

Oppdragsgiver: **Andøya Spaceport**
Oppdragsnr.: **5173196** Dokumentnr.: **3**

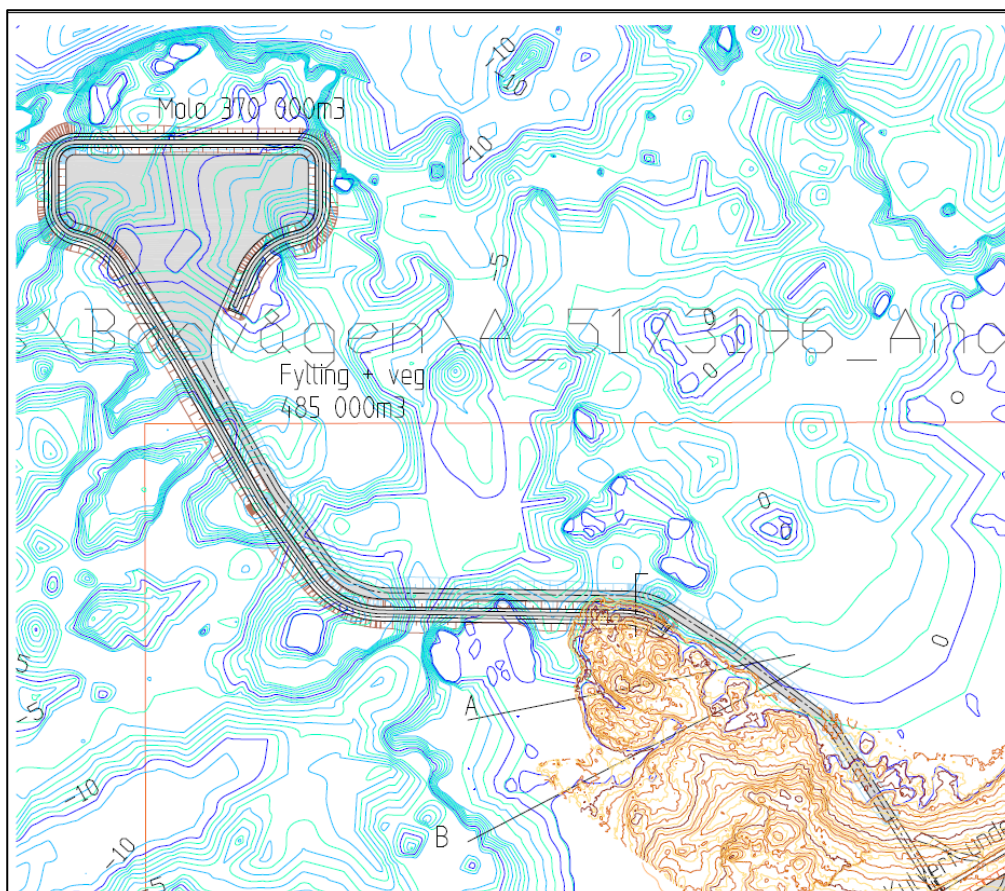
Til: Andøya Spaceport
Fra: Arne E Lothe
Dato: 2019-07-31

► Bølgehøyder og dimensjoner av fylling ved ny raketbase ved Børvågen

INNLEDNING

Det er planlagt en ny base for oppskyting av satellitter Andøya Spaceport. Forslag til utforming av basen i Børvågen er vist i Figur 1.

I dette notatet er det utført en beregning av sannsynlige bølgehøyder mot fyllingskonstruksjonen, og det er indikert nødvendige dimensjoner av beskyttelse mot bølger. Det er antatt at anlegget skal dimensjoneres for flomklasse F2 (200 års returperiode).



Figur 1 Planlagt utforming av molo og utfylling i sjø

DATAGRUNNLAG

Datagrunnlaget for denne studien er følgende.

1. Dybdedata fra primærdata fra Kartverket, det vil si dybder med moderat tetthet (anslagsvis 50 - 100 m)
2. Bølgedata fra et punkt i åpent hav i posisjon N70.73°, Ø 19.92°, ca 50 km NNV for Børvågen. Data er levert av met.no.
3. Dybdedata fra EDMODNET i områder der primærdata ikke finnes (dypt vann).

METODE

Metoden for bølgeberegning er en prosess i tre trinn.

1. Vi antar at bølgedata fra punktet i åpent hav er representative for hele området vest for Andøya og Vesterålen. I det første trinnet beregnes bølger fra et punkt i åpent hav fram til et punkt ca rett nord for Anda fyr. Den viktigste effekten her er skjermingen som kommer fra Langøya og Anda i sør, og fra Andenes i nordøst.
2. Deretter benyttes en mer detaljert modell som følger bølgene fra punktet nord for Anda fyr til et punkt 600 m NV for Børvågskjæran. I dette punktet hentes det ut bølgespektra for ulike retninger og bølgeperioder.
3. Til slutt benyttes en detaljert modell med oppløsning på ned til 5 m i de grunneste områdene, og der detaljer i bølgebevegelsene studeres.

I de fleste tilfeller vil man kunne beskrive bølge-transformasjonen fra åpent hav og helt inn til anlegget ved hjelp av en dimensjonsløs koeffisient som er definert som:

$$C = \frac{H_{s,P}}{H_{s,0}} = C(\theta, T_p),$$

der

$H_{s,P}$ = signifikant bølgehøyde i et punkt P ved anlegget

$H_{s,0}$ = samtidig signifikant bølgehøyde i åpent hav

θ = middel bølgeretning i åpent hav

T_p = spektral topp-periode for bølgene i åpent hav.

I praksis betyr det at den prosentvise reduksjon (eller økning) i bølgehøyde fra åpent hav og fram til anlegget varierer med bølgeperiode og bølgeretning, men er *uavhengig* av bølgehøyden. Vi kan derfor gjennomføre analysen for et utvalg av bølgeretninger og bølgeperioder, men holde inngående bølgehøyde konstant, f eks på $H_s = 5.0$ m. Denne teorien er gyldig så lenge det ikke forekommer vesentlig brytning av bølgene andre steder enn direkte mot land. Dersom det forekommer brytning, vil mindre bølger gli over grunner uten å bryte, mens de høyere bølgene vil ha en økende tendens til å bryte og dermed tape energi.

For å sikre at ikke bølgehøyden ved anlegget overestimeres er prosessen ovenfor (trinn 1 - 3) gjentatt i en situasjon der bølgehøyden i åpent hav er satt lik 200-års signifikant bølgehøyde fra den aktuelle retningen. Det vil gi en grense for hvor høye bølgene ved anlegget kan bli, uansett hvor høye bølgene i åpent hav er.

MODELLER OG BEREGNINGER

De tilfeller av bølgesituasjoner som er modellert er vist i Tabell 1. Hvert tilfelle er et inngående spektrum av bølger som inneholder en fordeling av bølge-energi på forskjellige retninger og forskjellige perioder. Spektral topp-periode T_p er den perioden som inneholder mest energi (største bølgehøyde). Det er benyttet en standard signifikant bølgehøyde i åpent hav på $H_s = 5.0$ m.

Tabell 2 viser kontroll-tilfellene som er kjørt med 200-års tilstand i åpent hav. Tilfellene i Tabell 1 viser at en inngående spektral topp-periode på $T_p = 16.0$ s gir de høyeste bølgene ved anlegget, og derfor er bare denne perioden brukt.

Tabell 1 Oversikt over tilfeller av inngående bølger som er analysert med inngående signifikant bølgehøyde $H_s = 5.0$ m. Nummeret i tabellen viser til et tilfelle-nummer

Bølgeretning i åpent hav°	Bølgeperiode $T_p = 12.0$ s	Bølgeperiode $T_p = 14.0$ s	Bølgeperiode $T_p = 16.0$ s
240	12	13	14
270	17	18	19
300	22	23	24
330	27	28	29
360	32	33	34
30	37	38	39

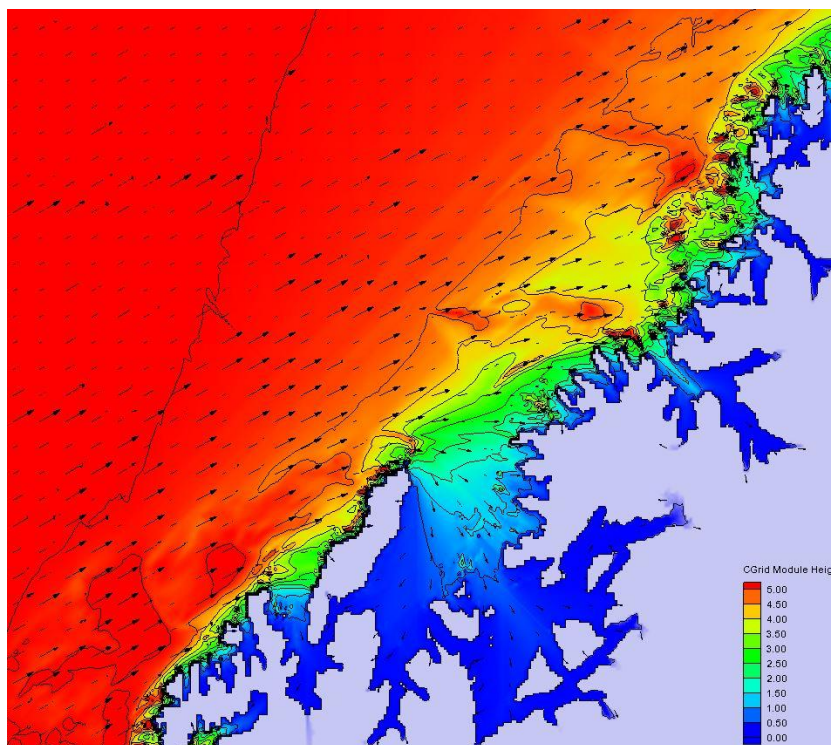
Tabell 2 Oversikt over tilfeller av inngående bølger i åpent hav med 200 års returperiode

Bølgeretning i åpent hav°	Bølgeperiode $T_p = 16.0$ s tilfelle nummer	Signifikant bølgehøyde nord for Anda fyr H_s m
240	14-200	14.09
270	19-200	15.76
300	24-200	12.45
330	29-200	12.21
360	34-200	12.92
30	39-200	10.21

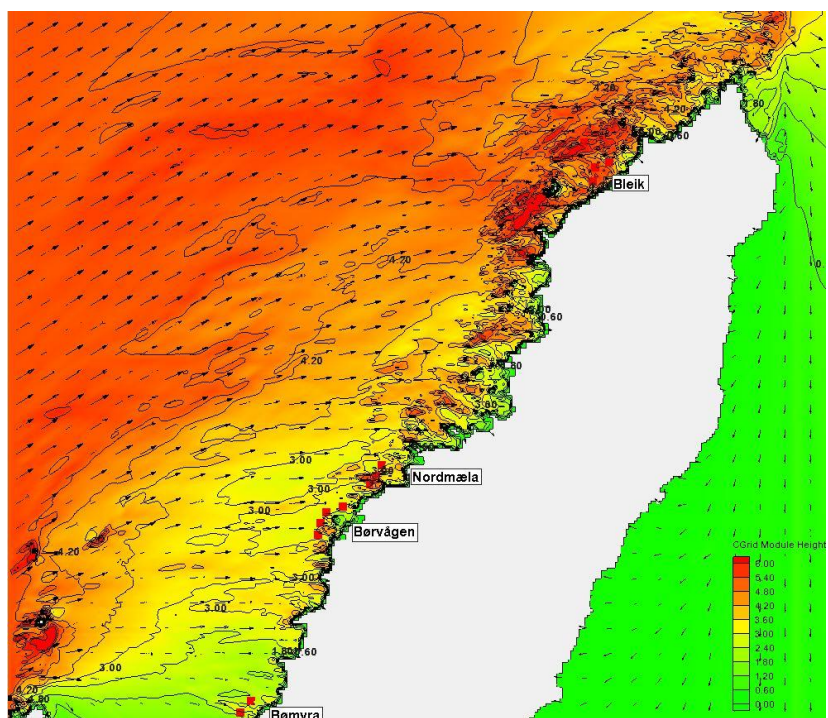
Figur 2 nedenfor viser den største havmodellen som er benyttet ved bølger fra 240°. Figur 3 viser den lokale modellen som dekker området mellom Anda og vestsiden av Andøya.

Figur 4 viser den siste modellen med dybde data og den foreslåtte utformingen av base-arealet.

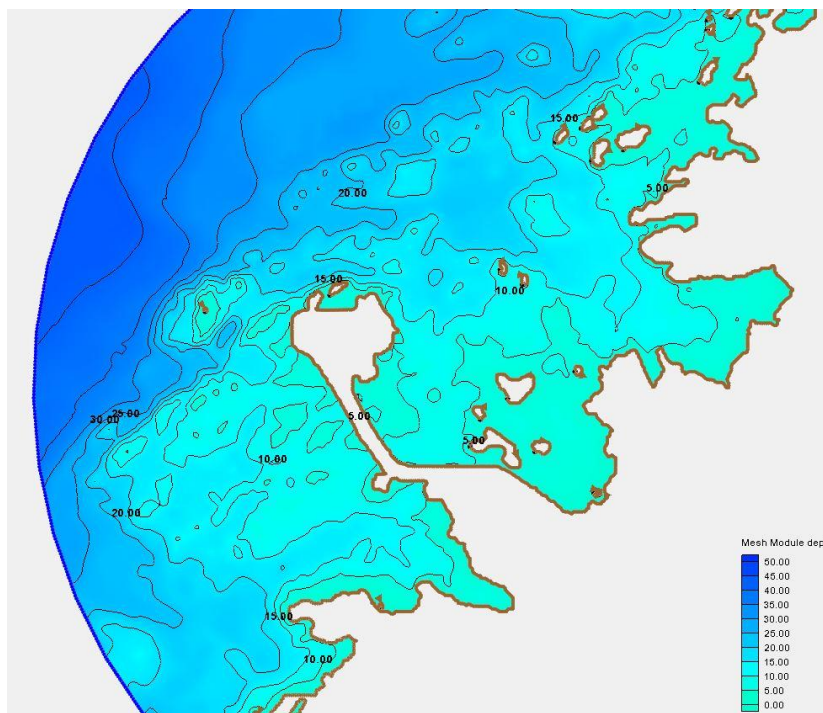
Figur 5 viser et utsnitt av den detaljerte modellen der det er markert 16 punkter A - O der bølgehøyden er målt i den siste modellen. Ved kjøringen er det antatt av vann-nivået i havet er ekstremt høyt, tilsvarende 200 år stormflo.



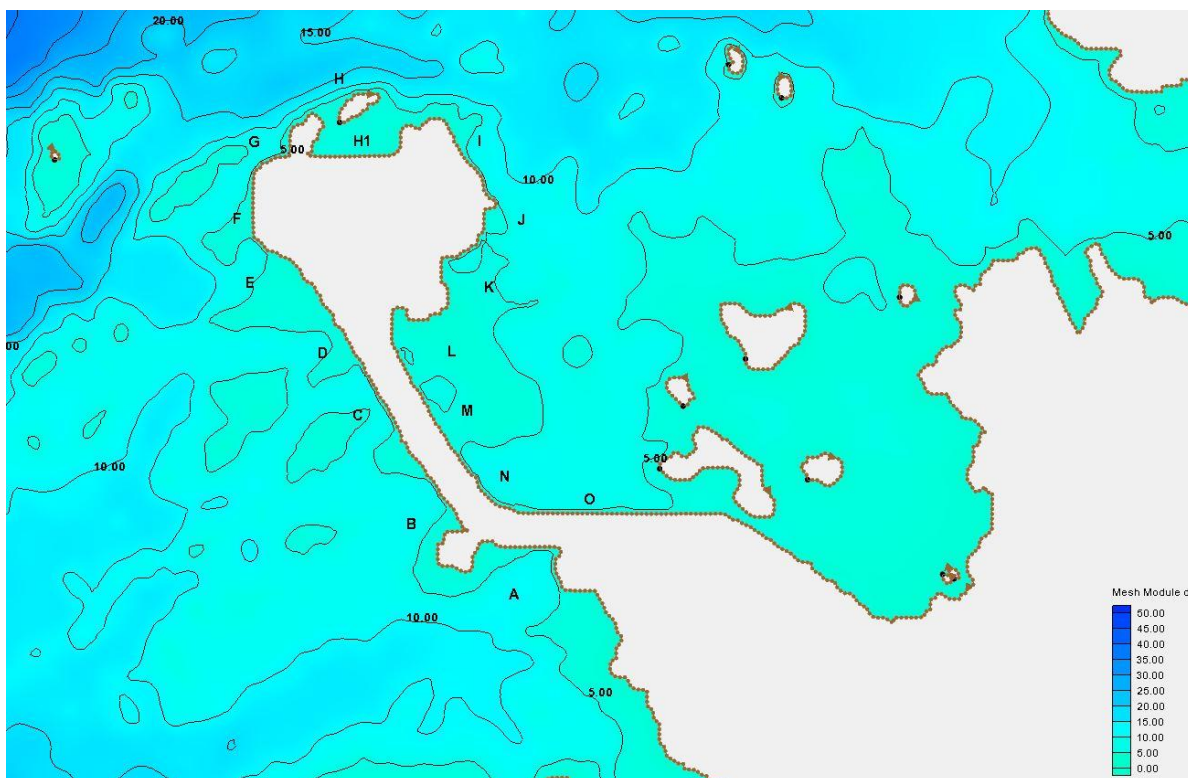
Figur 2 Bølgemodell for Troms og Nordland, bølger fra 240 grader



Figur 3 Bølgemodell for vestsiden av Andøya, bølger fra 240 grader



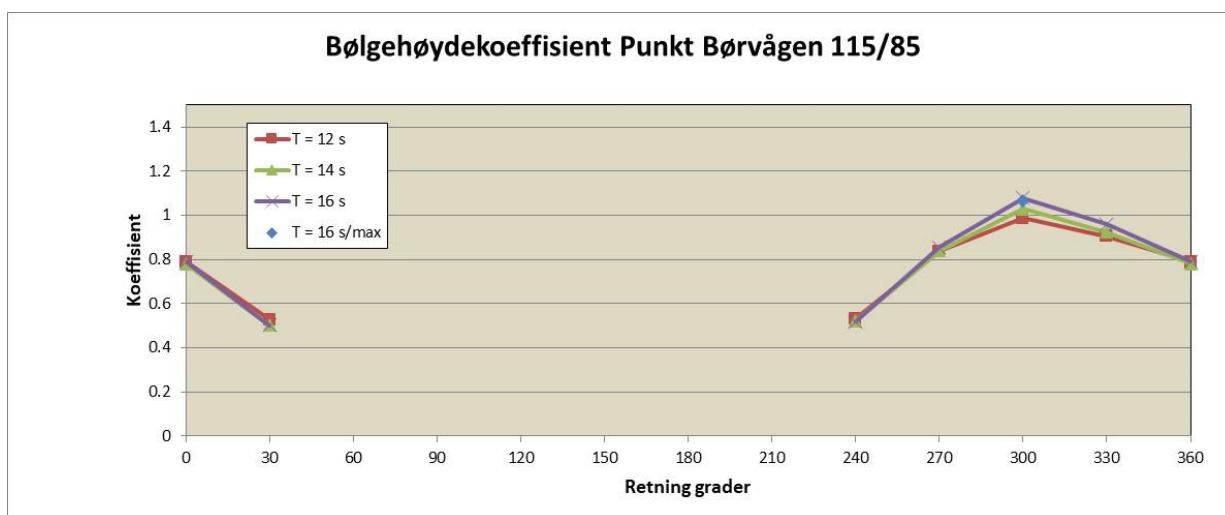
Figur 4 Dybdatedatamodell for Børvågen med planlagt utforming av basen



Figur 5 Punkter A - O der bølgehøyden er beregnet

RESULTAT

Resultat av bølgeanalysen fra åpent hav *fram til ca 600 m vest for Børvågen* er vist i Figur 6. Figuren viser bølgehøydekoefisienten C (se avsnittet METODE), dvs forholdet mellom signifikant bølgehøyde i punktet vest for Børvågen og bølgehøyde i åpent hav. Dersom koefisienten er 0.5, så er bølgehøyden i punktet 50 % av bølgehøyden i åpent hav. Vi antar i denne delen av beregningen at denne koefisienten varierer bare med periode og retning, slik at vi kan benytte en konstant bølgehøyde i åpent hav på $H_s = 5.0$ m, og vite at den samme koefisienten vil gjelde også for andre bølgehøyder. Som en kontroll av dette har vi utført en test med en ekstrem bølgehøyde på $H_s = 15.0$ m og periode $T_p = 16.0$ s fra retning 300° . Denne ene testen er vist i Figur 6 som « $T = 16s/\max$ », og den viser at koefisienten er uavhengig av bølgehøyden fram til dette punktet.



Figur 6 Bølgehøydekoefisient åpent hav til et punkt ca 600 m vest for Børvågen

Et eksempel på fordeling av bølgehøyder mot konstruksjonen er vist i Figur 7. Figuren viser fordeling av signifikant bølgehøyde under en storm fra retning 300° med spektral toppperiode $T_p = 16.0$ s og bølgehøyde i åpent hav $H_s = 5.0$ m. Dette er den retningen som gir størst belastning på konstruksjonen.

Vi merker oss at bølgehøyden ved randa av modellen (buen til venstre) er større enn bølgehøyden i åpent hav, og det finnes to partier nord og sør for fyllingen der bølgehøyden øker til over 7.0 m på grunn av dybdeforholdene (en kombinert effekt av grunning og refraksjon). Spesielt merker vi området sør for starten av vegfyllingen, der det finnes store bølgehøyder i et område som tilsynelatende er skjermet.

Bølgene er mer detaljert illustrert i Figur 8 som viser bølgeoverflaten, med bølgekammen som rød og bølgedal som grønn. Her ser vi hvordan bølgene svinger rundt Børskjæran og kommer inn mot Børvågen.

Situasjonen der det er en 200-års signifikant bølgehøyde $H_s = 15.8$ m fra vest ved Anda fyr er vist i Figur 9. (Merk at skalaen i dette bildet er 0 - 15 m). Vi ser at grunnene utenfor anlegget er en effektiv skjerming ved at bølgene bryter her og får en redusert høyde. Det er bare på nordsiden av den ytterste delen at høye bølger når fram til utfyllingsområdet. Merk også at det er relativt grunt i flere kilometer vest for Andøya. Det fører til at bølgene endrer retning langt ute, og at retningen ved randa på modellen i Figur 9 vil være mellom 270° og 360° uansett hvilken retning bølgene har i åpent hav.

Oppdragsgiver: **Andøya Space Center**
Oppdragsnr.: **5173196** Dokumentnr.: **3**

Vi kan nå gjennomføre analysen ved å hente observerte bølgehøyder ved punktene i Figur 5 og beregne en ny bølgehøydekoefisient basert på at bølgehøyden i åpent hav er $H_s = 5.0$ m. Deretter benytter vi statistikken for bølgene i hindcastpunktet (i posisjon N70.73°, Ø 19.92°, ca 50 km NNV for Børvågen) og beregner høyden for ekstremverdier (ved forskjellige returperioder).

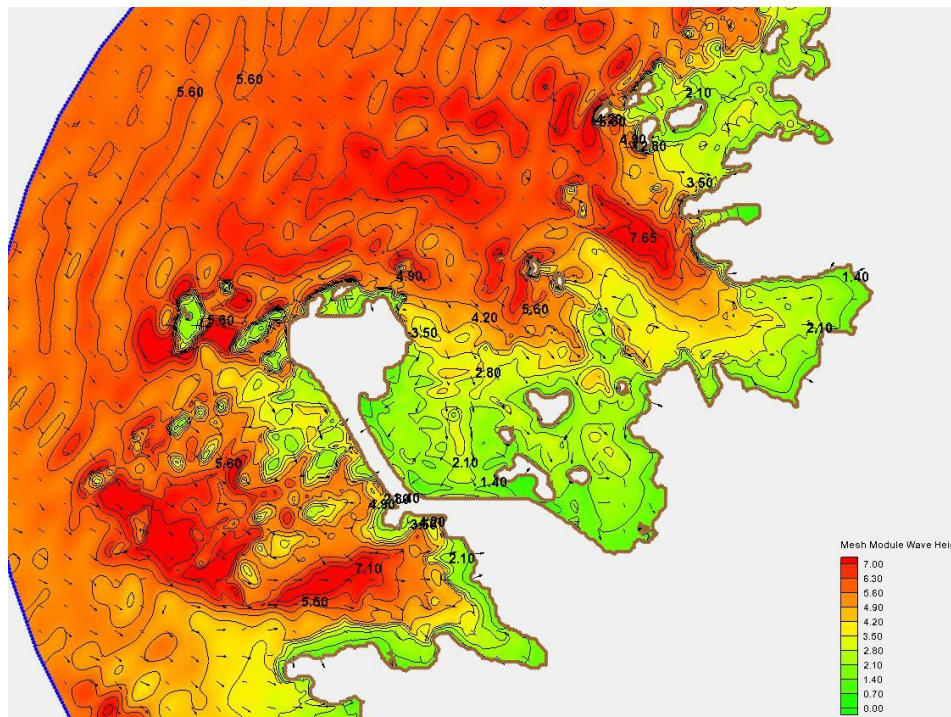
Men vi setter som et tilleggskrav at bølgehøyden i hvert punkt ikke kan bli høyere enn den bølgehøyden som er beregnet for tilfellet med 200-års storm i åpent hav.

Resultatet av den beregningen er vist i Figur 10. Her er den maksimalt oppnåelige bølgehøyden i hvert punkt vist for alle relevante bølgeretninger. På SV-siden av anlegget er bølgehøyden i størrelse $H_s = 5.0 - 6.0$ m, og det regnes som håndterbart. Det har vært bygget flere moloer og fyllinger i Norge med denne bølgehøyden, eksempelvis Melkøya, Gismerøy/Mandal, E10 ved Hamnøy/Reine (Figur 12), Sirevåg og Mortavika/Rennesøy.

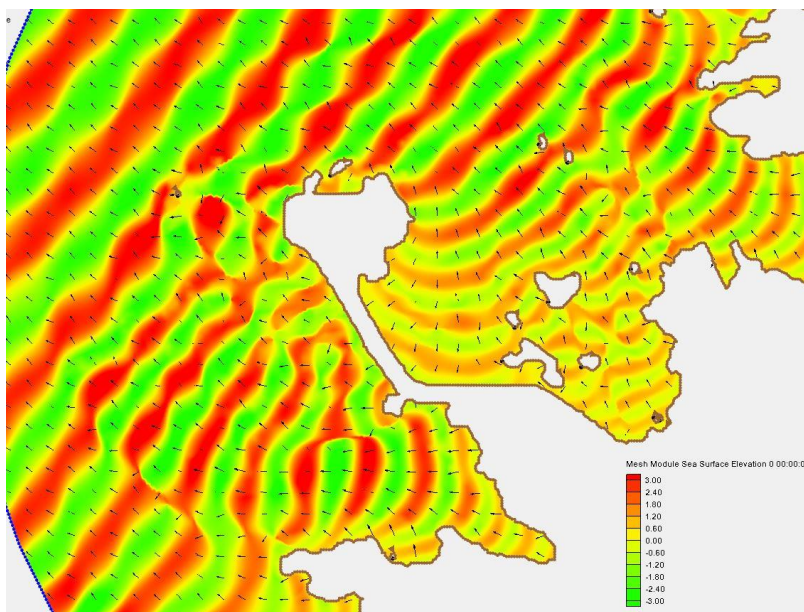
Den delen av anlegget som vender mot nord er imidlertid utsatt for bølger som kan nå opp til en høyde på $H_s \approx 10.0$ m. Dette er en meget kraftig bølgebelastning, og vi er ikke kjent med at det har vært bygget moloer for så høye bølger i Norge. Vi er imidlertid i den heldige situasjon av bunnen er slik laget at det er muligheter for å bygge en spesiell type konstruksjon her som har vært utprøvet ved E10 ved Hamnøy, se kapittel KONKLUSJON OG DISKUSJON.

Vi legger på dette tidspunkt ingen vekt på observasjonene i Punkt H1, som ligger i den lille «lagunen» på nordsiden av anlegget.

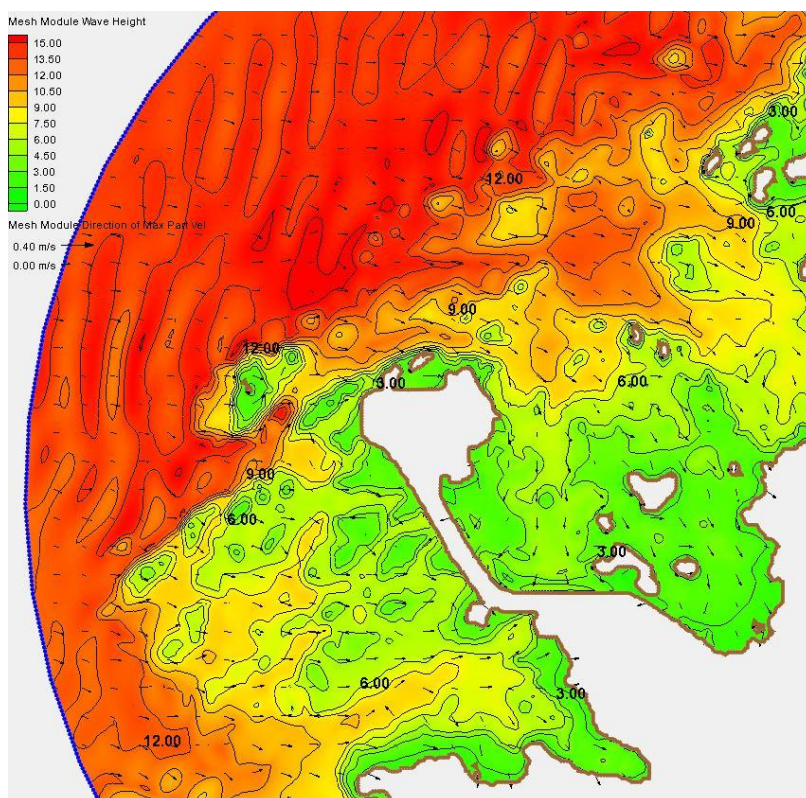
På NØ-siden av moloen og fyllingen er det betydelig lavere bølgebelastning, og denne delen av anlegget er i vanlig størrelse for moloer i Norge.



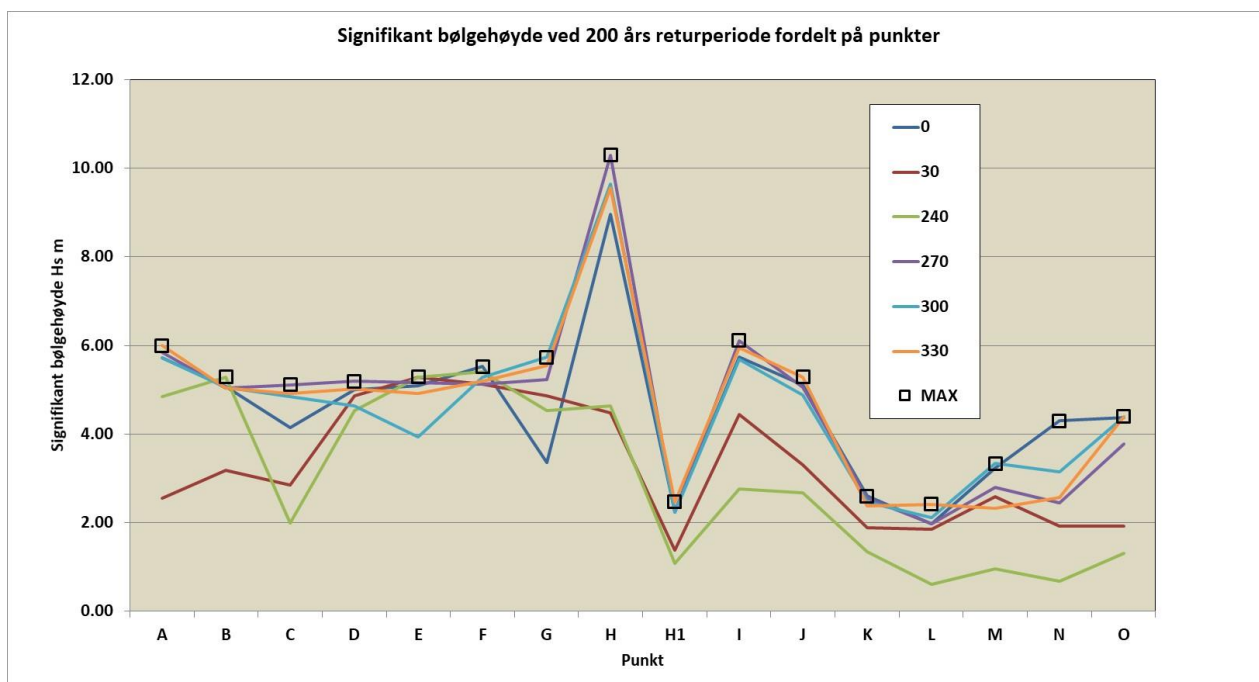
Figur 7 Fordeling av signifikant bølgehøyde ved innkommende bølger fra 300° med $H_s = 5.0$ m i åpent hav



Figur 8 Bilde av bølgeoverflaten ved innkommende bølge med $H_s = 5.0$ m fra 300° . Bølgekammen er rød.



Figur 9 Fordeling av signifikant bølgehøyde rundt anlegget ved innkommende signifikant bølgehøyde ved Anda $H_s = 15.8$ m fra 270°



Figur 10 Fordeling av signifikant bølgehøyde for punktene A - O ved 200 års tilstand i åpent hav. Bølgehøyden er begrenset av brytning, og vil derfor ikke bli større ved høyere stormer.

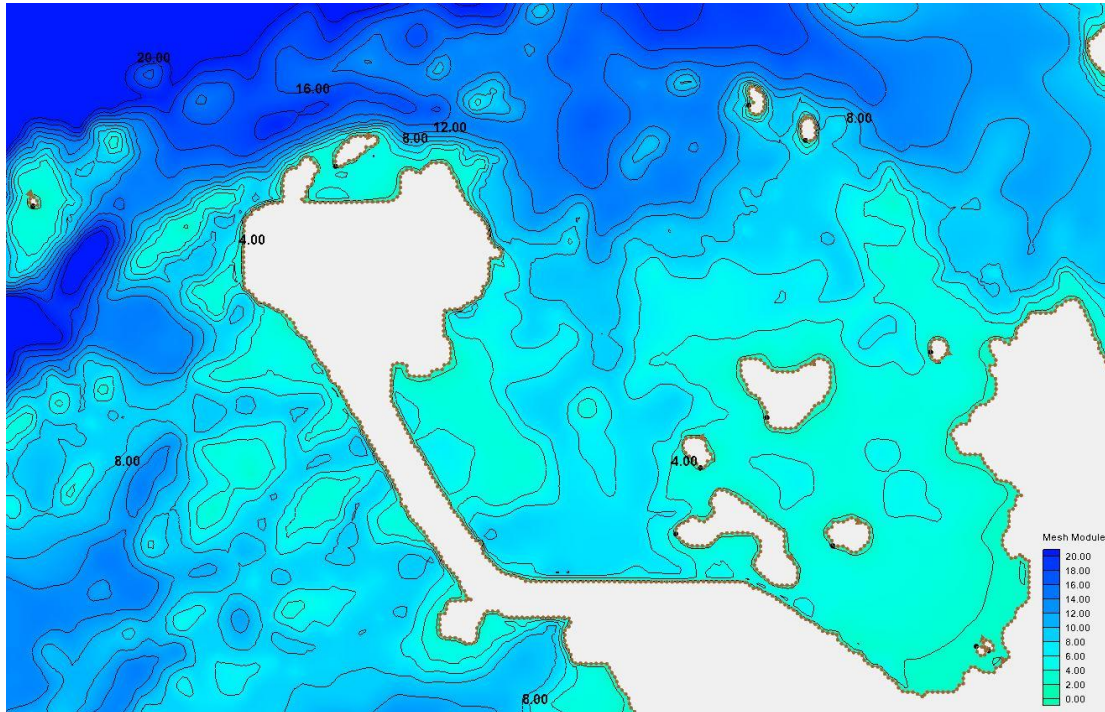
KONKLUSJON OG DISKUSJON

Den mest utfordrende delen av anlegget vil være nordsiden og deler av østsiden av baseområdet (Punkt H og Punkt I). På nordsiden kan man imidlertid utnytte de stedlige terrengformasjonene. Figur 11 viser at det finnes små holmer og skjær på utsiden av anlegget på nordsiden og at det er dannet et basseng med dybde i størrelse 3 - 5 m her. For å sikre seg mot de ekstremt høye bølgene som kan komme inn her, bør man fylle hele dette bassenget med stor blokkstein. Dimensjonering og størrelser er ikke bestemt, men vi anslår at det vil være behov for et ytre lag av blokker med størrelse 12.0 - 15.0 tonn, og et indre lag i størrelse 5.0 - 8.0 tonn. Denne konstruksjonstypen er en variant av såkalt skuldermolo («berm breakwater»), og er karakterisert som ultra-lav og ultra-brei skuldermolo.

En slik konstruksjon er bygget for Statens Vegvesen ved E10 Reine. Her er det utnyttet det faktum at en tunnel-drift skapte store mengder overskuddsmasse, og det ble da bygget en lav fylling i sjøen med bredde 25 - 40 m og blokker i størrelse 10 - 12 tonn. Dette gav et positivt resultat for bølgene som tidligere slo over vegen. Et bilde fra dette prosjektet er vist i Figur 12. Fyllingen ved Reine er bygget for en bølgehøyde på ca $H_s = 7.0$ m. Det er sannsynlig at en tilsvarende konstruksjon ved Børvågen vil måtte være noe høyere og ha noe større steinblokker, men vi anser det som mulig å gjennomføre. Forholdene ved Børvågen er også slik at det vil være mulig å utnytte naturlige formasjoner for å skape en avstand mellom bølgen og anlegget, slik som f. eks ved Punktene H og H1 (Figur 5).

Figur 11 viser nærbilde av bunnen rundt anlegget. Bildet er basert på de foreløpige dybde data som er tilgjengelige, og viser at det på nord og vestsiden av utfyllingsområdet er formasjoner i bunnen som kan og bør utnyttes, og det også er mulig på moloens SV-side.

En detaljert dimensjonering av fyllingene bør foretas nå oppmålingen av bunnen er utført.



Figur 11 *Detaljert dybdekart ved Børvågen*



Figur 12 *Eksempel på utradisjonell løsning med en lav brei skulderfylling ved Hamnøy/Reine, E10 i Lofoten*

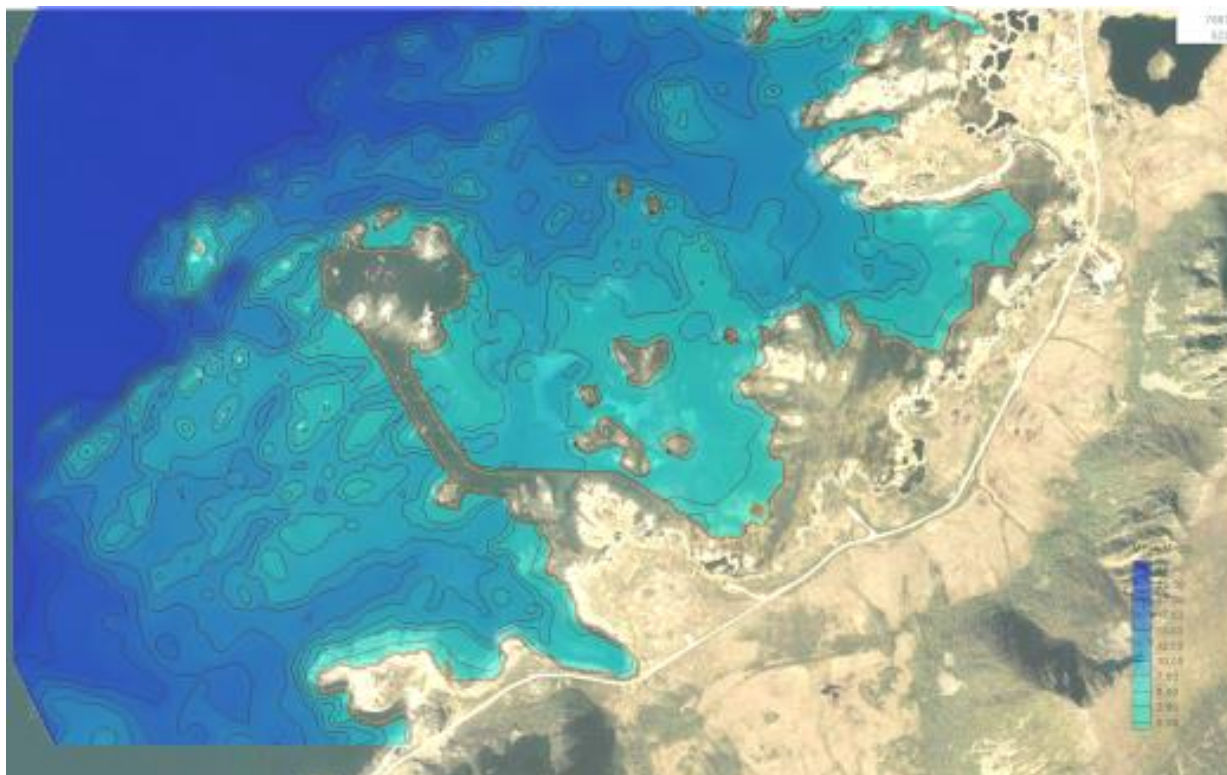
VIDERE ARBEID

Beregningen av bølgehøyder ved anlegget er basert på de tilgjengelige dybdedata som er beskrevet i kapittel DATAGRUNNLAG, underpunkt 1. Selv om disse data ikke har høy oppløsning i området, har de tilstrekkelig detaljering til at beregningen av bølgehøyder blir god nok.

Figur 13 viser dybdedatamodellen overlagret på et flyfoto av Børvågen fra 2013. Det er bare i de innerste vikene og grunne områder nær land at det finnes tydelige avvik, og disse avvikene er ikke viktige for bølgemodelleringen.

Figur 14 viser det samme flyfotoet, men med overlagret bølgemønster fra en situasjon med bølgehøyde $H_s = 15.8$ m fra vest (200 års tilstand, tilfelle 19-200).

Vi konkluderer fra disse to montasjene at de tilgjengelige dybdedata er gode nok til bølgemodelleringen.



Figur 13 Flyfoto fra 2013 med overlagret dybdedatamodell fra bølgemodelleringen



Figur 14 Flyfoto fra 2013 med overlagret bølgemønster under 200-års storm fra vest

Byggherren har også startet et arbeid for mer detaljert oppmåling av området. Det nye dybdekartet som er målt inn er vist i Figur 15. Her er målingene imidlertid begrenset til et belte mellom kote -5.0 m og -35.0 m. En oversikt over de nye data er vist i Figur 15, og en sammenligning mellom de dybdedata som er anvendt i bølgemodelleringen og de nye data er vist i Figur 16.

Det er ønskelig å få mer presise dybdedata for en sone som ligger 0 - 100 m ut fra fyllingsfronten. Hele fyllingen (moloen og baseområdet) er så sterkt utsatt for bølger at det vil være avgjørende for økonomi og sikkerhet at man kan utnytte naturlige formasjoner i terrenget og på bunnen til å bygge opp stabile fyllingsfronter. Dette gjelder spesielt for baseområdets nordre og vestre del, og i noen grad for den østre delen.

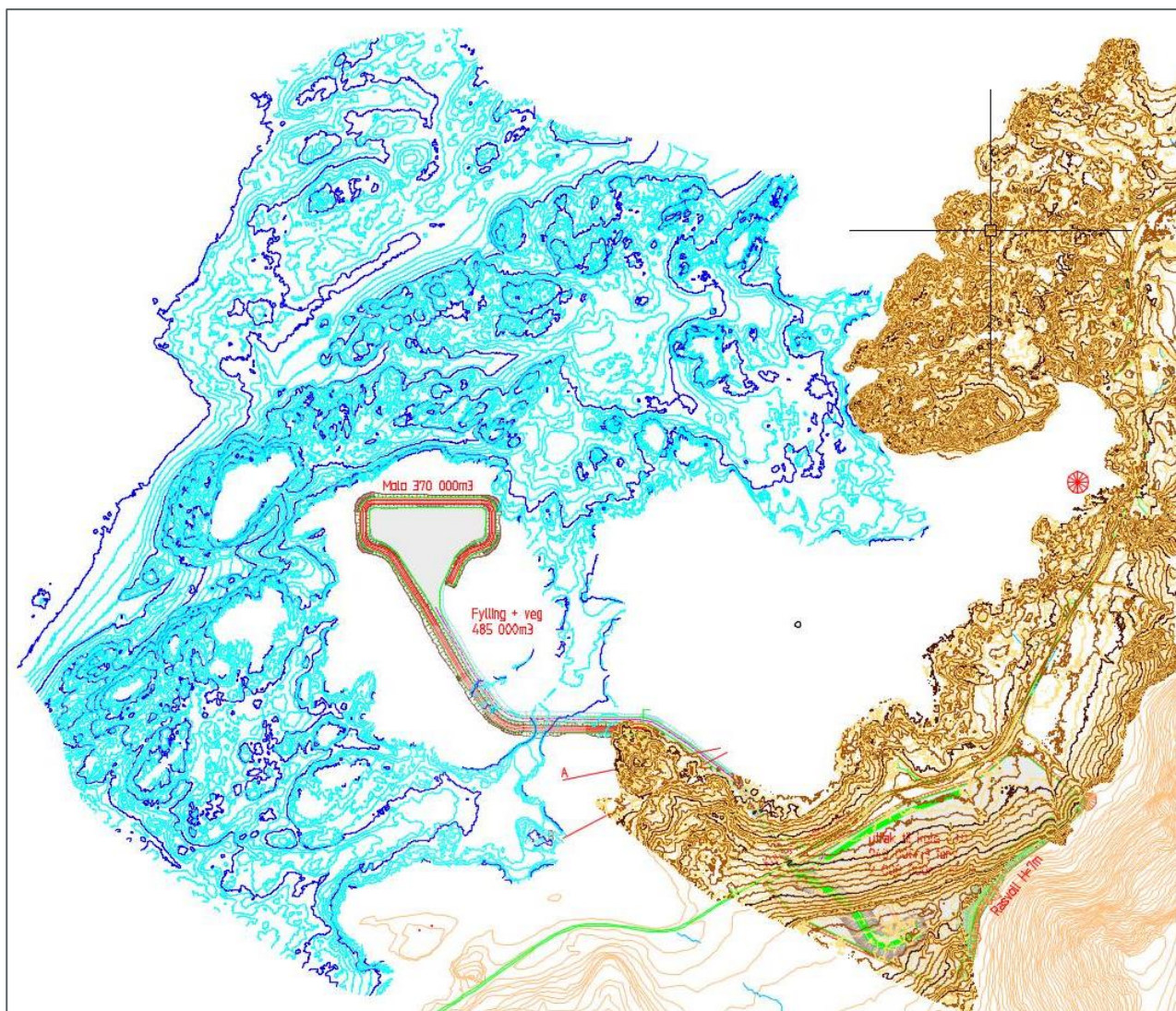
De aktiviteter som anbefales videre er derfor:

1. Oppmåling av det gjenstående området rundt fyllingen og moloen mellom kote ca -2 og -5
2. Prosjektering av fyllingen med steinstørrelser, ytre mål og høyder.

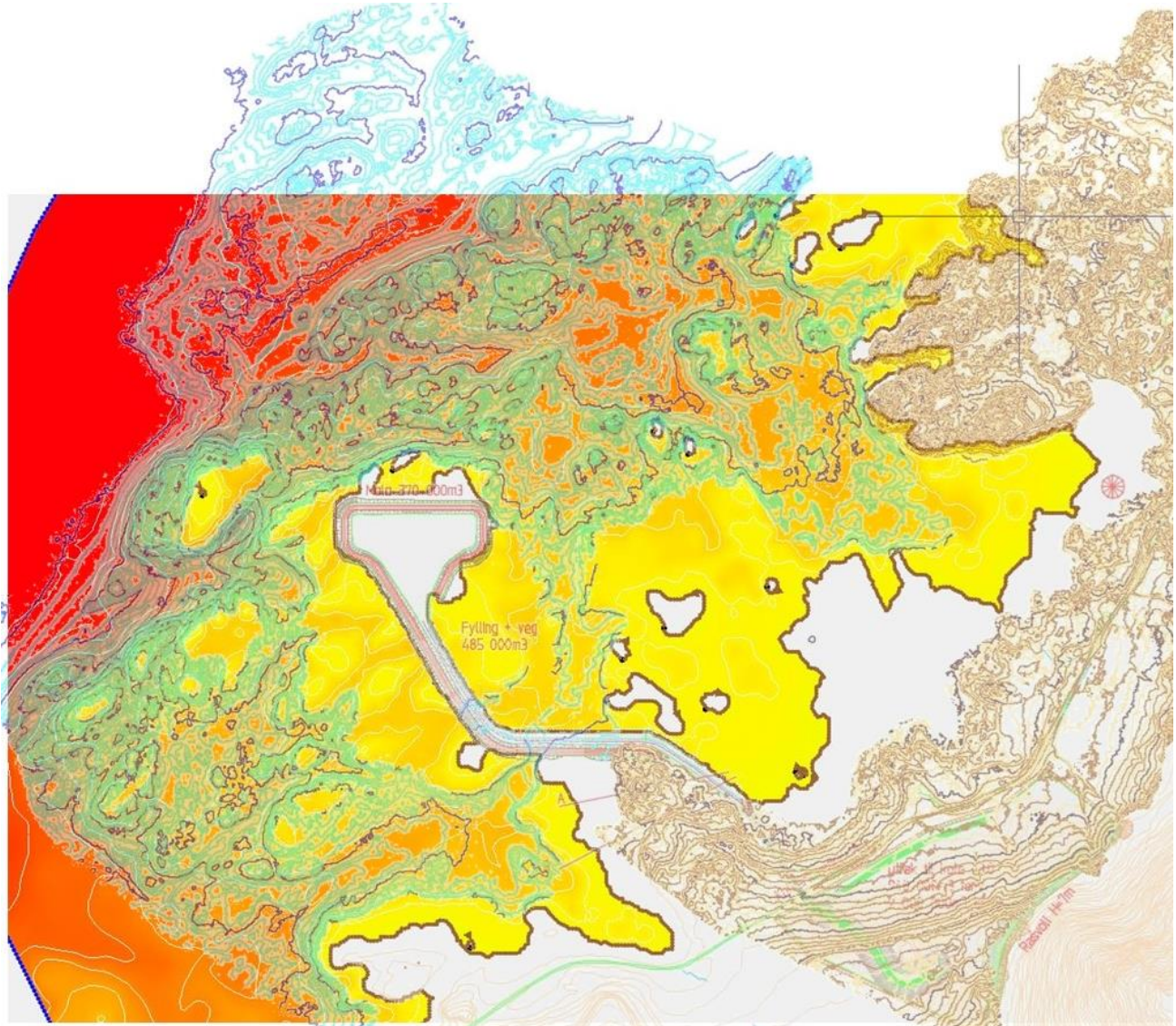
De dybdemålingene som er utført til nå er utført fra båt, og det medfører begrensninger på hvor nært land og på hvor grunt vann det kan måles. I tillegg kan det bare måles på dager med lite bølger.

Et alternativ er å måle fra en drone og basere observasjonene på fotogrammetrisk tolkning. Vi er ikke kjent med nøyaktigheten av denne typen målinger, men man kan anta at presisjonen avtar raskt med økende vanddybde. For vårt formål er imidlertid ikke presisjonen i dybdeobservasjonene avgjørende. Det er mer viktig å finne ut hvilken type bunn som finnes, og om det finnes naturlige formasjoner (undervannsrygger, skjær og holmer) som kan utnyttes for å skape stabile fyllinger.

Et eksempel på bruk av drone til oppmåling av moloer og grunne områder i sjøen er vist i Figur 17 og Figur 18.

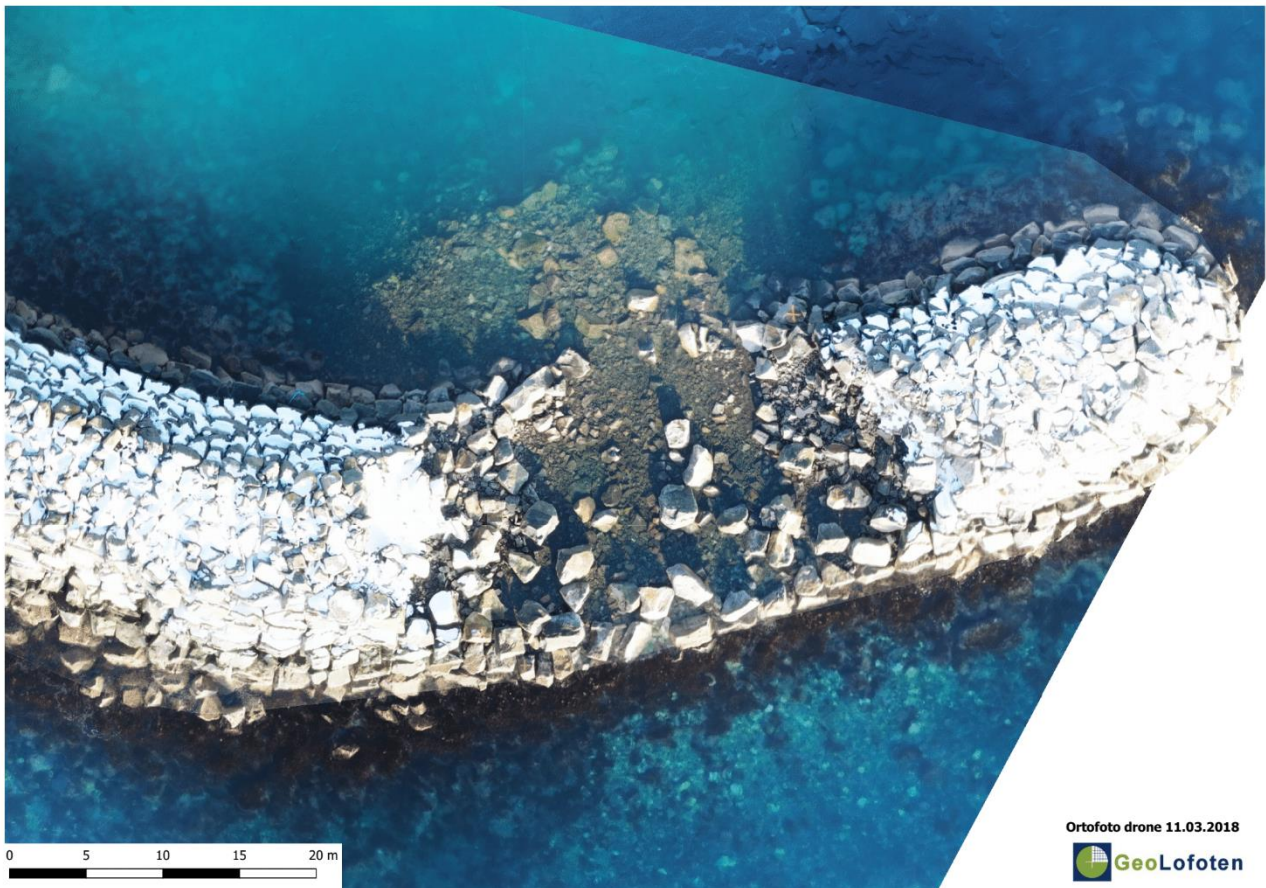


Figur 15 Dybdedata innmålt av Secora mellom kote -5.0 m og -35.0 m (blått); land-data fra Kartverket (brunt); og utfylling i sjøen (rødt og grått) fra Norconsult

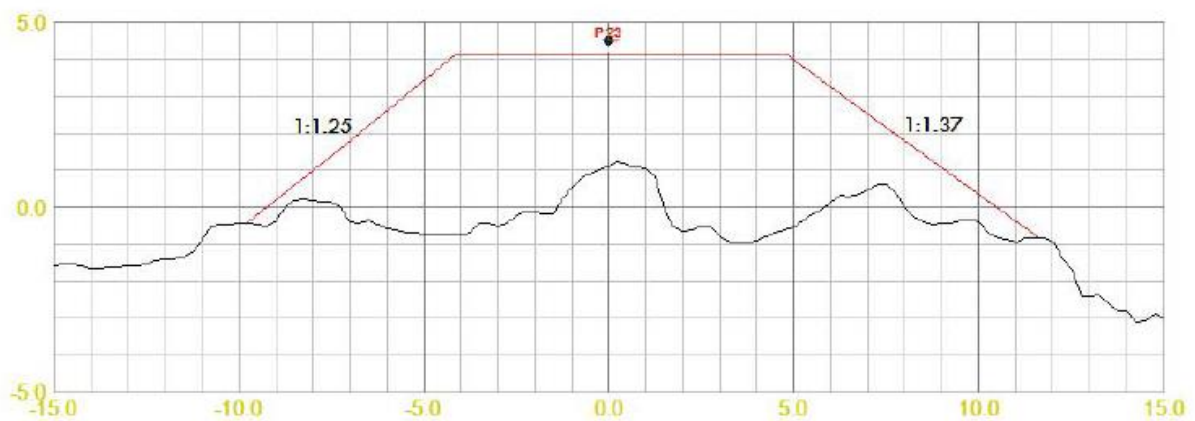


Figur 16 Dybdedata fra Secora overlagret på tidligere dybdedata fra Kartverket (primærdata). Primærdata er vist som fargekodete data fra gult (0.0 m) til rødt (-35.0 m)

Oppdragsgiver: **Andøya Space Center**
Oppdragsnr.: **5173196** Dokumentnr.: **3**



Figur 17 *Dronefoto av skadet molo i Steinesjøen, Bø i Vesterålen (GeoLofoten for Kystverket)*



Figur 18 *Volumberegning av skadet området i Steinesjøen (GeoLofoten for Kystverket)*

Notat

Oppdragsgiver: **Andøya Space Center**
Oppdragsnr.: **5173196** Dokumentnr.: **3**

2	2019-07-31	Fagnotat bølgesimulering og dimensjoner av fylling	Arne Lothe	Onno Musch	Arne Lothe
1	2019-07-08	Fagnotat bølgesimulering og dimensjoner av fylling	Arne Lothe	Onno Musch	Arne Lothe
Versjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult AS som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører Norconsult AS. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.