene har en avstand som varierer fra 222mm – 230mm. Kapasiteten til vindusinnfestningen, inkludert ramme, bolter og avstivere, er av DNV vurdert å være i henhold til gjeldende regler gjennom ekvivalens prinsippet i Pt.1 Ch.1 Sec.1 [2.5.9], ved gjennomføring av en styrketest av den komplette installasjonen. Skrueinnfestingene er vist i Figur 9-2 og Figur 9-3. De lastbærende skruene er fremhevet i Figur 9-3. Resterende skruer holder et tynt aluminiumsprofil med lite bæreevne og regnes derfor ikke som lastbærende.

Det er ikke blitt funnet skadede eller ødelagte lastbærende skruer for de aktuelle vinduene. Det kan derfor konkluderes med at de lastbærende skruene har hatt tilstrekkelig styrke. Dette har også blitt verifisert med fullskala trykktest som forklart i kap. 10.2.



DECK 2



Figur 9-2 Skruerinnfesting dekk 2

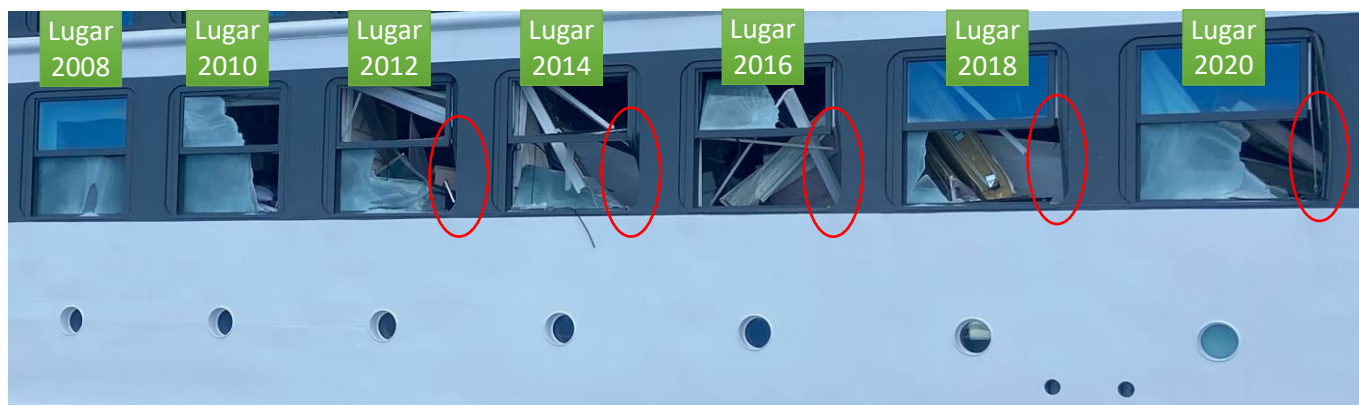


Figur 9-3 Skruerinnfesting, røde prikker viser hvor skruene sitter. De lastbærende skruene er fremhevet.

## 9.2 Feilmoder

### 9.2.1 Nedre vinduer lugar 2012, 2014, 2016, 2018 og 2020

I 5 av 7 lugarer (2012, 2014, 2016, 2018 og 2020) har aktre karmstolpe blitt slått inn, se Figur 9-4 og Figur 9-5. For disse vinduene kan det fastslås at karmstolpen har blitt slått inn samtidig som den drar med seg den aktre kortsiden av vindusruten slik at glasset også knuser. Det vil si at vinduskarmen gir etter før vindusruten, og at vindusruten knuser som et resultat av høyt trykk og manglende supportering fra karmstolpen.



Figur 9-4 Oversiktsbilde som viser de skadede lugarene på dekk 2, her synes det at aktre karm stolpe er skadet på 5 av 7 skadede vinduer.

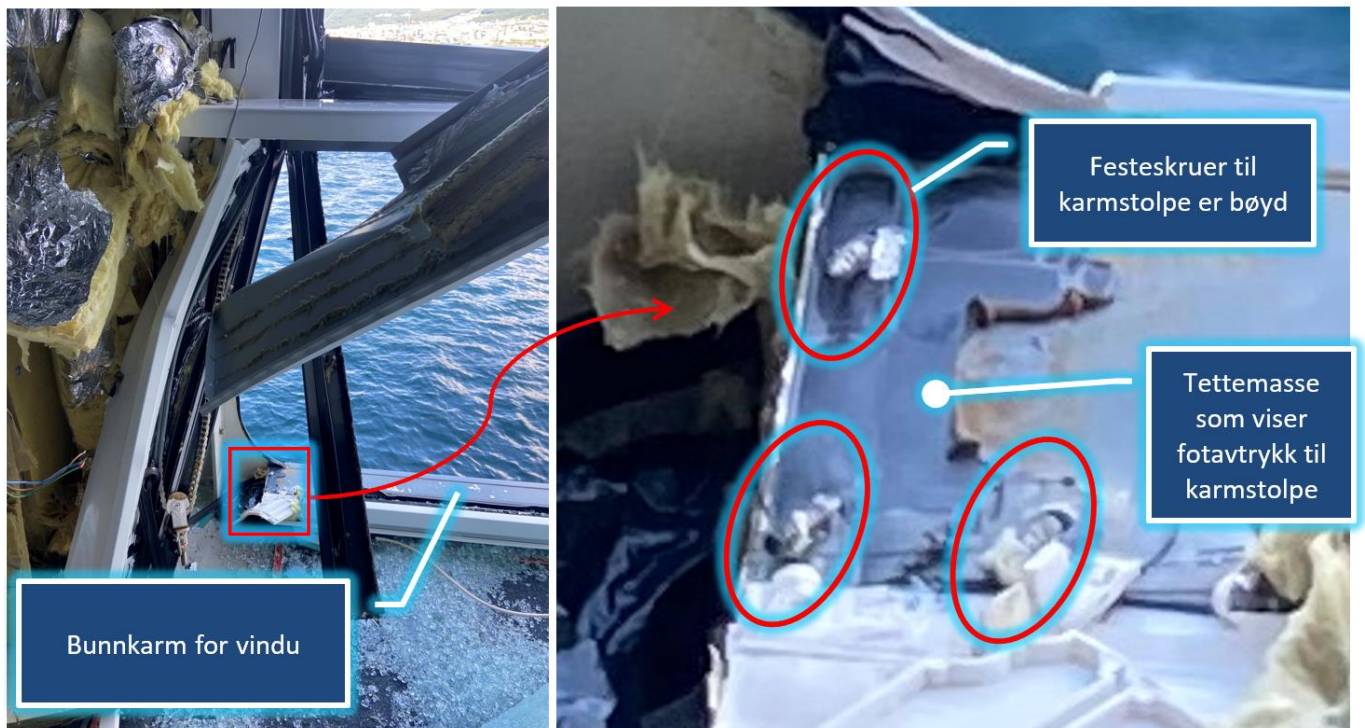


Figur 9-5 Vindu ved Lugar 2014

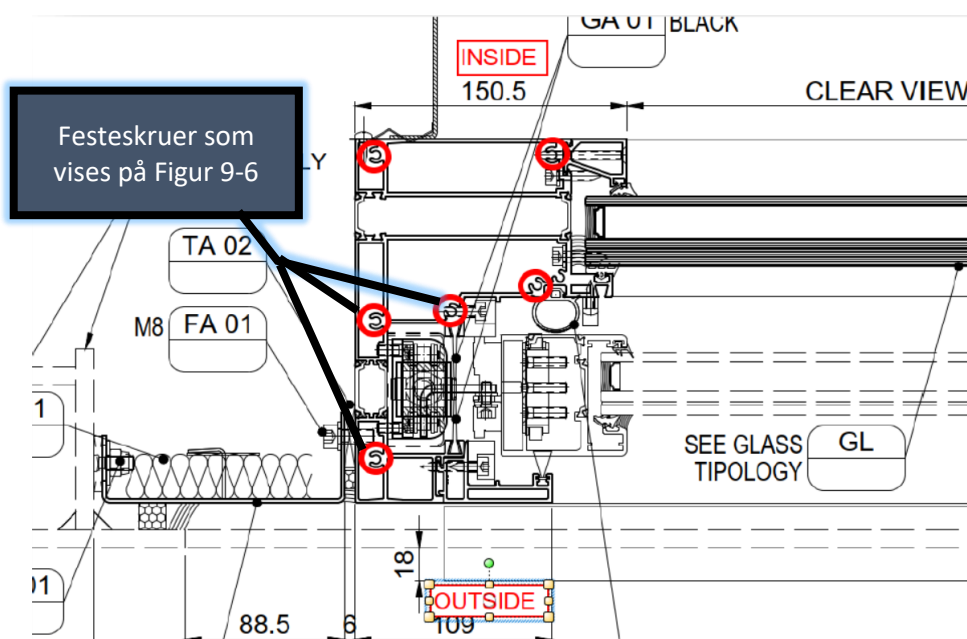


På Figur 9-6 vises et nærbilde av aktre karmstolpe. Der ser man at 3 av 6 festeskruer er bøyd som følge av at karmstolpen er trykket inn i lugaren. De 6 festeskruene som er brukt for å feste karmstolpen er vist i Figur 9-7.

Fullskala trykktesten som ble utført, se kapittel 10.2, viste at karmen tålte et testtrykk på 40kPa. Vinduene og karm for disse lugarene hadde et designtrykk på 24.4kPa. Siden karmen tålte et høyere trykk, men ga etter først tyder dette på at trykket har vært høyere enn 40kPa og dermed langt høyere enn det vinduet var designet for. Dersom karmstolpen hadde vært festet med lastbærende skruer til skroget, kunne karmen tålt trykket fra bølgen. Men siden trykket fra bølgen var så mye høyere enn designtrykket ville uansett vinduet knust.



Figur 9-6 Vinduskarmens svakeste punkt



Figur 9-7 Vinduskarmens festeskruer sett ovenfra

### 9.2.2 Øvre vinduer lugar 2010, 2012, 2014 og 2016

På Figur 9-8 vises de 4 øverste ødelagte vinduene der karmen fortsatt er intakt. Det betyr at glasset var det svakeste punktet for disse rutene og ikke karmen som for de nederste vinduene.

Utfra disse funnene kan man konkludere med at trykket har vært høyere enn det glasset tålte.



Figur 9-8 Oversiktsbilde som viser de skadede lugarene på dekk 2.

### 9.2.3 Nedre vinduer lugar 2008 og 2010

I de nedre vinduene i lugar 2008 og 2010, se Figur 9-9, er karmen fortsatt intakt, mens vinduet har knust. Dette skiller seg fra de nedre vinduene i de andre lugarene der aktre karmstolpe har blitt trykket inn og samtidig tatt med seg vindusruten. For de nedre vinduene i lugar 2008 og 2010 har glassruten vært det svakeste punktet. Det har ikke vært mulig å finne en forklaring på hvorfor karmene er intakt for disse rutene, mens aktre karmstolpe er slått inn for de resterende nedre vinduene.

Utfra disse funnene kan man konkludere med at trykket har vært høyere enn det glasset tålte.



Figur 9-9 Oversiktsbilde som viser de skadede lugarene på dekk 2.

## 9.3 Oppsummering feilmoder

- For de nedre vinduene for lugar 2012, 2014, 2016, 2018 og 2020 der karmstolpen har blitt slått inn har trykket vært høyere enn 40 kPa. Glassrutene var det svakeste punktet nede i lugar 2008 og 2010 og oppe for 2010, 2012, 2014 og 2016.

## 10. TESTER UTFØRT I DESIGN-FASEN

### 10.1 Generelt

Det er ikke uniforme krav i anerkjente internasjonale regler for skip til testing av vinduer, men det kreves normalt at anerkjente standarder skal brukes. Reglene for Viking Polaris, i dette tilfellet gjelder DNVGL-RU-SHIP, Pt.3, Ch.12 Sec.6 [1.1.5], krever derfor fullskala tester. Disse vinduene ble testet nettopp fordi vindusflaten var over 1 m<sup>2</sup> i tillegg til at vinduets innfestning var en ny type design som ikke var standard.

Undersøkelsene av testing for vinduskonstruksjonen viser at alle påkrevde tester er utført og godkjent.

Kravene til sertifisering og testing i regelverket for de aktuelle vinduene kan oppsummeres med:

- Egen fullskala test fordi vinduene er større enn 1m<sup>2</sup>
- Glasset skal testes i henhold til EN1288-3 fordi man avviker fra tykkelseskrav i skipsreglene
- Glasset skal være i henhold til ISO 21005 og testet i henhold til ISO 614
- Spyletest for å verifisere at vinduer er værbestandig («weathertight»)
- Støt-test av balkongrekkverk (gjelder for passasjerskip)

### 10.2 Fullskala trykktest

Testen er utført i henhold til skipsregler Pt. 3 Ch. 12 Sec 6 [6.2] punkt 1-3. Testen ble utført på en hydrostatisk testbenk der designtrykket (35.4kPa) påføres statisk over 5min. Dette tilsvarte designtrykket til det fremste vinduet for lugar 2000, som også var det sterkeste på dekk 2. Et bilde fra testen kan sees i Figur 10-1.

Formålet med testen er å sjekke at vinduet inkludert karm og innfesting tåler designtrykket. Det betyr at testen er utført med likt oppsett som ferdig montert på skipet.

Testen er godkjent og dokumentert i [11].

SOMEC har på eget initiativ økt trykket under testen til 40kPa for å teste restkapasiteten til vinduene [10]. Testen var positiv da ingen synlige skader eller deformasjoner ble registrert.



Figur 10-1 Statisk trykktest, bilder fra vindusfabrikant, SOMEC



### 10.3 Trykktest av glasset

For vinduer plassert under elevasjon 22.7m fra kjølen (under 1.7 Cw fra vannlinjen) ber skipsreglene om at glasset testes for en varierende trykklast med 4 x designtrykk. Den varierende trykktesten er beskrevet i skipsreglene Pt. 3 Ch. 12 Sec 6 [6.2] og vist i Figur 10-2. Merk at punkt 4 omhandler denne testen, mens punkt 1-3 er dekket i delkapittel 10.2.

Formålet med testen er å verifisere tilstrekkelig styrke på glasset (uten karm og innfesting).

Denne testen er ikke utført. I stedet har glasset blitt testet i henhold til en 4-punkts bøyetest (EN 1288-3) som verifiserer styrken på glasset. Konklusjonen etter EN 1288-3 testen var at det laminerte glasset er like sterkt som monolittisk (1-lags) glass. Testen er godkjent og dokumentert i [10]. Det er usikkert om EN 1288-3 gir samme sikkerhetsnivå som testen beskrevet i Pt. 3 Ch. 12 Sec 6 [6.2] punkt 4 (se diskusjon i Kap 9.1.3), men dette har ikke vært utslagsgivende for ulykken.

#### 6.2 Test arrangement

- 1) The glass pane together with its framing shall be supported with an arrangement identical to that on board the actual ship.
- 2) The test pressure shall be applied uniformly over the entire glass surface.
- 3) Step 1: Increase test pressure to the design pressure as defined in Ch.4 Sec.5 [3.5] within 30 seconds and maintain the pressure for 3 minutes. No leakage, no signs of structural damage to frame or glass pane retaining structure and no signs of glass pane detaching from retaining structure shall be visible.
- 4) Step 2\*: Perform 3 loading/unloading cycles between test pressure  $P$  and  $4 \times P$  within  $60 \text{ sec} < t < 120 \text{ sec}$  before reducing the test pressure to zero. The glass pane shall show no signs of damage.

In case of leakage, damage to the framing structure, glass pane detaching from the frame or visible damage, the test shall be repeated.

\*Note: Step 2 is not required for windows located in superstructure and deckhouse sides from 1.7 Cw above WL at scantling draft.

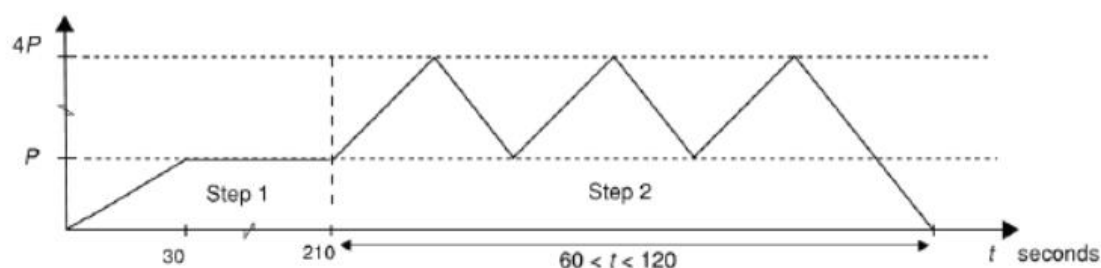


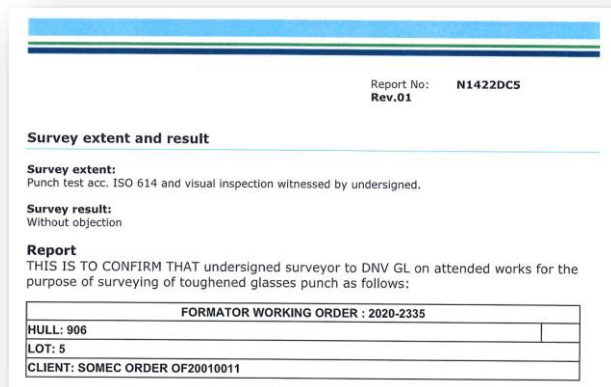
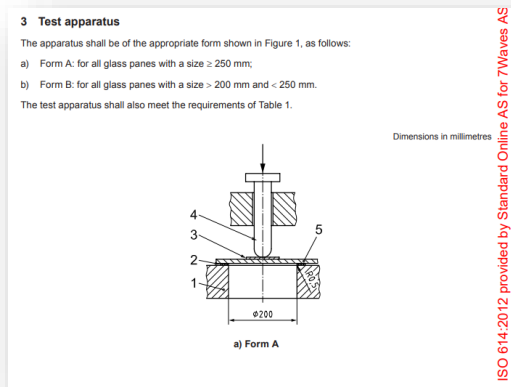
Figure 2 Test sequence for glass pane and framing

Figur 10-2 Utsnitt fra skipsreglene. Testkrav fra Pt. 3 Ch. 12 Sec 6 [6.2]

### 10.4 Punch-test

Punch-test er utført i henhold til ISO614. Denne testen er relevant for herdet sikkerhetsglass brukt som vindu på skip og sjekker lokal styrke av glasset. Testen utføres ved å plassere et stykke av glasset over en flat ring. Deretter plasseres et stempel sentrisk over den flate ringen. Stempelet presses til slutt mot glasset til en angitt designkraft for å teste den lokale styrken. Kraften øker med 1kN/s [12]. Testen er godkjent og dokumentert i [10].





Figur 10-3 Detaljer fra punch-testen

## 10.5 Spyle-test

Høytrykkspyling av skjøt mellom vindu-karm og vindu-vindu. Har blitt utført for å teste hvorvidt vinduene er værbestandig (weather-tightness). Spyle-testen er beskrevet i skipsreglene Pt. 3 Ch. 12 Sec 6 [6.4] og vist i Figur 10-4. Testen er godkjent og dokumentert i [13].

## 6.4 Hose testing

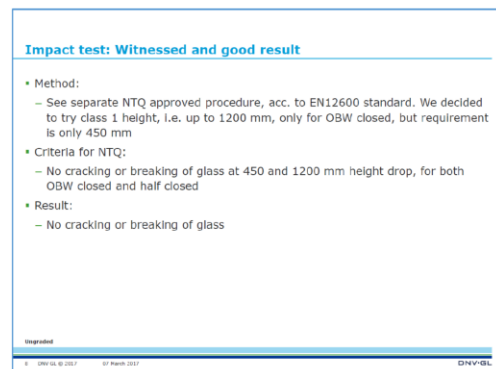
Hose testing as per Pt.2 Ch.4 Sec.2 shall be performed after installation to verify the weathertight performance of the window.

Figur 10-4 Utsnitt fra skipsreglene. Testkrav fra Pt. 3 Ch. 12 Sec 6 [6.4]

## 10.6 Støt-test

En støt-test er utført i henhold til EN12600 med 50kg pendel og 1.2m fallhøyde. Detaljer om testen er dokumentert i [14]. Krav om testen er gitt i skispreglene [6], Pt. 5 Ch. 4 Sec. 1 [5.1.5] og er aktuell for balkongrekkverk i glass. Disse vinduene blir som et balkongrekkverk i nedsenket posisjon. Testen er godkjent og dokumentert i [15].

**IMPACT TEST:** Somek followed the standard described in the European Norm EN ISO 12600, with an impactor of 50 kg. Specification asked for a drop height of 450 mm. A further test to 1200 mm of drop height was passed, even if not mandatory for the specs.



Figur 10-5 Støt-test

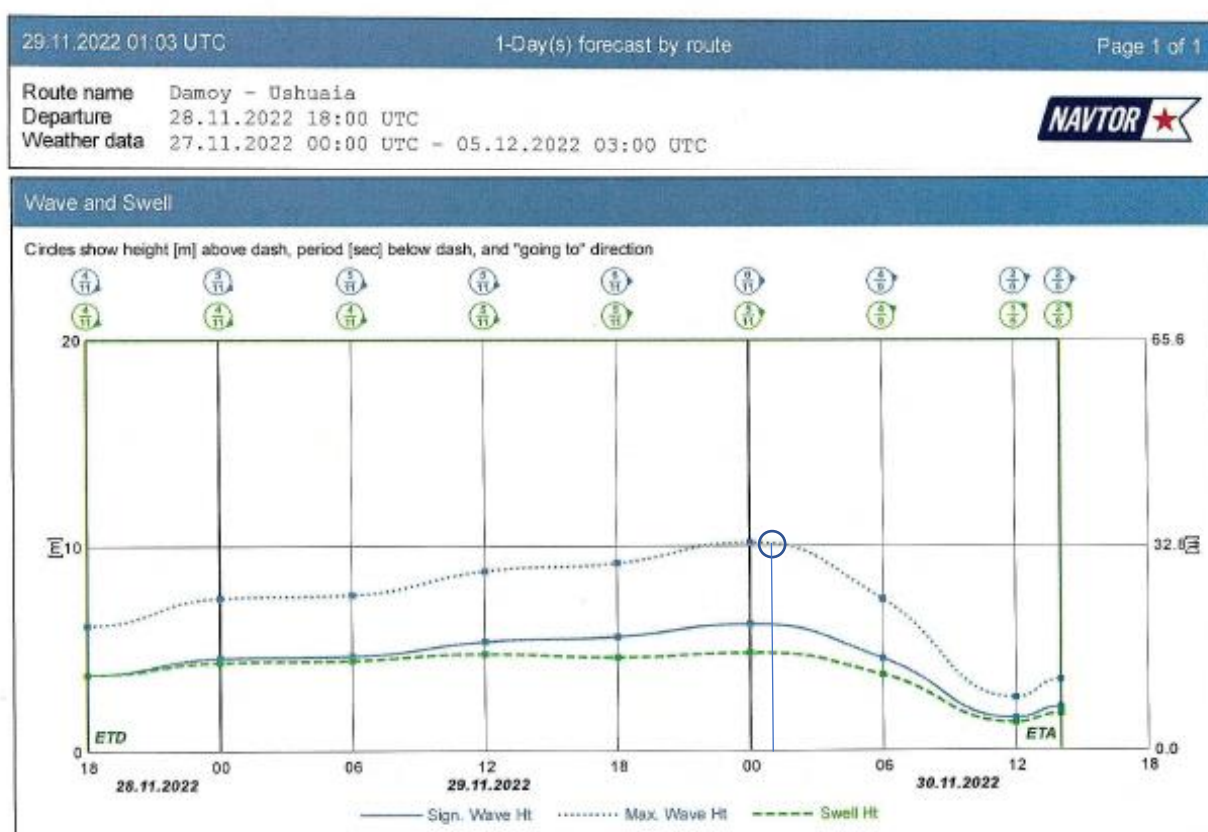
## 11. VÆR OG BØLGEFORHOLD

### 11.1 Bakgrunn

Undersøkelsen knyttet til vær og bølgeforhold har til hensikt å:

1. undersøke ulykkesbølgen og dens nøkkelparametere.
2. finne ut om ulykkesbølgen var innenfor hva skipet var designet for å tåle.

Fra værmeldingen [16] er bølgetilstanden ved ulykkestidspunktet karakterisert ved signifikant og maksimal bølgehøyde samt tilhørende periode, ( $H_S=6\text{m}$ ,  $H_{MAX}=10\text{m}$ ,  $T_P=11\text{s}$ ). Utskrift fra skipets ruteplanleggingsstasjon er vist i Figur 11-1.



Figur 11-1 Utskrift fra skipets ruteplanleggingsstasjon, for turen Damoy-Ushuaia [16]. Blå ring viser ulykkestidspunktet (01:35 UTC)

Rapportene fra skipets mannskap [17] i den aktuelle perioden bekrefter at bølgemeldingen stemte overens med observert bølgehøyde fra broen på skipet, men vinden ble rapportert til å øke utover kvelden, med vindkast på 60-76 knop.

Ut fra værmeldingen var de varslede bølgeforholdene innenfor det skipet var designet for å tåle (sjøtilstander med 25år returperiode, se også kapittel 7.2). Dermed er det ikke opplagt at skipet ble truffet av en unormal stor bølge den ikke var designet for å tåle.

I det følgende er det derfor gjort en nærmere undersøkelse av ulykkesbølgens karakteristik.

## 11.2 Ulykkesbølgen

Fra beskrivelsen av ulykken så er det rapportert at det hørtes et enkelt smell idet bølgen traff og ødela vinduene på dekk 2 [17]. Det er videre rapportert at all skaden ble forårsaket av denne ene bølgen [17]. Den er derfor omtalt som «ulykkesbølgen».

Skipet har ikke hatt måleinstrumenter om bord som måler bølger som bølgerader eller liknende. Våre undersøkelser er derfor basert på:

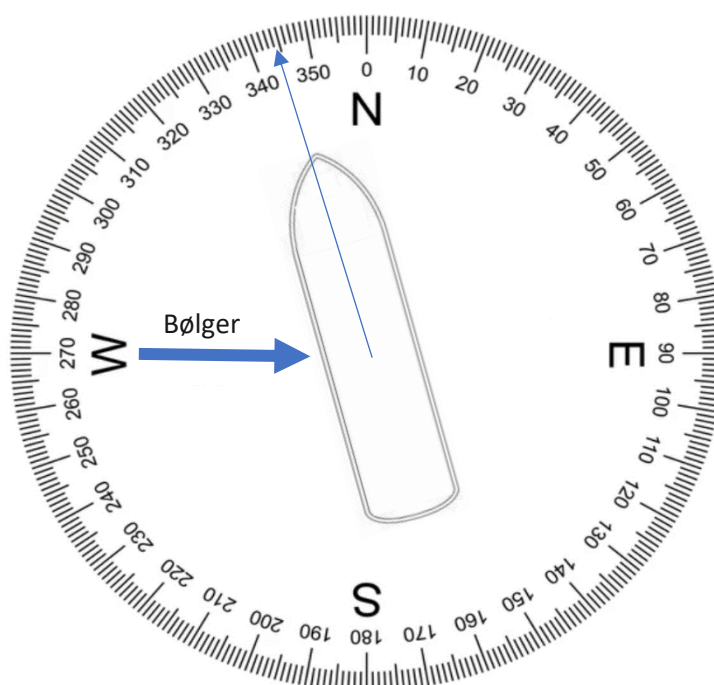
- Værmeldingen
- Observasjoner fra CCTV bilder

For å karakterisere ulykkesbølgen har fokus vært på å finne og kvantifisere:

- Relativ bølgeretning med skipets kurs
- Bølgehøyde og bølgeperiode

## 11.3 Relativ bølgeretning

Værmeldingen på ulykkestidspunktet predikerte bølger fra 270 grader (fra vest). Ifølge VDR var skipets kurs 344 grader rett før ulykken. Dette gir en relativ bølgeretning på sjøtilstanden på 74 grader mot babord relativt til skipets lengderetning, se Figur 11-2. Denne bølgeretningen understøttes delvis av observasjoner fra CCTV-kameraene vist på Figur 11-3. Her ser det imidlertid ut som at vinkelen er noe mindre, og relativ bølgeretning er derfor anslått å være omlag 60-80grader mot babord. Som betyr en mellomting mellom sidesjø og bølger skrått inn forfra.



Figur 11-2 Relativ bølgeretning

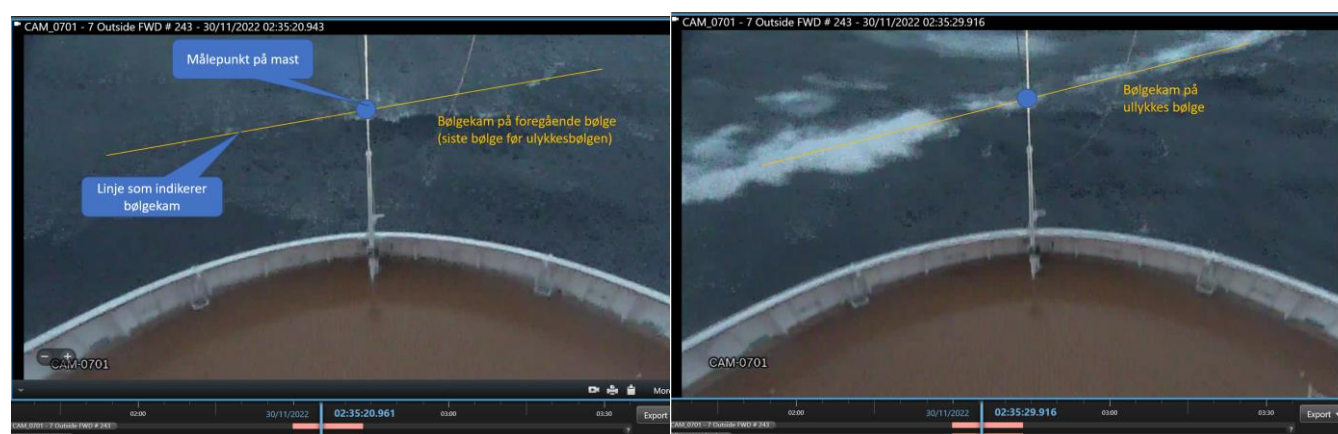




Figur 11-3 Bilder fra CCTV kamera på dekk 5, babord ved ramme #162, rett før sammenstøtet (02:35:36 UTC+1).

#### 11.4 Bølgeperiode

Fra CCTV bildene fremkommer det at bølgen brøt rett før eller i det den traff skipet. Bølger kan bryte enten på grunn av at sterk vind eller at motstrøm gjør bølgekammen ustabil [18], eller at høyde/lengde forholdet gjør at bølgen bryter [8]. Brytende bølger er mer vanlig i en «oppbyggende» sjøtilstand (når bølgehøyden og vindstyrken fortsatt øker) og i krapp sjø (kortere bølger).



Figur 11-4 CCTV Bilder fra bro som viser tidsintervall mellom forutgående og ulykkesbølgen målt fra baugmast



Figur 11-5 CCTV bilder fra ramme #198, dekk 5, babord side. Målepunkt er lyskasteren på rekke.

Figur 11-4 viser bølgekam på forutgående bølge passere omtrent på målepunktet av baugmasten 2:35:20:9, kammen på ulykkesbølgen passerer omtrent samme punkt ved 2:35:29:9, som gir møteperiode på 9.0 sekunder.

Figur 11-5 viser bølgekam på forutgående bølge passerer området ved stativet 2:35:28:3 og kammen på ulykkesbølgen passerer omtrent ved målepunktet 2:35:36:1, som gir møteperiode på 7.8 sekunder.

Basert på ovenstående er det rimelig å anta et gjennomsnitt av disse verdiene, dvs. at det tok cirka 8.5 sekunder for skipet å passere begge bølgekammene.

## 11.5 Bølgehøyde

For å estimere den maksimale bølgehøyden i sjøtilstanden har følgende metoder blitt brukt:

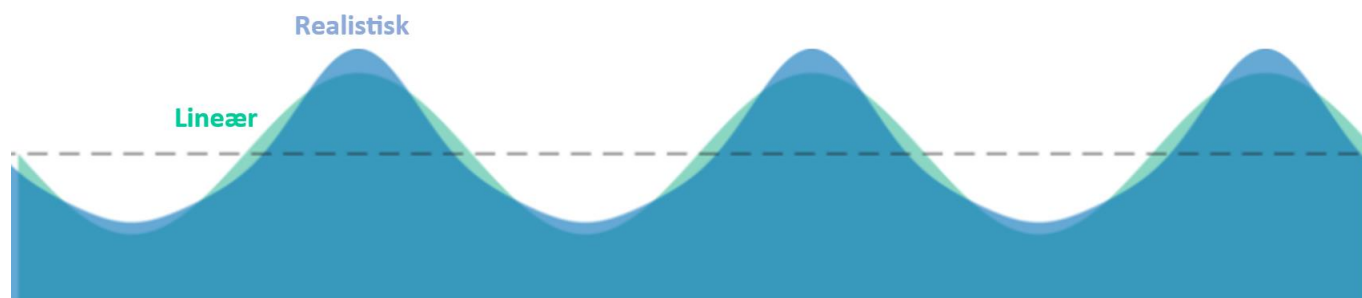
1. Vurdert høyden på bølgen basert på avstanden fra vannlinjen til de knuste vinduene og CCTV
2. Utført bølgeresulteringer for å finne sannsynlige maksimale bølgehøyder, se beregning i Appendiks A.

### 1. Bølgehøyde basert på avstand fra vannlinje til skadested

Avstanden fra vannlinjen til Dekk 3 med uskadede vinduer er 11m (det ble ikke funnet skader på vinduer over dekk 2). Dermed må bølgekamhøyden vært mindre enn 11m fordi CCTV viser at skipet beveger seg ned i en bølgedal rett før sammenstøt.

På grunn av ulineære effekter har bølger en høyere bølgekam enn bølgedal, og man kan anta at bølgekammen er opp mot 20% høyere enn amplituden til en regulær bølge, se asymmetrifaktor i [4]. Dette fenomenet er vist i Figur 11-6 der en lineær bølge sammenliknes med en realistisk (ulineær) bølge.

Med utgangspunkt i bølgekamhøyde på 11m og asymmetrifaktor på 1.2 kan man fastslå at ulykkesbølgen var mindre enn  $(11m/1.2*2)$  18.3m.



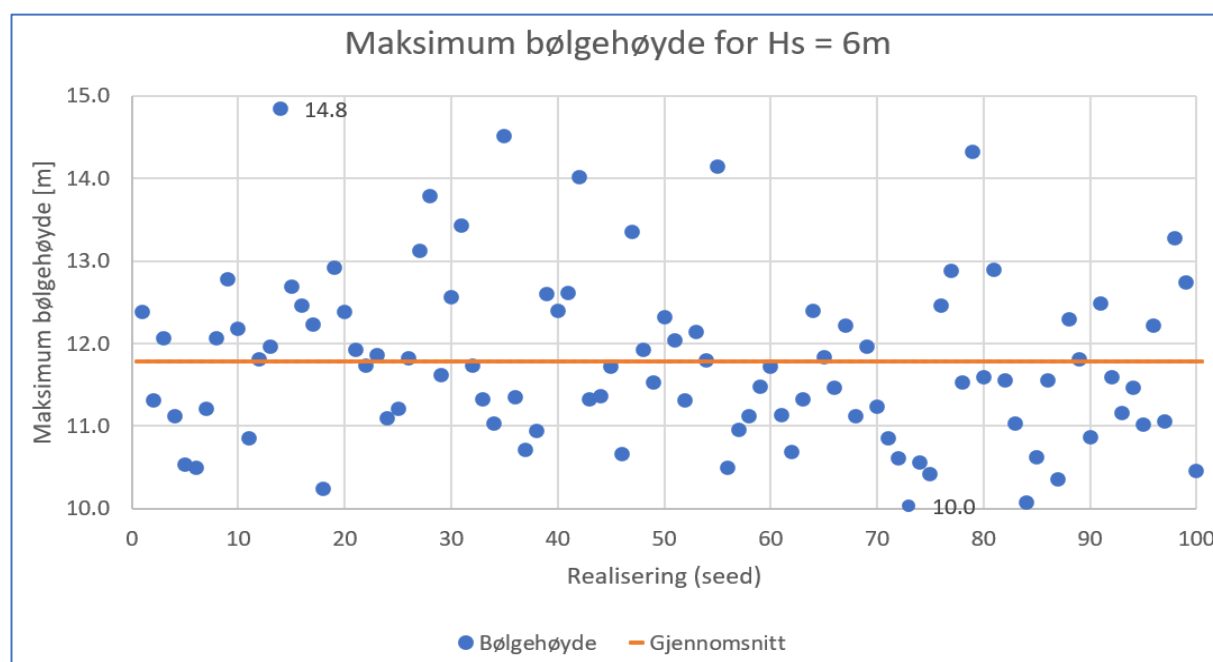
Figur 11-6 Sammenlikning av lineær og realistisk bølge. Den realistiske bølgen har høyere bølgetopp og grunnere bølgedal.

## 2. Bølgehøyde basert på bølgerrealiseringer

Bølgerrealiseringer har også blitt utført for å estimere et sannsynlig utfallsrom for bølgehøyden. Følgende er gjort for å estimere sannsynlig bølgehøyde:

- JONSWAP<sup>4</sup> bølgespekter er antatt med  $H_s=6-7\text{m}$  og  $T_p = 11\text{sekunder}$ .  $\gamma=1.8$  for  $H_s=6$  og  $\gamma=2.6$  for  $H_s=7\text{m}$ .
- 100 ulike 3-timers bølgerrealiseringer er utført, som gir 100 observert maksimum bølgehøyder.
- Den 10. minste bølgen av 100 observerte maksimumbølger er tatt som laveste sannsynlige bølge.
- Den 90. største bølgen av 100 observerte maksimumbølger er tatt som høyeste sannsynlige bølge.

Resultatet fra simuleringene for  $H_s = 6\text{m}$  er vist i Figur 11-7. Resultatene fra simuleringene er gitt i Tabell 11-1.



Figur 11-7 Maksimum bølgehøyde fra bølgesimuleringer for  $H_s=6\text{m}$

<sup>4</sup> Joint North Sea Wave Project

Hs [m]	Maksimal bølgehøyde [m] gitt persentil	
	10%	90%
6	10.6	12.9
7	12.6	15.7

Tabell 11-1 Maksimal bølgehøyde

Fra Tabell 11-1 ser man at den 10. minste maksimale bølgen fra de 100 kjøringene med Hs = 6m er beregnet til 10.6m, mens den 90. største 12.9m.

Basert på beregnede bølgerrealiseringer er det sannsynlig at bølgehøyden var mellom 10.6-15.7m.

### 11.6 Bølgeklattring

Det er sannsynlig at innkommende bølge har blitt forstørret i forhold til uforstyrret bølge, grunnet «bølgeklattring» og overflateheving fra fartsbølgen. Det har ikke vært mulig å kvantifisere denne effekten.

### 11.7 Oppsummering bølgehøyde

Oppsummert viser beregningene av høyden (H) på ulykkesbølgen at:

1. Estimert basert på avstand fra vannlinje til skadested tilsier  $H < 18.3$  meter
2. Estimert basert på bølgerrealiseringer  $H=10.6-15.7$  meter

Basert på dette er konklusjonen at:

1. Sannsynligvis var bølgehøyden mellom 10.6-15.7m
2. Bølgen har sannsynligvis vært mindre enn 18.3m

## 12. VURDERING AV MASKINLOGGEN

Det er foretatt en vurdering av skipets rullebevegelse etter at ulykkesbølgen traff skipet. Vurderingen er gjort med utgangspunkt i data fra maskinloggen som kan sees på Figur 12-1. Rulleverdier fra MRUen er lagt inn i et excel-ark for å kunne vurdere hvordan skipet ruller før og etter ulykken. Deretter er disse verdiene visualisert i grafen som vises i Figur 12-2.

Ulykkesbølgen treffer skipet kl. 01:35:37 (UTC) på babord side. Ulykkesbølgen kan karakteriseres som en impulsbelastning som setter skipet i bevegelse og fører til en maksimal krengevinkel på 3.0 grader mot styrbord 4 sekunder etter sammenstøtet, altså kl 01:35:41. Deretter ruller skipet mot babord med størst utslag på -2.3 grader etter 11 sekunder (kl. 02:35:48), før den igjen ruller tilbake til styrbord med en krengevinkel på 3.0 grader etter 18 sekunder (kl. 01:35:55).

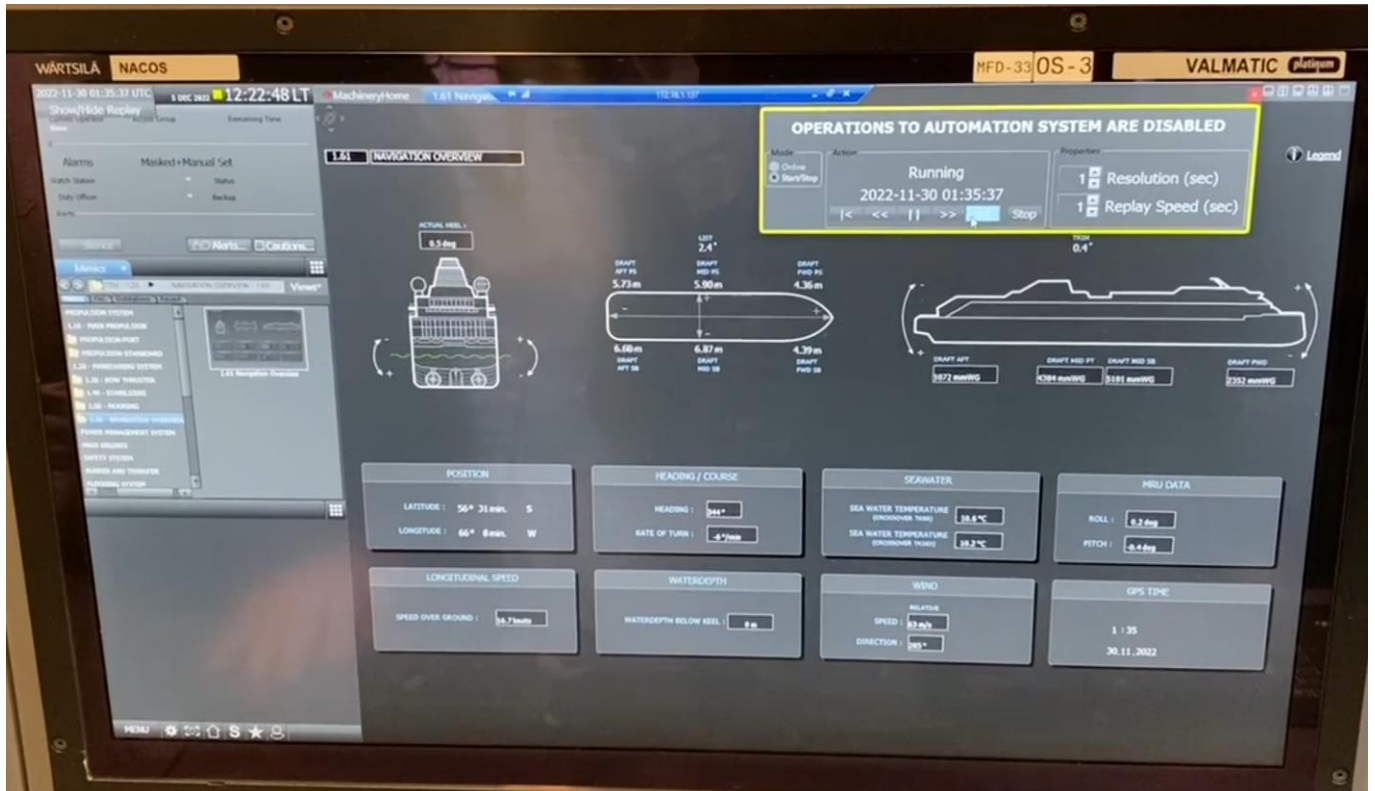
Viking Polaris bruker noen sekunder før hun får fullt utslag mot styrbord etter å ha blitt truffet av ulykkesbølgen (impulsbelastningen). Man ser også at hun ruller med sin egenperiode til bevegelsene har blitt dempet ut. Dette er som forventet.

Det er en konstant krengevinkel på 1-2 grader mot styrbord da ulykken inntraff. Dette er basert på et gjennomsnitt av rulle-målingene.

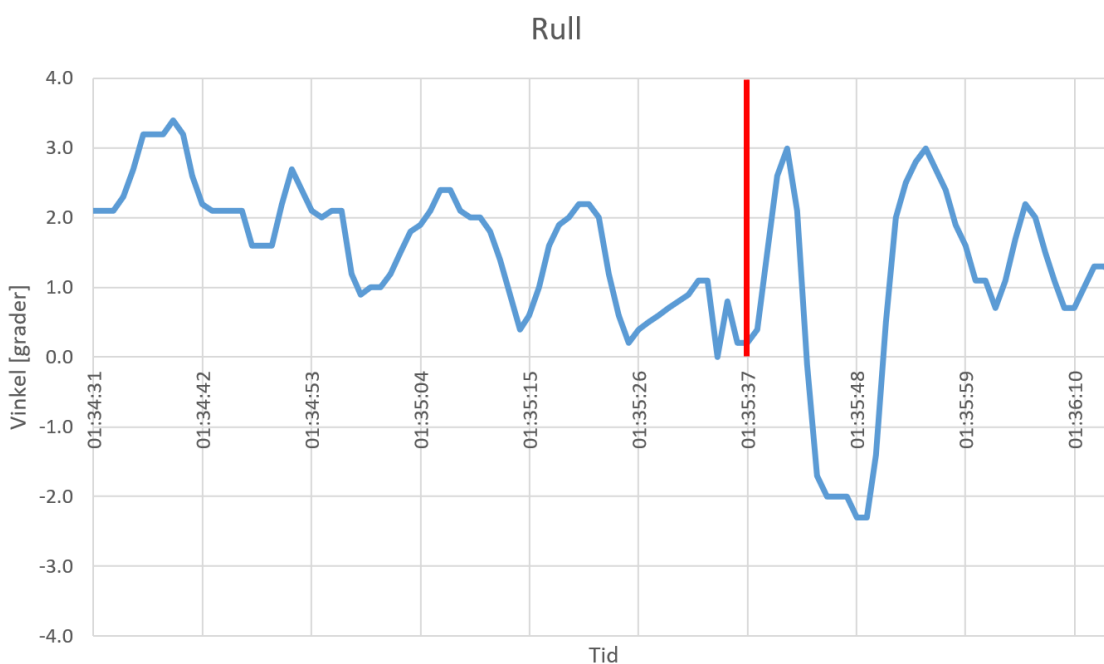
Viking Polaris er utstyrt med stabilisatorfinner som demper rullebevegelsene, og man ser at disse stabilitetsfinnene demper mesteparten av rullebevegelsene etter 30 sekunder.



Det har vært usikkerhet rundt koordinatsystemet som brukes for rullevinklene. Basert på videoer fra CCTV og rulleresponsens i Figur 12-2 konkluderes det med at positiv krengevinkel betyr krengeing mot styrbord og at styrbord side går ned. Dette er motsatt av koordinatsystemet som vises under «actual heel» på maskinloggen i Figur 12-1.



Figur 12-1 Maskinlogg.



Figur 12-2 Rullbevegelse etter ulykken. Bølgen treffer 01:35:37. Positiv vinkel er krengeing mot styrbord.

### 13. VURDERING AV SJØMANNSKAP

Skipsreglene antar «godt» sjømannskap. Det vil si at skipsreglene antar at sjømannskap er i henhold til gjeldende praksis som betyr at man unngår stormer, endrer kurs eller frivillig reduserer hastigheten utfra været man seiler i [19].

I design finner man igjen antakelsen om «godt» sjømannskap når man utfører direkteberegninger av regellastene i henhold til [19]. Dersom man bruker direkteberegnete laster skal lastene justeres med faktorer som blant annet hensyntar at sjøfolk endrer kursen utfra værmelding og man finner disse faktorene igjen i flere formler i skipsreglene. Eksempler på slike faktorer er  $f_R$  (operasjonell faktor) og  $f_\beta$  (heading-korreksjon).

I beregningen av designtrykk ( $P_{SI}$ , se Figur 8-1) som er benyttet for de aktuelle vinduene ombord Viking Polaris inngår ingen eksplisitt sjømannsfaktor eller bølgeanalyse på grunn av vinduenes plassering på skipet. Siden designtrykket ikke reduseres med en eksplisitt sjømannsfaktor må man anta at vinduene skal tåle en sjøtilstand som ligger innenfor 25års konturen. Det betyr at sjøtilstanden under seilassen var innenfor gyldighetsområdet til skipsreglene.

### 14. KAPASITET TIL OMKRINGLIGGENDE STÅL

Det er foretatt en vurdering av kapasiteten til omkringliggende stål for å forsøke å gi et øvre estimat på trykket forårsaket av ulykkesbølgen. Ytterhuden rett under vinduene viser ingen tegn til skader eller deformasjoner. Dermed er det naturlig å anta at det maksimale trykket dette stålet tåler kan gi en indikasjon på det øvre intervallet av trykket ved ulykkestidspunktet.

Stålet tåler mer enn vinduene fordi stålet er dimensjonert av et minimumstykkelseskrav som gir større styrke enn det lokale trykkkravet. Dette gjør at stålplaten kan motstå større trykk enn vinduene. Reglene har også krav til minimumstykkelser for glass som forklart i kap. 9.1.3 der sikkerhetsfaktor 4 inngår.

Stipla v2.3 er brukt for å gjøre et grovt anslag av det maksimale statiske trykket omkringliggende stål tåler. Et avstivet, integrert panel er modellert i Stipla med platetykkelser og stiverprofiler i området vist i Figur 14-1. Deretter er trykket økt til maksimal kapasitet. Beregningene i Stipla er vist i Figur 14-2.

Beregningene viser at maksimalt statisk trykk på det omkringliggende stål er estimert til å tåle 107kPa. Dette indikerer at trykket fra ulykkesbølgen har vært i størrelsesorden 107kPa, men større enn testtrykket til karmen på 40kPa. Det kan ikke utelukkes at det maksimale slammingstrykket har vært større enn 107kPa over en veldig kort periode, siden beregningen tar utgangspunkt i en statisk trykklast.



Figur 14-1 Uskadet stål. Det maksimale trykket disse platene tåler er beregnet i Stipla

DNVGL-PS: New File

File Stiffener profile Print Help

**General Input**

Project name:

Project:

Identification:

Test:

Safety format:

LRFD Material Factor: gm =

WSD Allowable Usage Factor, UF =

Material (MPa):

Plate: S355J / EN 10025-2 fyp =

Stiffener: S355J / EN 10025-2 fys =

Youngs modulus E:

Continuous stiffener | Sniped stiffener |

Use recommended values for momentfactor and buckling length:  Yes  No Definition

Buckling length: Lk =  mm

Moment factor - Support: km1 =  Field: km2 =

Recommended values: 1123 km1 = 12 km2 = 24

**Geometry & Stresses**

Geometry (mm)

Stiffener span: L =

Length of girder: Lg =

Plate thickness: t =

Stiff spacing: s1 =  s2 =

Lat tors buck length: Lt =

Stiffener profile: BF 160x7.0

Stresses (MPa)

SigxA =  SigxB =

SigyA =  SigyC =

Tau =  psd =  +/-

Fixation parameter for plate (F300)

Clamped edges (kpp=1.0)

Simply supported edges (kpp=0.5)

**Figure**

**Buckling/Section Scantling**

Buckling - Incl. deformation

Yield

Buckling + Yield

Consider Vsd/Vrd > 0.5

Optimize z\*

**Result**

Control	Interaction Ra...	Reference
<b>STIFFENER BUCKLING CHECK (DNV-RP-C201): (1 = Support, 2 = field; s = stiffener, p = plate)</b>		
UF 1s = Nsd/Nks 1Rd + (M1Sd - NSd*z) / (Ms 1Rd*(1 - Nsd/Ne)) + u = 0.0/1871.0 + (38.4 - 0.0*0.139) / (38.4*(1 - 0.0/16042.4)) + 0.000 =	1.00	< 1.00 (Eq 7.50)
Shear check: Vsd/Vrd = 82.4/204.3 =	0.40	< 0.50 (Ch 7.8)
<b>PLATE YIELD CHECK (Points A-D) AND LATERAL CHECK:</b>		
Lateral: PL1 - UF = p/pRd = 0.107/0.590 =	0.18	< 1.00
<b>PLATE THICKNESS CHECK (DNVGL-OS-C101, Ch.2 Sec.4 [6.3]):</b>		
Point A: Sigjd = 0.0 MPa UF = tmin/t = 4.77/11.00 =	0.43	< 1.00
<b>STIFFENER YIELD CHECK: (check at points 1-3, plate(p) and stiffener(s)). Effective width se = 550.0</b>		
Point 1s: UF = Sigx/fyd = 349.2/355.0 =	0.98	< 1.00
<b>STIFFENER SECTION MODULUS CHECK (DNVGL-OS-C101, Ch.2 Sec.4 [6.4]): (check at points 1-3, plate(p) and stiffener(s))</b>		
Effective width se = 550.0 mm calculated according to DNV OS C101, sec 5, G400, Np > 5		
Point 1s: Sigxd = 0.0 MPa UF = Zs/Ws = 1.083E+5/1.101E+5 =	0.98	< 1.00

Figur 14-2 Beregning i Stipla for maksimalt trykk

## 15. BIBLIOGRAFI

- [1] Petroleumstilsynet, «Granskingsrapport etter hendelse med fatalt utfall på COSInnovator 30. desember 2015. dok:418005005,» Petroleumstilsynet, Stavanger, 2016.
- [2] F. B. f. t. I. o. M. A. (FEBIMA), «Report on the investigation into a fatal accident on board vlcc ARAFURA near Cape Horn with the decease of two crew members on September 11th, 2021.,» FEBIMA Doc 004987, Vooruitgangstraat 56 – B1210 Brussels – Belgium, 2021.
- [3] DNV, «DNVGL-RU-Ship, Skipsregler,» January 2018.
- [4] DNV, «DNV-RP-C205 Environmental conditions and environmental loads,» September 2021.
- [5] DNV, «DNVGL-RU-SHIP-Pt3 Hull,» January 2018.
- [6] DNV, «DNVGL-RU-SHIP-Pt5 Ch. 4 Passenger ships,» January 2018.
- [7] T. U. Berntzen, «Email fra DNV til SHK "Viking polaris - spørsmål",» DNV AS, 20/02/2023 .
- [8] O. Faltinsen, Sea Loads on ships and offshore structures, Cambridge University Press, 1990.
- [9] «ISO 11336-1:2012».
- [10] SOMEK, «RM0198-004-GEN-001».
- [11] SOMEK, «CM0186-TEST-002 Static test».
- [12] «ISO614,» 2012.
- [13] SOMEK, «CM0186-TEST-004 Hose test».
- [14] SOMEK, «906-515-2500.pdf».
- [15] Vard, «906-515-2500.pdf».
- [16] NAVTOR, «1 Day Forecast by route, Damoy-Ushuaia,» NAVTOR, 28.11.2022 18:00 UTC.
- [17] SHK, *Oppstartsmøte - 7WAVES, Undersøkelse av ulykke om bord Viking Polaris*, PPT, Statens Havarikommisjon (SHK), 16.02.2023.
- [18] T. Garrison, "Essentials of Oceanography, sixth edition", Belmont, CA: Brooks/Cole, 2012.
- [19] DNV, «DNV-CG-0130 Wave loads,» October 2021.
- [20] O. Ltd., «Orcaflex Version 11.3,» Orcina Ltd, November 2022. [Internett]. Available: <https://www.orcina.com/orcaflex/specification/>.

## APPENDIX A: GENERERING AV VILKÅRLIG BØLGETOG, MAKSIMAL BØLGEHØYDE

Generering av vilkårlige bølgetog for å finne maksimal bølgehøyde.

De vilkårlige bølgetogene for bølgehøyde genereres ved hjelp av analyse verktøyet Orcaflex [20], for et Jonswap bølgespektrum med følgende parametre:

$$H_s = 6.0 \text{ m}$$

$$T_p = 11.0 \text{ s}$$

$$Y = 1.8$$

Bølgehøgda i uregelmessig sjø beregnes som summen av antall bølgekomponenter ( $N=10000$ ):

$$\zeta = \sum_{j=1}^N A_j \sin(\omega_j t + \epsilon_j)$$

Der  $A_j$ ,  $\omega_j$  og  $\epsilon_j$  respektivt er bølgeamplitude, sirkulær frekvens og vilkårlige fasevinkel for bølgekomponentnummer  $j$ .

Bølgeamplituden  $A_j$  beregnes fra bølgespekteret  $S(\omega)$  som vist nedenfor:

$$\frac{1}{2} A_j^2 = S(\omega_j) \Delta\omega$$

Der  $\Delta\omega$  er en konstant differanse mellom etterfølgende frekvenser.

Fasene knyttet til hver bølgekomponent er pseudo-vilkårlig. OrcaFlex benytter en vilkårlig tall generator og et brukerdefinert «seed» til å tildele faser. Sekvensen er repeterbar, så det samme «seedet» vil alltid gi de samme fasene og følgelig nøyaktig det samme bølgetoget. Den spesifiserte varigheten for hver sjøtilstand er tre timer og bølgeretningen er 0 grader. Bølgehøyden i origo blir registrert.