

APRIL 2024  
ULVSHALE-FÆLLESSKOV DIGELAG

# KYSTBESKYTTELSEN VED ULVSHALE-FÆLLESSKOV

TEKNISK PROJEKTBEKRIVELSE





APRIL 2024  
ULVSHALE-FÆLLESSKOV DIGELAG

# KYSTBESKYTTELSEN VED ULVSHALE-FÆLLESSKOV

TEKNISK PROJEKTBEKRIVELSE

PROJEKTNR.

A256285

DOKUMENTNR.

RP-002

VERSION

2.0  
1.0

UDGIVELSESDATO

26-04-2024  
22-03-2024

BESKRIVELSE

Teknisk projektbeskrivelse  
Teknisk projektbeskrivelse

UDARBEJDET

JBUN  
MLHU/KARH/PFKL/  
TOBJ/JBUN

KONTROLLERET

JPHE  
JBUN/PFKL/JPHE

GODKENDT

JBUN  
JBUN



# INDHOLD

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Indledning                                 | 7  |
| 2   | Eksisterende forhold                       | 8  |
| 2.1 | Kystlinjen                                 | 8  |
| 2.2 | Bølgebrydere                               | 11 |
| 2.3 | Diger                                      | 13 |
| 2.4 | Geotekniske forhold                        | 14 |
| 2.5 | Miljøforhold                               | 16 |
| 3   | Projekteringsgrundlag for kystbeskyttelsen | 18 |
| 3.1 | Projekteringshændelse og levetid           | 18 |
| 3.2 | Bathymetri                                 | 21 |
| 3.3 | Bølgeklima                                 | 23 |
| 3.4 | Projekteringsforhold                       | 33 |
| 4   | Projektering af kystbeskyttelse            | 34 |
| 4.1 | Bølgebrydere                               | 35 |
| 4.2 | Geotekniske overvejelser                   | 41 |
| 4.3 | Sandfodring bag ved bølgebrydere           | 41 |
| 5   | Kystbeskyttelsens udformning og placering  | 45 |
| 5.1 | Erosionsbeskyttelse                        | 45 |
| 6   | Anlægs- og vedligeholdelsesbeskrivelse     | 46 |
| 6.1 | Anlægsbeskrivelse                          | 46 |
| 6.2 | Vedligehold af kystbeskyttelse             | 48 |
| 7   | Projektets påvirkninger                    | 50 |
| 7.1 | Natur og Miljø                             | 50 |

|   |                   |    |
|---|-------------------|----|
| 8 | Berørte matrikler | 51 |
| 9 | Referencer        | 52 |

# 1 Indledning

Efter aftale med Ulvshale-Fællesskov digelag har COWI udarbejdet denne projektering af kystbeskyttelsen langs dele af digelagets nordlige ansvarsområde. Projekteringen vil primært omhandle muligheden for etablering af bølgebrydere langs kysten mod nord, på en strækning på ca. 600 m, mellem allerede etablerede strækninger med bølgebrydere. Etableringen og færdiggørelsen af kystbeskyttelsen på denne strækning er den første del af et større arbejde som Ulvshalve-Fællesskov digelag har igangsat for at beskytte området mod oversvømmelse.

Denne projektering er vigtigste bilag i ansøgningsmaterialet, som digelaget benytter til at ansøge kystmyndigheden om tilladelse til opførelse af kystbeskyttelsen, som skal virke som erosionsbeskyttelse og have en bølgedæmpende virkning under stormhændelser, således at diget bag er beskyttet mod bølgepåvirkning. Det bagvedliggende Nordre Dige bliver reetableret til terrænhøjden før stormen Babet i oktober 2023, dog således at kronehøjden ingen steder er under 3,3 m DVR90 som var den gamle kronehøjde. Derved opfyldes de lokale erosionsskår i diget, der er opstået efter den gamle tilladelse.

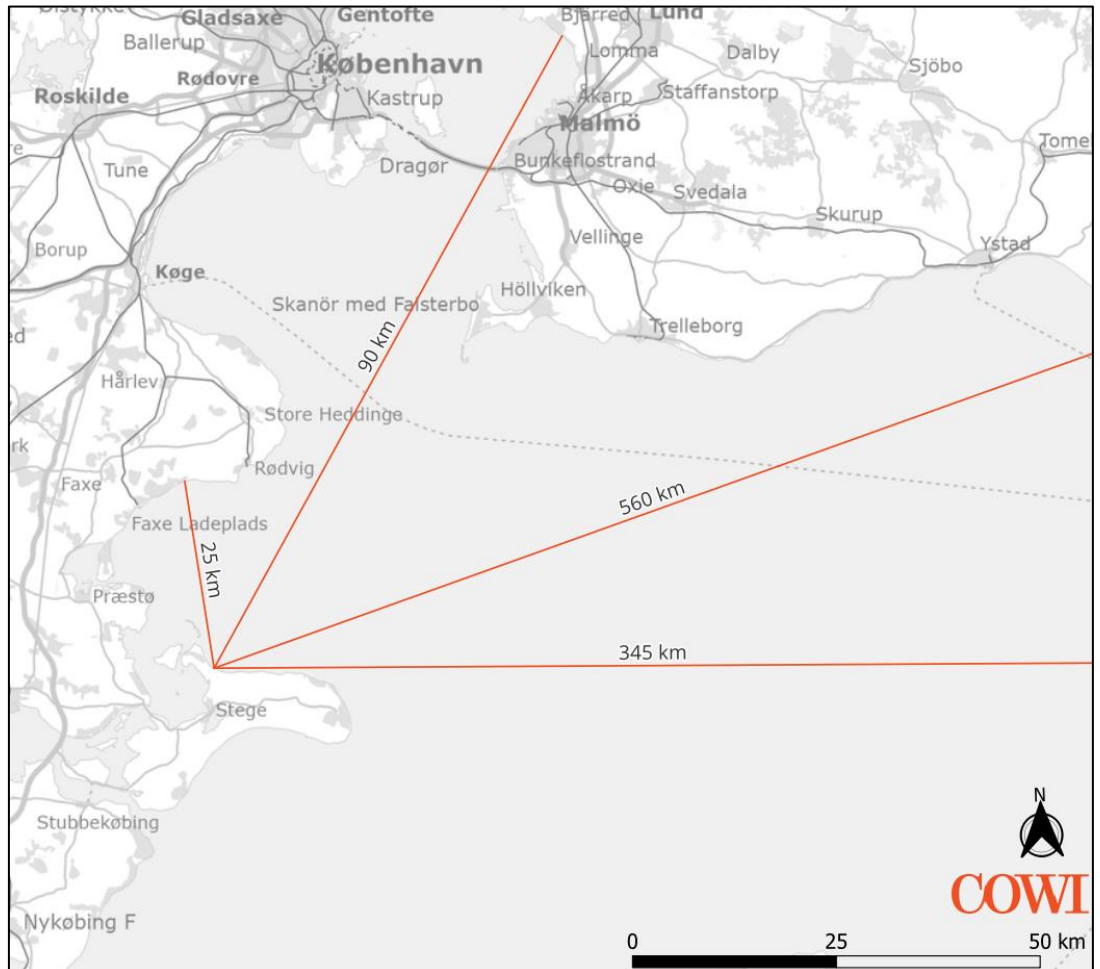
Afsnit 4 i rapporten beskriver i nærmere detaljer valget af løsningen for kystbeskyttelsen samt dimensioneringen af denne. Der er valgt en løsning med bølgebrydere, hvorved mellemrummet på ca. 600 m mellem de eksisterende bølgebrydere udfyldes med nye bølgebrydere.

Projekteringen skal ligeledes bruges i forbindelse med at der skal indhentes tilbud fra entreprenører i det tilfælde at digelaget opnår tilladelse til kystbeskyttelsen. Tegninger, arbejdsbeskrivelser, mv. vil blive brugt som grundlag for at indhente tilbud på anlæggelsen af kystbeskyttelsen.

Der er i projekteringen også medtaget en forstrækning af de eksisterende bølgebrydere omkring strækningen, således at den samlede strækningen efter etablering af de nye bølgebrydere vil have et ens beskyttelsesniveau. Enkelte af de allerede etablerede bølgebrydere er anlagt i Natura 2000 områder, og der er derfor i forbindelse med projekteringen foretaget en væsentlighedsvurdering (separat dokument) som vedlægges ansøgningen om kystbeskyttelse.

## 2 Eksisterende forhold

Ulvshale Kyst-området består primært af marine og æoliske sand- og grusaflejring, med underliggende moræneler. Den overordnede sandtransport i området er drevet af bølgeenergien, der forårsager en netto langstransport af sediment fra øst fra Møns klint langs Møns nordkyst forbi Ulvshale og med naturligt aflejningsområde mod nordvest. Det frie stræk i området når op til 560 km, som illustreret i Figur 2-1. Dette medfører en potentiel meget stor bølgeenergi og dermed erosionsrisiko i området.



Figur 2-1 Frit stræk fra Ulvshale Strand

I området Ulvshale findes flere lavtliggende, kystnære boligområder, der er truet af risiko for både kysterosion og oversvømmelser. Området er delvist beskyttet af et etableret dige, samt bølgebrydere. Derudover skal der håndteres vand fra baglandet i form af vand på terræn som følge af episoder med kraftig nedbør.

### 2.1 Kystlinjen

Ulvshale strand er en del af Møns nordkyst. Kysten er en nedbrydningskyst med nettomaterialetransport i vestlig retning. Denne materialetransport har været holdt ved lige af sediment fra Møns klint og af nedbrud fra kridt- og lerskrænterne langs kysten og de mange rullestensstrande ved havet. For at give et



bedre overblik i forbindelse med beskrivelsen af kystlinjen er denne inddelt på baggrund af stationeringer fra nulpunktet ved den østlige grænse af området østlige matrikel. Stationeringsnumrene stiger herefter med meters afstand fra nulpunktet til den østlige ende af Ulvshales erosionsprægede boligområde. Punkterne er afsat ved vegetationsgrænsen og stiger i sedimenttransportretningen, hvilket er fra øst mod nordvest. Punkterne er estimeret til at have samme lokation som stationeringen i tidligere rapporter af Ing. M. Sørensen. Det sidste punkt er 2400 og afgrænses cirka ved østligste matrikel. Dette kan ses på Figur 2-2, hvor stationsnummer samt bølgebyrdnummer matrikler er markeret.

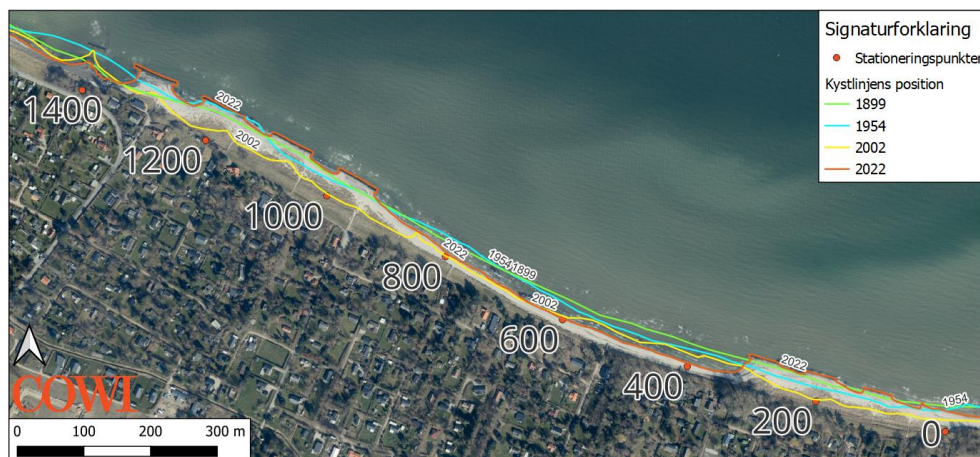


Figur 2-2 Stationeringsnumre per 200 m samt markering af bølgebyrdnummer

Ved sammenligning af høje målebordsblade fra 1899 med ortofotos af området, ses kyststrækningens udvikling over tid. Etablering af forskellige typer af kystbeskyttelse har været årsag til en forstyrrelse af kystens naturlige ligevægt. Dermed er dele af kysten rykket frem, mens andre er rykket landværts.

Fremrykningen er bl.a. sket mellem station 950 og 1500 efter etablering af fem bølgebyrdere i efteråret 1995. De blev etableret med henblik på at beskytte digefoden, men fungerede ikke efter hensigten. De er derfor senere blevet forlænget. Dette skete i november 2002 for bølgebyrder nr. 5, oktober 2004 for bølgebyrder 3 og 4 og i 2013 for bølgebyrder nr. 2. Derudover blev bølgebyrdere 11, 12 og 13 anlagt i 2013, hvormed strækningen mellem st 0 og 450 også er fremrykket med ca. 40 m på ét år, som følge af den tilhørende sandfodring. Alle bølgebyrdere undtagen nummer 1 er i dag landfaste, mens der sker en mindre tombolodannelse ved bølgebyrder 1.

Figur 2-3 viser et ortofoto fra 2022, samt kystlinjen i 1899, 1945, 2002 og 2022.



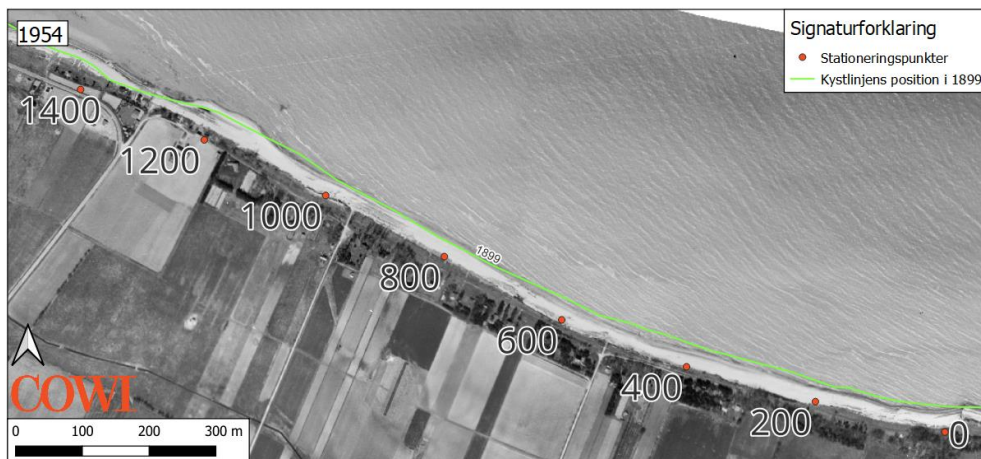
Figur 2-3 Ortofoto fra 2022 samt kystlinjernes position i området i 1899, 1954 og 2002

Som det fremgår af Figur 2-3 er strækningerne st. 900-1400 og st. 0-350 rykket frem, mens strækningen st. 350-900 (uden bølgebrydere) er rykket tilbage. Dette er sandsynligvis som følge af den uligevægt som de opførte bølgebrydere har skabt – og den manglende række bølgebrydere mellem Bølgebryder 5 og 11. Dette er især tydeligt ved sammenligningen af kystlinjen 1899 med 2022, hvilket kan ses på Figur 2-4.



Figur 2-4 Højde målebordsblade fra 1899 med markering af kystlinjen fra 2022.

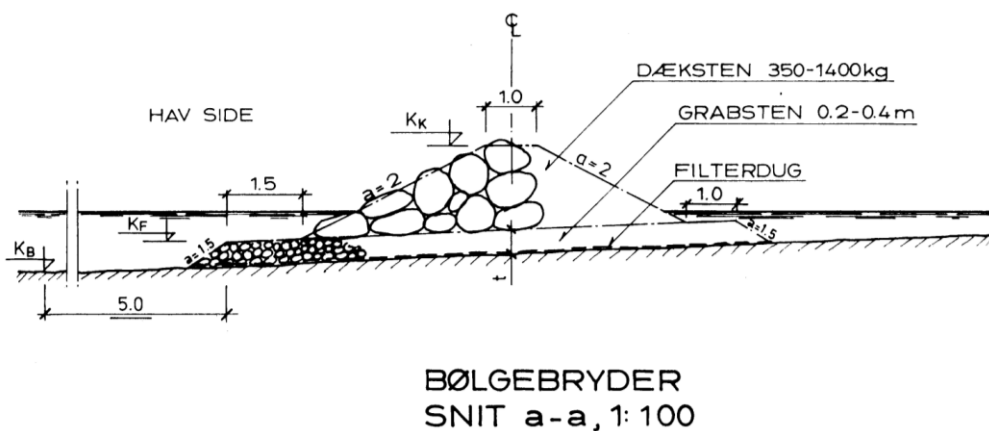
Mellem 1899 og 1954 er etableret en mindre høfde i forbindelse med et åudløb til havet ved station 0 samt små pælehøfder. Da der ikke har været tilgængelige data mellem 1899 og 1954, har det ikke været muligt at registrere mere præcist, hvornår denne høfde blev etableret. Dog kan det ses på Figur 2-5 nedenfor, at den har været i stand til at påvirke kystens balance, ved at mindske mængden af langtransport vest for station 0. Dermed er der skabt læsideerosion.



Figur 2-5 Ortofoto fra 1954 og kystlinje fra 1899.

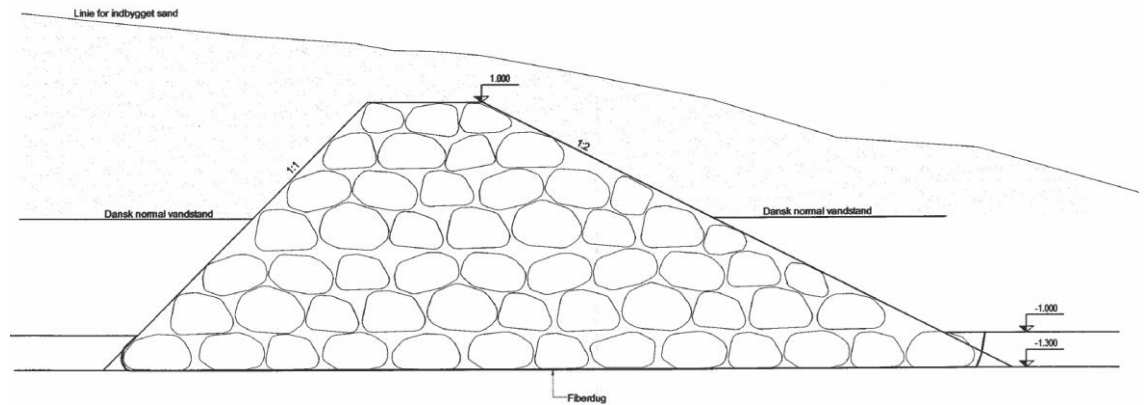
## 2.2 Bølgebrydere

Da de 5 første bølgebrydere blev etableret i 1995 havde de alle en længde på omkring 40 m og en højde på 1,25 m og en opbygning som illustreret i Figur 2-6 med kronebredde på 1 m og anlæg 1:2 på hav- og landværts side.



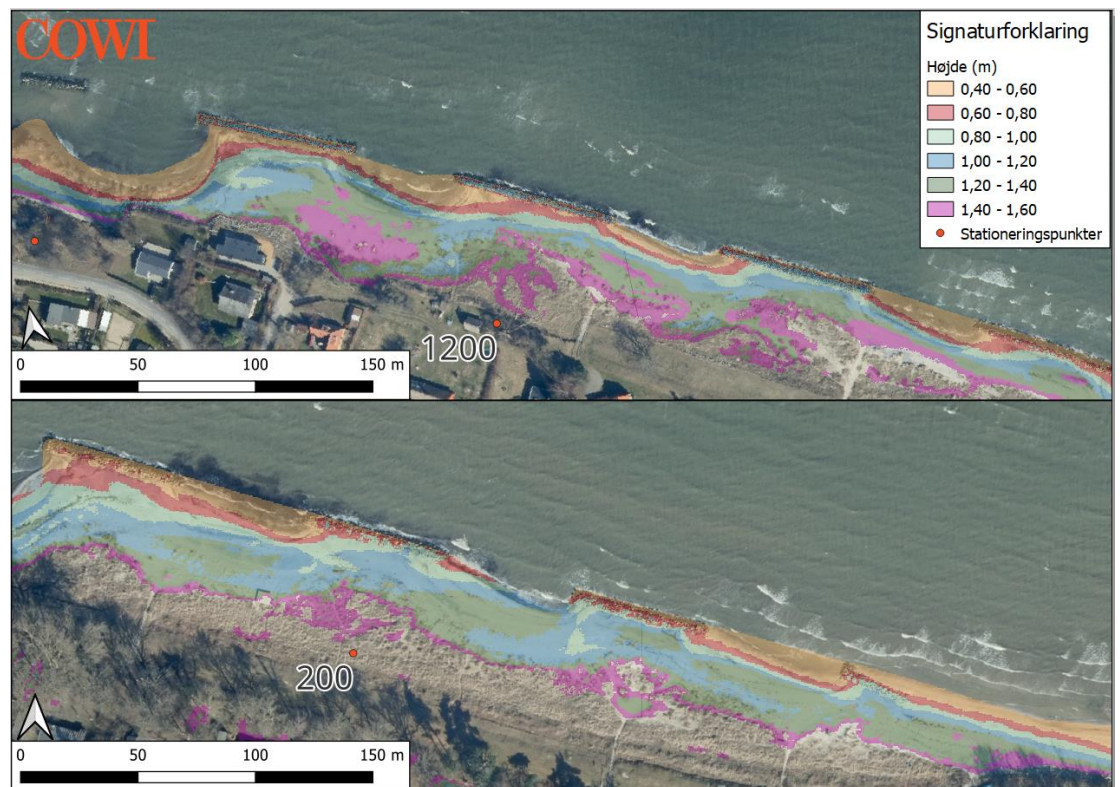
Figur 2-6 Tværsnit af bølgebryder fra 1995

I 2013 etableredes 3 stk. bølgebrydere. Dette blev gjort ved at først fodre med 30.000 m<sup>3</sup> sand og bygge sandet op til kote -1,00. Herefter blev bølgebryderne anlagt med sten i størrelsen 0,4-0,8 m, og de føres ned til kote ca. -1,30 og opbygges til kote +1,00, som illustreret på Figur 2-7.



Figur 2-7 Opbygning af bølgebrydere 11, 12 og 13 i 2013.

Det er dog kun enkelte steder, at bølgebryderne har bibeholdt samme kote som ved deres anlæggelse. Som illustreret på Figur 2-8 er der kun enkelte steder, hvor bølgebryderne 11-13 (nederste ortofoto) når en kote +1,00 eller højere. Bølgebryderne 2-4 (øverste ortofoto) ligger alle med højder over kote +1,00, mens bølgebryder 1 og 5 ligger lavere.



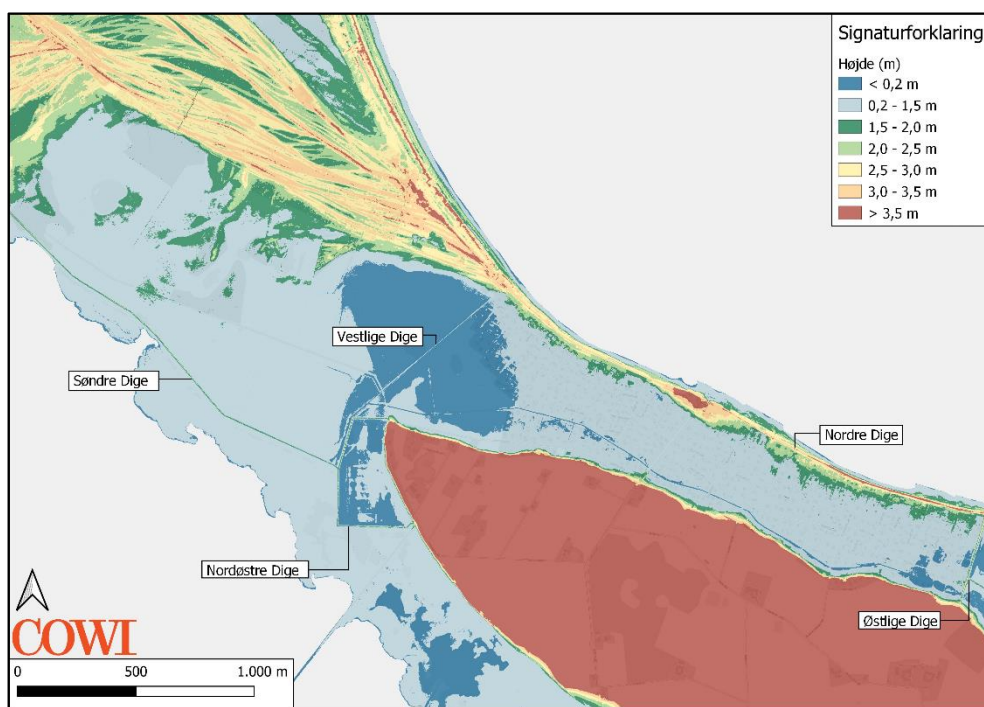
Figur 2-8 Højden af bølgebryderne - højdemodel fra 2019. Øverste foto viser (fra venstre) bølgebryder 1, 2, 3, 4 og 5. Nederste foto viser (fra venstre) bølgebryder 11, 12, 13 og den østligste landfaste 14

Øst for bølgebryder 13 er den ca. 25 meter lange bølgebryder, der har østligste ende på land og derved minimere erosion bag bølgebryder 11, 12 og 13.

Mellem de to sæt af bølgebrydere findes en række af gamle pæletræ-høfder. Disse er så nedbrudt at de ikke længere kan antages at have en effekt på kystbeskyttelsen.

## 2.3 Diger

Ulvshale omkranses overordnet af fem diger til beskyttelse mod havoversvømmelser. Mod Østersøen er havdiget, det **Nordre dige**, der løber langs Ulvshales nordkyst havværts boligerne og landværts bølgebryderne. Mod øst beskytter det **østlige dige** mod vandindtrængen fra lavtliggende marker og mod vest er placeret **vestlige dige** gennem det lavest beliggende sump-område. Det **søndre dige løber fra skoven i vest til det nordøstre dige, der** beskytter samlet mod vandindtrængen fra Stege Nor. Digernes lokationer er markeret på højdemodel fra 2019 for området i Figur 2-9.



Figur 2-9 Landskabshøjden i området. Digernes lokation ses ud fra højden.

Det nordre dige ses tydeligt i højden af landskabet, da der er tillagt bølgebidrag så digekronens højde nogle steder er over 4 m DVR90 og forventeligt mindst 3,3 m DVR90. Det Østlige dige i den østlige del af området er mindst 1,9 m DVR90, mens det vestlige dige ikke er særligt højt – kun maksimalt 1,5 m DVR90 ifølge denne højdemodel. Det Søndre og Nordøstre dige er langt og uensartet opbygget med ned til 1,6 m DVR90 i analyseret kronehøjde samtidig med, at det forventes at være svært at holde fri for gnavere og ræve, da det er placeret meget isoleret fra boligområder etc.

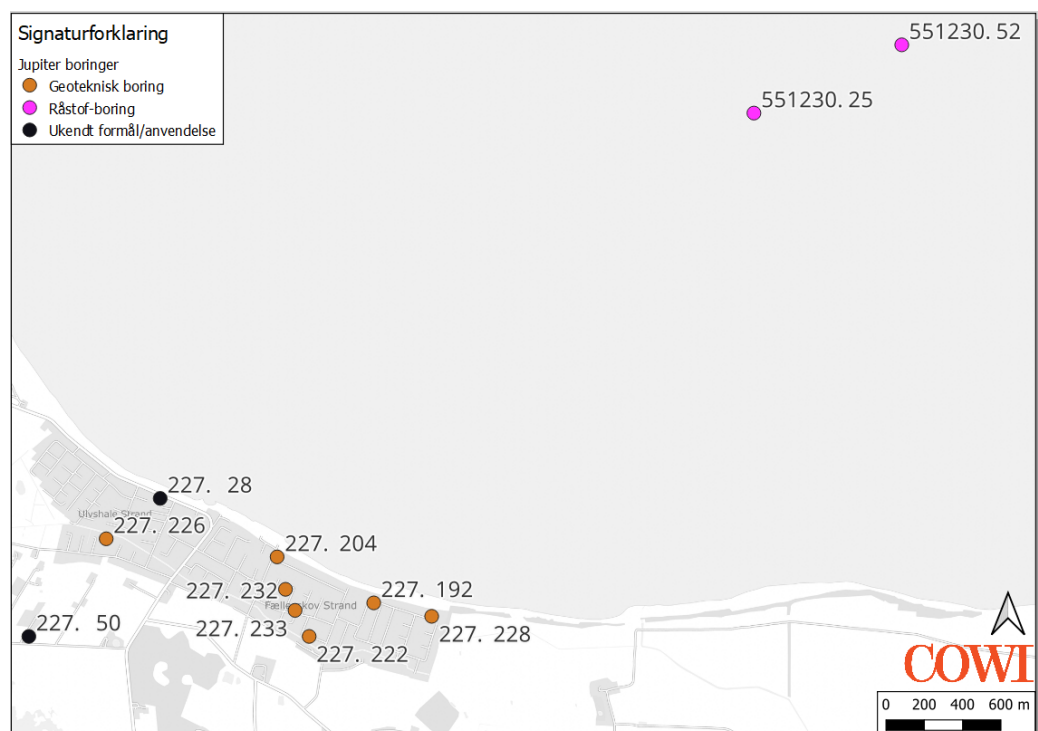
Digehøjden på det samlede digebeskyttelsestracée varierer i højde fra op til 4,00 m på Norde dige ved st. 300 til 0,60 m i den vestlige del af det vestlige dige. Disse variationer i digehøjden skyldes bl.a. lokal antropogen erosion.

Foruden den lokale erosion, skyldes højdeforskellene også, at det Vestlige dige er opbygget lavere end det Nordre dige, da det ikke skal modstå bølgepåvirkning i samme grad. Derudover er stedvist fundet huller i diget, gravet af dyr som f.eks. ræve eller mosegrise. Foruden findes en del høj vegetation på diget. De større planterødder, der følger med højere vegetation, er med til at øge digets ustabilitet.

Lokale lavninger, huller, skrænter, samt større planterødder er dermed alle med til at mindske digets sikkerhed og evne til at fungere som kystbeskyttelse.

## 2.4 Geotekniske forhold

De geotekniske og geologiske forhold er vurderet ud fra boringer, der er fundet ved en søgning i Jupiter databasen. Der er ikke fundet geotekniske boringer, i selve digets tracé, men der er identificeret en række boringer der ligger i området omkring diget. Boringer, der ligger i nærheden af diget er illustreret på Figur 2-10, og er brugt som grundlag for en vurdering af de generelle geologiske forhold i området. Der anvendes data fra boring 227.28, 227.204, 227.192 og 227.228.



Figur 2-10 Lokation af de Jupiter boringer i området, der er nærmest diget samt de to havboringer, der er nærmest kysten

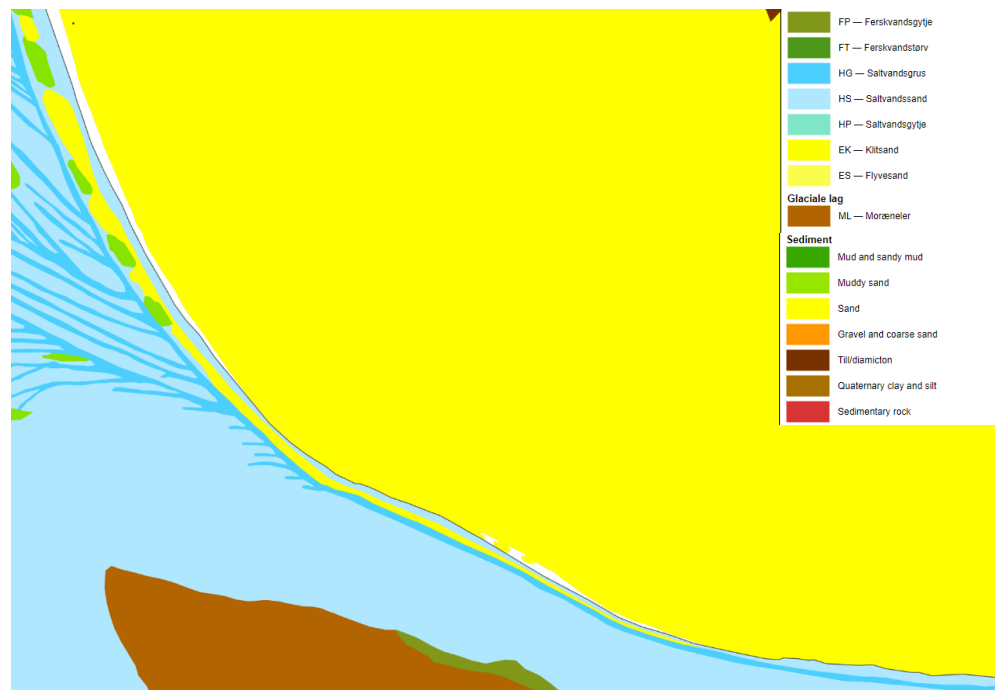
I hovedparten af de analyserede boreprofiler findes der sand indtil ca. 0,6 m.u.t. (meter under terræn). Det øvre sandlag er i boring 227.204, som er tættest på diget, blandet med rester af affald som f.eks. glasskår. Herunder findes der moræneler, hvilket dog starter på forskellige dybder. Flere steder indeholder moræneleret kalk. Flere steder findes også vandførende sand under eller imellem lerlag.

Der forefindes ikke geotekniske borer hvor bølgebrydere er opført. Jordartskortet i Figur 2-11 viser, at bundsedimentet i området, hvor bølgebrydere er opført, består af sand og grus. Figuren viser samtidig, at der er de samme forhold, som gør sig gældende på strækningen, hvor de nye bølgebrydere skal etableres.

Der er ikke foretaget geotekniske stabilitetsvurderinger i projekteringen, men der foretages i stedet en vurdering af de sætninger, som de eksisterende bølgebrydere har været udsat for siden disse blev opført. Tabel 2-1 viser et overblik over de eksisterende bølgebrydere og deres topkote ved hhv. ansøgning og den opmåling der er foretaget i januar 2024. Da der ikke foreligger opmålinger af bølgebryderne ved opførelse, er sætningerne antaget ud fra oplysninger som er tilgængelige fra ansøgningsmaterialet.

Tabel 2-1 viser at der både er positive og negative "sætninger" ud fra de tilgængelige data. Det kan derfor ikke entydigt konkluderes at der er foregået sætninger på bølgebryderne, da disse variationer kan skyldes usikkerheder i forhold til de opførte bølgebrydere, og med hvilken tolerance de er opført.

Sætningerne forventes derfor at være minimale, og skulle der forekomme sætninger, kan dette udbedres løbende.



Figur 2-11 Jordarts- og havbundssedimentkort fra GEUS. Den sorte linje på kortet angiver kystlinjen.

Tabel 2-1 Oversigt over opførte bølgebrydere og deres formodede sætning i levetiden. Topkoterne for de første bølgebrydere er angivet i ansøgningerne i forhold til DNN, dette er korrigeret til DVR90. Sætningerne er antaget, der er ikke foreligger opmålinger efter opførelse.  
\*Opmåling i januar 2024.

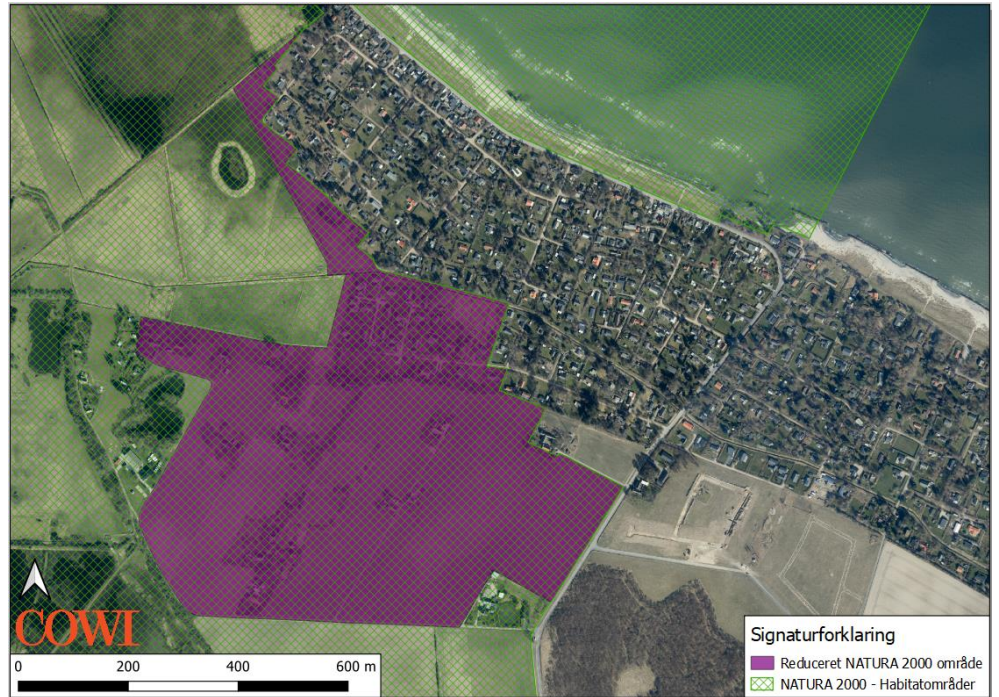
| Bølgebryder navn | Bølgebryder nummer | Opførelsesår                                 | Topkote ifølge ansøgning [m DVR90] | Nuværende topkote* [m DVR90] | Antaget sætning [m] |
|------------------|--------------------|--|------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| A                | -                  | Sandsynligvis også 2013, men er ikke angivet | -                                  | 0.9                          | 0.1                 |
| B                | 13                 | 2013   | 1                                  | 0.88                         | 0.12                |
| C                | 12                 | 2013   | 1                                  | 1.16                         | -0.16               |
| D                | 11                 | 2013   | 1                                  | 1.18                         | -0.18               |
| J                | 5                  | 1995 (forlænget med 40 m i november 2002)    | 1.01                               | 0.91                         | 0.10                |
| K                | 4                  | 1995 (forlænget med 40 m i oktober 2004)     | 1.11                               | 0.88                         | 0.23                |
| L                | 3                  | 1995 (forlænget med 40 m i oktober 2004)     | 1.16                               | 0.86                         | 0.30                |
| M                | 2                  | 1995 (forlænget med 40 m i 2013)             | 1.21                               | 1.09                         | 0.12                |
| N                | 1                  | 1995   | 1.11                               | 1.12                         | -                   |

## 2.5 Miljøforhold

Den vestlige del af Ulvshale (fra ca. st. 1300) hører under et Natura 2000 område, som illustreret i Figur 2-12.

Som markeret på Figur 2-12, ønskes en del af habitat-området reduceret, særligt nuværende boligområder, men EU har siden 2018 endnu ikke taget stilling til Danmarks ønske om reduktion. Derfor er området stadig Natura 2000 Habitat-område.





Figur 2-12 Natura 2000 samt reduktion af Ramsarområde ved Ulvshale med nyeste ortofoto fra forår 2022

Dele af kystbeskyttelsen ligger indenfor eller på grænsen til habitatområdet. Bølgebryder 1 ligger helt inde i Habitat-området, mens bølgebryder 2 er delvist dækket af det, som illustreret på Figur 2-13. Bølgebryder 2 blev i 2013 udvidet med 40 m inde i selve habitatnaturen.



Figur 2-13 Området mellem st. 1100 og 1550, med markering af Natura 2000 områdets grænse. Det ses at bølgebryder 1 og 2 (hhv. nr. 1 og 2 fra venstre) hører helt eller delvist under Natura 2000 området.

### 3 Projekteringsgrundlag for kystbeskyttelsen

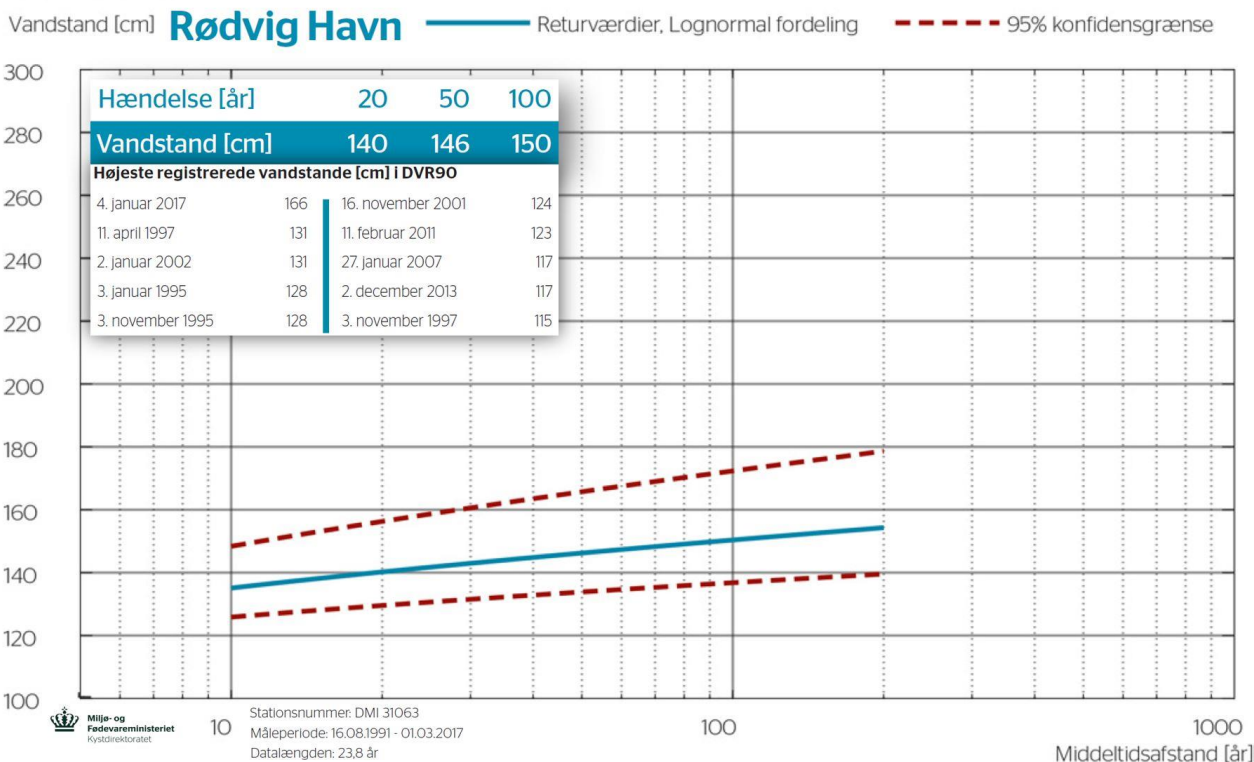
#### 3.1 Projekteringshændelse og levetid

##### 3.1.1 Stormhændelser og højvandsstatistik

Stormfloden i 1872 nåede ved Nyord en vandstand svarende til omkring 3,17 m DVR90 i dag [1]. Efter stormfloden i 1872 blev kystdiget ved Ulvshale anlagt til en minimumshøjde på 3,3 m DNN (Dansk Normal Nul => 3,3 m DNN -0,089 m på Møn) = 3,211 m DVR90. Under stormfloden 1. januar 1922 nåede vandstanden i Rødvig Havn ca. 149 cm DVR90.

Øvrige højvandshændelser i nyere tid inkluderer den stille stormflod den 4. januar 2017 med maksimalvandstand på 1,66 m DVR90 og stormfloden af 2. januar 2019, hvor vandstandene i Rødvig Havn blev målt til 1,33 m DVR90. Ved den nye højeste hændelse fra 20. oktober 2023 havde Rødvig Havn en målt maksimalvandstand på 1,69 m DVR90. De tre nye hændelser svarer statistisk til henholdsvis omkring en 1.000 års middeltidshændelse i 2017, omkring en 9 års hændelse i 2019 og omkring en 2.000 års hændelse i 2023 ifølge Kystdirektoratets højvandsstatistik fra 2017, se Figur 3-1. Det er altså to statistiske 1000-års hændelser, der er indtruffet med 6 års mellemrum i nyere tid i området.

#### Middeltidshændelser



Figur 3-1 Kystdirektoratets højvandsstatistik 2017 for Rødvig Havn uden historiske hændelser

I 2017 bad Realdania, COWI om en højvandsstatistik der medtager de mange gamle historiske storme, og på den baggrund er der udgivet en højvandsstatistik med historiske hændelser for Danmark, se Figur 3-2.

| Byer | Hændelser | 2014 | 2050 | 2100 | 2120 |
|------|-----------|------|------|------|------|
| Køge | 10        | 133  | 153  | 197  | 220  |
|      | 20        | 147  | 167  | 211  | 234  |
|      | 50        | 174  | 194  | 238  | 260  |
|      | 100       | 209  | 229  | 273  | 295  |
|      | 250       | 270  | 290  | 334  | 357  |
|      | 500       | 321  | 341  | 385  | 407  |
|      | 1000      | 376  | 396  | 440  | 463  |
|      | 2000      | 418  | 438  | 482  | 505  |

Figur 3-2 COWI Højvandsstatistik for Køge inklusiv historiske hændelser og tillagt IPCC's bud på fremtidens havspejlsstigninger ved forskellige middeltidshændelser, [2]

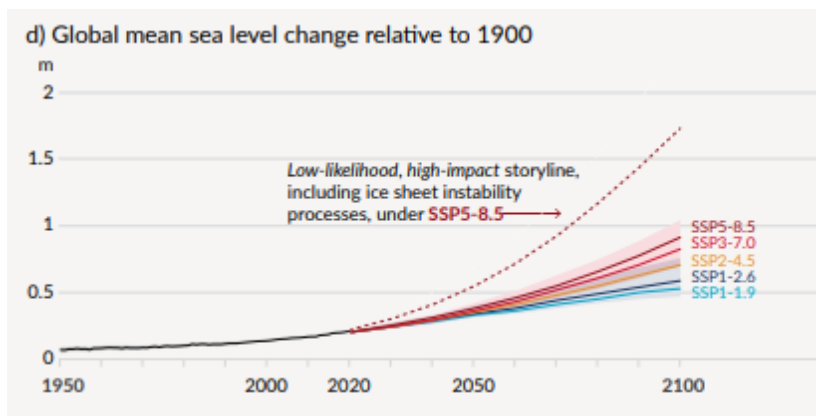
Ved at medtage de gamle historiske hændelser falder middeltidshændelserne for de seneste års høje vandstande i Kystdirektoratets højvandsstatistik fra en statistisk 1000+års middeltidshændelse til COWIs højvandsstatistik til omkring 2 x 30 års hændelser, se Figur 3-2.

Det er ikke til at forudsige, hvornår den næste ekstreme stormflod indtræffer, men der er risiko for, at de vil indtræffe hyppigere i fremtiden, da klimaforandringerne ikke alene medfører havvandstigning, men også forventet stigning i ekstreme vejrhændelser.

### 3.1.2 Global havspejlsstigning

Ifølge FN's Klimapanel, IPCC, vil klimaforandringer medføre havspejlsstigninger og dermed permanent øget vandstands niveau i verdenshavene og derved også ved nordlige del af Møn i Østersøen. Derudover vil de samme stormfloder, der tidligere er blevet oplevet som sjældne og voldsomme, forekomme oftere og oftere – næsten årligt grunden den højere middelvandstand i fremtiden.

IPCCs nyeste fremskrivninger for forventede fremtidige havspejlsstigninger er fra marts 2023, se Figur 3-3. Det ses på grafernes spredningsvifter, at usikkerheden for fremskrivningen stiger med tiden.

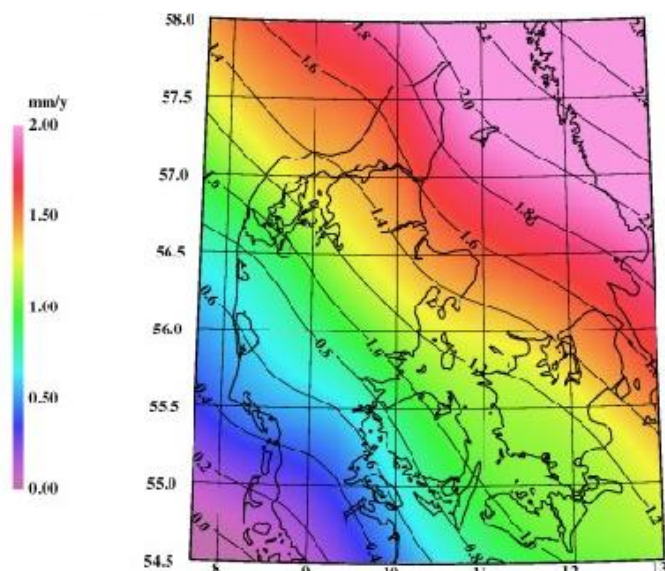


Figur 3-3 IPCCs seneste fremskrivning for global havspejlsstigning for forskellige emissionsscenarier for drivhusgasudledning. Nulpunktet er den globale havvandsstand i år 1900. Grafernes buffer illustrerer usikkerheden for hvert scenarie [3].

Herfra medtages den mest konservative fremskrivning, SSP5-8.5, "Business-as-usual"-scenariet, med 'very high emissions'. Dette er scenariet, som DMI anbefaler til sikringsniveau-beregning efter år 2050. Havniveauet ved scenariet SSP5-8.5 i AR6 er beregnet fra IPCC til +29.2 cm i 2050 og +79.4 cm i 2100 for middelscenariet.

### 3.1.3 Isostatisk landhævning

Eftersom landet hæver sig, og har gjort det siden seneste istid, modvirkes det stigende vandspejl en smule, se Figur 3-4.



Figur 3-4 Landhævningen i Danmark målt i mm/år

På Figur 3-4 ses landhævningen i Danmark målt i mm/år. Ved aflæsning fås, at nordlige Møn oplever en årlig landhævning på ca. 1,2 mm/år.

I modsætning til havspejlsstigningen, der øges år for år, så forventes landhævningen at være ens de næste mange årtier. Dermed bliver landhævningen mindre betydningsfuld fremover i forhold til havspejlsstigningen.

### 3.1.4 Dimensionsgivende vandstand

Den klimabetingede havspejlsstigning er beregnet fra IPCC's seneste rapport AR6 til 29,2 cm i 2050 og 79,4 cm i 2100 for middelværdien af SSP5-8.5 scenariet.

Det er valgt at bruge højvandsstatistik for Rødvig Havn, da denne station ligger relativt nær Ulvshale og må formodes at opleve vandstande i samme niveau da begge områder ligger eksponeret mod vinde fra øst. Sikringsniveauerne er således beregnet ud fra Kystdirektoratets beregnede middeltidshændelser for Rødvig Havn fra 2017 [4]. Sikringsniveauerne er klimafremskrevet til 2050, 2075, 2100 og 2125 svarende til levetider på ca. 25, 50, 75 og 100 år ved anlægsstop 2025. Havspejlsændringerne er beregnet fra IPCC's klimafremskrivninger og modregnet for den oplevede landhævning siden 2017, hvor stormflodsstatistikken er fra. De i tabellen anførte sikringsniveauer tager ikke højde for bølgebidrag.

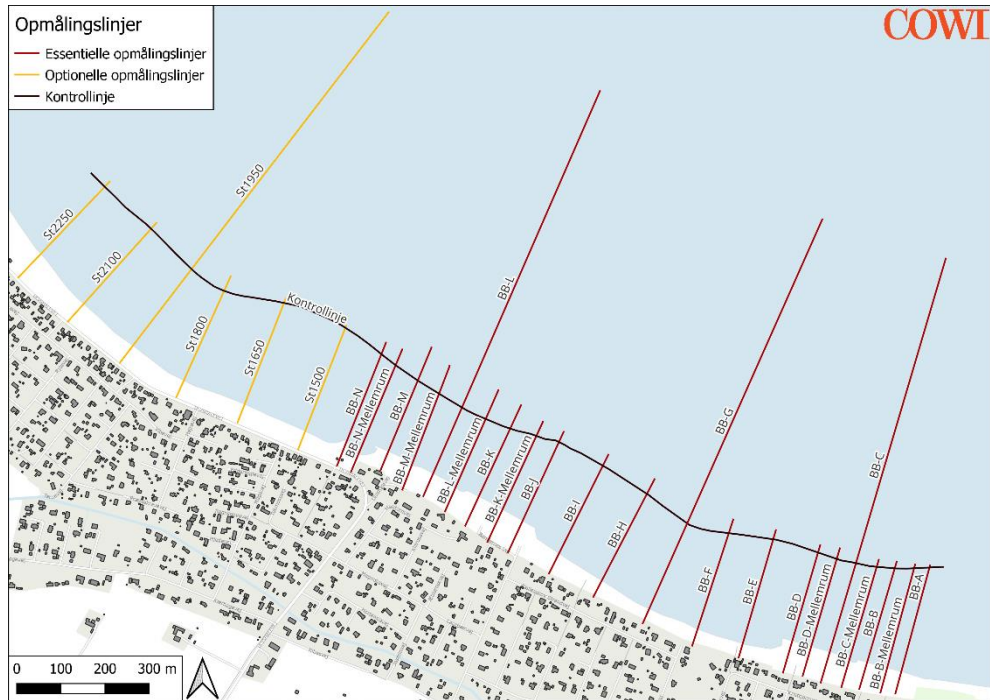
Tabel 3-1 Sikringsniveauer for forskellige årstal og middeltidshændelser (MT) målt i cm DVR90 [4], [2], [3].

| År          | MT20     | MT50       | MT100    | MT100     | 1872 stormflod |
|-------------|----------|------------|----------|-----------|----------------|
|             | KDI 2019 | KDI 2019   | KDI 2019 | COWI 2017 |                |
| <b>2017</b> | 140      | 146        | 150      | 209       | 317            |
| <b>2050</b> | 165      | 171        | 175      | 234       | 342            |
| <b>2075</b> | 185      | <b>191</b> | 195      | 254       | <b>362</b>     |
| <b>2100</b> | 209      | 215        | 219      | 278       | 386            |
| <b>2125</b> | 239      | 245        | 249      | 308       | 416            |

Kystbeskyttelsen vil blive dimensioneret for en middeltidshændelse på 50 år (MT50), samt en levetid på 50 år. Det vil sige den dimensionsgivende vandstand er 191 cm DVR90.

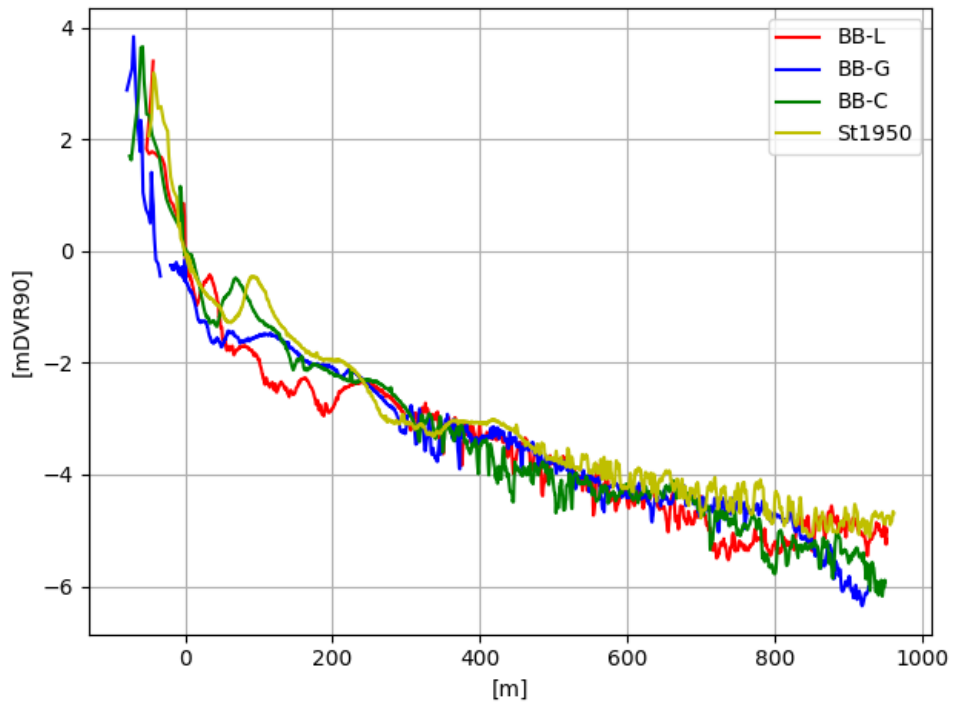
## 3.2 Bathymetri

Der er i januar 2024 foretaget havbundsmålinger af kysten ud fra projektområdet. Havbundsmålingen er foretaget langs linjer vinkelret på kysten, se Figur 3-5



Figur 3-5 Opmålingslinjer for havbundsmåling, foretaget januar 2024

De lange opmålingslinjer, BB-L, BB-G samt BB-C, er målt ud fra hhv. bølgebryder L, bølgebryder G og bølgebryder C, jf. Figur 2-2. De målte havbundsdybder for de angivne linjer er vist på Figur 3-6. Afstand "0 m" angiver opmålingspunktet, hvor bølgebryderne omtrentlig er placeret.



Figur 3-6 Havbundsmålinger langs opmålingslinje, BB-L, BB-G og BB-C, beliggende hhv. ved bølgebryder nr. L, G og C. X-aksen er afstanden fra kote 0 (vandlinjen), og y-aksen er koten relativ til DVR90.

Figur 3-6 viser ingen betydelige variationer i havbunden langs den del af kysten, hvor bølgebryderne er placeret. Samtidig observeres det, at hældningen af havbunden er næsten konstant fra bølgebryder og ud. Af de opmålte profiler kan man konstatere, at der ikke er markante ændringer i bathymetrien langs kysten i området. Desuden bemærkes det, at vanddybden er omkring -1,0 m cirka 50 meter ud fra bølgebryderne.

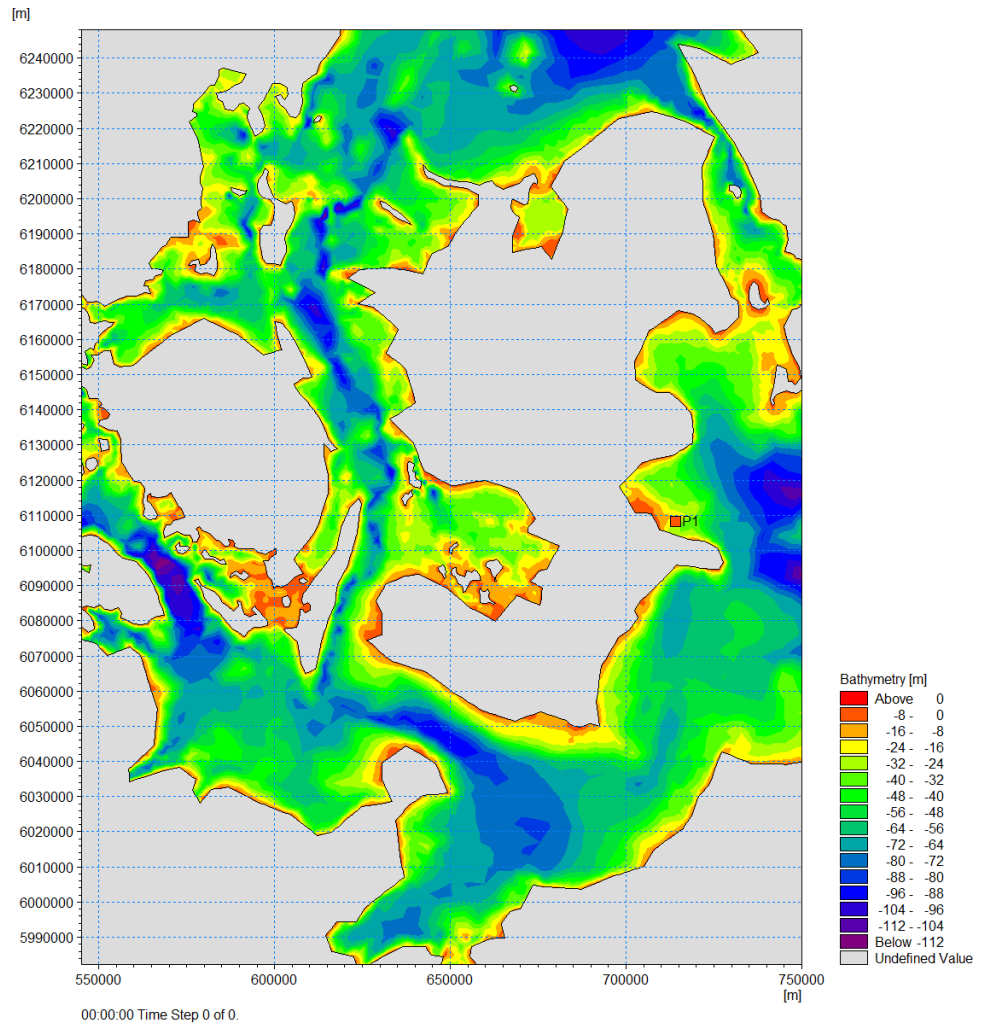
### 3.3 Bølgeklima

Fra COWIs Østersø-model er udtrukket en bølgetidsserie fra et punkt ud for Møns nordkyst. Bølgetidsserien strækker sig fra 1995 til 2018. Modellen beskriver primært bølgeforholdene på dybt vand, og har ikke tilstrækkelig detaljeringsgrad til at beskrive variationerne i bølgeforholdene i kystzonen. Både kystlinje og dybdeforhold er således beskrevet i en forholdsvis grov opløsning og modellen kan derfor bruges til at give en indledende vurdering af de generelle bølgeforhold i området, men ikke de detaljerede forhold nær kysten.

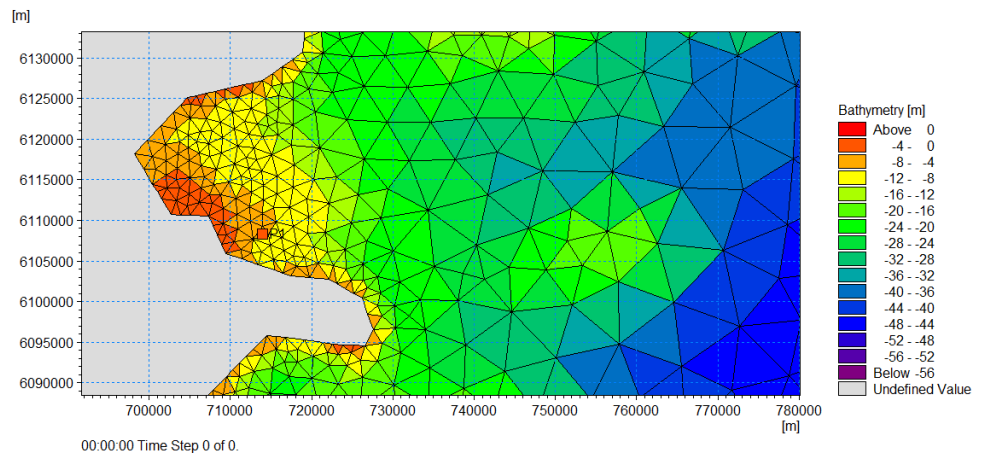
Dette fremgår f.eks. via Figur 3-7 og Figur 3-8, hvor kystlinjerne af Møn, Lolland og Falster går i ét med Sjælland. Bølgeforholdene, som udtrækkes af denne Østersø-model, kan derfor kun benyttes som dybvandsbølger, og bølgetransformationen videre ind mod kystlinjen må fortages med andre metoder.

Fra Østersø-modellen er der udtrukket en bølgetidsserie i udtrækspunktet P1, vist på Figur 3-7 og Figur 3-8, hvor vanddybden er 7,3 m. Punktet P1 er beliggende ud for kysten ved Ulvshale-Fællesskov.

De opmålte kystprofiler, der beskriver havbundens dybdeforhold ud til ca. 6 m dybde er anvendt til beregning af bølgetransformationen fra dybvandsbølger til bølgeforhold ved kysten. Bølgetransformationen foretages med lineær bølgeteori, jf. [5]. En nærmere beskrivelse er angivet i afsnit 3.3.2.



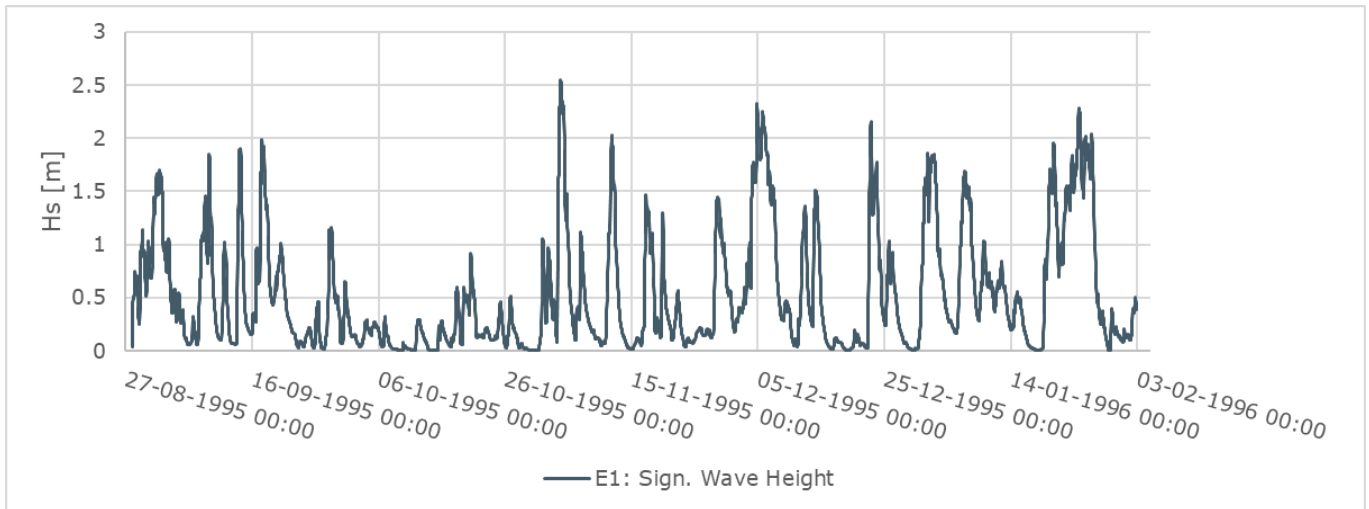
Figur 3-7 Bathymetri i Østdanmark



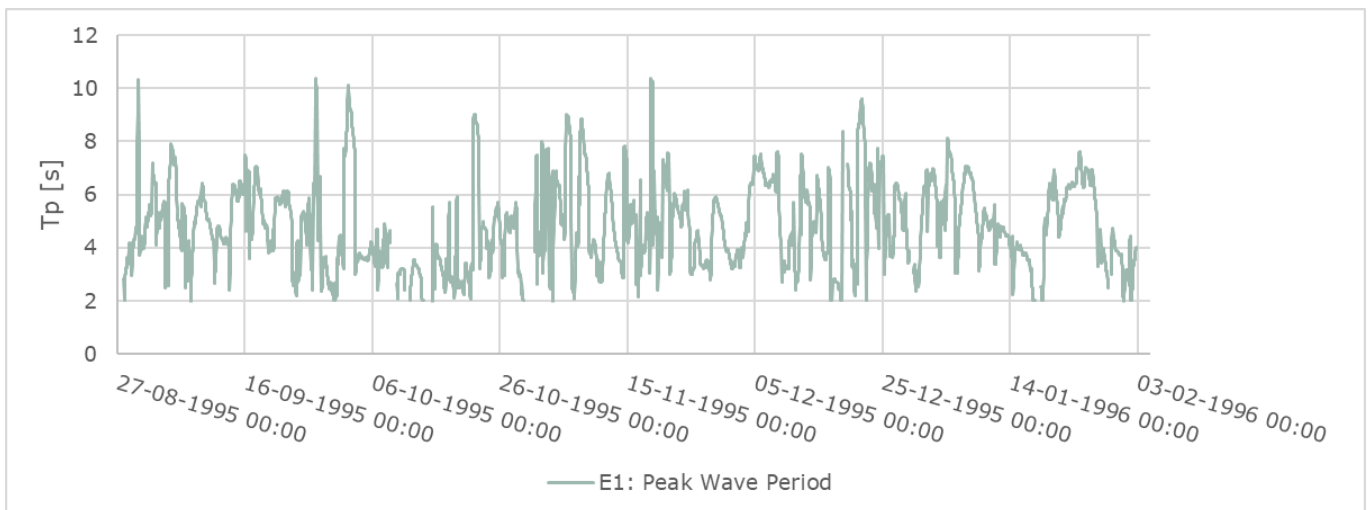
Figur 3-8 Bathymetri i området ud for Ulvshale

På Figur 3-9 og Figur 3-10 er vist et udsnit af tidsserierne af den signifikante bølgehøjde ( $H_s$ ), og bølge peak perioden ( $T_p$ ) for punktet P1. Den signifikante bølgehøjde er defineret som middelværdien af den højeste 1/3 af bølgenes energi i et bølgespektrum.





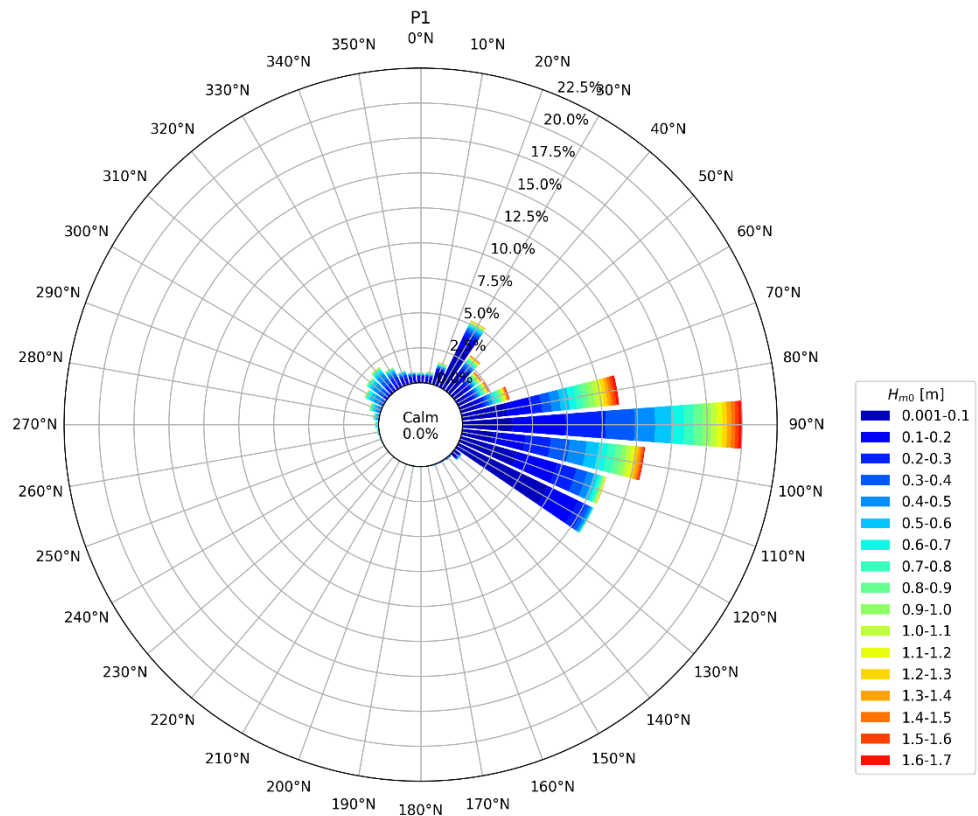
Figur 3-9 Udsnit af tidsserie for den signifikante bølgehøjde (Hs).



Figur 3-10 Udsnit af tidsserie for bølge peak perioden (Tp).

### 3.3.1 Dybvandsbølgeforld

Fra den udtrukne tidsserie er det muligt at lave en bølgerose, som viser størrelsen og retningen af bølgerne ud for Ulvshale-fællesskov. De største bølger kommer fra den østlige retning - de er den primære årsag til langstransport langs Møns nordkyst med materiale transporteret fra Møns Klint forbi Ulvshale til aflejring ved Nyord. På bølgerosen fremgår det også, at der kommer bølger fra vestlig retning, dette er de mindre bølger som kan dannes i Faxe Bugt i tilfælde med vind fra vest til nordvest.



Figur 3-11 Bølgerose for Ulvshale, ved udtrækningspunkt P1

### 3.3.2 Bølgetransformation fra dybt til lav vand

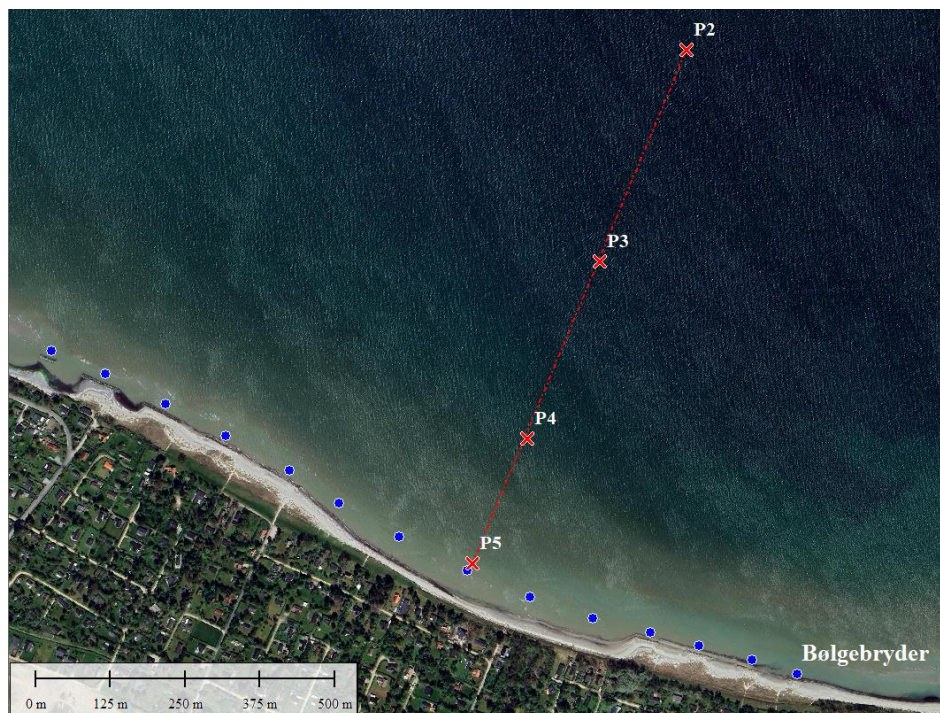
Bølgeforholdene fra udtrækningspunktet, P1, på 7,3 meters dybde er blevet transformeret til fire punkter (P2 – P5), langs en linje vinkelret på kysten, som vist i Figur 3-12. Bølgetransformationen fra P1 i 7,31 meters dybde til P2, P3, P4 og P5, som er beliggende på 5,88 m, 4,14 m, 2,24 m og 1,0 m dybde (DVR90), udføres baseret på lineær bølgetransformationsteori, hvor shoaling- og refraktionskoefficienterne ( $K_s$  og  $K_r$ ) beregnes og multipliceres med bølgehøjden i punkt P1.

Bølgehøjden i nærheden af kysten er begrænset af bølgebrydning, som kan udløses af bølgestejlhed og dybdebegrænsning. Derfor må bølgehøjden ikke overstige de kriterier, der er foreslået af Kamphuis [6].

$$H \leq \left\{ \begin{array}{l} 0.095 e^{4.0m} L \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \\ 0.56d e^{3.5m} \end{array} \right\}$$

Hvor:

- $d$  er dybden nær kysten
- $L$  er bølgelængden nær kysten
- $m$  er hældning af havbunden



Figur 3-12 Placering af punkter, hvor de kystnære bølgeforhold etableres. De blå punkter indikerer bølgebrydere, samt forventet placering af nye bølgebrydere.

Beregningerne er udført for hvert tidsskridt i bølgetidsserien fra P1 (1 time) dækkende perioden 1995-2018, med følgende antagelser:

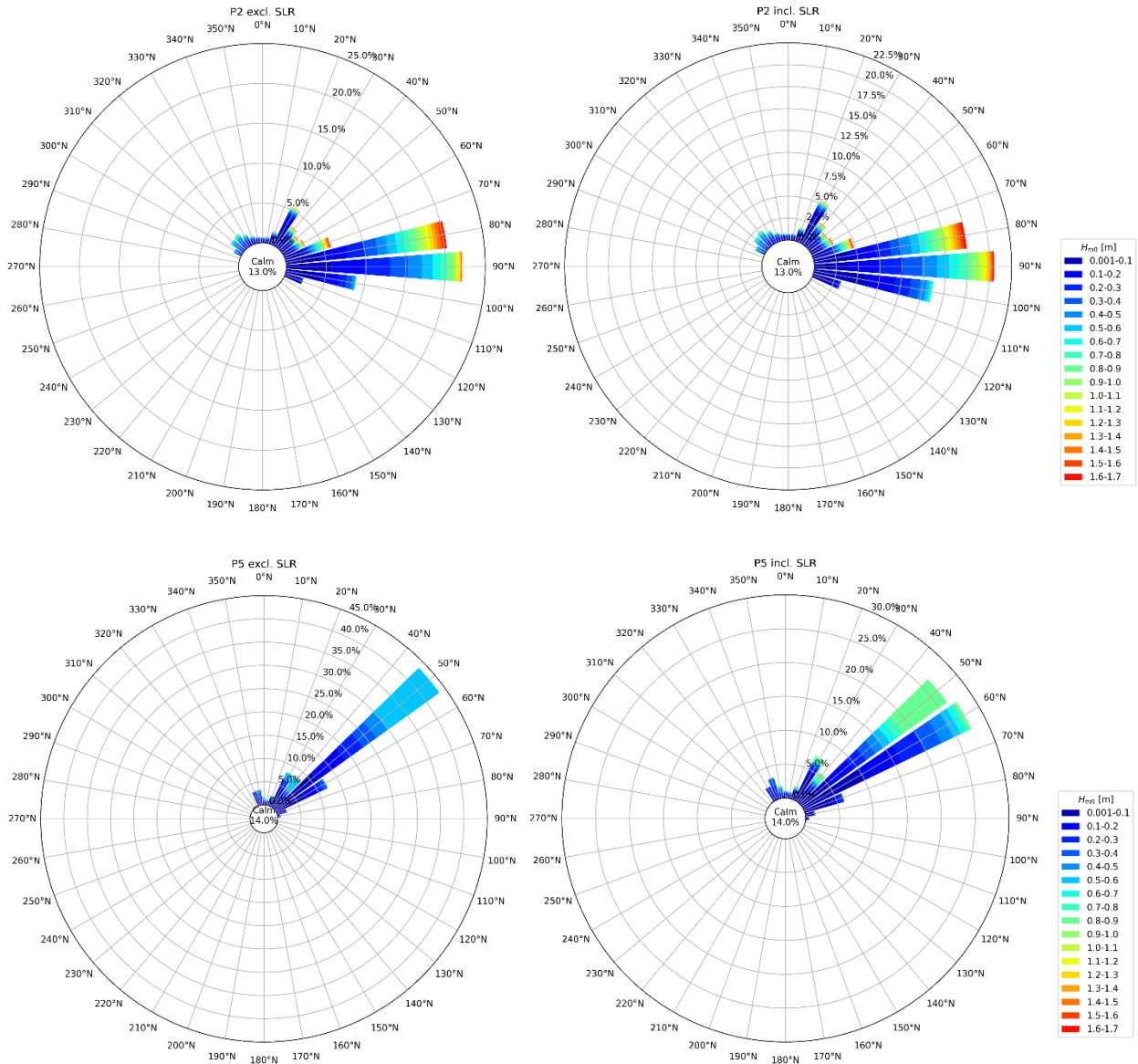
- > Stranden er orienteret 26°N, bestem på baggrund af ortofoto
- > Hældning af havbund på 1:225 ( $m=0,44\%$ ), bestemt på baggrund af opmålte profiler, se Figur 3-6
- > Der anvendes et konstant vandstands niveau svarende til en 50-årshændelse på +1,46 m DVR90 med nuværende middelvandstand se. Tabel 3-1.
- > Til vandstanden tillægges et klimabidrag svarende til global vandstandsstigning fra dags dato til år 2075, SLR = 1,91 m - 1,46 m = 0,45 m MSL (se Tabel 3-1.)

Resultaterne fra ovenstående er vist i Tabel 3-2.

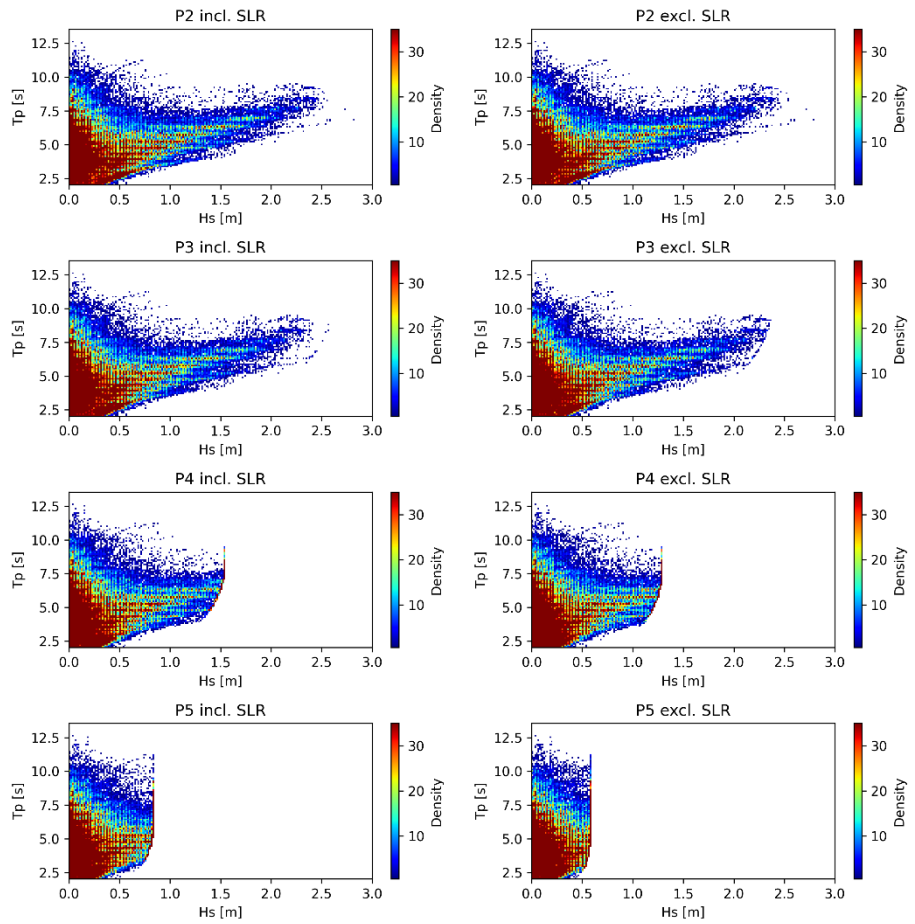
De kystnære bølgeforhold præsenteres i form af bølgeroser i Figur 3-13. Figur 3-14 viser scatterdiagrammer mellem bølgehøjder og bølgeperioder. Figur 3-15 og Tabel 3-2 viser de endelige overskridelsessandsynligheder for givne bølgehøjder for punkt P2-P5.

Bølgeroserne viser, at de største bølger på kommer fra en retningssektor på 80-90°N ved punkt P2, vanddybde 5,9m, hvorimod de største bølger på lavere vand, P5, 1 m vanddybde er retningssektoren 40-50°N for de største bølger. Dette indikerer, at refraction, som forventet, har meget stor indflydelse på bølgeforholdene i de kystnære punkter.

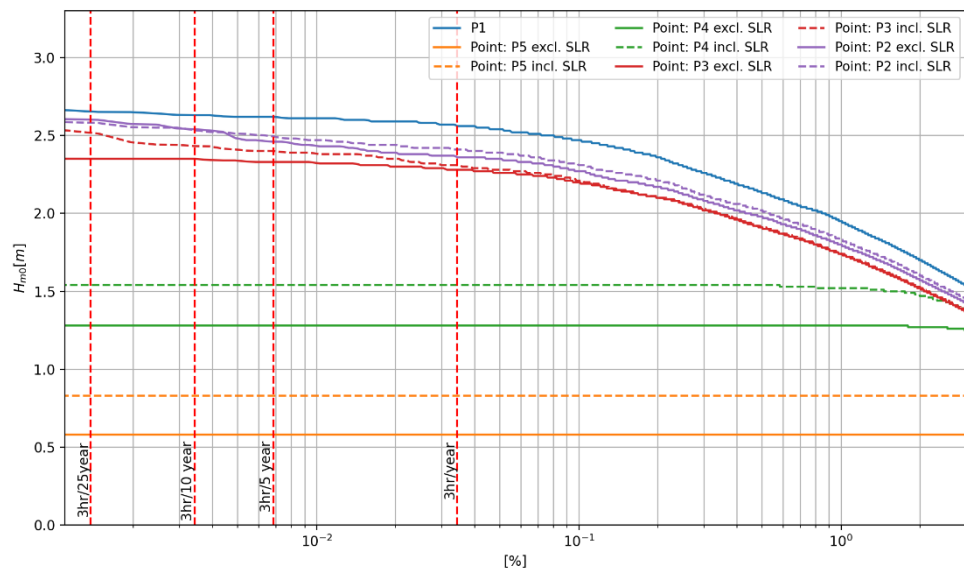
Den gule linje på Figur 3-15 samt Tabel 3-2 viser ligeledes, at for vanddybder under 1,5 meter, vil den signifikante bølgehøjde  $H_{m0}$ , ikke overstige 1 m, hvilket skyldes kriteriet af [6], altså at bølgerne nær bølgebryderne vil være dybdebe- grænsede.



Figur 3-13 Bølgerose ved punkt P2 (øverst), vanddybde 5,9 m og bølgerose ved punkt P5 (nederst). Begge punkter er vist med (højre) og uden (venstre) vands- tandsstigning på +0,45 m.



Figur 3-14 Scatterdiagrammer over den signifikante bølgehøjde  $H_s$  og peak bølgeperioden,  $T_p$ .



Figur 3-15 Endelige overskridelsessandsynligheder for bølgehøjder for forskellige vanddybder. "Inkl. SLR" er vandstanden inklusive vandstandsstigninger

Tabel 3-2 Bølgehøjder baseret på overskridelsessandsynlighed på de kystnære bølgeforhold ved punkt P2, P3, P4 samt P5.

| Position      | 3 t/<br>år | 3 t/<br>5 år | 3 t/<br>10 år | 3 t/<br>25 år | 3 t/<br>50 år |
|---------------|------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| P5 ekskl. SLR | 0,58       | 0,58         | 0,58          | 0,58          | 0,58          |
| P5 inkl. SLR  | 0,83       | 0,83         | 0,83          | 0,83          | 0,83          |
| P4 ekskl. SLR | 1,28       | 1,28         | 1,28          | 1,28          | 1,28          |
| P4 inkl. SLR  | 1,54       | 1,54         | 1,54          | 1,54          | 1,54          |
| P3 ekskl. SLR | 2,21       | 2,28         | 2,30          | 2,32          | 2,34          |
| P3 inkl. SLR  | 2,23       | 2,38         | 2,43          | 2,50          | 2,52          |
| P2 ekskl. SLR | 2,31       | 2,40         | 2,52          | 2,60          | 2,65          |
| P2 inkl. SLR  | 2,36       | 2,45         | 2,53          | 2,58          | 2,66          |

### 3.3.3 Sensitivitets analyse

For punktet P5, der ligger på 1 m vanddybde ved foden af ny bølgebryder, er bølgehøjden dybdebegrænset, og designbølgehøjden er således ikke afhængig af bølgehændelsernes returperiode, men udelukkende af den lokale vanddybde. For at opnå mere sikkerhed på den dimensionerende bølgehøjde er der i

nærværende projekt ligeledes foretaget en sensitivitsanalyse på bølgehøjden, hvis man justerer vanddybden hhv. +0,5 m og +1,0 m. Resultatet er vist i Tabel 3-3.

Tabel 3-3 Sensitivitsanalyse på bølgehøjden, ved ændringer af vanddybden foran bølgebryder

| Vanddybde<br>[m] | Bølgehøjde [m] |              |
|------------------|----------------|--------------|
|                  | P5 Ekskl. SLR  | P5 Inkl. SLR |
| 0                | 0,58           | 0,83         |
| +0,5             | 0,86           | 1,12         |
| +1,0             | 1,15           | 1,40         |

Tabel 3-3 illustrerer, at en teoretisk ændring i vanddybden på 1 meter vil medføre en stigning fra 0,58 m til 1,15 m og 0,83 m til 1,40 m i bølgehøjden, svarende til hhv. cirka 70 og 100% stigning i den største bølgehøjde. Dette skyldes at brydningskriteriet bliver lempet på større vanddybder, og større bølgehøjder kan derfor forekomme.

### 3.3.4 Bølgeperiode

For at kunne vurdere bølgenes længde, er det nødvendigt at kende forholdet mellem bølgehøjde og bølgeperiode. På Figur 3-16, fremgår bølgehøjderne og perioderne fra den transformeret tidsserie. På figuren er lavet en estimeret relation mellem bølgehøjde og bølgeperiode:

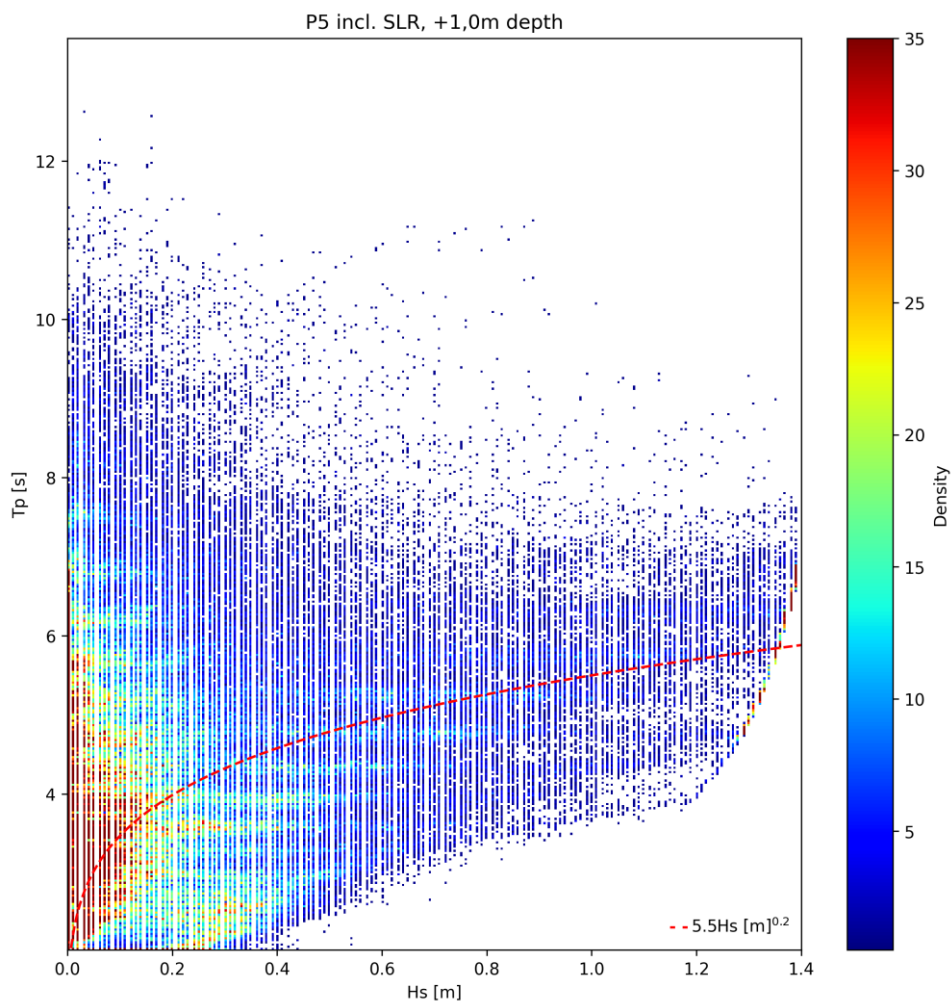
$$T_p = 5.5H_s^{0.2}$$

hvor:

$T_p$  er bølgens peak periode

$H_s$  er bølgens signifikante bølgehøjde

På baggrund af relationen mellem bølgehøjde og periode fås de i Tabel 3-4 angivne peak bølgeperioder.



Figur 3-16 Scatter figur for Hs og Tp, for punkt P5, hvis vanddybden bliver forøget med 1 meter. Angivet på figuren er en relation mellem Tp og Hs.

Tabel 3-4 Bølgeperioder for tilsvarende bølgehøjder, angivet i Tabel 3-3. Bølgeperioden er beregnet med formlen, angivet i Figur 3-16

| Vanddybde<br>differens<br>[m] | Ekskl. SLR        |                       | Inkl. SLR         |                       |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
|                               | Bølgehøjde<br>[m] | Bølgeperi-<br>ode [s] | Bølgehøjde<br>[m] | Bølgeperi-<br>ode [s] |
| 0                             | 0,58              | 4,93                  | 0,83              | 5,30                  |
| +0,5                          | 0,86              | 5,34                  | 1,12              | 5,63                  |
| +1,0                          | 1,15              | 5,66                  | 1,40              | 5,88                  |



### 3.4 Projekteringsforhold

For at opnå en større robusthed i den endelige løsning, er den valgte dimensionsgivende bølge den, der opstår ved en vanddybde-differens på 1 meter, inklusive vandstandsstigning. Derved tages der højde for eventuelle fremtidige erosionsstillæg eller vandstandsstigninger, som er større end de forventede.

De betingelser, der anbefales for projektering af bølgebryder, præsenteres i Tabel 3-5.

Tabel 3-5 Projekteringsforhold for bølgebrydere.

| Returperiode | Signifikant bølgehøjde, $H_s$ [m] | Peak bølgeperiode, $T_p$ [s] | Bundkote, $h$ [m DVR90] | Vandstands niveau [m DVR90] |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 50-år (2075) | 1,40                              | 5,88                         | -1,0                    | +1,46+0,45 = +1,91          |

For bølge-parametrene til projektering af bølgebryderne medtages der ikke bølgestuvning, da stuvningen antages at forekomme mellem diget og bølgebryderne.

## 4 Projektering af kystbeskyttelse

Kystbeskyttelse er en paraplybetegnelse for både erosion, der er drevet af på-landsbølgers ødelæggende kræfter, og havoversvømmelse, der drives af vandstandshævningen under en stormflod.

Dertil skal tillægges "klimapåvirkningen" der dels er forventet stigning i både bølgehøjde og maksimalvandstand grundet havspejlsstigningen samt de andre afledte klimapåvirkninger som øget nedbør, højerestående grundvand og samtidigheds-fænomenerne.

Til håndtering af de indfaldene bølger anlægges bølgedæmpende bølgebrydere yderst mod havet med bagvedliggende højtliggende strand så bølgenes energi løber helt af, der hvor erosionsbeskyttelse mangler i dag og der anlægges ensartet terrænhøjder mellem bølgebrydere og havdiger langs hele strækningen.

Senest i oktober 2023 har effekten af bølgebrydere på kyststrækningen ved Ulvshale vist sig vigtig i beskyttelsen af diget. Dige ved Ulvshale-fællesskov blev ramt af stormen "Babet" d. 20-21 oktober 2023. Stormen medførte skader på en større strækningen af diget, et eksempel på dette er vist på Figur 4-1. Figur 4-2 og Figur 4-3 viser på samme strækningen et relativt uberørt dige. Diget på de uberørte strækninger har været beskyttet af en forstrand og bølgebrydere. Bølgebryderne har været med til at bibeholde stranden foran diget, og denne kombination af forebyggelse mod erosion af stranden før stormen, samt den bølgebrydende effekt under storm har bidraget til at diget kunne modstå vandstand og bølgepåvirkningen på kysten.

Projekteringen af kystbeskyttelsen for strækningen uden bølgebrydere tager derfor udgangspunkt i, at der skal etableres bølgebrydere på strækningen, således at samme beskyttelsesniveau af diget opnås på hele strækningen. Dette således at kysten beskyttes mod erosion og diget beskyttes mod bølger under stormhændelser.



Figur 4-1 Skader på diget på strækning uden bølgebrydere. Foto fra Ulvshale-Fællesskov digelag efter stormen Babet.



Figur 4-2 *Relativt uberørt dige, beskyttet bag forstrand og bølgebrydere, i den østlige ende af digets strækning. Skaderne nederst på billedet er hvor strækningen uden bølgebrydere begynder. Foto fra Ulvshale-Fællesskov digelag efter stormen Babet.*



Figur 4-3 *Relativt uberørt dige, beskyttet bag de vestligst placerede bølgebrydere og forstrand. Foto fra Ulvshale-Fællesskov digelag efter stormen Babet.*

## 4.1 Bølgebrydere

Bølgebryderen projekteres iht. metoder og principper beskrevet i The Rock Manual [7]. Der anvendes  $T_m \approx T_p/1,2$  og  $T_{-1,0} \approx T_p/1,1$  samt stormvarighed på 3 timer.  $T_m$  er middel bølgeperiode,  $T_p$  er peak bølgeperiode og  $T_{-1,0}$  er spektral bølgeperiode. Der anvendes en stendensitet på  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$  (granit) og vanddensitet på  $\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$  forudsat en salinitet på 25 PSU og en vandtemperatur på  $10^\circ\text{C}$ .

### 4.1.1 Skråningsstabilitet

Valg af dæksten eftervises ved van der Meers formel med et skadestål på  $Sd=2$ , svarende til begyndende skade (0-5% skade). Van der Meer's formel er anvendt til bestemmelse af stenstørrelserne af dæklaget, ref. [7]:

$$\frac{H_{des}}{\Delta D_{n50}} = \begin{cases} c_{pl} P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \xi_m^{-0.5} \xi_m < \left[\frac{c_{pl}}{c_s} P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}\right]^{\frac{1}{P+0.5}} \\ c_s P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P \xi_m > \left[\frac{c_{pl}}{c_s} P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}\right]^{\frac{1}{P+0.5}} \end{cases}$$

Hvor

- >  $D_{n50}$  er den nominelle sten diameter (m)
- >  $H_{des}$  er projekteringsbølgehøjden
- >  $\Delta$  er den relative densitet,  $\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$
- >  $\cot(\alpha)$  er hældningen af dæklaget (1:1,5 til 1:2)
- >  $g$  er tyngdeaccelerationen
- >  $P$  er konstruktionens permeabilitet (0,2 - 0,3)
- >  $S_d$  er en dimensionsløs skadesniveau (2 svarende til 0 - 5% skade)
- >  $N$  er antal bølger i en projekteringsstorm (3000 – lavt vand)
- >  $\xi_m$  er en bølgestejlhedsparameter (surf similarity)

$c_{pl}$  og  $c_s$  er bølgeparametre (lavt vand:  $c_{pl}=8.4$ ,  $c_s=1.3$ )

Beregningen af den mindste størrelse dæksten fremgår af Tabel 4-1.

Tabel 4-1 Beregning af hydraulisk stabilitet af stenkastning efter van der Meer og Hudson.

| Parameter        |               |                   | Værdi |
|------------------|---------------|-------------------|-------|
| Densitet         | $\rho_s$      | kg/m <sup>3</sup> | 2650  |
| Permeabilitet    | P             |                   | 0,10  |
| Anlæg            | $\cot \alpha$ |                   | 2,0   |
|                  | a             | °                 | 26,6  |
| Antal lag        |               |                   | 1     |
| HAVBUND          |               |                   |       |
| Hældning         | $\cot \beta$  |                   | 225   |
|                  | b             | °                 | 0,25  |
| Vanddybde        | d             | m                 | 1,0   |
| Vandstand        | v             | m                 | 1,91  |
| Total vand-dybde | h             | m                 | 2,91  |
| Densitet         | $\rho_w$      | kg/m <sup>3</sup> | 1025  |

|                                   |                    |    |            |
|-----------------------------------|--------------------|----|------------|
| Relativ densitet                  | $\Delta$           |    | 1,60       |
| Signifikant bølgehøjde            | $H_s$              | m  | 1,40       |
|                                   |                    |    | Lavt vand  |
| Brydningsgrænse $H_s/h$ forhold   |                    |    | 0,6        |
|                                   | $H_{seff}$         | m  | 1,40       |
| Battjes & Groenendijk             | $H_{tr}$           |    | 1,09       |
|                                   | $H_{tr}/H_{rms}$   |    | 1,014      |
|                                   | $H_{rms}$          |    | 1,08       |
| Bølgehøjde på lavt vand           | $H_{2\%}$          | m  | 1,73       |
| Peak bølgeperiode                 | $T_p$              | s  | 5,88       |
| Middelbølgeperiode                | $T_m$              | s  | 4,9        |
| Spektral bølgeperiode             | $T_{-1,0}$         | s  | 5,3        |
| Bølgelængde                       | $\gamma$           |    | 44,6       |
| Surf similarity parameter         | $\varepsilon$      |    | 2,8        |
| Kritisk surf similarity parameter | $\varepsilon_{cr}$ |    | 3,8        |
| Van der Meer parametre            | $C_{pl}$           |    | 8,4        |
|                                   | $C_s$              |    | 1,3        |
| Stormvarighed                     | t                  | h  | 3          |
| Antal bølger                      | N                  |    | 2204       |
| Median sten-vægt                  | $M_{50}$           | kg | <b>650</b> |
| Median stenstørrelse              | $D_{n50}$          | m  | 0,63       |
| Dæklagstykkel                     |                    | m  | 0,63       |
| Hudson, skadestål                 | $K_d$              |    | 1,37       |
| Van Der Meer, skadestål           | $S_d$              |    | 1,86       |

#### 4.1.2 Nye bølgebrydere

Placering af de nye bølgebrydere er baseret på ingeniørmæssig erfaring, samt en vurdering af de omkringliggende bølgebrydere og deres effekt. Placeringen af

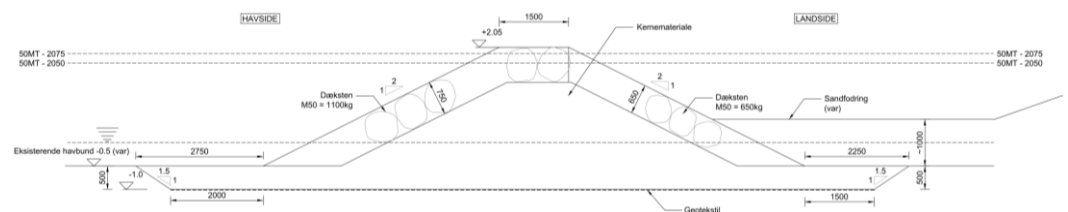
de nye bølgebrydere er vist på Figur 4-4. Tværsnittet for de nye bølgebrydere er vist på Figur 4-5.



Figur 4-4 Placering af nye bølgebrydere.

Bemærk på Figur 4-5 at der er anvendt dæksten på havsiden, med en median stenvægt på 1100 kg. Dette svarer til de dæksten, som digelaget allerede har indkøbt til den midlertidige beskyttelse af diget efter stormen Babet. Disse dæksten genanvendes i bølgebryderne, og er derfor angivet på tværsnittet. For at spare på materialet, er der anvendt mindste kravet til dæksten på landsiden af bølgebryderen.

Det forventes at bølgebryderen nedgraves med en halv meter, hvor kernematerialet vil blive placeret. Tåen af bølgebryderen er af samme materiale som kernen. Tåens udstrækning på landsiden skal ikke nødvendigvis være af samme størrelse som på havsiden, siden denne ikke er ligeså eksponeret for bølger.

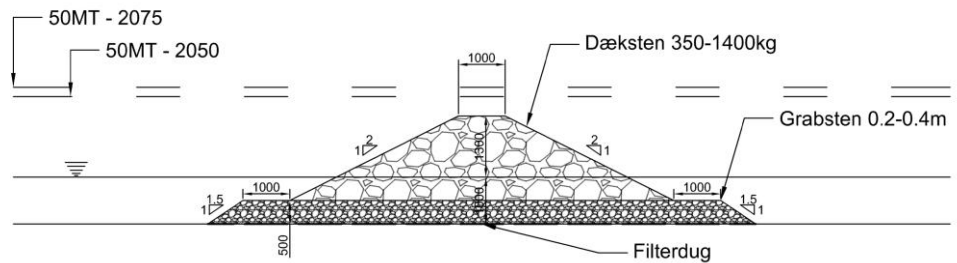


Figur 4-5 Ny bølgebryder på 0,5m vanddybde. 50 års middeltidshændelsen i 2050 og 2075 er angivet.

### 4.1.3 Eksisterende bølgebrydere

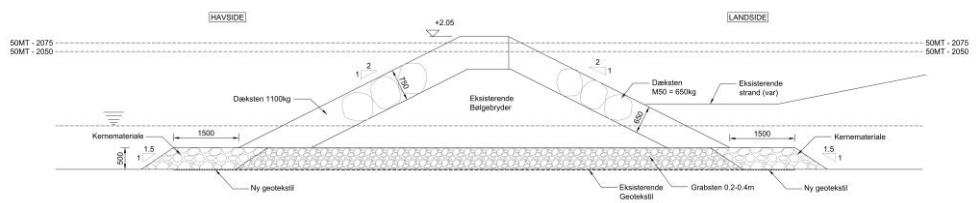
De eksisterende bølgebrydere, vil under en 50 års middeltidshændelse om ca. 25 år og 50 år stå under vand, som vist på Figur 4-6. Det anbefales derfor at forstærke bølgebryderne, både for at sikre at kronen (toppen af bølgebryderen) er højere end en 50 års middeltidshændelse i fremtiden, samt at der kan placeres større sten til at gøre bølgebryderen mere robust.

Figur 4-7 viser en forstærkning af de eksisterende bølgebrydere, hvor sten med en middelvægt på 1,1t benyttes. For at det nye lag dæksten kan placeres, skal tåen i bunden udbygges, så dækstenene kan placeres herpå, samt at der er tilstrækkelig beskyttelse mod lokal erosion ved bølgebryderen.



Figur 4-6 Tværsnit af eksisterende bølgebrydere, baseret på Figur 2-6. 50 års midteltidshændelsen i 2050 og 2075 er angivet på skitsen.

Forstærkelsen af de eksisterende bølgebrydere tager udgangspunkt i samme materialer som anvendt til de nye. Dette indebærer dæksten på havsiden, tilsvarende de allerede indkøbte dæksten, samt det nye tå-materiale er tilsvarende kernematerialet på de nye bølgebrydere.



Figur 4-7 Oplæg til forstærkelse af eksisterende bølgebrydere. 50 års midteltidshændelsen i 2050 og 2075 er angivet på skitsen.

#### 4.1.4 Dæksten

For både de nye bølgebrydere samt forstærkelsen af de eksisterende, skal der anvendes nye dæksten. De nye dæksten som skal benyttes til bølgebryderne, er vist på Figur 4-7 og Figur 4-5 og beregnet i Tabel 4-1. Det vil kun være nødvendigt at placere de største dæksten på havsiden af bølgebryderen, hvorved materiale kan spares på bagsiden.

Digelaget har allerede indkøbt dæksten af typen marksten, som skal benyttes til bølgebryderne. Disse marksten har en median stenstørrelse ( $D_{n50, \text{mark}}$ ), tilsvarende største kravet i Tabel 4-1 (0,72 m). Resultaterne i Tabel 4-1, tager dog udgangspunkt i at de valgte dæksten er af sprængsten. Da en stensætning med sprængsten typisk vil have større stabilitet en stensætning med marksten af samme størrelse bør diameteren  $D_{n50, \text{mark}}$  for marksten omregnes til en ækvivalent  $D_{n50, \text{spræng}}$  svarende til sprængsten, Jf. [7] tabel 5.30.

De indkøbte marksten vurderes som semi-runde og derfor skal deres medianstørrelse,  $D_{n50, \text{mark}}$  multipliceres med en faktor 0,95. Den tilsvarende medianstenstørrelse,  $D_{n50, \text{spræng}}$ , Jf. [7] bliver derfor;

Tabel 4-2 Tilsvarende median størrelse for indkøbte marksten

| Diameter af indkøbte marksten<br>$D_{n50,mark}$ [mm] | Faktor Jf. [7] [-] | Ækvivalent sprængstensdiameter<br>$D_{n50,spræng}$ [mm] | Ækvivalent Median stenvægt, $M_{50,spræng}$ [kg] |
|--|--------------------|---|--|
| 720  | 0,95               | 680   | 833  |

#### 4.1.5 Kernemateriale

Der anvendes filterkrav efter Terzaghi og Thompson & Shuttler. Disse fremgår af nedenstående. I de følgende beregninger, tages der udgangspunkt i de sten, som digelaget allerede har indkøbt. Der regnes med en stengradering på 530-1590 kg, for en median stenvægt på 1100 kg.

$$D_{15a}/d_{15f} < 15$$

$$D_{50a}/d_{50f} < 7$$

$$D_{15a}/d_{85f} < 4$$

Indeks indikerer gennemfaldsprocent på en kornkurve for materialet. Indeks "a" indikerer dæksten (armour) og "f" indikerer filtersten. De beregnede graderingernes mindste størrelser kan ses i Tabel 4-3. Resultaterne er angivet i Stenmasse (M)/Nominal diameter ( $D_{n,mark}$ ).

Tabel 4-3 Mindste gradering for de angivne stengraderinger i Tabel 4-1

| Gradering - $M/D_{n,mark}$ | 530-1590 kg<br>[kg]/[mm] |
|----------------------------|--------------------------|
| 15%                        | 590/606                  |
| 50%                        | 1100/746                 |
| 85%                        | 2070/921                 |

Mindste krav til filterstørrelser kan ses i Tabel 4-4.

Tabel 4-4 Mindste graderingskrav for filterstørrelserne

| Gradering - $M/D_n$ | [kg]/[mm] |
|---------------------|-----------|
| 15%                 | 0,18/40   |
| 50%                 | 3,21/107  |
| 85%                 | 9,22 /152 |

#### 4.1.6 Tåen

Det forventes at materiale til udformning af tåen til bølgebryderne vil være af samme materiale som kernen til de nye bølgebrydere. Disse materialekrav kan ses i Tabel 4-4.

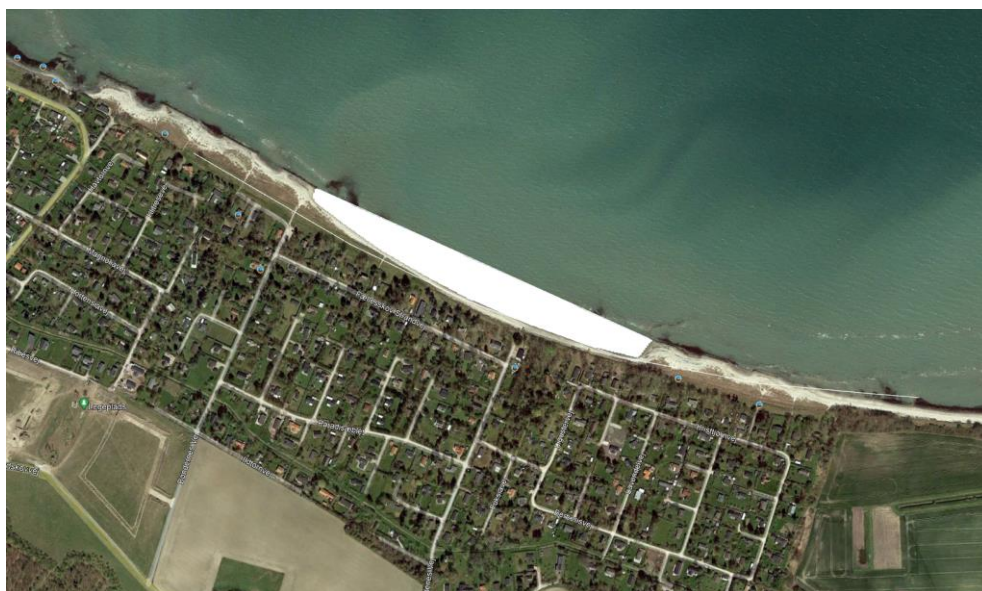


## 4.2 Geotekniske overvejelser

Som angivet i afsnit 2.4 var der i stedet for geotekniske stabilitetsberegninger foretaget en vurdering af de eksisterende bølgebrydere og deres tilhørende sætninger, hvor resultat kan ses i Tabel 2-1. Det blev konkluderet at det ikke kan vurderes med sikkerhed om bølgebryderne har været udsat for sætninger. Derfor vil eventuelle fremtidige sætninger af bølgebryderne kunne imødekommes ved reparation af bølgebryderne.

## 4.3 Sandfodring bag ved bølgebrydere

For at få den fulde beskyttelse af diget, vil der skulle sandfodres mellem diget og bølgebryderne, så der kan dannes et forland, som det ses ved de andre bølgebrydere. På Figur 4-8 er angivet et område med areal på omkring 31.000 m<sup>2</sup> som bør sandfodres.



Figur 4-8 Sandfodringsareal. (Satellitfoto: Google Earth)

Lagtykkelsen af sandfodringen er undersøgt ved at sammenligne de nærliggende sandprofiler, bag de eksisterende bølgebrydere. De eksisterende sandprofiler hælder ned imod kysten. Den gennemsnitlige forskel imellem sandfodringsarealet set på Figur 4-8 og naboliggende profiler er ca. 1 m.

Det vurderes ikke at opførelsen af bølgebryderne vil medføre en negativ påvirkning på sandtransporten i området, og at der dermed heller ikke vil være nogen negative konsekvenser for områderne vest for strækningen med nye bølgebrydere.

Der forventes derfor ikke at være behov for løbende vedligeholdelsesfodringer på strækningen, da det ikke har været tilfældet for nuværende strandfodringsområder. Dette er baseret på at de omkringliggende strækninger med bølgebrydere er stabile.

### 4.3.1 Sedimenttransport

Sedimenttransportretningen langs kysten er gående fra øst mod vest, se Figur 4-10. Figur 4-9 viser hvordan der har været en lokal tilbagerykning af kystlinjen fra 1899 til 2002. Der er fra 1995 til 2013 anlagt bølgebrydere, som har haft en indflydelse på kystlinjens beliggenhed på strækningen, som er vist på Figur 4-9. På strækningen er det muligt at se, hvordan tilbagerykningen af kystlinjen har været reduceret fra 2019 til 2022 sammenlignet med 2014 til 2019. Da der blev anlagt nye bølgebrydere i 2013, er det forventeligt, at der skete en umiddelbar tilbagerykning af kystlinjen efter etableringen af det nye anlæg, og at tilbagerykningen efterfølgende er mindsket. Da tilbagerykningen af kystlinjen er begrænset, vil opførelsen af de 5 nye bølgebrydere på strækningen ikke påvirke den kroniske sedimenttransport betydeligt.

Ser man samtidig på, hvor materialerne fra den langsgående sedimenttransport aflejres, kan man på Figur 4-10 se at aflejringen sker mod vest. Nabostrækningen mod vest, fra punktet hvor de eksisterende bølgebrydere slutter og frem til aflejningsområdet, modtager derfor ikke materialer fra det område, hvor de nye bølgebrydere skal opføres.

Af Figur 4-10 fremgår det også, at der på denne strækning er udfordringer med kronisk erosion af kystlinjen. Digelaget som også ejer diget på denne del, har planer om at igangsætte undersøgelser for hvordan denne strækning kan beskyttes.

Etableringen af de 5 nye bølgebrydere betragtes som en færdiggørelse af første fase, hvor bølgebrydere benyttes til at beskytte en delstrækning af Nordre dige. Beskyttelsen mod erosion på nabostrækningen undersøges i en efterfølgende fase.



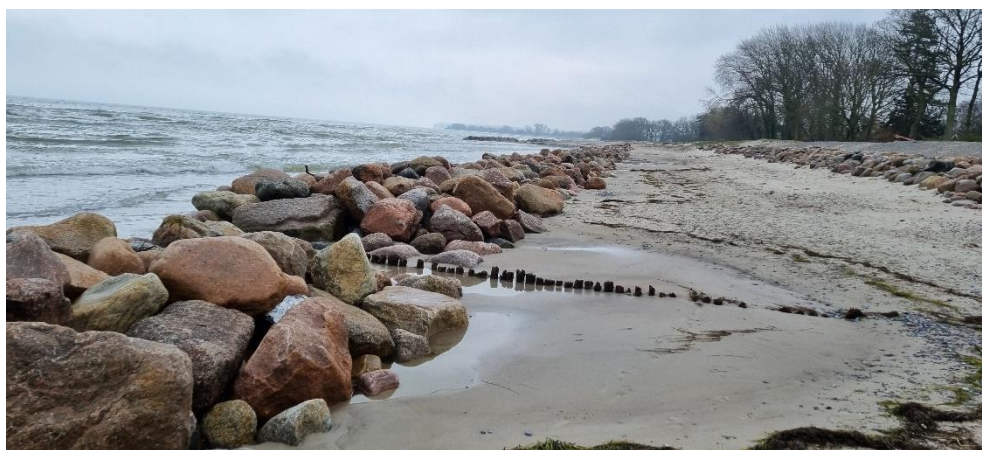
Figur 4-9 Kystlinje udvikling i perioden 1899 til 2022, på strækningen mellem de eksisterende bølgebrydere.



Figur 4-10 Kystlinjeudvikling i perioden 1899 til 2022 på strækningen ved Ulvshale-Fælleskov.

### 4.3.2 Fjernelse af ældre beskyttelses anlæg

Der er på strækningen, hvor bølgebryderne skal anlægget, tidligere etableret træ-høfder, se Figur 4-11. Da disse er nedbrudt over længere tid, har de ikke en effektiv beskyttende effekt på strækningen. Når de nye bølgebrydere etableres, bliver høfderne derfor fjernet. Dette gør også, at når personer bevæger sig på stækning vil de ikke kunne falde over høfderne, specielt da høfderne ville blive begravet i sand i forbindelse med sandfodringen.



Figur 4-11 Eksempel på eksisterende høfde på strækningen hvor de nye bølgebrydere skal etableres. På billedet ses derudover de sten som er udlagt som midlertidig beskyttelse efter stormskaderne på diget fra oktober 2023.

### 4.3.3 Beplantning af sandfodringsområde

Efter sandfodringen udplantes hjemmehørende klitvegetation. Udplantningen af planter sker for at fremme udbredelsen af disse, da planterne bidrager til at holde på sandet, og der undgås bl.a. stor sandfygning.

Der udplantes 5 planter per m<sup>2</sup>, og der opsættes afspærringsbånd omkring de nyudplantede planter for at undgå disse beskadiges indtil de har etableret sig.

## 5 Kystbeskyttelsens udformning og placering

### 5.1 Erosionsbeskyttelse

Den nye erosionsbeskyttelse vil blive udformet ved at anlægge 5 nye bølgebrydere i området imellem de eksisterende. Placeringen af disse kan ses på Figur 4-4. Samtidigt vil erosionsbeskyttelsen ligeledes omfatte restaureringen af de eksisterende. Disse bølgebrydere er dimensioneret i afsnit 4.1, hvor tværsnittet for de nye bølgebrydere kan ses på Figur 4-5 og restaureringen af de gamle på Figur 4-7.

Tegning A256285-TG-001, -002 og -003 viser plan og typiske tværsnit for bølgebryderne.

## 6 Anlægs- og vedligeholdelsesbeskrivelse

### 6.1 Anlægsbeskrivelse

I de følgende afsnit beskrives hvordan arbejderne for kystbeskyttelsen påtænkes at skulle udføres.

#### 6.1.1 Bølgebrydere

Der skal foretages to typer arbejder i forbindelse med bølgebryderne, anlæggelsen af nye bølgebrydere, samt forstrækning af de eksisterende bølgebrydere på strækningen. Herunder beskrives først etableringen af de nye bølgebrydere og efterfølgende forstrækningen af de eksisterende bølgebrydere.

Der er i januar 2024 foretaget en havbundsopmåling som viser at der hvor bølgebryderne skal opføres er en havbundsdybde på omkring 0,5m. Det forventes derfor at en entreprenør vil opføre bølgebryderne fra landsiden, hvorved maskinerne kan køre på havbunden når anlægget skal opføres. Det kan forekomme at udlægges en kørevej af sten for at hæve maskinerne ud af vandet. Materialerne fra denne kørevej vil bestå af materialer som skal indbygges i bølgebryderne eller sand som forbliver bag bølgebryderne.

For at sikre tilstrækkelig robusthed mod varierende havbund, skal bølgebryderne anlægges således at bundkoten er i -1m DVR90. Dette medfører at der hvor bølgebrydere opføres skal der afgraves et ca. 0,5m sandlag. Sandet herfra indbygges bag bølgebryderne i området som skal sandfodres.

Efter afgravningen af sand, udlægges en geotekstil hvorpå der placeres filterstenmateriale. Filterstenmaterialet udgør både kerne og tå-beskyttelse af bølgebryderne. Når filterstenmaterialer er udlagt og afrettet indbygges dæksten på bølgebryderen. Bølgebryderne har to stengraderinger. På siden mod havet og på kronen af bølgebryderen indbygges den største dækstensgradering, hvor der på bagsiden benyttes den mindste dækstensgradering.

Begrundelsen for at benytte forskellige graderinger er at digelaget har eksisterende dæksten som kan indgå i bølgebryderne, og disse er tilstrækkelig store til at give ekstra robusthed ved at blive placeret på havværdssiden.

For enderne af bølgebryderne benyttes den store dækstensgradering rundt i rundingen, hvorfor den mindre dækstensgradering kun benyttes på langsiden mod land.

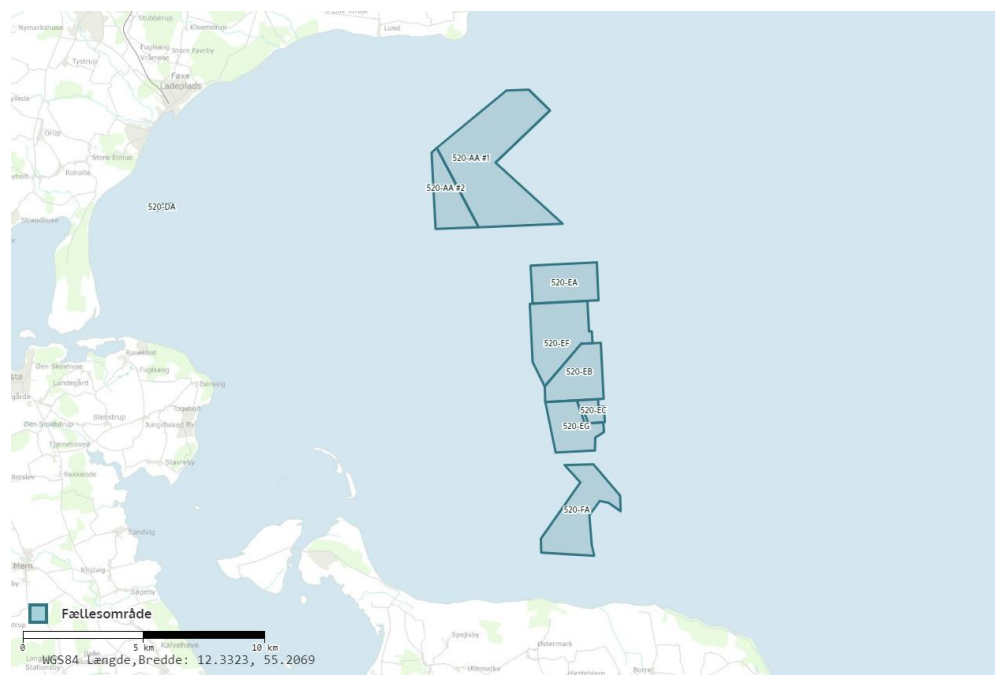
For de eksisterende bølgebrydere, er arbejderne sammenlignelige med den for de nye bølgebrydere, hvorfor det samme type materiel forventes af kunne benyttes til arbejdet.

De eksisterende bølgebrydere vil forblive i deres oprindelige opbygning. Det påtænkes at der omkring bølgebryderne afgraves ned til tåbeskyttelse, og at området omkring bølgebryderne afgraves for sand således at tå-konstruktionen kan

udvides. Når der er afgravet tilstrækkelige sandmængder, vil der blive udlagt filterstenmateriale på udrullet geotekstil. Efterfølgende opbygges der et nyt lag dæksten ovenpå de eksisterende dæksten. Dækstenen placeres som ved etableringen af de nye bølgebrydere, med den største dækstensgradering på havværdssiden, og den mindre dækstensgradering ind mod kysten.

### 6.1.2 Initial strandfodring

Det forventes at der kan indhentes sand fra et af de fællesområder som ligger tæt på Ulvshale. Sandet kan herefter sejles til kysten hvorfra det kan pumpes via en flydeledning indtil kysten. Alternativt kan sandet sejles til en havn i nærheden hvorfra det kan køres til stranden.



Figur 6-1 Fællesområder til råstofindvinding. I bunden af kortet ses nordkysten på Møn. Kort: Miljøstyrelsen.

## 6.2 Vedligehold af kystbeskyttelse

### 6.2.1 Bølgebrydere

Vedligehold af bølgebryderne udføres efter skader på stenkonstruktionen. Hvis dæksten, kernesten eller geotekstil er skadet, vil skaden skulle udbedres. Under stormvejr kan fx. enkelte sten flyttes af bølger, disse flyttes tilbage efter stormen. I tilfælde af is på vandet, kan bølgebryderne blive påvirket, og påvirkninger fra is kan medføre at dele af konstruktionen skal opbygges igen.

### 6.2.2 Strandfodring

Der udføres en initial sandfodring på strækningen, efterfølgende forventes der ikke et behov for yderligere sandfodring. Erfaringer fra de allerede eksisterende bølgebrydere viser at der er begrænset variation i kystlinjen efter etablering af bølgebryderne. Der foregår en langsgående transport af sand fra øst mod vest, denne transport vil fortsætte efter etablering af bølgebryderne. Evt. i forbindelse med kronisk erosion, vil vanddybderne bliver større foran bølgebryderne med tiden.

Efter den initiale sandfodring kan der forekomme ændringer til sandprofilerne, f.eks. i mellemrummet mellem bølgebryderne. Det er forventeligt at naturen vil påvirke sandets profil efter en sandfodring. Der kan evt. foretages opmålinger på områder for at følge udviklingen af sandfodringen, og om denne forbliver.

Skulle der med tiden vise sig at den initiale sandfodring helt eller delvis forsvinder, vil dette kunne modvirkes med yderligere sandfodring.

### 6.2.3 Beplantning

Efter sandfodringen udplantes hjemmehørende klitvegetation. Disse forventes med tiden at sprede sig i området. Det er dog vigtigt at planterne beskyttes mod gående og maskiner i området, umiddelbart efter udplantning. Planterne skal have tid til at fordele sig på området. Skulle større områder have beskadiget planter, bør disse erstattes med nye planter.

### 6.2.4 Dige

For at bevare digets kystbeskyttende funktion er det essentielt, at det vedligeholdes jævnlige. Dette gøres bl.a. ved at sikre, at de kohæsive kræfter, der skabes af græssets rodnet bevares. Græslandet, bør være tæt og velplejet uden bare områder og huller (kan være gravet af f.eks. mosegrise). Større planter som hybenroser, træer og buske bør fjernes. For at undgå disse større planter bør græsset slås ca. 3-7 gange i vækstsæsonen hvert år.

Det bør årligt vurderes, om højden af diget samt græslandet er intakt. COWIs projektleder vil én gang årligt deltage i en digevandring, hvor digernes samt den øvrige kystbeskyttelses tilstand vurderes.



For at bevare digets højde bør færdsel på diget, så vidt muligt undgås, da det medfører lokal erosion.

## 7 Projektets påvirkninger

### 7.1 Natur og Miljø

Projektet udføres tæt ved og i begrænset omfang inden for Natura 2000 områder. Af denne årsag er der udført en væsentlighedsvurdering (A256285-TN-002) som indsendes i forbindelse med myndighedsansøgningen.

Foruden væsentlighedsvurdering indsendes også det udfyldte skema for VVM-vurderingen (A256285-MA-003) i forbindelse med myndighedsansøgningen.

## 8 Berørte matrikler

De matrikler, hvorpå projektet anlægges kan ses i Figur 8-1 samt Tabel 8-1.

Bølgebryderne opføres så langt ude i vandet, at de ikke påvirker nogle matrikler. De påvirkede matrikler er derfor udelukkende påvirket af sandfodring.



Figur 8-1: Berørte matrikler

Tabel 8-1: Matrikler berørt af sandfodring

| Matrikler berørt af sandfodring |
|---------------------------------|
| 63gb                            |
| 63gh                            |
| 63ø                             |
| 63z                             |
| 63fx                            |
| 63gu                            |
| 59s                             |
| 63aa                            |
| 63ad                            |
| 63bz                            |
| 63y                             |
| 63gø                            |
| 63x                             |
| 63gq                            |
| 63gv                            |
| 63a                             |

## 9 Referencer

- [1] Kystdirektoratet, »Forslag til udpegning af risikoområder på baggrund af en foreløbig vurdering af oversvømmelsesrisikoen fra havet, fjorde eller andre dele af søterritoriet,« Transportministeriet, Lemvig, 2011.
- [2] COWI, »Byernes udfordringer med havvandsstigning og stormflod,« Realdania, København, 2017.
- [3] IPCC, »AR6 Synthesis Report - Climate Change,« IPCC, FN, 2023.
- [4] Kystdirektoratet, »Højvandsstatistikker 2017,« Kystdirektoratet, Lemvig, 2019.
- [5] Kamphuis, J.W., Introduction to Coastal Engineering and Management,, World Scientific, 2000.
- [6] J. W. Kamphuis, Introduction to Coastal Engineering and Management, 1, Red., World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2000.
- [7] CIRIA, CUR, CETMEF, The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition), London: C683, CIRIA, 2007 (reprinted 2012).
- [8] IPCC, »AR6 Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability,« [ipcc.ch/report/ar6/wg2](https://ipcc.ch/report/ar6/wg2), Intergovernmental panel on Climate Change, 2022.

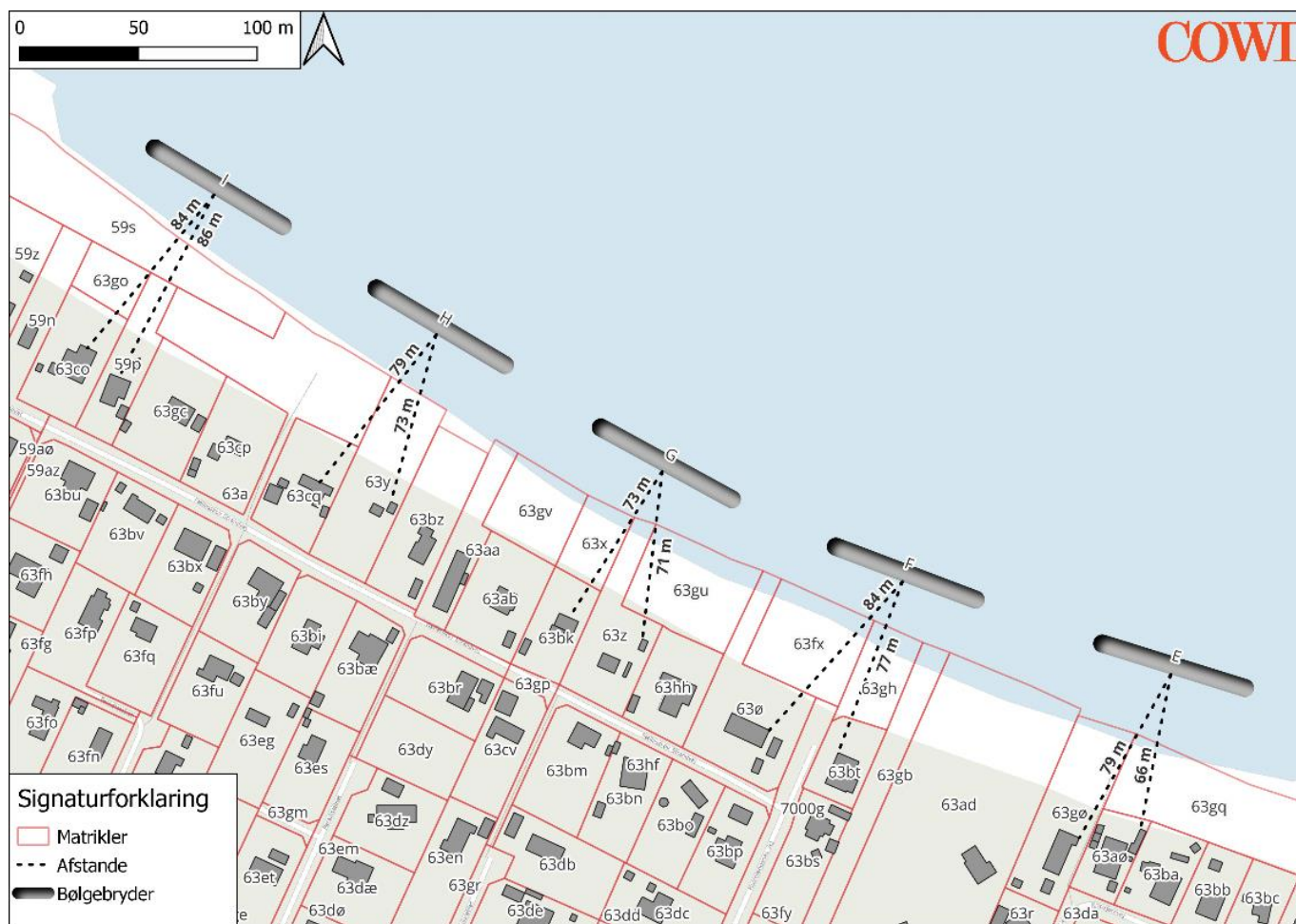
## Bilag A Afstande til kystbeskyttelse



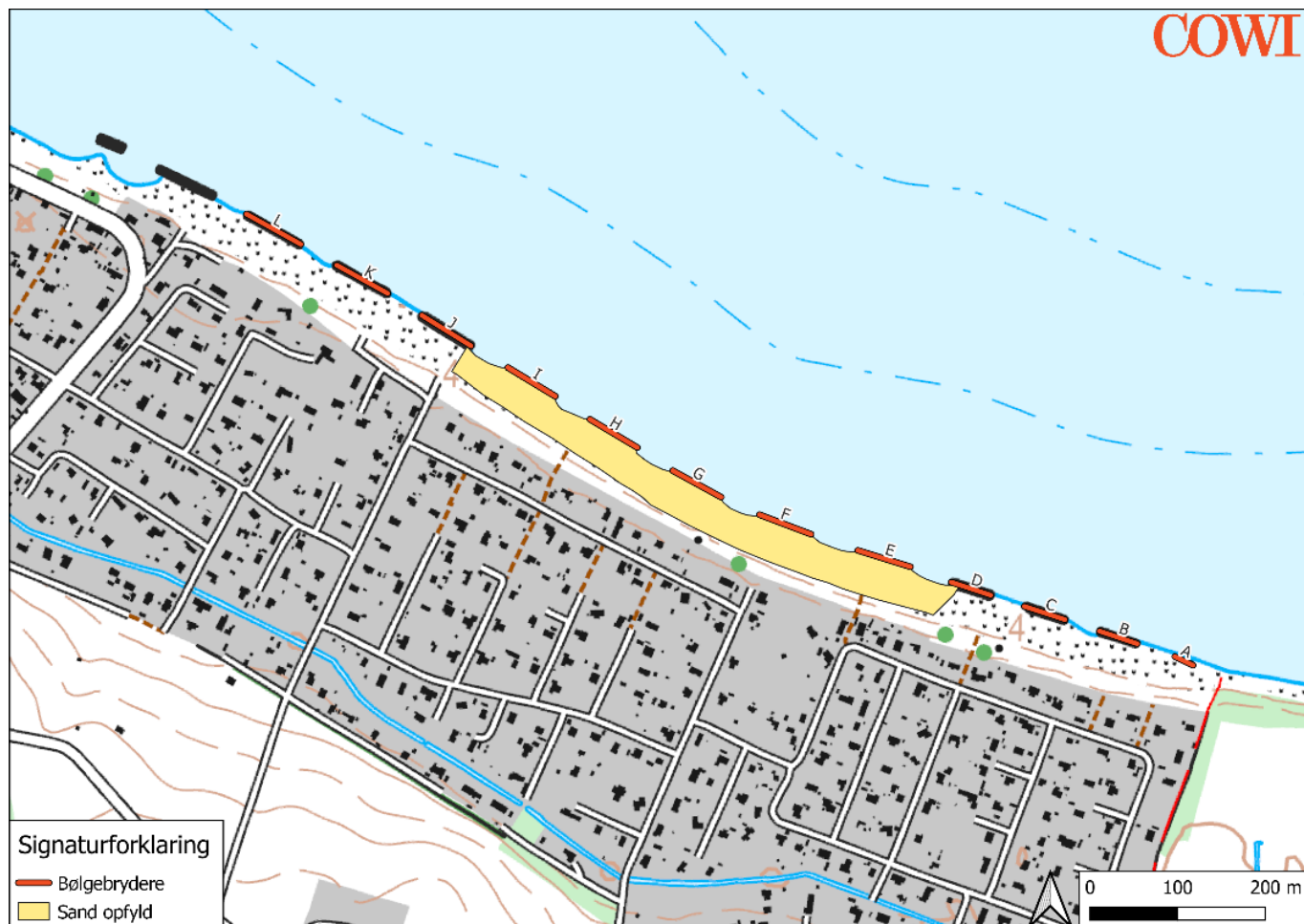
Figur 9-1 Skitse af placeret bølgebryder, med afstand til nærmeste hus og digefod.



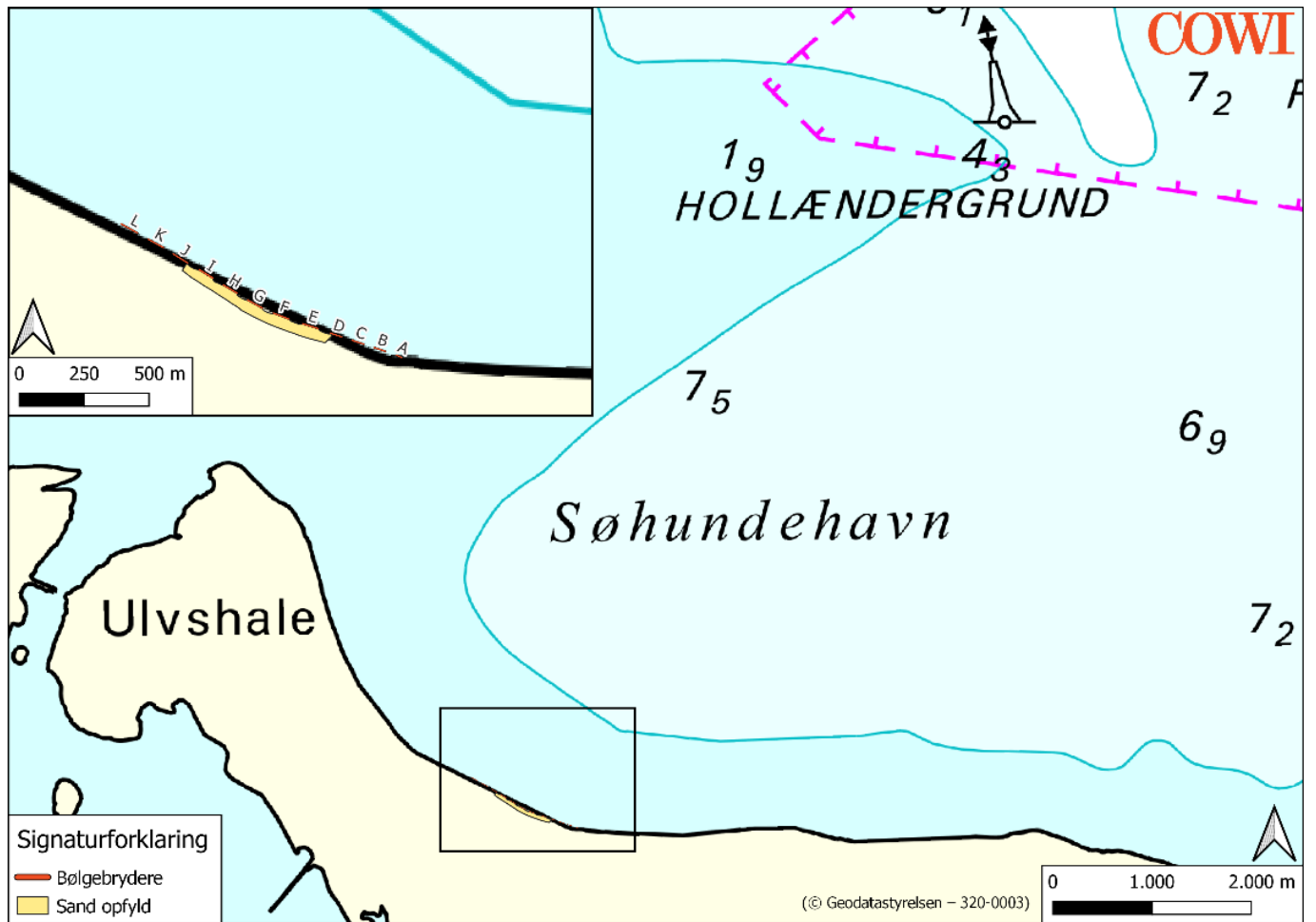
Figur 9-2 Skitse af placeret bølgebryder, med afstand til nærmeste hus og dige-fod.



Figur 9-3 Afstande fra nærtliggende huse til nye bølgebrydere.



Figur 9-4 Søkort med indtegnede elementer fra ansøgningen.



Figur 9-5 Søkort med indtegnede elementer fra ansøgningen.