DR. TECHN.
OLAV OLSEN

RAPPORT

INNSEILING GRENLAND
NUMERISKE BEREGNINGER

© Copyright Dr.techn.Olav Olsen AS

RAPPORT

Prosjektnavn:

INNSEILING GRENLAND

Dokumentnavn:

NUMERISKE BEREGNINGER

Prosjektnr.:	12352-63
Dokumentnr.:	12382-63-OO-R-001
Dato:	28.10.2019
Revisjon:	A
Antall sider:	25
Utarbeidet av:	Gonzalo Palomares
Kontrollert av:	Knut-Ola Lunde
Godkjent av:	Knut-Ola Lunde

Rettigheter til prosjektmaterialet
Oppdragsgiver har rett til å bruke materialet utarbeidet av prosjekterende Dr.techn.Olav Olsen AS til gjennomføring av prosjektet, senere drift, vedlikehold, ombygging og påbygging. Hvis ikke annet er avtalt, har Dr.techn.Olav Olsen AS alle øvrige rettigheter til sine ideer og det utarbeidete materialet. Dr.techn.Olav Olsen AS kan likevel ikke bruke dette på en måte som er urimelig i forhold til oppdragsgiver. Oppdragsgiver kan ikke overdra materialet til en tredjepart uten samtykke fra Dr.techn.Olav Olsen AS.

Revisjon	Dato	Grunn for utsendelse	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. av
A	28.10.2019	For kundens kommentarer	GDP	KOL	KOL

INNHOLD

1 OPPSUMMERING OG KONKLUSJON 4

2 OPPDRAGSBESKRIVELSE 5

2.1 Innledning 5

3 BEREGNINGSFORUTSETINGER 8

3.1 Batymetri og kystlinje 8

3.2 Bølgekilde utaskjærs 10

3.3 Bølgeforhold 12

3.4 Vindforhold 15

3.5 Programvare 15

3.6 Konfigurering av bølgemodeller 15

4 RESULTATER 17

4.1 Resultater ved Langøya 17

4.2 Resultater fra lokalmodell i SWAN 19

5 KONKLUSJON 25

6 REFERANSER 26

1 OPPSUMMERING OG KONKLUSJON

Kystverket vurderer å utdype farleden langs innseilingen til Grenland. Tiltaket inkluderer sprenging av flere grunner til kote -16.4 LAT og bygging et deponi opp til kote -22 LAT med massene fra utdypingen.

Dr.techn.Olav Olsen AS ble bedt om å utarbeide numeriske beregninger for å undersøke konsekvensen av utdypingen og deponiet på bølgeforholdene langs innseilingskanalen.

Bølgedata som danner grunnlaget for analysen ble hentet fra NORA10 *hindcast*-databasen til Meteorologisk Institutt. Databasen har data med 3-timers intervall fra 1957 og frem til i juli 2019. Dette gir tilstrekkelig data for bølgeforholdene som opptrer på sjøen ca. 30 km S utaskjærs for Langesund.

Fra analysen av det gjennomsnittlige bølgeklimaet som treffer Langesundet fremkommer det at tungsjø er hovedårsaken til urolighetene. Verdien på maksimal signifikant bølgehøyde som opptrer i Langesundet og overskrides en gang per år er ca. H_s=1.7 m. Resultatet stammer fra bølger som kommer fra S, SV og SØ (180N, 225N og 135N). Bølger fra SV er de mest energirike utaskjærs Grenland, mens bølger fra SØ virker å være mer kritisk for bølgeuro i leden.

Vindsjø ble ikke inkludert i analysen da den er mindre energetisk og blir ikke i samme grad påvirket av endringer i batymetrien.

Den oppsatte modellen simulerer bølgeforholdene inn i Langesundet langs innseilingskanalen gjennom tiltaksområdet.

Dagens signifikante bølgehøyde (H_s) som overskrides en gang årlig ble brukt som parameter for å vurdere endringer i bølgeuro. Denne verdien beskriver de verste forholdene et skip kan treffe årlig langs innseilinga.

Resultatene viser at bølgeforholdene langs innseilingen kan oppnå 1.7 m årlig ved Langøya og at de vil ikke endres signifikant på grunn av utdypningstiltaket. Bølgehøyden H_s endres veldig lite (1-3 cm), litt avhengig av perioder og retninger. Disse endringene skjer nedstrøms tiltaket.

Det finnes ikke et generisk krav eller veiledende verdi for H_s i innseilingskanaler, men en maksimal årlig verdi på 1.7 m for H_s ansees som normale forhold.

Konklusjonen er at det ikke blir noen signifikante endringer i bølgeforholdene langs innseilinga på grunn av tiltaket. Utdypingen kan til og med forbedre lokale bølgeforhold i utdypingsområder på grunn av:

- **Effekten av «shoaling» (oppbygging av bølger på grunn av redusert vanndyp) reduseres som fører til at bølgehøyden lokalt kan bli mindre.**
- **Sannsynligheten for brytende bølger reduseres.**
- **Bølgerefleksjoner tilbake til kanalen kan bli mindre.**

2 OPPDRAGSBESKRIVELSE

2.1 Innledning

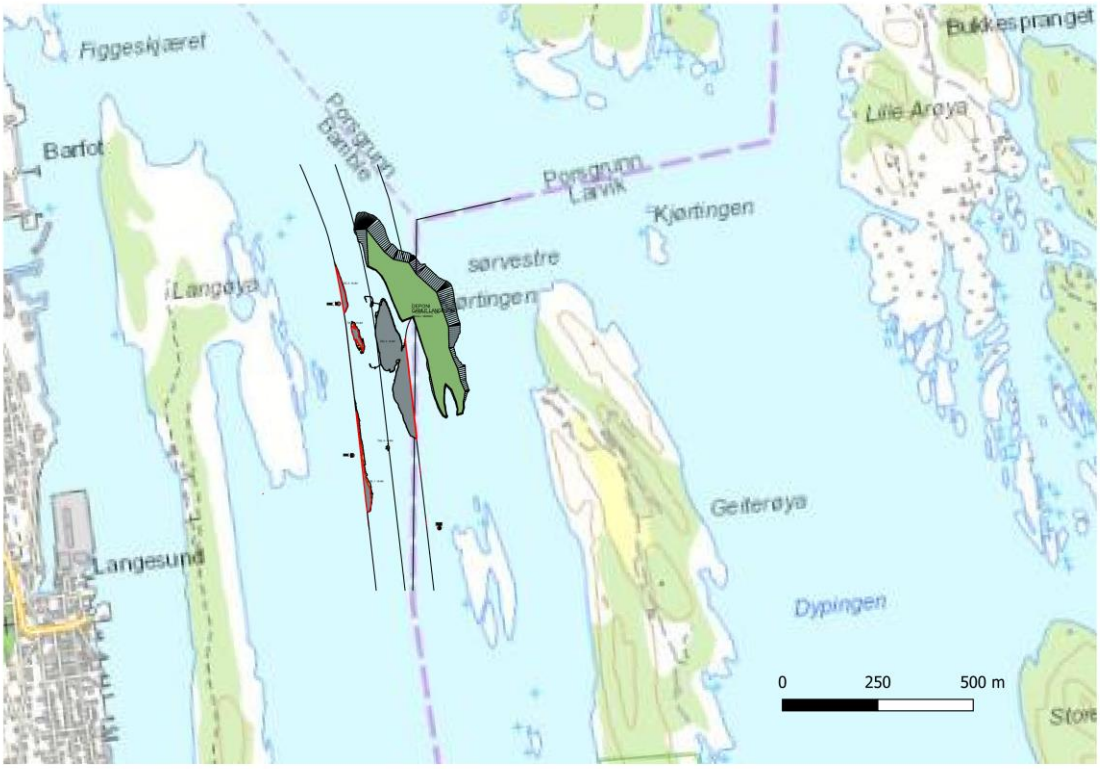
Kystverket vurderer å utdype farvannskanalen langs innseilingen til Grenland. Tiltaket inkluderer mudring av flere grunnarealer, til kote -16.4 LAT, og etablering av et deponi opptil kote -22 LAT.

Dr.techn.Olav Olsen AS ble bedt om å utarbeide numeriske beregninger for å undersøke konsekvensen av utdypingen og deponiet på bølgeforholdene langs innseilingskanalen.

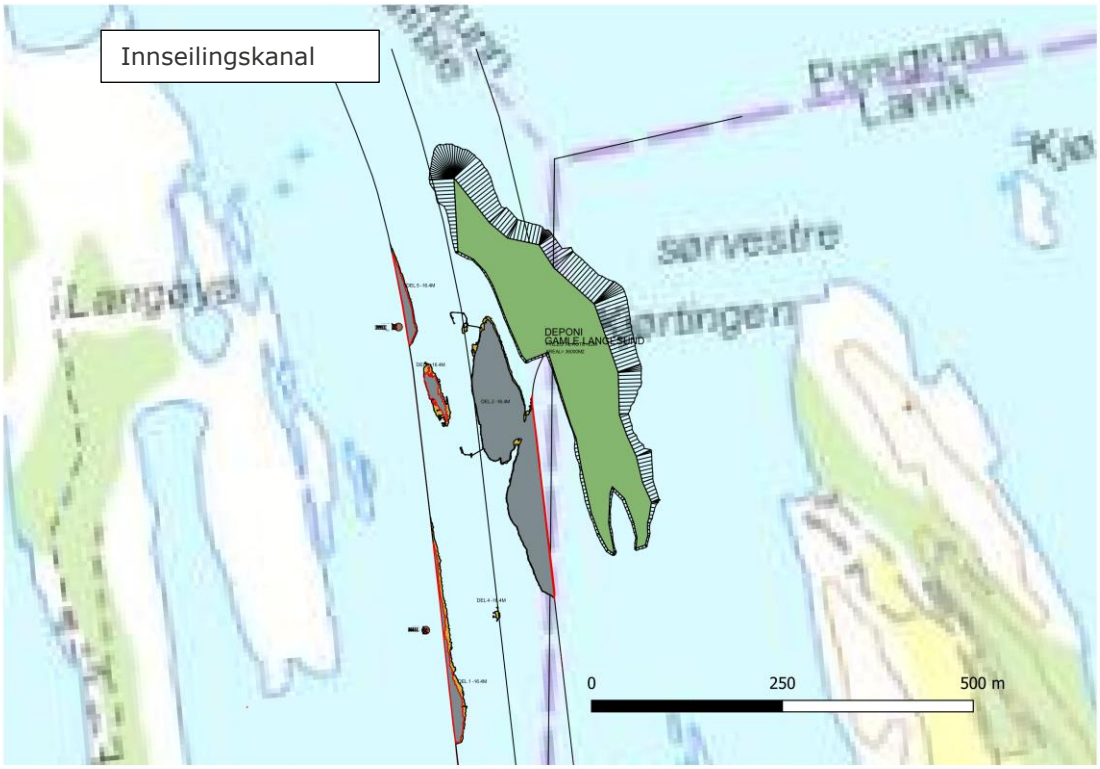
Prosjektet ligger ved Skagerrak og er mest utsatt for havbølger fra sektøren SØ-SV.

> *Figur 1 Plassering av Langesund*

Utdypingen vil skje på flere arealer langs kanalen som vil gjøre kanalen dypere. Det skal bygges et deponi med sprengingsmasser fra utdypingen opptil kote -22 LAT. Arealer som definerer utdyping og deponiet er vist i Figur 2.



> *Figur 2 Beliggenhet av tiltaket*



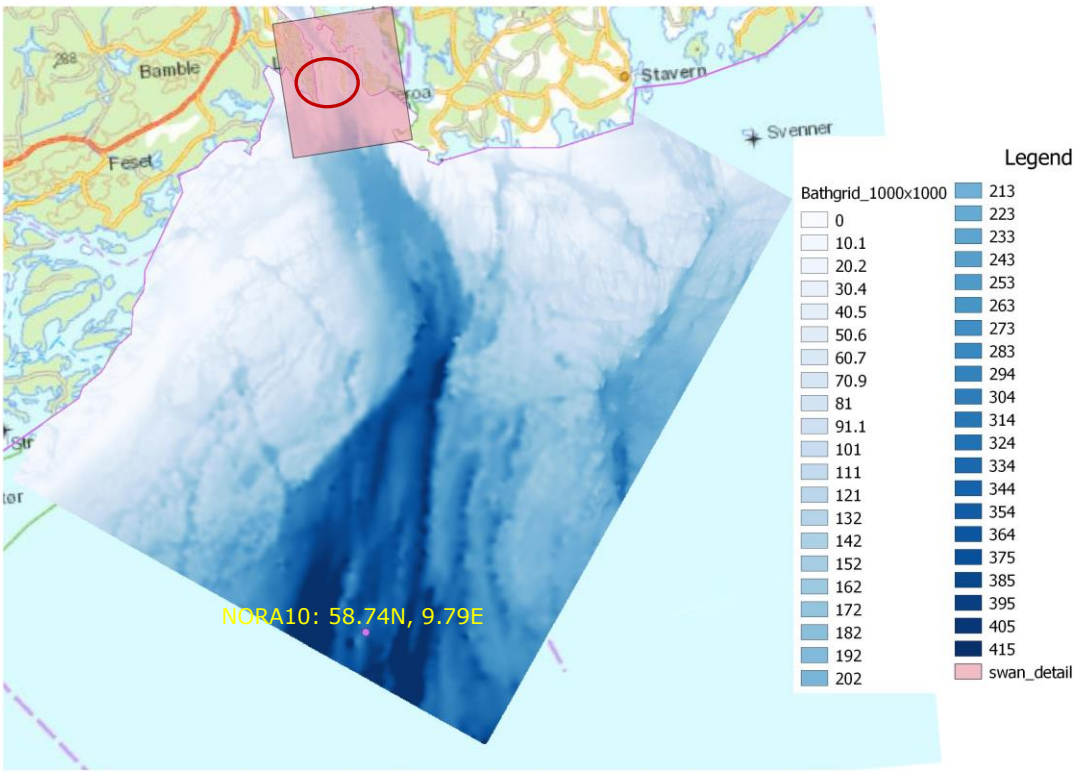
> *Figur 3 Utforming til utdyping og traseen til innseilingskanalen hentet fra Kystverket. Toppen av deponi i grønnfarge i koten -22 LAT. Mudringsarealer til koten -16.4 LAT i gråfarge.*

I prinsippet, om kanalen blir bredere, kan det føre til at mer energi fra bølger går inn i fjorden. Men utdypingsarealene er begrensede og kanalen er dyp, noe som kan redusere denne effekten. I tillegg er det andre parametre som kan påvirke inngangen av bølgeenergi gjennom kanalen, som refraksjon langs sidene av kanalen eller bølgebrytning.

3 BEREGNINGSFORUTSETINGER

3.1 Batymetri og kystlinje

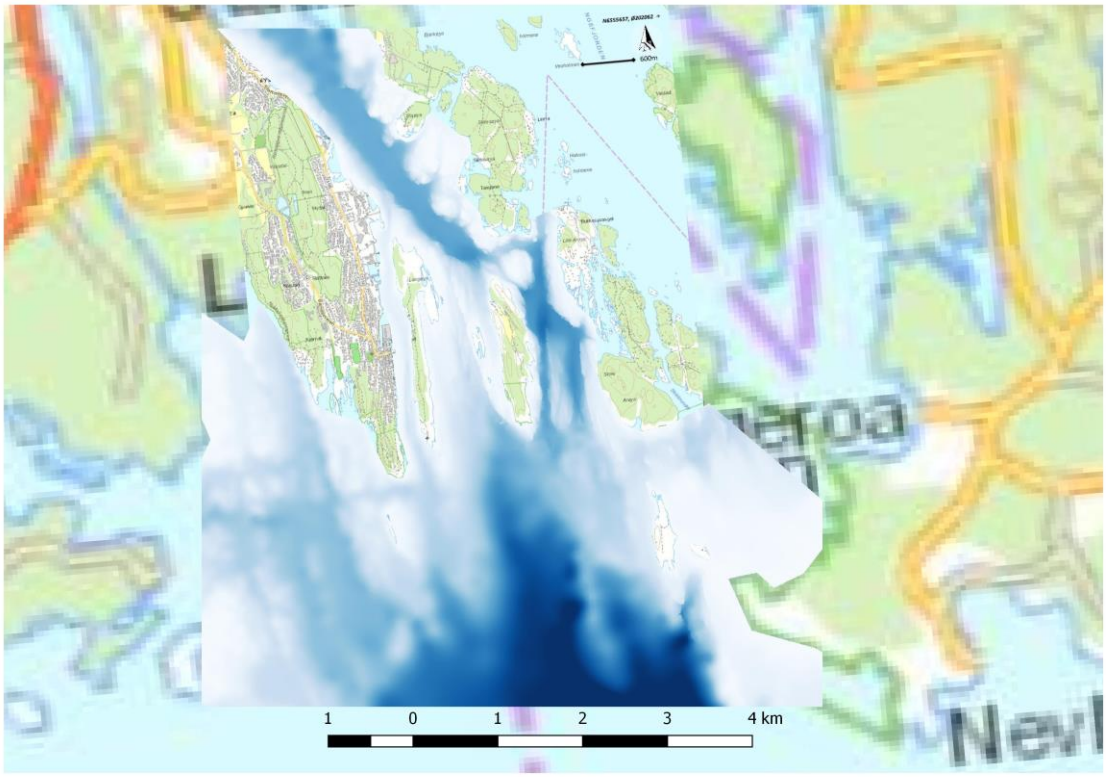
Generell batymetri for kyst- og havområder ble hentet fra Kartverket (Geonorge), dette har en oppløsning på 50x50 m.



> *Figur 4 Generell modell for batymetrien utaskjærs Langesundet, fra Geonorge. Kildepunktet for bølgedata er også indikert (rosa)*

Detaljert batymetri ble hentet fra Kystverket. Batymetrien dekker en god del av Langesund og har en oppløsning på 1 m. Den er tilstrekkelig for å dekke hovedtrekkene i den eksisterende sjøbunnen i tillegg til mudringsområder og deponiet.

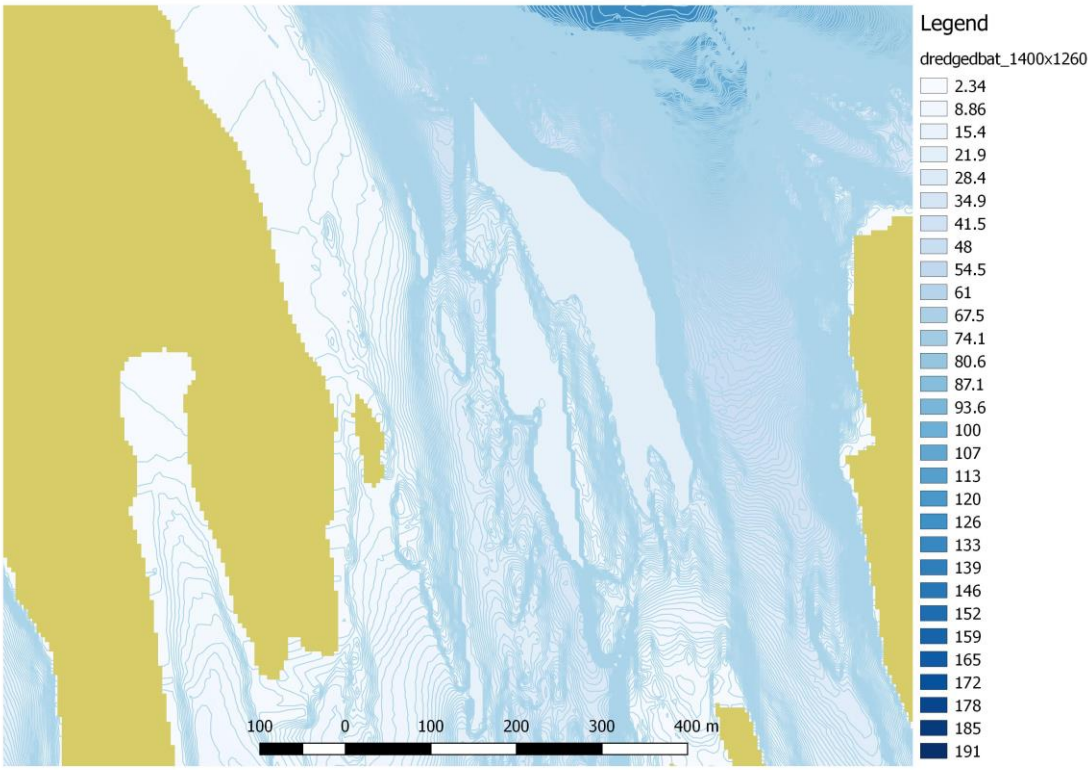
Detaljbatymetrien ble prosessert slik at den passer som input for bølgemodellen. Vi bruker en oppløsning på 5x5 m i batymetrien som grunnlag for modellen.



> *Figur 5 Modell for lokal batymetri i Langesund (5x5 m)*

Utformingen av utdypingsområdene etableres ved å endre batymetrien direkte i batymetrifilen. Det antas at sjøbunnen langs kanalen er fjell og at det er behov for fjellsprenging. Derfor blir overgangen til den opprinnelige sjøbunnen nesten vertikal.

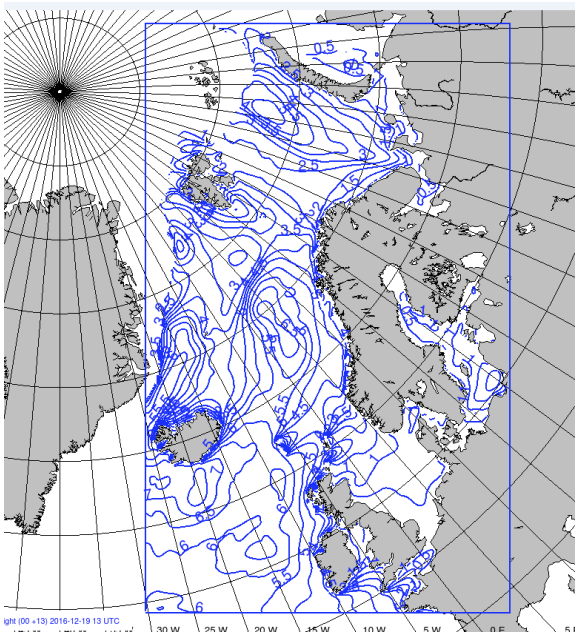
Deponiet er modellert med samme skråning som er vist i grunnleggende CAD fil fra Kystverket, se Figur 2.



> *Figur 6 Modell for lokal batymetri ved Langøya, oppløsning 5x5m. Deponiet og mudringsområdene kan observeres i bunnens konturlinjer.*

3.2 Bølgekilde utaskjærs

Bølgedata fra et punkt til havs hentes fra NORA10 og blir simulert inn mot målområdet for å finne de aktuelle bølgehøydene og periodene i det ønskede området. NORA10 (*Norwegian ReAnalysis 10 km*) er en dataserie med bølge- og vinddata innhentet gjennom *Hindcast* reanalyse teknikk hver tredje time for et grid med oppløsning på 10x10 km i Norskehavet. Databasen er styrt av det Norske Meteorologisk Institutt. Dataene dekker perioden fra 1957 og frem til i juli 2019.



> *Figur 7 Området dekket av NORA10*

En nærmere beskrivelse av NORA10 kilde kan finnes på ref. /3/.

3.2.1 Definisjon av bølger

Bølgeforhold som blir benyttet i de numeriske beregningene beskrives av Hs og Tp. Disse er to parametere vanligvis brukte for å definere bølgespekteret knyttet til en gitt sjøtilstand.

$$S(\omega) = \frac{8.1 \cdot 10^{-3} \cdot g^2}{\omega^5} \cdot \exp\left[-\frac{5}{4} \cdot \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \cdot \gamma^r$$

Hvor:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$r = exp\left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2 \cdot \sigma^2 \cdot \omega_p^2}\right]$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07\,, \omega \leq \omega_p \\ 0.09\,, \omega > \omega_p \end{cases}$$

Og:

S: Spektraltettheten til sjøforholdene
T: bølgeperiode [s]
ω: bølgens vinkelfrekvens [rad/s]
ω_p: bølgens spiss vinkelfrekvens [rad/s] ($2\pi/T_p$)
γ: toppethetsparameter (valgt *γ=3.3*)

Signifikant bølgehøyde (H_s) er tilsvarende den middelverdien av den høyeste tredjedelen av individuelle bølgehøyder i en 3 timers periode. Enkeltbølger kan være inntil dobbelt så store som den signifikante bølgehøyden. Den signifikante bølgehøyden er også omtrent lik H_{m0} som er arealet av bølgespekteret:

$$H_{m0} = \sqrt{2} * \sqrt{\frac{8E}{\rho_w * g}} = 4\sqrt{m_0}$$

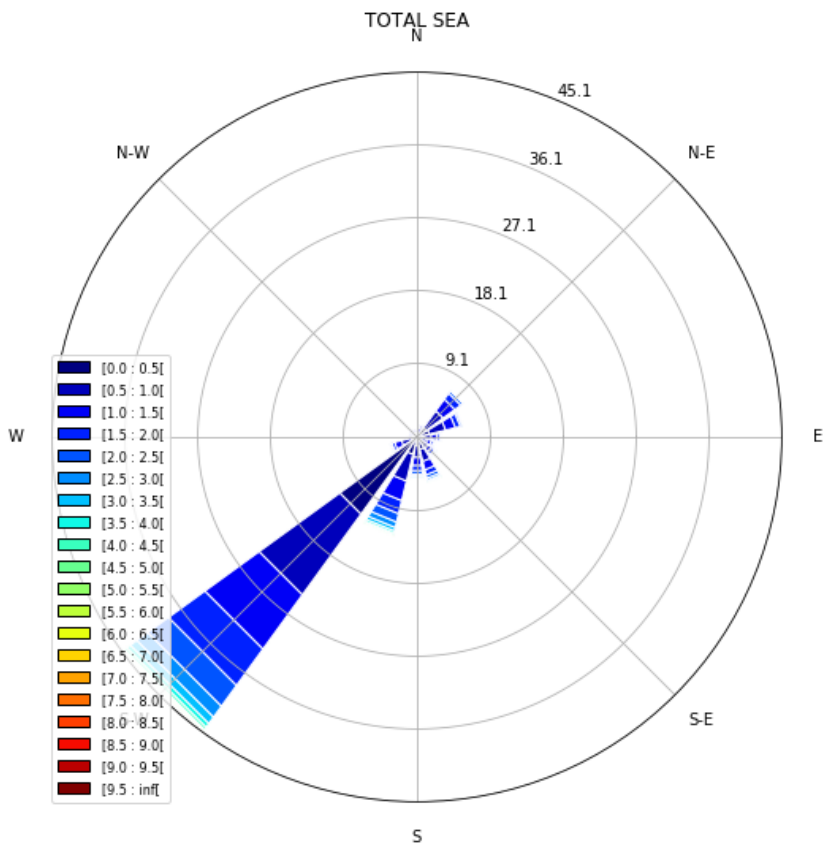
Den signifikante bølgehøyden er en måling på energien i et gitt spekter, og den kan ikke behandles som en individuell bølge. Den riktige måten å simulere et gitt spekter med sin H_s og T_p er å danne en rekke bølger (H_i,T_i) med Fourier serie-metoden.

Bølgeperiode (T_p) er tiden en bølge bruker på å forflytte seg én bølgelengde, definert mellom to nullkrysninger av middelvannstandsnivået.

3.3 Bølgeforhold

For dette prosjektet er det innhentet data fra **punkt 58.74N, 9.79E**, ca. 30 km S for Langesund, se Figur 4. Dybden i dette punktet er rundt 340 m, noe som er dypt nok for å sikre at bølgene ikke er påvirket av sjøbunnen. Dette er viktig for å ekstrapolere bølgedata i alle retningene som bølgene skal forplantes.

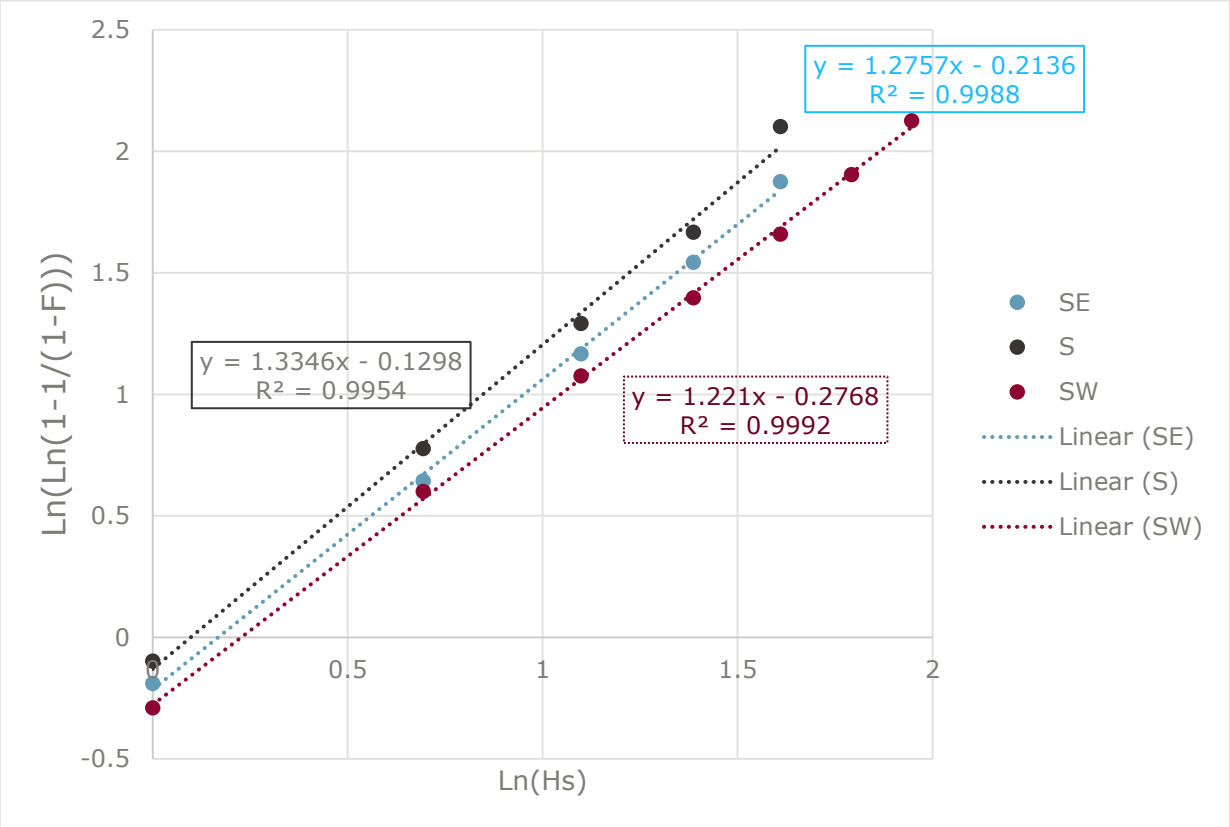
Bølgehøydene i NORA10 kommer med 3-timers intervaller fra 1957 til 2018 og hvert datapunkt representerer homogene sjøforhold. For hver av disse tidsintervallene vises det en signifikant bølgehøyde, en pikperiode og retning som beskriver spekteret for hvert 3 timers intervall. Disse dataene er gitte for en uregelmessig sjø (flere perioder og bølgelengder). En grafisk representasjon av bølgene og sine retningene er vist i Figur 8.



> *Figur 8 Oppsummering av bølgedata ved NORA10 gridpunkt fordelt i en bølgerose*

Den mest energiske retningen utaskjærs Rekefjord er SV, andre retninger som kan ramme Langesund er S og SØ, de er mye mindre energetiske men de ble inkluderte i første omgang for fullstengdighet.

Bølgedataene er sortert på sektorer av 45 °. For hver retning tilpasses en *Weibull*-fordeling ved *Least-Square* tilpassing. Resultatet for denne tilpassing er vist i Figur 9 for retning SØ, S og SV.



> *Figur 9 Grafisk sammenligning av weibull fordelingene for SØ, S og SV i en log-log plot.*

Som referanseverdi for å vurdere urolighet foran de eksisterende kaiene er det valgt en sjøtilstand knyttet til en årlig frekvens (sannsynlighet for overskridelse) på 3 timer per år. Dette tilsvarer det verste bølgeforholdet man kan forvente å oppstå årlig. Disse korrigeres med sannsynligheten for hver retning.

For hver av disse sannsynlighetene for årlige overskridelser og hver retning tilknyttes det en signifikant bølgehøyde fra en *Weibull*-fordeling som vist i Tabell 1.

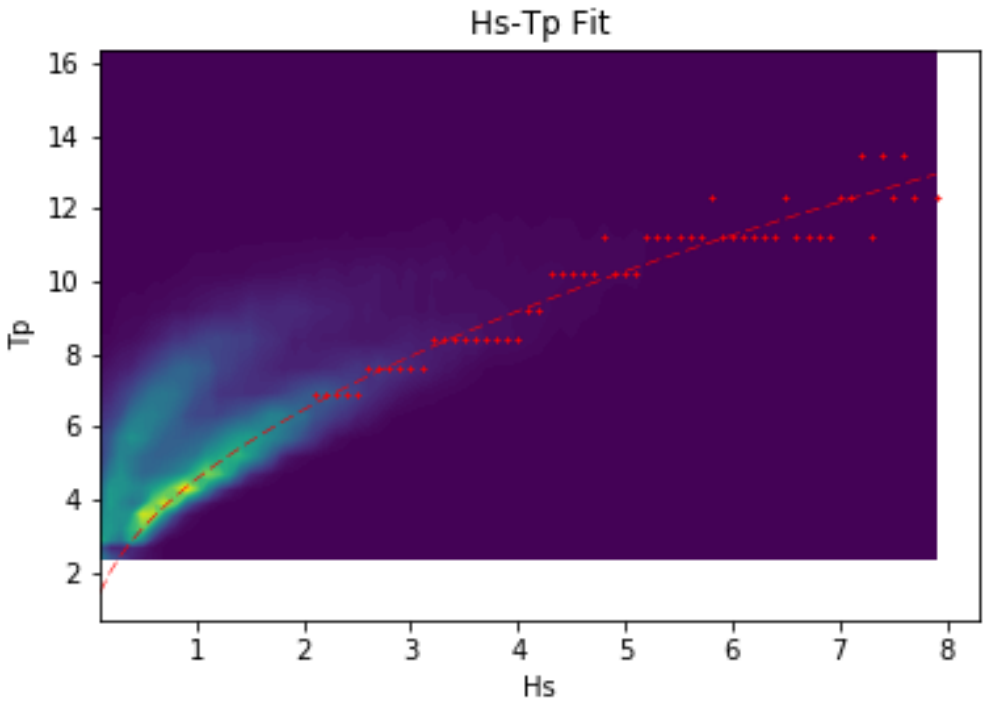
Resultatene av denne prosesseringen av bølgedata er oppsummert i plot under:

SIGNIFIKANT BØLGEHØYDER [m] FOR 3 t ÅRLIG OVERSKRIDELSE [h] og RETNING

N	NØ	Ø	SØ	S	SV	V	NV
1.6	2.9	3.1	4.5	3.5	6.6	1.0	1.9

> *Tabell 1: Oppsummering av bølgebølgeforhold knyttet til hver retning og 3 t årlig overskridelse ved NORA10 punkt (markert i rødt er retningene som er brukt videre for bølgeforplantingen i første omgang).*

De mest sannsynlige pikperiodene (T_p) knyttet til disse signifikante bølgehøydene (H_s) ble beregnet fra en H_s-T_p passering som vises i Figur 10.



> *Figur 10 Frekvens-spredningsplott forbindende H_s og Tp og passering av en funksjon $T_p = a \cdot H_s^b$., i rød farge, de representative punktene for de ytterste forholdene (H_s>2 m).*

I Tabell 2 vises det disse verdiene for de relevante bølgeretningene:

SØ	S	SV
10	9	12

> *Tabell 2: Pikperiodene (T_p) knyttet til signifikant bølgehøyde visste i Tabell 1 for de relevante bølgeretningene.*

Disse gjennomsnittlige verdiene for T_p ble brukt som grunnlag for bølgeforplantningen. I tillegg, med det formål å dekke alle mulige tilfeller, ble det benyttet perioder +/- 2 sekunder fra disse vist ovenfor, som er mest sannsynlig for hver retning. Dette gir 5x3 tilfeller som ble kjørt i den spektrale bølgemodellen SWAN.

3.4 Vindforhold

Vindforholdet ansees ikke som signifikante for prosjektet. Vindbølger er korte bølger som ikke påvirkes av endringer i dypvann.

3.5 Programvare

For de numeriske beregningene benyttes SWAN (Simulating WAves Nearshore). Modellen er utviklet og opprettholdt av TU Delft (Delft University of Technology). For SWAN er det benyttet programversjon 41.10AB.

3.5.1 SWAN

SWAN er en tredje generasjons bølgemodell fra universitetet i Delft, Nederland. Programmet estimerer bølgeparametere langs kysten, innsjøer eller elvemunninger med input fra vind, bunnforhold og strømforhold. Programmet benytter spektral tilnærming og beregner spektrum knyttet til gitte bølgeforhold.

Modellen har vært grundig testet siden 1993, er velkjent og brukes i flere sammenhenger fra forskning til anvendte ingeniørstudier.

Modellen tar hensyn til alle relevante prosesser som skjer langs bølgeforplantingen, til og med de mest relevante ikke-lineær prosessene:

- Bølgerefraksjon grunnet dybde og vannstrøm
- Overføring og refleksjon gjennom porøse strukturer (moloer, plastringer o.l.)
- Frekvens-skiftning på grunn av vannstrøm
- Interaksjon mellom bølger
- Bølgebrytning, bunnfriksjon og brytning grunnet dybde.
- Demping på grunn av vegetasjon i sjøen og turbulent strøm.
- Økning av bølgehøyde på grunn av variasjon i dybde.
- Diffraksjon.

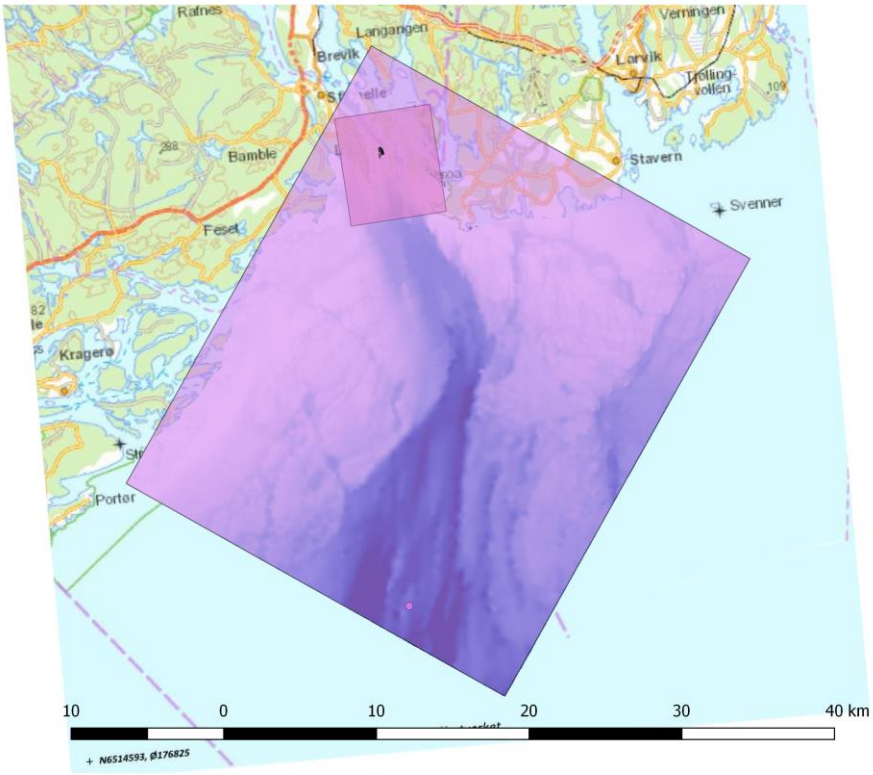
Diffraksjon er grovt inkludert i SWAN og dette er godt nok for forplanting av bølger bak en øy, men ikke for å bestemme bølger bak for eksempel en molo.

En nærmere beskrivelse av SWAN finnes på ref./1/.

3.6 Konfigurering av bølgemodeller

3.6.1 SWAN

SWAN-modellen ble konfigurert med et kartesisk regulært rutenett, orientert ca. 30N. Et finere rutenett ble brukt i nærheten av Langesundet for å fange grunnene og få med en mer detaljert batymetri-oppløsning. Romlig oppløsning til det grove rutenettet var ca. 50 m og det fine rutenettet hadde en oppløsning på 10-15 m. Grensebetraktingene ble satt ved å spesifisere et JONSWAP-spekter langs kantene i sjøen, gitt H_s og T_p fra Tabell 1 og Tabell 2.



> *Figur 11 Rutenett benyttet i SWAN modell (grovt og fint)*

4 RESULTATER

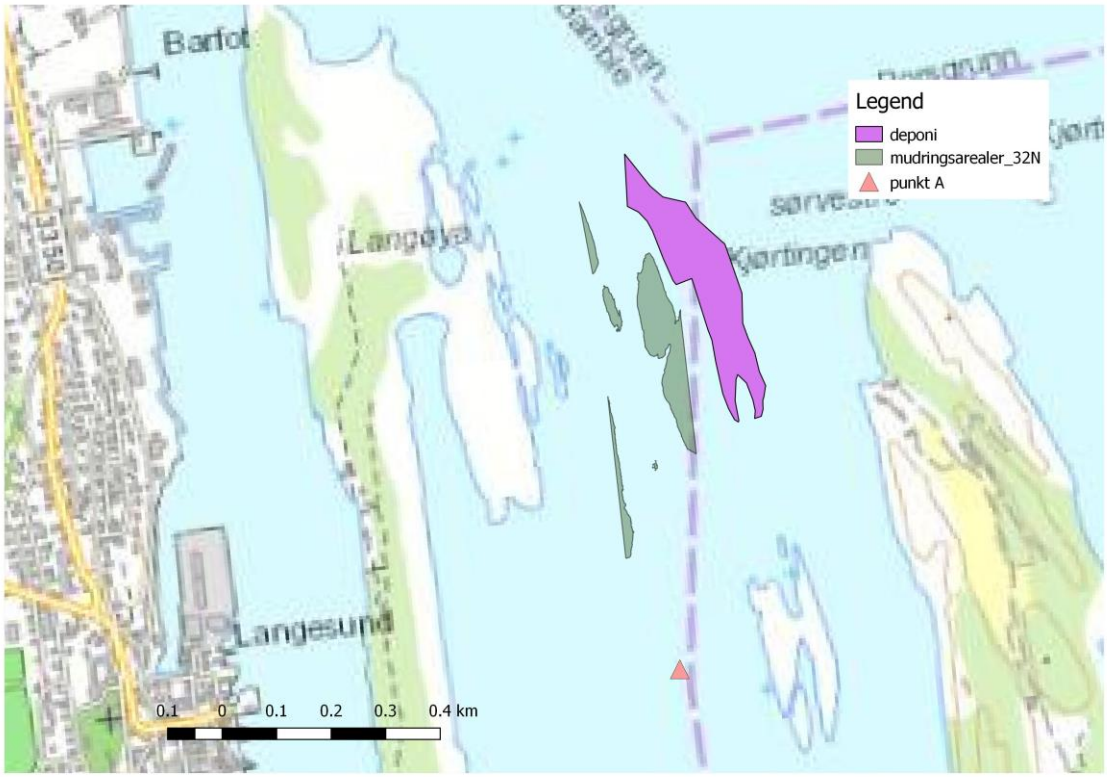
4.1 Resultater ved Langøya

I Tabell 3 oppsummeres de viktigste resultatene for SWAN-modellen ved punkt vist i Figur 13.

	Hs_0 [m]	Tp_0 [s]	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]
135N	4.5	7	1.65	7.6	167
180N	3.5	8	1.55	7.6	168
225N	6.6	10	1.39	10.2	170

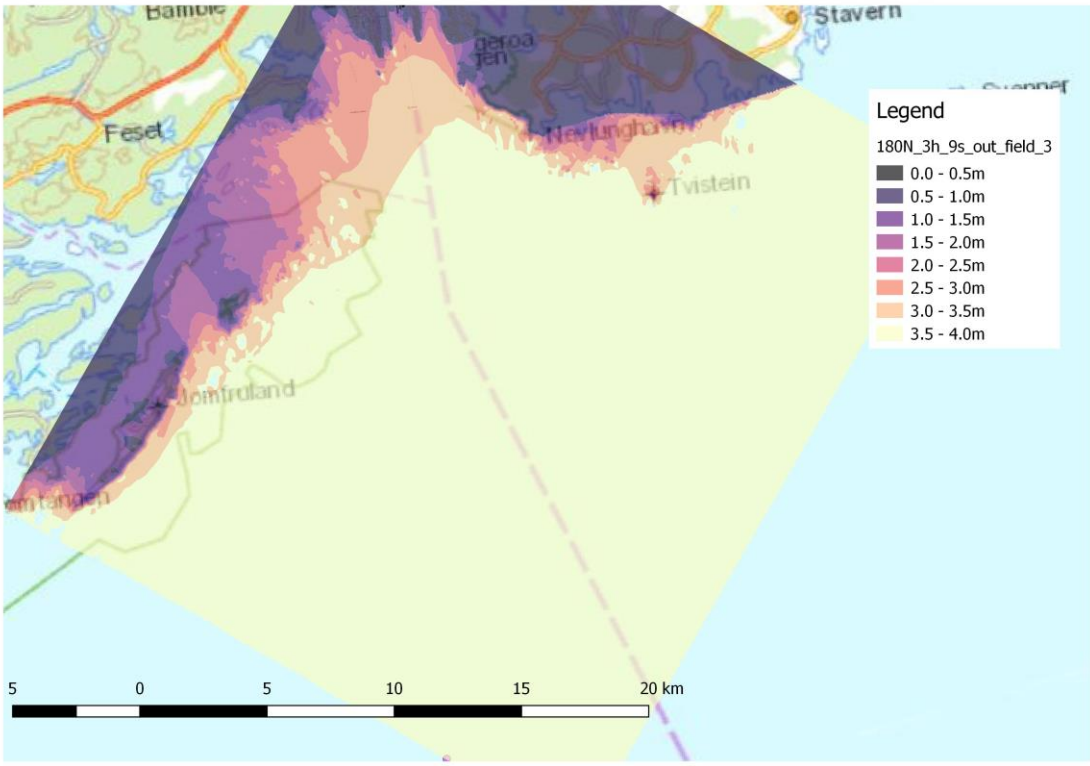
> *Tabell 3: Oppsummering av resultatene fra SWAN modellen. Valgte tilfelle for simulering med lokal modellen i rødt farge. Hs_0 og Tp_0 er henholdsvis signifikant bølgehøyde og pikperiode ved NORA10 punkt utaskjærs.*

Resultatene ble hentet fra et punkt oppstrøms tiltaksområdet.

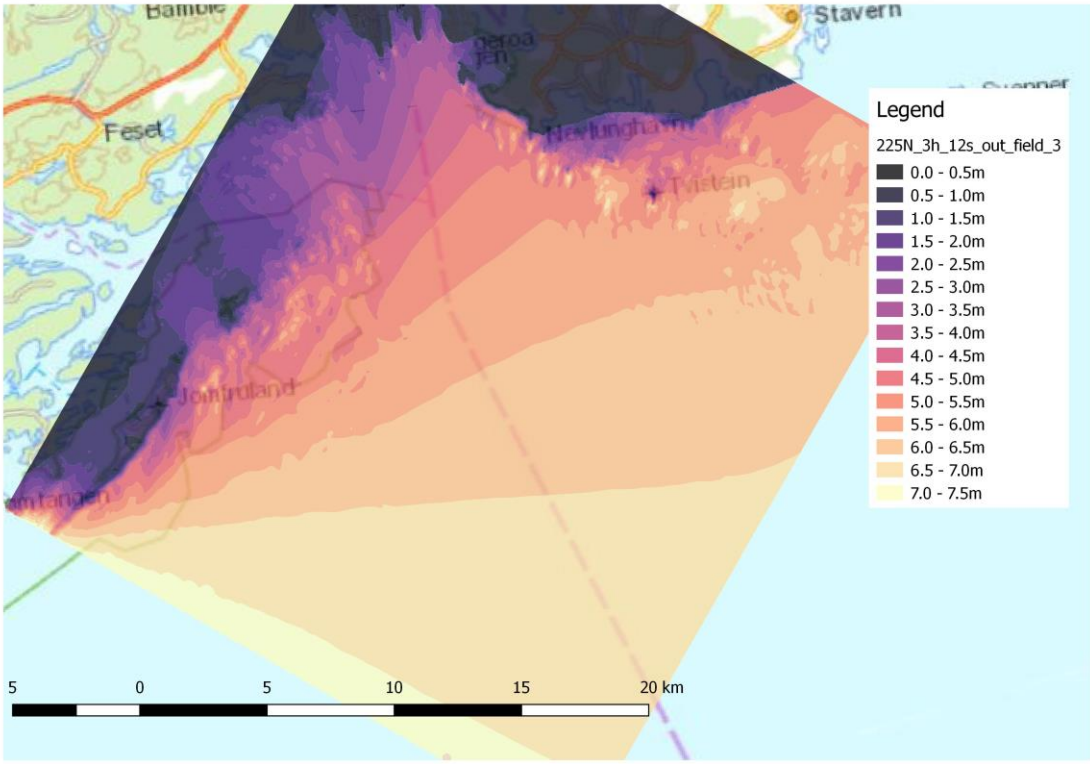


> *Figur 12 Punkt A, hvor resultater ble hentet fra.*

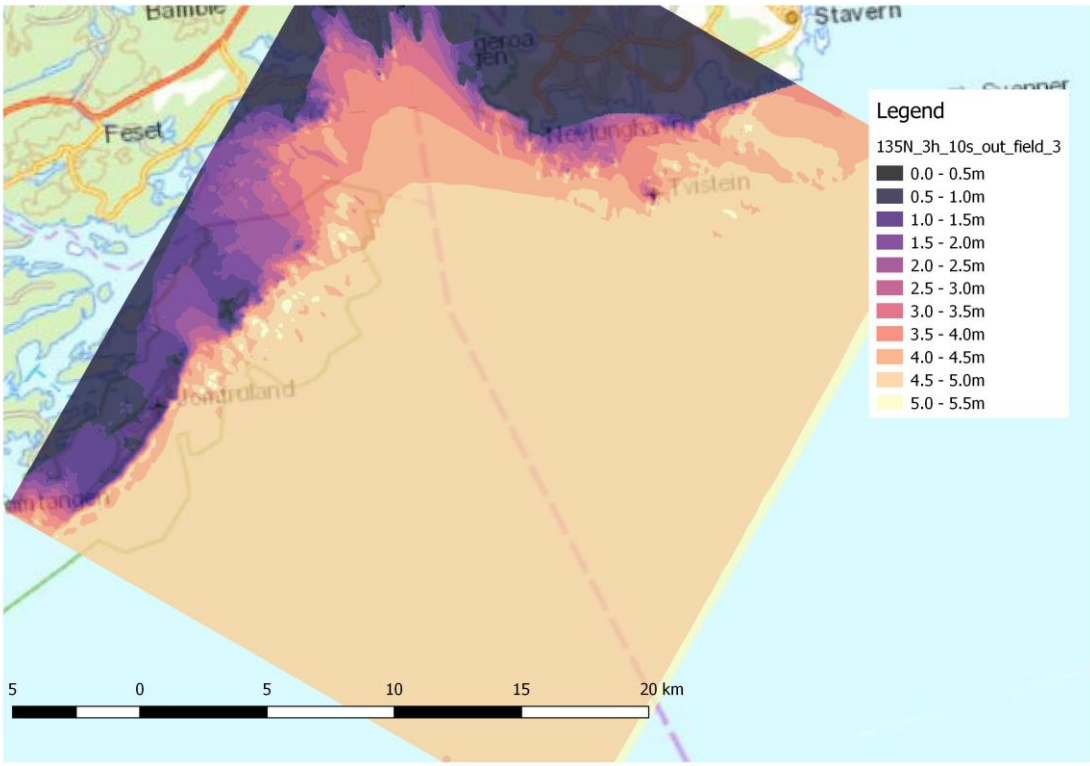
Som eksempel viser figurene under noen av de mest energirike tilfellene fra hver retning:



> *Figur 13 Hs fra SWAN modellen med dønninger fra S, årlig, Tp=9 s, H_{s0}=3.5 m.*



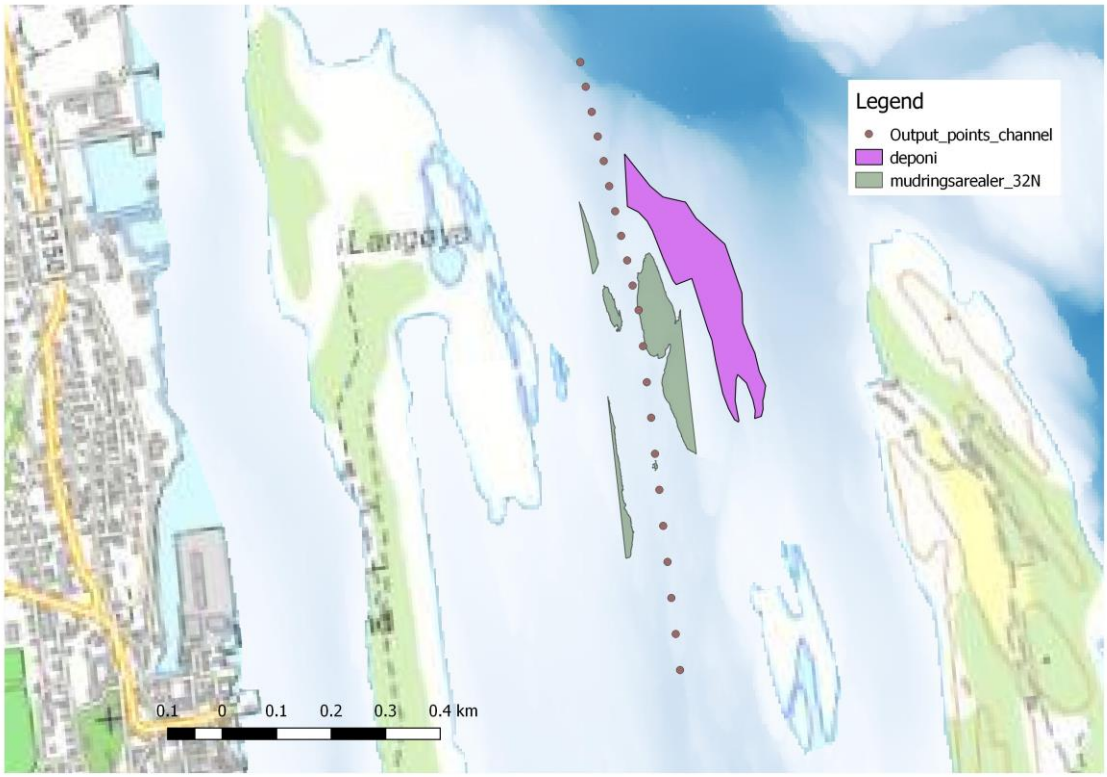
> *Figur 14 H_s fra SWAN modellen med dønninger fra SV, årlig, Tp=12 s, H_{s0}=6.6 m.*



> *Figur 15 H_s fra SWAN modellen med dønninger fra SØ, årlig, Tp=10 s, H_{s0}=4.5 m.*

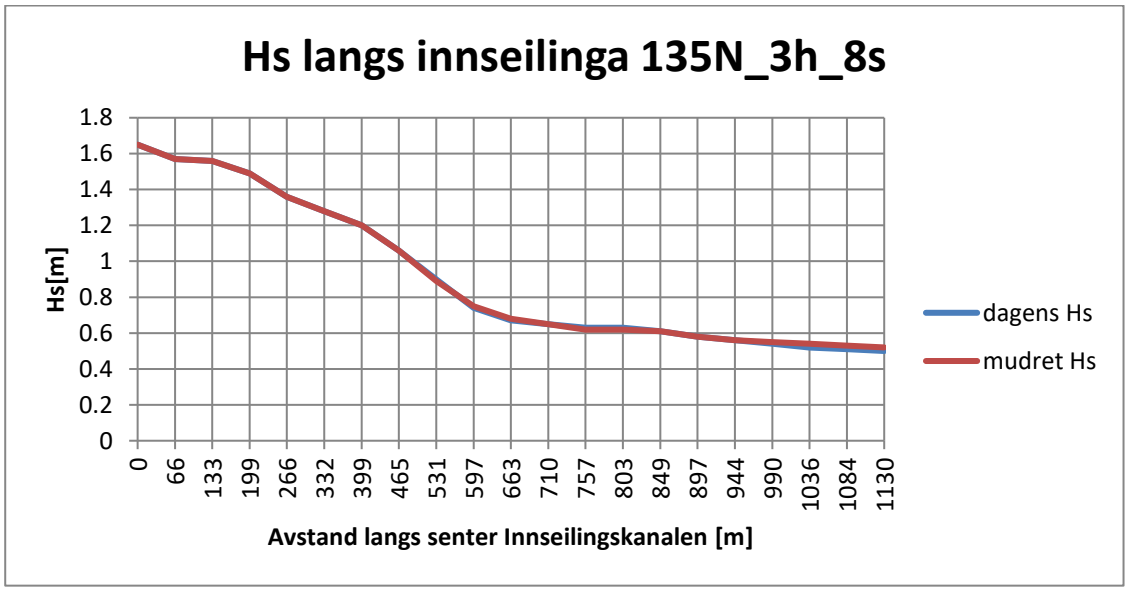
4.2 Resultater fra lokalmodell i SWAN

Disse resultatene kommer fra det finere rutenettet brukt i nærheten av Langesundet. Resultatene gis langs senterlinja av innseilingskanalen for å sammenligne dem med dagens situasjon.

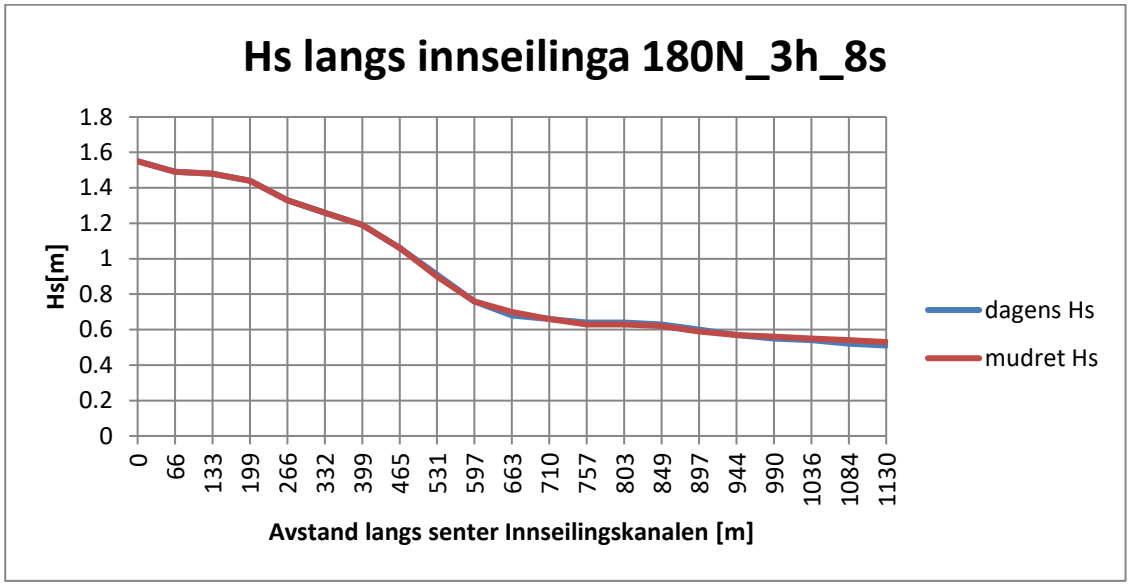


> *Figur 16 Resultatpunkter langs senterlinja til innseilingskanalen.*

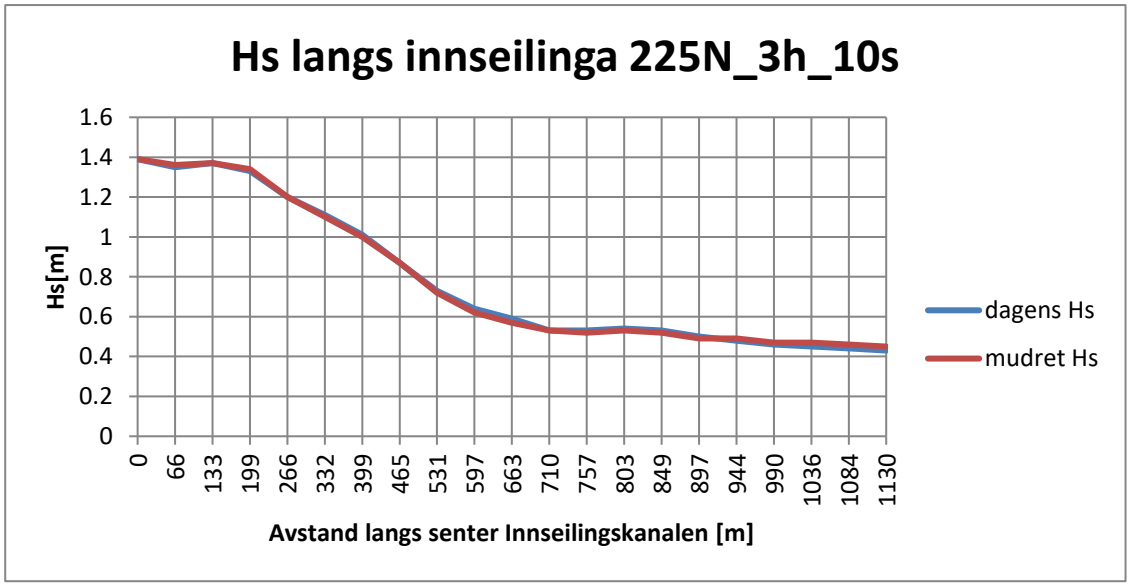
De neste plotene viser Hs resultatene i de gitte punktene langs innseilinga for de mest kritiske tilfeller for hver bølgeretning, og de sammenlignes med dagens verdier.



> *Figur 17 Hs[m] langs punktene vist i Figur 15. Bølger fra SØ, Tp=8s.*

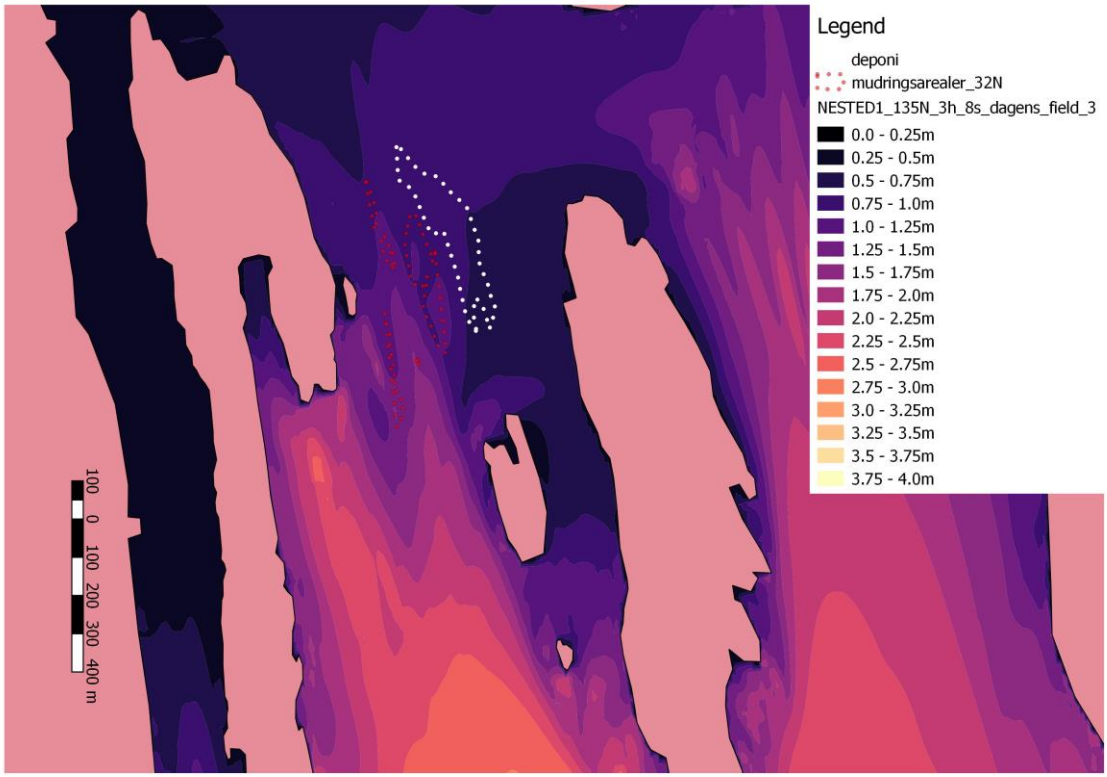


> *Figur 18 Hs[m] langs punktene vist i Figur 15. Bølger fra S, Tp=8s*

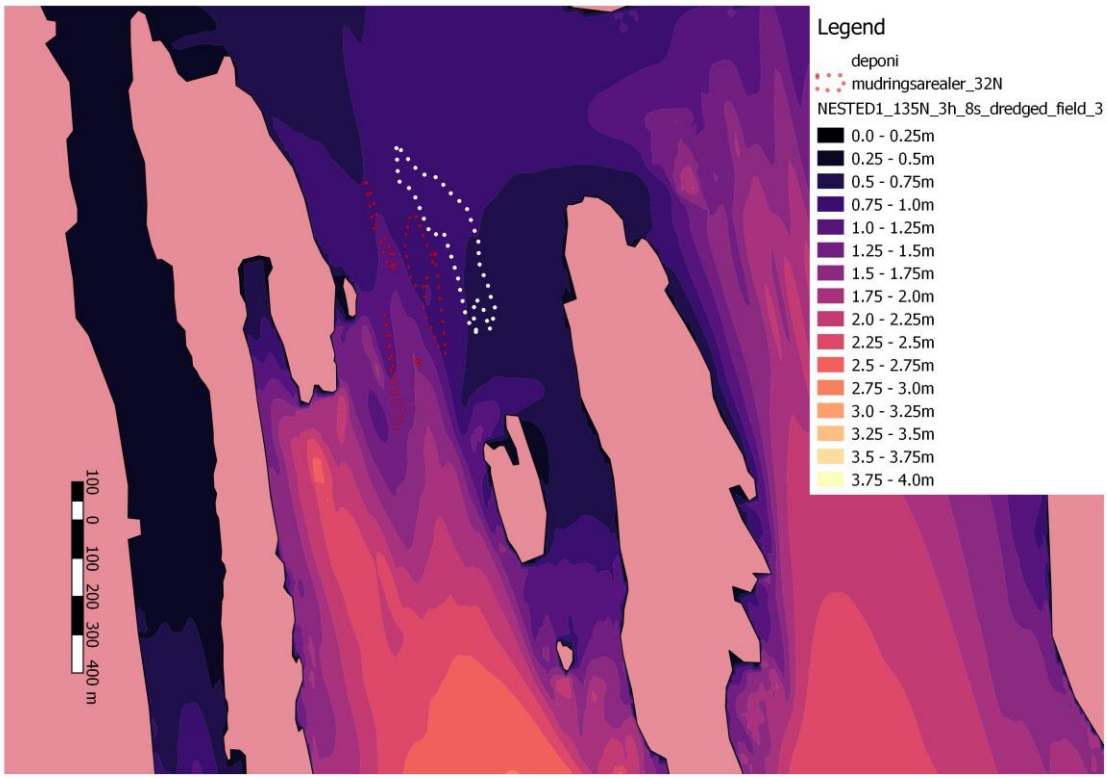


> *Figur 19 Hs[m] langs punktene vist i Figur 15. Bølger fra SV, Tp=10s*

Nedenfor vises det to figurer som sammenligner dagens situasjon og etter utført tiltak for de mest kritiske tilfellene. De er nesten helt like, noe som viser at det ikke blir ikke noen betydelige endringer i bølgeforholdene.



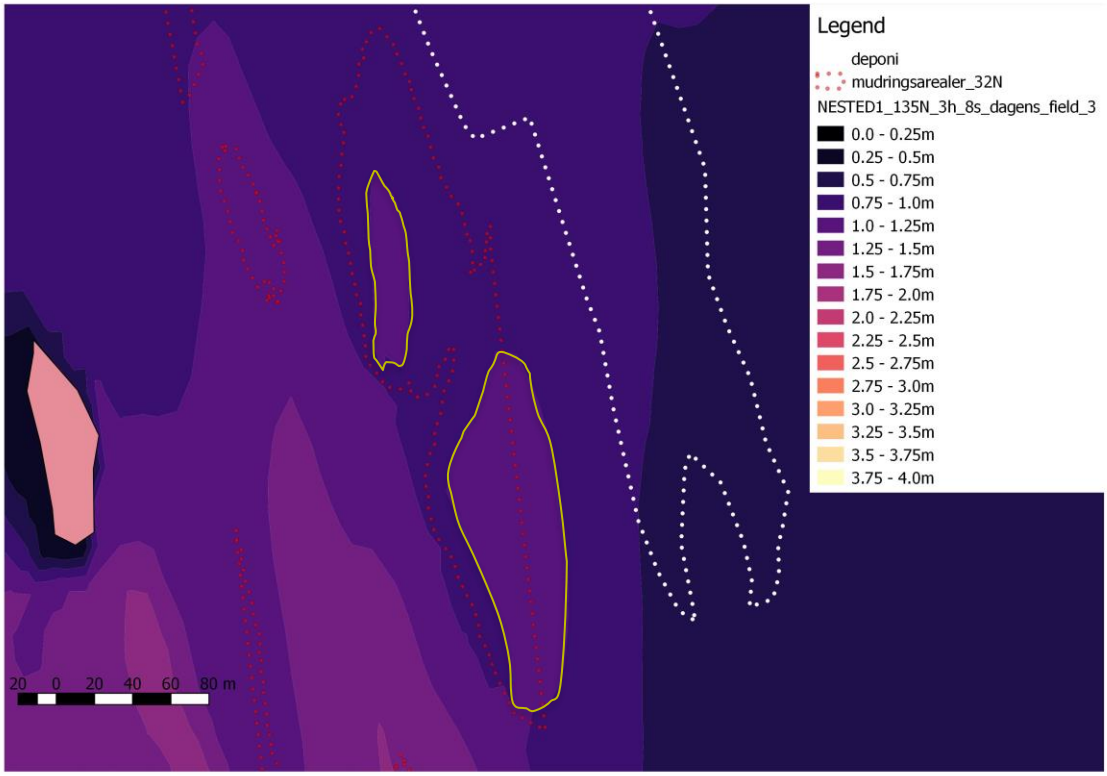
> *Figur 20 Hs ved Langøya, Tp=8 s, bølger fra SØ, dagens situasjon.*



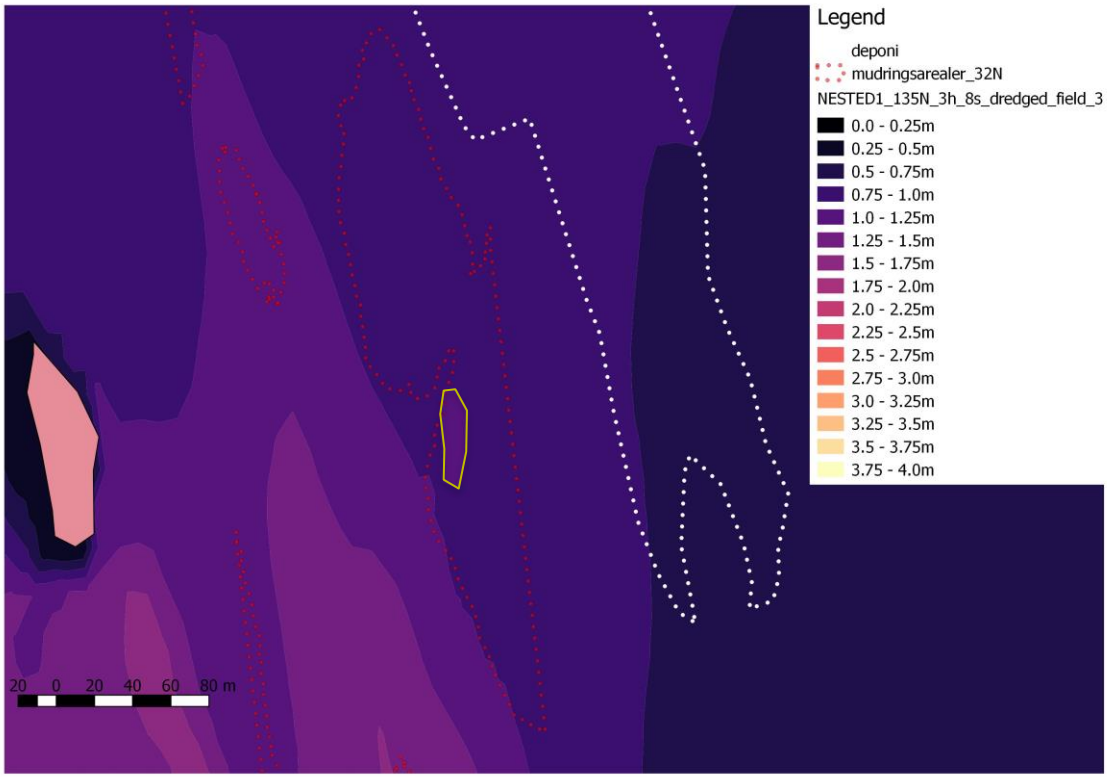
> *Figur 21 Hs ved Langøya, Tp=8 s, bølger fra SØ, med utdyping og deponiet.*

Det er imidlertid en viktig forskjell, om vi ser nærmere på det største mudringsområdet (delområde 2) hvor det vises en redusering av bølgehøyde over deponiet, se figurene nedenfor. Dette er en gunstig effekt av utdypingen. Bølgene som treffer grunnere vann blir høyere lokalt over en hindring, slik som en grunne. Denne effekten kalles «shoaling» på engelsk. Bølgene blir også brattere i disse områdene, noe som øker bølgeuroen for de som seiler i området.

Det er også sannsynlig at noen bølger kan bryte mot grunnen, spesielt de som er brattest (høye og korte), en effekt som også er ugunstig for seiling i leden.



> *Figur 22 Detalj bilde av Hs oppå mudringsområde nummer 2 (marker med røde punkter), Tp=8 s, bølger fra SØ, dagens situasjon. Med en gul linje markeres områder med høyere bølgehøyde på grunn av grunning (shoaling).*



> *Figur 23 Detalj bilde av Hs oppå mudringsområde nummer 2 (marker med røde punkter), Tp=8 s, bølger fra SØ, med utdypingen. Med en gul linje markeres områder med høyere bølgehøyde på grunn av grunning (shoaling).*

Ved å fjerne grunnen kan bølgehøyden reduseres samt også sannsynligheten for brytende bølger. Dette kan også føre til mindre refleksjoner bakover mot kanalen.

5 KONKLUSJON

Dagens signifikante bølgehøyde (H_s) som overskrides en gang årlig ble brukt som parameter for å vurdere endringer i bølgeuro. Denne verdien beskriver de verste forholdene et skip kan treffe årlig langs innseilinga.

Etter å ha forplantet de verste tilfellene inn til Langesundet vises det at H_s=1.7 m og T_p=8 s, med en retning 168 °N er det verste sjøtilstanden som kan treffe innseilingskanalen årlig ved Langøya, se Figur 16. Dette tilfellet er drevet av bølger utaskjærs Langesund av fra SØ.

Resultatene viser at bølgeforholdene langs innseilingen kan oppnå 1.7 m årlig ved Langøya og at de vil ikke endres signifikant på grunn av utdypningstiltaket og deponiet. Endringene i H_s er veldig små (1-3 cm), avhengige litt av perioder og retninger, men for små til å kunne konkludere med at tiltaket øker bølgeuroen i området. Disse endringene skjer nedstrøms tiltaket.

Det finnes ikke et generisk krav eller veiledende verdi for H_s i innseilingskanaler, men en maksimal årlig verdi på 1.7 m for H_s ansees som akseptabel og tiltaket ser ikke ut til å endre bølgeforholdene langs innseilingen.

Utdypingen kan til og med forbedre lokale bølgeforholdene i utdypingsområdet på grunn av:

- **Effekten av «shoaling» (oppbygging av bølger på grunn av redusert vanndyp) reduseres som fører til at bølgehøyden lokalt kan bli mindre.**
- **Sannsynligheten for brytende bølger reduseres.**
- **Bølgerefleksjoner tilbakebak til kanalen kan bli mindre.**

6 REFERANSER

1. http://swanmodel.sourceforge.net/
2. https://www.geonorge.no/
3. *«A high-resolution hindcast study for the North Sea, the Norwegian Sea and the Barents Sea"* Øyvind Breivik, Magnar Reistad og Hilde Haakenstad -Norsk Meteorologisk Institutt.