

Oppdragsgiver: **On arkitekter og ingeniører AS**

Oppdragsnr.: **5202639** Dokumentnr.: **Havn-01**

Til: Odd Morten By

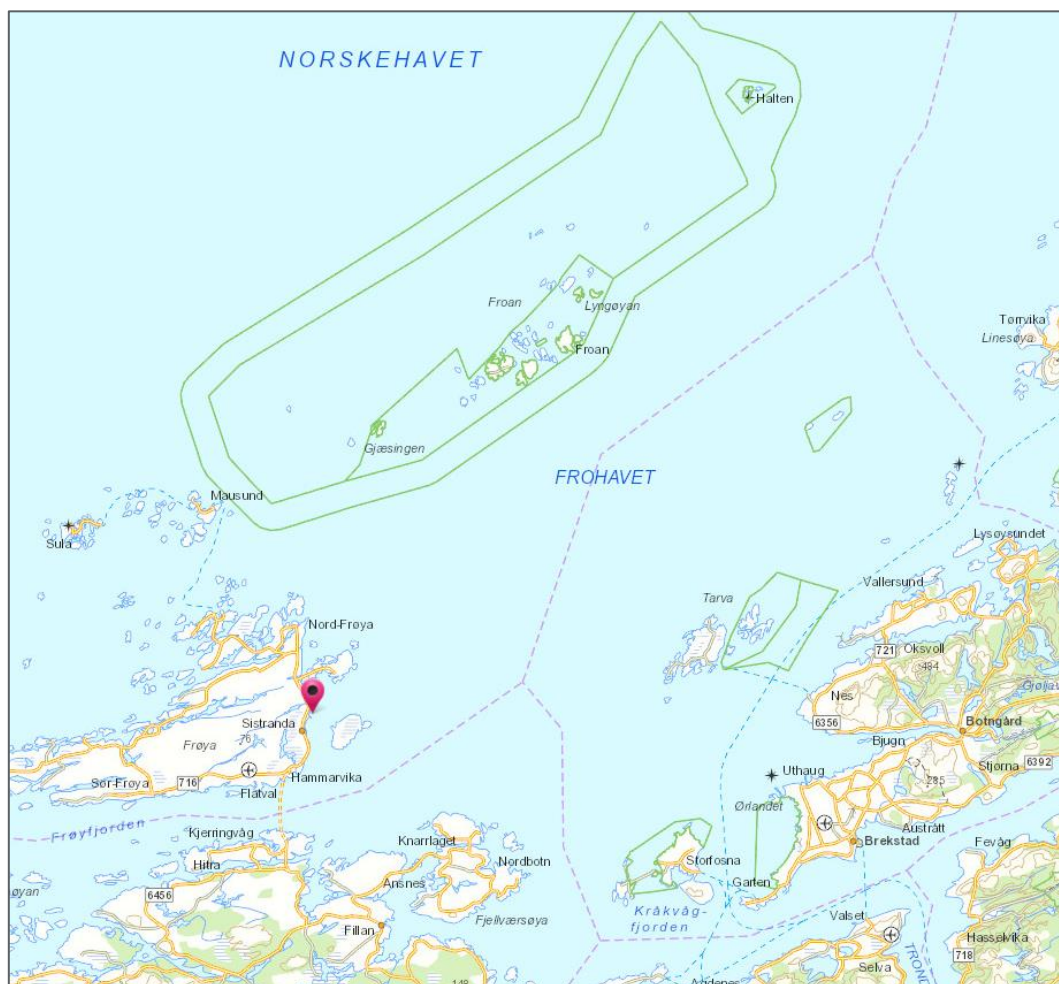
Fra: Magnus T. Bach-Gansmo

Dato: 2020-04-19

► Bølgeanalyse og erosjonssikring - Siholmen

Siholmen AS har engasjert On arkitekter og ingeniører AS for å bistå med reguleringsarbeid av Siholmen, og i den forbindelse er Norconsult engasjert for å estimere bølgehøyder og konkludere med nødvendige erosjonssikringsdimensjoner.

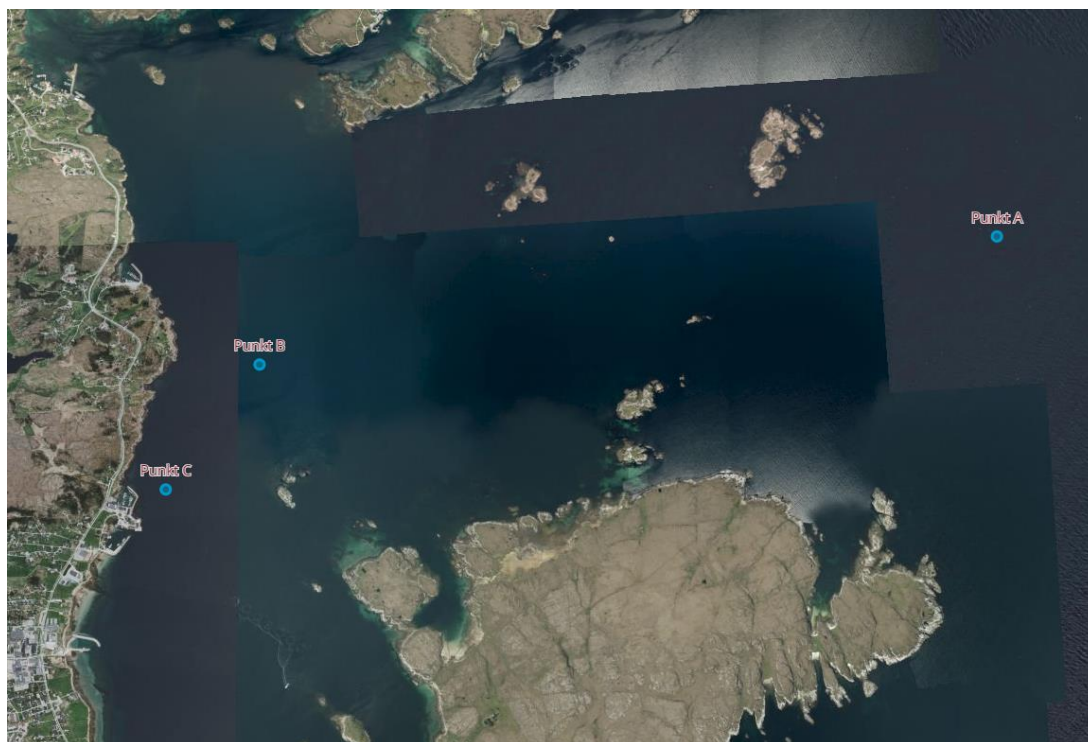
Det er planlagt å fylle ut i sjøen for å tilrettelegge for boliger, industri og en småbåthavn i tillegg til å rette ut den eksisterende moloen. Reguleringsplanen er vist Figur 3.



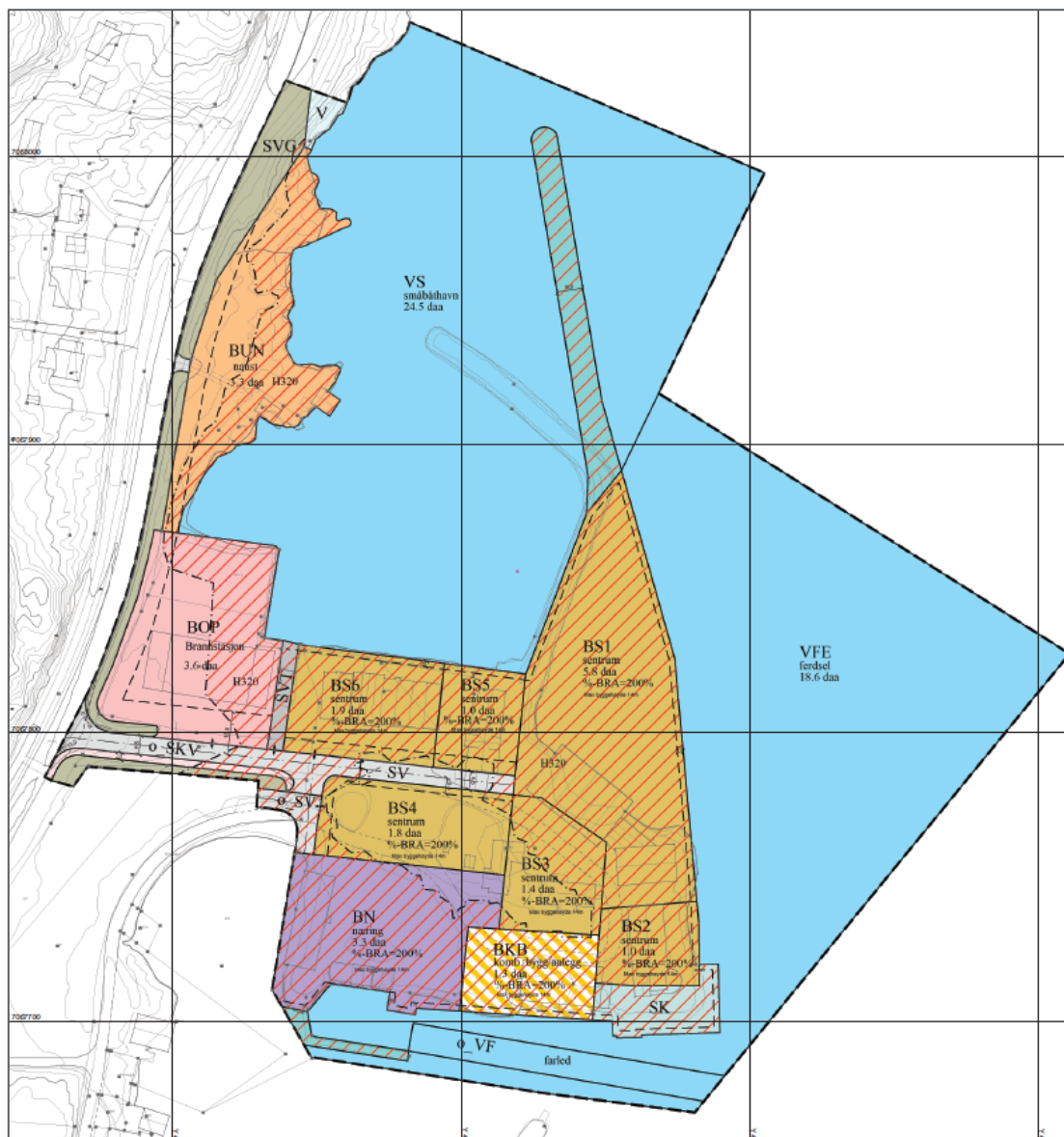
Figur 1 Oversiktskart. Tiltaket er markert med den røde pinnen.

Notat

Oppdragsgiver: **On arkitekter og ingeniører AS**
Oppdragsnr.: **5202639** Dokumentnr.: **Havn-01**



Figur 2 Flyfoto. Vind- og hav-bølger er estimert i Punkt C.



Figur 3 Reguleringsplanen.

Stormflo

Stormflo er betegnelsen for fenomenet at havnivået under spesielle værforhold kan bli meget høyt. De viktigste faktorene som gir opphav til stormflo er:

1. astronomisk tidevann, spesielt rundt fullmåne og vår/høst-jevndøgn
2. lavt luft-trykk
3. langvarig pålandsvind.

Merk at stormflo ikke inkluderer effekter med kort varighet, som vanlige stormbølger (5 – 20 s) eller svingninger i havnebassenger (1/2 – 5 minutter).

Det er observert at det alminnelige middelvann-nivået i havet stiger på global basis. Denne utviklingen ventes å fortsette innenfor de neste 100 år. I Norge har vi imidlertid også en landheving som er et resultat av at landet ble presset ned under siste istid. Summen av disse to effektene kalles netto vannstandsheving. I noen deler av landet vil landhevingen være større enn økningen i vannstanden i havet i overskuelig framtid. Landhevingen er ujevnt fordelt i landet og er størst der hvor isdekket var mektigst. Samtidig er økningen i middelvannstand i havet heller ikke jevnt fordelt over kloden. Dette gir opphav til ulike estimater på netto heving av vannstanden for Norges kommuner.

Det er benyttet siste tilgjengelige estimater på framtidig klimadrevet endring i middelvannstand, gitt i en rapport fra 2015 [1], og vann-nivå basert på data fra nærmeste standardhavn som er Heimsjø. Stormfloverdier for sikkerhetsklasse F1 og F2 med klimapåslag frem til 2100 er listet opp i Tabell 1 for Frøya kommune.

Tabell 1 Estimerte stormflohøyder for Frøya kommune i cm over NN2000.

År	Estimert stormflohøyde over NN2000, scenario RCP 8.5, spredning 95 %, 20 år returperiode, sikkerhetsklasse F1	Estimert stormflohøyde over NN2000, scenario RCP 8.5, spredning 95 %, 200 år returperiode, sikkerhetsklasse F2	Kommentar
2020	192 cm	220 cm	
2050	220 cm	248 cm	Benyttet for dimensjonering av molo foran småbåthavn
2090	255 cm	283 cm	Dimensjonerende stormflo for sikkerhetsklasse F2
2100	264 cm	292 cm	

Til sammenlikning er høyeste observerte vannstand i Heimsjø 208 cm over NN2000 [2].

Det er noe avvik mellom estimatet på 283 cm NN2000 ovenfor og det offisielle tallet 263 cm NN2000 som finnes blant annet på nettsiden sehavniva.no. Stormflo-estimat i hht klasse F2 er summen av 200 års stormflo i dag og et tillegg for antatt netto heving av middelvannstand i havet ved Siholmen fram til 2090 (altså inkludert effekter av landheving). Årsaken til avviket er estimatet på 200 års stormflo i dag. Her melder sehavniva.no at 200 års stormflo på Sistranda er 203 cm NN2000, men det rapporteres samtidig at høyeste målte verdi ved Heimsjø (hvor vannstandsmålingene er hentet fra) er 208 cm NN2000 for målinger siden 1928. Dette er ikke teoretisk umulig, men det er ikke konservativt. I vår alternative metode får vi 200 års stormflo på 220 cm NN2000, og høyeste registrerte verdi har en teoretisk returperiode på 71 år. Tillegget for klima-drevet vannstandstigning er det samme i de to metodene. Vi mener derfor at man ikke bør planlegge for et næringsområde i Flomklasse F2 for en stormflohøyde som allerede har vært overskredet en gang i løpet av de siste 90 år, og anbefaler derfor at man benytter den noe høyere verdien på 283 cm for klasse F2. Klasse F2 er 200 års returperiode i 2090, med klimascenario RCP8.5 og 95 % ensemblespredning.

Derimot bør toppen av nytt utfylt område legges over dimensjonerende stormfloverdi i 2090. Vi foreslår at toppen legges på minimum 3,0 m over NN2000, noe som gir 17 cm sikkerhet mot framtidig stormflo.

Bølger

Bølgebildet inn mot tiltaket består av to typer bølger som kan opptre samtidig eller uavhengig av hverandre:

- Lokale vindbølger fra sør, nord og nord-øst. Bølgene er beregnet ved hjelp av vindmålinger fra Ørland og strøklengdene over sjøen hvor vinden blåser.
- Havsjø fra Norskehavet og Frohavet. Bølgene er estimert ved hjelp av en numerisk bølgemodell.

Resultatet av bølgeanalysen gir en dimensjonerende kombinert signifikant bølgehøyde, H_s^1 og dimensjonerende spektral topp-periode, T_p^2 .

Havsjø

Havsjø inn mot Siholmen er estimert ved hjelp av en bølgemodell med oppløsning 240 x 240 m², se Figur 5. Modellen dekker 72 x 51.1 km², og viser hvordan bølgeenergien forplanter seg inn Frohavet.

Bølgedata er hentet i punkt A mellom Inntian og Uttian (Figur 2). Fra analysen ser vi bølger fra NØ kommer inn tilnærmet uhindret. Derimot vil havsjø fra NV og N passere øygruppen Froan, som demper bølgene betraktelig.

Videre fra Inntian – Uttian er det forbundet med vanskeligheter å estimere bølgene. Passasjen mellom disse øyene er brutt opp av 4 – 5 grupper av holmer og skjær, som delvis gir skjerming, og delvis sørger for at bølgene bryter eller endrer retning.

Vi har valgt en metode der vi identifiserer kanaler eller sektorer der man er sikker på at bølgene passerer gjennom, og så beregnet hvilken andel av bølge-energien i havet utenfor som har en retning som gjør at den kan passere inn disse kanalene. Metoden har vært testet mot mer omfattende og presise metoder, og det viser seg at denne såkalte sektor-metoden generelt er konservativ.

Havsjøen er så estimert i tre trinn (se Figur 2):

- H_s og T_p er hentet fra bølgemodellen i punkt A for bølgeretning i åpent hav = 30°
- Fra Uttian – Inntian til et punkt B utenfor Tuvneset
- Fra Tuvneset og til punkt C utenfor tiltaket.

200 års signifikant bølgehøyde, $H_{s,hav}$ og tilhørende spektral topp-periode, $T_{p,hav}$ er estimert til følgende:

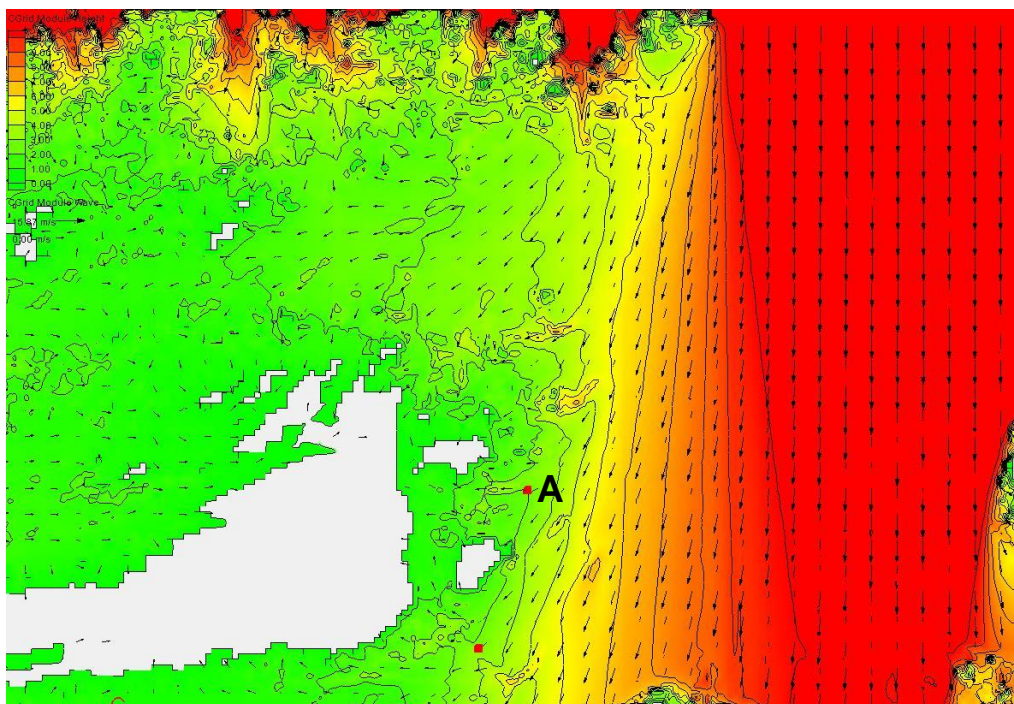
$H_{s,hav} = 1,6 \text{ m}$

$T_{p,hav} = 12-16 \text{ s}$

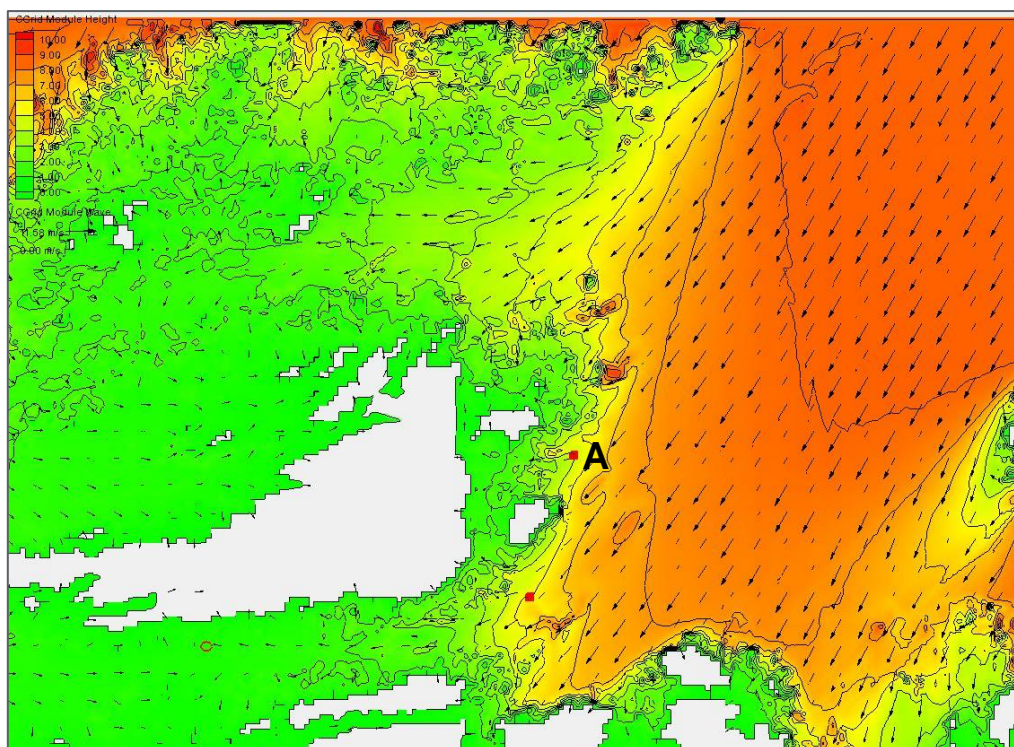
Tilhørende bølgelengde på 20 m dyp vil ligge mellom 150 - 220 m.

¹ Signifikant bølgehøyde, H_s er definert som middelverdien av den høyeste tredjedelen av alle bølger i en storm eller i en registrering. Innenfor en slik storm vil den høyeste bølgen være ca $H_{\max} \approx 2 H_s$ (målt fra bølgedal til bølgetopp).

² Spektral topp-periode, T_p er definert som den bølgeperioden (tidsavstanden mellom to påfølgende bølgetopper) som inneholder mest energi, dvs den perioden som vil oppfattes som den dominerende.



Figur 4 Benyttet bølgemodell. Inngangsparametere: $H_s = 12,0$ m, $T_p = 14,0$ s og bølgeretning i åpent hav = 0° . Vi ser at øygruppen Froan demper bølgene inn mot tiltaket betraktelig.



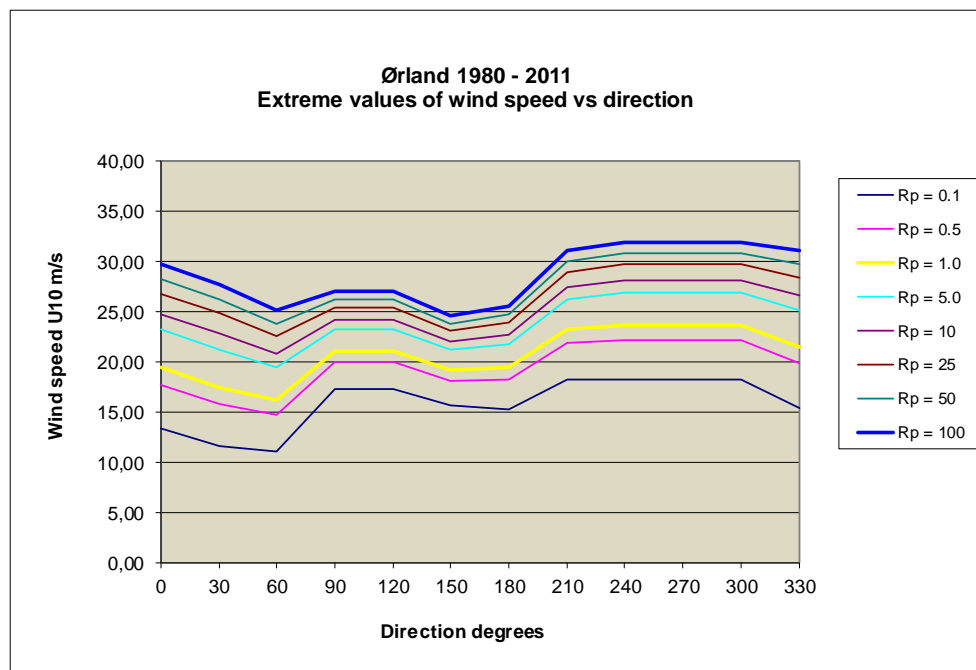
Figur 5 Benyttet bølgemodell. Inngangsparametere: $H_s = 8,0$ m, $T_p = 14,0$ s og bølgeretning i åpent hav = 30° .

Vindbølger

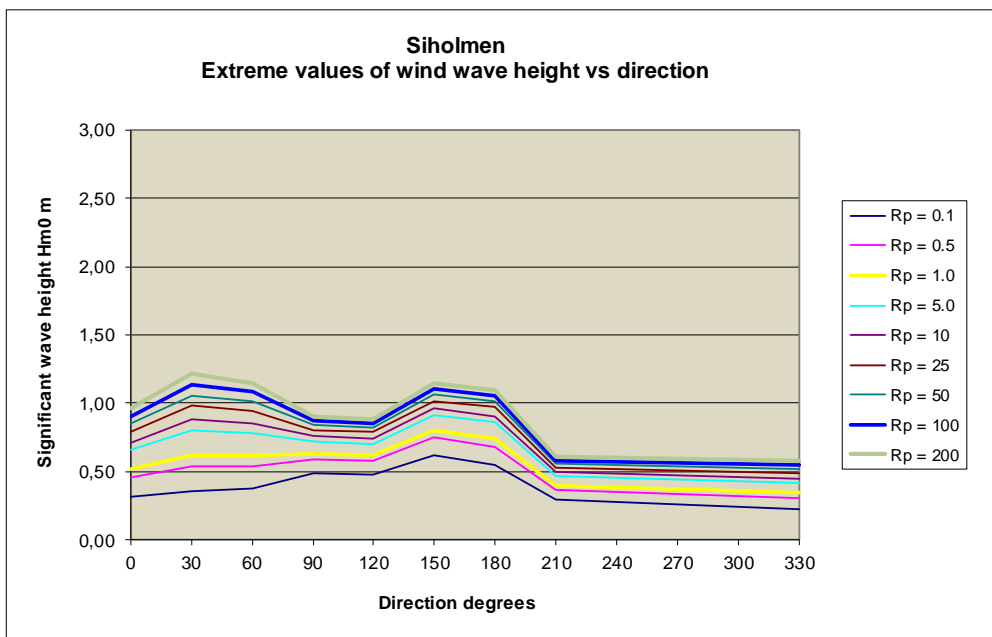
Vindsjø beregnes ved hjelp av en standard metode som er basert på en beregning av ekstremverdier av vind fra en nærliggende målestasjon, og en beregning av bølgene som kan oppstå ved den beregnede vinden. Vi benytter SINTEFs programvare HSCOMP til bølgeberegningen, og bølgene er beregnet i punkt C, se Figur 2. Punktet ligger ca. 150 m øst for tiltaket, og vil altså fange opp bølger fra sør- og nord-østgående retninger.

Det er benyttet vindmålinger fra Ørland i perioden 1980 - 2011. Man må regne med at vinden fra østlige retninger er noe sterkere ved Frøya, og vinden er økt med en faktor på 1,1 i sektoren 30°-120°. I beregningene er det lagt inn at vinden kan avvike med en 30° sektor i ugunstig retning. Resultatene er vist i Figur 6.

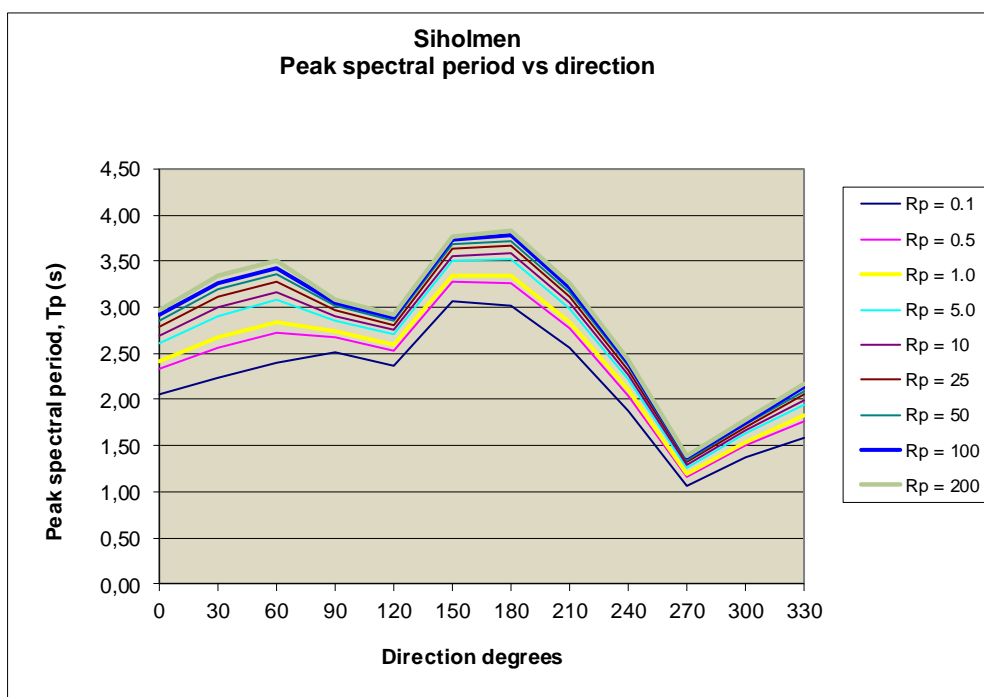
Signifikant bølgehøyde, $H_{s,vind}$ og spektral topp-periode, T_p er vist i henholdsvis Figur 7 og Figur 8.



Figur 6 Fordeling av ekstremvind ved Ørland. Den angitte vindhastigheten er 10 min middelvind som forekommer innenfor en storm med varighet på 3 timer. R_p er returperiode gitt i år. Det er antatt at vindretningen kan avvike med en 30° sektor i ugunstig retning.



Figur 7 Fordeling av estimerte verdier for signifikant bølgehøyde fra lokal vindsjø, $H_{s,vind}$ i punkt C, se Figur 2. R_p er returperiode gitt i år.



Figur 8 Fordeling av estimerte verdier for spektral topp-periode for vindsjø. R_p er returperiode gitt i år.

Kombinert signifikant bølgehøyde

Fra resultatene ser vi at dimensjonerende verdier for både vindsjø og havsjø vil opptre fra noenlunde samme retninger (nord-øst). Vi kan derfor ikke utelukke at ekstrem vindsjø vil opptre samtidig med ekstrem havsjø.

Kombinert signifikant bølgehøyde er funnet med følgende formel:

$$H_{s,kombinert,returperiode} = \sqrt{H_{s,vind,returperiode}^2 + H_{s,hav,returperiode}^2}$$

Dimensjonerende 200 års kombinert signifikant bølgehøyde er funnet til:

$H_{s,kombinert,200 \text{ år}} = 2,0 \text{ m}$

Med en tilhørende spektral topp-periode i intervallet 4-16 s.

Dimensjoner

TEK 17 stiller ulike krav til dimensjonering av konstruksjoner avhengig av konsekvensen ved oversvømmelse. Ved oversvømmelse menes all form for uønsket flom fra stormflo og bølger. Ved Siholmen skal det fylles ut et næringsareal samt at den eksisterende moloen skal utvides. Vi deler derfor tiltaket opp i to seksjoner:

- Erosjonssikring av fylling foran næringsareal
- Molo foran småbåthavn

Det er antatt at næringsarealet må tilfredsstillere sikkerhetsklasse F2, og erosjonssikringen av fyllingen må dermed dimensjoneres med et gjentakelsesintervall på 200 år + antatt havnivåstigning frem til 2090. F2 omfatter de fleste typer boliger og industribygg så lenge de ikke har en samfunnskritisk funksjon. Eksempler på samfunnskritiske konstruksjoner inkluderer blant annet sykehus, brannstasjoner og sykehjem.

Moloutvidelsen skal primært beskytte en småbåthavn, og konsekvensen ved oversvømmelse anses som liten. Man kan derfor argumentere for at moloen faller under sikkerhetsklasse F1, som krever et gjentakelsesintervall på 20 år i beregningene. Derimot vil F1 kunne føre til relativt hyppige skader på moloen. Vi anbefaler derfor at man benytter en kombinasjon av 20 års stormflo (F1) + 200 års signifikant bølgehøyde (F2) i dimensjoneringen.

I tillegg er det en relativt enkel prosess å heve moloer. Vi anbefaler derfor at moloen foran småbåthavnen dimensjoneres for antatt havnivåstigning frem til 2050. I 2050 man gjøre en ny vurdering av hvor mye faktisk har steget, og evt. heve moloen deretter.

Dimensjonerende parametere for erosjonssikringen av fyllingen og moloen er listet opp i Tabell 2.

Tabell 2 Dimensjonerende parametere

Parameter	Erosjonssikring av fylling foran næringsareal	Molo foran småbåthavn
Stormflo	2,83 m NN2000 Havnivåstigning frem til 2090, returperiode 200 år, sikkerhetsklasse F2.	2,20 m NN2000 Havnivåstigning frem til 2050, returperiode 20 år, sikkerhetsklasse F1.
Signifikant bølgehøyde	2,0 m Returperiode 200 år, sikkerhetsklasse F2.	2,0 m Returperiode 200 år, sikkerhetsklasse F2.

Dimensjoner er funnet ved hjelp av metoder beskrevet i molohåndboka [3].

Blokkstørrelser og lagtykkelser

Nødvendig median blokkvekt er funnet ved hjelp av formelverk av van der Meer, og det er antatt at blokkenes egenvekt er 27 kN/m^3 ($2,8 \text{ tonn/m}^3$). I beregningene er helningen satt til 1:1,3 og vi finner at median blokkvekt, W_{50} må være 3,0 tonn. Videre følger det at minste tillatte blokkvekt, W_{min} er 2,1 tonn og at 5 % av blokkene må være tyngre enn $W_{5\%} = 4,2$ tonn. Lagtykkelsen settes til 1,9 m, og blokkene skal plastres.

Mellom dekklaget og kjernemassene må det legges ut et filterlag, og beregningene viser at d_{50} bør være 270 mm. Standardfraksjonen FK 120/300 ivaretar dette kravet, og lagtykkelsen settes til $0,75 \text{ m} \pm 0,25 \text{ m}$.

Høyde

Sikringshøyden er funnet ved hjelp av formelverk av van der Meer, og bestemmes av mengden vann som tillates å skylle over moloen. EurOtop [4] har gitt ut anbefalinger på anbefalte overskyllingsmengder. Blant annet anbefaler referansen at overskyllingen ikke overskrider følgende:

- 0,03 liter per sekund per løpemeter (l/s/m) for alminnelig publikum.
- 1 l/s/m mot bygningsdeler.
- 0 - 10 l/s/m for sjøvant publikum.
- 10 l/s/m grense for småbåter på baksiden av moloen.
- 10 - 50 l/s/m for kjøretøy med lav hastighet og asfaltdekker.

Overskyllingsmengden er avhengig av moloens høyde og bredde. Det vil si at overskyllingen avtar når bredden og/eller høyden økes.

Når vi har bestemt en gjeldene overskyllingsgrense, finner vi så en kombinasjon av sikringens høyde over stille vann og bredden på toppen. Ettersom det vurderes som sannsynlig at dimensjonerende signifikant bølgehøyde kan opptre samtidig som stormflo, blir høyden summen av *stormflo + bølgepåslag*.

Erosjonssikringen av fyllingen foran næringsarealet må sikre bygninger og allmenn sikkerhet. Her stilles det konkrete krav i TEK 17 § 7-2, og sikringen må dimensjoneres med 200 års stormflo + antatt havnivåstigning frem til 2090. Selv om referansen anbefaler at overskyllingen ikke skal overstige 0,03 l/s/m og 1 l/s/m mot henholdsvis allment publikum og bygningsdeler, mener vi at det er forsvarlig å dimensjonere sikringen for 10 l/s/m som er grenseverdien for sjøvant publikum. Dette forutsetter at bygningene er dimensjonert for et fuktig klima.

Høyden på moloen som beskytter småbåthavnen er funnet ved å legge til grunn 20 års stormflo pluss fremtidig havnivåstigning frem til 2050 og bidraget fra 200 års signifikant bølgehøyde. EurOtop anbefaler at overskylling ikke overstiger 10 l/s/m mot småbåter fortøyd bak moloen, som er grensen for skade og mulig havari. Med småbåter mener vi gjerne enkle og åpne farkoster. Derimot ser vi i Figur 9 at båtene ved Siholmen er mer robuste med dekk og overbygning enn en typisk småbåt. Vi benytter derfor en noe høyere grenseverdi på 25 l/s/m.



Figur 9 Dagens småbåthavn. Foto er hentet fra Google Maps.

Høyde på erosjonssikring av fylling foran næringsareal

For erosjonssikringen kan vi finne en kombinasjon av sikringens høyde og bredde. I Tabell 3 er det listet opp 3 ulike kombinasjoner av tilstrekkelig bredde og høyde over NN2000.

En prinsippsskisse av erosjonssikringen er vist i Figur 10, merk at foten er skissert opp i figurene nedenfor.

Tabell 3 Forholdet mellom erosjonssikringens høyde i m over NN2000 vs. bredde. Overskyllingsgrensen er satt til 10 l/s/m under en kombinert hendelse av 200 års signifikant bølgehøyde og stormflo med klimapåslag frem til 2090 (2,83 m NN2000).

Bredde topp erosjonssikring	Total høyde inkludert stormflo med klimapåslag frem til 2090
3 m	4,9 m over NN2000
4 m	4,5 m over NN2000
5 m	4,1 m over NN2000

Høyde på molo foran småbåthavn

Dersom vi antar at det skal etableres en adkomstveg på moloen bør dekket beskyttes av et brystvern. En prinsippsskisse av en mulig moloutforming er vist i Figur 11, merk at foten er skissert opp i figurene nedenfor. Her er bredden på brystvernet satt til 2-3 blokker som vil dempe bølgene som flommer over og opp på vegen. Deretter finner vi at høyden på brystvernet må være 4,3 m over NN2000 for å holde oss innenfor overskyllingsgrensen. Bak brystvernet legges adkomstvegen noe lavere enn topp brystvern for å spare masser. Dersom høydeforskjellen mellom topp adkomstveg og brystvern blir høyere enn 1 m må blokkene sikres tilstrekkelig.

Fordi moloen er dimensjonert for overskylling må baksiden plastres med blokker. Det vurderes som tilstrekkelig å plastre baksiden av moloen med W50 = 1 tonn ned til +0,0 m NN2000. Fra 0,0 m NN2000 og

ned til sjøbunnen erosjonssikres skråningen med sprengstein fraksjonen 300/600. Merk også at foten på baksiden må erosjonssikres.

Sikring av foten

Sikring av foten avhenger av grunnforholdene ved fyllingsfoten og dybden.

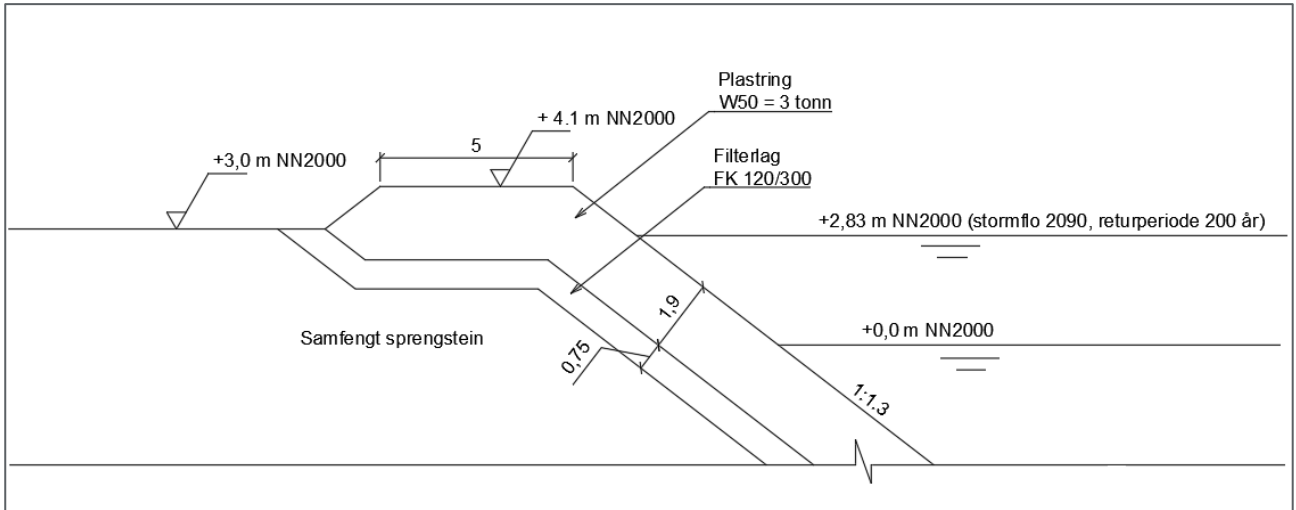
Der hvor blokkene løper over bart fjell må fjellets evne til å holde på blokkene vurderes i hvert enkelt tilfelle. Typiske dimensjoner på fortanning er $B/d_{50} = 2,8 - 3,0$ og $D/d_{50} = 1,4 - 1,7$. En prinsippskisse er vist i Figur 12.

Dersom foten ligger på sandbunn eller annen lett eroderbar masse må molo-foten sikres mot erosjon og undergraving. Erosjonsbeskyttelsen skal strekke seg minimum 3 m ut foran dekklaget og bestå av minimum FK 120/300. Lagtykkelsen settes lik som filterlaget på 0,75 m. En prinsippskisse er vist i Figur 13.

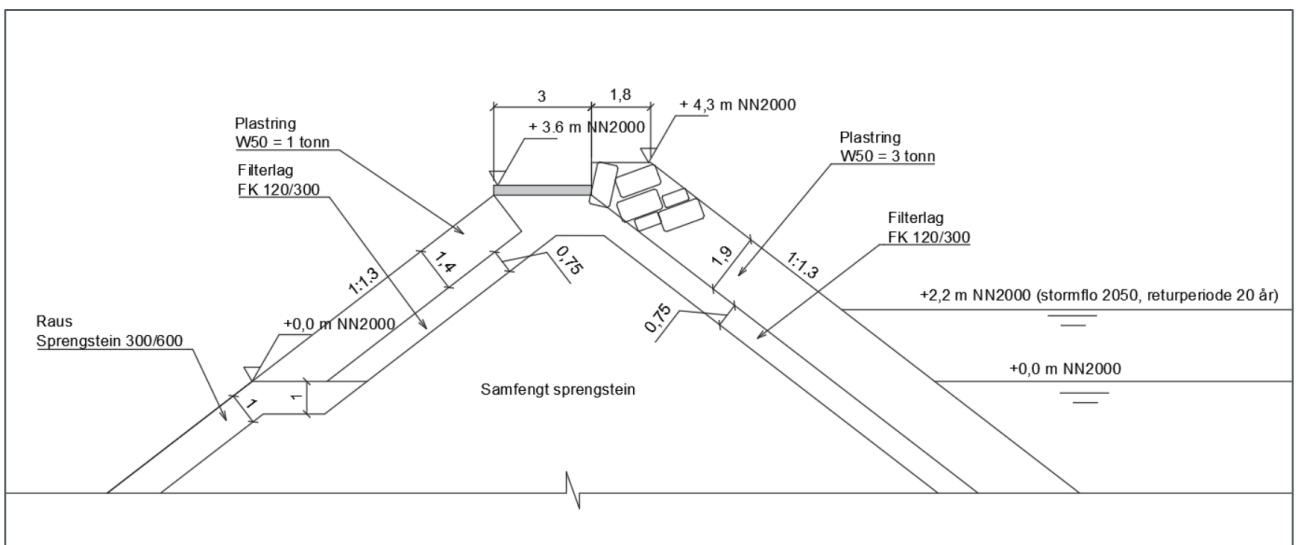
Dersom erosjonssikringsfoten ligger dypere enn 6,5 m kan man spare dekkblokker ved å bygge en høy fot/repos og avslutte dekklaget ved -5,0 m NN2000. En prinsippskisse er vist i Figur 14. Bredden på reposen settes til 3 m for å skape et godt fundament for dekklaget og det tillates noe avrundning over tid.

Tabell 4 Oppsummerende resultater

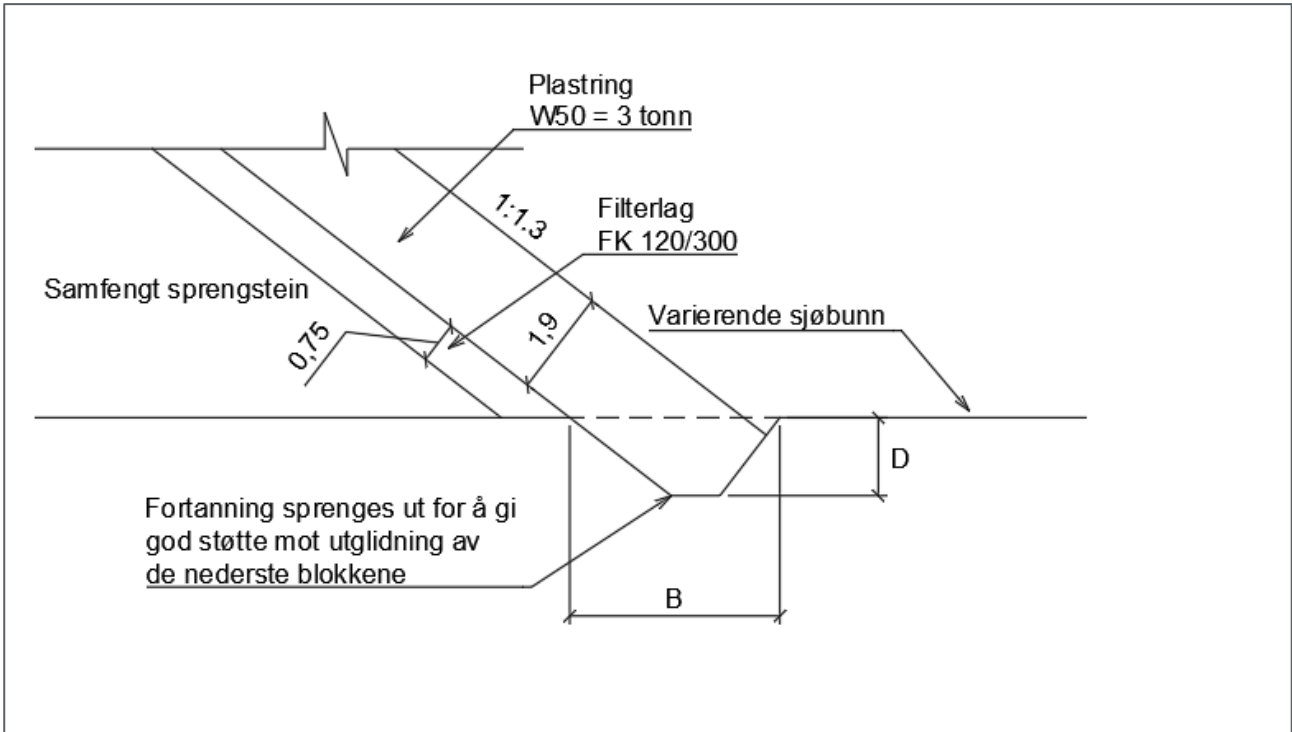
Parameter	Verdi	Kommentar
Signifikant bølgehøyde, H_s	2,0 m	Returperiode 200 år
Spektral topp-periode, T_p	4 - 16 s	
Stormflo i 2050	2,20 m NN2000	Returperiode 20 år
Stormflo i 2090	2,83 m NN2000	Returperiode 200 år
Anbefalt høyde utfyllt område	Minimum +3,0 m NN2000	Bør legges høyere enn 200 års stormflo i 2090.
Dekklag		
Median blokkvekt, W_{50}	3,0 tonn	
Minste tillatte blokkvekt, W_{min}	2,1 tonn	
5 % av blokkene må være tyngre enn, $W_{5\%}$	4,2 tonn	
Lagtykkelse	1,9 m	
Filterlag		
Steinfraksjon	FK 120/300	
Lagtykkelse	0,75 m \pm 0,25 m	
Høyde og bredde		
Erosjonssikring av næringsareal		
Overskyllingsgrense	10 l/s/m	Grense satt for godt sjøvante personer. Forutsetter at bygningene tåler et fuktig klima.
Høyde topp erosjonssikring	Se høyre kolonne i Tabell 3	
Bredde topp erosjonssikring	Se Tabell 3	
Molo foran småbåthavn		
Overskyllingsgrense	25 l/s/m	Grense satt skade og mulig havari av middels store fritidsbåter.
Høyde brystvern	4,3 m NN2000	
Bredde brystvern	2 blokker (ca. 1,8 m)	



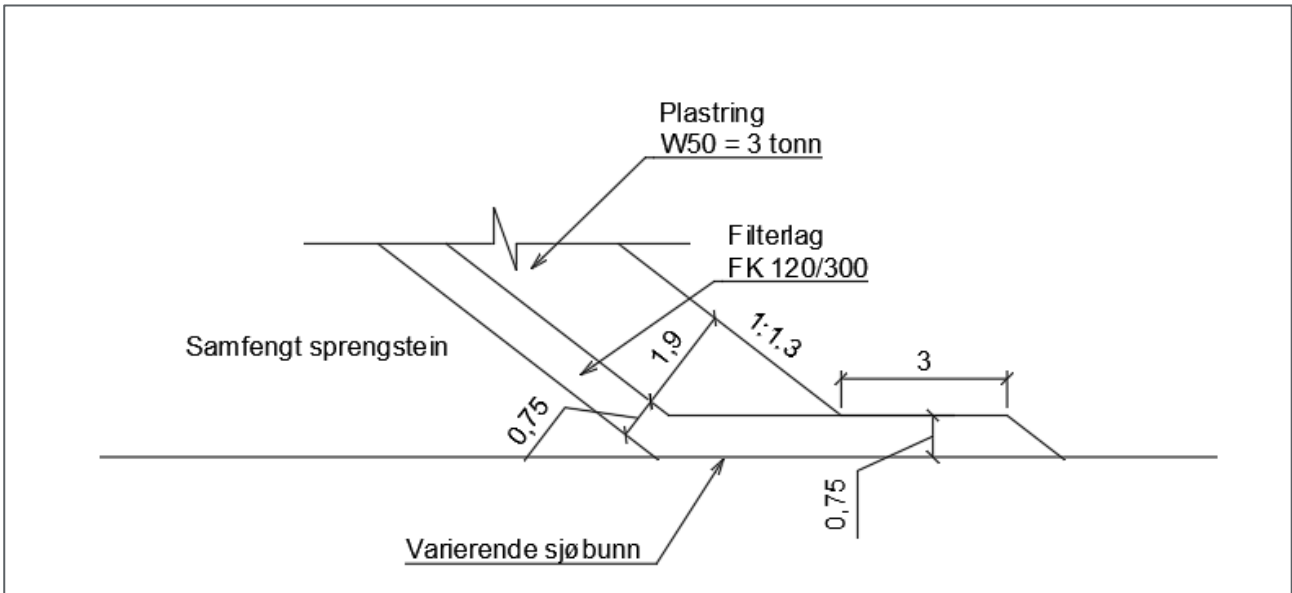
Figur 10 Prinsippskisse av erosjonssikringen foran næringsarealet. Her er bredden satt til 5 som gir en total sikringshøyde på 4,1 m NN2000.



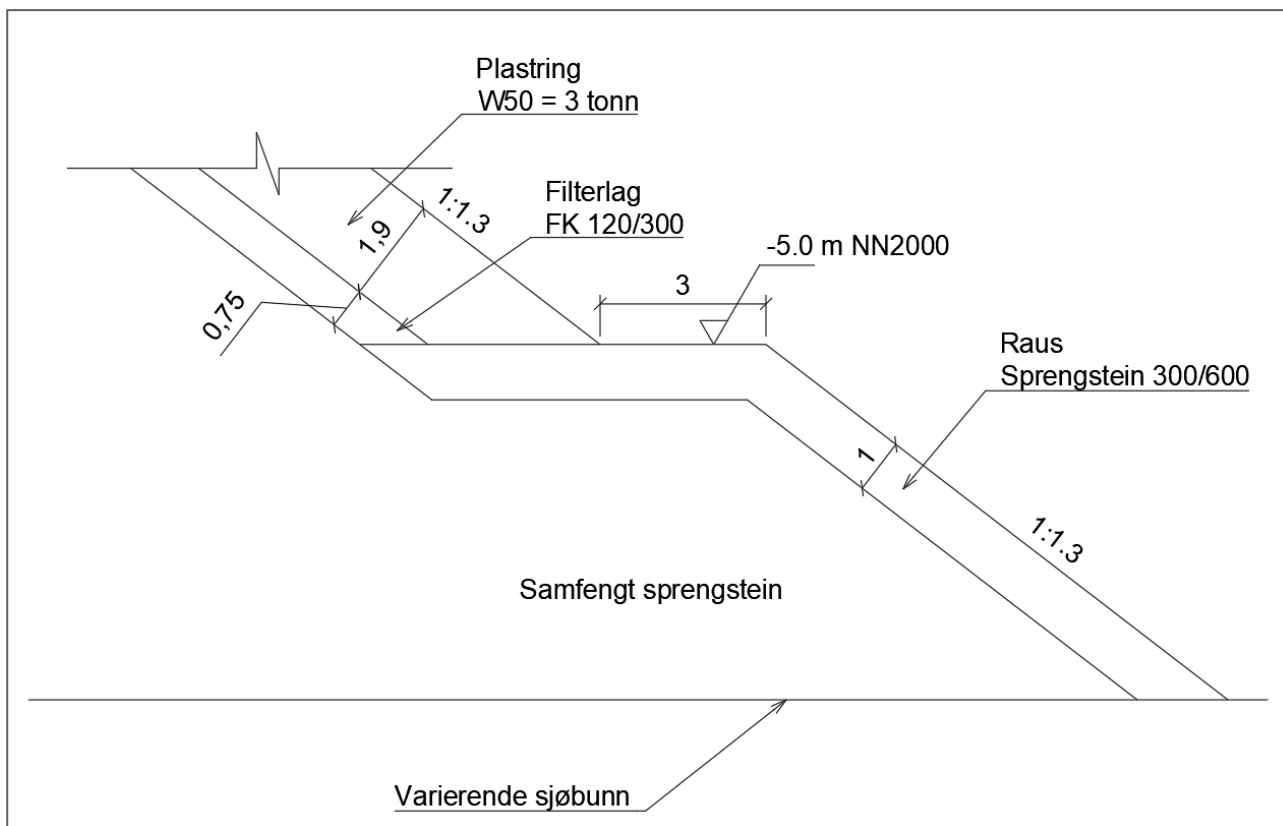
Figur 11 Prinsippskisse av molo foran småbåthavn.



Figur 12 Utforming fot over bart fjell. Fortanning vurderes i hvert tilfelle om det er nødvendig.



Figur 13 Utforming fot over eroderbar grunn. Dybde < 6,5 m NN2000.



Figur 14 Utforming fot – høy fyllingsfot med bredde repos = 3 m. Dybde > 6,5 m NN2000.

Referanser

- [1] M. Simpson, J. Nilsen, O. Ravndal, K. Breili, H. Sande, H. Kierulf, H. Steffen, E. Jansen, M. Carson og V. O., «Sea Level Change for Norway,» NCCS report no. 1/2015, 2015.
- [2] Kartverket, [Internett]. Available: kartverket.no/sehavniva. [Funnet 05 03 2020].
- [3] Kystverket, «Molohåndboka,» 2018.
- [4] EurOtop, «Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual,» 2007.

Notat

Oppdragsgiver: **On arkitekter og ingeniører AS**

Oppdragsnr.: **5202639** Dokumentnr.: **Havn-01**

02	2020-04-19	Kontrollert	MagBac	AreLo	OnFMu
01	2020-03-30	Utkast	Magnus T. Bach-Gansmo		
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.