



Kystbeskyttelse ved Gl. Skagen

**Tilstandsvurdering og granskning af årsag til
nedbrydning af høfder**

Frederikshavn Kommune

Dato: 23. juni 2023

Rev.nr.	Dato	Beskrivelse	Udarbejdet af	Kontrolleret af	Godkendt af
0	03-11-2023	-Kystbeskyttelse ved Gl. Skagen	JMAK/LOPE	KLBU	LOPE

Indhold

1.	Indledning.....	4
2.	Grundlag	6
2.1.	Historik for strækningen.....	6
2.2.	Tilstandsvurdering.....	9
2.3.	Sediment.....	17
3.	Analyser.....	19
3.1.	Design vandstand.....	19
3.1.1.	Baseret på projekteringsrapport udført af A1	19
3.1.2.	NIRAS grundlag for vandstand.....	19
3.2.	Design bølgeforhold	19
3.2.1.	Baseret på projekteringsrapport udført af A1	19
3.2.2.	Baseret på NIRAS grundlag.....	19
3.3.	Projekt beregninger.....	25
3.3.1.	Stenstørrelse.....	25
3.4.	Tidligere rådgivers design ift. det udførte.....	28
3.5.	Design af eksisterende høfder	28
3.5.1.	Dimensionering af dæksten.....	28
3.5.2.	Filtersten og tå	28
3.6.	Renovering af høfder og sandfodring	29
4.	Konklusion	30
5.	Referencer.....	31

1. Indledning

Frederikshavn Kommune har bedt NIRAS bistå med at tilstandsvurdere de eksisterende hølfer på en strækning vest for Skagen. Strækningen er vist i Figur 1.1 **Error! Reference source not found.**

Der er igennem de seneste 70 år lavet en del forskelligartede tiltag for at beskytte kyststrækningen med både hårde stenkonstruktioner, supplerende ralfodring og supplerende sandfodring samt omfordeling af de eksisterende materialer i strandprofilet. Det er derfor ikke entydigt at se på kystens udvikling over de seneste mange år, men de generelle overordnede trends kan benyttes til vurdering af kysten og de eksisterende konstruktioners tilstand og effekt.

Opgaven baseres på opstartsmøde og fysisk besøg på strækningen udført d. 3. marts 2023 samt 12. september 2023. I det omfang det er muligt støttes analysen af den af NIRAS tidligere udførte kystgennemgang mellem Hirtshals Havn og Grenen dateret 6. oktober 2022.



Figur 1.1: Kyststrækningen ved Gl. Skagen der er beskyttet af hølfer og andre hårde konstruktioner. Baseret på Tegning 101, udført af A1.

På baggrund af de udførte visuelle inspektioner udføres følgende ydelser:

1. Granskning af fremsendt materiale ift. historiske hændelser, kystudvikling på strækningen og det oprindelige design inkl. forudsætninger. Historik for strækningen beskrives.
2. Tilstandsvurdering af kysten og de enkelte beskyttelses anlæg baseret på den visuelle inspektion samt dronefotos leveret af Kunden.
3. Vurdering af de enkelte anlægs kystbeskyttende virkning. Årsag til nedbrydning af høfder vurderes på basis af:
 - i) Vurdering af overensstemmelse mellem tidligere rådgivers design/projektering ift. det udførte
 - ii) Vurdering af design bølgeforhold gennem udtræk af dybvandsbølge med simpel LITPACK transformation til kysten som *'best practice'* svarende til design tidspunktet.
 - iii) Vurdering af anvendt design vandstand gennem ekstremanalyse af Kystdirektoratets højvandsstatistik og IPCCs vurdering af havspejlsstigning som *'best practice'* svarende til design tidspunktet.
4. Anbefaling for fremtidige kystbeskyttelsestiltags designgrundlag:
 - i) Fastlæggelse af designgrundlag baseret på bearbejdning af data bestemt under pkt. 3 opdateret til 2023 design værdier.
5. Beregning af stenstørrelse og kronekote på hårde konstruktioner (høfder).

2. Grundlag

2.1. Historik for strækningen

Høfderne på strækningen er etableret i forskellige perioder baseret på tidligere tilladelser:

- I perioden 1946-50 successivt beskyttet med seks høfder.
- I 1978 blev læsideområdet beskyttet af yderligere 10 høfder
- Systemet blev i 1985 udvidet med to kortere høfder som terminalafslutning.
- Den nuværende beskyttelse ved Højen Fyr med høfde og skråningsbeskyttelse blev anlagt i 1984
- Skråningsbeskyttelsen er i 2004 blevet forlænget på begge sider.
- Dertil sand- og ralfodring mellem høfderne.
- Supplement med fem nye høfder mellem Fellen i syd og de eksisterende høfder fra 1950 samt to høfder umiddelbart syd for Højen Fyr etableret i 2018 baseret på design fra 2015.

Af Ref. /2/ Tilladelse til kystbeskyttelse ved Skagen SV for Gl. Skagen til Højen Fyr, juni 2018 fremgår det bl.a. at:

Området omkring Gl. Skagen er en typisk sandmættet revlekyst med 3 til 4 markante revler ud for en flad forstrand med en stejl erosionskrænt i de bagved liggende sandklitter. Kysten har en generel tilbagerykning på 1 – 2 m pr år, samtidig med, at der foregår en østgående hovedmaterialevandring på ca. 1 mio. m³ pr. år fordelt henholdsvis på forstranden, henholdsvis på revlerne.

Siden 1949/50 har der bl.a. ved hjælp af stenhøfder været etableret en sikring af selve Gl. Skagens bydel (Højen). Denne sikring har fastholdt kysten gennem de sidste 55 år, hvorimod den før omtalte generelle tilbagerykning har fundet sted på begge sider af byen. Tilbagerykningen medførte op i halvfjerdserne et væsentligt tab af 5 til 6 m høje klitter øst for byen. Hvilke var årsag til etableringen af høfdegruppen i 1978.

På grund af den efterfølgende læside erosion, er høfdegruppen fra 1978 blevet suppleret med to terminalhøfder i 1984. Her er høfderne afkortet således, at strømmen omkring høfdehovederne får et mere strømlinet forløb, og dermed mildne læsideerosionen.

Siden 1984 er kysten mellem den sidste høfde i 1978/84 gruppen og Højen fyr rykket tilbage, men i et langsommere tempo. Tilbagerykningen er ikke helt stoppet, og i dag begynder Højen Fyr at fremstå som en fremskudt position på kystlinjen.

I læsideområdet ved Højen Fyr er klittilbagerykningen gennemsnitlig 3,2 m/år. De eksisterende høfder har stabiliseret klit og strand, medens der omvendt har været ekstra tilbagerykning på en strækning sydvest for Højen Fyr på grund af læsidevirkning af høfden. Der skal anlægges 2 nye høfder mellem den østligste høfde i 1978/84 høfdegruppen for at stoppe læsideerosionen op mod Højen Fyr, og dermed reducere den uheldige effekt af, at Højen Fyr ligger i en fremskudt position i forhold til den omgivende kyststrækning, som på sigt kan medføre, at der sker bagskæring. Formålet med høfde 6/15 og 7/15 er, at fastholde kystlinjen i sin nuværende placering og dermed undgå yderligere erosion.

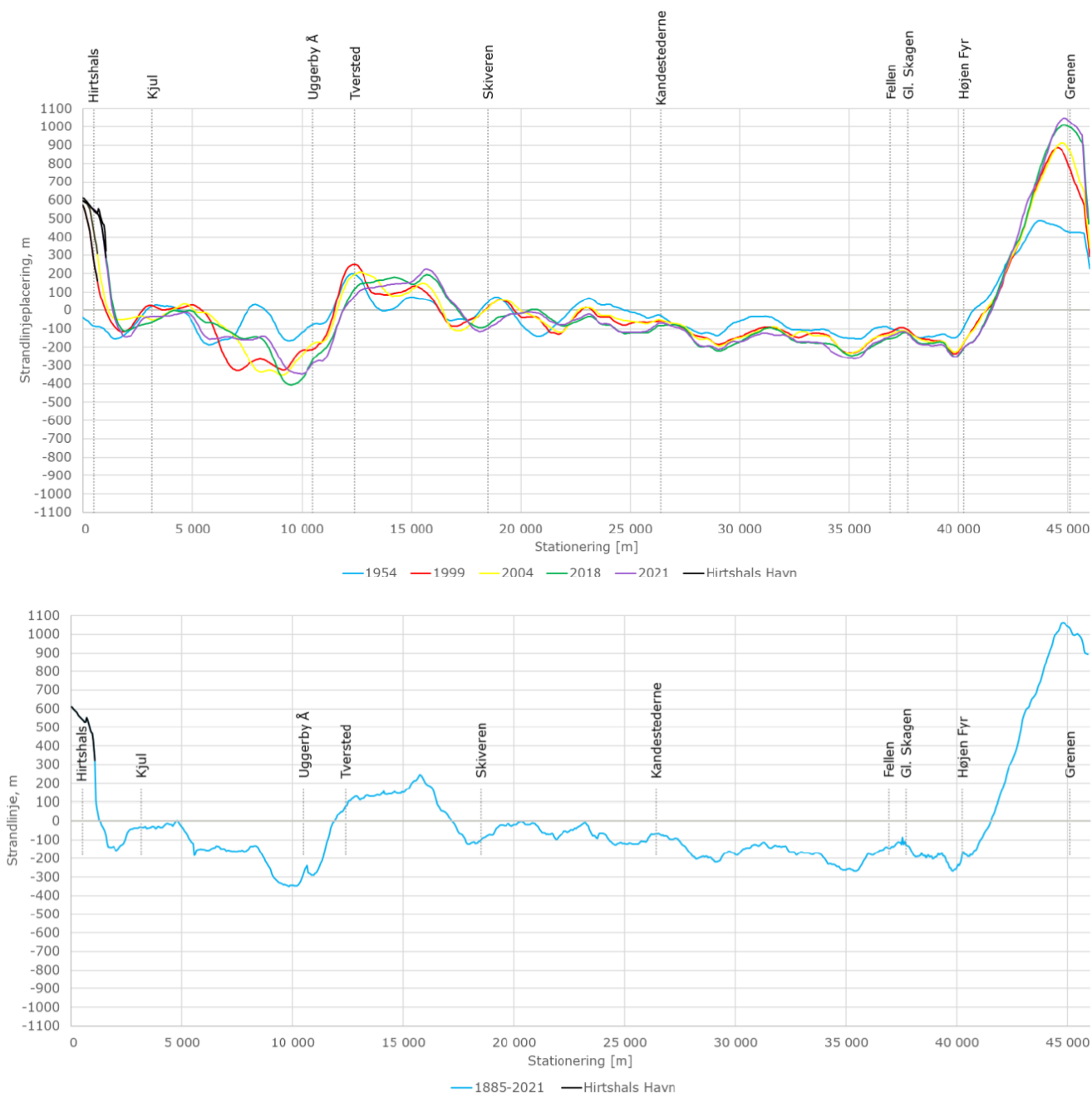
På den ubeskyttede strækning vest for Gl. Skagen ned mod Rævehulevej 34, herefter kaldet "Fellen" foregår forsat den generelle tilbagerykning i klitskrænten, med en gennemsnitlig tilbagetrækning på 1,3 m/år. Med tiden kommer Gl. Skagen by til at ligge som en fremrykket position på kystlinjen. Der skal anlægges 5 nye høfder med varierende længde fra 42 til 53 m. Høfdehovederne ligger i hovedsagen inden for en skrå linje fra spidsen af Høfde 1 (1950) ned mod "Fellen". Denne udformning af høfderne, der svarer til 1978 høfderne, har erfaringsmæssigt virket

godt, og været effektiv i opsamlingen af sand op mod klitfoden. Dette vil medvirke til genopbygning af Højen Klit, der initialt opbygges med sandfodring.

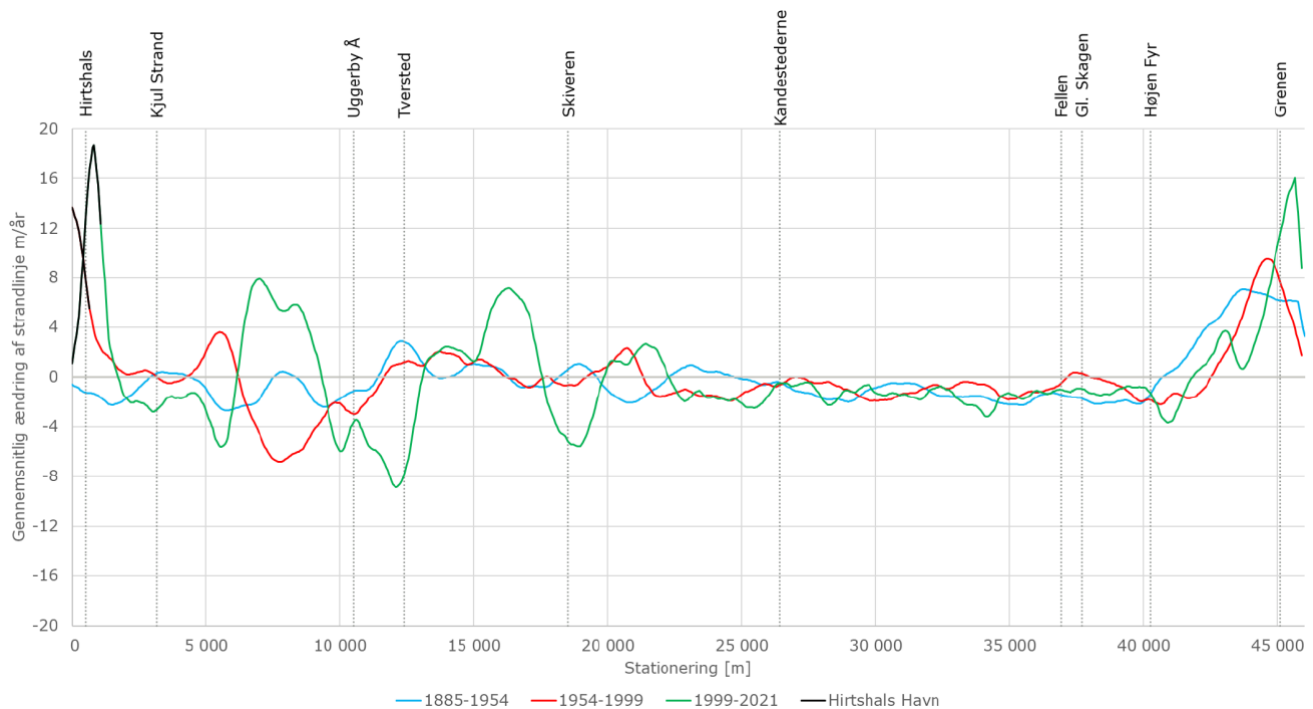
Endeligt udføres hølferne med trappepassage som betonehøfdeblokke med ru kostet overflade, således at der kan være offentlig passages langs stranden. Etableringen af kystbeskyttelsen i form af de 5 nye hølfer vest for Gl. Skagen vurderes at forårsage en midlertidig udhungning af 1950 hølfeområdet i størrelsesordenen 2 m over en strækning på ca. 300 m. Der skal derfor udføres en initialfodring på denne strækning med 15.000 m³.

Hertil kommer en initialfodring på 25.000 m³ til genopbygning af Højen Klit, som ligger bag de 5 nye hølfer. På østsiden af beskyttelsen ved Højen Fyr dannes der læsideerosion, der forårsager en tilbagerykning af klitskrænten. Den nuværende situation ser ud til at være stabiliseret, men forstærkningen af kystsikringen kan initialt forårsage yderligere erosion indtil en ny ligevægt er indstillet. Det kan derfor, som option, komme et behov for at forlænge den eksisterende skråningsbeskyttelse øst for Højen Fyr.

Den historiske kystudvikling er ligeledes bearbejdet i Ref. /10/ som gengivet i Figur 2.1 og Figur 2.2. De afspejler tilsvarende trends som beskrevet i tilladelsen. Figureerne afspejler ligeledes den store variation i erosion og kystfremrykning gennem årene.



Figur 2.1: Historisk kystudvikling mellem Hirtshals og Grenen mellem 1885 og 2021 i forhold til stranden i 1885 (baseret på Ref. /10/). Øverst for givne årstal, nederst den samlede udvikling fra 1885 til 2021.



Figur 2.2: Gennemsnitlig historisk kystudvikling (fra Ref. /10/).

I 2015 har A1 etableret og retableret en del af hofderner baseret på følgende detailprojekt:

1. Renovering af eksisterende hofdere fra 1949/50 (6 stk.)
2. Renovering af eksisterende hofdere fra 1978 (12 stk.)
3. Etablering af 2 stk. nye hofdere mod nordøst op mod Højen Fyr
4. Etablering af 5 stk. nye hofdere mod sydvest ned mod ejendommen "Fellen" inkl. sandfodring på strækningen.
5. Forlængelse af skråningsbeskyttelsen nordøst for Højen Fyr (option)

De 5 hofdetyper præsenteret af A1 havde alle samme opbygning og stenstørrelse, men varierer i længden (uddrag fra tegninger vist i Bilag 2). De nye anlagte hofdere skulle bestå af hofdehoved, hofdeskæft og hofdelandende, og de eksisterende hofdere skulle renoveres uden hofdelandende, men kun med hofdehoved og hofdeskæft.

Ved 1 års gennemgang var der sket ny nedbrydning som blev rettet op med de samme sten jf. Bilag 1. Der blev udført måling af vanddybde der viste op til 2,2 m dybde i stedet for antagne 1 m. Det fremgår ikke at der i den forbindelse blev udregnet nye stenstørrelser.

2.2. Tilstandsvurdering

Der blev d. 3. marts 2023 udført visuel inspektion af kyststrækningen sammen med kunden, ved fire nedslagspunkter: Højen Fyrvej 49, For enden af Hamiltonvej, Solnedgangspladsen og Fellen/Rævehulevej 34. Derudover er der modtaget drone fotos og video af strækning udført i april 2023. Udover denne fælles inspektion blev der d. 12. september udført en supplerende gåtur langs hele strækningen. Der blev d. 12. september 2023 observeret flyttet strandmateriale (fra forstranden og op mod klit som beskyttelse af klitfoden). Historik, mængder og logistik kendes ikke, og derfor heller ikke effekten på strandens dynamik. Derudover har Kystlaget suppleret

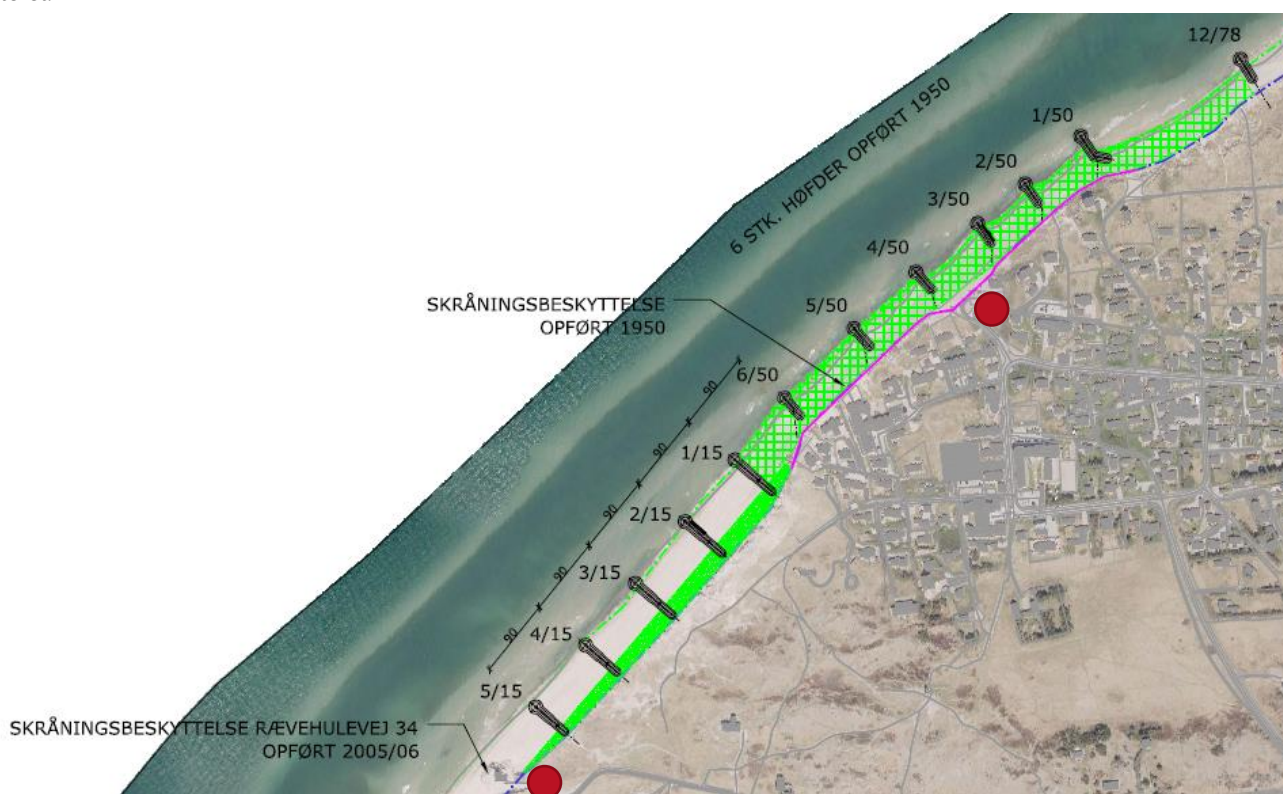
med en kystgennemgang efter det længerevarende blæsevejr midt i august 2023, hvor der var erosion i klitfoden flere steder på strækningen, hvilket ligeledes beskrives i dette afsnit.

Figur 2.3 viser strækningen hvor der blev vurderet på tilstanden (bemærk at figur er roteret) samt nedslagspunkterne A-D.

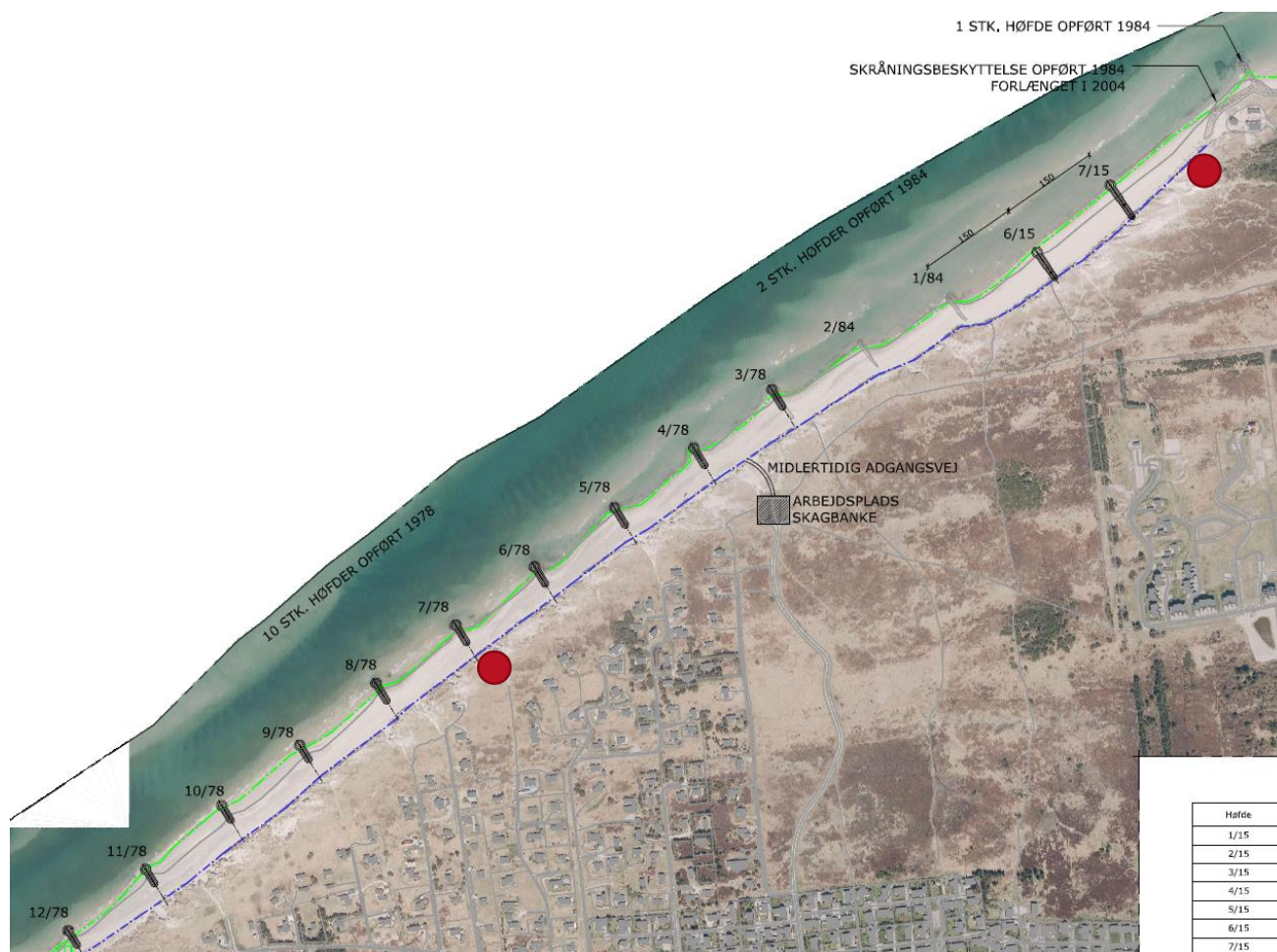
Høfdernes benævnelser er angivet i Figur 2.4 og Figur 2.5.



Figur 2.3: Strækningen med angivelse af de udvalgte punkter hvor strand og konstruktioner blev besigtiget. Bemærk at figur er roteret.



Figur 2.4: Høfde benævnelse for den sydvestligste halvdel af høfderne opført i 1950, 1078 og 2015. Skråningsbeskyttelse omkring Fellen/Rævehulevej 34 opført i 2005/06. Udklip fra Tegn. 101, 2014.12.10 udført af A1. Røde markeringer viser nedslagspunkter for besigtigelsen d. 3. marts 2023.



Figur 2.5: Høfde benævnelse for den nordvestligste halvdel af høfderne opført i 1978, 1984 og 2015. Skråningsbeskyttelse ved Højen Fyrvej 49 forlænget i 2004. Udklip fra Tegn. 101, 2014.12.10 udført af A1. Røde markeringer viser nedslagspunkter for besigtigelsen d. 3. marts 2023.

De følgende figurer viser billeder ved de fire nedslagspunkter samt dronfotos leveret af grundejerforeningen.

Ved område A (Figur 2.6) ses en meget bred sandstrand der bærer præg af nylig tilsanding. De anlagte høfder umiddelbart nord for Fellen var ikke synlige. Figur 2.7 viser et dronfoto fra april 2023 der ligeledes afspejler den store mængde tilgængelig sand på denne strækning.



Figur 2.6: Billeder fra området ved A. Tv. ses mod nord og til højre ses mod syd ved Fellen.



Figur 2.7: Dronefotos af høfderne fra 1/50 og mod sydvest dvs. lidt nord for solnedgangspladsen og mod Fellen. Dronefoto leveret af digelag 2. april 2023.

Ved område B er der i høj grad stadig sand i strandprofilet og en mindre mængde ral højt på stranden. Der er lidt lunger i høfdernes skafter, men de er ikke stærkt sammenfaldne (se Figur 2.8).



Figur 2.8: Billeder fra området ved B. Der er her en lidt større grad af ral højt i strandprofilet, men stadig udpræget sandstrand. For område C ses i højere grad lunger i høfde skafterne, nedfaldne sten og i højere grad ral på stranden i stedet for sand. Klitfoden ser ud til at være påvirket af bølger men ikke med nylige skred. Der var ved høfdehoveder tegn på fordybelse ved hovederne i form af større bølger tæt på stranden.



Figur 2.9: Billeder fra området ved C. Der ses spredning af både filter og dæksten samt lunke i skaftet.



Figur 2.10: Højde 7/78 på strækning C d. 3. marts 2023.

Kystlaget har suppleret med billeder fra strækningen mellem høfderne 7-8/78 umiddelbart efter det længerevarende stormvejr i midten af august 2023, hvor der var et højvande svarende til ca. 0,6 m DVR90. I Figur 2.11 er vist skrænt ved Mågehuset for enden af Redningsvej, hvor der ses nylig erosion i bunden af klitten med nedstyrtning som resultat. Derudover var der tydelig erosion umiddelbart syd for Højen Fyrvej. På resten af strækningen har det store rallag formentlig beskyttet klit og strand højt på strandprofilet.



Figur 2.11: Fra strækningen ved høfderne 7-8/78, hvor der er sket yderligere erosion af klitfoden ifm. stormvejr i august 2023 (Fra kystlaget 2023).

Op mod Højen Fyrvej er de sidste høfder trukket tilbage grundet den tidligere bagsideerosion nordøst for høfde 1/84. Der er således et forstejlet kystprofil på denne del af strækningen som kan foranledige større bølger tæt på kystlinien og gør det svært at bibeholde sediment foran skråningsbeskyttelsen af Højen Fyrvej 49. Der er på denne del af strækningen meget ral.



Figur 2.12: Billeder fra området ved D, syd for Højen Fyrvej 49. Der ses stor mængde ral højt i strandprofilen og spredte sten ved hølfer.

Kystlaget har suppleret med billeder fra strækningen ved Højen Fyrvej umiddelbart efter det længerevarende stormvejr i midten af august 2023, hvor der var et højvande svarende til ca. 0,6 m DVR90. I Figur 2.13 er vist skrænt ved Højen Fyrvej, hvor der ses nylig erosion i bunden af klitten med nedstyrtning som resultat. På denne del af strækningen har det store rallag ikke kunnet beskytte klit og strand højt i tilstrækkelig grad.



Figur 2.13: Skrænten på sydsiden af Højen Fyrvej hvor der er sket erosion ifm. stormvejr i midten af august 2023 (Fra kystlaget 2023).

Figur 2.14 viser et dronefoto nord for Højen Fyrvej 49, der viser den aktive bagsideerosion. Der er her en del sand ud for kystbeskyttelsen, formentlig pga. vindretningen i perioden inden billedet blev taget.



Figur 2.14: Erosion på nordøst siden af Højen Fyrvej. Dronefotos leveret August 2023.

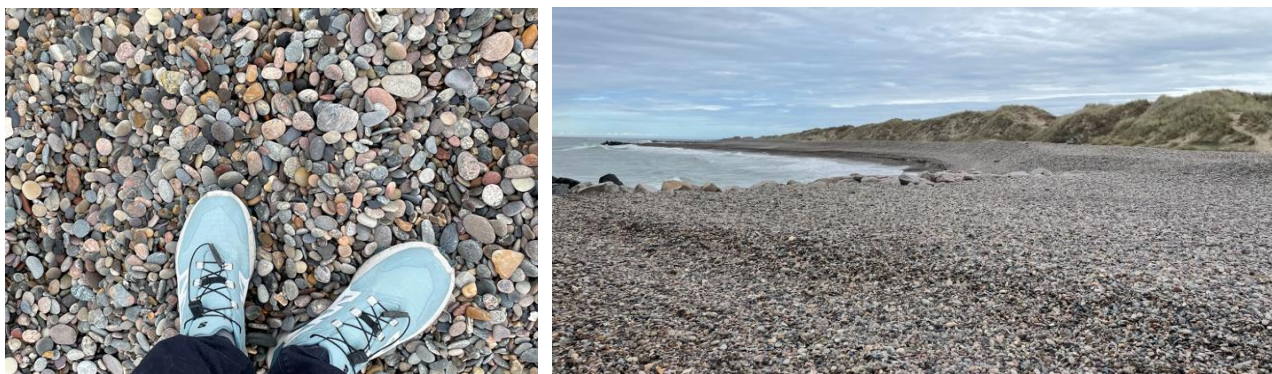
Baseret på dette grundlag kan følgende vurderes og konkluderes:

- Visuelt fremstår konstruktionerne flere steder spinkle.
 - Sten ligger ved flere af konstruktionerne meget spredt.
 - Det gælder både filtermateriale og dæksten.
 - Der er som konsekvens heraf flere steder større lunger i specielt skaftet på høfden.
 - Kronebredden synes meget smal for skaftet.

- Høfdehovederne ser flere steder visuelt intakte ud.
- Der er langs kysten fra høfde 1/15 i syd og helt op til Højen Fyrvej 49 større mængder ral umiddelbart højt beliggende i strandprofilet. Hvor ral ligger ud til vandlinjen ses et stejlere kystprofil.
- Der ses en generel transportretning mod nordøst, baseret på kystorienteringen.
- Der er ved nogle høfder styrtbrydende bølger hvilket kan tyde på et stejlt bundprofil, måske drevet af det tilførte ral.
- Der er ved Fellen væsentlig mere sand end tidligere år og de sydvestligste høfder (2-5/15) er knap synlige pga. den store sandmængde. Det vurderes, at der er ekstraordinært meget sand til stede som med tid vandrer videre mod nord og høfderne bliver synlige igen. Jo længere mod Højen Fyrvej man kommer på stranden, ses sandet langsomt dækket mere af ral så der ved Højen Fyrvej ses begrænset mængde sand (det afhænger af vejsituationen hvordan sand og ral flyttes op på stranden).
- Ved Højen Fyrvej ses der tydelig erosion af klinten mod nordøst og mangel på sand sydvest for den hårde skråningsbeskyttelse og høfde.
- Overordnet vurderes konstruktionerne stadig at have en beskyttende høfde effekt på kyststrækningen.

2.3. Sediment

Der er ikke foretaget yderligere analyser af sediment på stranden og i kystprofilet under vand. Der ligger store mængder ral specielt i den øvre del af stranden og sand i den nedre og vandlinje (se Figur 2.15). Der er tidligere udført en kystanalyse af stranden ved Gl. Skagen (se Ref. /10/). Heri er gennemgået kystens udvikling fra Fellen til Højen Fyrvej. Ved Fellen med den brede sandstrand sydvest og nordøst for Fellen, som primært er skabt ved strandfodring og fastholdelse af sand ved beplantning/læhegn er de fleste af de nye høfder nu næsten dækket af sand.



Figur 2.15: Størrelse af ral-materialet på stranden samt et billede på udbredelsen af det.

Stranden bliver gradvist mere dækket af ral mod nordøst op mod Gammel Skagen og videre til Højen Fyrvej. Stranden er også smallere på den strækning, hvor der ligger ejendomme helt ud til stranden i forhold til sydvest for. Der er anlagt skråningsbeskyttelser langs kysten i Gammel Skagen i 2021 for at beskytte ejendommene, der ligger helt ud til stranden.

Langtransporten stiger imod nordøst langs kysten i Gammel Skagen. Det betyder, at sandet eroderer hurtigere væk end rallen, som derfor opkoncentreres på stranden mellem høfderne. Samtidigt holder de nye høfder på sandet langs stranden sydvest for Gammel Skagen, hvilket betyder, at der har været et mindre input af sand til strækningen de senere år og deraf generelt tilbagerykning af kystprofilet.

Den brede ralstrand giver en betydelig bedre beskyttelse af skråningerne end en sandstrand med tilsvarende bredde og højde. Ralstranden er forholdsvis høj og stejl, da bølgerne har en tendens til at transportere rallen landværts i forbindelse med storm og højvande.

Den kroniske erosion har medført, at vanddybden sandsynligvis er blevet større ud for høfderne gennem tiden, hvorved strandprofilet er blevet stejlere. Dette kan være medvirkende til, at det kun er rallen, der står stejlt, som findes på stranden, medens sandet, der ligger mere fladt, ligger på bunden ud for høfderne og på revlerne.

Stranden er også dækket af ral nordøst for Gammel Skagen. Ralstranden er høj ved Hamiltonvej, så der ikke er tegn på erosion af klitterne, hvilket viser, hvor godt ralstranden beskytter mod akut og kronisk erosion.

Ralstranden er smallere umiddelbart sydvest for Højen Fyr end ved Hamiltonvej. Der er tegn på erosion af klitterne umiddelbart sydvest for Højen Fyr. De nye høfder sydvest for Højen Fyr, har medvirket til at opbygge den robuste ralstrand på denne strækning.

Skråningsbeskyttelsen og høfden ved Højen Fyr medvirker til at reducere den kroniske erosion af stranden og klitterne sydvest for.

Langtransporten stiger langs kysten mod nordøst, hvilket betyder, at der er et stort erosionspres på den ubeskyttede strækning nordøst for Højen Fyr, som udgør den sidste høfde i høfdefeltet ved Gammel Skagen. Der er således omfattende læsideerosion nordøst for Højen Fyr, som med tiden kan medføre bagskæring af ejendommen og at motocrossbanen forsvinder. Skråningsbeskyttelsen ved Højen Fyr er forlænget i flere omgange mod nordøst for at forhindre bagskæring.

Den nuværende mængde sand ved Fellen vurderes til at vandre mod nordøst og vil over tid delvist lægge sig mellem høfder og generelt i strandprofilet langs strækningen. Tilsvarende vil ral ligeledes men i langsommere tempo bevæge sig mod nordøst.

3. Analyser

I dette afsnit vurderes de anlagte konstruktioners anlægs kystbeskyttende virkning. I første omgang præsenteres de benyttede design forhold for det oprindelige projekt udført af rådgivningsfirmaet A1 og det sammenlignes med grundlag etableret i forbindelse med denne rapport. Efterfølgende beskrives de nødvendige design.

3.1. Design vandstand

3.1.1. Baseret på projekteringsrapport udført af A1

A1 har benyttet sig af højvandsstatistikkerne for Skagen Havn og Hirtshals Havn udført af Kystdirektoratet i 2013. Ved en returperiode på 50 år, svarede en højvandshændelse i Skagen Havn til $+1,38\text{m} \pm 0,07\text{m}$ DVR90. For Hirtshals Havn svarede det til en hændelse på $+1,43\text{m} \pm 0,07\text{m}$ DVR90.

A1 har benyttet en dimensionsgivende 50-års vandstand på $+1,50\text{m}$ DVR90.

Kystbeskyttelsen skulle projekteres for en 50 års levetid, hvor kombinationen af den forventede havspejlsstigning og landhævning ledte til en vandstandsstigning på 0,3m. Her svarer den post-glaciale landhævning til omkring 0,1m, og den forventede middelvandspejlstigning svarede til $0,4\text{m} \pm 0,25\text{m}$.

$$\text{Vandsstandsstigning (SLR)} + (-\text{landhævning}) = \text{Total vandstandsstigning}$$

Dvs. en ekstrem vandstand på i alt 1,8 mDVR90 i 50 årig horisont.

3.1.2. NIRAS grundlag for vandstand

Grundlaget for den ekstreme vandstand er det samme som antaget i afsnit 3.1.1. I afsnittet om bølgeforhold ses der på sammenhæng af vandstand og bølger.

Der er kommet en ny højvandsstatistik i 2017 (Ref. /11/), som viser tilsvarende ekstreme vandstande, der derfor ikke ændres.

3.2. Design bølgeforhold

3.2.1. Baseret på projekteringsrapport udført af A1

A1 angiver ikke specifikke design forhold mht. bølgehøjde og bølgeperiode samt grundlaget her for, og det er således ikke muligt at anføre de præcise antagelser benyttet i deres projekt. A1 skriver dog at 'bølgerne ikke kan blive højere end ca. 0,5-0,6 gange vanddybden'. Det ser ud til at beregninger baseres på signifikant bølgehøjde på $H_s = 0,55 \cdot d_{50\text{år}}$ og maksimal bølgehøjde $H_{\text{max}} = 0,78 \cdot d_{50\text{år}}$ ($d_{50\text{år}}$ svarer til vanddybde for 50 års hændelse om 50 år). Bølgeperiode er ikke angivet.

Projektet ser ud til at være baseret på en middelvanddybde svarende til 1 m. Dvs. at der ikke tages højde for den generelle kysttilbagerykning, der potentielt vil øge vanddybden og dermed øge bølgehøjden.

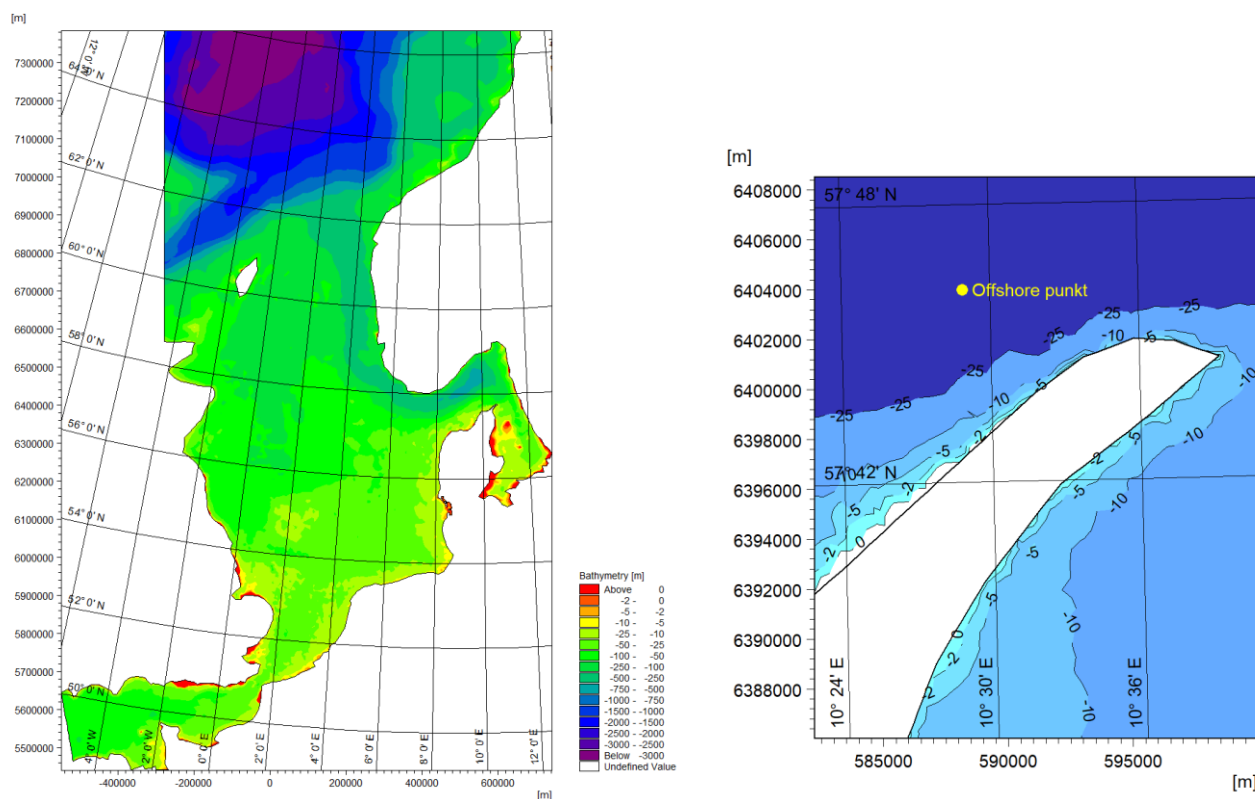
Der er i materialet ikke angivet en bølgeindfaldsvinkel.

3.2.2. Baseret på NIRAS grundlag

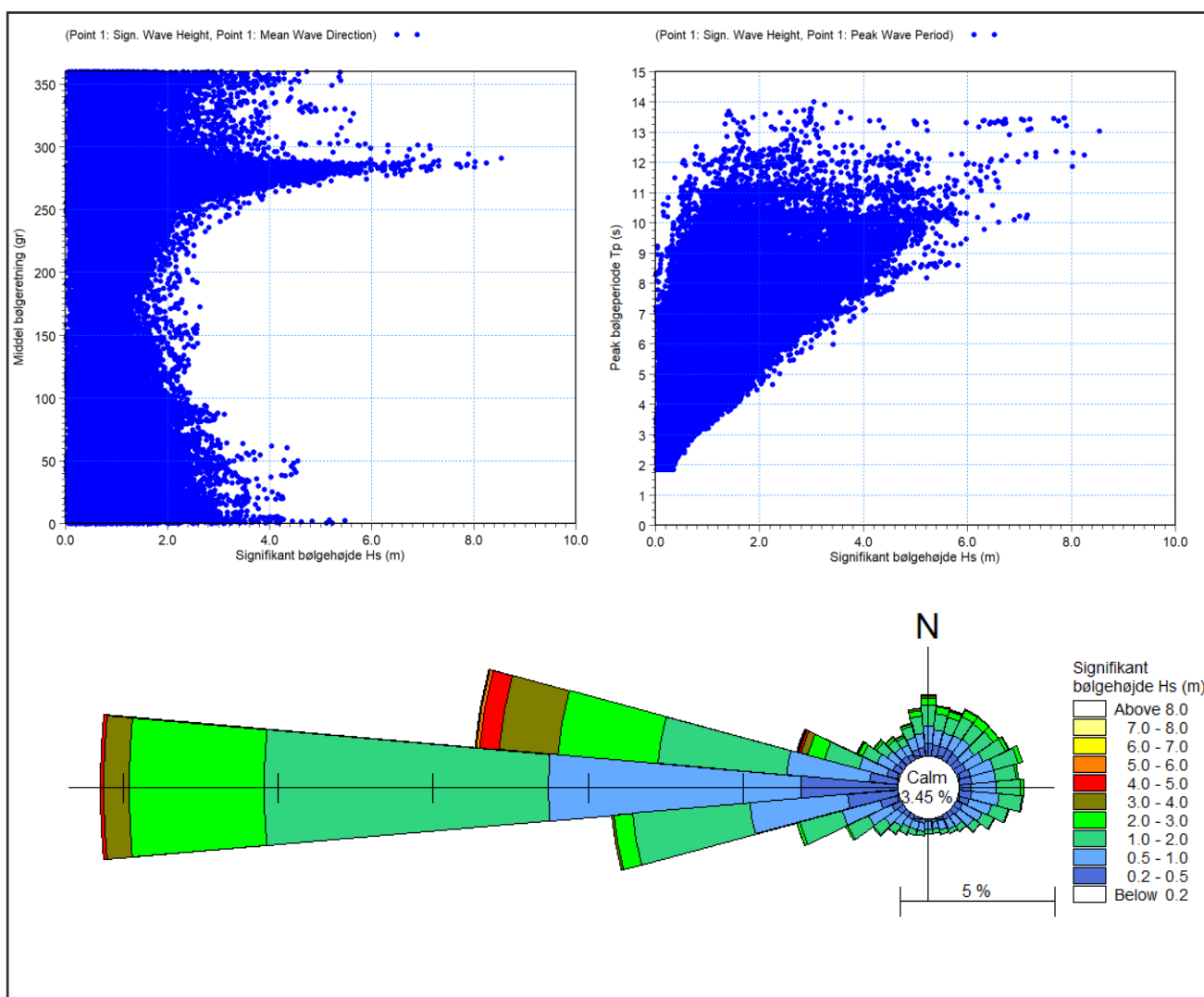
Bølgedata er udtrukket fra NIRAS regionale numeriske bølgemodel (Spectral Wave model fra DHI) dækkende Nordsøen ind til det nordlige Kattegat. Modellen er baseret på tilgængelige vinddata har været brugt på flere andre projekter langs Vestkysten hvor den også er kalibreret.

Modellen medtager bølgegeneration på grund af vind, ikke lineær bølge til bølge interaktion, dissipation pga. brydning og bundfriktion.

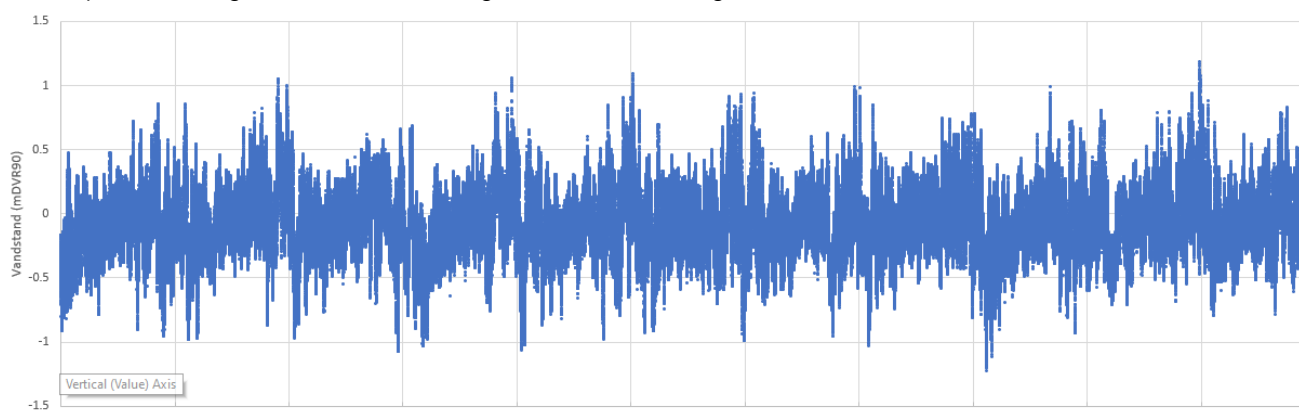
Der er udtrukket data i et punkt på dybt vand, hvor bunden endnu ikke har indflydelse på bølgehøjden. Modelområdet og udtrækspunkt er vist i Figur 3.1 og i Figur 3.2 er vist bølgeparametrene signifikant bølgehøjde, peak bølgeperiode og middel bølgeretningen for tidsserien som dækker 2010-2020. Tilsvarende er vandstand baseret på DMIs måler i Hirtshals vist i Figur 3.3. Baseret her på er der lavet en samhørighedsanalyse af vandstand og bølger på dybt vand. Resultat af analysen er 50-års hændelser for samhørende vandstand og bølgeparametre H_s og T_p , der efterfølgende anvendes til at beregne en 50-års bølge på det lavere vand ved høfderne.



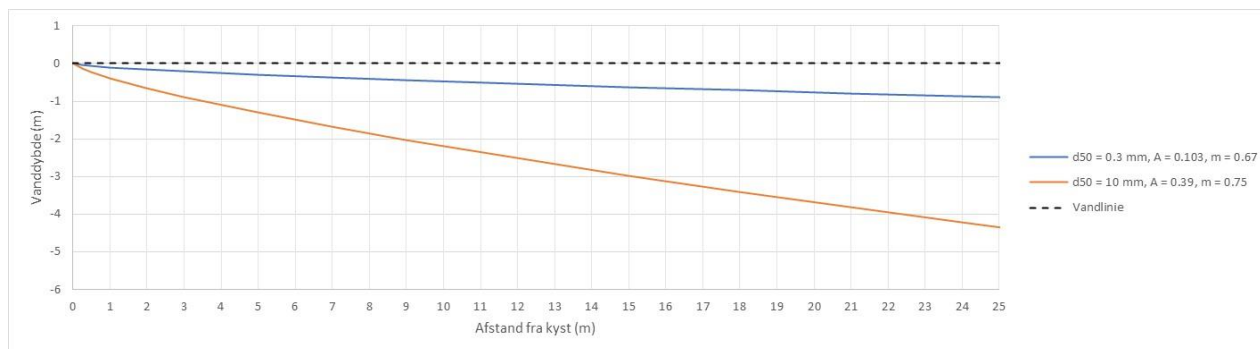
Figur 3.1: Til venstre ses modelområdet for NIRAS regionale bølgemodel baseret på MIKE21 Spectral Waves. Til højre ses udtrækspunktet på dybt vand i punktet med koordinaterne (588144.412, 6403998.6).



Figur 3.2: Bølgeparametre i offshore punktet for signifikant bølgehøjde H_s i forhold til middel bølgeretningen og peak bølgeperioden T_p . Nederst bølgerose der viser hvor bølgerne kommer fra i 10 graders intervaller centreret om nord.



Figur 3.3: Vandstand ved Hirtshals fra 2010 til 2020 baseret på data fra DMI.dk.



Figur 3.6: Deans ligevægtsprofil baseret på to værdier af d_{50} .

Det oprindelige A1 projekt er regnet for en vanddybde svarende til de eksisterende forhold. Dvs. at der er antaget en vanddybde på 1 m ved middelvandspejl ved hofdehovedet. På en kyststrækning med generel tilbageerykning vil der i levetiden ske erosion og dermed bliver der dybere langs hofderne medmindre der tilføres sand svarende til kysttilbageerykningen. Det er relevant at inkludere denne kysttilbageerykning og mulige erosion i profilet ift. de bølger som potentielt kan nå ind til konstruktionen, som øges med vanddybden. Erosionsforhold for kronisk og akut erosion er vist i Figur 3.6 baseret på Kystdirektoratets kystatlas. Som det ses afspejles kystens inddeling af den tidligere gennemgang af kysten.

Der er vurderet en generel kysttilbageerykning på 1-2 m pr. år for strækningen ved Solnedgangspladsen, som beskrevet i tilladelsen fra Kystdirektoratet (Ref. /2/). En kysttilbageerykning på 2 m vil medføre en dybdeforøgelse, der er afhængig af materialet på strækningen. Består stranden af sand vil der være lille dybdeforøgelse og ved ral og sten vil det betyde en større dybdeforøgelse, hvis materialet forsvinder. Det antages, at bundkonturen følger Deans profil givet af vanddybden $d = A \cdot x^m$ hvor A varierer med kornstørrelsen d_{50} og x er afstand fra kysten. For A svarende til $d_{50} = 0.3$ mm er $A = 0.103$ og for $d_{50} = 10$ mm er $A = 0.39$ (se Ref. /12/). Vi har ikke konkrete målinger af kornstørrelse for sand og ral. For de angivne værdier fås ligevægtsprofiler der ser ud som vist i Figur 3.6.

Hofdehoveder er placeret i en afstand fra kysten på op til ca. 20-30 m. Hvis bundmaterialet udelukkende bestod af sand ville en kysttilbageerykning på ca. 2 m svare til en sænkning af havbunden på ca. 7 cm mens det for et grovere materiale ville betyde ca. 30 cm (i en afstand af ca. 25 m fra kysten). Dertil kommer at der med det grovere materiale potentielt kan være en stejlere bundprofil. Af dronefotos fremgår bunden lys hvilket kunne indikere sand. Men det må antages at ral er med til at forstjæle profilet ift. rent sand.

Ral er ligeledes med til at armere havbunden i tillæg til at det langsomt transporteres mod nordøst, så der forventes ikke et fuldt udviklet ligevægtsprofil for ral. Baseret på den store variation i ral ud i kystprofilet antages det, at ral materialet i højere grad vil armere havbunden end skabe et fuldt udviklet stejlt profil.

Tages det i regning, at der er en generel kysttilbageerykning på ca. 2 m om året fås der i de 50 års levetid en potentiel forøgelse af vanddybden på ca. $d_{\text{design } 50 \text{ år}} \sim 50 \text{ år} \cdot 0.03 \text{ m/år} = 1,5 \text{ m}$ i levetiden.

Med en design vanddybde i slutningen af konstruktionens levetid svarende til 2,5 m og ekstrem vandstand 1,8 m kan design bølgehøjden regnes til op til $H_s = 3,45$ m og $T_p = 10$ s. Her antages bølgehøjden gældende fra offshore siden af de revler som er opmålt i Kystdirektoratets profil, men som er meget dynamiske. Det er således en konservativ vurdering af bølgehøjden.



Figur 3.7: Den kroniske erosion øverst og akut erosion nederst omkring Skagen Odde baseret på Kystdirektoratets Kystatlas (oktober 2023).

3.3. Projekt beregninger

Årsagen til den beskrevne tilstand af hølfer vurderes på basis af tre scenarier for design parametre:

- Scenarie 0: A1s design forhold, hvor der mangler oplysninger. Det svarer til de stenstørrelser der er anvendt i detailprojektet.
- Scenarie 1: NIRAS design forhold med antagelse om vanddybde som A1. Design bølgeforhold gennem udtræk af dybvandsbølge med simpel LITPACK transformation til kysten som 'best practice' svarende til design tidspunktet.
- Scenarie 2: NIRAS design forhold med antagelse om ændret vanddybde, som følge af kronisk erosion inden for levetiden.

De tre scenariers design betingelser er angivet i Tabel 3.1 baseret på analyserne i afsnit 2 og 3.

Tabel 3.1: Design forhold for de tre scenarier.

Scenarie	Vanddybde år 0	Vanddybde tillæg år 50	Ekstrem vandstand	Klimabetinget havspejl - landhævning	Total vanddybde ved hoved *)	Hs,50	Tp,50	Indfaldsvinkel
(-)	(m)	(m)	(m DVR90)	(m)	(m)	(m)	(s)	(Gr. N)
Sc. 0	1	0	1,5	0,3	2,8	2,18		90
Sc. 1	1	0	1,5	0,3	2,8	2,29	Ca. 10	50-90
Sc. 2	1	1,5	1,5	0,34**)	4,34	3,45	Ca. 10	50-90

Note: *) Ekskl. bølgesetup som svarer til ca. 0,15 m, **) Antaget højt udledningsscenario og eustatisk hævnning på 0,1m.

3.3.1. Stenstørrelse

Der er i projektet De nye hølfer er designet til at have en levetid på 50 år, hvor A1 har designet hølferne med hensyn til den forventede havspejlsstigning og højvandshændelser. Derfor er de benyttede dæksten i hølferdehoved og hølferdeskaft større end stenene der findes i de eksisterende hølfer.

A1 beregnede følgende mængder og stenstørrelser:

- Optagning og genudlægning af søsten fra 1950 hølfer: 500 m³
- Optagning og genudlægning af brudsten fra 1978 hølfer: 1200 m³
- Nye brudsten 300-1000 kg til hølferdeskaft: 2250 m³
- Nye brudsten 300-1000 kg til hølferdehoveder: 1900 m³
- Nye filtersten 5-40 kg: 3850 m³

A1 udførte for Frederikshavn Kommune detailprojektering af kystbeskyttelse ud for Gl. Skagen. Projektet inkluderede renovering af eksisterende hølfer fra hhv. 1950 (6 hølfer) og 1978 (12 hølfer), samt anlæg af to nye hølfer mod øst op mod Højen Fyr, samt 5 hølfer mod vest mod ejendommen "Fellen" på Rævehulevej 34. Figur 3.8 og Figur 3.9 viser udsnit af tegning 101 fra detailprojektet for hhv. sydlige og nordlige strækning.



Figur 3.8: Udsnit 2 fra Tegning 101, A1. Viser de nyere høfder 1/15-6/15 og høfderne fra 1950 1/50-6/50.



Figur 3.9: Udsnit 2 fra Tegning 101, A1 Consult. Viser høfderne fra 3/78-12/78, høfder fra 1984 1/84-2/84 og de nyere høfder 6/15-7/15.

A1 udregnede stenstørrelser til reovering af høfderne og anlæggelse af nye høfder (jf. Figur 3.10 og Figur 3.11).

	Eksisterende søsten**	Eksisterende brudsten	Nye Brudsten HMA300/1000	Nye Brudsten HMA1000/3000
Anvendelse	Landende	Skaft	Skaft	Hoved
Densitet	2650 kg/m ³	2650 kg/m ³	2650 kg/m ³	2650 kg/m ³
W _{emil} *	480 kg	480 kg	540 kg	1700 kg
W _{emul} *	600 kg	600 kg	690 kg	2100 kg
ELL = 0.7 NLL (< 5%)	245 kg	245 kg	200 kg	700 kg
NLL (< 10%)	350 kg	350 kg	300 kg	1000 kg
NUL (> 70%)	850 kg	850 kg	1000 kg	3000 kg
EUL = 1.5 NUL (<97%)	1275 kg	1275 kg	1500 kg	4500 kg

Note: * For ikke-standard gradering er $W_{emil} = 0.8 \times (NLL + NUL) / 2$ og $W_{emul} = (NLL + NUL) / 2$
 ** For eksisterende søsten findes ingen specifikation af gradering. St relsen vurderes som eksisterende brudsten.

Figur 3.10: A1 beregnede nødvendige stenst relser ved anvendelse af granit.

	Nye Brudsten HMA300/1000	Nye Brudsten HMA1000/3000
Anvendelse	Skaft	Hoved
Densitet	3100 kg/m ³	3100 kg/m ³
W _{emil} *	400 kg	1000 kg
W _{emul} *	500 Kg	1250 kg
ELL = 0.7 NLL (< 5%)	140 kg	350 kg
NLL (< 10%)	200 kg	500 kg
NUL (> 70%)	800 kg	2000 kg
EUL = 1.5 NUL (<97%)	1200 kg	3000 kg

Note: For ikke-standard gradering er $W_{emil} = 0.8 \times (NLL + NUL) / 2$ og $W_{emul} = (NLL + NUL) / 2$

Figur 3.11: A1 beregnede stenst relser ved anvendelse af norit.

NIRAS har genberegnet nødvendige stenst relser efter gængse metoder til design af stenkonstruktioner. Baseret herpå er følgende observeret.

For h fdehoved er der overensstemmelse imellem de anvendte stenst relser baseret på scenarie 0 og scenarie 1 antagelser. For h fdeskaftet, stemmer stenst relserne ikke overens mellem scenarie 0 og scenarie 1 idet de anvendte sten er for små baseret på A1-forudsætninger i det oprindelige layout. H fdehovedets stenst relser burde være ført med ca. 3 m af skaftet. Der forventes minimale bølger ved landende, hvorfor de eksisterende søsten angivet ved landende fra A1 stemmer overens med NIRAS anbefaling.

På begge sider af høfderne er der sand eller der opfyldes med sand. Såfremt der på én side var vand, anbefales det at placeres geotekstilen på bagsiden af høfdehovedet, således sand ikke udløber gennem den grove dæksten. Idet sand forekommer på begge sider, forventes dette ikke at være et problem.

Der er placeret geotekstil langs havbunden, men ikke mellem filterlaget og dækstenene. Hvorfor der tjekkes for om der er benyttet den rigtige filterstensstørrelse til de dæksten.

Der blev ved 1-årsgennemgangen observeret en større vanddybde end design vanddybden. Ved denne lejlighed blev nedfaldet stenmateriale genplaceret men stenstørrelser blev ikke revurderet. Desuden fremgår det ikke at der er regnet på den fremtidige situation i slutningen af levetiden hvor kystprofilen er blevet dybere, grundet den generelle kysttilbagetrækning.

3.4. Tidligere rådgivers design ift. det udførte

Det har ikke været muligt at lave specifik kontrol af at den udlagte stenstørrelse (dimension og gradering) og stenvægt stemmer overens med de planlagte stenstørrelser samt lagtykkelser og udlagte kronkoter.

3.5. Design af eksisterende hofder

Baseret på ovenstående er der udført en beregning for at se om grundlaget stemmer hvis basis baseres på A1's design værdier (estimeret baseret på det fremsendte materiale).

3.5.1. Dimensionering af dæksten

Dimensionsgivende dæksten beregnes med van der Meers formeludtryk beskrevet i (CIRIA, CUR, CETMEF, 2007 (reprinted 2012)). I disse beregninger medtages effekten af konstruktionens hældning, bølgehøjde og -periode, stormvarigheden, konstruktionens permeabilitet samt accepteret skadesniveau. Generelle parametre der anvendes ses i Tabel 3.2.

Tabel 3.2: Parametre anvendt til beregning af dimensionsgivende dæksten.

Parameter	Symbol	Værdi	Note
Stormvarighed	-	6 timer	
Skadesniveau	S_d	2	Svarende til begyndende skade.
Permeabilitet	ρ	0,6	Permeabel
Anlæg (hældning)	α	2	
Relativ densitet	Δ	1,6	Forholdet mellem densiteten af sten (2650 kg/m^3) og vand (1035 kg/m^3) minus 1.

Den dimensionsgivende stenstørrelse varierer med ændringer af bølgeperioden. Den største dimensionsgivende stenstørrelse opnås ved en given bølgeperiode. Ændres bølgeperioden fra denne værdi vil stenstørrelsen tillige ændres. Af denne grund, beregnes den dimensionsgivende stenstørrelse ud fra den peak bølgeperiode der giver den største stenstørrelse.

3.5.2. Filtersten og tå

Filtermaterialet skal opfylde følgende filterkriterier (Jensen, 1984):

$$\frac{d_{15d}}{d_{15f}} > 20$$

$$\frac{d_{50d}}{d_{50f}} > 7$$

$$\frac{d_{15d}}{d_{85f}} > 4$$

Her står indeks "d" og "f" for henholdsvis dæksten og filtersten. Filterkriteriet for den eksisterende konstruktion er opfyldt.

3.6. Renovering af høfder og sandfodring

Fastlæggelse af design grundlag for renovering af eksisterende høfder baseret på 2023 viden. Bestemmelse af stenstørrelser og krone udføres på tilsvarende måde som angivet ovenfor. Med større vanddybde i fremtidsscenariet 2, fås større bølger ved konstruktionerne. Med de større bølger følger større sten der svarer til en standard gradering for norit sten på 3000-6000 kg. Det er en relativt stor stengradering ift. en minimums middelvægt på ca. 3600 kg så der i detailprojektering bør kigges på en ikke standard gradering, der er tilgængelig for økonomisk optimering af projektet.

Renovering kan udføres ved at lægge de større sten uden på den eksisterende konstruktion, efter optagning af de nedfaldne sten umiddelbart ved konstruktionen.

Derudover skal foden af konstruktionen reableres og stenene her skal baseres på velegnet gradering til det endeligt valgte gradering på dæksten. For enkelte af konstruktionerne ses der meget lidt nedbrydning og for disse kan man evt. vente med renovering.

Der bør som tidligere nævnt suppleres med fodring ved høfderne 6/15 og 7/15 og derudover bør høfde hovederne trækkes ud for at beskytte og reablere mere del af strækningen ved Højen Fyrvej.

4. Konklusion

Der er udført en tilstandsvurdering af kyststrækningen Fellen til Højen Fyrvejs hølfer. Det fremgik ved besigtigelsen at der for flere hølfer var større områder på især hølferdeskaftet hvor sten var faldet ned. Generelt så hølferdehoveder stabile ud. Overordnet blev det vurderet at hølferne trods nedfaldne dæksten stadig vedligeholder sin kysttekniske funktion, om end de ikke fremstår som ved anlæg.

Baseret de gennemgaaede vurderinger og analyser fremgaa det, at der i design af hølfer i 2018 ikke er taget hølferde for den kysttilbagerykning der generelt foregaa i kystprofilet. Det har betydning for design af bølgebryderne, da det medfører større design bølger ved hølferden. Større bølger medfører potentiale for større skade på hølferne.

For lave konstruktioner som de anlagte hølfer ønsker man typisk at skadesniveau er lavt, da de udsættes for mange bølger i levetiden og dermed alternativt hurtigt gøres sårbare. Det er derfor ofte anvendt at designe til den konservative side. I det oprindelige design af A1 er der ikke medregnet robusthed.

Vi har i denne opgave ikke haft mulighed for at tjekke entreprenorens reelt udlagte materiale (som f.eks. vægt af sten samt type og anlagt gradering) og kan således ikke udtale os om dette følger anvisningen fra design notatet. Men da sten flere steder er flyttet, kan det ligeledes være en årsag.

Generelt forventes den store mængde sand ved Fellen at bevæge sig mod nordøst, så hølferne på denne del af strækningen igen bliver synlige og skal håndteres som de resterende anlæg på hele kyststrækningen.

Der bør ved hølferne 6-7/15 suppleres med sand og hølferdehovederne trækkes længere ud, så stranden fastholdes og det dybe profil trækkes ud fra kysten.

En genberegning for stenstørrelser af det oprindelige design viser, at der i hølferdernes skaft er for små sten i forhold til almindeligt robuste designforudsætninger. Ved 1-årgennemgangen hvor der blev fundet en dybdeforøgelse blev stenstørrelser ikke genberegnet og er derfor for små i forhold til design forudsætninger på den ændrede vanddybde og på forhold der svarer til slutningen af levetiden. Der er angivet en metode til opretning af hølferne fremtidssikret til hele levetiden med den dynamiske kystudvikling, der forventes på strækningen.

5. Referencer

- Ref. /1/: Miljø og fødevareklagenævnets afgørelse, sag NMK-451-00008, 7. juni 2017.
- Ref. /2/: Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektoratet: Tilladelse til kystbeskyttelse ved Skagen SV for Gl. Skagen til Højen Fyr, 9990 Skagen, Frederikshavn Kommune (fra Matr. Nr. 301Ø Skagen Markjorder til matr. Nr. 14u Skagen Markjorder).
- Ref. /3/: A1: Design basis (for høfder og strand).
- Ref. /4/: A1: Projektforslag (for høfder og strand).
- Ref. /5/: A1: Vurdering af effekt af større vanddybde.
- Ref. /6/: Frederikshavn Kommune: Historiske opmålinger af profiler ved højder og i mellemrum.
- Ref. /7/: Kystbeskyttelseslaget Gl. Skagen: Dronefotos/video.
- Ref. /8/: Tidslinie for kyststrækningens udvikling.
- Ref. /9/: GIS data for pumpestationer og udløbsledninger i nordlige ende af strækningen.
- Ref. /10/: NIRAS: Kysten mellem Hirtshals Havn og Gammel Skagen. Kystteknisk beskrivelse og sediment-budget. 27. juli 2022.
- Ref. /11/: Kystdirektoratet: Højvandsstatistik 2017. Udgivet i 2019.
- Ref. /12/: Karsten Mangor: Shoreline management guidelines. 2004.

Bilag 1

Notat fra 1-års gennemgang i maj 2020

samt

Kystsikring Gl. Skagen, Opretninger af høfder, arbejdsbeskrivelse

From: sek@kystbeskyttelseslaget-glaskagen.dk <sek@kystbeskyttelseslaget-glaskagen.dk>

Sent: 23. marts 2023 09:16

To: NIRAS

Subject: Notat fra 1- års gennemgang

Vi havde 1-års gennemgang i maj 2020.

Zøllner havde forinden været en tur omkring alle 25 høfder for at lægge sten på, plads, og derudover var tre af høfdehovederne "udvidet", så de ikke var helt så stejle op fra bunden.

Alt sammen så derefter pænt ud nu, og vi var optimistiske omkring, at nu havde stenene sat sig - men der skete en hurtig forværring igen allerede i løbet af de følgende 12 mdr.

Zøllner var repræsenteret ved både entreprisechefen og ham, der havde lagt stenene på plads på den store maskine. Han gav udtryk for at have været frustreret over, at bundstenene var så små, for med hans mangeårige erfaring i baghovedet var det næsten forventeligt, at de ville blive flyttet af bølgerne.....

Fra: A1 Consult A/S

Sendt: 4. maj 2020 10:25

Til: Zøllner

Emne: Kystsikring Gl. Skagen, Opretninger af høfder, arbejdsbeskrivelse

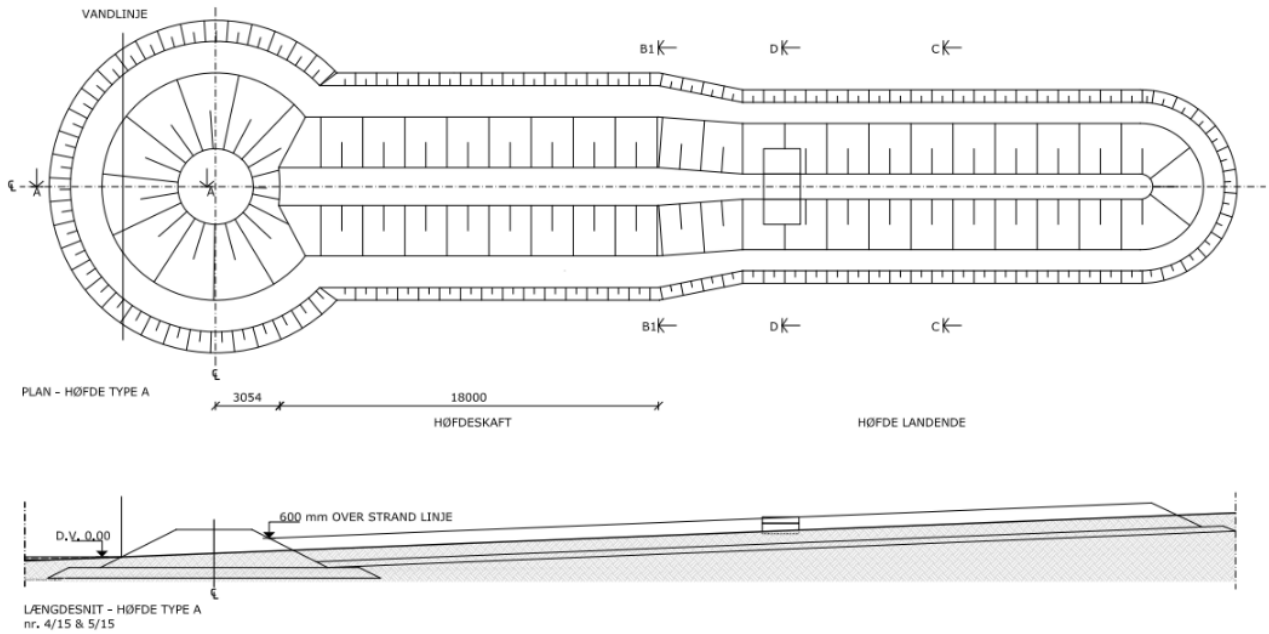
Hermed arbejdsbeskrivelse for opretningen af høfderne:

Høfde	Arbejder
5/15	Ingen arbejder
4/15	Ingen arbejder
3/15	Ingen arbejder
2/15	Ingen arbejder
1/15	Enkelte løstliggende sten i overgang mellem skaft og hoved lægges på plads
6/60	Enkelte løstliggende sten i høfdehovedet og skaftet lægges på plads.
5/50	Enkelte løstliggende sten i høfdehovedet og skaftet lægges på plads.
4/50	Enkelte løstliggende sten på hver side af skaftet lægges på plads.
3/50	Enkelte løstliggende sten i høfdehovedet og skaftet lægges på plads.
2/50	Enkelte løstliggende sten i skaftet lægges på plads. Spidsen af hovedet samles og den efterfyldes med dæksten for at ændre hældningen så det ligger med hældning 1:2,5.
1/50	Enkelte løstliggende sten i skaftet lægges på plads. Efterfyldning med dæksten ved overgang mellem hoved og skaft nordlige side.
Mellem høfder	Løstliggende sten mellem høfde 12/78 og 1/50 fjernes og bygges ind i høfde 1/50.
12/78	Enkelte løstliggende sten i høfdehovedet og skaftet lægges på plads.
11/78	Enkelte løstliggende sten i skaftet lægges på plads. Spidsen af hovedet samles og den efterfyldes med en lille smule dæksten for at ændre hældningen så det ligger med hældning 1:2,5
10/78	Spidsen af hovedet samles og den efterfyldes med dæksten for at ændre hældningen så det ligger med hældning 1:2,5
9/78	Enkelte løstliggende sten i skaftet lægges på plads. Spidsen af hovedet samles og den efterfyldes med en lille smule dæksten for at ændre hældningen så det ligger med hældning 1:2,5.
8/78	Enkelte løstliggende sten i høfdehovedet og skaftet lægges på plads.
7/78	Enkelte løstliggende sten i høfdehovedet lægges på plads.
6/78	Enkelte løstliggende sten i høfdehovedet lægges på plads.
5/78	Enkelte løstliggende sten i høfdehovedet og skaftet lægges på plads.
4/78	Enkelte løstliggende sten i høfdehovedet og skaftet lægges på plads.
3/78	Enkelte løstliggende sten på hver side af skaftet lægges på plads.
2/84	Enkelte løstliggende sten på hver side af skaftet lægges på plads.
1/84	Enkelte løstliggende sten på hver side af skaftet lægges på plads.
6/15	Enkelte løstliggende sten på nordlige side af høfdehovedet lægges på plads.
7/15	Enkelte løstliggende sten i høfdehovedet lægges på plads.

Bilag 2

Udformning af eksisterende høfder

Høfde type A:

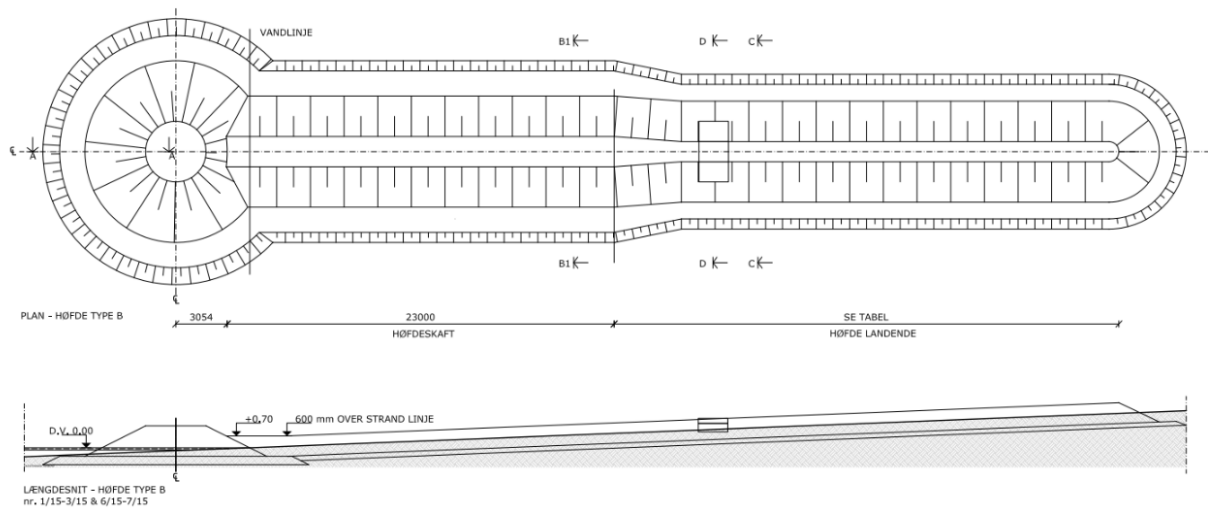


Høfde	Skafte	Landende
4/15	18 m	23,5 m
5/15	18 m	26,5 m

Note
 Ubenaevnte mål er i mm
 Koter er i m angivet i forhold til DVR90

Henviisninger
 Tegn. 120, Tværsnit, Høfde

Høfde Type B:



Høfde	Skafte	Landende
1/15	23 m	30 m
2/15	23 m	30 m
3/15	23 m	30 m
6/15	23 m	22 m
7/15	23 m	33 m

Note
 Ubenaevnte mål er i mm
 Koter er i m angivet i forhold til DVR90

Henviisninger
 Tegn. 120, Tværsnit, Høfde

