

Faxe Ladeplads Havneudvidelse

Analyser til videreudvikling af havneudvidelsen

Rapport
Projektnr. 11830979

Dato: 2024/06/12

Udarbejdet for Hasløv & Kjærsgaard I/S

Faxe Ladeplads Havneudvidelse

Analyser til videreudvikling af havneudvidelsen

Rapport
Projektnr. 11830979

Udarbejdet for: Hasløv & Kjærsgaard I/S
Repræsenteret ved: Dan Hasløv

Kontaktperson: Dan Hasløv, dbh@hogk.dk
Projektleder: Grith Christoffersen
Kvalitetsansvarlig: Sten Esbjørn Kristensen
Udarbejdet af: Grith Christoffersen og Asger Bendix Hansen
Projektnr.: 11830979
Godkendt af: Sanne Lina Niemann
Godkendelsesdato: 2024/06/12
Revision: Final 1.1
Klassifikation: **Begrænset:** Dette dokument er tilgængeligt for personer ansat i DHI-koncernen men må ikke deles med andre udenfor DHI-koncernen uden kundens forhåndsgodkendelse.
Filnavn: Faxeladeplads Havneudvidelse_2024-06.docx

Indholdsfortegnelse

1	Ikke-teknisk resumé	6
2	Introduktion	7
3	Datagrundlag	9
3.1	Batymetri-data	9
3.2	Vandstandsdata	11
3.3	Bølgedata	12
3.4	Vinddata	12
4	Modelopsætning	13
4.1	Bølgemodel	13
4.2	Kombineret bølge-, hydrodynamik- og sandtransportmodel	14
4.3	Kysttransportmodel	15
4.3.1	Eksisterende layout	15
4.3.2	Fremtidigt layout	18
5	Evaluering af bølger og kysttransport i Faxe Bugt	21
5.1	Bølger i Faxe Bugt	21
5.2	Kysttransport under eksisterende forhold	22
5.3	Kysttransport for fremtidigt layout	24
5.3.1	Alternativ planform for Sydstranden	26
6	Evaluering af sedimenttransport omkring havnen	28
6.1	Kvalitative observationer af bølge- og strømforhold samt sandtransport omkring havnen	28
6.1.1	Eksisterende havn	28
6.1.2	Fremtidig havn	30
6.2	Kvantitativ beregning af sandtransport forbi havnen	33
6.3	Mulighed for optimeret udformning af havn og indsejling	35
7	Evaluering af transportforholdene for tang omkring havnen	36
7.1	Transport og aflejring af tang	36
7.2	Transport og aflejring af tang omkring den eksisterende havn	36
7.3	Transport og aflejring af tang omkring den fremtidige havn	37
8	Sammenfattende resumé	39
8.1	Indflydelse på kysttransport samt stabilitet af Sydstrandens planform	39
8.2	Indflydelse på strøm- og bølgeforhold	40
8.3	Indflydelse på sandtransport omkring havnen	41
8.4	Indflydelse på transportforholdene for tang	41
9	Referencer	42

Figurer

Figur 1.1	Oversigtskort over Faxe Ladeplads Havn.....	7
Figur 2.1	Kort, der viser alt data fra den udførte opmåling. Farver angiver bundniveau i meter.	10
Figur 2.2	Kort over beliggenhed af batymetri-profiler.....	10
Figur 2.3	Målt batymetri langs kystprofiler.	11
Figur 2.4	Kort, der viser placeringen af vandstandsmålere samt det punkt, hvorfra bølgeforhold er udtrykket.....	11
Figur 2.5	Bølgerose, der viser bølgeforhold i Faxe Bugt.	12
Figur 2.6	Vindrose, der illustrerer vindforholdene ved Faxe Ladeplads.	12
Figur 3.1	Kort, der viser modelbatymetrien for den anvendte bølgemodel.....	13
Figur 3.2	Detaljerede plots, der viser beregningsnettet omkring havnen for den nuværende (øverst) og den fremtidige (nederst) havn.	14
Figur 3.3	Kort over udvalgte profiler til vurdering af kysttransport under eksisterende forhold. ...	16
Figur 3.4	Kystprofiler for eksisterende forhold.	17
Figur 3.5	Bølgeroser for bølgeforcing anvendt til Litdrift modellering af eksisterende forhold.	18
Figur 3.6	Profilverisigt og batymetri for fremtidige forhold langs Sydstranden.	19
Figur 3.7	Bølgeroser for bølgeforcing langs Sydstranden anvendt til Litdrift-modellering af fremtidigt layout.	20
Figur 4.1	Beregnet bølgefelt, der viser bølgehøjde og -retning i Faxe Bugt.....	21
Figur 4.2	Bølgeroser, der viser bølgeklimate i midten af Faxe Bugt (øverst) og tæt på Faxe Ladeplads Havn (nederst).	22
Figur 4.3	Modelleret Q-Alfa kurve Profil N2 under eksisterende forhold.	22
Figur 4.4	Oversigtskort for modelleret kysttransport under eksisterende forhold.	23
Figur 4.5	Modelleret variation i netto-transport ved Profil N2 under eksisterende forhold.	24
Figur 4.6	Modelleret variation i netto-transport gradient mellem Profil S1 og Profil S2 under eksisterende forhold.	24
Figur 4.7	Oversigtskort for modelleret kysttransport (orange pile) under fremtidige forhold.	25
Figur 4.8	Estimeret kystlinje svarende til en netto-transport på ca. 20.000 m ³ /år.	26
Figur 4.9	Sammenligning af opdateret skitse fra H&K med Figur 4.8.....	27
Figur 5.1	Kort, der viser bølgeforholdene omkring den eksisterende havn under en kraftig stormhændelse.....	28
Figur 5.2	Kort, der viser strømforholdene omkring den eksisterende havn under en kraftig stormhændelse.....	29
Figur 5.3	Kort, der viser sandtransportrater omkring den eksisterende havn under en kraftig stormhændelse.....	30
Figur 5.4	Kort, der viser bølgeforholdene omkring den fremtidige havn under en kraftig stormhændelse.....	31
Figur 5.5	Kort, der viser strømforholdene omkring den fremtidige havn under en kraftig stormhændelse.....	32
Figur 5.6	Kort, der viser sandtransportrater omkring den fremtidige havn under en kraftig stormhændelse.....	33
Figur 5.7	Søjlediagrammer, der illustrerer hyppighed og transport for de betragtede bølgescenarier.....	34
Figur 5.8	Bidrag til årlig sandtransport fra de betragtede bølgescenarier (karakteriseret ved bølgehøjde).	34
Figur 5.9	Kort, der viser en mulig fremtidig placering af navigationskanalen, der forventes at give forbedret transport af sand forbi havnen.....	35
Figur 6.1	Kort, der viser strømforholdene omkring den eksisterende havn under en kraftig stormhændelse.....	37
Figur 7.1	Forslag til havneudvidelse ved Faxe Ladeplads fra H&K.	39
Figur 7.2	Estimeret kystlinje svarende til en netto-transport på ca. 20.000 m ³ /år.	40

Tabeller

Tabel 3.1	Parametre for bølgescenarier anvendt i den koblede bølge-, hydrodynamik- og sandtransportmodel.....	15
Tabel 3.2	Kystlinjeorientering for eksisterende forhold.....	16
Tabel 3.3	Planlagt kystlinjeorientering for fremtidig Sydstrand.....	18
Tabel 4.1	Kystlinjeorientering og modellerede transportrater for eksisterende forhold.....	23
Tabel 4.2	Kystlinjeorientering og modellerede transportrater for fremtidig Sydstrand.	25
Tabel 4.3	Beregnet klassisk ligevægtsorientering (øverst) og systemisk ligevægtsorientering (nederst) svarende til ~20.000 m ³ /år for fremtidig Sydstrand.....	26
Tabel 5.1	Årlige transportrater beregnet ud fra den koblede 2D-model.....	35

1 Ikke-teknisk resumé

Nærværende rapport beskriver undersøgelser af kysttekniske forhold for den foreslåede havneudvidelse for Faxe Ladeplads Havn. Undersøgelserne har bestået i batymetriske opmålinger og modellering af bølger, strømme og sandtransport. Derudover er der lavet en vurdering af forholdene for tangansamling for både den eksisterende og foreslåede udformning. Baseret på disse undersøgelser gives anbefalinger til den videre udvikling af projektet.

Studiet af bølgeforskelene har vist, at de bølgeretninger, som påvirker kysten, kommer fra et meget snævert udsnit af vinkler omkring SØ. I forhold til tidligere forventninger præsenteret i grænsefladenotatet /8/ giver de nye undersøgelser en opdateret forståelse af dynamikken for den sydvestlige strand. På grund af fraværet af skyggeeffekt fra havneområder og eksisterende mole øst for indsejlingen forudsiges at stranden vil have en mindre krum planform end vist i de oprindelige skitser.

Den udførte modellering har endvidere vist, at den meget snævre vinkel inden for hvilken bølgerne fra SØ påvirker kysten, gunstigt vil eksponere den ønskede rekreative strand i forhavnen.

Den undersøgte udformning vil give væsentlige fordele i forhold til oprensning af sand fra indsejlingen. Dette skyldes dels at aflejringer kun vil forekomme i et lille område umiddelbart foran havnens åbning. Derudover vil ydermolernes krumning give anledning til kraftigere strømme, som vil øge den naturlige sandtransport forbi havnen. Denne krumning kan dog optimeres i en videre udvikling af projektet.

Den foreslåede havneudformning forventes at minimere ophobningen af tang inde i havnen. Stranden syd for havnen forventes dog at opleve tangansamlinger i et omfang, der svarer til den nuværende situation.

Havnens udformning kan optimeres yderligere både med henblik på at øge det naturlige bypass og på at opnå en attraktiv rekreativ strand ind mod havnen.

Hvad angår bypass er der beskrevet to forbedringsmuligheder. Den mest effektive vil være at flytte indsejlingen mod øst således at indsejlingen placeres der hvor strømforholdene er optimale for at transportere sand forbi indsejlingen. Denne drejning af sejlrenden svarer til den, der tidligere er blevet undersøgt af Faxe Kalk.

Ønskes det at beholde den nuværende placering af indsejlingen og sejlrenden kan det være muligt at opnå en mindre forbedring i bypassforholdene ved at justere på ydermolernes forløb. Dette vil dog betyde at den eksisterende læmole (prammene) ikke kan genanvendes hvilket forventes at øge anlægsomkostningerne.

Nyttiggørelse af sand fra oprensningerne ved indsejlingen kan med fordel ske ved at placere dette ved den søndre mole tæt på havnen. Afhængig af timing mellem fodring og storme må der forventes at ske væsentlige udsving i strandens planform.

Et kunstigt rev placeret ud for den søndre mole forventes dog at kunne reducere disse udsving og desuden øge krumningen af stranden således at den strækker sig længere ud langs molen. Placering af et sådant rev bør vurderes nærmere i forhold til anlægsteknik, nyttiggørelse af sand, strandens udformning og økonomi.

Der er ikke lavet undersøgelser af forekomsten af ålegræs i området omkring havnen eller af den foreslåede havns påvirkning af mulige ålegræsbede. Det anbefales at disse aspekter belyses som led i fremtidige uddybende undersøgelser.

2 Introduktion

Hasløv & Kjærsgaard IS (H&K) har i samarbejde med Karsten Mangor udarbejdet et design for udvidelse af havnen ved Faxe Ladeplads. Denne rapport leverer analyser til brug for det videre design af havneudvidelsen i form af numeriske beregninger af strøm- og bølgeforhold samt sediment- og tangtransport omkring den eksisterende samt udvidede havn. Herved belyses havneudvidelsens effekt på kystprocesserne.

En oversigt over den eksisterende havn og den planlagte havneudvidelse er vist på Figur 2.1. Tegningen af havneudvidelsen indeholder også noter, der angiver den eksisterende forståelse for kystteknikken omkring havnen udarbejdet af Karsten Mangor i samarbejde med H&K.



Figur 2.1 Oversigtskort over Faxe Ladeplads Havn.
(Top) Eksisterende havn baseret på et satellitbillede fra Google Earth. (Bund) Planlagt udvidelse inklusive foreslået sand by-pass-system.

Rapporten er struktureret som følger:

- Sektion 3 giver en oversigt over datagrundlaget for analyserne.
- Sektion 4 beskriver kort de benyttede modeller, der ligger bag analyserne.
- Sektion 5 giver en analyse af bølgetransformationen i Faxe Bugt og den resulterende transport af sand langs kysten omkring Faxe Ladeplads. For den fremtidige havn gives en analyse af den fremtidige kyst sydvest for havnen.
- Sektion 6 giver en analyse af bølge-, strøm- og sedimenttransportforhold omkring den eksisterende og udvidede havn. Disse analyser benyttes til at estimere oprensningsbehovet i indsejlingen til den fremtidige havn.
- Sektion 7 undersøger, om det nye havnelayout giver anledning til ændringer i forholdene for tangtransport.
- Sektion 8 præsenterer en sammenfatning og diskussion af rapportens hovedkonklusioner.

3 Datagrundlag

3.1 Batymetri-data

I de udførte analyser er bundforholdene i Faxe Bugt beskrevet baseret på data fra 2 kilder, nemlig Danmarks Dybdemodell og en batymetrisk opmåling udført i forbindelse med dette projekt.

Danmarks Dybdemodell er en digital modell med middeldybder, som dækker Danmarks eksklusive økonomiske zone. Modellen har en opløsning på 50 meter og er baseret på en samling af hydrografiske opmålinger og historiske kilder. Disse data leveres af Geodatastyrelsen og er frit tilgængelige /3/.

Danmarks Dybdemodell giver dog ikke en tilstrækkelig detaljeret beskrivelse af bundforholdene tæt på land, og det har derfor været nødvendigt at indsamle supplerende data. Dette blev gjort ved at opmåle et antal transekter omkring havnen samt 9 kystprofiler fordelt langs kysten både nord og syd for havnen.

Området omkring havnen samt den søværts del af kystprofilerne blev opmålt ved hjælp af et autonomt overfladefartøj udstyret med et enkeltstråle-ekkolod og en GNSS modtager. Det anvendte ekkolod var et CEE-ECHO fra CEE Hydrosystems, som var udstyret med en 200 kHz Airmar transducer. Både målinger af vanddybde og position blev logget igennem fartøjets autopilot og gemt på et SD kort.

For at kunne korrigere de målte vanddybder i forhold til lydhastighed blev denne målt ved hjælp af en Cast Away CTD-sonde. Der blev ikke observeret væsentlige lodrette variationer i lydhastigheden, og i databehandlingen blev der derfor kun anvendt én værdi for lydhastigheden.

Den landværts del af kystprofilerne blev opmålt med en håndholdt GNSS modtager (Emlid Reach RS2+).

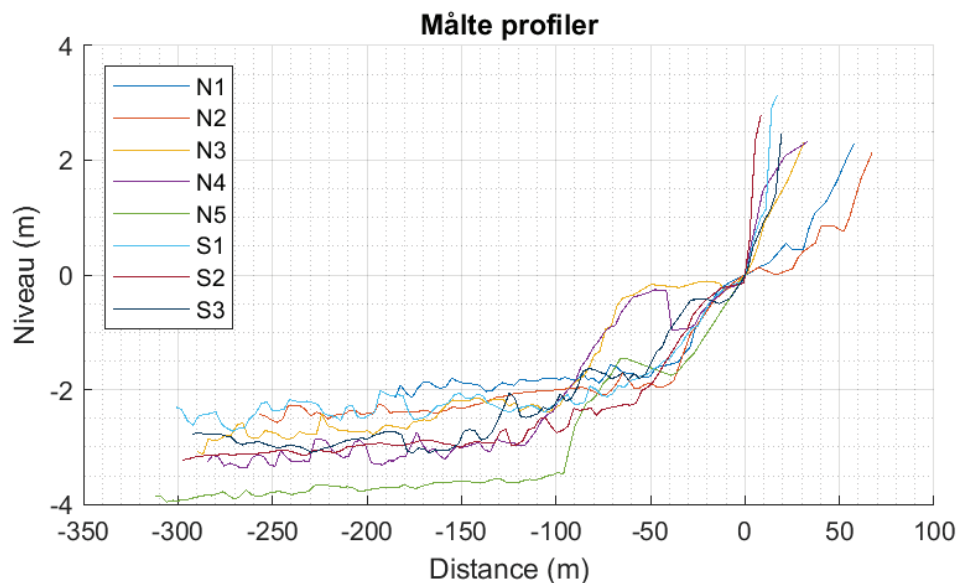
En oversigt over alt det indsamlede er vist i Figur 3.1. Data er desuden benyttet til at konstruere 9 kystprofiler. Placeringen af disse profiler er vist i Figur 3.2, og de interpolerede kystprofiler er vist i Figur 3.3.



Figur 3.1 Kort, der viser alt data fra den udførte opmåling. Farver angiver bundniveau i meter.



Figur 3.2 Kort over beliggenhed af batymetri-profiler.



Figur 3.3 Målt batymetri langs kystprofiler.

3.2 Vandstandsdata

Der er opstillet vandstandsmålere i Rødvig Havn og i Hesnæs Havn (Figur 3.4), og data fra disse kan frit downloades fra Danmarks Meteorologiske Institut. Vandstandsmåleren i Rødvig Havn har dog kun været i drift siden 1. januar 2012. Det har derfor været nødvendigt at benytte målinger fra Hesnæs Havn til at beskrive vandstanden i Faxe Bugt frem til år 2012. For perioden fra 2012 og frem er anvendt vandstande fra Rødvig.

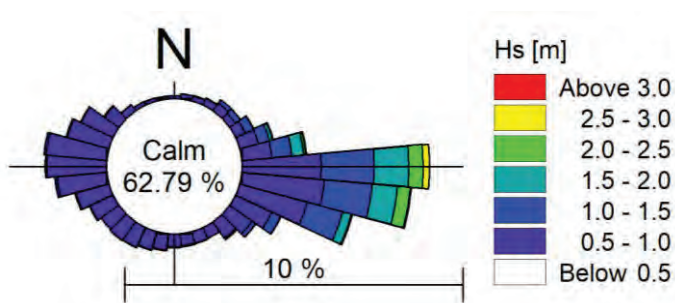


Figur 3.4 Kort, der viser placeringen af vandstandsmålere samt det punkt, hvorfra bølgeforld er udtrukket.

3.3 Bølgedata

Der er udtrukket en beregnet tidsserie for bølgeforhold i et punkt i Faxe Bugt (se Figur 3.4). Tidsserien dækker en 10-års periode fra 2009 til og med 2018. De udtrukne data er beregnet af DHIs bølgemodel for de danske farvande. En nærmere beskrivelse af denne model findes i /1/.

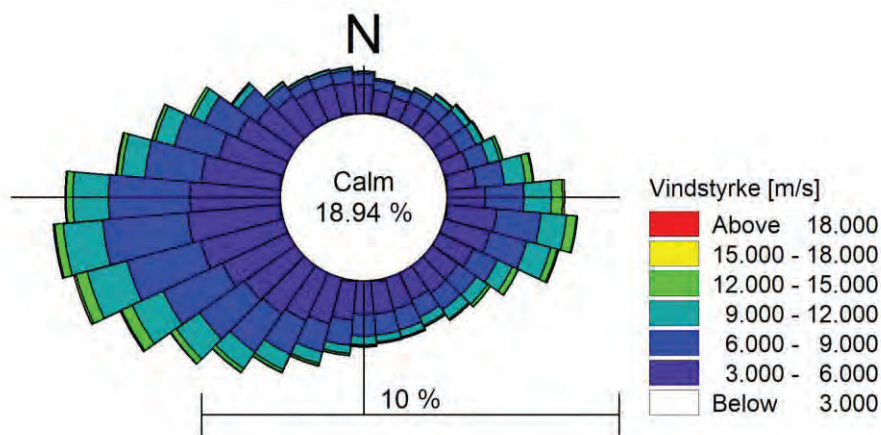
Bølgerosen viser retningsfordelingen af forskellige bølgehøjder, hvor retningen er defineret som kommende fra. Det ses, at de højeste bølger kommer fra østlige retninger og endvidere, at østlige bølger er de mest normale for området.



Figur 3.5 Bølgerose, der viser bølgeforhold i Faxe Bugt.

3.4 Vinddata

Der er udtrukket en 25-års tidsserie (1995-2019) med beregnede vindforhold ved Faxe Ladeplads (Figur 3.6). En nærmere beskrivelse af dette datasæt kan findes i /2/.



Figur 3.6 Vindrose, der illustrerer vindforholdene ved Faxe Ladeplads.

Vindrosen viser retningsfordelingen af forskellige vindstyrker, hvor retningen er defineret som kommende fra. Meget typisk for Danmark ses vinden typisk fra vestlige retninger, mens østlige vindretninger forekommer mindre hyppigt. Vindstyrken er dog ganske sammenlignelig på tværs af de to retningsmæssige hovedsektorer. Da Faxe Bugt vender mod øst, er det naturligt, at det indkommende bølgeklima (Figur 3.5) domineres af den østlige vind, mens den mere typiske vestlige vindsektor kun giver anledning til ganske små bølger i bugten.

4 Modelopsætning

4.1 Bølgemodel

Bølger udgør den primære drivende kraft for sandtransport langs kysten og omkring havnen i Faxe Ladeplads. For at give en detaljeret beskrivelse af bølgeforholdene tæt på kysten er der opsat en lokal bølgemodel i modelværktøjet MIKE 21 SW FM. Dette modelværktøj er en state-of-the-art 3. generations spektral bølgemodel, der er i stand til at repræsentere de mest væsentlige processer, der påvirker bølgeforholdene tæt på kysten. Modellen kan blandt andet tage højde for:

- Dannelse af bølger på grund af vind.
- Ikke-lineære bølgeinteraktioner.
- Bundfriktion.
- Bølgebrydning.
- Refraktion og shoaling.

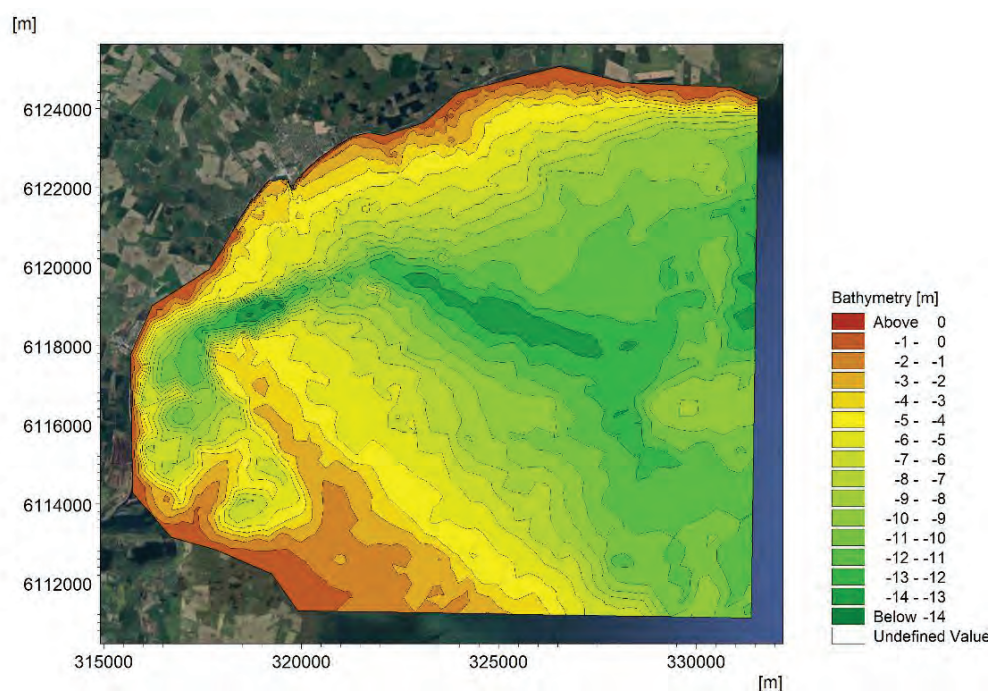
En fuld beskrivelse af modelværktøjet er givet i /5/.

Modelområdet for den anvendte model har en udstrækning på ca. 15 km gange 15 km og dækker det meste af Faxe Bugt (Figur 4.1). Cellestørrelsen i beregningsnettet varierer mellem ca. 300 m i områder, der ligger langt fra kysten, til 10-20 m i området omkring havnen. Modelbatymetrien er interpoleret ud fra både de tilgængelige data fra Danmarks Dybdemodell og den til projektet udførte opmåling.

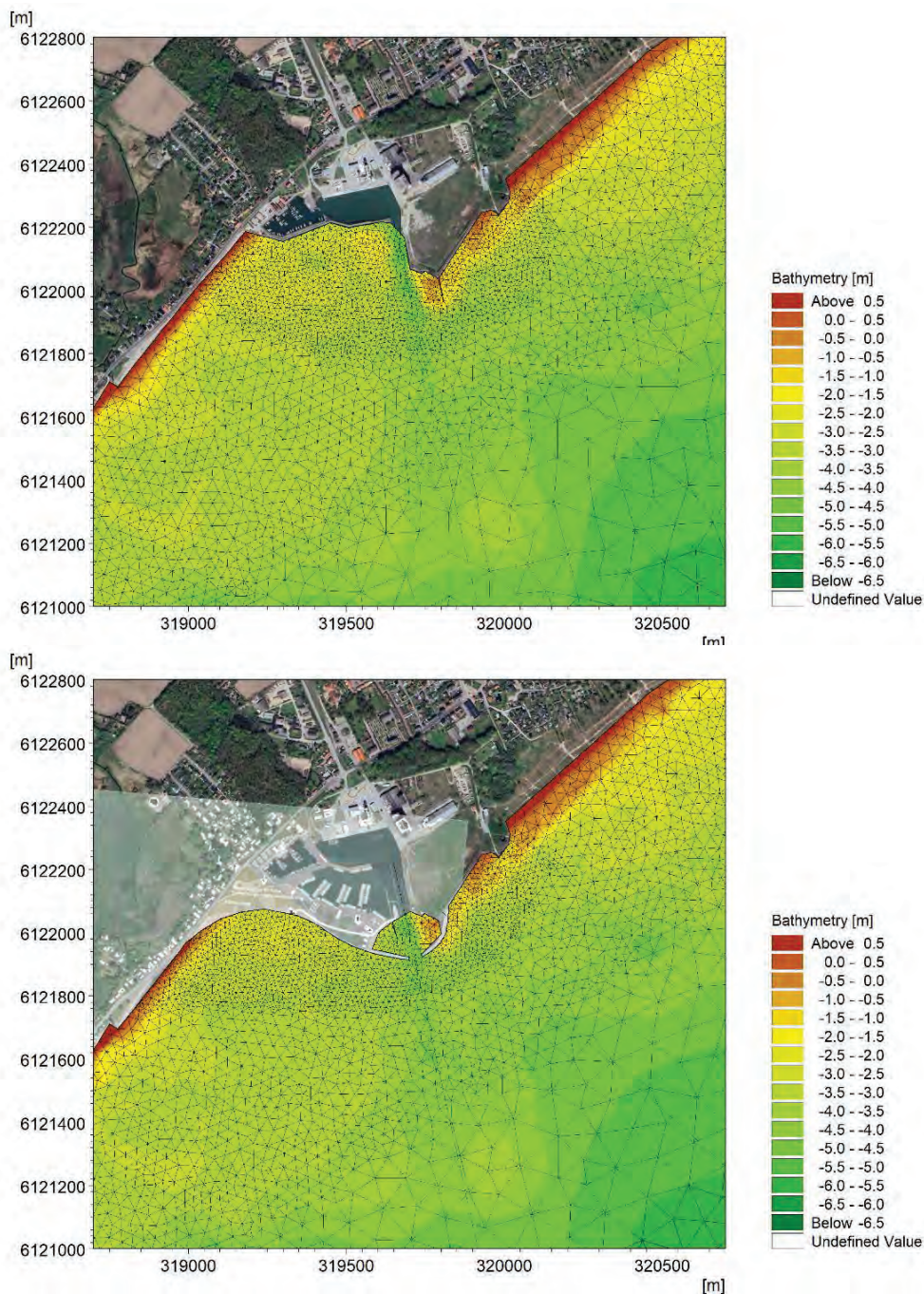
For at kunne beskrive både den nuværende og fremtidige situation er der lavet to modelbatymetrier som vist i Figur 4.2. Den eneste forskel imellem disse to batymetrier er udformningen af havnen. Modellen for den fremtidige udformning af havnen tager derfor ikke højde for de bundændringer, der måtte opstå på grund af den ændrede udformning.

Bølgemodellen har to åbne rande; mod syd og mod øst. Den tilgængelige tidsserie for bølgeforhold er anvendt som randbetingelse på begge de åbne rande.

Modellen er afviklet for perioden 2009-2018 (10 år).



Figur 4.1 Kort, der viser modelbatymetrien for den anvendte bølgemodel.



Figur 4.2 Detaljerede plots, der viser beregningsnettet omkring havnen for den nuværende (øverst) og den fremtidige (nederst) havn.

4.2 Kombineret bølge-, hydrodynamik- og sandtransportmodel

For at kunne vurdere forholdene for tilsanding i indsejlingen til den fremtidige havn er der opsat en kombineret model, der beskriver både bølger, hydrodynamik og sandtransport omkring havnen.

Den koblede model har samme udstrækning som bølgemodellen i afsnit 4.1 men har en bedre opløsning omkring havnen (cellestørrelse ned til omkring 3 m).

Ligesom i bølgemodellen beskrevet i afsnit 4.1 er bølgemodellen i den koblede model opsat i værktøjet MIKE 21 SW FM, og de to modeller er i al væsentlighed ens.

Den hydrodynamiske model er opsat i værktøjet MIKE 21 HD FM, som er en dybdemidlet model, der beskriver strøm- og vandstandsforhold. En fuld beskrivelse af MIKE 21 HD FM er givet i /4/.

Den hydrodynamiske model er drevet af bølgereaktionskræfter fra den tilknyttede bølgemodel.

Sandtransporten omkring havnen er beregnet ved hjælp af MIKE 21 ST FM. Dette modelværktøj beregner transporten af sand under den kombinerede påvirkning af strøm og bølger. En fuld beskrivelse af MIKE 21 ST FM kan findes i /6/.

Den kombinerede model er relativt tung at afvikle, og det har derfor ikke været muligt at simulere den samme 10-års periode, som er simuleret med den rene bølgemodel. Der er i stedet simuleret et antal repræsentative scenarier, der hver er karakteriseret ved de bølgeforhold, der påtrykkes som randbetingelse. Denne modelleringsstrategi er valgt ud fra en forventning om, at bølgeforholdene er den dominerende faktor, der påvirker transporten af sand forbi havnen.

Udvælgelsen af bølgescenarier er foretaget med udgangspunkt i den bølgetidsserie, der er udtrukket i midten af Faxe Bugt (afsnit 3.3). Ved hjælp af en statistisk analyse af disse bølgeforhold er der udvalgt 6 repræsentative bølgescenarier (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Parametre for bølgescenarier anvendt i den koblede bølge-, hydrodynamik- og sandtransportmodel.

Signifikant bølgehøjde	Peak bølgeperiode	Middel bølgeretning	Hyppighed
0,5 m	3,5 s	90°	11 %
1,0 m	5,0 s	90°	6,1 %
1,5 m	6,0 s	90°	3,5 %
2,0 m	7,0 s	90°	1,6 %
2,5 m	8,0 s	90°	0,43 %
3,0 m	8,5 s	90°	0,08 %

4.3 Kysttransportmodel

For at vurdere stabiliteten af den planlagte strand syd for havneudvidelsen benyttes MIKE LITTORAL PROCESSES FM (Litdrift), /7/, til at analysere variationen i transportkapacitet langs stranden.

Forud for denne analyse er der først foretaget en undersøgelse af de eksisterende forhold for at sikre, at modellen kan repræsentere de forventede transportrater – i omegnen af 20.000 m³ om året (baseret på udgravningsvolumenet fra indsejlingskanalen).

4.3.1 Eksisterende layout

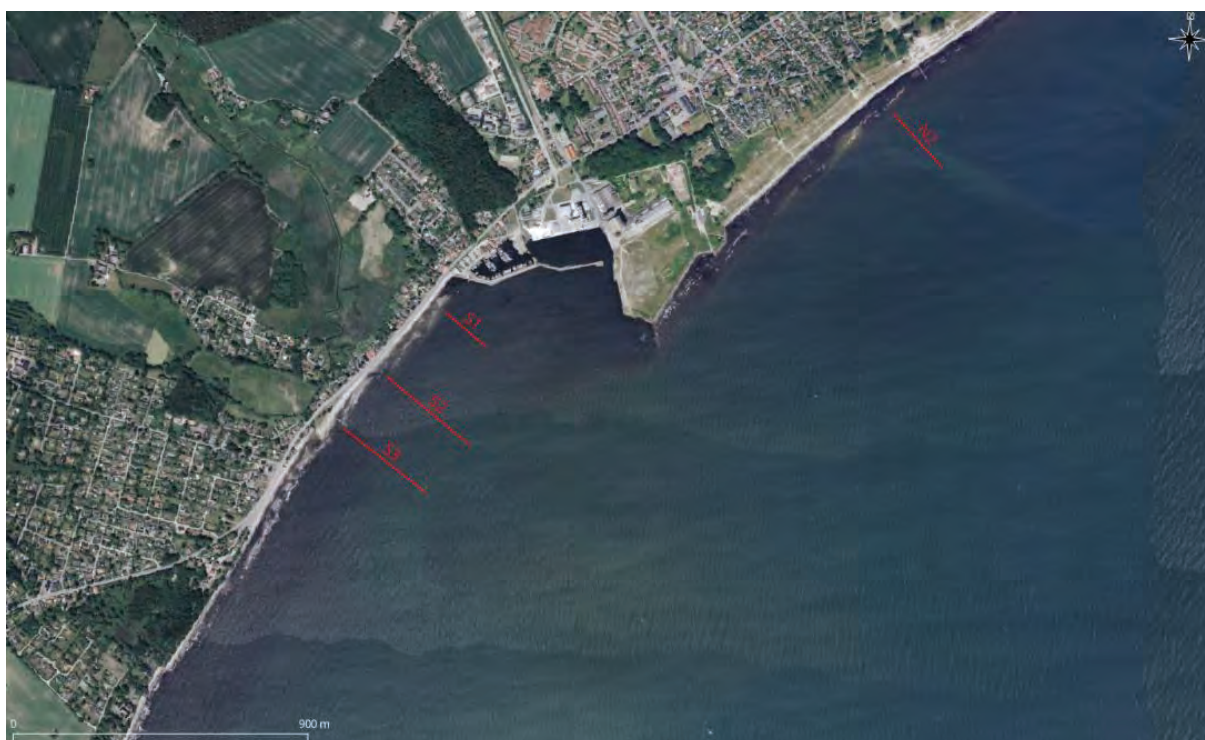
Til vurdering af den eksisterende situation er der udvalgt fire opmålte profiler, se Figur 4.3. I Litdrift er hvert kystprofil repræsenteret dels ved en orientering (se Tabel 4.2) og ved en beskrivelse af bundforholdene langs profilet (se Figur 4.4). Orienteringen af kystprofilen vælges, så den repræsenterer dybdekonturenes orientering kystnært, hvor den langsgående transport forekommer. Dette er en vigtig parameter for bølgeprocesserne, som driver kysttransporten, og derfor varieres den også i modellen, hvorved en såkaldt Q-Alfa kurve bestemmes for hvert kystprofil. En Q-Alfa kurve beskriver, hvordan kysttransporten (Q) varierer med kystorienteringen (Alfa). Herved kan kystens ligevægtsorientering relativ til bølgeklimate undersøges.

Tabel 4.2 Kystlinjeorientering for eksisterende forhold.

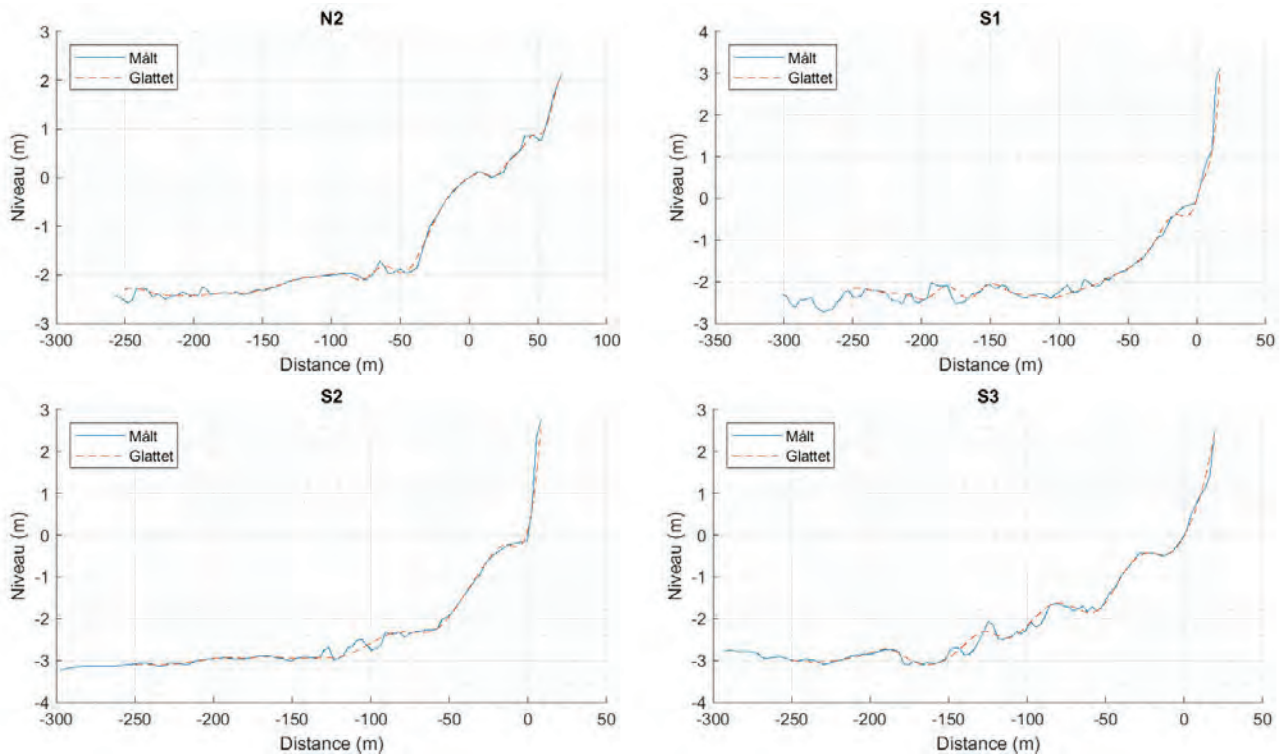
N2 (gr. N)	S1 (gr. N)	S2 (gr. N)	S3 (gr. N)
146	128	128	128

Hvert kystprofil forceres med bølgedata udtrukket fra bølgemodellen beskrevet i sektion 4.1. Bølgerne udtrækkes i kystprofillets yderste punkt. Derudover benyttes vandstandstidsserien beskrevet i sektion 3.2.

På baggrund af tidligere studier for området er der antaget en median kornstørrelse på $d_{50} = 0,25$ mm med geometrisk spredning $(d_{84}/d_{16})^{0.5} = 1.5$. Derudover er bundruheden under kalibreringen blevet sat til 0,008 m.



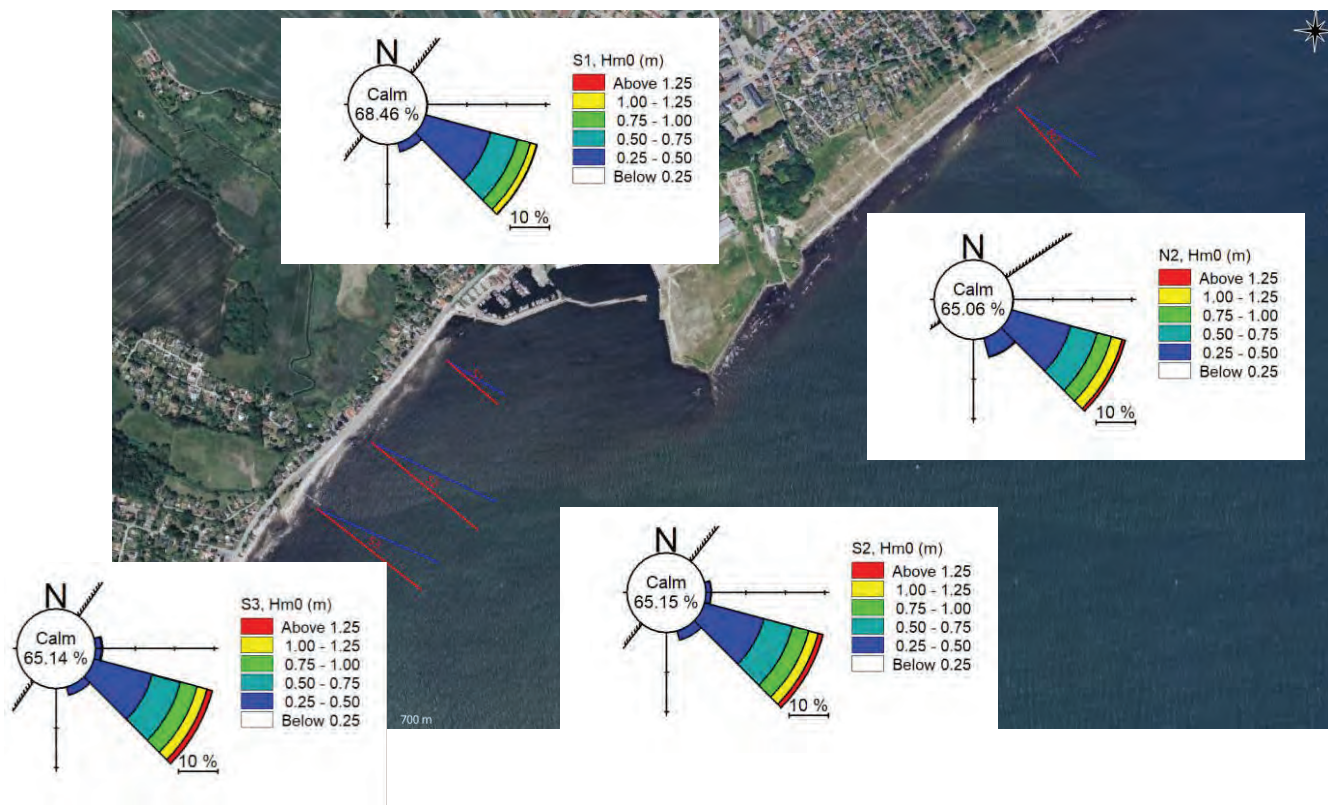
Figur 4.3 Kort over udvalgte profiler til vurdering af kysttransport under eksisterende forhold.



Figur 4.4 Kystprofiler for eksisterende forhold.

Lidrift-modellen benytter det glattede profil. Bemærk, at for at tage højde for læeffekten fra havnen er Profil S1 er blevet kortet af i modellen, så det kun inkluderer fra -100 m og op til toppen af profilet.

Figur 4.5 viser bølgeroser for bølgeforcingen anvendt til modellering af kysttransporten under eksisterende forhold. I roserne er kystlinjen også angivet med en riflet sort linje. Bølgeklimate ses grundlæggende at være retningsmæssigt ganske smalt og at ramme den estimerede eksisterende kystorientering med en forholdsvis lille vinkel (vinkel mellem kystnormal og bølgeretning). Som udgangspunkt lader den eksisterende kyst altså til at være relativt tæt på sin ligevægtsorientering.



Figur 4.5 Bølgeroser for bølgeforcing anvendt til Littredrift modellering af eksisterende forhold.

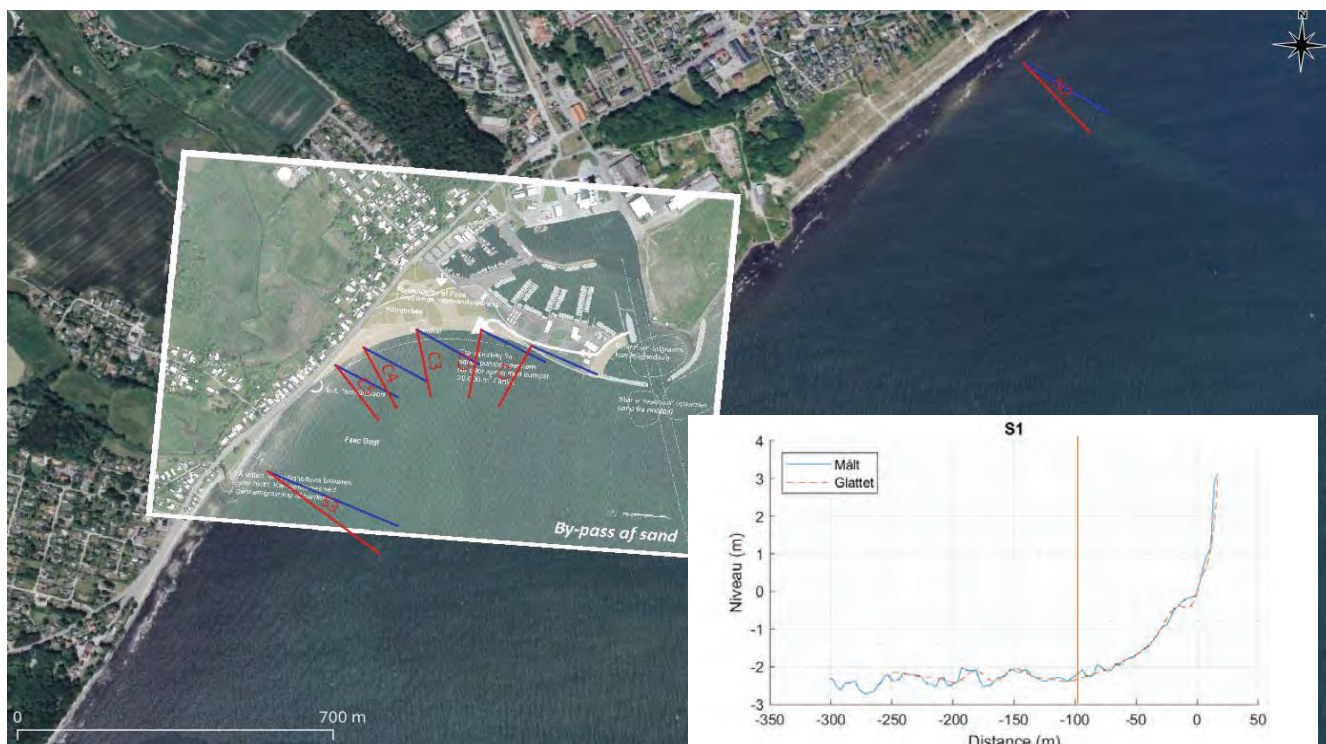
4.3.2 Fremtidigt layout

Til vurdering af stabiliteten af Sydstranden i det fremtidige havnelayout benyttes 5 profiler langs strandens tracé. De 5 profiler antages at følge batymetrien for det eksisterende Profil S1 (nærmest havnen) og har dermed alle samme batymetri, se Figur 4.6. Den planlagte kystorientering er angivet i Tabel 4.3.

Modellen benytter samme parametre som beskrevet for de eksisterende forhold, og på samme måde varieres kystorienteringen i modellen for at undersøge kystens ligevægtsorientering relativt til bølgeklimate.

Tabel 4.3 Planlagt kystlinjeorientering for fremtidig Sydstrand.

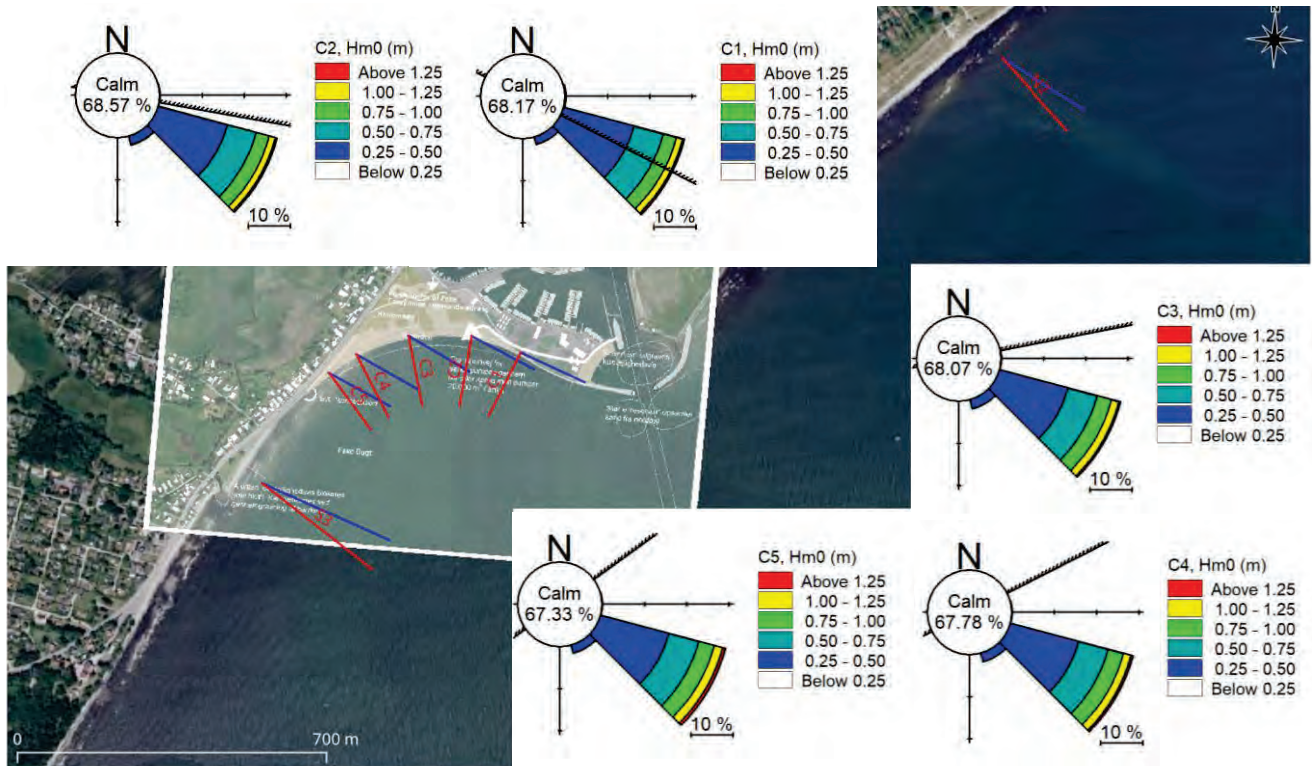
C1 (gr. N)	C2 (gr. N)	C3 (gr. N)	C4 (gr. N)	C5 (gr. N)
207	190	169	153	144



Figur 4.6 Profiloversigt og batymetri for fremtidige forhold langs Sydstranden.

Lidriftmodellen benytter det glattede profil for S1 i Figur 4.5 til alle profiler langs den fremtidige Sydstrand (C1 til C5). Bemærk, at for at tage højde for læeffekten fra havnen er Profil S1 blevet kortet af i modellen, så den kun inkluderer fra -100 m og op til toppen af profilet.

Figur 4.7 viser bølgeroser for bølgeforcingen anvendt til modellering af kysttransporten langs Sydstranden i det fremtidige layout. I bølgeroserne er den planlagte kystlinje også angivet med en riflet sort linje. Bølgeklimate ses igen at være retningsmæssigt ganske smalt, men for det fremtidige layout rammer bølgerne nærmest parallelt med den planlagte kystorientering. Som udgangspunkt lader den planlagte kyst altså til at være langt fra sin naturlige ligevægtsorientering.

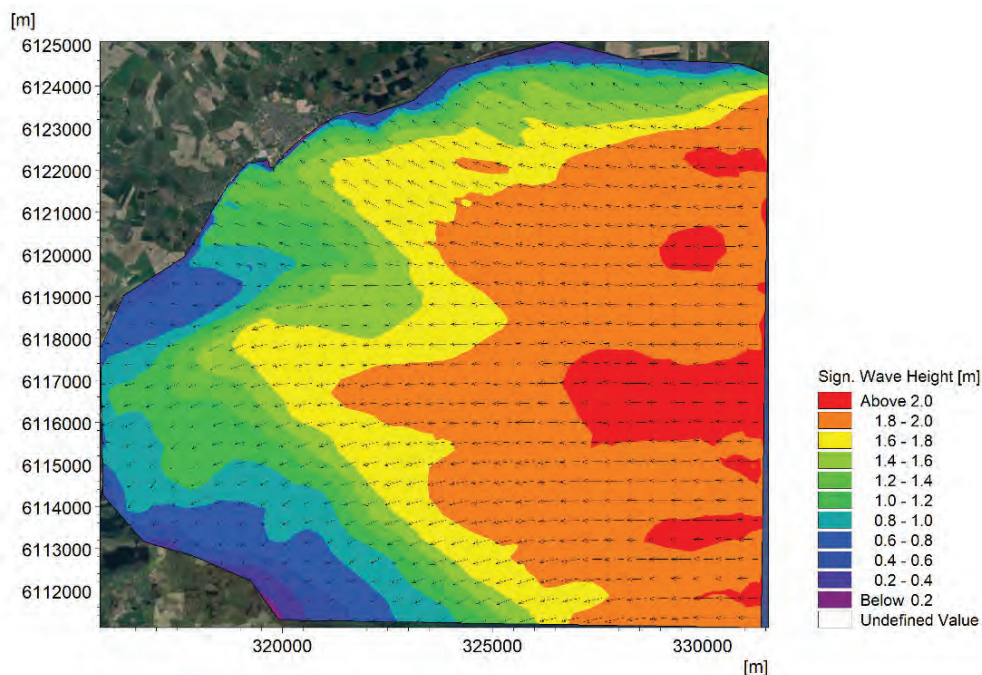


Figur 4.7 Bølgeroser for bølgeforcing langs Sydstranden anvendt til Litdrift-modellering af fremtidigt layout.

5 Evaluering af bølger og kysttransport i Faxe Bugt

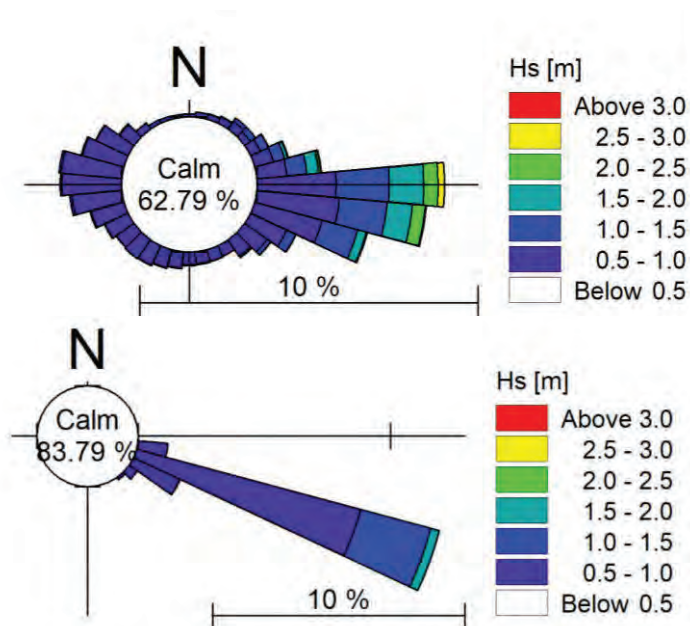
5.1 Bølger i Faxe Bugt

I Figur 5.1 vises et eksempel på modellerede bølger i Faxe Bugt. I Figur 5.2 vises to bølgeroser, én udtrukket i midten af bugten og én tæt på Faxe Ladeplads Havn.



Figur 5.1 Beregnet bølgefelt, der viser bølgehøjde og -retning i Faxe Bugt.

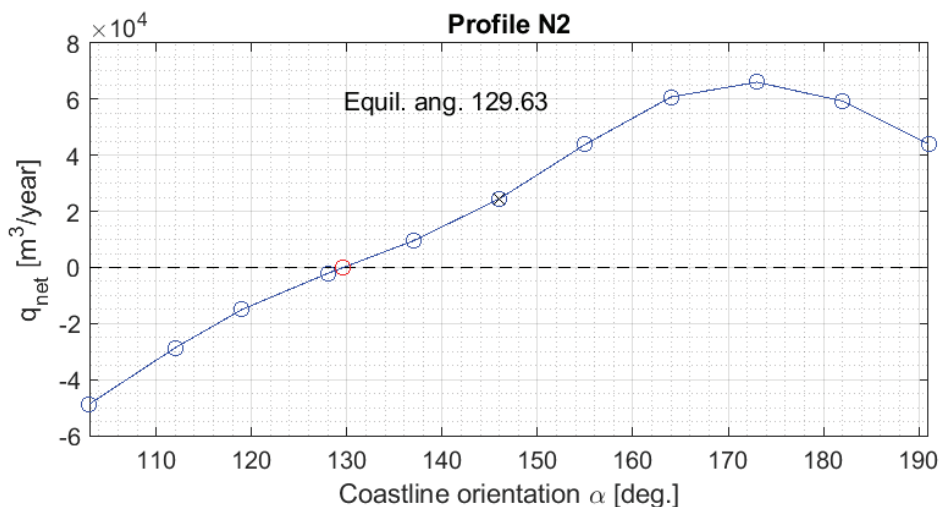
Som bølgeroserne i Figur 5.2 viser, er der væsentlig forskel på bølgeklimaet i midten af Faxe Bugt og tæt på havnen. Til trods for, at der midt i Faxe Bugt forekommer bølger kommende fra alle retninger, så er det kun de bølger, der kommer fra østlige retninger, der giver væsentlig bølgeaktivitet ved Faxe Ladeplads. Ved Faxe Ladeplads består bølgeklimaet således udelukkende af bølger kommende fra et snævert interval af retninger omkring syd-sydøst. Bølgehøjden er desuden altid væsentligt mindre tæt på havnen end midt i Faxe Bugt. Figur 5.1 viser et øjebliksbillede af beregnede bølgehøjder (farver) og -retninger (pile). Figuren viser, hvordan bølgerne gradvist drejes ind mod kysten, så bølgerne falder næsten vinkelret ind på kysten (pga. bølgerefraktion). Bølgerefraktionen medfører, at den indkommende bølgeenergi til Faxe Bugt fordeles langs hele kysten i Faxe Bugt, og dermed falder bølgehøjden nær kysten. Denne kraftige refraktion gør desuden, at der er væsentlig forskel i bølgehøjden forskellige steder langs kysten. Kysten nord for havnen er således udsat for større bølger end kysten umiddelbart syd for havnen.



Figur 5.2 Bølgeroser, der viser bølgeklimaet i midten af Faxø Bugt (øverst) og tæt på Faxø Ladeplads Havn (nederst).

5.2 Kysttransport under eksisterende forhold

Et oversigtskort over det modellerede kysttransportmønster under eksisterende forhold er vist i Figur 5.4. Kortet viser både den forudsatte kystorientering for nuværende forhold (røde profiler) samt den beregnede ligevægtsorientering (blå profiler). Yderligere er netto-transportretningen samt -størrelsen angivet med pile. Disse informationer findes ligeledes i Tabel 5.1. Den klassiske ligevægtsorientering er baseret på skæringen med x-aksen i Q-Alfa kurven, illustreret med en rød ring i Figur 5.3 for Profil N2. Den klassiske ligevægtsorientering forekommer således, når netto-transporten er nul. Denne klassiske definition bruges som regel, når strande skal stabiliseres med strukturer. Såfremt netto-transporten af sand i et område er uniform (omkring Faxø Ladeplads Havn ca. 20.000 m³/år), kan der dog sagtens eksistere en naturlig systemisk ligevægtssituation hvor transporten er højere.



Figur 5.3 Modelleret Q-Alfa kurve Profil N2 under eksisterende forhold.

I Q-Alfa kurven er den eksisterende kystlinjeorientering markeret med et blå kryds, mens den modellerede ligevægtsorientering er markeret med en rød ring.

I Faxe Bugt ses den åbne eksisterende kyst grundlæggende at være omkring 10-16 grader fra sin klassiske ligevægtsorientering. Dette giver dog ikke anledning til grundlæggende erosionsproblemer langs kysten, fordi en systemisk ligevægtssituation eksisterer. Altså, at den naturlige transportkapacitet opretholdes nogenlunde uniformt langs kysten – specifikt syd for havnen via mekanisk sandfodring. Denne systemiske ligevægtsituation består af en jævn gennemsnitlig årlig netto-transport mod sydvest i størrelsesordenen 20.000 – 25.000 m³/år. Samtidig ses udvekslingen af sand nordpå og sydpå (Q_{brutto} i Tabel 5.1) at være meget lig netto-transportraterne. Dette passer godt med de retningsmæssigt smalle bølgeroser vist i Figur 4.5.

Tabel 5.1 Kystlinjeorientering og modellerede transportrater for eksisterende forhold.

	N2	S1	S2	S3
Orientering (gr. N)	146	128	128	128
Klassisk ligevægtsorientering (gr. N)	130	118	114	113
Q_{net} (m ³ /år)	24.500	9.000	24.500	20.500
Q_{brutto} (m ³ /år)	24.550	9.300	24.800	20.800

Umiddelbart syd for havnen er den gennemsnitlige sydvestgående netto-transport reduceret til omkring 9.000 m³/år grundet læeffekt fra havnen. Længere sydpå stiger transporten igen, fordi påvirkningen fra læeffekter aftager. Der er derfor en gennemsnitlig gradient i netto-transport fra Profil S1 til Profil S2 på omkring 14.500 m³/år, som kan give anledning til erosion på strækningen, hvis der ikke sandfodres tilstrækkeligt. I øjeblikket tilføres stranden omkring 20.000 m³/år svarende til den gennemsnitlige transportkapacitet langs den åbne kyst. Behovet for sandfodring er dog dynamisk/sæsonbetonet, se Figur 5.5 og Figur 5.6. Der kan således opstå situationer med erosion langs Sydstranden, hvis fodringsintervallet f.eks. er for stort.

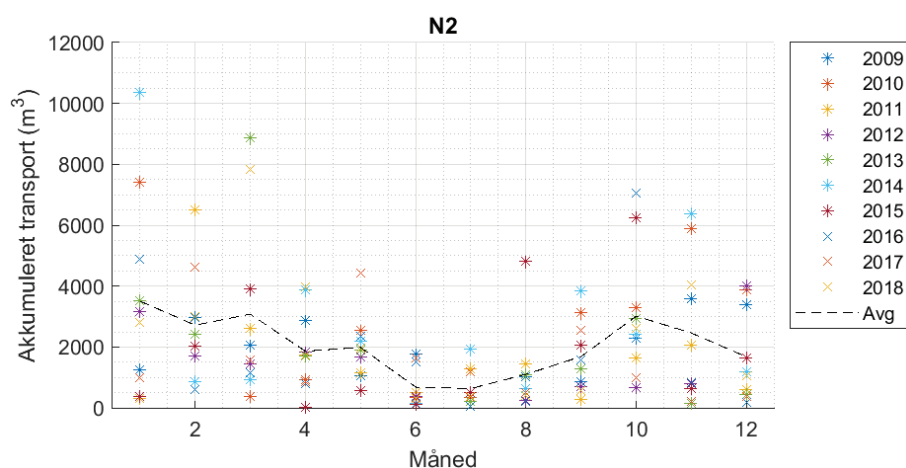


Figur 5.4 Oversigtskort for modelleret kysttransport under eksisterende forhold.

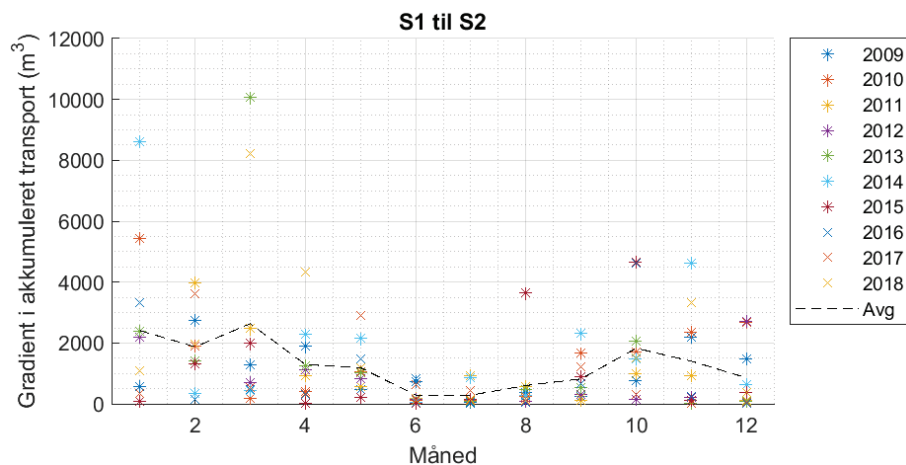
Røde profiler angiver kystens målte orientering baseret på Google Earth. Blå profiler markerer den beregnede klassiske ligevægtsorientering.

Fluktuationer i transporten fra år til år / måned til måned, i kombination med, hvornår fodringerne gennemføres, kan som nævnt på relativt kort sigt give anledning til erosion langs den eksisterende Sydstrand.

I Figur 5.5 vises et overblik over den månedlige modellerede netto-transport i Profil N2 for hvert af de 10 modellerede år. Her ses det, at transporten typisk er relativt lav i perioden fra omkring april til september, mens relativt høje transportrater ses i efterårs- og i vinterperioden. Samme mønster ses i transportgradienten mellem Profil S1 og Profil S2, Figur 5.6. Yderligere ses der stor variation i transporten (og gradienten) i f.eks. perioden januar til marts. Specifikt i januar 2014 ses en transport ved Profil N2 på 10.000 m³ svarende til omkring 41 % af den gennemsnitlige årlige transport i profilet. Samtidig ses en gradient på 8.500 m³ mellem Profil S1 og Profil S2. For dette specifikke eksempel skulle der altså tilføres 8.500 m³ alene i løbet af januar 2014 for at undgå erosion langs Sydstranden.



Figur 5.5 Modelleret variation i netto-transport ved Profil N2 under eksisterende forhold. De farvede markører angiver netto-transporten per måned for hvert af de modellerede 10 år. Den sorte linje angiver gennemsnitsværdien per måned.



Figur 5.6 Modelleret variation i netto-transport gradient mellem Profil S1 og Profil S2 under eksisterende forhold. De farvede markører angiver gradienten i netto-transporten per måned for hvert af de modellerede 10 år. Den sorte linje angiver gennemsnitsværdien per måned.

5.3 Kysttransport for fremtidigt layout

Et oversigtskort over det modellerede kysttransportmønster langs den fremtidige Sydstrand er vist i Figur 5.7. Kortet viser både den planlagte kystorientering (røde profiler) og den beregnede klassiske

ligevægtsorientering (blå profiler). Yderligere er netto-transportretningen samt -størrelse angivet med pile. Disse informationer findes ligeledes i Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Kystlinjeorientering og modellerede transportrater for fremtidig Sydstrand.

	C1	C2	C3	C4	C5
Orientering (gr. N)	207	190	169	153	144
Klassisk ligevægtsorientering (gr. N)	115	118	121	120	119
Q_{net} (m ³ /år)	200	17.600	51.400	47.600	38.700
Q_{brutto} (m ³ /år)	200	17.700	51.400	47.600	38.700

Langs den fremtidige planlagte Sydstrand ses kysten grundlæggende at være omkring 26-90 grader fra sin klassiske ligevægtsorientering. Dette giver anledning til noget større gennemsnitlige årlige netto-transportrater mod sydvest end under eksisterende forhold: omkring 38.000 – 51.000 m³/år fra Profil C3 til Profil C5.



Figur 5.7 Oversigtskort for modelleret kysttransport (orange pile) under fremtidige forhold. Røde profiler angiver kystens målte orientering baseret på Google Earth. Blå profiler markerer den beregnede klassiske ligevægtsorientering.

Kystlinjebevægelserne for den foreslåede udformning af Sydstranden vil være betydelige. F.eks. vurderes det, at stranden vil kunne erodere ca. 50-70 m/år på strækningen mellem C1 og C4, medmindre der gennemføres jævnlig sandfodring. Med jævnlig sandfodring på 20.000 m³/år reduceres erosionen til omkring 30 m/år. Baseret på modelresultaterne vil det planlagte layout således have en omtrentlig levetid på 2-3 år – såfremt der sandfodres svarende til det nuværende niveau på ca. 20.000 m³/år.

5.3.1 Alternativ planform for Sydstranden

Figur 5.8 viser en alternativ udformning af Sydstranden, hvor den årlige nettotransport er ca. 20.000 m³/år svarende til den forventede (nuværende og) fremtidige fodringsmængde. Kystlinjen for den alternative udformning af Sydstranden vil fortsat have en vis variation som følge af bølgeforhold og sandtilførsel (naturlig og mekanisk), men Sydstranden vil være stabil set over lang tid, så længe der kunstigt tilføres et sandvolumen på ca. 20.000 m³/år.

Den alternative udformning af Sydstranden er baseret på de beregnede Q-Alfa kurver for den oprindeligt planlagte Sydstrand, hvori en kystorientering svarende til en gennemsnitlig årlig netto-transport på 20.000 m³/år kan aflæses, se Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Beregnet klassisk ligevægtsorientering (øverst) og systemisk ligevægtsorientering (nederst) svarende til ~20.000 m³/år for fremtidig Sydstrand.

	C1	C2	C3	C4	C5
Klassisk ligevægtsorientering (gr. N)	115	118	121	120	119
Systemisk ligevægtsorientering, 20.000 m ³ /år (gr. N)	132	135	137	136	135

En mulighed for potentielt at øge strandbredden nær havnen kan være at implementere en dykket struktur/et kunstigt rev ca. vinkelret på havnen, som angivet med den stiplede grønne linje i Figur 5.8.



Figur 5.8 Estimeret kystlinje svarende til en netto-transport på ca. 20.000 m³/år.

Den stiplede grønne linje angiver en mulig position for en dykket struktur/et kunstigt rev. Den prikkede gule pil antyder konceptuelt returstrømmen fra brydende bølger hen over strukturen/revet.

En dykket bølgebryder/et kunstigt rev har to primære hydrodynamiske effekter:

1. Mindskelse af bølgehøjden på bagsiden (relativ til de indkommende bølger) af konstruktionen.
2. Generering af returstrøm fra bølger, der bryder hen over strukturen.

Konsekvensen af den første effekt er, at den langsgående bølgedrevne strøm, der driver kysttransporten mod sydvest, mindskes i læzonen bag strukturen. Dette vil have en lokal stabiliserende effekt på sandfodringen tæt ved havnen.

Konsekvensen af den anden effekt (bølger der bryder hen over strukturen, hvilket vil sige relativt tidligere end i det omkringliggende område, som er dybere), er en returstrøm som antydnet i Figur 5.8. Det er vigtigt, at strukturen/revet udformes, så denne returstrøm ikke bliver til fare for svømmere, og så strukturen ikke vil forårsage øget akkumulering af tang på stranden. En designproces vil skulle forholde sig til placering samt udformning af strukturen/revet herunder længde og højde/dybde af strukturen/revet.

I Figur 5.9 vises en sammenligning mellem skitsen baseret på nærværende modelresultater (Figur 5.8) og en ny principskitse for Sydstranden fra H&K. Principskitserne fra H&K viser en større akkumulering nær havnen end vist i Figur 5.8. Størrelsen på denne akkumulering er dog ikke understøttet af den nærværende modellering. Det vil grundlæggende kræve inkludering af 2D-effekter i sandtransportmodelleringen via en dedikeret morfologisk kystlinjemodel for at kunne analysere strandstabiliteten, størrelsen på akkumulering af sand nær havnen, svømmesikkerheden og risiko for øget akkumulering af tang ved et layout med en dykket struktur/et rev. En sådan model vil også kunne bruges til at optimere selve strukturen/revet i forhold til placering, planform og optimal dybde hen over strukturen/revet.



Figur 5.9 Sammenligning af opdateret skitse fra H&K med Figur 5.8.

6 Evaluering af sedimenttransport omkring havnen

Transporten af sand forbi havnen er styret af påvirkningen fra bølger og bølgedrevne strømme. Den nærværende analyse af sandtransporten tager derfor udgangspunkt i bølgeforholdene omkring havnen og de deraf forårsagede strømforhold. Derefter ses på, hvordan kombinationen af bølger, strøm og lokale bundforhold forårsager transport forbi havnen.

6.1 Kvalitative observationer af bølge- og strømforhold samt sandtransport omkring havnen

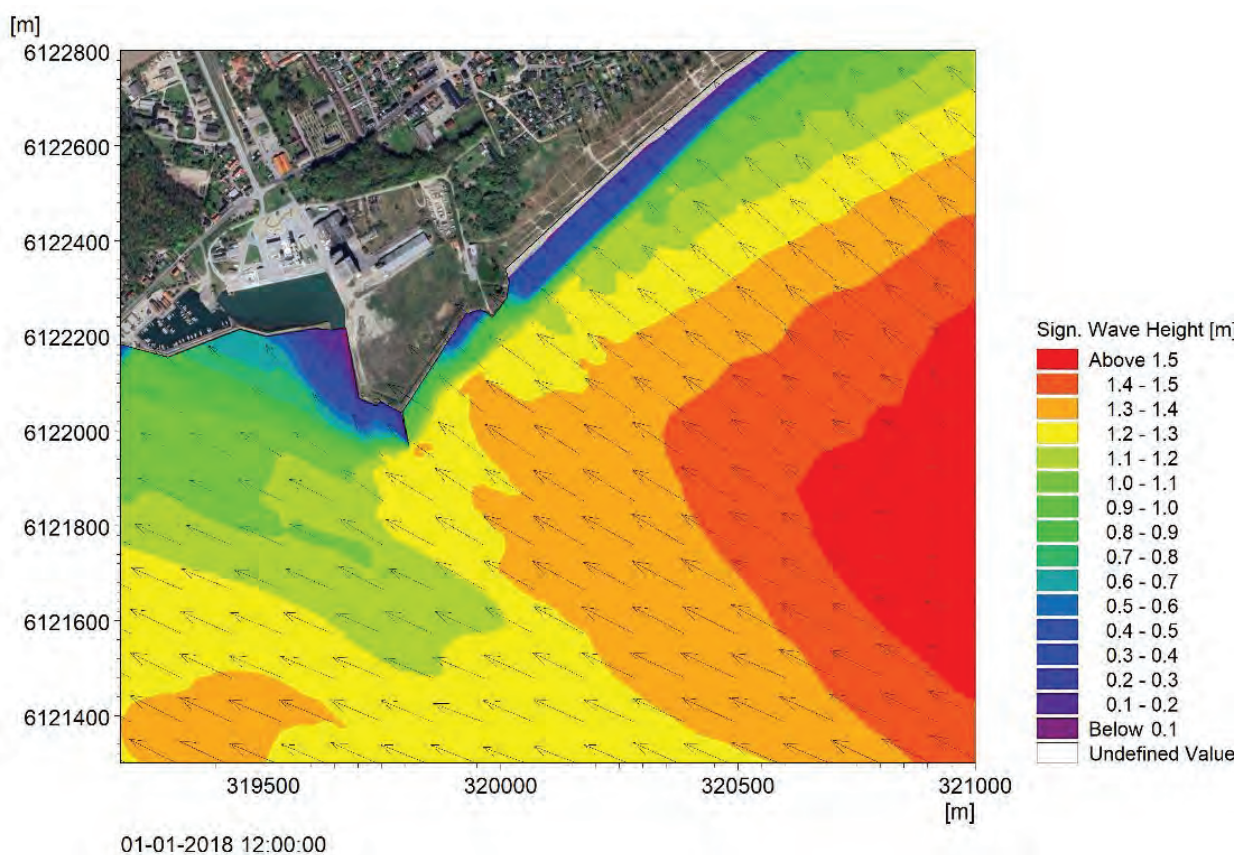
6.1.1 Eksisterende havn

Figur 6.1 viser et eksempel på typiske bølgeforhold omkring havnen under en kraftig storm.

Som bemærket i afsnit 5.1, så kommer bølgerne ved Faxe Ladeplads altid fra et snævert udsnit af retninger omkring sydøst. I alle situationer med væsentlig bølgeaktivitet omkring havnen vil bølgefeltet kvalitativt ligne det, der er vist i Figur 6.1. Bølgenes højde vil dog variere mellem hændelser.

Følgende observationer er gjort vedrørende bølgefeltet i Figur 6.1:

- Øst for havnen er bølgeretningen næsten vinkelret på kysten men med en lille vinkel.
- Dette giver anledning til bølgereaktionskraft rettet mod syd.
- Havnens østlige bølgebryder (prammene) giver betydeligt læ for bølgerne langs den inderste del af indsejlingen. Der er dog ingen synlig læ-effekt på stranden sydvest for havnen.

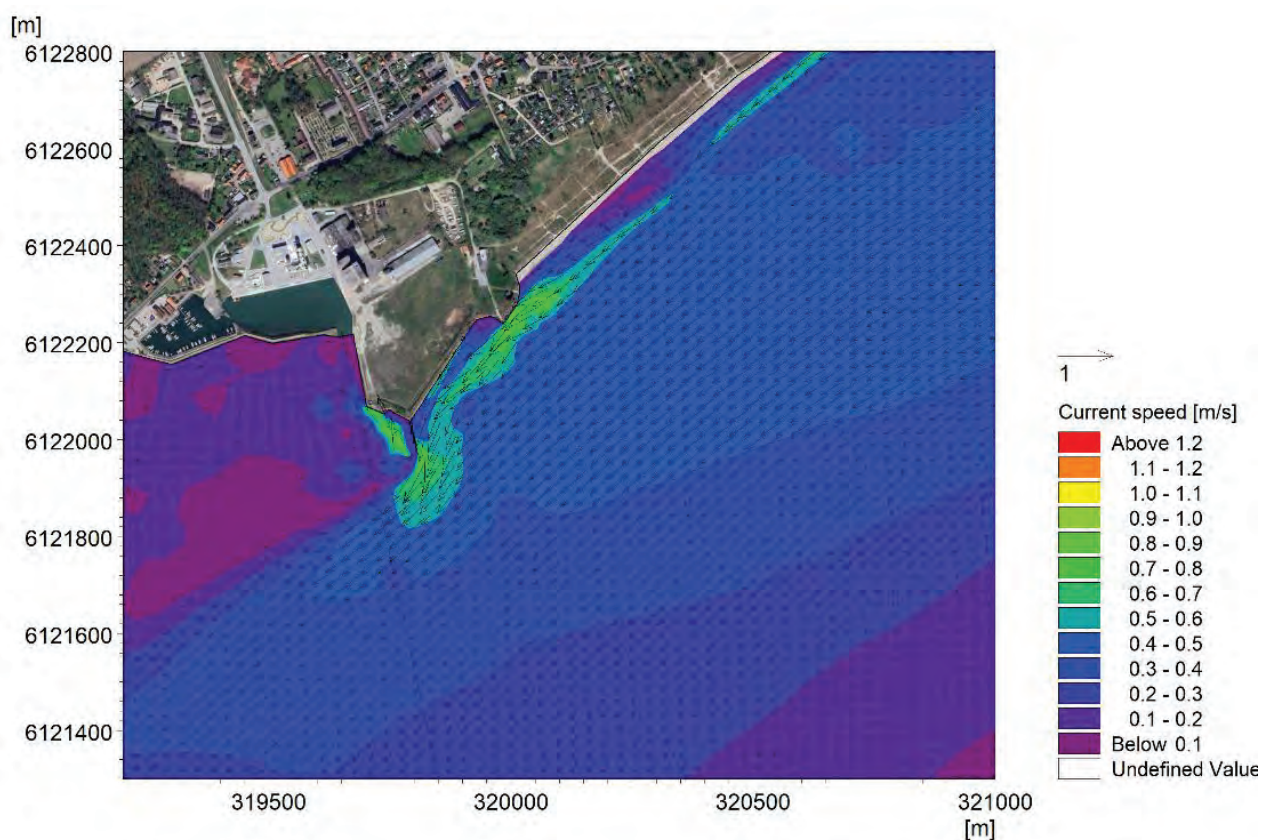


Figur 6.1 Kort, der viser bølgeforholdene omkring den eksisterende havn under en kraftig stormhændelse.

Bølgeforholdene på modellens rand er i dette scenarie $H_s = 2$ m, $T_p = 7$ s og $MWD = 90^\circ$.

Figur 6.2 viser det strømfelt, der forårsages af de bølgeforhold, der er vist Figur 6.1. Dette strømfelt giver anledning til følgende observationer:

- Den sydligt rettede bølgeraktionskraft giver anledning til en sydgående strøm langs kysten øst for havnen.
- Den kystparallelle strøm presses sammen og forstærkes ud for kystfremspringet ved rokklubben og ud for prammene.
- Området med forstærket strøm strækker sig ikke langt nok vestpå til at dække indsejlingen. Strømmen på tværs af indsejlingen er dermed svagere end på den åbne kyst øst for havnen.
- Prammenes blokering af strømmen danner et større læ-område vest for havnen, hvor strømforholdene er meget rolige.
- Lige vest for prammene er et område, hvor en kraftig strøm løber langs kysten ind mod havnen. Denne strøm skyldes de lave bundniveauer, der får bølgerne til at bryde pludseligt.

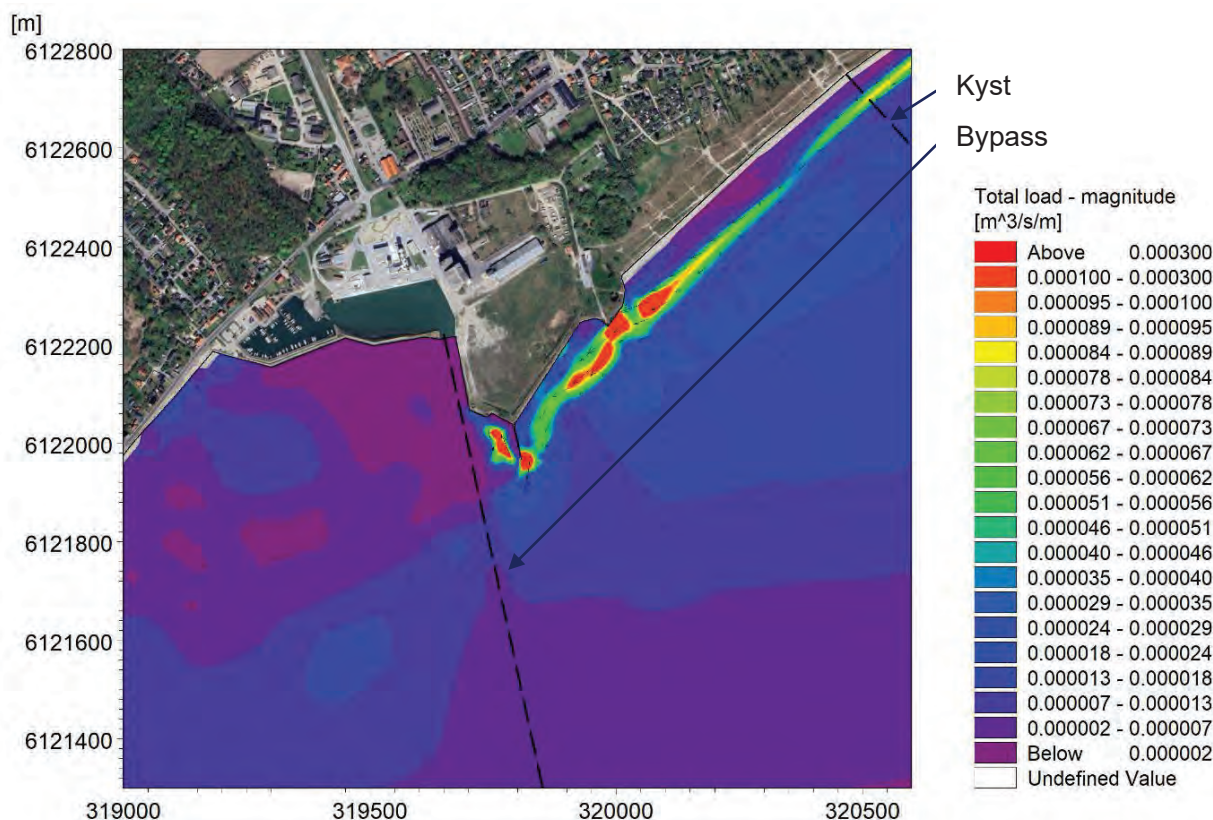


Figur 6.2 Kort, der viser strømforholdene omkring den eksisterende havn under en kraftig stormhændelse.

Bølgeforholdene på modellens rand er i dette scenarie $H_s = 2$ m, $T_p = 7$ s og $MWD = 90^\circ$.

Figur 6.3 viser den sandtransport, der forårsages af de bølge- og strømforhold, der blev vist i Figur 6.1 og Figur 6.2. Heraf ses at:

- Der er kraftig sydgående sandtransport langs kysten øst for havnen, som svarer til den langs-gående strøm vist i Figur 6.2.
- I forhold til den lige kyst er transportkapaciteten kraftigt forstærket omkring prammene, hvilket skyldes en kombination af stærk strøm og lav vanddybde.
- Transportkapaciteten i indsejlingen er lav, hvilket skyldes kombinationen af relativt lave strømhastigheder og store vanddybder.



Figur 6.3 Kort, der viser sandtransportrater omkring den eksisterende havn under en kraftig stormhændelse.

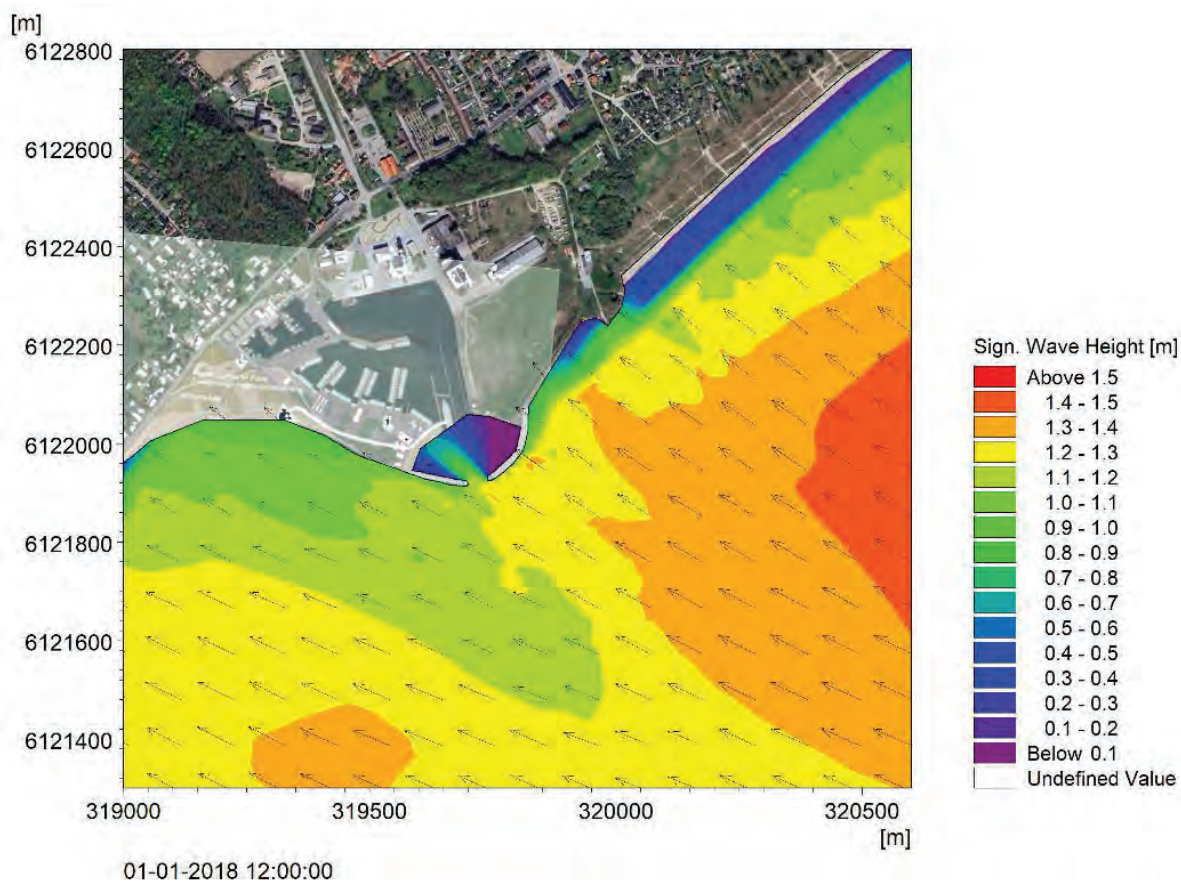
Bølgeforholdene på modellens rand er i dette scenarie $H_s = 2$ m, $T_p = 7$ s og $MWD = 90^\circ$. På figuren er vist de to profiler, hvorfra sandtransportrater er udtrukket.

Ovenstående gennemgang af bølge-, strøm- og sandtransportforhold omkring den nuværende havn viser, at havnens udformning ikke giver gode forhold for transport af sand foran havnen. Dette skyldes primært, at den østlige bølgebryder er udformet således, at den blokerer for strømmen i stedet for at accelerere den forbi indsejlingen.

6.1.2 Fremtidig havn

Figur 6.4 viser bølgefeltet omkring den fremtidige havn under de samme bølgeforhold, som blev betragtet for den eksisterende havn i det foregående afsnit. Bølgefeltet omkring den fremtidige havn giver anledning til følgende observationer:

- Ændringen i havnens udformning giver ikke anledning til ændringer i bølgefeltet syd og øst for havnen
- Fordi den fremtidige indsejling peger delvist ud mod bølgeretningen, ses en vis indtrængning af bølger i forhavnen.
- I området sydvest for havnen er bølgeretningen omtrent parallel med havnemolen, og der ses ingen nævneværdig skyggeeffekt fra havnen.

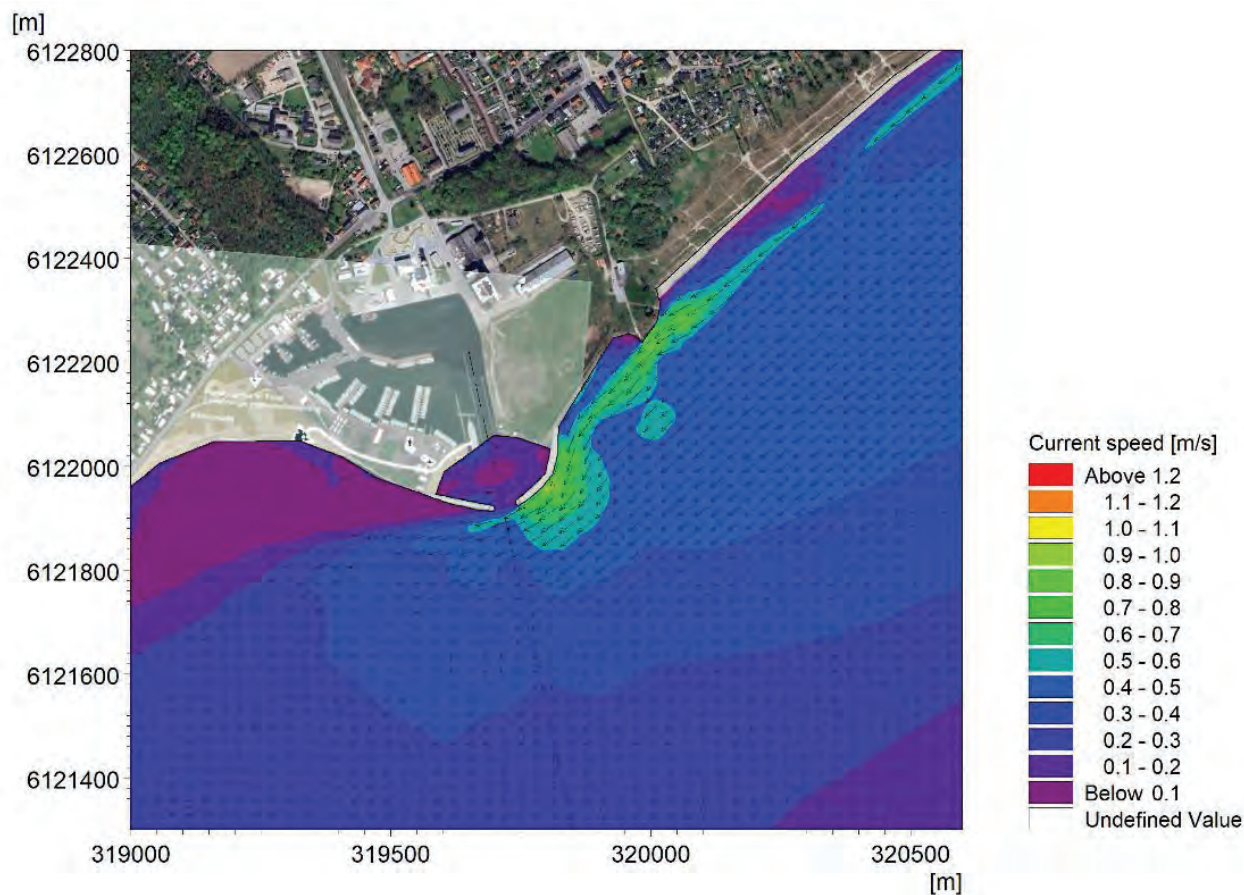


Figur 6.4 Kort, der viser bølgeforholdene omkring den fremtidige havn under en kraftig stormhændelse.

Bølgeforholdene på modellens rand er i dette scenarie $H_s = 2$ m, $T_p = 7$ s og $MWD = 90^\circ$.

Figur 6.5 viser strømfeltet omkring den fremtidige havn svarende til de bølgeforhold, der er vist i Figur 6.4. Dette strømfelt giver anledning til følgende observationer:

- Ændringen i havnens udformning giver ingen mærkbar ændring i strømforholdene øst for roklubben.
- Den fremtidige havn giver anledning til en sammentrækning og forstærkning af den kystparallelle strøm. Denne effekt er stærkere end for den eksisterende havn.
- De største strømhastigheder ses langs den fremtidige østmole.
- Indsejlingen vil også i den fremtidige udformning ligge vest (nedstrøms) af det område, hvor strømhastigheden er størst.

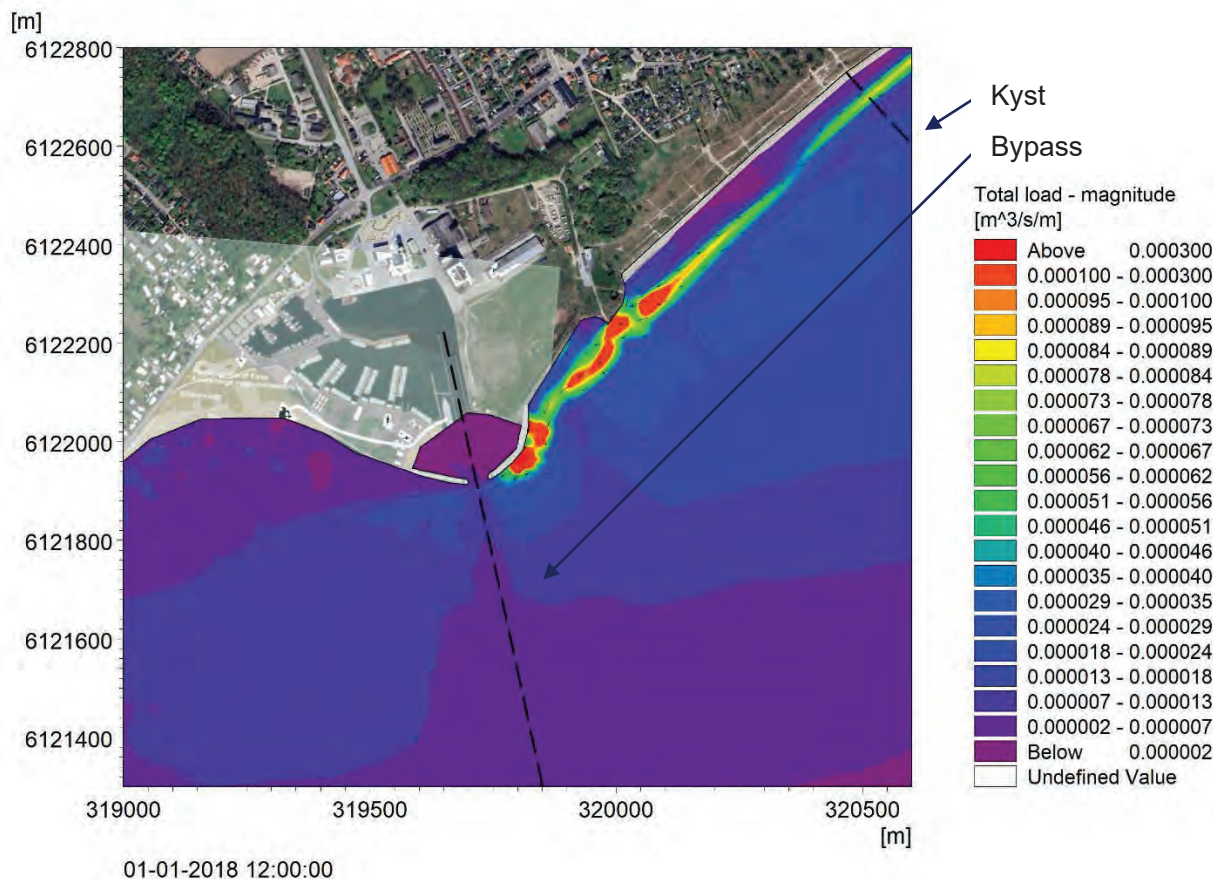


Figur 6.5 Kort, der viser strømforholdene omkring den fremtidige havn under en kraftig stormhændelse.

Bølgeforholdene på modellens rand er i dette scenarie $H_s = 2$ m, $T_p = 7$ s og $MWD = 90^\circ$.

Figur 6.6 viser den sandtransport, der resulterer af de bølge- og strømforhold, der er vist i henholdsvis Figur 6.4 og Figur 6.5. Heraf ses at:

- Sandtransportkapaciteten i indsejlingen er en smule højere for den fremtidige havneudformning end for den nuværende.
- Ligesom den nuværende havneudformning giver den nye udformning de største transportkapaciteter umiddelbart øst (opstrøms) for indsejlingen.



Figur 6.6 Kort, der viser sandtransportrater omkring den fremtidige havn under en kraftig stormhændelse.

Bølgeforholdene på modellens rand er i dette scenarie $H_s = 2$ m, $T_p = 7$ s og $MWD = 90^\circ$. På figuren er vist de to profiler, hvorfra sandtransportrater er udtrukket.

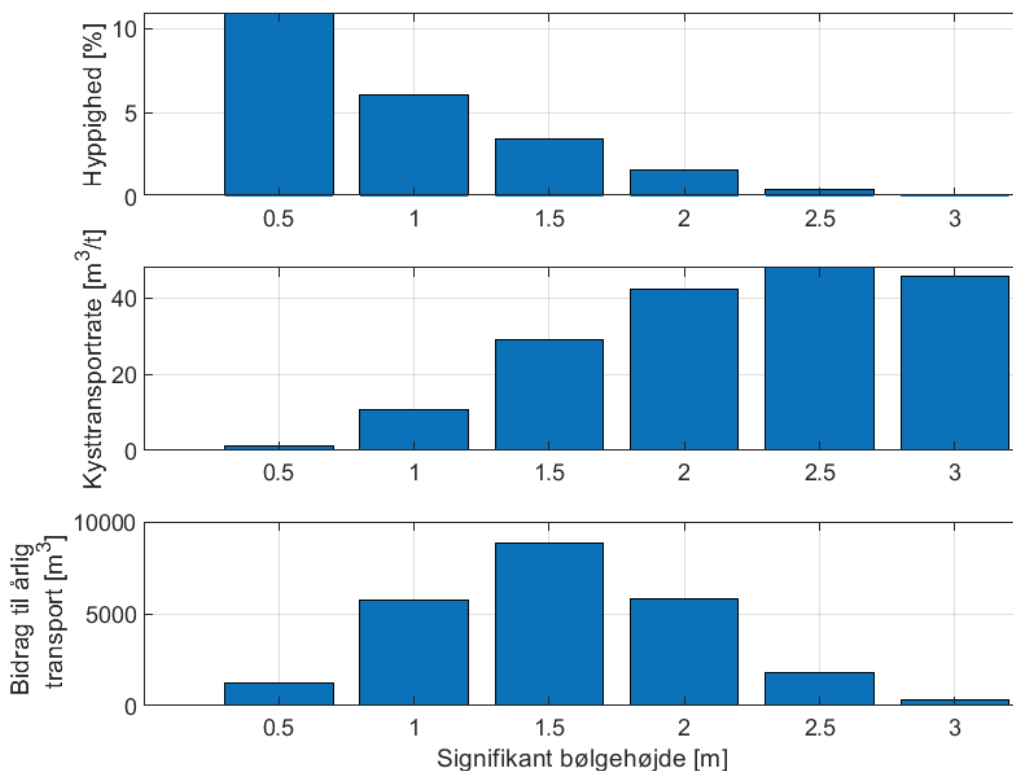
6.2 Kvantitativ beregning af sandtransport forbi havnen

På baggrund af de sandtransportkapaciteter, der er beregnet for de 6 betragtede bølgescenarier, er der lavet et estimat af den årlige transport af sand forbi både den nuværende og den fremtidige havn. Dette er gjort ved at udtrække transportkapaciteten langs to profiler orienteret vinkelret på kysten (se Figur 6.3). Transporten igennem profilet "kyst" skal beskrive transporten af sand langs kysten ned mod havnen. Transporten gennem profilet "bypass" beskriver transporten på tværs af indsejlingen. Forskellen mellem de to transportrater definerer oprensningsbehovet i indsejlingen.

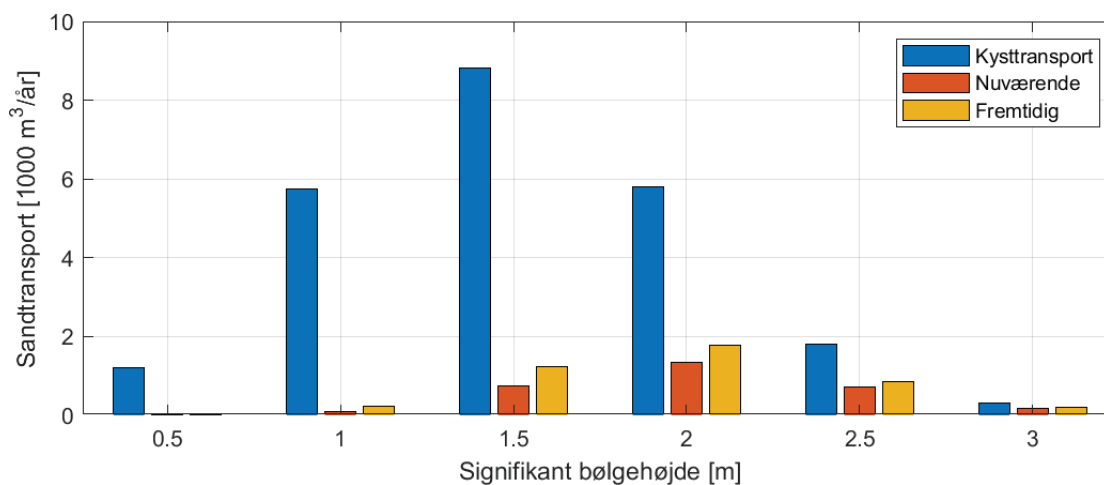
Figur 6.7 viser en illustration af, hvordan resultaterne fra de betragtede scenarier er omregnet til årlige transportrater for kysttransporten. Bølgeforholdene i hvert scenarie er tillagt en vis hyppighed, og det ses, at mindre bølger forekommer hyppigere end store bølger. Omvendt giver større bølger anledning til meget større øjeblikkelig sandtransport end mindre bølger. Kombineres den øjeblikkelige transportrate med scenariets hyppighed (nederste del af Figur 6.7), ses, at langt størstedelen af kysttransporten sker i de perioder, hvor bølgehøjden er mellem 1 og 2 m. Den samlede årlige kysttransport er ifølge denne beregning ca. 24.000 m³/år.

Figur 6.8 viser en sammenligning af kysttransporten med bypass transporten for begge udformninger af havnen. Heraf ses, at bypass transporten for begge udformninger er lille i forhold til kysttransporten. For den eksisterende havn giver denne beregning et samlet bypass på ca. 3.100 m³/år og dermed et estimeret oprensningsbehov på ca. 21.000 m³/år. Dette er i god overensstemmelse med de oprensningsmængder, der er rapporteret fra havnen (ca. 20.000 m³/år).

For alle bølgescenarier giver den foreslåede fremtidige udformning af havnen en forøgelse i bypass transporten i forhold til den nuværende havn. Som bemærket i afsnit 6.1.2, skyldes dette, at den foreslåede udformning giver kraftigere strømhastigheder på tværs af indsejlingen end den eksisterende havn. Den forventede årlige bypass transport for den fremtidige havn er således ca. 4.300 m³/år. Denne stigning i bypass transport vil dog kun have en meget begrænset effekt på oprensningsbehovet, som forventeligt vil reduceres fra ca. 21.000 m³/år til ca. 20.000 m³/år svarende til en reduktion på ca. 5 %.



Figur 6.7 Søjlediagrammer, der illustrerer hyppighed og transport for de betragtede bølgescenarier.



Figur 6.8 Bidrag til årlig sandtransport fra de betragtede bølgescenarier (karakteriseret ved bølgehøjde).

Tabel 6.1 Årlige transportrater beregnet ud fra den koblede 2D-model.

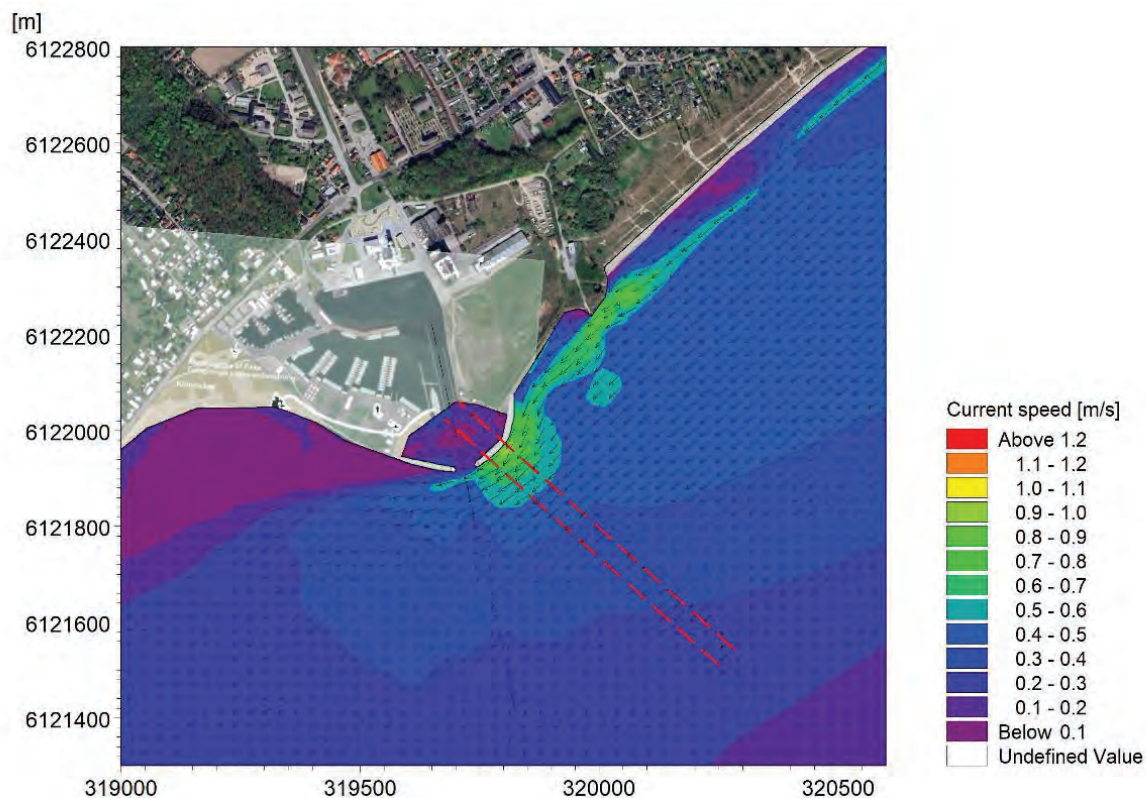
Kysttransport (m ³ /år)	Nuværende bypass (m ³ /år)	Fremtidig bypass (m ³ /år)
24.000	3.100	4.300

6.3 Mulighed for optimeret udformning af havn og indsejling

Selvom den her betragtede fremtidige udformning af havn og indsejling ikke giver en betydelig reduktion i oprensningsbehov, så viser de udførte beregninger, at der er god mulighed for at opnå en stor reduktion i oprensningsbehovet, hvis udformningen ændres.

Som vist i Figur 6.5, giver den foreslåede udformning af havnen anledning til relativt høje strømhastigheder langs den østlige mole. Dette skyldes, at molens krumme udformning presser strømmen sammen og accelererer den. Grunden til, at den foreslåede udformning ikke giver en væsentlig forbedring i bypass transporten er, at området med kraftig strøm ikke falder sammen med indsejlingen. For at opnå en bedre bypass transport vil det derfor være nødvendigt at ændre på havnens udformning, så der opnås en kraftig forstærkning af strømmen i området omkring indsejlingen. Dette kunne f.eks. opnås ved at flytte indsejlingen længere østpå, så den skærer igennem det område, hvor strømmen i den foreslåede udformning er stærkest. I Figur 6.9 er der vist en skitse af, hvordan navigationskanalen kunne placeres for at reducere oprensningsbehovet yderligere.

Alternativt kan det være en mulighed at ændre på ydermolernes forløb, således at strømkontraktionen flyttes hen mod den nuværende navigationskanal. Sådanne optimeringer bør baseres på simuleringer som dem, der er udført i dette studie.



Figur 6.9 Kort, der viser en mulig fremtidig placering af navigationskanalen, der forventes at give forbedret transport af sand forbi havnen.

7 Evaluering af transportforholdene for tang omkring havnen

7.1 Transport og aflejring af tang

Tang eller ålegræs, der rives løs fra sin forankring, vil drive frit i vandet, indtil det for eksempel skylles op og aflejres på kysten. Da løsrevet tang og ålegræs typisk har en massefylde, der svarer nogenlunde til vands massefylde, kan det drive både langs bunden, i vandsøjlen og ved overfladen. Hvor i vandsøjlen tangen befinder sig, har stor indflydelse på, hvor hurtigt og i hvilken retning den transporteres.

Transporten af tang styres primært af strømmen. For tang, der flyder i overfladen, kan transporten også påvirkes af vinden. Bølgebevægelser kan også skubbe tang i samme retning, som bølgerne bevæger sig, men den største effekt fra bølger vil oftest være igennem bølgedrevne strømme.

7.2 Transport og aflejring af tang omkring den eksisterende havn

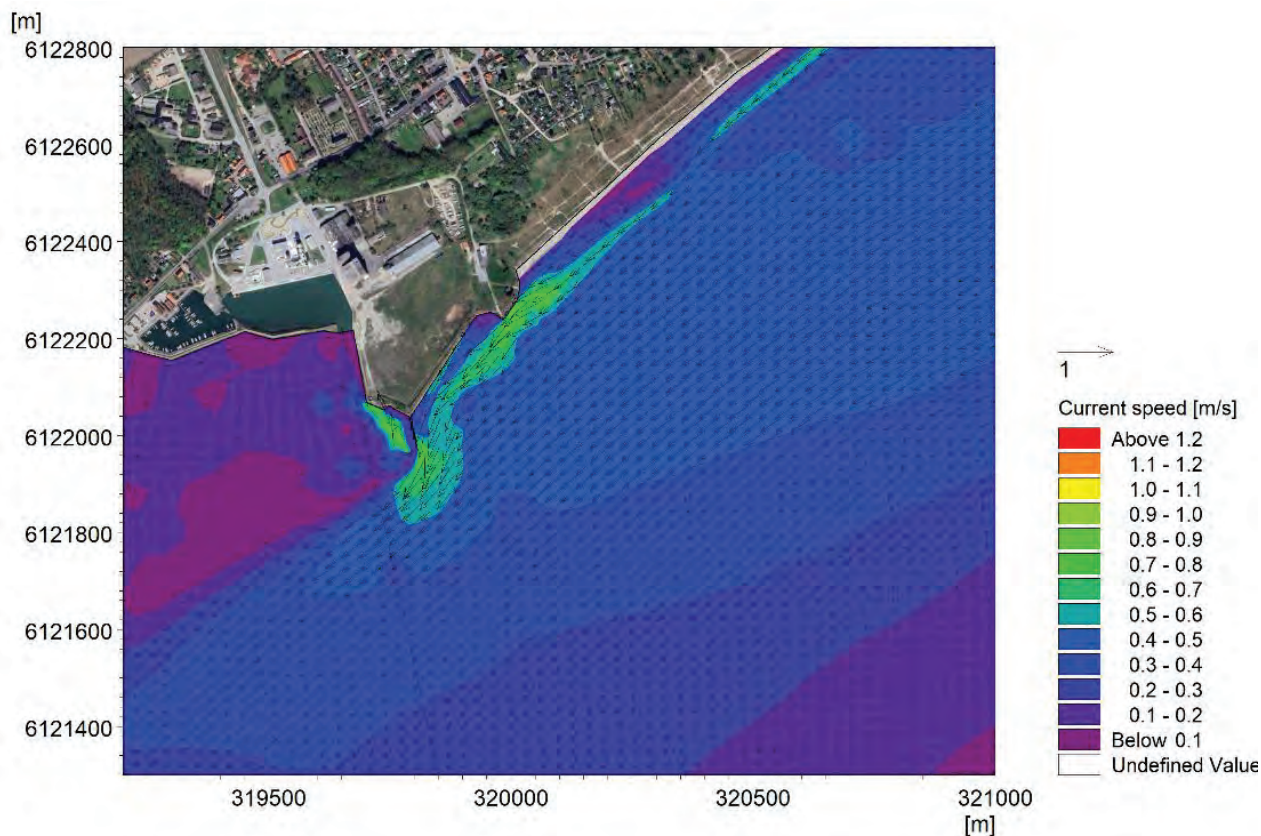
I Faxe Bugt findes der store lavvandede områder, som muligvis er dækket af ålegræsbede. Ligeledes findes givetvis områder med hårde bundsubstrater, der kan udgøre habitater for forskellige slags tang. Det forventes derfor, at drivende tang og ålegræs er til stede i hele Faxe Bugt.

I denne analyse af transport og aflejring af tang betragtes to forskellige mekanismer for transport af tang, nemlig transport forårsaget af bølger og bølgedrevne strømme og transport forårsaget af vind og vinddrevne strømme. Disse to mekanismer betragtes separat, og for hver mekanisme vurderes, hvor tang ansamles.

Bølgedreven transport af tang

Bølgedrevne strømme omkring Faxe Ladeplads Havn er grundigt beskrevet i afsnit 6.1.1, hvori det blev konkluderet, at det strømfelt, der er vist i Figur 7.1, er repræsentativt for de typiske bølgedrevne strømme i området.

I situationer med væsentlig bølgeaktivitet vil der oftest også være en kraftig østenvind. Tang, der driver rundt i Faxe Bugt, vil derfor blive skubbet østpå ind mod kysten. Her vil de bølgedrevne strømme have tendens til at skubbe tangen sydpå langs med kysten. Strømfeltet i Figur 7.1 antyder dog, at strømmene nærmere vil transportere tangen forbi havnen end ind i havnen. Der vil givetvis være noget tang, der skylles op på strandene og fanges i krogene øst for roklubben og øst for prammene, men det forventes ikke, at disse situationer giver anledning til større ophobninger af tang inde i havnen.



Figur 7.1 Kort, der viser strømforholdene omkring den eksisterende havn under en kraftig stormhændelse.

Bølgeforholdene på modellens rand er i dette scenarie $H_s = 2$ m, $T_p = 7$ s og $MWD = 90^\circ$.

Vinddrevne transport af tang

Vind kan give en transport af tang i samme retning som vinden. Dette kan ske som resultat af vind-drevne strømme, men vinden kan også flytte tang, uden at der genereres væsentlige vinddrevne strømme.

Fralandsvind giver ikke anledning til ansamlinger af tang i havnen, og som diskuteret ovenfor forventes østlige vinde heller ikke at gøre det. Sydlige vindretninger mellem sydvest (ca. 225 grader nord) og sydøst (ca. 135 grader nord) vil give en nordgående transport af tang, som vil blive skyllet op mod havnemolerne og kysten på den vestlige side af prammene (ind mod indsejlingen). Molerne og kysten former en tragt, som vil have tendens til at fange den tang, der bliver blæst ind fra syd. Det er således forventeligt, at den nuværende havn oplever store ansamlinger af tang i perioder med sydlige vinde.

Det skal yderligere bemærkes, at strømfeltet i Figur 7.1 antyder, at tang, der er ophobet i læområdet vest for prammene, ikke vil blive skyllet væk.

7.3 Transport og aflejring af tang omkring den fremtidige havn

Ligesom den eksisterende havn forventes den fremtidige havn ikke at være udsat for større tangansamlinger i perioder med østlige vinde og væsentlig bølgeaktivitet. De bølgedrevne strømme vil også for den fremtidige havn have tendens til at transportere tang forbi havnen rettere end ind i havnen.

Under perioder med sydlige vinde vil tang blive skubbet ind mod den sydvestlige mole. Eftersom indsejlingen i den fremtidige udformning er relativt smal, og de omkringliggende moler har et afrundet forløb, forventes det, at kun begrænsede mængder tang vil finde vej ind i havnen.

Størstedelen af den tang, der transporteres mod den sydvestlige mole af sydlige vinde, må dog forventes at samle sig i hjørnet mellem molen og den sydlige strand. I denne sammenhæng skal det bemærkes, at den oprindeligt foreslåede udformning (Figur 2.1) forventes at have store variationer i position af Sydstranden (se afsnit 5.3). Dette hjørne vil derfor sandsynligvis opleve samme rolige strømforhold som hjørnet ved den eksisterende havn og forventes derfor at opleve en lignende grad af tangansamlinger.

8 Sammenfattende resumé

I denne sektion præsenteres hovedkonklusionerne fra studiet af effekterne fra en mulig udvidelse af Faxe Ladeplads Havn i et kort resumé.

I nærværende studie har DHI undersøgt nedenstående effekter af layoutet i Figur 8.1 designet af H&K:

- Indflydelse på kysttransport samt stabilitet af Sydstrandens planform.
- Indflydelse på strøm- og bølgeforhold.
- Indflydelse på sandtransport omkring havnen.
- Indflydelse på transportforholdene for tang.

Hovedkonklusionerne fra disse undersøgelser sammenfattes kort i de nedenstående afsnit.



Figur 8.1 Forslag til havneudvidelse ved Faxe Ladeplads fra H&K.

8.1 Indflydelse på kysttransport samt stabilitet af Sydstrandens planform

Modelberegninger viser, at den naturlige kysttransport i området er omkring 20.000 – 25.000 m³/år i gennemsnit. Heraf finder ca. 80 % af transporten sted i perioden fra oktober til marts.

Bølgeforholdene nord og syd for havnen er stort set upåvirkede af det nye havnelayout. Dette har den betydning, at den planlagte udformning for Sydstranden ikke vil være stabil. Med den foreslåede udformning vokser den gennemsnitlige årlige kysttransportrate fra omkring 200 m³/år tæt ved havnen til omkring 40.000 – 50.000 m³/år hen mod midten af stranden. Den stigende transport giver anledning til erosion, og i løbet af en periode på omkring 3 år vil stranden søge tilbage mod en orientering mere lig de eksisterende forhold.

Baseret på modelleret sandtransport er der udarbejdet en alternativ udformning af stranden (Figur 8.2), der modsvarer en gennemsnitlig årlig kysttransportrate på 20.000 m³/år (svarende til det hidtidige årlige

sandfodringsvolumen, som antages at fortsætte uforandret i fremtiden). En mulighed for potentielt at øge strandbredden nær havnen kan være at implementere en dykket struktur/et kunstigt rev ca. vinkelret på havnen som antyd det med den stiplede grønne linje i figuren.

Effekten af et sådant layout har ikke været en del af nærværende studie. Optimering af et layout med et neddykket rev med henblik på at fastholde mere sand langs med Sydstranden bør gennemføres med en mere detaljeret tilgang, fx med en morfologisk kystlinjemodel. Desuden bør badesikkerhed vurderes pga. de stærke strømme, som kan opstå nær et rev med brydende bølger.



Figur 8.2 Estimeret kystlinje svarende til en netto-transport på ca. 20.000 m³/år. Den stiplede grønne linje angiver en mulig position for en dykket struktur/et kunstigt rev. Den prikkede gule pil antyder konceptuelt returstrømmen fra brydende bølger hen over strukturen/revet.

8.2 Indflydelse på strøm- og bølgeforhold

I det foreslåede layout former ydermolerne en strømlinjet bue. Denne udformning er valgt for at give en jævn kontraktion og forøgelse af den kystparallelle bølgedrevne strøm og derved øge den naturlige transport af sand forbi havnen. Dette ville i så fald reducere behovet for oprensning i indsejlingen.

Der er udført beregninger af bølger og deraf forårsagede strømforhold under et antal typiske bølgeforhold. Disse beregninger viser, at den ændrede havneudformning ikke vil have nogen nævneværdig effekt på bølgeforholdene udenfor havnen, fordi bølgerne ankommer næsten vinkelret på kysten.

Den foreslåede havneudvidelse vil have en lokal effekt på strømforholdene omkring havnens indsejling. Specielt østmolens krumme forløb vil give anledning til en kraftigere og mere udbredt forstærkning af den kystparallelle strøm. Denne forøgelse vil dog stadig være begrænset til et område, der ligger øst (opstrøms) for indsejlingen, og i selve indsejlingen vil der kun ske en lille stigning i strømhastighederne i forhold til den nuværende havn.

8.3 Indflydelse på sandtransport omkring havnen

Baseret på de beregnede bølge- og strømforhold omkring havnen er der lavet beregninger af sandtransport forbi havnen. Beregningerne viser, at der for den eksisterende havn kun transporteres ca. 3.000 m³ sand forbi havnen om året. Kombineret med estimatet af, hvor meget sand der transporteres til havnen østfra (20.000-25.000 m³/år), stemmer det godt overens med, at havnen rapporterer, at der oprenses ca. 20.000 m³/år fra indsejlingen.

Tilsvarende beregninger for den foreslåede havneudformning viser en årlig transport af sand forbi havnen på ca. 4.000 m³. Denne forøgelse svarer dog kun til en reduktion i oprensingsbehovet på ca. 1.000 m³ (5 %).

Selvom den nye udformning kun giver en begrænset reduktion i oprensingsbehovet, kan der være en gavnlig effekt ved, at sandaflejring sker i et lille veldefineret område. Med havnens nuværende udformning sker aflejringerne langs store dele af indsejlingen. Med den foreslåede udformning forventes aflejringerne at begrænse sig til området mellem og umiddelbart søværts for ydermolerne.

De udførte beregninger indikerer dog, at der kan opnås en yderligere reduktion i oprensingsbehovet ved at optimere udformningen af havnen. Én mulighed kunne således være at flytte indsejlingen længere mod øst, så denne er placeret i det område, hvor strømmen er stærkest med de foreslåede moleforløb. Alternativt kan det være en mulighed at ændre på ydermolernes forløb, så strømkontraktionen flyttes hen mod den nuværende indsejling. Sådanne optimeringer bør baseres på simuleringer som dem, der er udført i dette studie.

8.4 Indflydelse på transportforholdene for tang

Der er lavet en vurdering af ansamlinger af tang omkring den nuværende og den foreslåede havneudformning. Der er taget højde for, hvordan tang aflejres forskelligt under forskellige vind- og bølgeforhold.

Det vurderes, at den nuværende havn er tilbøjelig til at indfange tang i situationer med sydlige vinde. I disse situationer vil tang, der rammer kysten langs strækningen fra prammene til et stykke syd for havnen, have tendens til at aflejres enten i indsejlingen eller i hjørnet mellem strand og havnens vestmole.

Perioder med østlige vinde forventes at forårsage ansamlinger af tang øst for roklubben og for prammene men ikke i væsentlig grad inde i havnen.

Den foreslåede fremtidige havneudformning indebærer en relativt smal åbning ind til havnen, som er placeret på et strømlinjet moleforløb. Denne udformning forventes at minimere ansamlinger af tang inde i havnen.

Som beskrevet ovenfor forventes stranden syd for havnen at danne et markant hjørne med den fremtidige vestmole. Dette område vil ikke blive udsat for kraftige strømme, der kan skylle tangen væk, og det vil derfor være udsat for tangansamlinger af et omfang, der svarer til den nuværende situation.

9 Referencer

- /1/ https://www.metocean-on-demand.com/metadata/waterdata-dataset-DKWaters_SW
- /2/ https://www2.meteo.uni-bonn.de/staff/CSchoelzel/sources/Ohlwein_2015_AGU_HErZ_poster.pdf
- /3/ <https://gst.dk/ansvarsomraader/soekort-og-marine-data/soeopmaaling-og-dybdedata/danmarks-dybdemodel-ddm-50-m-oploesning>
- /4/ MIKE by DHI A/S. (2024a). MIKE 21 Flow Model FM - Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation. Copenhagen: DHI A/S.
- /5/ MIKE by DHI A/S. (2024b). MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation.
- /6/ MIKE by DHI A/S. (2024c). MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM: Sand Transport Scientific Documentation. Hørsholm: DHI A/S.
- /7/ MIKE by DHI A/S. (2024d). Littoral Processes FM - All Modules Scientific Documentation.
- /8/ Hasløv & Kjærsgaard I/S (2022): Faxe Ladeplads – Havnen for alle. Helhedsplanens grænseflader.