
NOTAT

KYSTSIKRING ENEBÆRODDE

Spektralbølgemodellering ved Enebærodde

PROJEKTNUMMER 41004799



VERSION: 0

30-09-2022

HAVNE & GEOTEKNIK

Udarbejdet af: BUJO

Kontrolleret af: REDI

Godkendt af: OLRI

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	1
2	Beskrivelse af bølgemodel	2
2.1	Vanddybder	2
2.1.1	Fremskrivning af vanddybder	3
2.2	Beregningsnet grov model	3
2.3	Beregningsnet fin model	4
2.4	Vindfelt	5
2.5	Randbetingelser	6
2.6	Varierende vandstande i bølgemodellen	7
3	Resultater	9
3.1.1	Resultater fra den klimafremskrevne bølgemodel	9
3.1.2	Resultater fra bølgemodellen med de nuværende vanddybder	12
3.1.3	Transformation af bølger ind til skråningsbeskyttelsens fod	13
4	Konklusion	15
5	Referencer	16

1 Indledning

Nordfyns Kommune ønsker at bevare adgangsvejen Halshusene, som er den eneste vej på Enebærodde, og den eneste vej ud til Enebærodde Fyr samt anden bebyggelse på odden. Vejen består af grus, og da odden i den nordlige ende er meget smal og lavtliggende, er odden indimellem delvist oversvømmet og vejen er i det seneste årti ad flere omgange blevet eroderet og undermineret på de mest kystnære strækninger under stormsituationer med forhøjet vandstand. Senest under stormen Malik (30.01.2022) blev op mod 2/3 af vejens bredde nogle steder borteroderet af bølger ifølge udbudsmaterialet.

På to særligt kystnære strækninger ønsker Nordfyns Kommune derfor at beskytte grusvejen med skråningsbeskyttelse. Skråningsbeskyttelsen skal ikke sikre imod oversvømmelse, men blot imod erosion af vejen. Oversvømmelse af vejen, kan også forekomme fra fjordsiden.

Selve Enebærodde er ejet af Stiftelsen Hofmanskave (herefter kaldet Stiftelsen) og er åben for offentligheden til fods eller på cykel og er særdeles naturskønt. Hele odden er omfattet af Natura 2000 området Odense Fjord og store dele af odden er udpeget med lysåbne habitatnaturtyper samt §3 beskyttet natur. Dette gælder også de arealer, hvor det forventes, at der skal etableres skråningsbeskyttelse.

Nærværende notat beskriver forudsætninger, modelopsætning og resultater fra en spektralbølgemodel. Resultaterne fra spektralbølgemodellen er anvendt til at bestemme ekstrembølger som designbasis for en skråningsbeskyttelse af de to strækninger i den nordlige ende af Enebærodde, hvor vejen er særligt kystnær.

2 Beskrivelse af bølgemodel

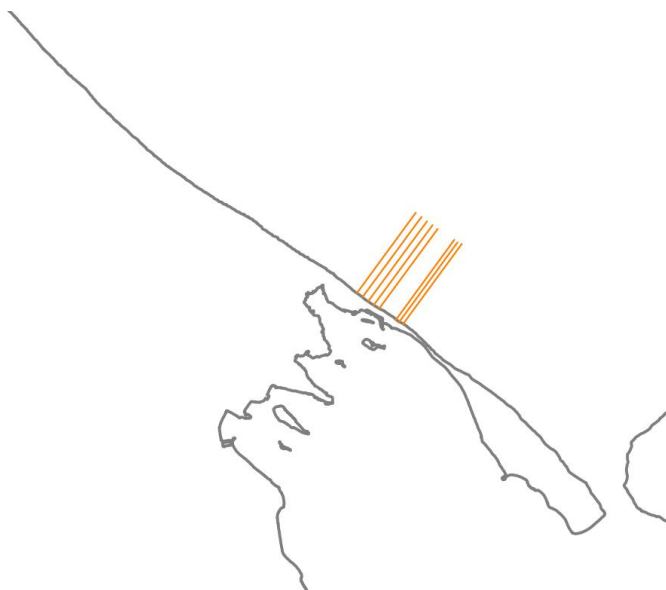
Der er foretaget spektralbølgemodellering i DHI's software MIKE21 SW, som er en vind-bølge model baseret på et ustruktureret beregningsnet af trekanter. Modellen medtager bølgevekst, bølgebrydning og transformation af vindgenererede bølger og dønninger i kystfjerne og -nære områder. Simuleringslængden er 10 år i perioden 01-01-2009 til 31-12-2018.

Der er indledningsvist lavet simuleringer i en grov model der inkluderer hele Kattegat som vist på Figur 2.2. Derefter er der lavet en lokal fin model ved Enebærodde, vist på Figur 2.4, hvor opløsningen er væsentligt højere, for at opløse havbunden helt korrekt omkring udtrækspunktet.

2.1 Vanddybder

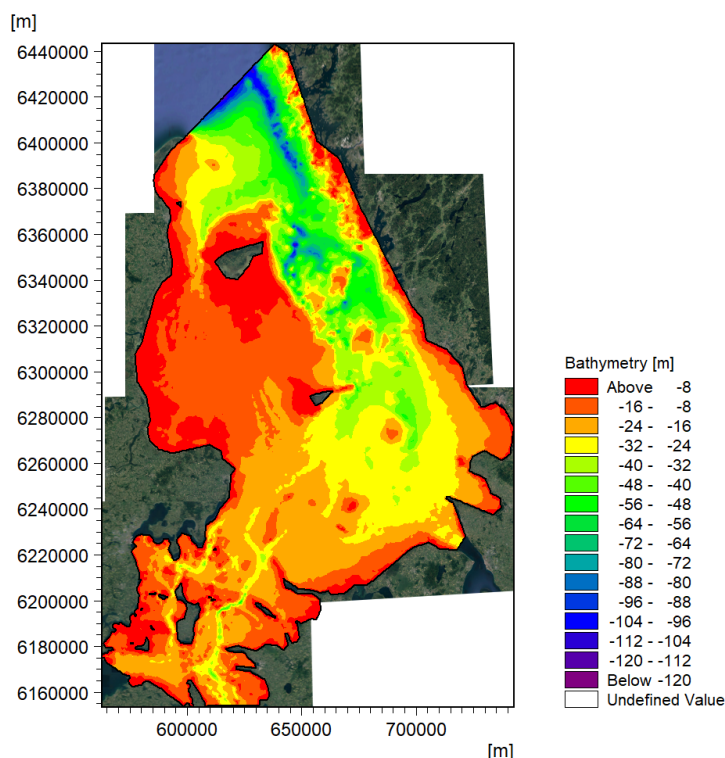
Vanddybderne for modellen er hentet fra MIKE C-MAP, som indeholder xyz-datapunkter for vanddybder for næsten hele verden. Det er et produkt købt ved DHI. Der er hentet en punktsky for modelområdet, som er læst ind i modellen.

Som supplement til punktskyen fra MIKE C-MAP har Sensor Survey for Sweco foretaget en søopmåling af vanddybderne umiddelbart ud for de to strækninger på den nordlige del af Enebærodde. Søopmålingerne er udført i 8 linjer vinkelret ud fra kysten som vist på Figur 2.1.



Figur 2.1: Viser linjerne, hvor Sensor Survey har foretaget søopmåling.

I områderne mellem søopmålingerne interpoleres der mellem punkterne, for at danne havbundens konturer. På Figur 2.2 ses vanddybderne der er brugt i modellen.



Figur 2.2: Viser domænets udbredelse og dets vanddybder.

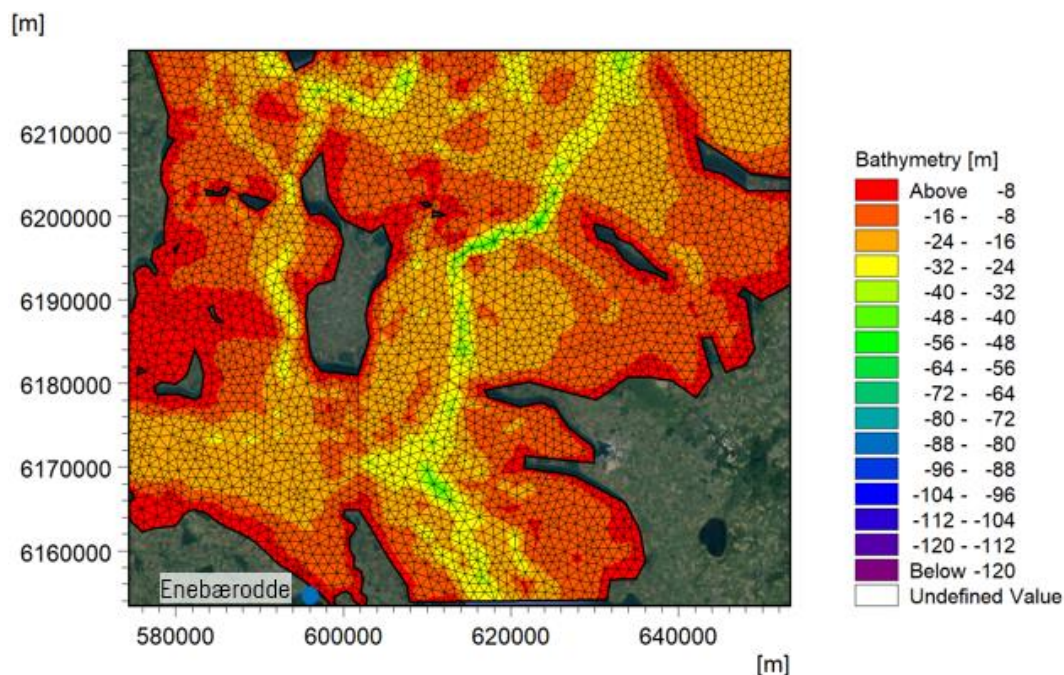
2.1.1 Fremskrivning af vanddybder

Vandspejlet forventes at stige i fremtiden som følge af klimaforandringerne, og der er derfor - udover de nuværende vanddybder præsenteret i afsnit 2.1 - også regnet med vanddybder fremskrevet til midten af indeværende århundrede, 2041-2070, med perioden 1981-2010 som reference //Ref 2. Vandspejlet forventes at stige ca. 0,26 m i det højeste udledningsscenari, RCP 8.5. Landhævning er ikke medregnet i denne analyse hvilket vurderes at være konservativt.

I modellen er den samme kystlinje som for de nuværende vanddybder anvendt, og alle vanddybder er gjort 0,26 m dybere i modellen med de fremskrevne vanddybder. Det betyder, at bølgerne kan blive højere da bølgerne vil blive mindre begrænset af vanddybden. Kystlinjen vil flytte sig landværts når vandspejlet stiger og dette er der set bort fra i modellen, da det ikke har betydning for resultaterne.

2.2 Beregningsnet grov model

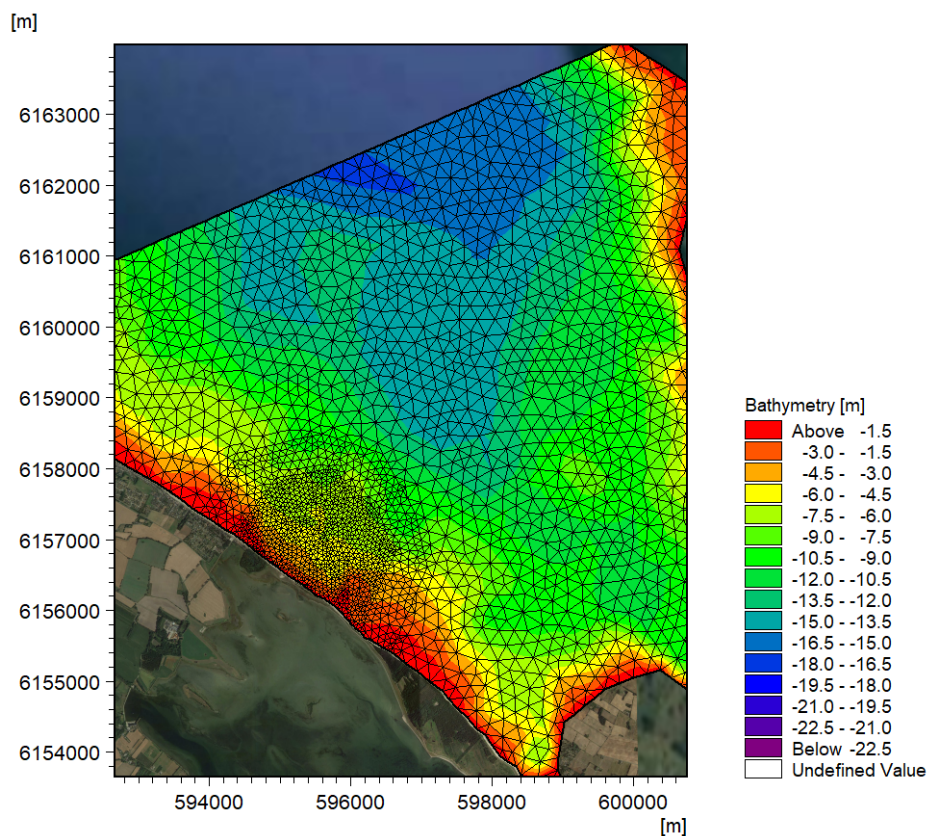
På Figur 2.3 ses beregningsnettet for den sydlige del af modellen. Dette net er opbygget af triangulære beregningslementer i hele domænet.



Figur 2.3: Beregningsnet for den sydlige del af domænet. Enebærodde markeret med en blå prik.

2.3 Beregningsnet fin model

På Figur 2.4 ses beregningsnettet for den fine model lokalt ved Enebærodde, hvor der på modellens rand mod nordvest er påsat en tidsserie fra den grove model der indeholder den signifikante bølgehøjde, H_s , peak bølgeperioden, T_p , middel bølgeretningen og standardafvigelsen for bølgeretningen fra samme linje i den grove model. Den grove model er simuleret først, hvorefter resultater fra denne er brugt som input til den fine model. Den fine model er mindre med et beregningsnet der generelt er med højere opløsning, mens simuleringsperiode og længden er den samme for begge modeller. Beregningsnettet er særligt fint omkring de to strækninger, hvor der ønskes kystbeskyttelse og der også er foretaget søopmålinger, for at opløse havbunden korrekt.



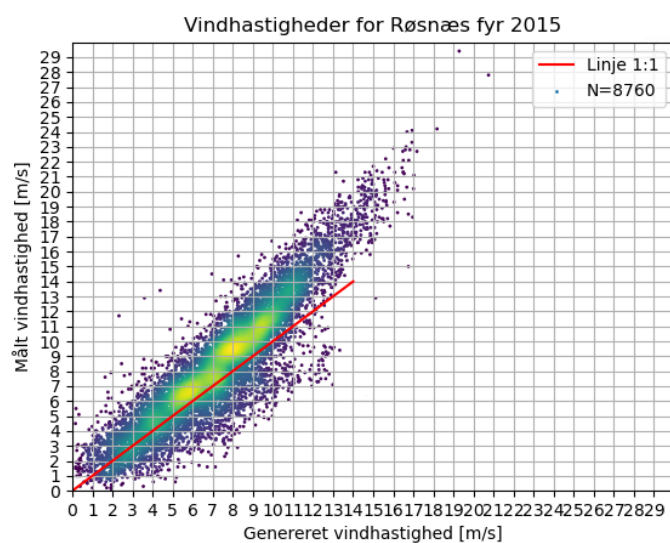
Figur 2.4: Viser beregningsnettet for den fine model.

2.4 Vindfelt

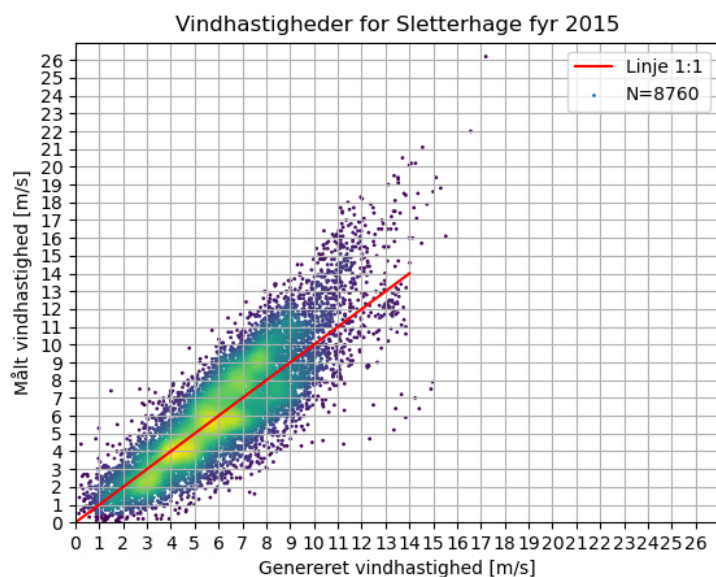
Vindfeltet er udtrukket fra ECMWF, som står for "The European Centre for Medium Range Weather Forecasts". Herfra kan der udtrækkes vind og vejrdato i felter på 30x30 kilometer for de aktuelle år der simuleres, og disse dataset kan derefter indlæses i modellen.

For at validere vinddata i modellen, er det plottet op i mod målt vinddata fra to nærliggende fyr til Enebærødde. Målestationer anvendt til sammenligning af data er Sletterhage fyr og Røsnæs fyr.

På Figur 2.5 og Figur 2.6 ses genereret data for hhv. Sletterhage fyr og Røsnæs fyr plottet ud af x-aksen og målt data for de førnævnte fyr plottet op af y-aksen. Ydermere ses en linje med en hældning på 1 som viser hvor scatter data vil ligge, hvis genereret data og målt data antager den samme værdi. Graferne viser, at der er en ringe skævhed mellem det genererede data og det målte, der generelt ligger acceptabelt tæt på hinanden. Der er en tendens til, for begge målepunkter, at det generelt er ved de højere vindhastigheder, at skævheden mellem det genererede data og det målte data er størst. Generelt viser Figur 2.5 og Figur 2.6, at der er målt større vindhastigheder end der er genereret, dog er skævheden vurderet at være acceptabel.



Figur 2.5: Genererede vindhastigheder ved Røsnæs Fyr plottet op i mod målte vindhastigheder for år 2015.



Figur 2.6: Genererede vindhastigheder ved Sletterhage Fyr plottet op i mod målte vindhastigheder for år 2015.

2.5 Randbetingelser

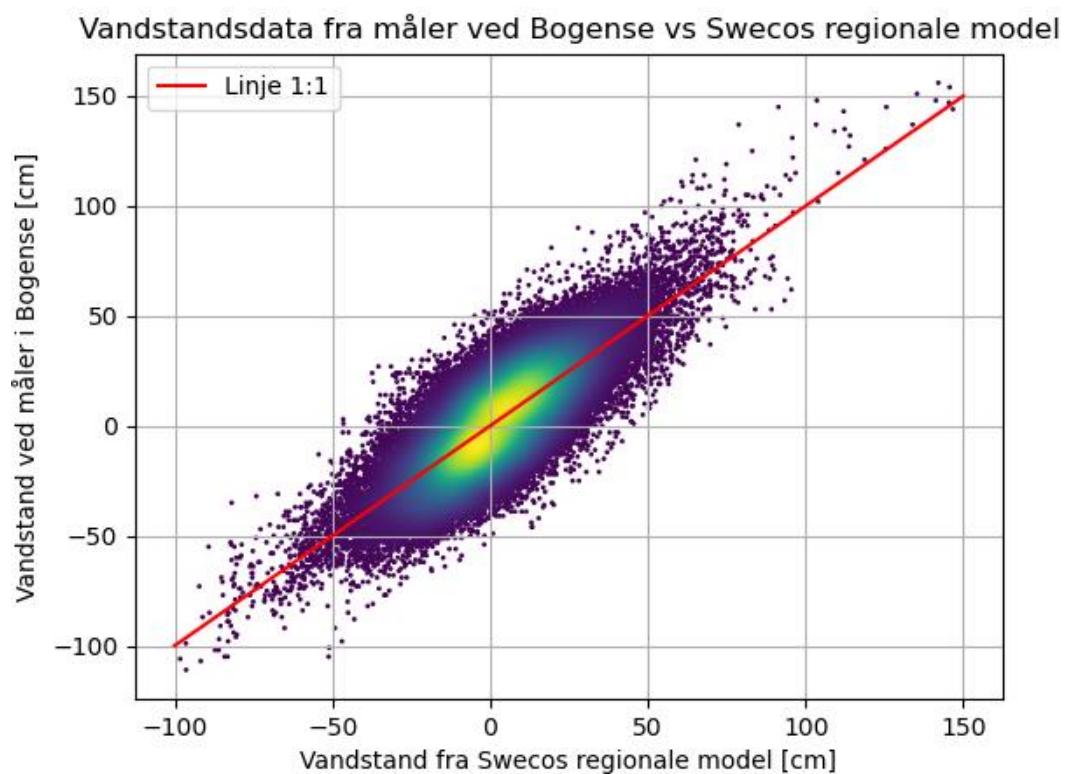
Randen hele vejen rundt om den grove model er lukket og derfor er der ikke sat nogle randbetingelser på. Randbetingelser til randen mod nordvest i den fine model er udtrukket fra den grove model.

2.6 Varierende vandstande i bølgemodellen

I spektralbølgemodellen er der sat vandstandsvariation på fra vandstandsmåleren ved Bogense Havn for at medtage de generelle tidevandsvariationer og eventuelle opstuvningseffekter, som kan betyde større bølgehøjder da bølgerne dybdebegrænses tættere på kysten. Vandstandsmåleren i Bogense står i koordinaterne UTM32 6158380N, 568120E.

Da der i vandstandstidsserien for Bogense er huller, hvor der ikke er nogen observationer, er den udfyldt med vandstandsdata fra Swecos regionale model, som bl.a. indeholder vandstande for alle danske farvande, Østersøen og op til den Botniske bugt. Vandstandsdata fra Swecos regionale model er udtrukket ud for kysten ved Bogense i koordinaterne UTM32 6160154N, 567147E. Koordinaterne for udtrækspunktet er et stykke længere fra kysten end koordinatet for vandstandsmåleren, fordi beregningsnettet i Swecos regionale model er groft og der kan være store usikkerheder i at udtrække data meget tæt på kysten.

Som det kan ses på Figur 2.7 er der en ringe afvigelse i vandstanden fra vandstandsmåleren i Bogense og Swecos regionale model, så det vurderes, at være rimeligt at bruge data fra den regionale model, hvor der ikke er måledata. Der er i alt 87647 tidsskridt i bølgemodellen, hvor der er 4842 huller i vandstandsobservationerne fra Bogense, hvilket betyder, at ca. 5,5 % af vandstandene i tidsserien er udfyldt med vandstande fra Swecos regionale model.



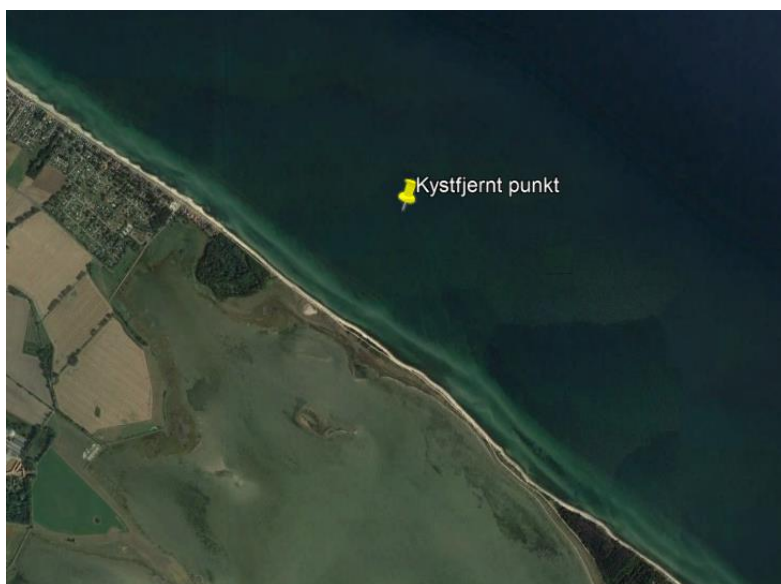
Figur 2.7: Viser vandstandsdata fra Swecos regionale model plottet op imod vandstandsdata fra vandstandsmåleren ved Bogense.

Vandstandsvariationerne fra vandstandsmåleren ved Bogense suppleret med data fra Swecos regionale model er anvendt i hele domænet.

3 Resultater

I dette afsnit bliver resultaterne for bølgemodellen præsenteret. Der vil blive præsenteret resultater både fra de nuværende forhold og fra fremtidige forhold med større vanddybder grundet klimafremskrivningen på havspejlet, som beskrevet i afsnit 2.1.1.

Resultaterne fra MIKE 21 SW modellerne er skrevet ud i et kystfjernt punkt ud for Enebærodde i koordinaterne UTM 32 595500E 6157000N ca. 600 m fra kysten og på ca. 6 m vanddybde, som ses på Figur 3.1.

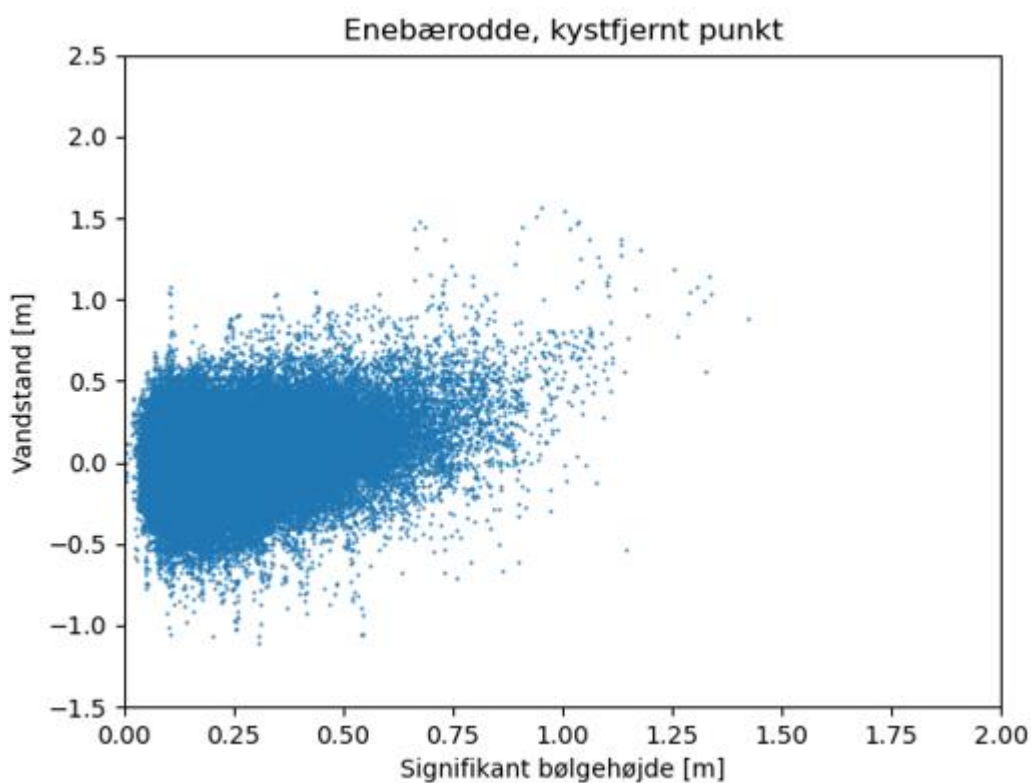


Figur 3.1: Viser det kystfjerne punkt, hvor data til resultatbehandling er udtrukket. Punktet ligger i koordinaterne UTM 32 595500E 6157000N ca. 600 m fra kysten og på ca. 6 m vanddybde.

Fremgangsmåden for resultatbehandling er den samme i nutidige forhold som for klimafremskrevne forhold. I nærværende rapport beskrives fremgangsmåden kun for klimafremskrevne forhold og for nuværende forhold præsenteres en tabel med resultater.

3.1.1 Resultater fra den klimafremskrevne bølgemodel

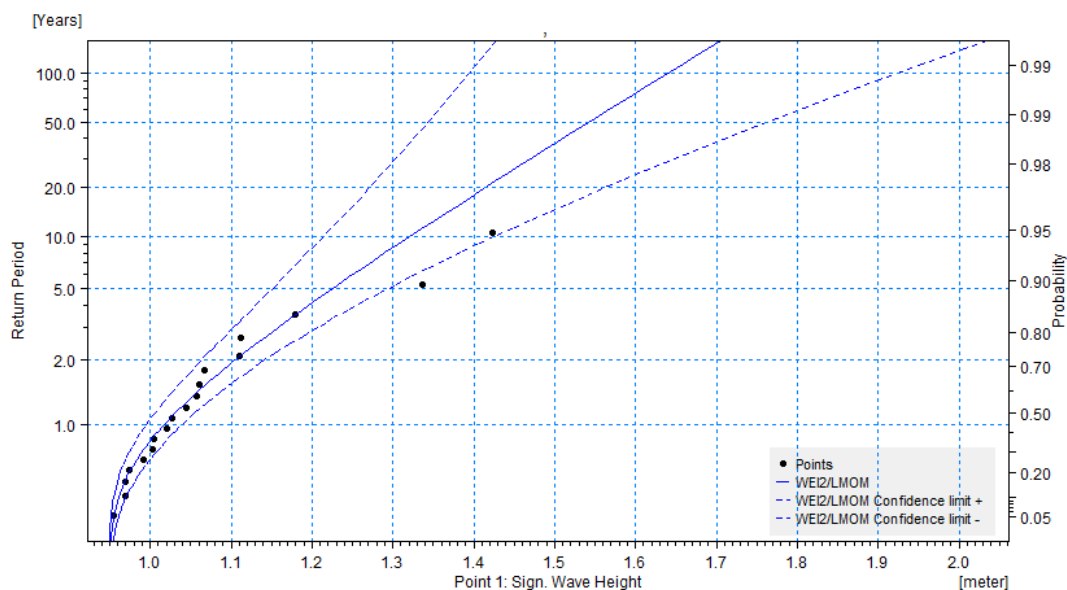
På Figur 3.2 ses den signifikante bølgehøjde og vandstanden fra den klimafremskrevne spektralbølgemodel plottet op imod hinanden. Her ses en klar tendens til, at de høje bølger forekommer samtidig med højvande.



Figur 3.2: Viser den signifikante bølgehøjde og vandstanden fra den klimafremskrevne spektralbølgemodel plottet op imod hinanden. Da nulpunktet for vandstand i modellen svarer til en klimafremskrivning på 0,26 m skal vandstandene for punkterne i figuren tillægges 0,26 m i vandstand.

Ekstrembølger til design af bølgebrydere for klimafremskrevne vanddybder

På Figur 3.3 ses en sandsynlighedsgraf for specifikke bølgehøjder. Grafen er dannet i MIKE EVA, der er et værktøj til at lave ekstremværdianalyse. I analysen er de største bølger i simuleringen medtaget ved "peak over threshold"-metoden for et antal bølger svarende til 1-2 per simuleringsår, og er vist som punkter på grafen. Tiden mellem de medtagne bølger er minimum 72 timer, så der ikke medtages bølger fra sammen ekstremhændelse.



Figur 3.3: Viser en sandsynlighedsgraf for specifikke bølgehøjder.

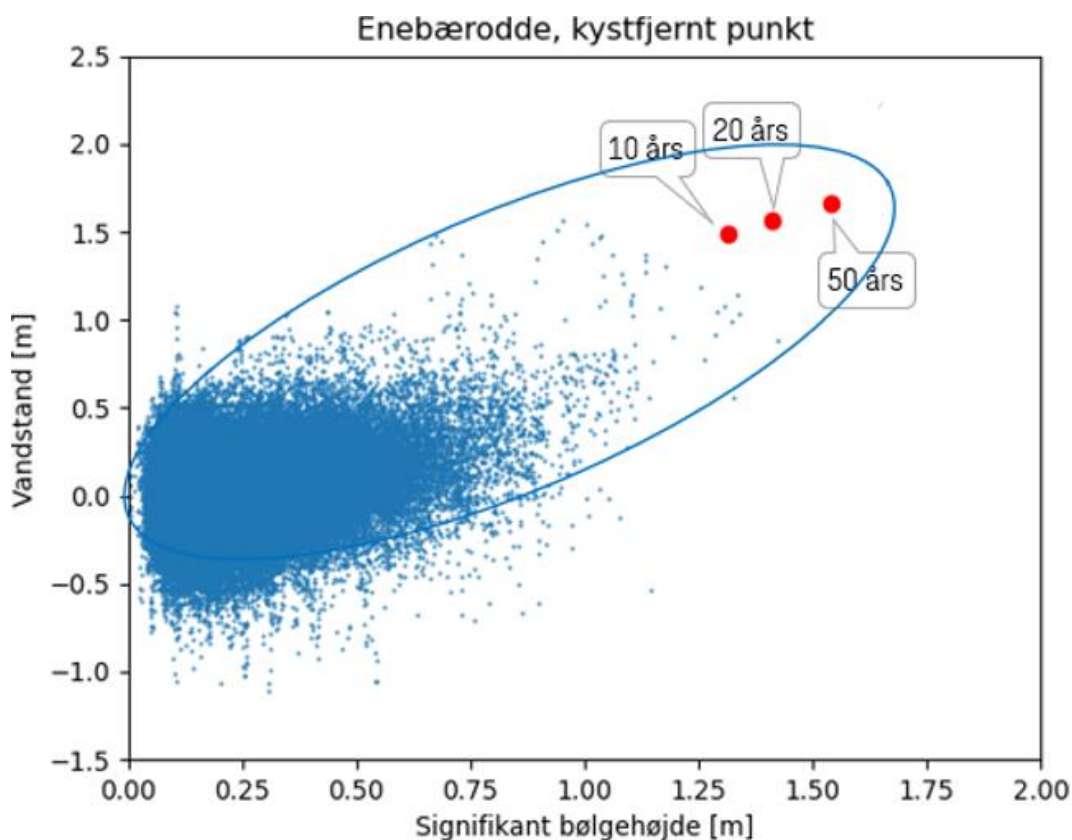
Resultater

Tabel 3.1 Viser resultaterne for bølgehøjderne til de respektive returperioder udtrukket fra Figur 3.3.

Returperiode [år]	Bølgehøjde [m]	Højvandstand [m DVR90]
10	1,30	1,78
20	1,40	1,84
50	1,55	1,92

Tabel 3.1: Viser bølgehøjden og højvandstanden til udvalgte returperioder aflæst på Figur 3.3 og i Kystdirektoratets højvandsstatistikker tillagt 0,26 m som følge af havspejlsstigningen.

Resultaterne i Tabel 3.1 er også plottet på Figur 3.4 sammen med punkter fra simuleringen.

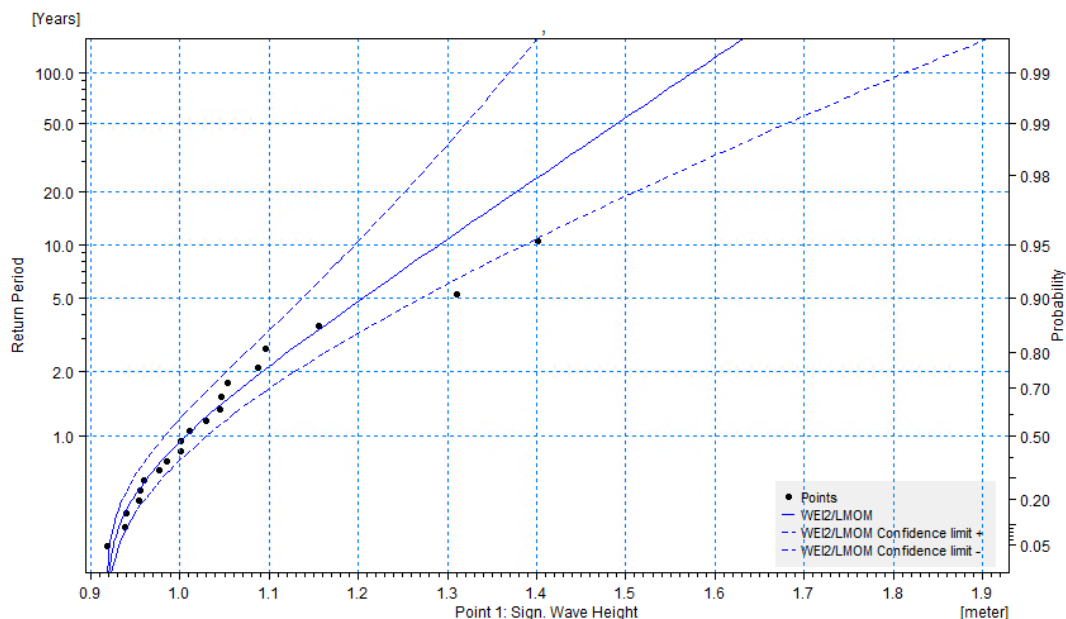


Figur 3.4: Viser simuleringresultater, hvor bølgehøjder er plottet op imod vandstand. Der er ydermere indsat 3 punkter bestående af en højvandshændelse fra KDI's højvandsstatistikker koblet med den tilhørende ekstrembølge fra den klimafremskrevne spektralbølgesimulering. Da nulpunktet for vandstand i modellen svarer til en klimafremskrivning på 0,26 m skal vandstandene for punkterne i figuren tillægges 0,26 m i vandstand. Den blå ellipse markerer, at der er en tydelig korrelation mellem vandstand og bølgehøjde.

3.1.2 Resultater fra bølgemodellen med de nuværende vanddybder

I nærværende afsnit beskrives de nutidige bølgeforhold ved de to kystnære strækninger ved Enebærodder. Her præsenteres bølgedata fra MIKE 21 SW modellen sammen med en ekstremværdianalyse for vandstand og bølgehøjde.

Ekstrembølger til design af bølgebrydere for nuværende vanddybder



Figur 3.5: Viser en sandsynlighedsgraf for specifikke bølgehøjder.

Resultater

Returperiode [år]	Bølgehøjde [m]	Højvandstand [m DVR90]
10	1,30	1,52
20	1,40	1,58
50	1,50	1,66

Tabel 3.2: Viser bølgehøjden og højvandstanden for nuværende havspejlsniveau til udvalgte returperioder aflæst på Figur 3.5 og i Kystdirektoratets højvandsstatistikker.

3.1.3 Transformation af bølger ind til skråningsbeskyttelsens fod

I nærværende afsnit transformeres dybhavsbølgerne, bestemt i afsnit 3.1.1 og afsnit 3.1.2, ind til skråningsbeskyttelsens fod, for at bestemme designbølgerne for skråningsbeskyttelsen. Designbølgerne ved konstruktionens fod er bestemt ved fremgangsmåden i The Rock Manual //Ref 1 og kan ses i Tabel 3.3 for nuværende vanddybder og i Tabel 3.4 for klimafremskrevne vanddybder. Det er vigtigt at understrege, at bølgetransformationen er lavet under antagelse af, at foden af skråningsbeskyttelsen ligger i kote +0,5 m DVR90, da den endelige opmåling af terrænet først foretages i det tidlige forår, efter potentielle vinterstorme er hændt. Da bølgerne er stærkt dybdebegrænset kan det have betydning for designbølgehøjderne hvis foden af skråningsbeskyttelsen skal ligge i en anden kote end +0,5 m DVR90, og det kan være nødvendigt at regne bølgehøjderne igen med de nye forudsætninger.

Havbundshældningen foran de to stækninger der ønskes beskyttet er bestemt ud fra opmålingerne foretaget af Sensor Survey til ca. 1:100.

I Tabel 3.3 og Tabel 3.4 er der tilføjet håndberegninger for 1, 2, 5 og 10 års hændelser, da disse bruges i overskyldsberegninger for skråningsbeskyttelsen.

Returperiode [år]	Bølgehøjde [m]	Højvandstand [m DVR90]
1	0,50	1,25
2	0,55	1,35
5	0,60	1,45
10	0,65	1,52
20	0,70	1,58
50	0,75	1,66

Tabel 3.3 Designscenarier ved skråningsbeskyttelsens fod med nuværende vanddybder.

Returperiode [år]	Bølgehøjde [m]	Højvandstand [m DVR90]
1	0,65	1,51
2	0,70	1,61
5	0,75	1,71
10	0,80	1,78
20	0,85	1,84
50	0,90	1,92

Tabel 3.4: Designscenarier ved skråningsbeskyttelsens fod med vanddybder fremskrevet til midten af indeværende århundrede.

4 Konklusion

Der kan baseret på de foretagne analyser beskrevet i nærværende rapport konkluderes følgende:

- Der er foretaget numerisk simulering af de nuværende og klimafremskrevne vanddybder.
- Ved en fremskrivning af vanddybderne til midten af indeværende århundrede estimeres bølgehøjden for de respektive returperioder at stige ca. 0,15 m, som det ses af Tabel 3.3 og Tabel 3.4, baseret på den numeriske simulering. Dette skal tages med i regning ved design af skråningsbeskyttelsen.
- Der er opsat matematiske modeller, lavet statistisk ekstremværdianalyse og foretaget grundige numeriske simuleringer for at bestemme ekstremværdier for bølgehøjder og vandstande.
- Der er bestemt bølgehøjder og højvandstande for 1, 2, 5, 10, 20 og 50 års returperioder, som anvendes i design af skråningsbeskyttelsen og til bestemmelse af overskyl.
- For returperioderne 1, 2, 5, 10, 20 og 50 år er dybhavsbølgerne transformeret ind til foden af skråningsbeskyttelsen efter metode anvist i //Ref 1.
- Hændelserne der er brugt i design af skråningsbeskyttelsen er angivet i Tabel 3.3 og Tabel 3.4.

5 Referencer

//Ref 1: CIRIA The Rock Manual 2nd edition. London, 2007.

//Ref 2: Klimaatlas, Danmarks Meteorologiske Institut 2022