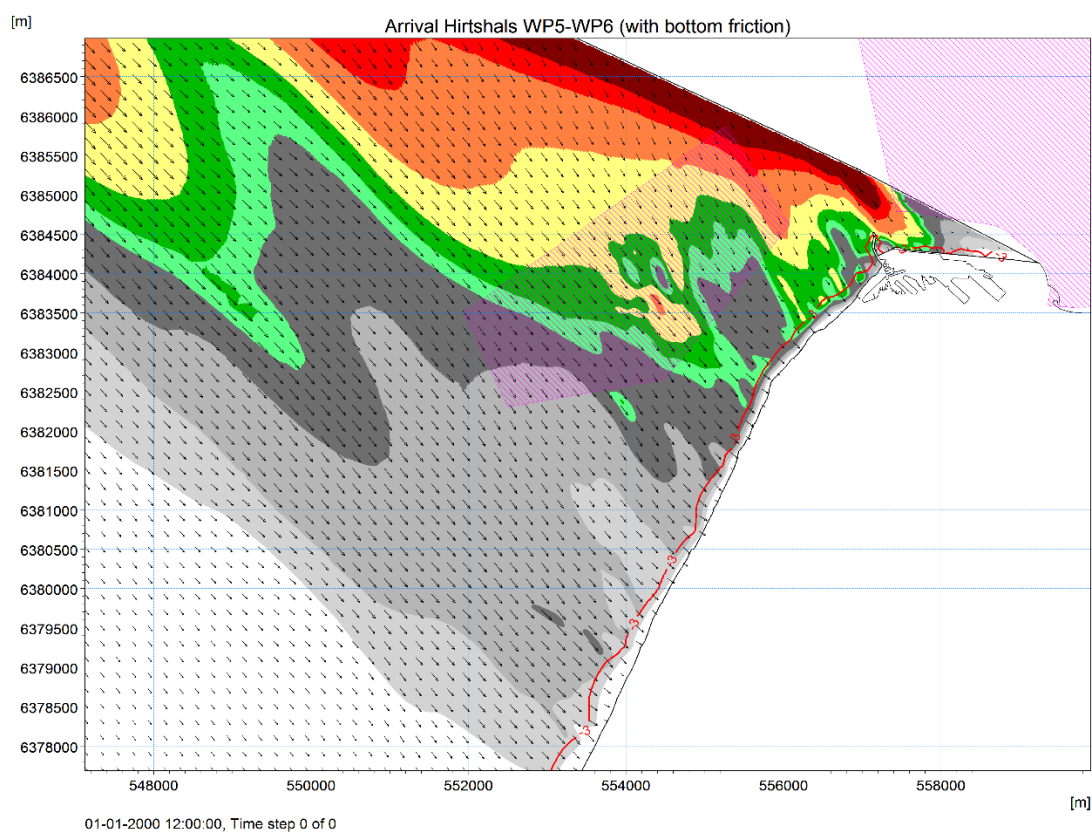


Modellering af kølvandsbølger fra ny Fjord Line hurtigfærge på ruten Hirtshals – Kristiansand – begge retninger



Juli 2019

(Enkelte rettelser pr. 15-03-2020)

Rapport udarbejdet til

Orbicon A/S, Høje Tåstrup, på vegne af Austal Australia

Udarbejdet af

TT-Hydraulics Aps.

Lindholmsvej 21, 9400 Nørresundby, Denmark.

e-mail: tt@tt-hydraulics.dk

Forord

Herværende rapport er udarbejdet på anmodning fra *Orbicon A/S*, Høje Tåstrup, på vegne af *Austal Australia*, som bygger og leverer ny hurtigfærge med navnet *Fjord Line FSTR*. Herværende rapporten skal være en del af myndighedsbehandlingen for vurderingen af kølvandsbølger på kysterne fra den nye hurtigfærge på ruten mellem Hirtshals og Kristiansand. Hurtigfærgen forventes i drift på ruten i 2019.

Austal Ships har udført hydrodynamiske modellering (CFD-modellering) af de kølvandsbølger hurtigfærgen skaber nær færgen (Austal, 2018). Med disse modelleringsresultater som udgangspunkt har *TT-Hydraulics Aps.* som beskrevet i herværende rapport, foretaget edb-modellering af bølgenes videre forplantning fra færgens sejllinje frem til kysten.

Indholdsfortegnelse

Forord.....	3
Sammenfatning og konklusion.....	5
Kriterium for maksimal bølgehøjde.....	6
Kriterium vedrørende bølger ved 3 m dybdekurven nær kysten	6
Kriterium vedrørende bølgepåvirkningen på Natura 2000 områder	6
Data for Fjord Line Hurtigfærge	7
Ruter, waypoints og fartangivelse.....	7
Bølgemodellering.....	7
Dannelse af kølvandsbølger fra højhastighedsfærger	7
CFD-modellering af bølgehøjde, -periode og -retning nær færgerne	8
Bølgehenfald på grund af diffraktion.....	10
Bølgedæmpning på grund af bundfriktion	11
Modelleringsprincip	11
Beregningsnet.....	12
Modelleringsresultater	13
Længdeprofiler af vanddybde og kølvandsbølger nær færgerne	13
Figurer af modellerede bølgehøjder for kølvandsbølger.....	13
Bemærkninger til de modellerede bølger.....	14
Bølger i strandzonen nord og syd for Hirtshals Havn.....	14
Bølger der passere Natura 2000 områderne N1, N5 og N203	14
Referencer	15

Bilag

Bilag nr. 1 – Modelresultater

Bilag nr. 2 – Ruteplan med waypoints

Sammenfatning og konklusion

Ruten Hirtshals – Kristiansand – begge retninger er angivet i rutemanualen på bilag nr. 2. Servicefarten for Fjord Line FSTR i begge retninger er 36,5 knob (jævnfør kontrakt vedrørende levering af færgen), men nær havnene reduceres farten som angivet i rutemanualen (bilag 2).

De kølvandsbølger, der skabes af færgen på ruten og som løber ind mod de nærliggende kyster, er modelleret med MIKE21-modelsystemet udviklet af DHI. Udgangspunktet (randbetingelsen) for herværende modellering har været de bølger i sejlinjen, som er blevet edb-modelleret af Austal Australia ved 3-dimensional CFD-modellering med modelsystemet *SHIPFLOW* (Austal, 2018). Alle situationer i denne rapport er modelleret både med og uden bundfriktion.

Særlig fokus har været forholdene på de nærliggende kyster ved ankomst og afgang til Hirtshals Havn. De modellerede bølgehøjder fremgår af figurerne på bilag nr.1. Fra undersøgelsen kan følgende konkluderes:

Krav til maksimal bølgehøjde langs kysterne

De største kølvandsbølger forekommer hvor færgen er tættest på kysten ved Hirtshals Havn. De højeste bølger opstår ved kysten umiddelbart syd for Hirtshals Havn når færgen ankommer. Samlet set viser modelresultaterne at bølgerne overholder myndighedskravet for kysterne gældende ved 3 m dybdekurven.

Bølgeforhold ved Natura 2000 områderne N1, N5 og N203

I forhold til de naturlige bølgehold i havet ud for Hirtshals vurderes den ekstra påvirkning der sker ved kølvandsbølgenes lejlighedsvis passage hen over Natura 2000 områderne at være ganske ubetydelig. Det kan med god sandsynlighed fastslås at påvirkningen af flora og fauna vil være uændret.

Kriterium for maksimal bølgehøjde

Kriterium vedrørende bølger ved 3 m dybdekurven nær kysten

Af hensyn til sikkerhed og komfort for fritidsaktiviteter i kystzonen har myndighederne fastsat et bølgehøjdekriterium, der ikke tillader, at den maksimale bølgehøjde H_h (i meter) på 3 m dybdekurven overstiger:

$$H_h \leq 0,5 \sqrt{\frac{4,5}{T_h}} \quad (1)$$

hvor T_h er middelbølgeperioden i sekunder.

Middelbølgeperioden for kølvandsbølgerne ved subkritisk hastighed bestemmes af $T_h = 0,27 V$ (s) (V er her færgens fart i knob).

Ved superkritisk fart (dvs. for $F_D > 1,0$) har CFD-modellering udført af Austal (Austal, 2018) vist at middelbølgeperioden gives af $T_h = -0,0318 F_D^2 - 1,5153 F_D + 10,61$ (s), hvor F_D er dybde-Froudetallet:

$$F_D = \frac{V}{\sqrt{g D}} \quad (2)$$

hvor V er færgens fart (her i m/s), g er tyngdens acceleration ($9,81 \text{ m/s}^2$) og D er vanddybden (m).

Ved den kontraktfastsatte servicefart på 36,5 knob for Fjord Line FSTR bliver kravet at den maksimale bølgehøjde H_h mellem 0,36 til 0,40 m ved 3 m dybdekurven afhængigt af vanddybden hvor færgen aktuelt sejler når bølgerne skabes. Sejler færgen med reduceret fart nær havnene reduceres bølgeperioden yderligere og den maksimalt tilladelige bølgehøjde øges.

Når disse lange kølvandsbølger løber ind mod kysten vil man normalt se, at bølgehøjden vokser når de kommer ind på lavere vanddybde. Denne effekt betegnes *shoaling* og bølgemodelleringen medtager denne effekt. Kølvandsbølger, som passerer ind over 3 m dybdekurven, vil normalt vokse yderligere i højde indtil de bryder i den zone (normalt ved 0,5 – 1,5 m vanddybde) hvor badning ofte finder sted. Derfor kan bølger i brydningszone somme tider være højere end hvad kravet tillader uden at dette betyder at kravet ikke er opfyldt.

Kriterium vedrørende bølgepåvirkningen på Natura 2000 områder

For hvert enkelt Natura 2000 område er opstillet lister med de naturtyper og plante- og dyrearter der skal beskyttes og bevares. Bølgepåvirkningen må ikke give anledning til at denne beskyttelse og bevarelse forringes.

Data for Fjord Line Hurtigfærge

Data for færgen givet i nedenstående tabel 1.

Tabel 1 Data for Fjord Line Hurtigfærge (hull 419, Austal Australia)

Længde overalt (m)	109,0
Længde, vandlinje (m)	105,0
Bredde, overalt (m)	30,9
Dybgang (m)	3,4
Servicefart (ved modellering) (knob)	36
Displacement (ved modellering) (tons)	2205

(Bemærk at længden i vandlinjen varierer svagt med færgens last og trim)

Ruter, waypoints og fartangivelse

Ruter, waypoints og fartangivelser er angivet på Fjord Lines manual ses som bilag nr. 2.

Ankomst til Hirtshals: Over Skagerrak mod Hirtshals sejles med servicefart 36,5 knob. Farten reduceres lineært over den sidste halve sømil ind mod waypoint WP6, som rundes med 18 knob. Herefter nedsættes farten gradvis ind mod WP7 til 11 knob.

Afgang fra Hirtshals: Der sejles som ved ankomst blot modsat. Efter WP6 accelereres til servicefart.

Bølgemodellering

Dannelse af kølvandsbølger fra højhastighedsfærger

Et sejllende skib genererer både lange og korte bølger, men kun de lange kølvandsbølger, der bliver genereret ved skibsskrogets samlede fortrængningen ved bevægelsen gennem vandet, vil forplante sig over længere afstande og nå frem til kysten.

For kølvandsbølger genereret af skibe, der sejler på havets overflade vil Froudes modellov kunne anvendes. Anvendelsen af Froudes modellov reducerer dimensionerne af problemet så lighedannetheden (f.eks. lighedannetheden af kølvandsbølgemønstret omkring sejllende skibe) i stedet for at afhænge både af hastighed og længde, reduceres til kun at afhænge af ét tal, Froudetallet F_r , som er

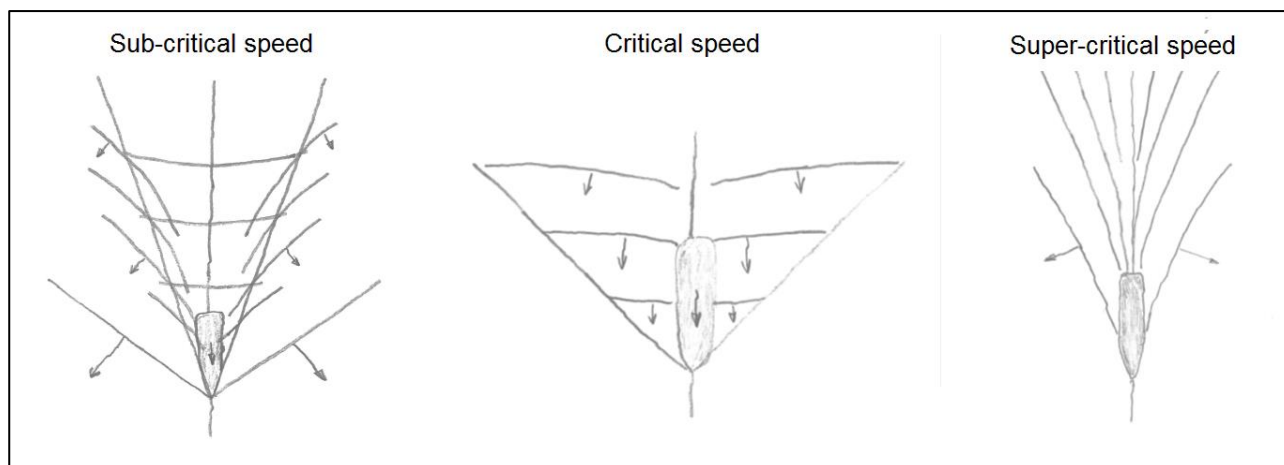
$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

hvor V er hastigheden af skibet, g er tyngdeaccelerationen ($9,81 \text{ m/s}^2$) og L er en karakteristisk længde i strømningsfeltet.

For et skib sejler på dybt vand sættes den karakteristiske længde L normalt til skibets længde, men på lavt vand har både skibets længde og vanddybden indflydelse. Fra erfaringer med både fysisk og

numerisk modellering er det tidligere blevet konkluderet at, i forhold til de lange kølvandsbølger nær kysten er disse i hovedsagen kun afhængige af dybde-Froudetallet $F_D = \frac{V}{\sqrt{gD}}$, hvor D er vanddybden.

Fra den generelle teori om strømninger med fri overflade er det velkendt, at det kritiske Froudetal ($Fr = 1$) betyder en overgang mellem temmelig forskellige flow-typer, såfremt Fr er enten over eller under denne kritiske værdi. For kølvandsbølger i lavvandede farvande kan man forvente de tre typer bølger, som ses på figuren herunder.



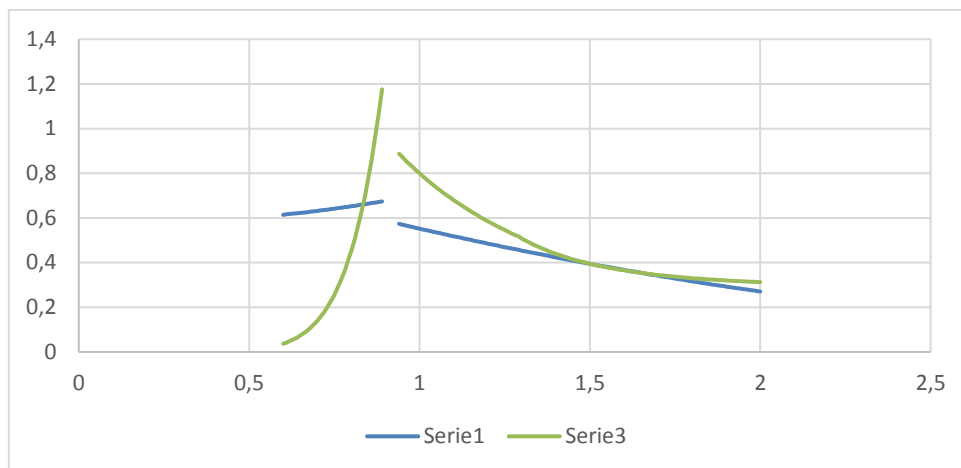
Figur 1 Bølgemønstre for kølvandsbølger

I den tidlige forskning af kølvandsbølger blev disse undersøgt ved fysiske eksperimenter i vandtanke med skalamodeller, men i dag er 3-dimensionelle hydrodynamiske computer-modeller (CFD-modeller) til rådighed til dette formål.

CFD-modellering af bølgehøjde, -periode og -retning nær færgerne

Den numeriske modellering af strømmingen omkring skibsskroget (hvor bølgedannelsen sker) foregår i en stationær, 3-dimensional, hydrodynamisk edb-model, hvor skibet er fikseret i rummet, og hvor vandet passerer skroget med den hastighed skibet sejler med. Herved opnås at kølvandsbølgerne viser sig som stationære bølger i modellen. Fra en sådan numerisk modellering kan bølgehøjde, bølgelængde og bølgeretning bestemmes som funktion af hastighed og vanddybde. Som begrundet ovenfor samles de to uafhængige variable, hastighed og dybde, til én uafhængig variabel nemlig dybde-Froudetallet F_D .

CFD-modelleringen er foretaget af Austal og fremgår af rapporten herfra (Austal, 2018). Maksimal bølgehøjde H_m og tilhørende bølgeperiode T_m er modelleret ved forskellige værdier af dybde-Froudetal. Dette er opnået ved at modellere med fastholdt fart (servicefart) og at variere vanddybden. Resultatet heraf er vist på Figur 2

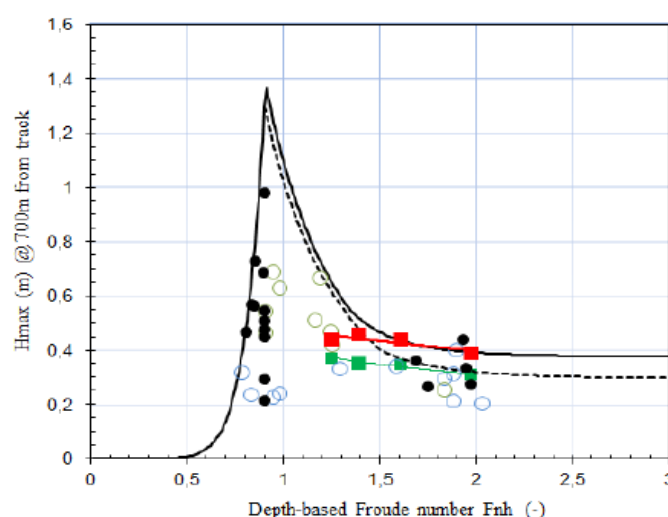


Figur 2 Maksimal bølgehøjde (700 m fra sejlinje) som funktion af dybde-Froudetal. Ordinaten er den maksimale bølgehøjde (m) og absissen er dybde-Froudetal. Serie1 er CFD-modelleret af Austal og Serie3 er de bølgehøjder som er anvendt ved bølgemodelleringen

For superkritisk fart ($F_D > 1$, højre side af diagrammet) ses at den kurve som benyttes ved den videre bølgemodellering (serie3) ligger over CFD-modelleringen. Bølgemodelleringen bliver derfor på den sikre side med hensyn til bølgehøjden.

Ved subkritisk fart ($F_D < 1$, dvs. venstre side af diagrammet) som er det område som benyttes nær havnen er resultaterne fra CFD-modelleringen ikke benyttet. Årsagen hertil er at CFD-modelleringen som nævnt er foretaget med konstant servicefart og varierende vanddybde hvorved de ikke dækker forholdene nær havnen, hvor farten er under 18 knob. Derfor benyttes i stedet den generelle som har været benyttet ved de fleste modelleringer i Danmark af DHI og TT-Hydraulics.

Det som er benyttet for subkritisk fart er det som fremgår af venstre side af Figur 3



Figur 3 Maksimal bølgehøjde (700 m fra sejlinje) som funktion af dybde-Froudetallet, (punkteret linje gælder for Express 3, fuld optrukket linje er for Max Mols). (fra DHI, 2012). Den figur er blot til orientering.

De anvendte formler for bølgerne, som funktion af det dybdebaserede Froudetal F_D ved modelleringerne, er herefter:

Bølgehøjden H_h (700 m fra sejlinjen)

$$H_h = 1,30 (F_D + 0,1)^{1,0} \text{ (m)} \quad \text{for } F_D \leq 0,9 \quad (\text{DHI, 2012})$$

$$H_h = 1,0 (F_D + 0,125)^{-1,9} \text{ (m)} \quad \text{for } 0,9 < F_D < 1,5 \quad (\text{Austal, 2018})$$

$$H_h = 0,82 (0,35 + 1/F_D^5) \text{ (m)} \quad \text{for } F_D \geq 1,5 \quad (\text{Austal, 2018})$$

Bølgeperioden

$$T_h = 0,27 V \text{ (s)} \quad \text{for } F_D < 1 \quad (\text{DHI, 2012a og Austal CFD})$$

hvor V er færgens fart i knob.

$$T_h = 0,4251 F_D^2 - 2,9183 F_D + 11,355 \text{ (s)} \quad \text{for } F_D > 1 \quad (\text{Austal, 2018})$$

Bølgeretningen θ i forhold til sejlrretningen

$$\theta = 35,267(1 - \exp(12(F_D - 1))) \text{ for } F_D \leq 1 \quad (\text{DHI, 2012})$$

$$\theta = \text{ArcCos}(1/F_D) \text{ for } F_D > 1 \quad (\text{DHI, 2012})$$

Bølgehønfald på grund af diffraktion

Den vigtigste årsag til reduktionen af højden af kølvandsbølgerne på deres bevægelse fra færgens sejllinje til kysten er diffraktion. (Diffraktion opleves for eksempel ved at en lysstråle afbøjes, når den passerer et meget lille hul). På grund af den endelige længde af skibet vil den frembragte bølgeenergi ikke kun bevæge sig vinkelret på sejlrretningen. Derfor vil bølgehøjden reduceres på grund af spredning af energien ved diffraktion. (Tabet på grund af hydrodynamisk friktion er næsten nul i disse lange flade bølger). Virkning af diffraktion er blevet undersøgt i flere omfattende undersøgelser i fuld skala. Fra disse undersøgelser, beskrevet af Kirkegaard et al (1999), har det kunnet konkluderes, at bølgehøjden h henfalder ved følgende ligning:

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{s}{s_0} \right)^r \quad (3)$$

hvor h_0 er bølgehøjden 2,5 skibslængder fra sejllinjen (fundet fra CFD modellering), s er afstanden fra sejllinjen, s_0 er 2,5 gange skibslængden og r er henfaldskonstanten.

Disse feltundersøgelser (Kirkegaard et al., 1998) giver som gennemsnit en værdi på $r = -0,55$ som derved er den mest sandsynlige værdi. Denne værdi har været benyttet af DHI (2012a) ved de tidligere modelleringer på Kattegat-ruten. Betydningen af henfaldets relative størrelse ses af tabel 2.

Tabel 2 Relativ henfald på grund af diffraktion af bølgehøjde for $r = -0,55$

Afstand fra sejllinje Antal gange skibslængden	Afstand fra sejllinje (m)	Relativ bølgehøjde (-)
2,5	265	1,00
5	530	0,68
10	1060	0,47
20	2120	0,32
40	4240	0,32

(Bemærk at skibslængden her er 106 m for at inkludere virkningen af færgens trim)

Bølgedæmpning på grund af bundfriktion

Bølger som bevæger sig hen over områder med mindre vanddybder vil dæmpes i mindre grad på grund af det energitab ved vandbevægelsen langs bunden. Dette kan der tages hensyn til ved bølgemodelleringen, hvori der medtages en friktion svarende at bunden har en strømningsmæssig ruhed (den såkaldte *ækvivalente sandruhed*) på 0,04 m.

Imidlertid skal man huske på, at det ovennævnte henfald på grund af diffraktion bygger på fuldskala-målinger med virkelige færges. Derved kommer den således bestemte henfaldskonstant for diffraktion til også at have et mindre indhold af bundfriktion. Man derfor kun sige at en modellering hvor bundfriktionen er medtaget svagt vil undervurdere bølgerne. Medtages bundfriktionen ikke overvurderes bølgerne til gengæld svagt.

Derfor foretages bølgemodelleringen både med og uden bundfriktion, og bliver resultatet at bølgehøjden på 3 m kurven ligger henholdsvis over (uden friktion) og under (med friktion) kravet til den maksimale bølgehøjde, er den almindelige praksis at betragte kravet som værende opfyldt.

Modelleringsprincip

Målet med den numeriske modellering er at bestemme højden af kølvandsbølgerne fra højhastighedsfærgerne, når de når frem til 3 m dybdekurven nær kysten.

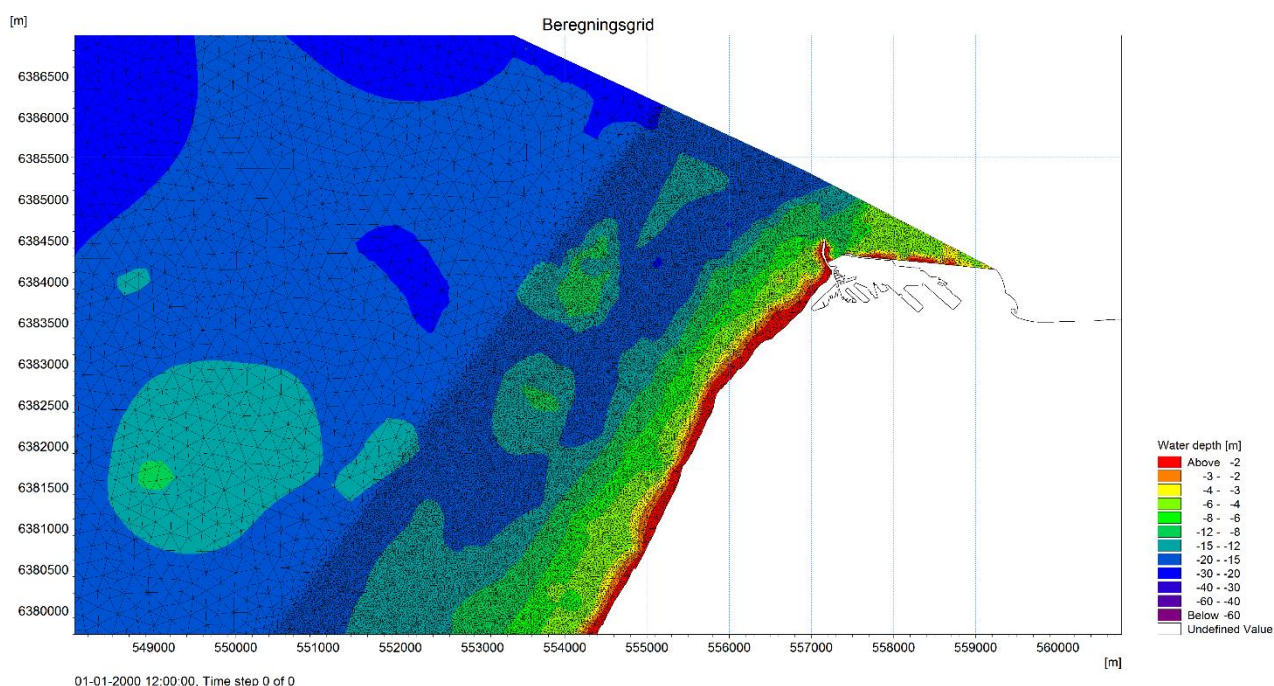
Modelleringen omfatter følgende 2 trin:

1. Med en 3-dimensional hydrodynamisk modellering (CFD-modellering fra Austal Australia, 2018) bestemmes bølgeegenskaberne (højde, periode og retning) langs en linje beliggende 2 skibslængder fra sejllinjen af færgen til forskellige dybde-Froudetal. Fra disse modelleringer opstilles den funktionelle relation mellem bølgeegenskaber og dybde-Froudetallet, og fra denne relation kan længdeprofiler af de genererede bølgers egenskaber langs færgens sejllinje opstilles til at være randbetingelse for det næste skridt i modelleringen.

2. I det andet trin bliver bølgetransporten fra sejllinjen til kystlinjen (3 m dybdekurven) modelleret (TT-Hydraulics) med den 2-dimensionale MIKE 21-SW model med randbetingelsen beskrevet ovenfor. Denne modellering dækker samtlige ændringer af bølgeegenskaberne fra henholdsvis *shoaling* (ændringer i bølgehøjde og længde) og *refraktion* (ændringer i bølgehøjde og retning) begge forårsaget af variationer af vanddybden. De modellerede bølgehøjder bliver sluttelig korrigeret for virkningen af bølgediffraktionen (dvs. den bølgereduktion der sker, fordi bølgeenergien ikke kun transporteres vinkelret på sejlretningen, men også langsgående hermed).

Beregningsnet

Beregningsnettet inklusiv vanddybder ses på Figur 4 Beregningsnet og vanddybder for det sydlige beregnings område. Beregningsnettet for det nordlige område er tilsvarende og ses på figurene med modelleringsresultaterne på Bilag nr. 1



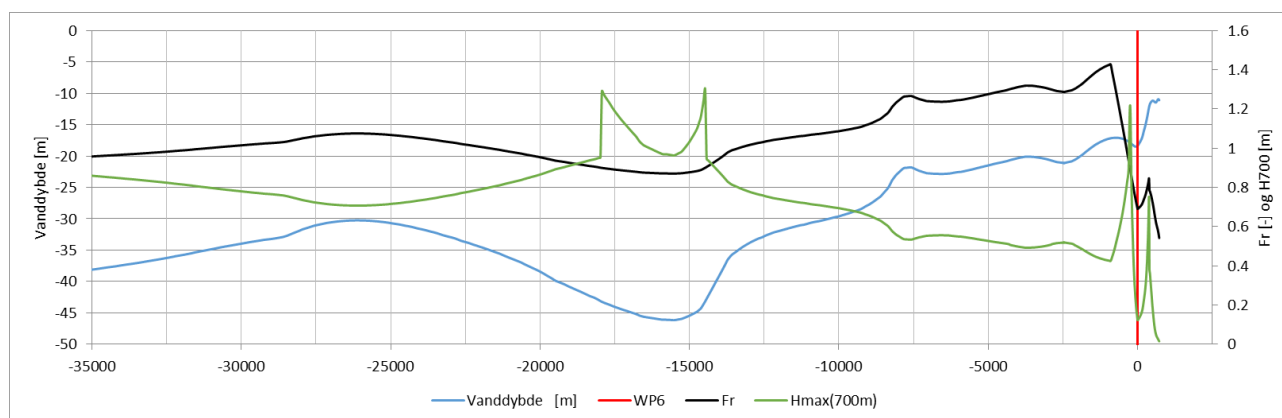
Figur 4 Beregningsnet og vanddybder for det sydlige beregnings område

Modelleringsresultater

Længdeprofiler af vanddybde og kølvandsbølger nær færgerne

Før modellering med MIKE21 beregnes først længdeprofiler af dybde-Froudetal. Dernæst beregnes længdeprofiler af maksimal bølgehøjde H_h , bølgeretning og bølgeperiode langs sejllinjen af færgerne (eller rettere langs en linje 2 skibslængder ved siden af sejllinjen, fordi dette svarer til resultaterne fra CFD-modelleringen). På følgende figurene af disse længdeprofiler er bølgehøjden H_h hvad der svarer til en afstand af 700 m fra sejllinjen angivet fordi (og kun fordi) de 700 meter er en generel (arbitrært valgt) standardafstand til dette formål.

På Figur 5 vises længdeprofilet af dybde-Froudetal og dernæst bølgehøjde. Figurer for bølgeretning og periode er ikke vist.



Figur 5 Længdeprofiler af vanddybde, dybde-Froudetal, og maksimal bølgehøjde 700 m fra færgerne

Figurer af modellerede bølgehøjder for kølvandsbølger

De 15 figurer, der viser de modellerede bølgehøjder i havområdet ud for Hirtshals Havn, er samlet på særskilt bilag nr. 1, fordi figurerne dermed kan vise størst muligt på den liggende papirretning.

Den modellerede maksimale kølvandsbølgehøjde er vist med farvekoder forklaret på figurerne. Rød skravering angiver Natura 2000 områder. Skalaer er ikke ens på alle figurer. De små pile angiver bølgenes forplantningsretning. Den tynde linje, der mere eller mindre følger med kystlinjen i en kort afstand fra denne, er den 3 m dybdekurve, hvor bølgekravet til maksimal højde netop skal være opfyldt. (Bemærk at kravet til bølgehøjde afhænger af færgens fart som tidligere nævnt).

Der er udført modellering for både ankomst og afgang fra Hirtshals, men modelleringen viste, at ved afgang når mærkbare bølger ikke ind til kysten. På figurerne 13, 14 og 15 ses bølgeretningen ved afgang til dokumentation heraf.

Bemærkninger til de modellerede bølger

Bølger i strandzonen nord og syd for Hirtshals Havn

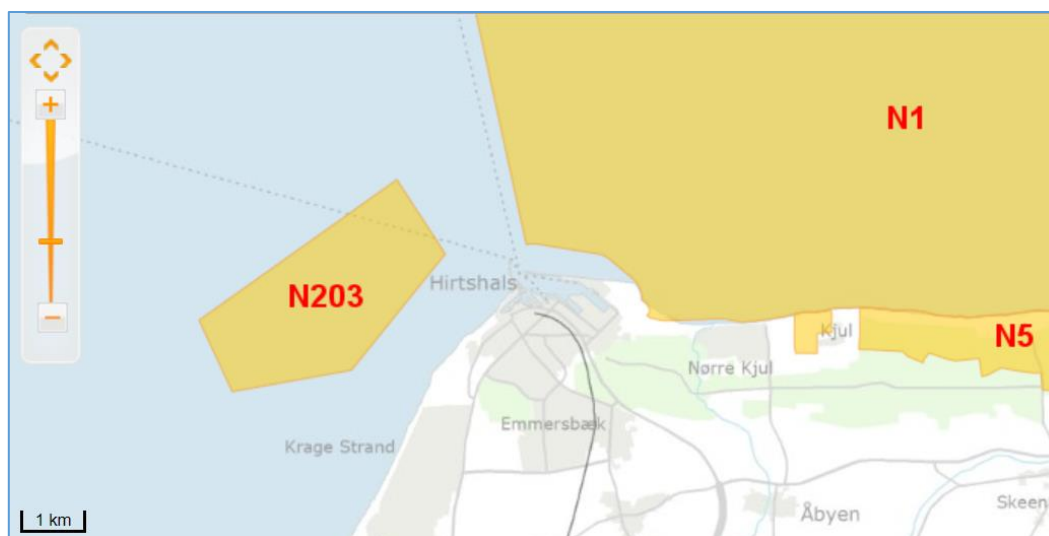
Kravet til maksimal acceptabel bølgehøjde er som nævnt 0,36 – 0,40 m når bølgerne dannes når færgen sejler med servicefart på 36,5 knob. Ved anduvning af havnen herunder i faserne med acceleration og deceleration, hvor farten er mindre, mindskes bølgeperioden og den maksimalt tilladte bølgehøjde øges.

Som nævnt er alle situationer modelleret både med og uden bundfriktion.

Modelleringen viser at den kraftigste belastning forekommer på kysten umiddelbart syd for Hirtshals Havn når færgen anduver havnen. Resultaterne viser, at uden bundfriktion i modelleringen overskrides kriteriet for bølgehøjde lige akkurat ved 3 m dybdekurven. Når bundfriktion medtages overskrides kriteriet ikke. Efter den eksisterende praksis betyder dette at kriteriet kan betragtes som værende overholdt

Bølger der passere Natura 2000 områderne N1, N5 og N203

De Natura 2000 områder der er relevante i forhold til bølger skabt af sejlads på ruten Hirtshals – Kristiansand er områderne N1, N2 og N203, som ses på Figur 6.



Figur 6 Natura 2000 områder i Skagerrak nær Hirtshals

Bølgeklimate for disse områder er efter danske forhold særdeles kraftigt på grund af de hyppige og kraftige vestlige vinde, de lange frie stræk til den norske og engelske kyst for de vindgenererede bølgenes opvoksen samt kystens orientering. Derfor er den naturlige bølgepåvirkning af områderne betydelig og det må vurderes, at der ofte på havbunden i områderne sker sedimenttransport og resuspension af sand og finere sedimentmaterialer. Der er yderligere også en tydelig påvirkning fra tidevandstrøm og nettostrøm.

I dette perspektiv må de påvirkninger, der hidrører fra kølvandsbølgerne fra hurtigfærgen, bedømmes at være forsvindende små, og det må konkluderes at de naturtyper og plante- og dyrearter, der er omfattet af Natura 2000-beskyttelsen ikke vil blive påvirket negativt.

Referencer

- Austal Australia (2018). 109m High Speed Catamaran Ferry – Wave Wake Wash Near Field Analysis. Document Number: 419-190-015R. Date: 12-10-2018.
- DHI (2012). Assessment of Wake Wash Height along the Routes Ebeltoft-Sj. Odde and Aarhus-Sj. Odde caused by HSC Incat 112 Hull #066 Ferry. Report to MOLSLINJEN 2012.
- Kirkegaard, J; Kofoed-Hansen, H; and Elfrink, B (1998). *Wake wash of high-speed craft in coastal areas*, Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Copenhagen, Denmark, 1998.
- Orbicon (2017). Modellering af kølvandsbølger fra MOLSLINJENs hurtigfærge HSC Express 3 på ruten fra Aarhus til Odden og retur. Rapport udarbejdet i samarbejde med TT-Hydraulics