

HEGRENESET AS

# HEGRENESET FLOM, BØLGER OG EKSTREMVANN

TEKNISK NOTAT

ADRESSE COWI A/S  
Parallelvej 2  
2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

## INNHOLD

|     |                                           |    |
|-----|-------------------------------------------|----|
| 1   | Introduksjon                              | 1  |
| 1.1 | Sammendrag                                | 3  |
| 2   | Meteorologiske data                       | 4  |
| 2.1 | Vind                                      | 4  |
| 2.2 | Vannstand                                 | 7  |
| 3   | Flomsikkert nivå                          | 8  |
| 3.1 | Sikringsnivåer og perimeterkonstruksjoner | 10 |
| 3.2 | Anbefaling for videre detaljplanlegging   | 24 |
| 4   | Referanser                                | 26 |

## 1 Introduksjon

Hensikten med dette tekniske notatet er å vurdere flomsikkert nivå for byutviklingsområdet Hegreneset i Bergen. Vurderingen er basert på COWIs erfaringer og tilgjengelige data om vannstand og vind i området, samt eksisterende situasjon innenfor Hegreneset. Med utgangspunkt i den definerte konseptplanen, som vises i Figur 1, estimeres foreløpige sikringsnivå langs ytterkantene.

Hegreneset ligger langs fjorden med flere kilometer strøk for bølgedannelse ved vestavind. Bølgepåvirkning kommer i tillegg til fremtidig havnivåstigning, og har betydning for kotene som må tas hensyn til langs kystlinjen i området.

En mer detaljert beregning og vurdering av flomsikkert nivå må gjøres i en senere fase av prosjektet, når byggene langs kystlinjen er ferdig regulert. Det må

PROJEKTNR.

A227976

DOKUMENTNR.

RAP001

VERSION

1.0

UDGIVELSES DATO

2021.10.01

BESKRIVELSE

Flomsikkert Nivå

UDARBEJDET

ADKE

KONTROLLERET

OJJ

GODKENDT

HRHE

også avklares hvilke krav det er til sikring mot bølgeoppskyll for boliger, veier og uteområder innenfor det regulerede området.

Avsnitt 1.1 gir et kort sammendrag over rapportens innhold, vurderinger og anbefalinger.



Figur 1      *Konseptplan for byutviklingsområdet Hegreaset i Bergen, datert des. 2020.*

## 1.1 Sammendrag

Hegreneset ligger i et risikoområde for stormflod og skal derfor sikres i henhold til Norsk Byggteknisk forskrift (TEK17), der Hegreneset hører til Sikkerhetsklasse F2. Dette tilsvarer et stormflodsnivå på kote +2,06 m NN2000 i år 2100 inkl. global havnivåstigning (SLR) og en 200 års vannstand

I rapporten er det undersøkt to kombinasjoner av vannstand og bølger, hhv. 200 års vannstand og 10 års bølger, og omvendt. Videre er adaptive løsninger vurdert i de tilfeller der dette kan aksepteres. En adaptiv løsning er i dette tilfellet en løsning som etableres til designhendelsen i år 2050 (dvs. lavere SLR), og som senere i prosjektet kan forhøyes, slik at den kan motstå designhendelsen i år 2100.

Figur 2 viser en konseptplan for Hegreneset med en oversikt over de ulike strekningene og områdene langs perimeteren. Konseptplanen angir også overordnede vurderinger og løsninger som foreslås langs perimeteren. Denne konseptplanen må ikke benyttes uten å ha lest de enkelte kapitlene om den relevante strekningen.

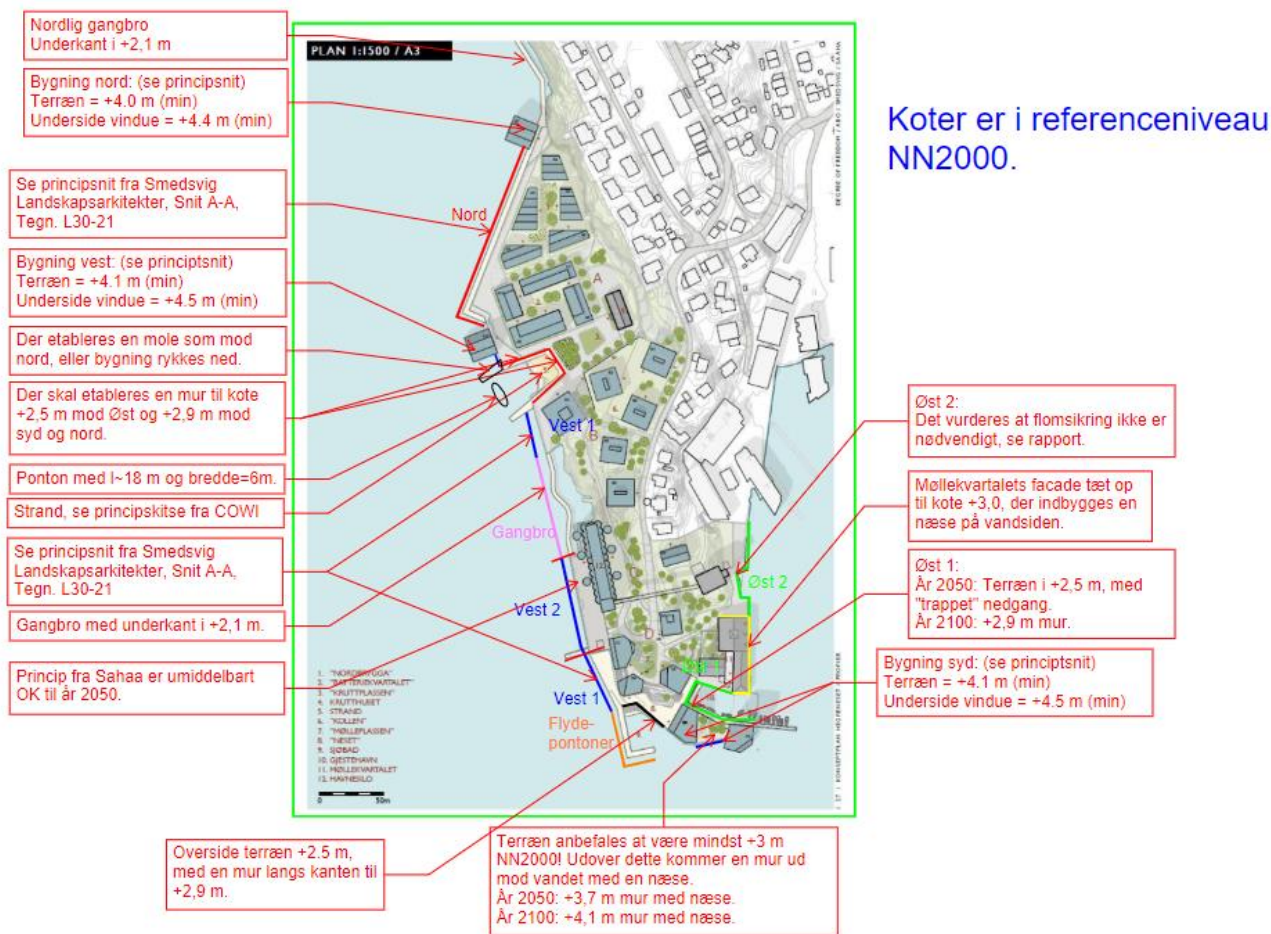
Den ytre perimeteren etableres med forskjellige løsninger og vil fungere som beskyttelse mot stormflo og bølgeoppstyll. Dvs. at generelt sett skal den ytre perimeteren være sammenhengende og med åpninger kun for å kunne bevege seg frem og tilbake mellom områder på Hegreneset og langs promenaden. Det skal være mulig å lukke disse åpningene i forkant av varslede ekstremhendelser med for eksempel sandsekker.

Generelt anbefales følgende:

- > Terrenget bak perimeteren på Hegreneset anbefales ikke å etableres under kote +2,5 m NN200. Lavere terrenget kan etableres, men da må det være særlig fokus på avvanning i disse områdene. Det er stor usikkerhet knyttet til forventet vannstandstigning etter år 2100, så jo høyere terrengkote som velges, dess lengre er prosjektet sikret for fremtiden.
- > Bygninger bak perimeteren bør ikke etableres med terreng under kote +2,5 m NN2000.
- > Bygninger som inngår i stormflodssikringen/perimeteren bør ikke etableres med terreng under kote +3,5 m NN2000.
- > Bygninger som etableres på vannet og som inngår i stormflodssikringen bør ikke etableres med terrengkote under ca. +4,0-4,1 m NN 2000.

For spesifikke vurderinger og nivåer knyttet til stormflodssikringen av Hegreneset henvises det til Figur 2 og de enkelte underkapitlene som omfatter delstrekningene kap. 3.1.

I kapittel 3.2 presenteres anbefalinger for videre forløp i prosjektet, som det anbefales å lese for å få et bedre overblikk over mulige utfordringer og problemtillinger.



Figur 2 Konseptplan for Hegreneset med resultater fra de enkelte vurderingene for de anviste strekningene og områdene.

## 2 Meteorologiske data

### 2.1 Vind

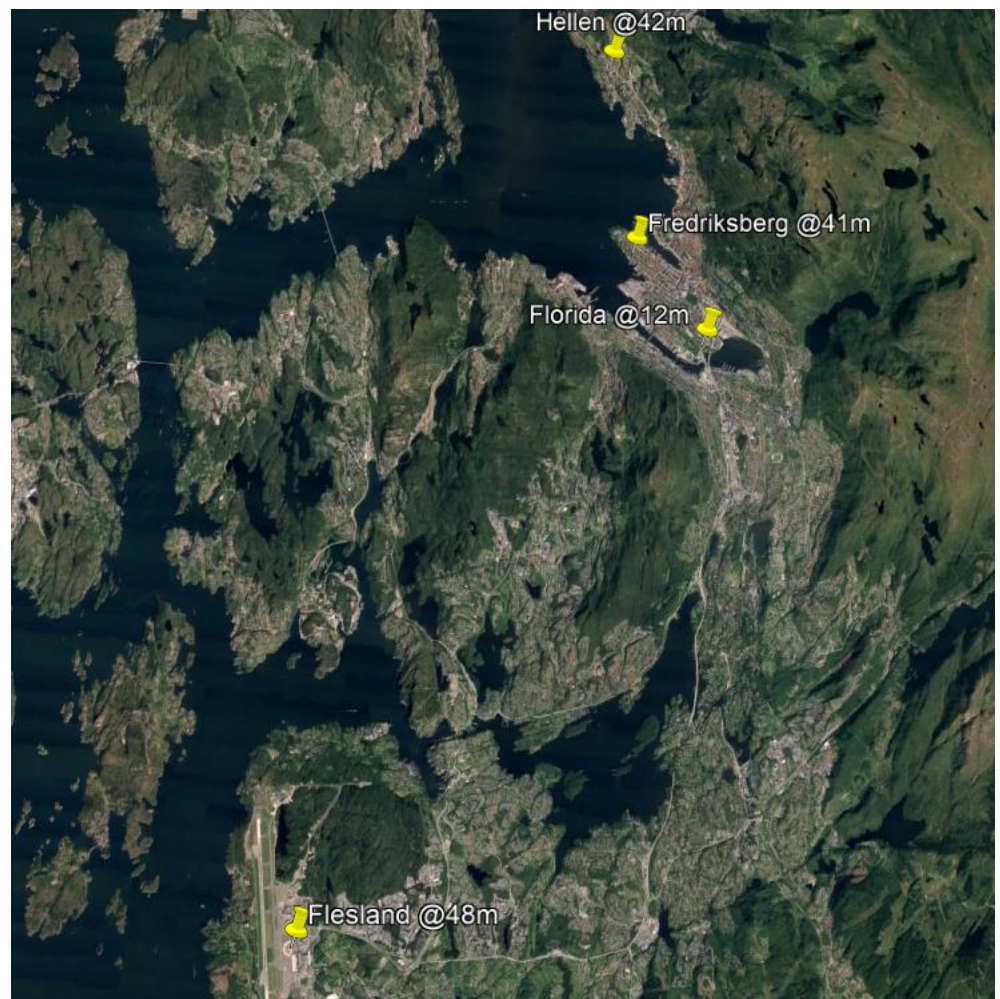
Vinddata er hentet fra Norsk Klimaservicesenter, Ref. /1/, for perioden 1960 til 2021 ved målestasjonen Flesland i en høyde på +48 m NN2000 ca. 14 km sydsydvest fra Hegreneset. Vinddata fra Flesland er sammenlignet med vinddata fra målestasjonen Florida i perioden 1997 til 2020, vinddata fra den nå nedlagte målestasjonen Fredriksberg og vinddata målt ved Hellen skole 2018-2021. Sammenligningen mellom vinddata fra de fire stasjonene vises i Bilag B. Plasse-ringene deres vises i Figur 3.

Basert på sammenligningene er det valgt å bruke vinddata fra Flesland for bølgeberegningene ved Hegreneset. Sikringsnivået beskrives nærmere i kapittel 3.

Anvendte vinddata er høyeste 10 minutters middelvindhastigheter over 1 time med tilhørende vindretning, som referer til +48 m NN2000. Det er tatt et

konserverativt valg om å ikke skalere vinddata målt ved Flesland, selv om man normalt benytter vinddata ved 10 m over havet til å bestemme bølger. Dette valget er tatt fordi det er stor usikkerhet knyttet til hvilken vindprofil som skal benyttes for Hegreneset, grunnet omliggende terreng. Vindrosen fra Flesland vises i Figur 4. Vinden kommer hyppigst fra syd-sydvest og nord-nordvest, i tråd med fjorden utenfor og terrenget innenfor. Det er laget en analyse av forholdet mellom vind og vannstand som vises i Bilag A.

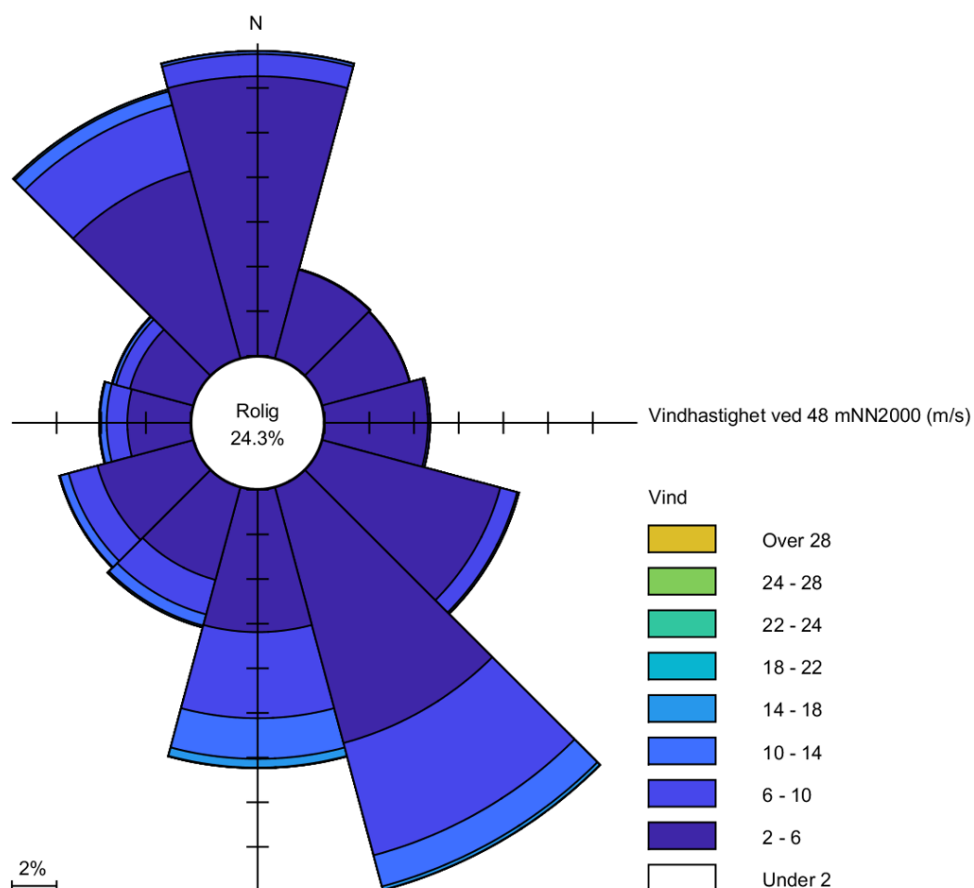
En ekstremverdianalyse for vindhastighet er gjennomført, og vises i Bilag A. Denne brukes for å beregne dimensjonerende bølgeforhold, se Bilag D. Ekstremverdiene for de aktuelle vindretningene og gjentakintervallene vises i Tabell 1.



Figur 3 Plassering av målestasjonene Flesland, Florida, Fredriksberg og Hellen.

Tabell 1 Retningsfordelte ekstremverdier for vindhastigheter (m/s) ved målestasjon Flesland.

| Retning (°N) \ Returperiode (år) | 1    | 10   | 50   | 100  | 200  |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|
| 120                              | 14,6 | 17,5 | 19,4 | 20,2 | 20,9 |
| 150                              | 19,3 | 23,0 | 25,3 | 26,3 | 27,2 |
| 180                              | 19,3 | 22,9 | 24,8 | 25,6 | 26,4 |
| 210                              | 18,8 | 23,3 | 26,4 | 27,7 | 28,9 |
| 240                              | 17,2 | 20,9 | 23,5 | 24,6 | 25,7 |
| 270                              | 18,1 | 22,8 | 26,1 | 27,6 | 28,9 |
| 300                              | 19,2 | 23,5 | 26,4 | 27,7 | 28,9 |
| 330                              | 19,3 | 23,5 | 26,4 | 27,7 | 28,9 |



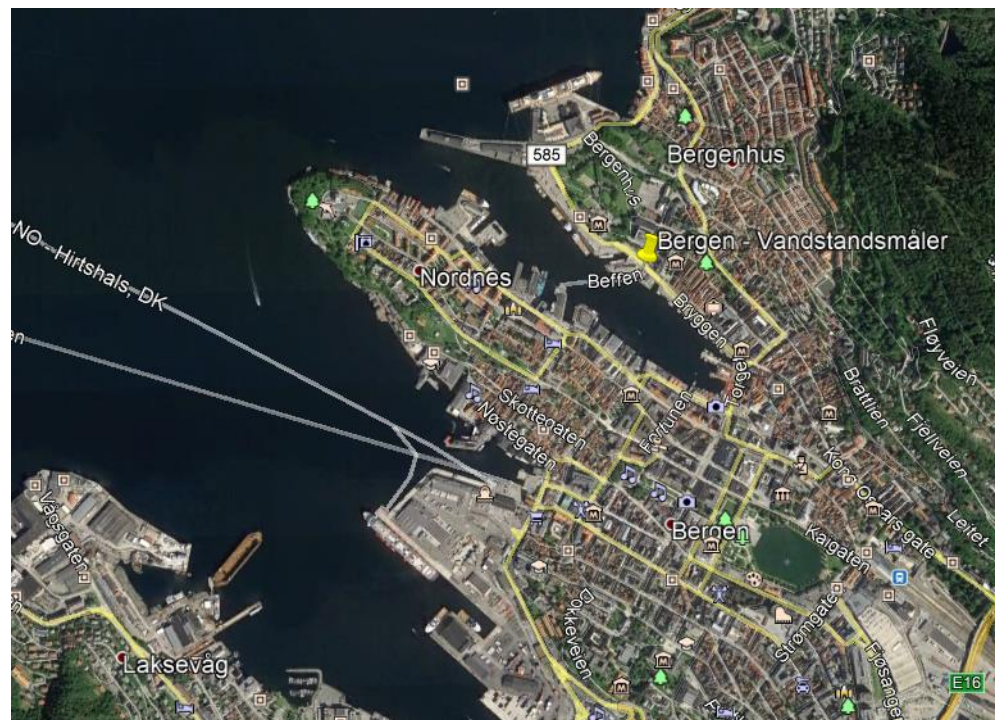
Figur 4 Vindrose for målestasjon Flesland, perioden 1960 til 2021. Vinden refererer til maksimal 10 minutters middelvindhastighet over 1 time ved +48 m NN2000, Ref. /1/.

## 2.2 Vannstand

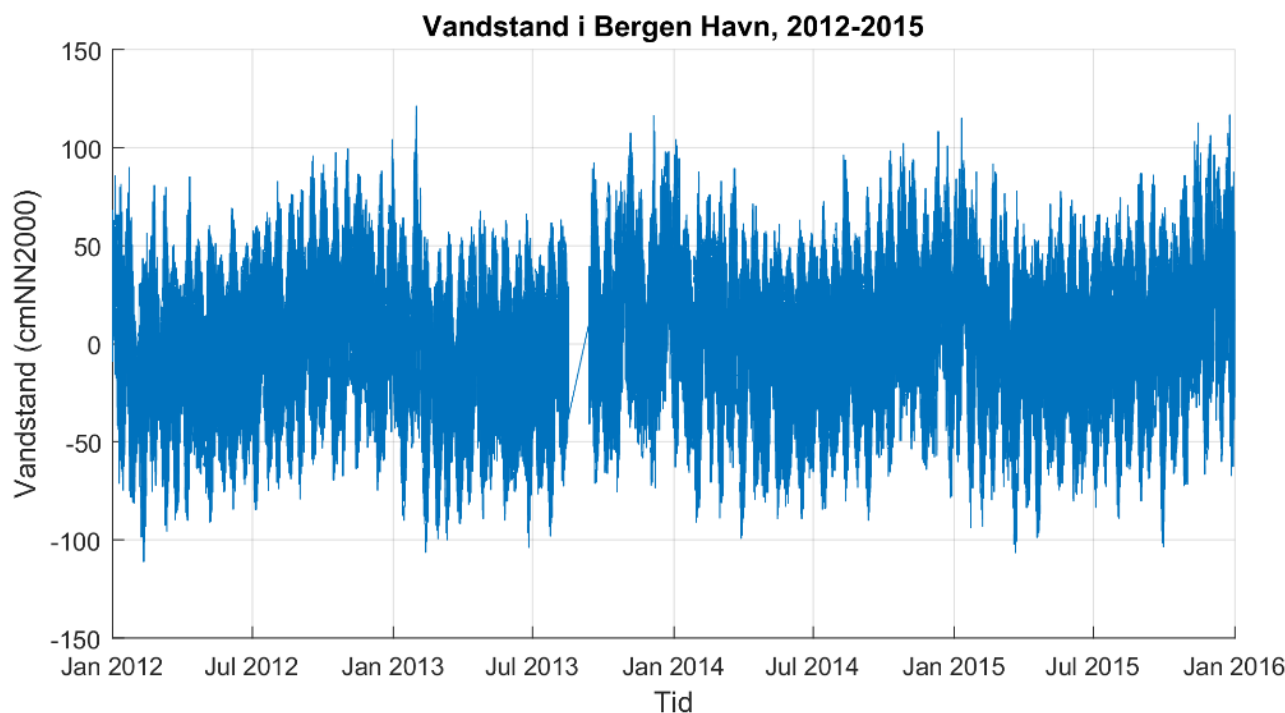
Vannstanden er målt i Bergen havn, se Figur 5, og er hentet fra Kartverkets API, Ref. /2/. Vannstandstatistikken er fra perioden 1997 til 2020 og refererer til NN2000 (NormalNull 2000). Det er enkelte avbrudd i måleserien, men dette har ingen påvirkning på de etterfølgende analysene. Et utsnitt av tidsserien fra 2012-2015 vises i Figur 6. Sammenligning mellom vinddata og vannstand vises i Bilag A. Ekstremverdier for vannstanden vises i Tabell 2, Ref. /2/.

Tabell 2 Ekstremverdier vannstand i Bergen havn, ekskl. havnivåstigninger og landhevning, ref. /2/.

| Returperiode (år)     | 1   | 10  | 50  | 100 | 200 |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Vannstand (cm NN2000) | 102 | 118 | 128 | 131 | 135 |



Figur 5 Plassering av vannstandsmåleren i Bergen Havn.



Figur 6 Vannstand (cm NN2000) i Bergen Havn perioden 2012-01-01 til 2016-01-01.

### 3 Flomsikkert nivå

Når flomsikkert nivå skal bestemmes må det tas høyde for bidrag fra ekstremt høyvann (flo), fremtidig havnivåstigning, isostatisk landheving og samtidige ekstreme bølger.

Ifølge Byggteknisk forskrift (TEK17) §7-2 Sikkerhet mot flom og stormflo, Ref. /3/, så skal bygninger i risikoområder for stormflo sikres i henhold til en predefinert sikkerhetsklasse, se Tabell 3. Hegreneset transformeres til nytt rekreativt område med mulighet for bolig-, kontor- og forretningsbygg, og disse kategoriseres som sikkerhetsklasse F2. I samsvar med TEK17 skal det da benyttes 200-års ekstremvannstand ved fastsetting av sikringsnivåer ved Hegreneset.

Tabell 3 Sikkerhetsklasser for bygninger i risikoområder for stormflo, Ref. /3/.

| Sikkerhetsklasse mot stormflo | Konsekvens | Største nominelle årlige sannsynlighet |
|-------------------------------|------------|----------------------------------------|
| F1                            | Liten      | 1/20                                   |
| F2                            | Middels    | 1/200                                  |
| F3                            | Stor       | 1/1000                                 |

Det skal tas hensyn til havnivåstigning som forårsakes av klimaforandringene. I 2015 ble rapporten "Sea Level Change for Norway – Past and Present

*Observasjons and Projesjons to 2100*" utgitt Ref. /4/ på bestilling fra norske myndigheter. Her fremskrives havnivåstigninger for kystkommuner, korrigert for isostatisk landheving. På bakgrunn av konklusjonene fra denne rapporten utga Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap (DSB) i 2016 rapporten "*Havnivåstigning og stormflo – samfunnssikkerhet i kommunal planlegging*" Ref. /5/, og denne skal brukes som veiledning i planarbeidet med å vurdere havnivåendringer og stormflo på bakgrunn av ovenstående sikkerhetsklasser.

DSB-veilederen anbefaler at det benyttes det mest konservative utviklingsscenarie RCP8.5, på bakgrunn av rapporter fra IPCC i årene 2081-2100. Videre anbefales det at øvre grense (95-percentil) for utviklingsscenariet benyttes. Havnivåstigningen i år 2081-2100 for RCP8.5 er angitt å være 71 cm, inklusiv korrigering for landheving. Havnivåstigningen er basert på *AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014* fra IPCC, Ref. /6/. I 2019 utga IPCC rapporten, *SR: The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, Ref. /7/, med en revidert vurdering av havnivåstigningene. Der er ikke en vesentlig forskjell mellom RCP8.5 i de to rapportene, derfor vurderes det som akseptabelt å benytte verdier for havnivåendringer fra Ref. /5/. Merk at det vitenskapelige grunnlaget for den 6. vurderingsrapport fra IPCC ("*Climate Change 2021 – The physical Science Basis, Sixth assessment raport of the Intergovernmental Panel on Climate Change*") ble offentliggjort i august 2021. Det vurderes dog akseptabelt å fortsatt benytte ovenstående referanser inntil norske myndigheter har analysert sistnevnte rapport nærmere.

Når en vurderer hvilken bølgehøyde som skal kombineres med 200-års vannstanden (sikkerhetsklasse F2), må det tas hensyn til at dette høye vannstands-nivået ikke nødvendigvis forekommer samtidig som en 200-års vindhastighet (og dermed også bølgehøyde). I bilag A er korrelasjonen mellom vannstand, vindhastighet og vindretning analysert, siden bølgehøyden langs Puddefjorden-Damsgårdssundet for det meste er vindskapt. Basert på dette har vi i dette notatet benyttet to ulike kombinasjoner av returperioder for hhv. vannstand og vind (bølger) i den videre estimeringen og vurderingen av det fremtidige sikringsnivået på Hegreneset, se Tabell 4. Dimensjonerende forhold for de to kombinasjonene kommer frem i Tabell 5 og Tabell 6. Bølgeforholdene er beskrevet nærmere i Bilag D.

*Tabell 4      Kombinasjoner av vannstand og vind (bølger), som benyttes til å bestemme sikringsnivåer for Hegreneset.*

|               | Returperiode<br>Vannstand (år) | Returperiode<br>Vind (år) |
|---------------|--------------------------------|---------------------------|
| Kombinasjon 1 | 200                            | 10                        |
| Kombinasjon 2 | 10                             | 200                       |

Tabell 5 Dimensjonerende Kombinasjon 1 ved vind fra relevante retninger.

| Kombinasjon 1 (200 års vannstand, 10 års vind) |                   |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|-------------------|------|------|------|------|
| Bølgeretning                                   | NV                | V    | SV   | S    | SØ   |
| U <sub>10</sub> (m/s)                          | 23,5              | 22,8 | 23,3 | 22,9 | 23,0 |
| H <sub>s</sub> (m)                             | 1,3               | 1,1  | 1,2  | 0,8  | 0,6  |
| T <sub>p</sub> (s)                             | 3,4               | 3,0  | 3,2  | 2,4  | 2,1  |
| Vannstand (m NN200)                            | 1,35 <sup>1</sup> |      |      |      |      |

Tabell 6 Dimensjonerende Kombinasjon 2 ved vind fra relevante retninger.

| Kombinasjon 2 (10 års vannstand, 200 års vind) |                   |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|-------------------|------|------|------|------|
| Bølgeretning                                   | NV                | V    | SV   | S    | SØ   |
| U <sub>10</sub> (m/s)                          | 28,9              | 28,9 | 28,9 | 26,4 | 27,2 |
| H <sub>s</sub> (m)                             | 1,6               | 1,4  | 1,5  | 0,9  | 0,8  |
| T <sub>p</sub> (s)                             | 3,7               | 3,3  | 3,5  | 2,5  | 2,2  |
| Vannstand (m NN200)                            | 1,18 <sup>1</sup> |      |      |      |      |

### 3.1 Sikringsnivåer og perimeterkonstruksjoner

I dette kapittelet vurderes sikringsnivåer og forslag til tiltak for Hegrenesets perimeter mot fjorden. Der er fortsatt mange ukjente faktorer ved Hegreneset, som for eksempel overganger mellom fortau og kystkonstruksjoner, gjennomgang til bakenforliggende områder samt hvor det skal være mulig å kjøre med ønskede kjøretøy i en situasjon med høy vannstand. Det vises til kapittel 3.2 for en beskrivelse av videre prosess med design av konstruktive tiltak for stormflø-sikring.

Det er valgt å vurdere sikkerhetsnivåer og -konstruksjoner for to tidspunkter; år 2050 og 2100. Dette for å kunne etablere adaptive løsninger for sikringskonstruksjoner, der dette er mulig. Kystlinjen etableres slik at det er mulig å justere denne i fremtiden, når anslag av havnivået blir sikrere og man gjør seg erfaringer med bølgeoppskyll. Objekter som ikke kan bygges om designes for forholdene i år 2100 fra starten av.

Å benytte en adaptiv løsning innebærer at disse må revurderes ved et senere tidspunkt når man har mer data om både havnivå og vind. Fordelen er at prosjektet i utgangspunktet kan designes med lavere koter og sikkerhetsnivåer, før disse senere heves og forsterkes. Forskjellen på havnivåstigning i 2050 (33 cm) og 2100 (71cm) er dermed ganske stor.

<sup>1</sup> Vannstand er ekskl. havnivåstigning.

Bølger vil kunne føre til oppskylling langs kystlinjen. Vannmengden som spruter inn på land må ikke være så stor at den fører til oversvømmelse og skader på land. Det er benyttet erfaringstall fra tidligere prosjekter og modellforsøk for denne faktoren, og disse tallene presenteres i underliggende kapitler.

Konseptplaten for Hegreneset vises i Figur 7. Strekningene som er navngitt behandles separat i egne kapitler. I Figur 2 vises konseptplanen med de overordnede vurderingene som beskrives underliggende kapitler. Det anbefales at kapitlene om de enkelte strekningene leses i sammenheng med figuren.



Figur 7

Konseptplan for Hegreneset med navngivning av strekninger og områder som beskrives i underliggende kapitler.

### 3.1.1 Generelt og området bak perimeteren/promenaden

Den ytre perimeteren etableres med forskjellige løsninger og vil fungere som beskyttelse mod stormflo og bølgeoppskyl. Dvs. at generelt sett skal den ytre perimeteren være sammenhengende og med åpninger kun for å kunne bevege seg frem og tilbake mellom områder på Hegreneset og langs promenaden. Det skal være mulig å lukke disse åpningene i forkant av varslede ekstremhendelser med for eksempel sandsekker. Ved større åpninger for utrykningskjøretøy kan porter være nødvendig.

Konstruksjonene mot kysten må samtidig bygges slik at bølgeoppskyl ledet tilbake i fjorden. Dette er grensesnitt med god drenering og VA.

Om en god nok ytre perimeter etableres vil ikke området bak omfattes av de samme kravene til koter og sikringsnivåer. I prinsippet kan man ha bygg på kote +2,0, selv om det på det kraftigste anbefales å benytte kote +2,5 NN2000 som dimensjonerende.

### 3.1.2 Nordlige gangbro

Det ønskes å etablere en gangbro mellom Hegrenesets nordlige område og området nord for ved Breiviken, se Figur 7. Dette anses som en konstruksjon som bør designes for Sikkerhetsklasse F2 i år 2100 allerede ved begynnelsen av konstruksjonens levetid. Gangbroen er ikke kritisk for stormflosikring og har kun funksjon som en gangbro som skal kunne benyttes under normale forhold.

I år 2100 forventes det at det forekommer daglige vannstander til opp mot +1,2 m NN2000. Under antagelsen av hyppige signifikante bølger på  $H_s \sim 0,6$  m, så vurderes det at gangbroen bør etableres med en underside i +2,1 m NN2000. Dette vil gjøre at broen er brukbar under normale forhold, men ikke ved ekstreme designforhold, f.eks. 10 års vannstand og 1-års bølger.

Gangbroen vil bli utsatt for bølgelaster både under, på siden og på rekkverket. Det er viktig at det tas hensyn til disse påvirkningene når broen designes. Det skal også tas hensyn til vekten fra is som vil kunne dannes på broen pga. bølgeoppskyl.

### 3.1.3 Bygning Nord

Bygningen forventes etablert ute i vannet og vil dermed være utsatt for bølger fra V og NV. Bygningen skal fungere som stormflosikring for landområdet bak, samtidig som det skal være behagelig å være i bygningen, selv under ekstreme forhold. Dette setter særlige krav til bygningens konstruksjon ut mot vannet. En adaptiv løsning vurderes ikke å være fordelaktig.

Bygningen ligger litt beskyttet bak området nord for Hegreneset, der bølger fra NV vil bryte og spres, og det vurderes derfor at bølger fra V vil være dimensjonerende.

Det anbefales at bygningens fasade ut mot vannet etableres med ruhetselementer i fire nivåer fra kote ca. +0,0 m NN2000 opp til kote +3,0 m NN2000 for å redusere bølgeoppskyllet på bygningen. Ved kote +4,0 m NN2000 anbefales det

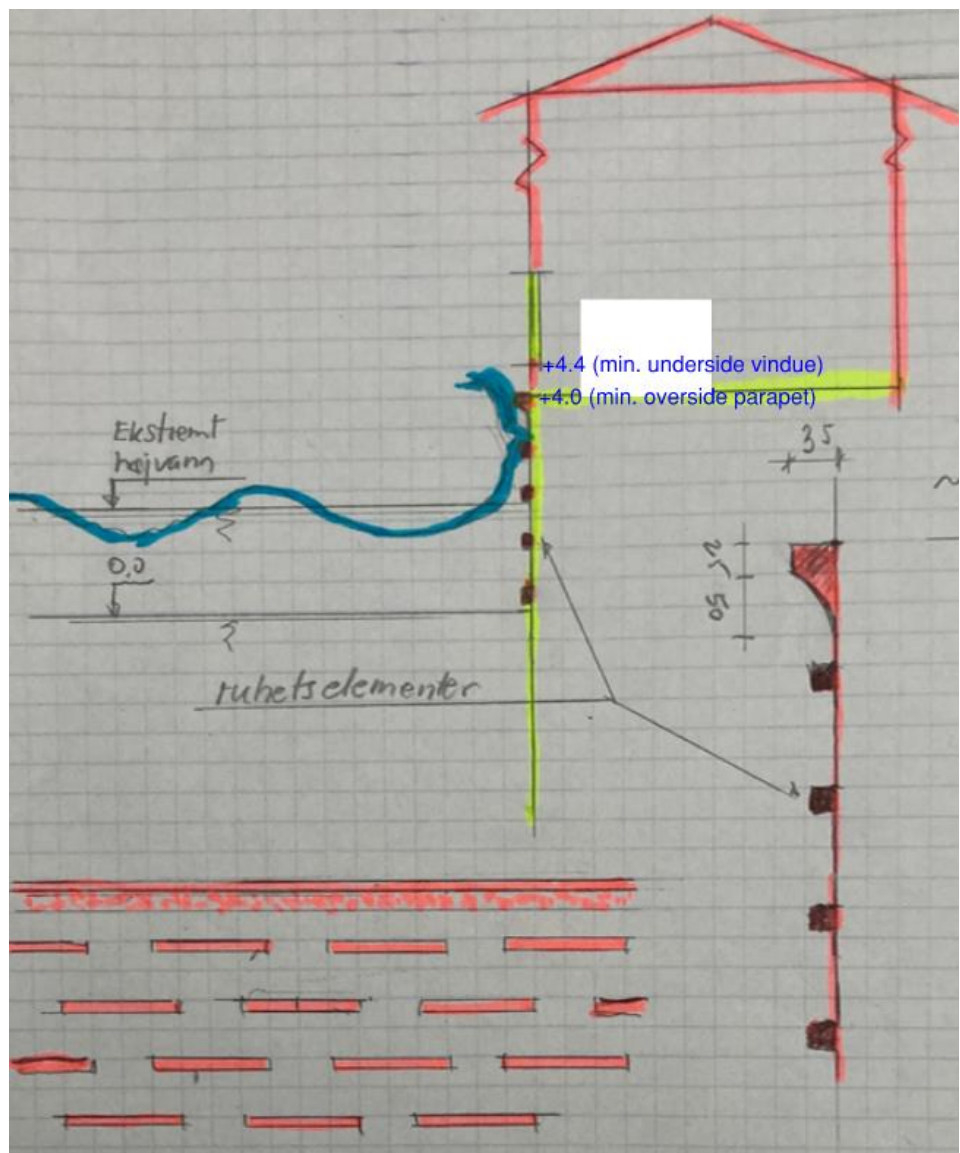
at det etableres en nese (bull nose) som leder oppskyllet tilbake ut mot havet. Det vurderes videre at undersiden av vinduer ut mot vannet ikke bør etableres under kote +4,4 m NN2000. Kotene er beregnet basert på Kombinasjon 1 og 2, se Tabell 4:

$$\text{Bull nose: vannstand} + SLR + f * H_s = 1,18 \text{ m} + 0,71 \text{ m} + 1,5 * 1,4 \text{ m} = 4,0 \text{ m NN 2000}$$

$$\text{Underside Vinduer} = 1,18 \text{ m} + 0,71 \text{ m} + 1,75 * 1,4 \text{ m} = 4,4 \text{ m NN 2000}$$

I Figur 8 vises en prinsippskisse for ruhetslementer og bull nose. Kotene virker høye, men er fastsatt for å det skal føles sikkert å befinne seg i bygningen, selv under ekstreme forhold. Det anbefales at bølgeoppskyllet, og dermed også kotene, vurderes nærmere ved fysiske modellforsøk.

Det skal ved design av bygningen tas hensyn til laster fra bølger og forhøyet vannstand.



Figur 8 Skisse av ruhetslementer og bull nose for Bygning Nord, samt koter for bygningen.

### 3.1.4 Delstrekning Nord

Langs delstrekning Nord etableres en promenade som vil være utsatt for bølger fra NV og V, hvor NV er den dimensjonerende retningen. Promenaden skal sammen med den bakenforliggende bygningen fungere som stormflosikring for landområdet bak ved dimensjonerende forhold. Samtidig skal promenaden være brukbar under normale forhold. En adaptiv løsning vurderes å være fordelaktig for promenaden på bakgrunn av Kombinasjon 1 og 2 i år 2050, der bygningen bak skal vurderes på bakgrunn av forholdene i år 2100.

Promenaden er foreløpig designet som skissert på Figur 9, altså 10 m bred og bestående av flere konstruksjonselementer:

- > Et nedsenket areal, i form av en fastgjort konstruksjon.
- > Nedtrapping fra kote +3,1 m NN2000 ned til eksisterende kaikant på kote +1,9 m NN2000.
- > Et gangareal på kote +2,8 m NN2000
- > En avsluttende mur opp mot bakenforliggende bygning på kote +4,0 m NN2000.

Med en 200-års designvannstand i år 2050 på ca. +1,7 m NN2000, vurderes det at det nedsenkede arealet vil ha en reduserende virkning på bølgeoppskyllet ved promenaden, da bølgene vil bryte over. Samtidig vil det å lage konstruksjonen permeabel, f.eks. med trekledning ut mot vannet med en permeabilitet på f.eks. 30-40%, også medføre en reduksjon av bølgeoppskyllet. Særlig under normale bølge- og vannstandsforhold vil det nedsenkede arealet ha en stor innflytelse på reduksjonen av bølgeoppskyllet, men det forventes også å være effektivt under ekstreme forhold.

Det vurderes også at nedtrappingen og bredden av promenaden medfører at bølgeoppskyllet vil være redusert oppe ved muren ved den bakenforliggende bygningen. Det er derfor vurdert som akseptabelt å benytte en faktor på den signifikante bølgehøyden som angitt i Tabell 7, som gir en toppkote på muren ved bygningen på +4,0 m NN 2000 i år 2050. Det er viktig at muren ved bygningen etableres med drenshull slik at vannet kan slippe ut.

Det skal nevnes at med den overnevnte løsning vil promenaden bli utsatt for bølgeoppskyllet ved ekstreme forhold, hvilket kan gi skade på møbler eller annet inventar som står på promenaden.

Åpninger fra promenaden ned til kaien, og det nedsenkede arealet skal holdes på et minimum, og det skal være mulig å lukke åpningene i forkant av ekstreme hendelser.

Det skal tas hensyn til laster fra bølger som vil kunne forekomme i år 2100 ifm. design av det nedsenkede arealet, og andre elementer på promenaden, slik at det er mulig å utvikle den adaptive løsningen.

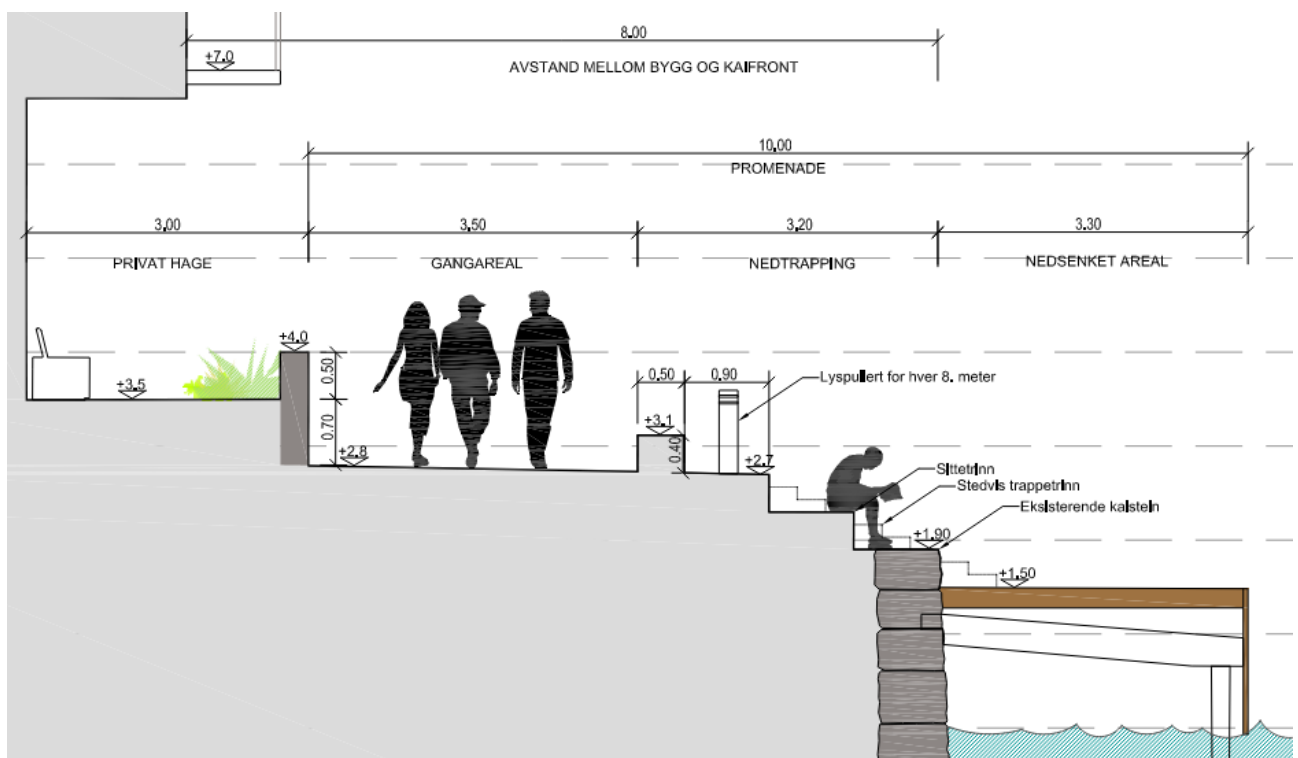
I år 2100 vil det nedsenkede arealet ha en redusert effekt på bølgeoppskyllet, da designvannstanden er steget til mellom +1,9-2,1 m NN2000 for en hhv. 10- og 200-års hendelse. Det vil derfor potensielt være nødvendig å gjøre ekstra tiltak i år 2050, hvor muren ved bygningen økes til kote +4,4 m NN2000 og evt.

tilføres en bull nose. Hvis det er for stort bølgeoppskylt på promenaden vil det også redusere bølgeoppskyllet kraftig dersom muren på kote +3,1 m NN2000 heves samtidig som at det etableres en bull nose.

I år 2100 kan det på nåværende tidspunkt forventes å være daglige vannstander opp til +1,2 m NN2000, som betyr at det nedsenkede arealet forholdsvis ofte vil være vått og utsatt for bølgeoppskylt. Samtidig vil det også forekomme bølgesprut opp gjennom det nedsenkede gangarealet.

Ved områder hvor det ikke er bygninger bak promenaden, skal det fortsatt være en sikring mod bølgeoppskylt. Her anbefales det at det etableres en mur på kote +4,0 m NN2000 eller andre løsninger, som ikke er beskrevet nærmere her. Det forventes at det skal være mulig å komme ned til promenaden med utrykningskjøretøy, og man kan derfor ikke lage en permanent lukking av området. Det foreslås i stedet å etablere en port som kan lukkes og agere som sikring ved ekstremhendelser. COWI har levert en slik løsning i Lemvig, Danmark.

Promenaden er geometrisk forholdsvis kompleks, og det anbefales at det i en senere fase av prosjektet lages fysiske modellforsøk for å beskrive og måle bølgeoppskylt på promenaden og over muren ved bygningen. Om dette finnes og mengden ikke er akseptabel, må en annen løsning utvikles.



Figur 9 Prinsippskisse av promenade ved delstrekning Nord. Smedsvig landskapsarkitekter, tegning L30-21, 13-09-21.

Tabell 7 Koter og inputparametre til beregning av koter for muren ved bygninger langs delstrekning Nord. Beregning vist for år 2050.

| Retning | Vannstand<br>(m NN2000) | SLR (m) | Hs (m) | $f_{\text{mur}}$<br>(-) | Koter – Mur ved bygning<br>(m NN200) |
|---------|-------------------------|---------|--------|-------------------------|--------------------------------------|
| NV      | 1,18                    | 0,33    | 1,6    | 1,55                    | +4,0                                 |

### 3.1.5 Bygning vest

Bygningen forventes etablert ute i vannet, og vil være utsatt for bølger fra V, NV og SV. Bygningen skal fungere som stormflosikring for landområdet bak, samtidig som det skal være behagelig å være i bygningen selv under ekstreme forhold. Dette setter særlige krav til bygningens konstruksjon ut mot vannet. En adaptiv løsning vurderes ikke å være fordelaktig. Kotene fastsettes derfor basert på Kombinasjon 1 og 2 i år 2100, som beskrevet først i kapittel 3.

Det anbefales at bygningens fasade ut mot vannet etableres med ruhetselementer i fire nivåer fra kote ca. +0,0 m NN2000 opp til kote +3,0 m NN2000 for å redusere bølgeoppskyllet på bygningen. På kote +4,1 m NN2000 anbefales det at det etableres en bull nose som leder oppskyllet tilbake ut mot havet. Det vurderes videre at undersiden av vinduer ut mot vannet ikke bør etableres under +4,5 m NN2000. Kotene er beregnet som det meste kritiske tilfellet av Kombinasjon 1 og 2, se Tabell 4, for bølger fra V, NV og SV. Input til beregningen av kotene vises i Tabell 8. Bølger fra NV og SV vil ramme bygningen med en vinkel på ca. 15-20°, og det er derfor benyttet en lavere faktor på den signifikante bølgehøyden.

Tabell 8 Koter og inputparametre til beregning av koter for bull nose og underside vinduer for bygning Vest.

| Retning | Vannstand<br>(m NN2000) | SLR (m) | Hs (m) | $f_{\text{Bull nose}} / f_{\text{underside, vindue}}$<br>(-) | Koter - Bull nose/underside vindue<br>(m NN200) |
|---------|-------------------------|---------|--------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| V       | 1,18                    | 0,71    | 1,4    | 1,5 / 1,75                                                   | +4,0 / +4,4                                     |
| NV      | 1,18                    | 0,71    | 1,5    | 1,4 / 1,65                                                   | +4,1 / +4,5                                     |
| SV      | 1,18                    | 0,71    | 1,6    | 1,4 / 1,65                                                   | +4,1 / +4,5                                     |

I Figur 8 vises en prinsippskisse for ruhetselementer og bull nose for bygning Nord. Prinsippet er det samme for bygning Vest, dog med koter som i Tabell 8. Kotene virker høye, men er fastsatt med formål om at det skal føles sikkert å befinne seg i bygningen, selv under ekstreme forhold. Det anbefales at bølgeoppskyllet, og dermed kotene, vurderes nærmere i fysiske modellforsøk.

I forbindelse med design av bygningen skal det tas hensyn til belastning fra bølger og vannstandstigning.

### 3.1.6 Strand

Der er et ønske om at det etableres en sandstrand ca. midt på den vestlige perimeter av Hegreneset. COWI har med utgangspunkt i en skisse mottatt fra Smedsvig Landskapsarkitekter utarbeidet et foreløpig snitt i stranden, se Figur 10. Stranden tenkes utført med middelhelning 1:17 fra kote +1,5 m NN2000 og ned til kote -1,8 m NN2000. Sandlaget bør ha en tykkelse på 1 m for å gi plass til de naturlige erosjonsprosessene. Dette skal utføres for å redusere vedlikehold, og for samtidig ikke treffe fjell ved bruk av stranden. For å etablere et 1 m tykt lag sand er det nødvendig å sprengre noe av fjellet for å oppnå en helning på 1:17.

På kote -1,8 m NN2000 etableres en barriere av sprengstein for å holde sanden tilbake. Det må likevel fortsatt forventes at noe av sanden vil eroderes og forsvinne, og det vil være behov for tilførsel senere. Fra barrieren og ned til grunnfjell er det foreslått at det fylles opp med usortert stein med helning 1:1,5-2. Om det ikke er økonomisk gunstig, eller om helningen på grunnfjellet er annerledes enn antatt, kan en løsning med rørspunt boret ned til fjell undersøkes. Dette har imidlertid en kortere forventet levetid enn en ren sprengsteinsløsning.

Mellom de to moloene er det planlagt at det skal etableres en flytepontong eller øy til rekreasjon, som samtidig senker bølgeoppskyll på stranden. For å ha denne funksjonen må denne være maks 18 m lang og minst 4-5 m bred, gitt en total åpning på 30 m inn mot stranden.

Fra kote +1,5 m NN2000 etableres en oppgang opp til kote +2,0 m NN2000 som på nåværende tidspunkt antas å tilsvare terreng.

Det påpekes at i år 2050 forventes det på nåværende tidspunkt daglig vann opp til +0,85 m NN2000 med et middelvannspeil på ca. +0,35 m NN2000, som vil redusere bredden av stranden som ikke er dekket av vann. I år 2100 vil middelvannspeilet ha økt til 0,7 m NN2000. Daglig høyvann på +1,2 m NN2000 kan forventes, som vil medføre en stor reduksjon av strandarealet over vannspeilet. Det kan derfor bli nødvendig å heve terskelen ut mot havet for å kunne fastholde en attraktiv strand i fremtiden, når havnivåstigningen har vært betydelig.

Stranden er ikke i seg selv tilstrekkelig for å sikre området langs og bakenfor mot bølgeoppskyll i hverken år 2050 eller 2100. Det vurderes at en adaptiv løsning kan være fordelaktig, da det umiddelbart vil være mulighet for å endre perimeteren i fremtiden.

Det anbefales at den sydlige og nordlige strekningen langs stranden skal etableres med en mur opp til kote +2,9 m NN2000 for å sikre området bakenfor mot bølgeoppskyll. Der skal etableres en mur opp til kote +2,5 m NN2000 ved den østlige grensen mellom strand og terreng (ikke vist på prinsippsnitt, se Figur 10) for å sikre området bakenfor mod bølgeoppskyll. For å sikre til år 2100 skal det legges på minst 0,4 m oppå ovenstående koter, samtidig som det muligens må etableres en bull nose. Ovenstående er basert på antagelsen om at det etableres

en øy for å dempe bølgene som rammer stranden. Hvis dette ikke er tilfelle, må kotene beregnes på nytt.

For å redusere strandens utbredelse, kan man redusere dybden ved barrieren ned til f.eks. kote -1,1 m NN2000, og alternativt kan det undersøkes om stranden kan være brattere. Dersom barrieren plasseres høyere opp skal det settes høye krav til markeringen av barrieren, siden de som bader antar at man kan gå på bunnen. Et bratt fall på ca. 1:2,5 kan komme overraskende på personer og kan føre til personskader, dersom man ikke er en god svømmer og kommer plutselig over kanten. En brattere strand medfører et større behov for vedlikehold. En annen mulighet er å benytte en annen type materiale, f.eks. 10-20 mm eller større diameter, avhengig av tilgjengelighet (se f.eks. shingle beaches i England). Shingle er helt avrundede sten. Dette gir mulighet til å etablere stranden med en brattere helning uten å øke vedlikehold på stranden. Det vurderes som mulig å oppnå en helning på 1:10 til 1:8 på stranden, hvis det benyttes 10-20 mm materiale. Dette betyr at stranden vil være kortere, men til gjengjeld billigere å anlegge, dog avhengig av pris på shingle materialet.

Åpninger ned til stranden skal holdes på et minimum, og det skal være mulig å lukke åpningene i forkant av ekstreme hendelser. Spesielt i år 2100 med en ekstrem vannstand på +2,1 m NN2000, skal det tas hensyn til dette, da terrenget planlegges på +2,0 m NN2000. Det planlegges at det kan etableres en form for promenade langs den nordlige og sydlige strekning langs stranden, som evt. vil ha en dempende effekt på bølgeoppskyll.



Figur 10

Prinsippskisse av stranden, både tverrsnitt og grov plan. Mur til kote +2,5 m NN2000 mod øst er ikke vist. Øy/pongton er ikke vist på planen. Koter er i m NN2000.

### 3.1.7 Delstrekning Vest 1

Det refereres til avsnitt 3.1.4 om delstrekning Nord. Det antas at man skal benytte lignende løsninger på delstrekning Vest 1. Strekningen er mer utsatt for bølger fra vest enn fra nordvest, der bølgene er mindre under dimensjonerende Kombinasjon 1 og 2 i både år 2050 og 2100. Det anbefales derfor å ta utgangspunkt i promenadens oppbygning som vist på Figur 9.

### 3.1.8 Delstrekning Gangbro

Det refereres til avsnitt 3.1.2 om den nordlige gangbroen. Merk at det ved broens ender skal lages en overgang inn på promenaden. Denne skal være mulig å lukke under dimensjonerende forhold (for eksempel med sandsekker), så det ikke renner vann inn fra denne siden. Det forventes imidlertid ikke store bølgeoppskyll her til vanlig.

### 3.1.9 Delstrekning Vest 2

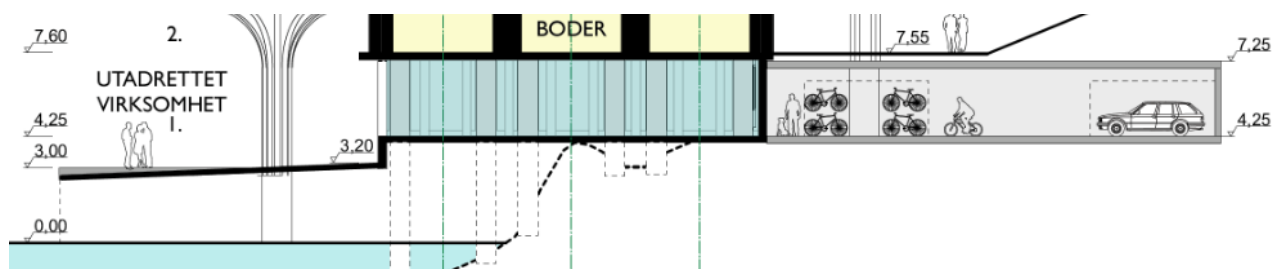
Delstrekning Vest 2 ligger langs den eksisterende silobygningen, som tenkes ombygget til boliger. Saaha arkitekter har laget et prinsipp for en mulig promenade foran bygningen, se Figur 11. Skissen er basert på en tegning av siloen fra 1952, hvor det er angitt en overside på kaien på +2,70 m og +0,00 (begge til et ukjent referansenivå), som antas at svare til middelvann. Fra 1950 og frem til det refererte tidsrommet 1986-2005 for de anviste havnivåstigningene i Ref. /5/, er det vurdert at havnivået er steget med ca. 15 cm på bakgrunn av Ref. /8/. Det tas derfor utgangspunkt i at kaien i dag befinner seg 2,55 m over nåværende middelvannspeil. For nå antas det at kotene som vises i Figur 11 skal fratrekkes 15 cm til NN2000. Dette må fastsettes av en landmåler.

Delstrekning Vest 2 er utsatt for bølger fra NV, V og SV, dog vil bølger fra V og SV her være dimensjonerende, da bølger fra NV angriper med en vinkel på ca. 20°. Det vurderes at det er fordelaktig å benytte seg av en adaptiv løsning, altså designhendelse Kombinasjon 1 og 2 i år 2050, da det vil være mulig å forhøye eksisterende kai eller lage andre tiltak i fremtiden for å redusere bølgeoppskyll.

Det vurderes at koten +4,25 m ~+4,10 m NN2000, som er vist på Figur 11 (antatt laveste nivå i silo), er tilstrekkelig for å beskytte bygningen mot bølgeoppskyll. Den anviste koten +3,0 m ~+2,85 m NN2000 vil redusere bølgeoppskyllet tilstrekkelig under normale forhold i år 2050. Imidlertid vil kaien under ekstreme designhendelser medføre at bølgene vil bryte direkte inn over kaien, som kan medføre bølgesprut opp på siloens fasade. Hvis det etableres en bull nose øverst på kaien, vil dette dempe bølgesprut betraktelig. Også oppskyll frem til år 2100 vil dempes.

For å beskytte til dimensjonerende nivå i år 2100 vil det være nødvendig å etablere en bull nose på kaien, samt evt. forhøye denne i form av en mur. Samtidig vil det også være en mulighet å etablere en bull nose på siloens fundament.

Det anbefales at promenaden revurderes når kotene på eksisterende kai og silo er målt inn i NN2000.



Figur 11 *Prinsskisse for promenaden langs delstrekning Vest 2. Sahaa arkitekter, 21-10-2020, A30-3.*

### 3.1.10 Havnebad og flytepontonger

Mot den sydlige delen av Hegreneset ønskes det å etablere et havnebad og badstue. Det ønskes også å etablere en molo bestående av flytende pongtonger. Det vurderes umiddelbart at pongtongene minimum skal være minst 6 m brede for å ligge stabilt og for å dempe de innkommende bølgene fra V og SV. Pongtongene kan være betongpontonger som etableres med en trebekledning. Pongtongene skal være festet til havbunnen og samtidig kunne heve og senke seg med vannstanden. Dette sikres ved design av et fortøyningssystem med tilstrekkelig fleksibilitet. Videre har pongtongene fendere til støtabsorpsjon mellom individuelle pongtonger. Disse bør leveres av spesialfirmaer med stor erfaring fra tilsvarende prosjekter, så sannsynligheten for skader på pongtongene under ekstreme bølgeforhold minimeres.

For området innenfor pongtongene vurderes det at en adaptiv løsning vil være greit, der kotene vurderes på bakgrunn av designforhold Kombinasjon 1 og 2 i år 2050. Det vurderes at terrenget ikke må ligge under +2,5 m NN2000. Det vil være nødvendig å etablere en mur langs havnebadet til kote +2,9 m. Sammen med en promenade ned til vannet vurderes det at dette vil være tilstrekkelig for å redusere bølgeoppskyllet i år 2050 til et akseptabelt nivå. I år 2100 vurderes det på nåværende tidspunkt at en mur opp til kote +3,1 m NN2000 vil være tilstrekkelig.

Det må ikke etableres for mange åpninger gjennom muren, og der hvor dette gjøres skal det være mulig å lukke åpningen før en dimensjonerende hendelse.

### 3.1.11 Bygning Syd 1 & 2

Bygningene forventes etablert ute i vannet og dermed være utsatt for bølger fra V, SV og S. Bølger fra vest vurderes ikke dimensjonerende, da bølgene vil brytes og spres rundt det sydlige hjørne av Hegreneset. Bygningen lengst mot vest skal fungere som stormflosikring for landområdet bak, samtidig skal det være behagelig å være i begge bygninger under ekstreme forhold. Dette setter særlige krav til bygningens konstruksjon ut mot vannet. En adaptiv løsning vurderes ikke å være fordelaktig, så kotene fastsettes på bakgrunn av Kombinasjon 1 og 2 i år 2100, som beskrevet først i kapittel 3.

Det anbefales at bygningens fasade mot vannet etableres med ruhetselementer i fire nivåer fra kote ca. +0,0 m NN2000 opp til kote +3,0 m NN2000 for å redusere bølgeoppskyllet på bygningen. På kote +4,1 m NN2000 anbefales det å

etablere en bull nose som guider oppskyllet tilbake ut mod havet. Det vurderes videre at underside av vinduer mot vannet ikke etableres under +4,5 m NN2000. Kotene er beregnet som det meste kritiske tilfellet av Kombinasjon 1 og 2, se Tabell 4, for bølger fra SV og S. Designforhold til beregningen av kotene vises i Tabell 9. Bølger fra SV vil ramme bygningen med en innfallsvinkel på ca. 15-20°, og det er derfor benyttet en lavere faktor på den signifikante bølgehøyden.

*Tabell 9 Koter og designforhold til beregning av koter for bull nose og underside vinduer for bygning Syd 1 & 2. Beregningen utføres etter samme prinsipp som for bygning Nord.*

| Retning | Vannstand (m NN2000) | SLR (m) | Hs (m) | $f_{\text{Bull nose}} / f_{\text{underside, vindue}} (-)$ | Koter - Bull nose/underside vindue (m NN200) |
|---------|----------------------|---------|--------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| S       | 1,18                 | 0,71    | 0,9    | 1,5 / 1,75                                                | +3,5 / +3,3                                  |
| SV      | 1,18                 | 0,71    | 1,5    | 1,4 / 1,65                                                | +4,1 / +4,5                                  |

I Figur 8 presenteres en prinsippskisse for ruhetslementer og bull nose for bygning Nord. Prinsippet er det samme ved bygning Syd 1 & 2, men med koter som i Tabell 9. Kotene virker høye, men er valgt for at det skal være behagelig i bygningen selv under ekstreme forhold. Det anbefales at bølgeoppskyllet og dermed kotene vurderes nærmere ved modellforsøk.

De anviste kotene på de to bygningene kan potensielt senkes om flytepontongene ved havnebadet flyttes mod syd og øst, for å redusere de innkommende bølgene som rammer bygningene.

I forbindelse med design av bygningen skal det tas hensyn til laster fra bølger og forhøyet vannstand.

Mellom de to bygningene er det et rekreativt område som må være brukbart daglig og samtidig ha en perimeter mot syd for å redusere mulig bølgeoppskyll. Det vurderes at perimeterkonstruksjonen kan etableres som en adaptiv løsning. Det foreslås først å anlegge denne til år 2050 og dernest revurdere kotene frem mot år 2100. Bølger fra SV vil være dimensjonerende selv om de har en innfallsvinkel på ca. 15-20°. Det skal etableres en mur til +3,7 m NN2000 og +4,1 m NN2000 med en bull nose for å sikre mot dimensjonerende hendelse i hhv. år 2050 og 2100, se Tabell 10 for disse. Muren skal designes for laster fra bølger.

Det vurderes at terrenget ikke bør ligge lavere enn kote +3,0 m NN 2000 av hensyn til nivåforskjellen mot bygningene, samtidig som det sikres at det er mulig å se over muren.

Tabell 10 Koter og designforhold til beregning av koter for bull nose for rekreativt område mellom bygning Syd 1 & 2. Beregningen utføres etter samme prinsippl som for bygning Nord.

| Årstall (år) | Retning | Vannstand (m NN2000) | SLR (m) | Hs (m) | f <sub>Bull nose</sub> (-) | Kote - Bull nose (m NN200) |
|--------------|---------|----------------------|---------|--------|----------------------------|----------------------------|
| 2050         | SV      | 1,18                 | 0,33    | 1,2    | 1,4                        | +3,5 / +3,3                |
| 2100         | SV      | 1,18                 | 0,71    | 1,5    | 1,4                        | +4,1 / +4,5                |

### 3.1.12 Delstrekning Øst 1

Delstrekning Øst 1, se Figur 7, inngår ikke som en del av et kritisk byggverk, og det vurderes derfor at det kan lages en adaptiv løsning, altså design for Kombinasjon 1 og 2 i hhv. år 2050 og år 2100.

Delstrekningen ligger forholdsvis godt beskyttet. De største bølgene kommer fra øst, hvor den signifikante bølgehøyden er ca.  $H_s=0,5$  m, altså milde forhold. Det anbefales at terrenget anlegges i minimum kote +2,5 m NN2000, og med en form for trappenedgang eller nivåspring ned til vannet. Gjøres dette forventes bølgeoppskyll ikke å være kritisk frem til år 2050.

I år 2050 anbefales det å revurdere designforholdene til år 2100, og på bakgrunn av dette vurdere om det vil være nødvendig å lave en mur langs kaien. Under nåværende designforhold i år 2100 vurderes det at det blir nødvendig å etablere en mur til kote +2,9 m NN2000. Avhengig av erfaringene som gjøres er det ikke sikkert at tiltak blir nødvendige her.

### 3.1.13 Møllekvartalet

Møllekvartalet, se Figur 7, ønskes bevart ved etablering av det nye byområdet på Hegreneset. Det er opplyst at koten på gulvnivået i bygningen er +2,0 m NN2000. Bygningens østlige fasade og sydlige gavl ligger utsatt direkte ut mot fjorden. Dette medfører at under designhendelsene Kombinasjon 1 og 2 i år 2100 vil det stå vann opp på fasaden, samtidig med at det vil være bølgeoppskyll på fasaden. Det vurderes ikke nødvendig å heve gulvnivået i bygningen, såfremt den eksisterende fasaden fjernes opp til kote +3,0 m NN2000 og gjenetableres som en vanntett og kraftig fasade som kan motstå de dimensjonerende bølgelastene. Fasaden skal også ha høy motstandsevne mot korrosjon, da den ofte vil være utsatt for saltvann. Det anbefales videre at det etableres en bull nose på den nye fasaden.

Både fasaden mot øst og gavlene mot nord og syd bør gjenetableres. Grunnen til at gavlen mot nord skal utskiftes er beskrevet nærmere i avsnitt 3.1.14.

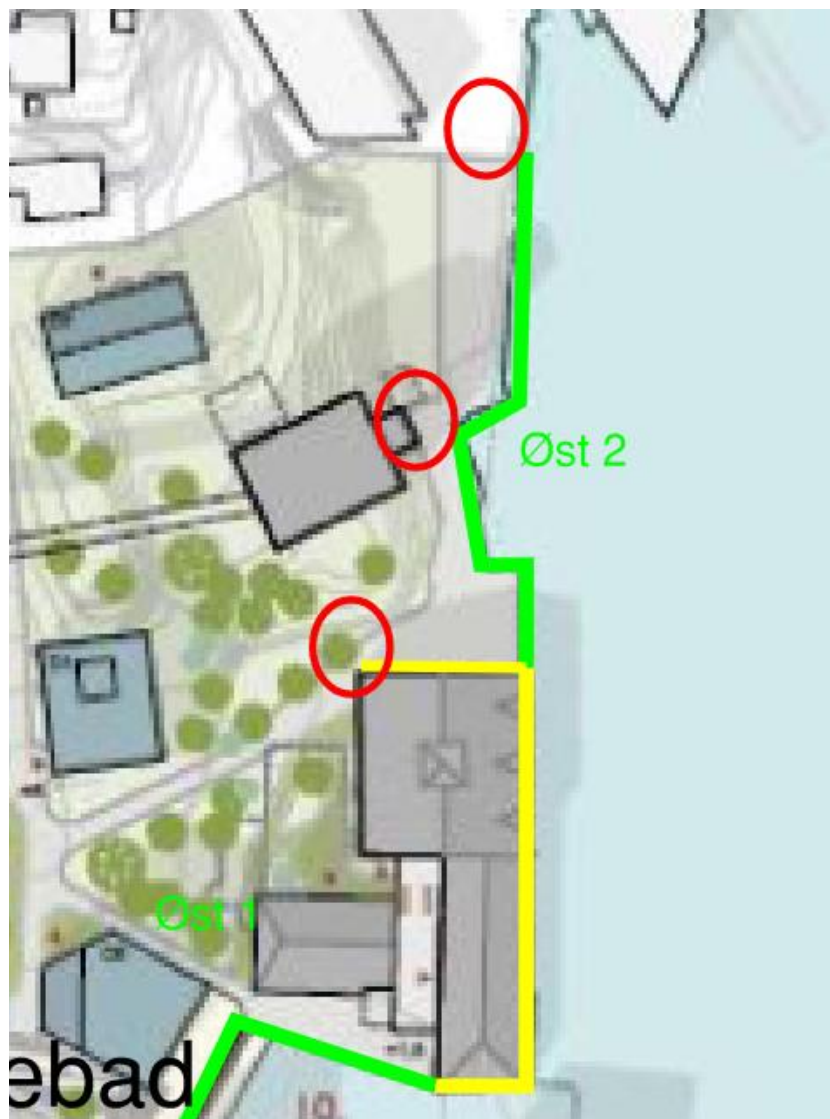
Utover at den nye fasaden skal kunne motstå de nye lastene skal bygningens overordnede stabilitet og bæreevne selvfølgelig også være oppfylt, noe som ikke undersøkes nærmere her.

Et alternativ til å skifte ut fasaden kan f.eks. være å heve gulvnivået inne i bygningen til f.eks. kote +2,5 eller +3,0 m NN2000. Dette vil gjøre bygningen mer robust mot bølgeoppskyll og -påvirkning. Det vil likevel være nødvendig å sikre at det oppbygde terrenget/gulvkonstruksjonen og eksisterende fasade er vann-tette. Samtidig må det sikres at fundamentet på bygningen kan håndtere den ekstra belastningen som oppstår ved å heve gulvnivået i bygningen.

### 3.1.14 Delstrekning Øst 2

Det er opplyst at eksisterende kote på kaien er +1,9 m NN2000, hvilket betyr at kaien vil være oversvømt for designhendelsen Sikkerhetsklasse F2 i år 2100 for Kombinasjon 1 og 2. Den signifikante bølgehøyde er på ca. 0,5 m. Det er vurdert at det ikke er nødvendig å endre på kaien på nåværende tidspunkt og frem til år 2050, da terrenget stiger bakover og dermed naturlig beskytter Hegreneset mot oversvømmelse. Samtidig vurderes det ikke kritisk at det forekommer kraftig bølgeoppskyll på kaien under ekstreme forhold. Det vil likevel være nødvendig å sikre at de nyoppførte bygningene nord for delstrekning Øst 2 også er beskyttet, samtidig som den lille bygningen lokalt beskyttes mod bølgeoppskyll. Møllekvartalet vurderes å være sikret dersom gavlen mot nord reetableres, som beskrevet i avsnitt 3.1.13. Det anbefales imidlertid at inngangen inn til Møllekvartalet fra gavlen ikke plasseres under +2,5 m NN2000.

I år 2100 vil det med den forventede havnivåstigningen komme en del bølgeoppskyll på kaien. Dette kan potensielt medføre at det vil være nødvendig å etablere en mur oppå den eksisterende kaien, dersom bølgeoppskyllet under normale forhold eller designforholdene ikke kan aksepteres ved daværende tidspunkt. Muren kan enten plasseres ute ved kaiens front eller litt tilbaketrukket. Dersom det ønskes minimalt bølgeoppskyll for designhendelsene Kombinasjon 1 og 2, så vurderes en mur på kote +3,0 m NN2000 med en bull nose til å være tilstrekkelig.



Figur 12 Delstrekning Øst 2 og Møllekvartalet. Røde sirkler markerer lokale punkter og obs-punkter.

### 3.2 Anbefaling for videre detaljplanlegging

Beregninger og vurderinger som er gjort i dette notatet er utført som et skrivebordsstudie ut fra foreliggende arkitektskisser i tilknytning til konseptfasen. Som beskrevet i tidligere kapitler skal det tas hensyn til påvirkning fra bølger på nye bygninger og eksisterende, dersom disse bevares. Det vil særlig være sokkel, nedre mur og evt. vinduer som vil være mest utsatte for bølgeoppskylt og dermed påvirkning.

Kotene for perimeterkonstruksjonene er foreløpige og kan endres i detaljfasen. Det er også en rekke grensesnitt mellom ulike perimetertyper og promenader som ikke er belyst her.

Det anbefales at det i det videre arbeidet fastsettes funksjonskrav til promenaden ved normale og ekstreme forhold, for å kunne vurdere oppbygningen mot dette.

Det skal også vurderes om det ønskes en adaptiv løsning for perimeterkonstruksjonene, slik som det er beskrevet ovenfor, eller om man vil sikre seg mot 200-års stormflo og bølger i år 2100 umiddelbart.

Det skal også sikres at drenering på Hegreneset både kan håndtere bølgeopp-skyll samt regnvann og vann fra fjellet mot øst. Ved lavpunkt på Hegreneset skal det tas særlig hensyn til dette for å unngå å danne en kulp som ikke kan tømmes for vann under designforhold. Langs perimeteren kan dette f.eks. løses ved å etablere drenshull i konstruksjonene.

For mer presis fastsettelse av perimeterkonstruksjoner/promenader kan det anbefales at følgende analyser gjøres i en senere fase, når det foreligger mer detaljerte byggeplaner for f.eks. perimeterkonstruksjonene, avstand til byggverk og type uteområde bak sjøkanten:

- > Arkitekt og byggherre fastsetter krav til akseptabel bølgeoppskylling langs perimeteren.
- > Gjennomføring av mer dybdegående samtidighetsanalyse (Joint Probability Analysis, JPA) av forekomster vannstand og vind/bølger, slik at mest korrekt kombinasjon kan fastsettes utfra stedlige forutsetninger.
- > Oppsett av numerisk bølgemodell (MIKE SW) for å bestemme bølgeforholdene i fjorden, for å få et mer presist bilde av bølgedannelsen. Dette er ikke nødvendig, men kan være en fordel.
- > Promenader er oftest komplekse konstruksjoner bestående av mange forskjellige elementer for å skape et brukervennlig og rekreativt område, samtidig som promenaden også beskytter bakenforliggende landområder mot ekstremt designforhold i form av bølger og vannstand. Det anbefales derfor kraftig at det gjøres fysiske modellforsøk hos et hydraulisk laboratorium for de ulike konstruksjonene. Dette for å få et mer presist bilde av bølgeopp-skyll, samtidig som det etableres mer detaljerende beregninger.

Det er hensiktsmessig at ovenstående analyser utføres i forbindelse med detalj-planlegging og byggesøknadsprosess, slik at endelige sikringsnivåer fastsettes i sammenheng med byggesaksbehandlingen.

## 4 Referanser

- /1/ **Norsk Klimaservicesenter**  
*<https://seklima.met.no/observations/>*  
, accessed 2 Februar 2021.
- /2/ **Kartverket**  
*<https://www.kartverket.no/til-sjos/se-havniva/resultat?id=92196>*  
, accessed 2 Februar 2021.
- /3/ **Direktoratet for Byggkvalitet**  
*<https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/7/7-2/>*  
, 15 September 2017, accessed 5 Februar 2021.
- /4/ **Kartverket, Nansensenteret, Bjerknes Centre for Climate Research**  
*Sea Level Change for Norway - Past and Present Observations and Projections to 2100*  
2015.
- /5/ **Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap**  
*Havnivåstigning og stormflo - samfunnssikkerhet i kommunal planlegging*  
2016.
- /6/ **IPCC**  
*AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014*  
2014.
- /7/ **IPCC**  
*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a changing Climate*  
Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities, 2019.
- /8/ **Kartverket**  
*Kartverket*  
Online: <https://www.kartverket.no/en/at-sea/se-havniva/sea-level/future-sea-level-along-the-norwegian-coast>, 23 September 2020, accessed 14 September 2021.
- /9/ **Goda, Y.**  
*Random seas and design of maritime structures*, 2nd edition  
World Scientific, Advanced series on ocean engineering - volume 15,  
2000.
- /10/ **SPM**  
*Shore Protection Manual Volume 1, Chapter 3: Wave and Water Level Predictions*, 1984  
Second Printing, US Army Engineer Waterways Experiment Station,  
1984.

## Bilag A Sammen ligning av vinddata

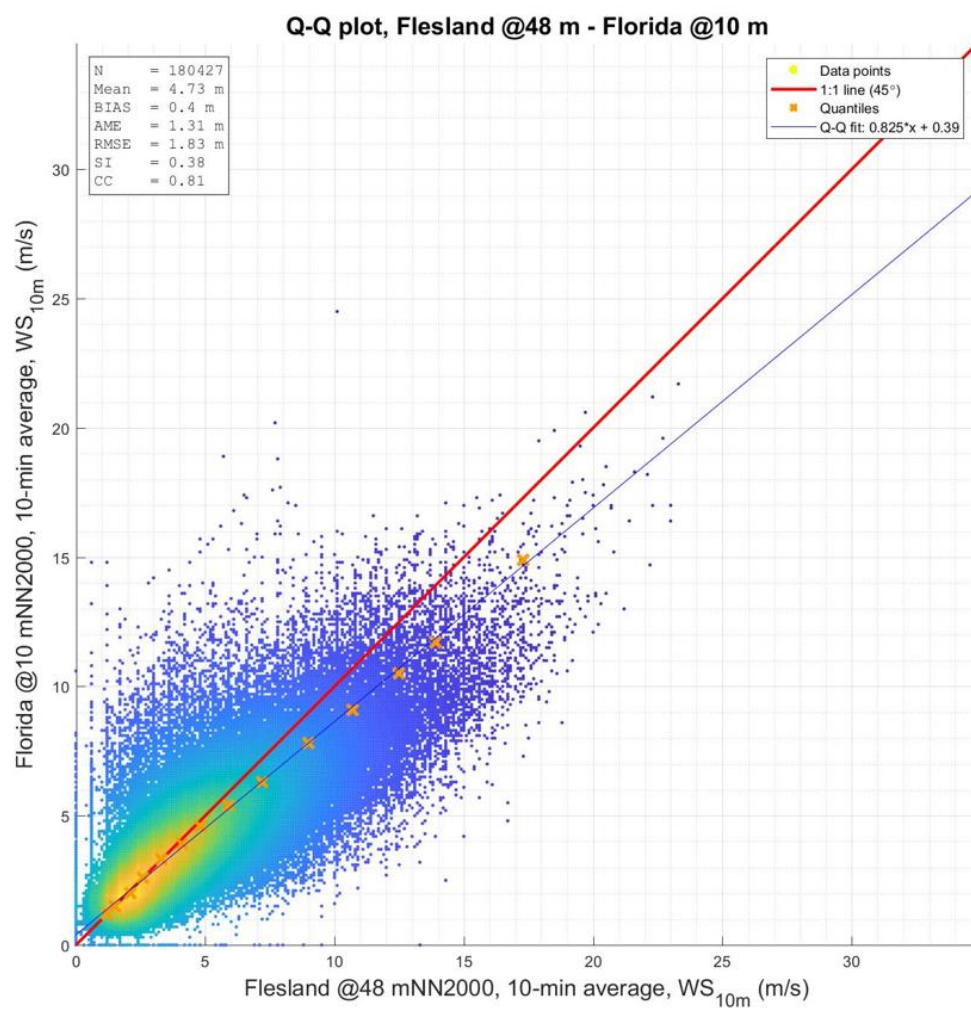
I dette bilag sammenlignes vinddata ved målestasjon Flesland (lufthavn ved Bergen), Florida, Fredriksberg og Hellen skole. Plaseringsene av de fire målere vises i Figur 3. Sammenligning har til formål å danne grunnlaget for hvilke værdata som benyttes ved vurderingen av bølgeforholdene ved Hegreneset for å vurdere perimeterens oppbygning samt sikringskoter mod stormflo og bølgeopp-skyll.

På bakgrunn av de etterfølgende sammenligningene mellom vinddata ved de fire vindstasjonene vurderes det akseptabelt å benytte data ved Flesland for å lage en ekstremver dianalyse opptil 200 år. Dette fordi det er god overensstemmelse mellom vinddata ved Fredriksberg og Florida.

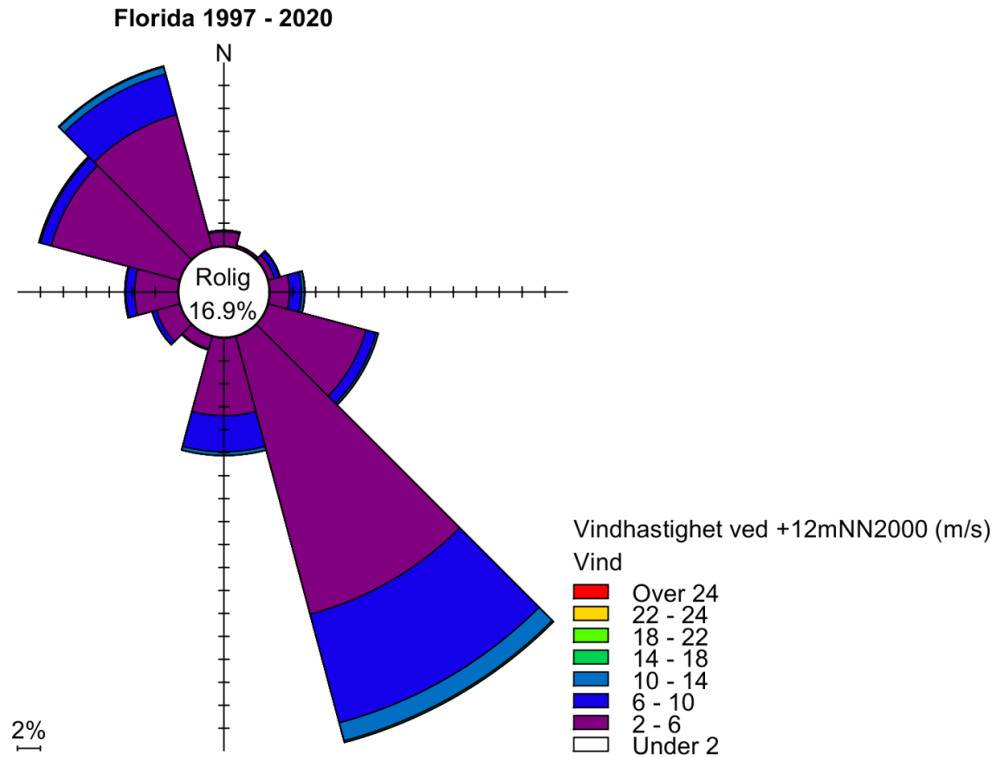
### A.1 Sammenligning av Flesland og Florida

En sammenligning av vindhastigheter mellom Flesland og Florida i perioden 1997-2020 er vist på Figur A-1. Det fremgår at vindhastighetene generelt er større ved Flesland sammenlignet med Florida. Det vurderes at det er primært to årsaker til dette. Det ene er at vindhastigheten ved Florida er ved +12 m NN2000, der Flesland er ved +48 m NN2000. Det vurderes dog ikke forsvarlig å benytte en vindprofil til å redusere vindhastighetene ved Flesland pga. ukjente innflytelser fra det omkringliggende terrenget. Videre ligger Florida også mer skjermet nede i Bergen by, hvor Flesland ligger forholdsvis fritt mod nord, vest og syd.

Det fremgår ved å sammenligne vindroser for Florida, Figur A-2, og Flesland, Figur 4, at vinden er NV og SØ-gående ved Florida, hvor den ved Flesland er mer NNV-N og SØ gående. Avviket for de nordlige retninger vurderes å være pga. den relative lave beliggenheten inne i Bergen by med høyere terreng umiddelbart mod nord. Samtidig er der mindre vind fra V-SV og NØ ved Florida, som vurderes å være fordi Florida er avskjermet på begge sider av et vesentlig høyere terreng. Generelt vurderes det likevel at retningsfordelingen er noenlunde lik.



**Figur A-1** Scatterplot mellom vindhastigheter ved målestasjon Florida og Flesland. Vinden refererer til maksimal 10 minutters middelvindhastighet over 1 time.

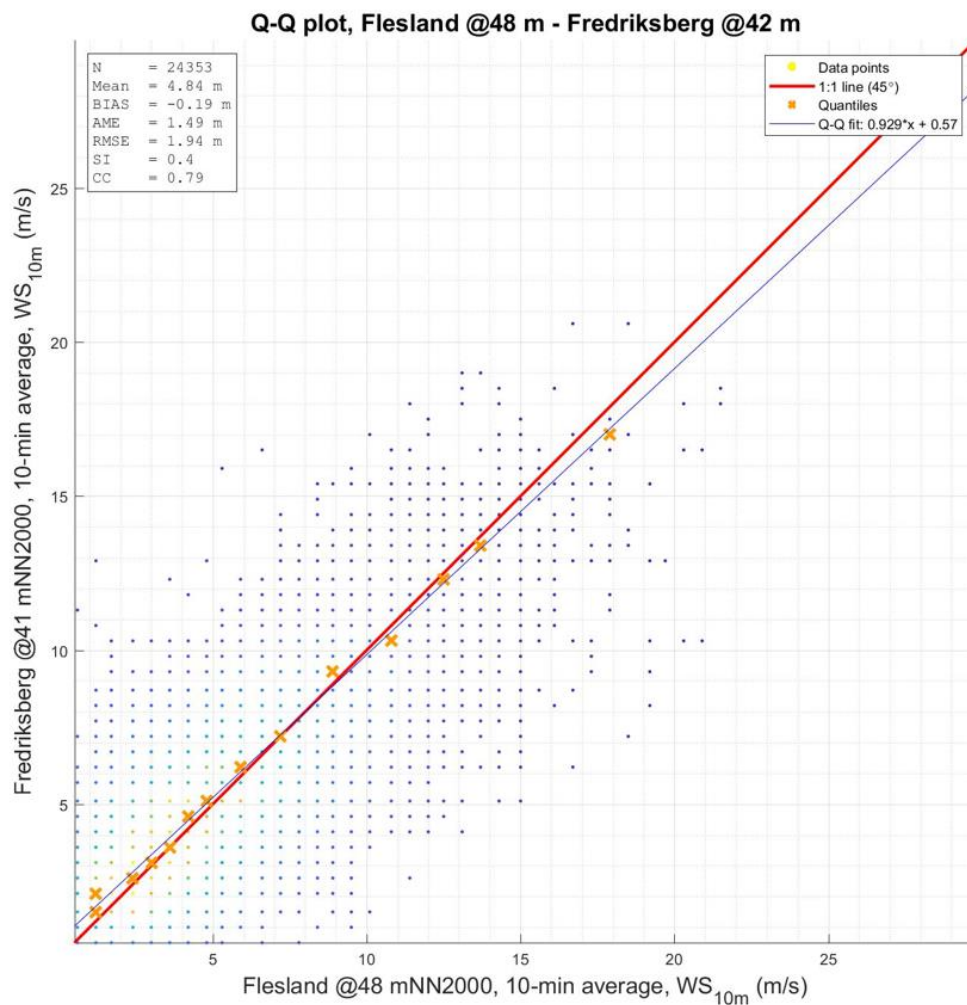


Figur A-2 Vindrose for målestasjon Florida, perioden 1997 til 2020. Vinden refererer til maksimal 10 minutters middelvindhastighet over 1 time ved +12 m NN2000, Ref. /1/.

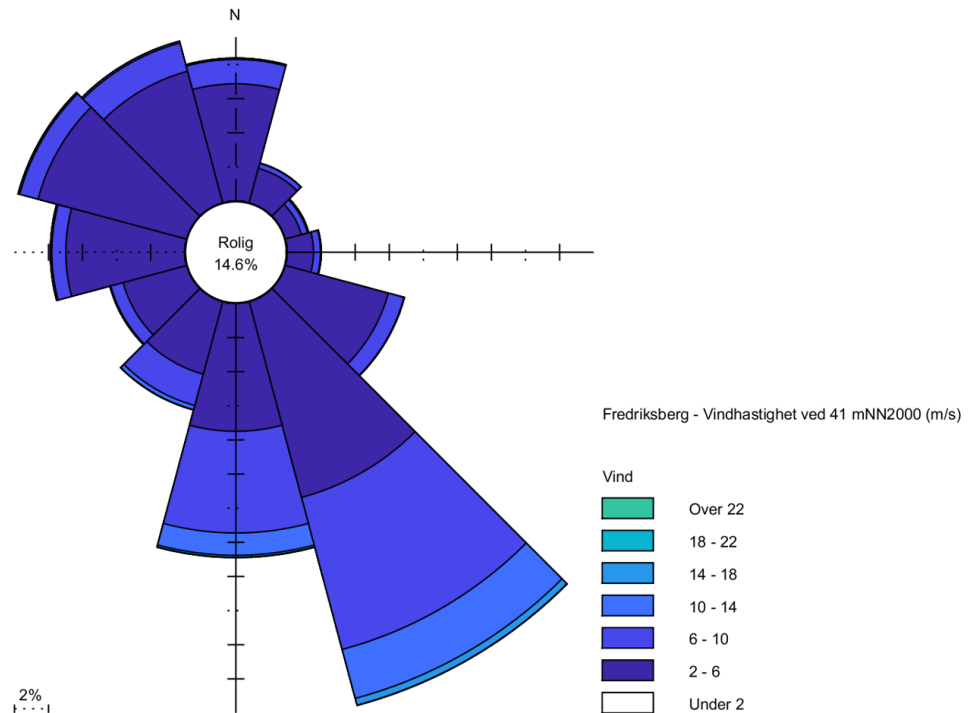
## A.2 Sammenligning av Flesland og Fredriksberg

En sammenligning av vindhastigheter mellom Flesland og Fredriksberg i perioden 1960-1984 er vist på Figur A-3. Det fremgår at det generelt er meget god overensstemmelse mellom vindhastighetene, men med en liten tendens til at Flesland har høyere vindhastigheter ved ekstremene.

Det fremgår ved å sammenligne vindroser for Fredriksberg, Figur A-4, og Flesland, Figur 4, at vinden begge steder er N-NV og SØ-gående. Dog er vinden litt oftere fra de mer vestlige retninger ved Fredriksberg, hvilket ikke umiddelbart kan forklares. Dog er det generelt meget god overensstemmelse mellom vind-data.



Figur A-3 Scatterplot mellom vindhastigheter ved målestasjon Fredriksberg og Flesland. Vinden refererer til maksimal 10 minutters middelvindhastighet over 1 time.

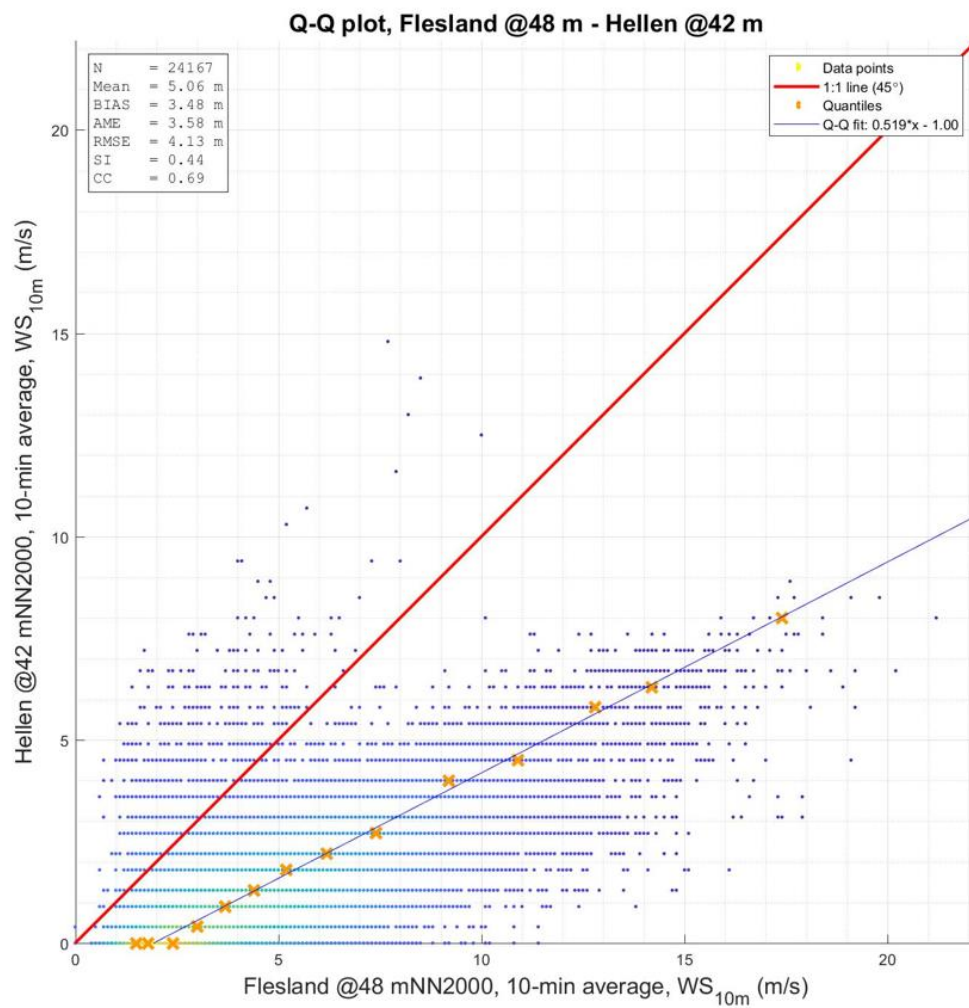


Figur A-4 Vindrose for målestasjon Fredriksberg, perioden 1952 til 1984. Vinden refererer til maksimal 10 minutters middelvindhastighet over 1 time ved +41 m NN2000, Ref. /1/.

### A.3 Sammenligning av Flesland og Hellen

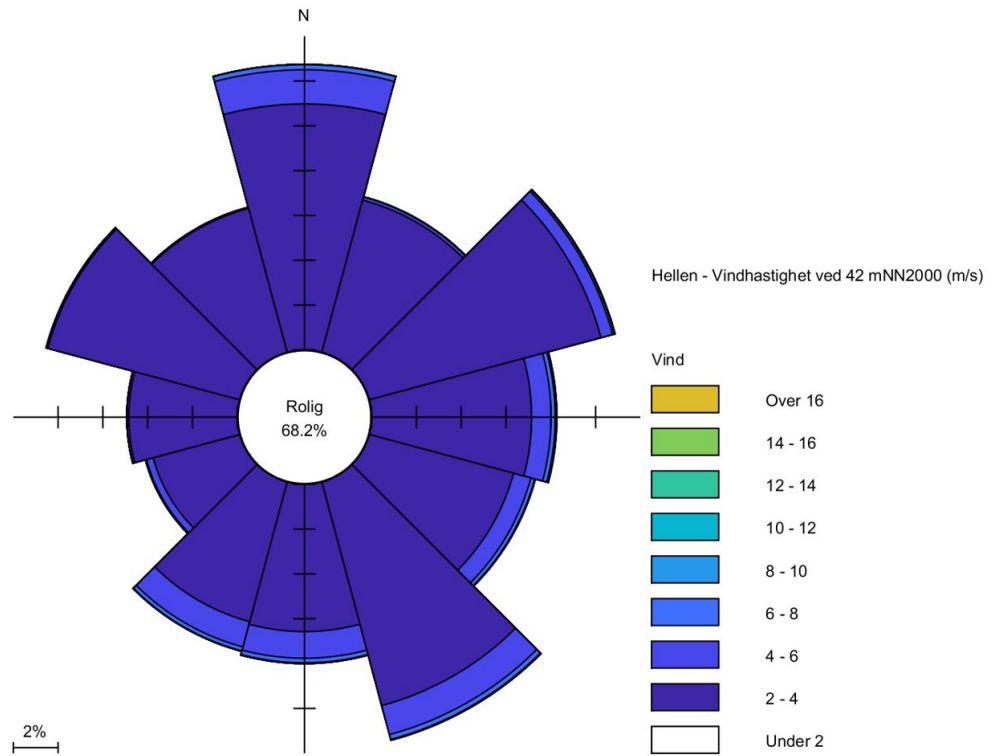
En sammenligning av vindhastigheter mellom Flesland og Hellen i perioden 2018-2020 er vist på Figur A-5. Det fremgår at det er en meget stor uoverensstemmelse mellom vindhastighetene. Generelt er vindhastighetene ved Flesland ca. 80-100% større end ved Hellen. Ut fra terrenget vurderes det ikke at dette kan være årsaken til de meget lave vindhastigheter. Det kan være at det forekommer noen meget lokale forhold som har innflytelse på målingene, dog vurderes dette ikke tilstrekkelig til at gjøre opp for de lave vindhastighetene, da måleren står på +42 m NN 2000. Det antas at det er noe galt med måleren.

Det fremgår ved å sammenligne vindroser for Hellen, Figur A-2Figur A-6, og Flesland, Figur 4, at vinden er NNV-N og SØ-gående ved Flesland, mens det ved Hellen ikke umiddelbart er noen primær vindretning. Videre er det forholdsvis mye vind fra øst ved Hellen, som man ikke ville forvente pga. det høye terrenget i denne retningen. Det kan være at det er noen lokale forhold som har innflytelse på måleren, men dette er ikke kjent p.t.



Figur A-5

Scatterplot mellom vindhastigheter ved målestasjon Hellen og Flesland. Vinden refererer til maksimal 10 minutters middelvindhastighet over 1 time.



Figur A-6 Vindrose for målestasjon Hellen, perioden 2018 til 2021. Vinden refererer til maksimal 10 minutters middelvindhastighet over 1 time ved +42 m NN2000, Ref. /1/.

## Bilag B Korrelasjon mellom vind og vannstand

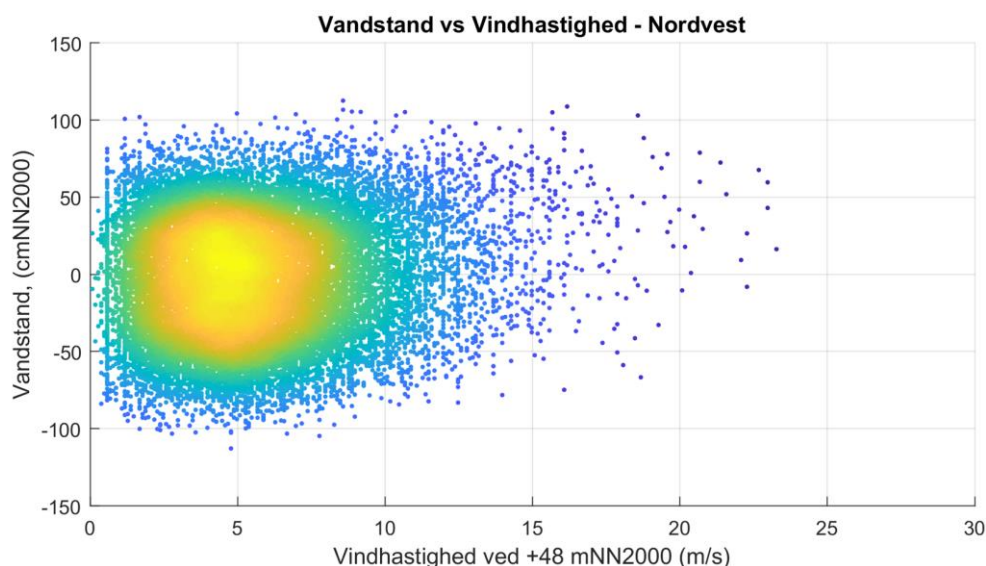
Grunnet Heggrenesets plassering og orientering vil vinden fra  $\sim 120^\circ \text{N}$  til  $330^\circ \text{N}$  være av interesse. En sammenligning mellom vannstander og vindhastigheter ved +48 m NN2000 (vind fra Flesland) for NV, V, SV, S og SØ fra 1997-2020 i Bergen havn vises i Figur B-1 til Figur B-5.

Det fremgår at det ikke er korrelasjon mellom ekstreme vindhastigheter fra nordvest, syd og sydøst, og ekstremt høyvann. F.eks. ved en 10-års vindhastighet på 23,5 m/s, jf. Tabell C-2, er den målte vannstanden  $\sim 70$  cm, mens 10-års vannstanden er 118 cm, jf. Tabell 2.

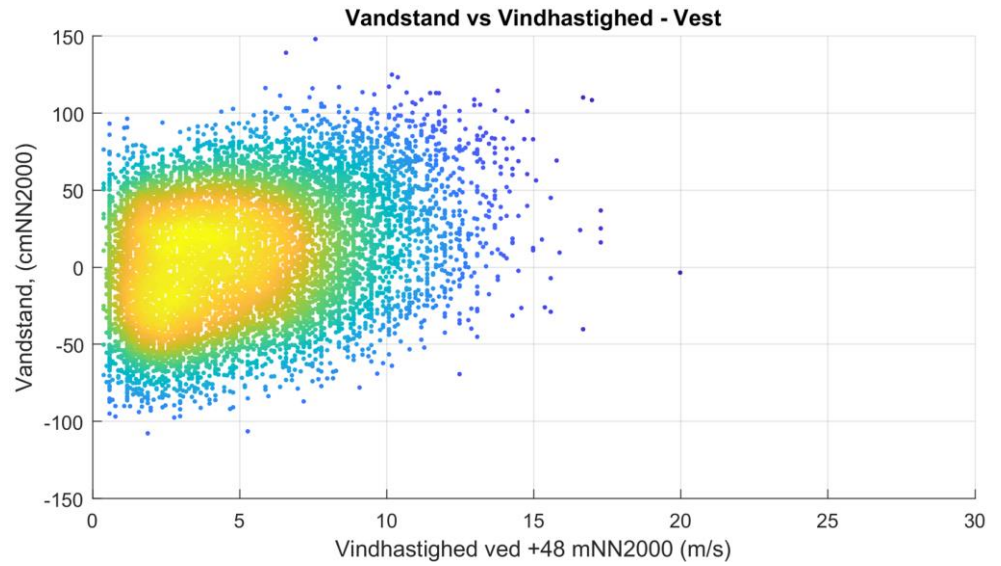
Ved vindhastigheter fra vest og sydvest er det en tendens til at vannstanden er høyere ved større vindhastigheter. Det er imidlertid ikke tilstrekkelig med overlapp i vannstandsmålingen og vinden til å vurdere sammenfallet mellom 10- og 200-års vindhastighetene med vannstanden.

Det vil være meget konservativt å anta at 200-års ekstremhendelsen forekommer samtidig for høyvann og vindhastighet, særlig for nordvest, syd og sydøst. For vest og sydvest er det stadig vurdert konservativt å benytte denne kombinasjonen. Selv om det er en tendens til høyere vannstand med høyere vindhastighet kan det likevel godt oppstå ekstremt lavvann som høyvann.

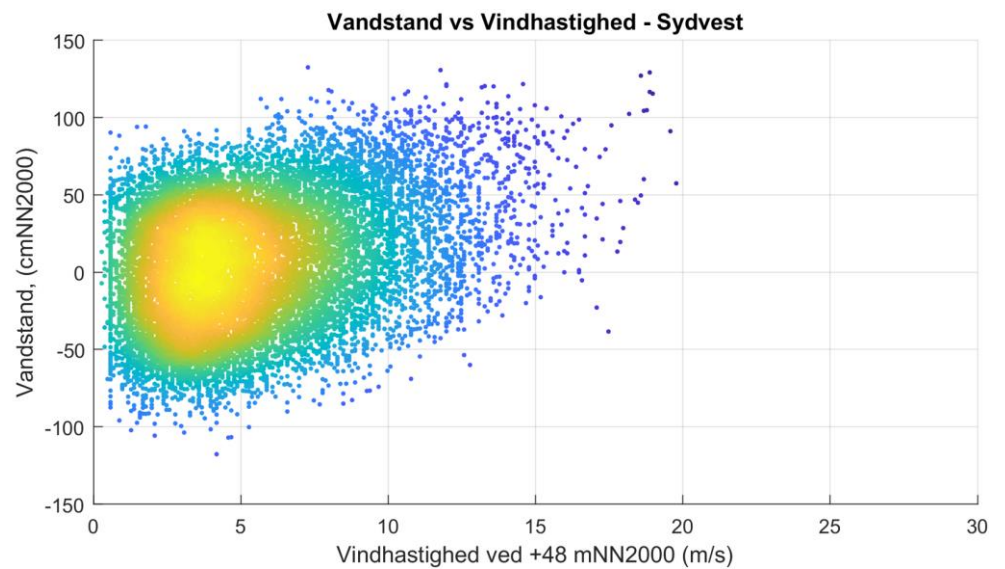
På bakgrunn av det ovenstående vurderes det forsvarlig å kombinere en 200-års vindhastighet (og dermed bølger) med en 10-års vannstand, og omvendt en 10-års vindhastighet med en 200-års vannstand.



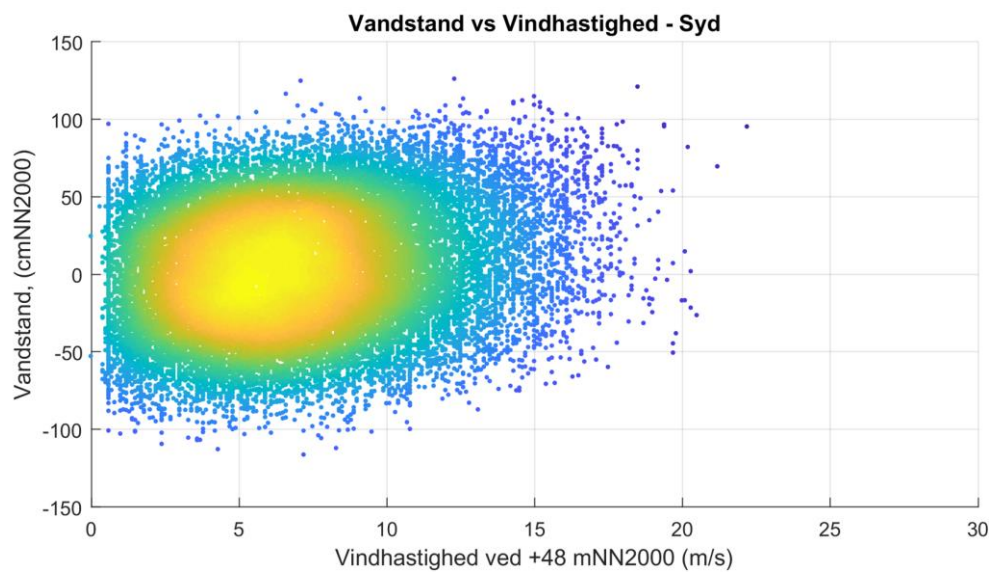
Figur B-1 Scatterplot mellom vindhastighet ved Flesland og vannstand i Bergen havn for vindhastigheter fra nordvest.



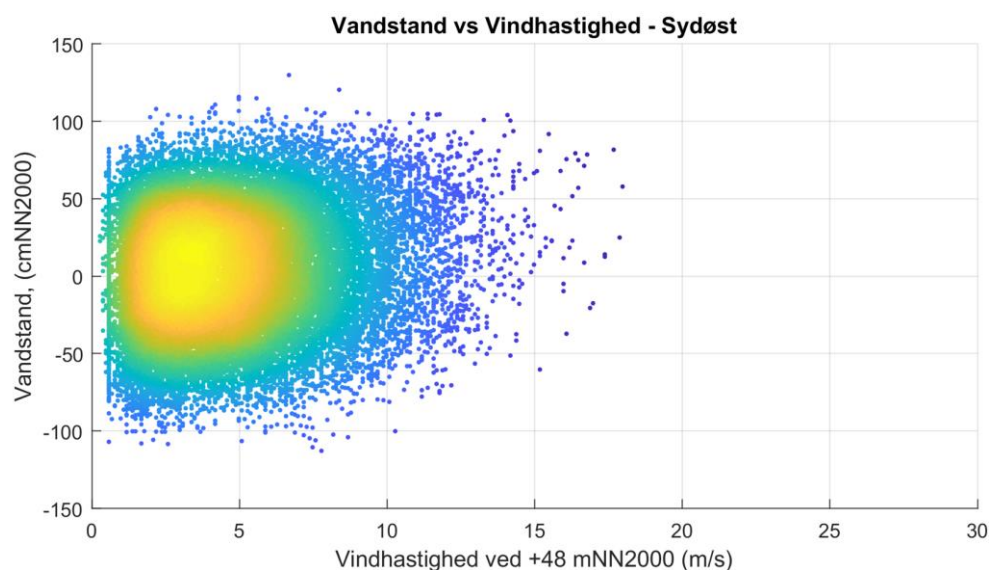
**Figur B-2** Scatterplot mellom vindhastighet ved Flesland og vannstand i Bergen havn for vindhastigheter fra vest.



**Figur B-3** Scatterplot mellom vindhastighet ved Flesland og vannstand i Bergen havn for vindhastigheter fra sydvest.



Figur B-4 Scatterplot mellom vindhastighet ved Flesland og vannstand i Bergen havn for vindhastigheter fra syd.



Figur B-5 Scatterplot mellom vindhastighet ved Flesland og vannstand i Bergen havn for vindhastigheter fra sydøst.

## Bilag C Ekstremverdianalyse på vinddata

Ekstremverdianalysen er utført ved bruk av "peak over threshold" (POT) metoden som beskrevet i Goda 2000, ref. /9/, del 3. 2- og 3- parameter Weibull fordelingen, se Tabell C-1, er tilpasset til vindhastighetene ved bruk av minste kvadraters metode (least square method).

Vindhastighetene er blitt oppdelt i omni- og retningsoppdelte datasett. Retningsoppdelingen er utført med  $\pm 15^\circ$  fra hovedretningen.

For å få ekstremverdiene til å være uavhengige er det benyttet minst 3 dager mellom hver verdi. Hver hendelse er blitt tildelt en overskridelsessannsynlighet (plotting posisjon). Overskridelsessannsynligheten er bestemt som foreslått i Goda 200, ref. /9/, ved:

$$p_i = \frac{i - \alpha}{N - \beta}$$

|      |                     |                                                                 |
|------|---------------------|-----------------------------------------------------------------|
| hvor | $p_i$               | er overskridelsessannsynligheten av rangert hendelse $i$        |
|      | $i$                 | er det rangerende hendelsesnummer                               |
|      | $N$                 | er antall rangerende hendelser benyttet i regresjonen           |
|      | $\alpha$ og $\beta$ | er (plotting posisjon) koeffisienter, som fremgår av Tabell C-1 |

For POT-analysen blir fordelingsregresjonen avhengig av størrelsen av threshold eller antallet av ekstreme hendelser,  $N$ , benyttet i analysen. Antallet av hendelser kan relateres til lengden av tidsserien gjennom antall hendelser pr. år,  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\text{Antal ekstreme hendelse}}{\text{Lengde af tidsserie i år}}$$

$p_i$  representerer den tilhørende sannsynlighet for ikke å overskride verdien av hendelsen  $i$  perioden  $\frac{1 \text{ year}}{\lambda}$ .

For en gitt verdi av  $\lambda$  (hendelser pr. år) og ekstremfordelingen  $F(x)$ , er gjentakperioden,  $RP$ , for hendelse  $x$  bestemt ved:

$$RP(x) = \frac{1}{\lambda(1 - F(x))}$$

Ekstremfordelingene er tilpasset til ekstremhendelsene for  $\lambda = 1, 2, 3, 4, 5$ . Fordelingen med beste tilpasning til dataene (vurdert ved visuell inspeksjon av tilpasninger og relativ feil) er valgt som beste representant for den fysiske prosess. I dette tilfelle gir 3-parameter Weibull fordelingen den beste tilpasning mens  $\lambda=5$  gir den minste relative feilen. Det er valgt å bruke  $\lambda=2$  for ikke å ha for mange målinger med. Følsomheten for fordelingene fremgår av Figur C-1 til Figur C-3.

Tabell C-1 Ekstremfordeling. Funksjon og plotting posisjons koeffisients. Fra Goda 2000, ref. /9/.

| Ekstrem fordeling                                                                      |                                                      | Plotting posisjon koeffisients |                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Navn                                                                                   | Funksjon, $F(x)$                                     | $\alpha$                       | $\beta$                        |
| 3-parameters Weibull*                                                                  | $1 - \exp\left(-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right)$ | $0.20 + \frac{0.27}{\sqrt{k}}$ | $0.20 + \frac{0.23}{\sqrt{k}}$ |
| 2-parameters Weibull                                                                   | $1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{A}\right)^k\right)$   | $0.20 + \frac{0.27}{\sqrt{k}}$ | $0.20 + \frac{0.23}{\sqrt{k}}$ |
| * 3-parameter Weibull fordelingen med k-parameter begrenset til $0.75 \leq k \leq 2.0$ |                                                      |                                |                                |

Monte Carlo simuleringer er utført for å vurdere konfidensgrenser av de statistiske fordelinger.

Monte Carlo simuleringsprosessen fungerer ved å bruke den best tilpassede fordelingsfunksjon til å generere 10.000 tilfeldige datasett av samme lengde som POT datasettet (e.g.  $10,000 \times 105 = 1,050,000$  ekstreme vindhastigheter). Datasettene er generert ved bruk av de samme *shape parameter*, *locasjon parameter* og *scale parameter* som for den beste tilpasning til det originale datasett, hvorfor de generert datasett tilhører samme statistiske populasjon som det originale datasett. For hvert generert datasett brukes minste kvadraters metoden til beregning av ekstremverdiene.

De 10.000 simuleringer kan også brukes til å bestemme et middel ( $\mu$ ) og standardavvik ( $\sigma$ ) av en gjentakerverdi. Under antagelse av at gjentakerverdiene er normalfordelte så er et 68% konfidensintervall svarende til +/- en standardavvik om den sentral estimert verdi av gjentakerverdien. 90% konfidensintervallet er definert ved +/- 1,645 multiplisert med standardavvik.

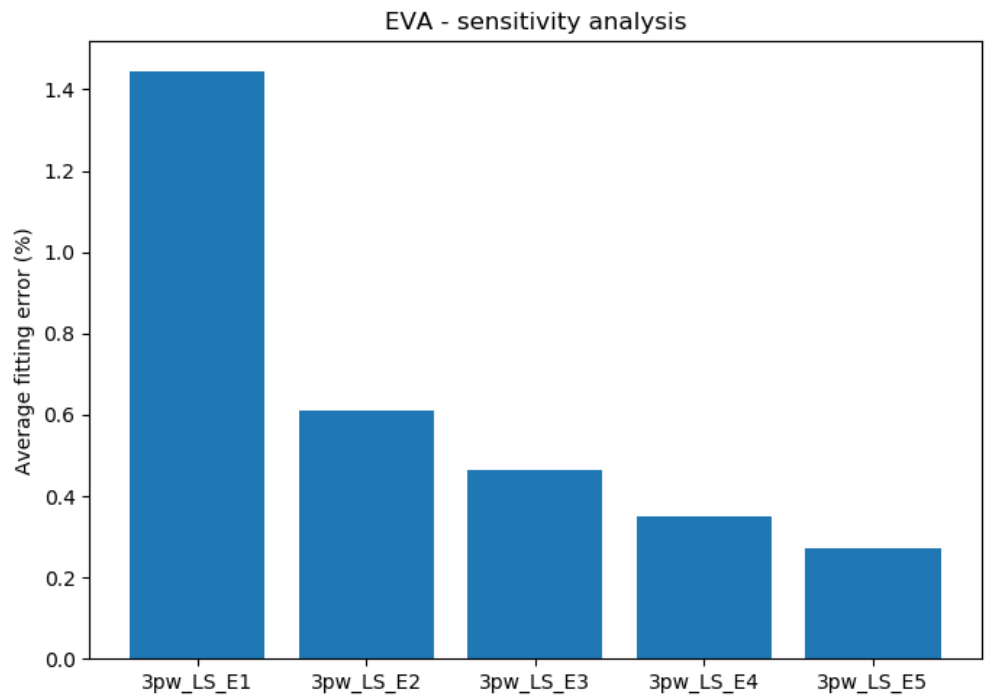
Den "øvre" og "nedre" grense, som er vist på fordelingsfigurene, se Figur C-4 til Figur C-11, svarer til et middel gjentakerverdi +/- én standardavvik (68% konfidensintervall).

Det er i EVA benyttet en metode beskrevet i avsnitt 6.6 i Norsok N-006 til å bestemme de retningsfordelte ekstremverdier. Dette medfører at det skal multipliseres en retningsfaktor på den avleste verdi på fordelingsfigurene. Denne faktoren er 6, da retningsekstremene er regnet du fra 12 retninger. Dvs. at ved avlesning av en 100-årsverdi, så skal man avlese en  $100 \times 6 = 600$  års verdi på f.eks. Figur C-4. For en 5-årsverdi skal man så avlese en 30-årsverdi. Ekstremanalysen for undergruppen av data for retningsoppdelte ekstremere er blitt begrenset for ikke å få høyere ekstremverdi enn for analysen som inkluderer alle retninger.

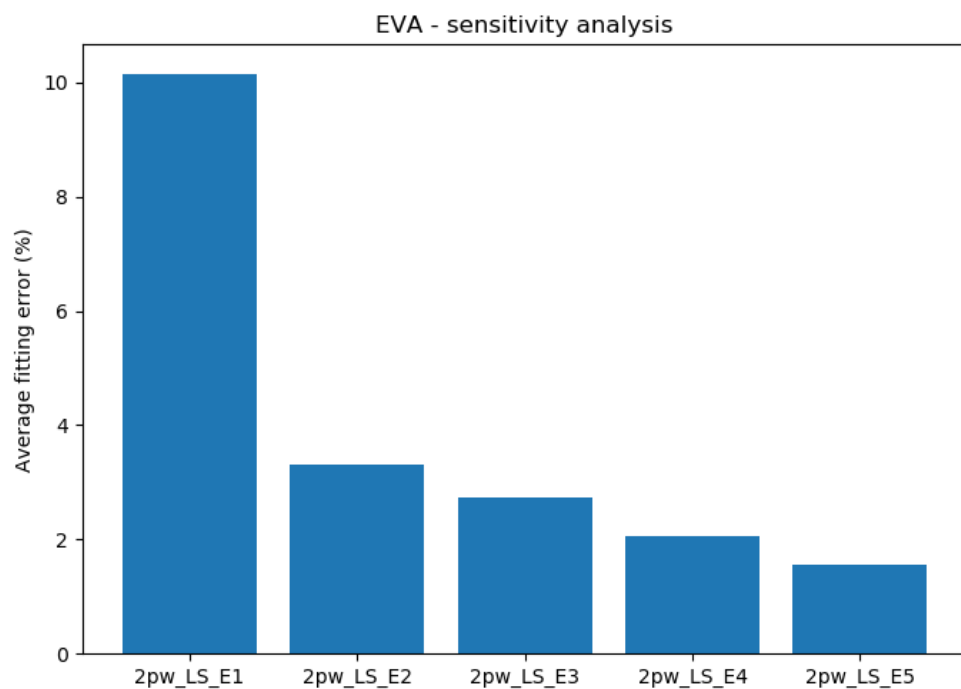
Retningsekstremene er kun vist for vindhastigheter fra 120 °N til 330 °N, da det er disse retningene som er av interesse. Ekstremverdier kommer frem av Tabell C-2 for 10- og 200-års gjentakperiode.

Tabell C-2      Ekstrem vindhastighet for vindretning 120 °N til 330 °N.

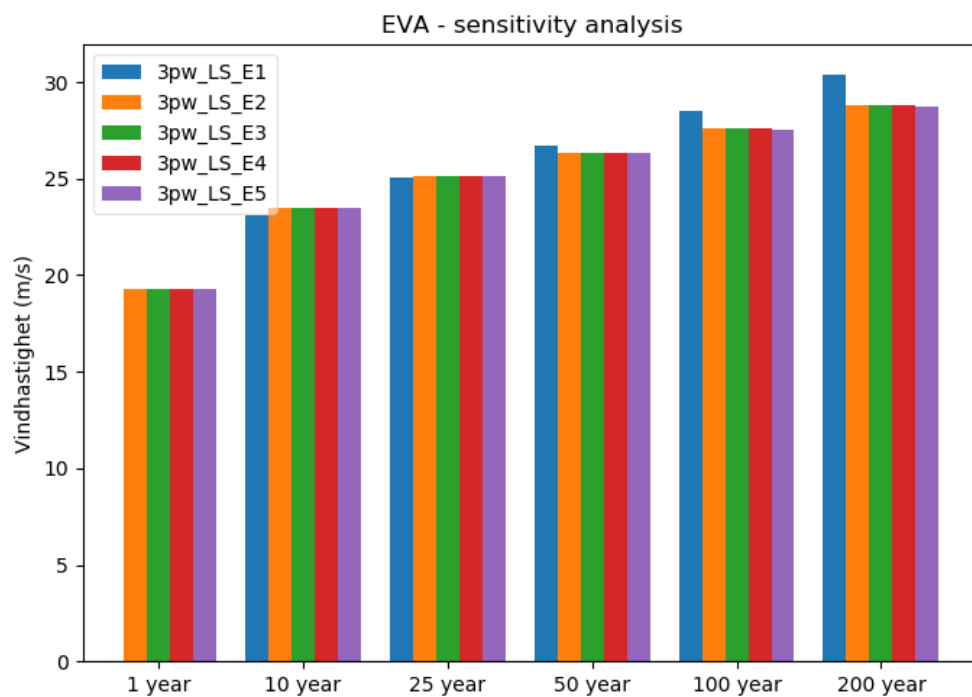
| Ekstrem vindhastighet<br>(m/s) | 120<br>°N | 150<br>°N | 180<br>°N | 210<br>°N | 240<br>°N | 270<br>°N | 300<br>°N | 330<br>°N |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 10 år                          | 17.5      | 23.0      | 22.9      | 23.3      | 20.9      | 22.8      | 23.5      | 23.5      |
| 200 år                         | 20.9      | 27.2      | 26.4      | 28.9      | 25.7      | 28.9      | 28.9      | 28.9      |



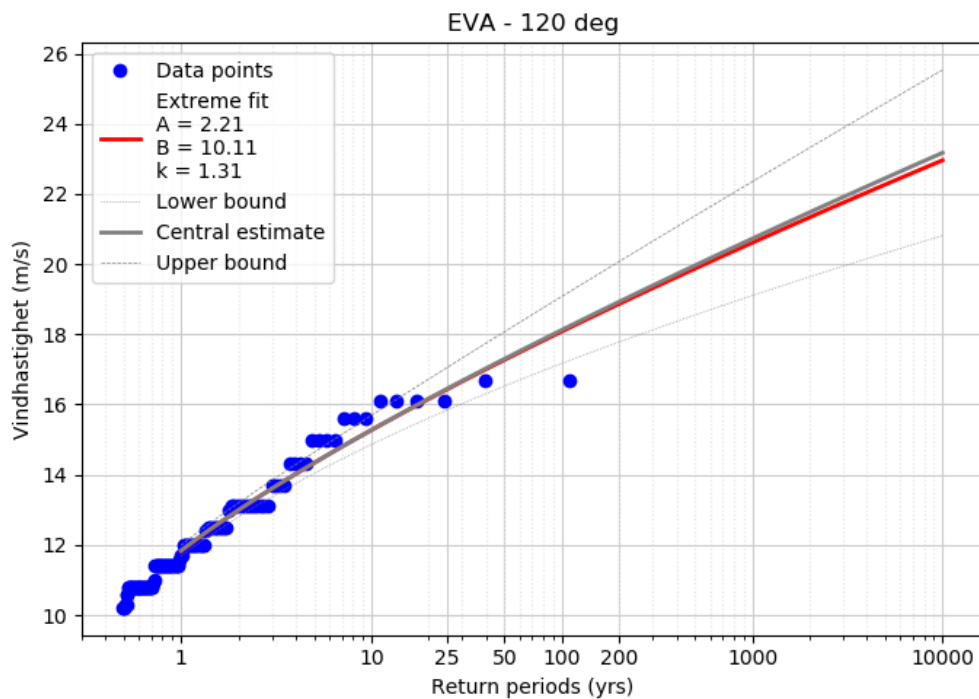
Figur C-1      Middels tilpasnings feil for  $\lambda=1,2,3,4,5$  for 3-parameter Weibull fordelingen (E1 svare til  $\lambda=1$  med 3-parameter Weibull fordeling).



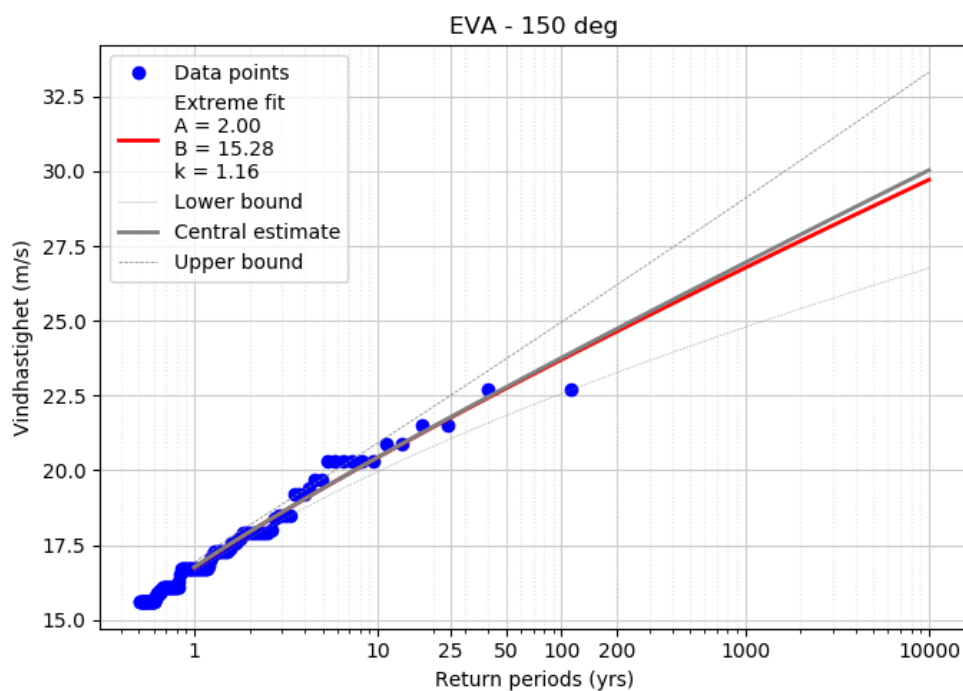
Figur C-2 Middels tilpasnings feil for  $\lambda=1,2,3,4,5$  for 2-parameter Weibull fordelingen (E1 svare til  $\lambda=1$  med 2-parameter Weibull fordeling).



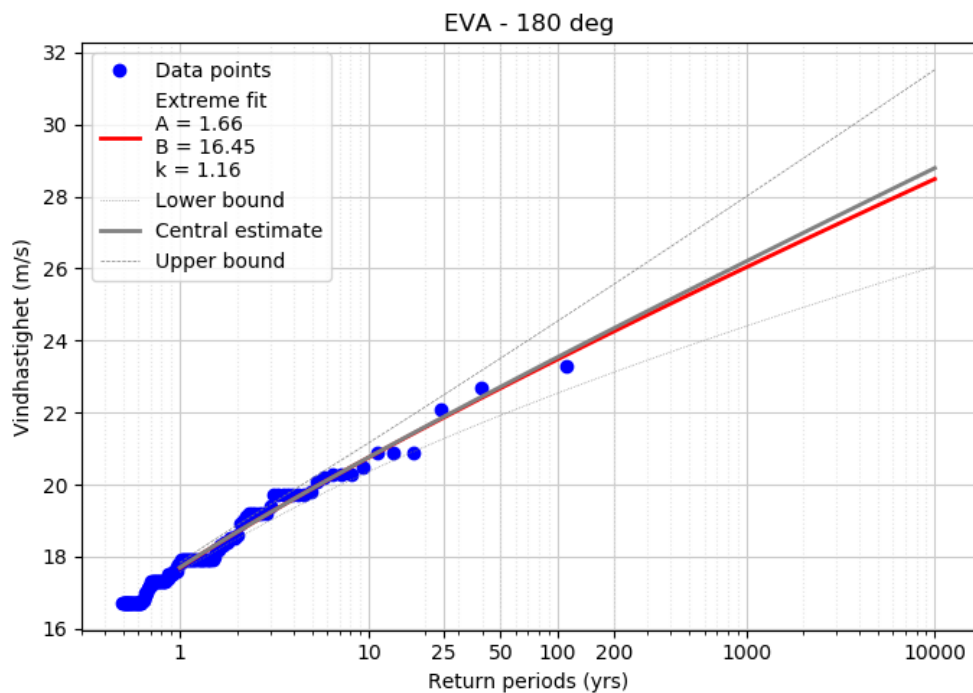
Figur C-3 Ekstrem vindhastigheters avhengighet av avskjæringsnivå (antall hendelser pr. år,  $\lambda$ ) for 3-parameter Weibull fordelingen.



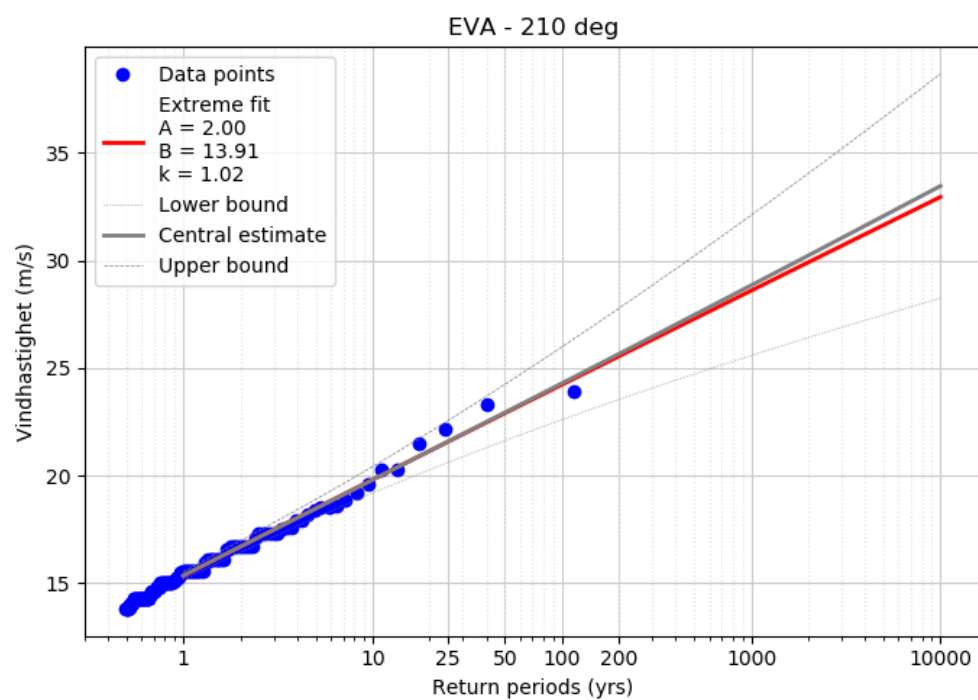
Figur C-4 3-parameter Weibull ekstremverdifordeling for vindhastigheter fra 120°N med  $\lambda=2$  (2 hendelser pr, år).



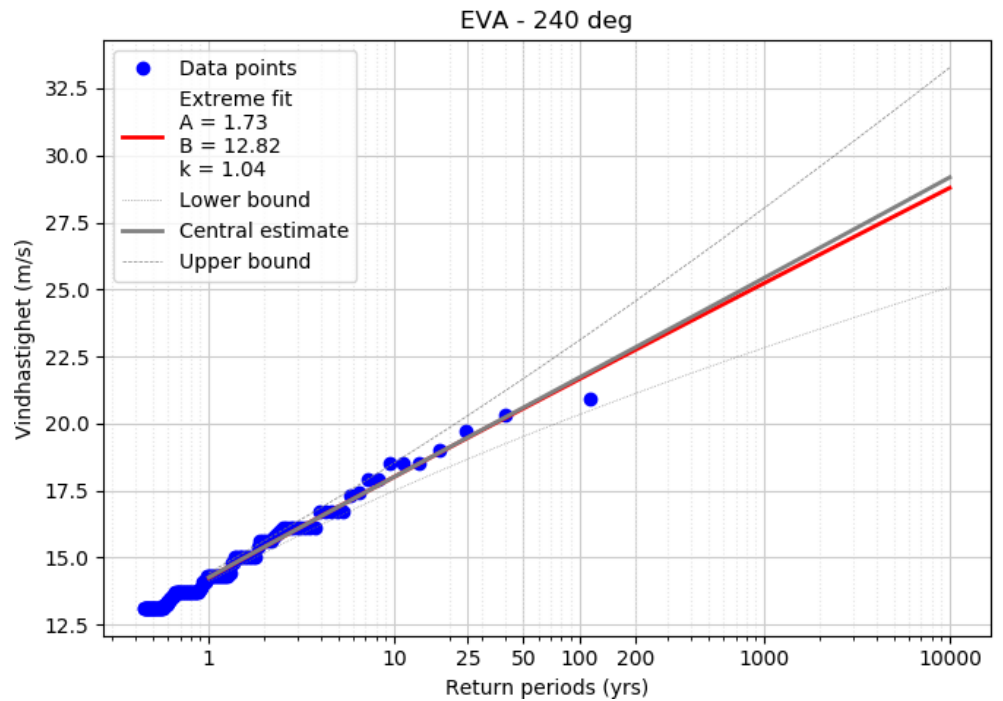
Figur C-5 3-parameter Weibull ekstremverdifordeling for vindhastigheter fra 150°N med  $\lambda=2$  (2 hendelser pr, år).



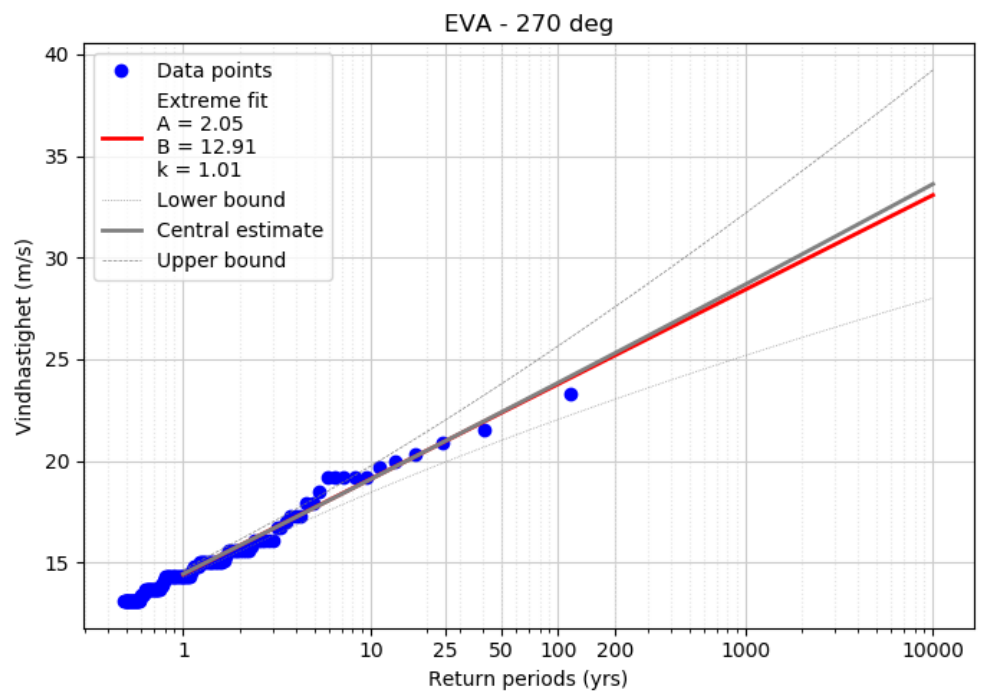
Figur C-6 3-parameter Weibull ekstremverdifordeling for vindhastigheter fra 180°N med  $\lambda=2$  (2 hendelser pr, år).



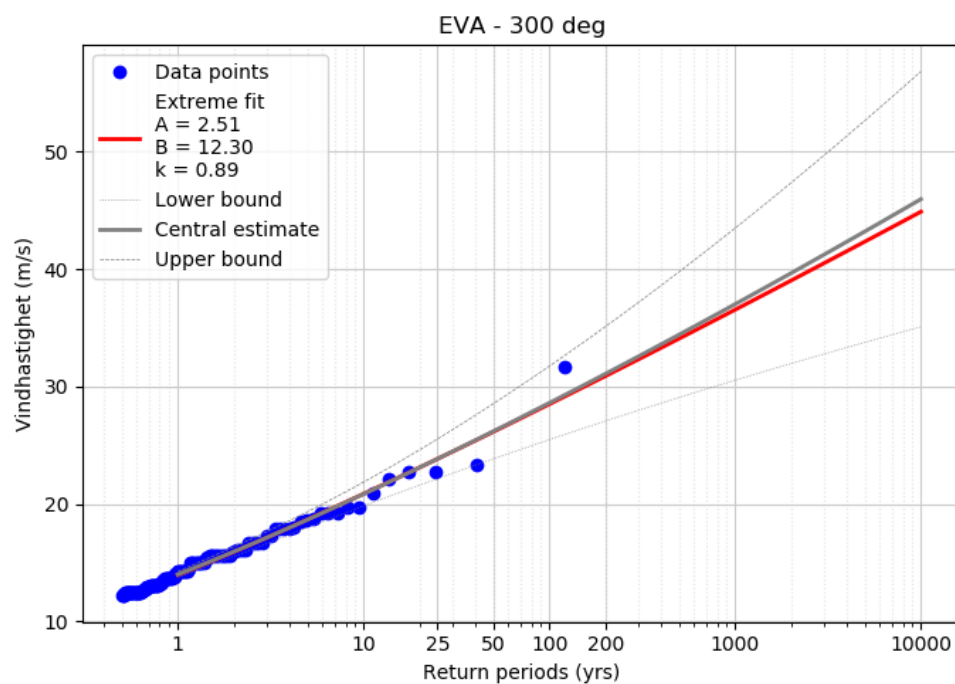
Figur C-7 3-parameter Weibull ekstremverdifordeling for vindhastigheter fra 210°N med  $\lambda=2$  (2 hendelser pr, år).



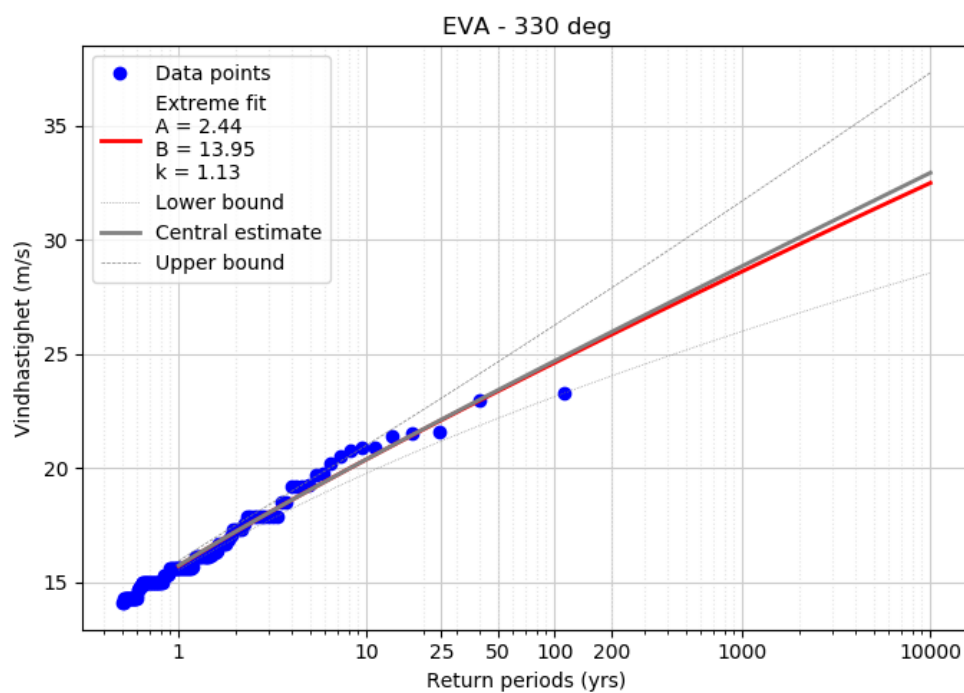
Figur C-8 3-parameter Weibull ekstremverdifordeling for vindhastigheter fra 240°N med  $\lambda=2$  (2 hendelser pr, år).



Figur C-9 3-parameter Weibull ekstremverdifordeling for vindhastigheter fra 270°N med  $\lambda=2$  (2 hendelser pr, år).



Figur C-10 3-parameter Weibull ekstremverdifordeling for vindhastigheter fra 300°N med  $\lambda=2$  (2 hendelser pr, år).



Figur C-11 3-parameter Weibull ekstremverdifordeling for vindhastigheter fra 330°N med  $\lambda=2$  (2 hendelser pr, år).

## Bilag D Vurdering av bølgeforhold

### D.1 Bølgeforhold ved Hegreneset

De ekstreme bølgeforholdene estimeres på bakgrunn av SPM-metoden beskrevet i Ref. /10/. Til beregningen er det benyttet et høy, samt ekstreme vindhastigheter med 10- og 200-års returperiode, jf. kapittel 3. De estimerte ekstreme bølgeforholdene vises i Tabell D-1 og Tabell D-2 for fremtidig situasjon ved Hegreneset. Det er valgt å samle bølgeretningene til 5 retninger. Herved er det valgt å benytte følgende vindhastigheter til å estimere bølgeforholdene:

- > SØ, maksimal vindhastighet av 120 °N og 150 °N benyttes.
- > S, vindhastighet ved 180 °N benyttes.
- > SV, maksimal vindhastighet av 210 °N og 240 °N benyttes.
- > V, vindhastighet ved 270 °N benyttes.
- > NV, maksimal vindhastighet av 300 °N og 330 °N benyttes.

Tabell D-1 Ekstreme bølgeforhold for 10-års returperiode, samt vindhastighet og strøk for relevante bølgeretninger.

| RP = 10 år            |      |      |      |      |      |
|-----------------------|------|------|------|------|------|
| Bølgeretning          | NV   | V    | SV   | S    | SØ   |
| U <sub>10</sub> (m/s) | 23,5 | 22,8 | 23,3 | 22,9 | 23,0 |
| Fetch (km)            | 4    | 3    | 3,5  | 1,5  | 1    |
| H <sub>s</sub> (m)    | 1,3  | 1,1  | 1,2  | 0,8  | 0,6  |
| T <sub>p</sub> (s)    | 3,4  | 3,0  | 3,2  | 2,4  | 2,1  |

Tabell D-2 Ekstreme bølgeforhold for 200-års returperiode, samt vindhastighet og strøk for relevante bølgeretninger.

| RP = 200 år           |      |      |      |      |      |
|-----------------------|------|------|------|------|------|
| Bølgeretning          | NV   | V    | SV   | S    | SØ   |
| U <sub>10</sub> (m/s) | 28,9 | 28,9 | 28,9 | 26,4 | 27,2 |
| Fetch (km)            | 4    | 3    | 3,5  | 1,5  | 1    |
| H <sub>s</sub> (m)    | 1,6  | 1,4  | 1,5  | 0,9  | 0,8  |
| T <sub>p</sub> (s)    | 3,7  | 3,3  | 3,5  | 2,5  | 2,2  |

Bølgeforholdene som vises i Tabell D-1 og Tabell D-2 gjelder for den vestlige og sydlige perimeteren. Bølgene fra NV vil dog f.eks. reduseres rundt om spissen på Hegreneset pga. diffraksjon, som det tas høyde for ved vurderingen av sikringsnivåer. Det vurderes at det skal benyttes en diffraksjonskoeffisient på ca. 0,5 for bølger fra NV langs den sydlige perimeteren.

Bølger fra øst vurderes til å være meget begrensede pga. det korte frie strekket og det bakenforliggende terrenget. En dimensjonerende bølgehøyde på 0,5 m er vurdert fra øst.