

Enø Digelaug - Hjørnet ved Strandvej 31

Beskrivelse af hofde

Enø Digelaug

Dato: 04. oktober 2024

Indhold

1	Indledning	2
2	Modellering	7
2.1	Længde af den aktive zone	10
2.2	Ligevægtsorientering	11
3	Dimensionsgivende parametre	13
4	Dimensionering	14
4.1.1	Dæksten	14
4.1.2	Filtersten	14
4.1.3	Geotekstil	15
4.2	Design af hofde	15
4.2.1	Dæksten og filtersten	16
4.2.2	Funderingsniveau	16
4.2.3	Tvær- og længdesnit	16
5	Påvirkning af nabostrækninger	19
6	Referencer	19

Rev.nr.	Dato	Beskrivelse	Udarbejdet af	Kontrolleret af	Godkendt af
1	04-10-2024	Uddybning af beskrivelse ift. feedback fra myndigheden	SIWE, ANSL	MLV	MLV

1 Indledning

I 2023 blev et kystbeskyttelsesprojekt af Enø etableret med det formål at beskytte bebyggelsen på øen mod oversvømmelse fra havet og den bagvedliggende fjord samt erosion på den nordlige del af den havvendte kyst. Erosionsbeskyttelsen består af en sandfodring, som enkelte steder er suppleret med en skråningsbeskyttelse.

Figur 1.1 viser den havvendte kyststrækning på Enø, som er blevet erosionsbeskyttet sammen med et zoom af skråningsbeskyttelsen ved Strandvej 31 i den sydlige del af strækningen. Her er der u hensigtsmæssigt meget sediment, der er eroderet væk efter anlæggelsen af kystbeskyttelsesprojektet for hele Enø. Ved Strandvej 24-31 består beskyttelsen af skråningsbeskyttelse, højvandsmur og sandfodring. Den større erosion (større end forventet) betyder, at skråningsbeskyttelsen kan risikere at blive undermineret, hvis stranden eroderes yderligere. Derudover kan bølgepåvirkningen ligeledes blive større end skråningsbeskyttelsen er dimensioneret til, hvilket kan medføre større overskyl og skader på stensætningen.

For at sikre at skråningsbeskyttelsen på strækningen lever op til de designmæssige forhold er en høfde derfor blevet opført ud for Strandvej 31, efter afslutning af det større projekt. Høfden har hermed til formål, at fastholde tilstrækkeligt fodringssediment og dermed designforudsætninger på den nordlige side af høfden, men er endvidere designet og dimensioneret til, at sediment også kan bevæge sig rundt om høfden, og på denne måde fortsætte med langstransporten i sydgående retning.

Høfden bidrager således med at beskytte det bagvedliggende sommerhusområde mod oversvømmelser, samt til at skråningsbeskyttelsen på den strækning kompenseres med rette sedimentmængde, således at underminering af anlægget undgås og dets levetid ikke nedsættes. Etableringen af høfden har dermed til formål at sikre, at den ønskede effekt af kystbeskyttelsesprojektet af hele Enø opnås. Uden etablering af høfden, vil sandfodringen ikke opnå den optimale effekt på den sydlige del af projektstrækningen, da sedimentet i stedet vil forsvinde længere nedstrøms, og området omkring Strandvej, vil dermed ikke få den nødvendige beskyttelse. Uden høfden vil der skulle foretages en lokal sandfodring mellem Strandvej 24-31 oftere end forudsat i det tidligere samlede projekt for Enø. Derfor er høfden afgørende for at projektstrækningen opnår den korrekte modstandsdygtighed i stormsituationer, hvor akut erosion og oversvømmelse er en potentiel fare.

Formålet med nærværende notat er derfor, at dimensionere en høfde, der kan fange noget af den sediment, der transporteres langs kysten i sydgående retning, så stranden kan opretholde sit dimensionsgrundlag. Derudover vil notatet danne grundlag for en myndighedsansøgning af høfden. På nuværende tidspunkt er der etableret en høfde ud for Strandvej 31, der ikke er myndighedsansøgt om.



Figur 1.1: Oversigtskort over den havvendte strækning af Enø og et zof kysten ved Strandvej 31. Ortofoto er taget i foråret 2023.

Figur 1.2 viser stranden nord for høfden set mod nord. Figuren viser en forholdsvis bred strand, der ligger foran skråningsbeskyttelsen.



Figur 1.2: Foto af stranden ca. 50 m nord for høfden set mod nord. Taget d. 15. februar 2024.

Figur 1.3 viser stranden og skråningsbeskyttelsen umiddelbart nord for høfden. Stranden her er væsentlig smalere. Desuden viser figuren den nuværende høfde.



Figur 1.3: Strand, skråningsbeskyttelse og hofde nord for hofden set mod syd. Taget d. 15. februar 2024.

Figur 1.4 viser stranden og skrænten syd for høfden. Stranden foran skrænten er relativ smal men bredere end stranden umiddelbart nord for høfden.



Figur 1.4: Skrænt og strand syd for høfden set mod syd. Taget d. 15. februar 2024.

2 Modellering

Der er foretaget beregninger af sedimenttransportkapaciteten med det formål at bestemme udbredelsen af den aktive zone samt ligevægtsorienteringen af kystlinjen. Beregningerne af sedimenttransportkapaciteten er udført i DHI's numeriske model LITDRIFT.

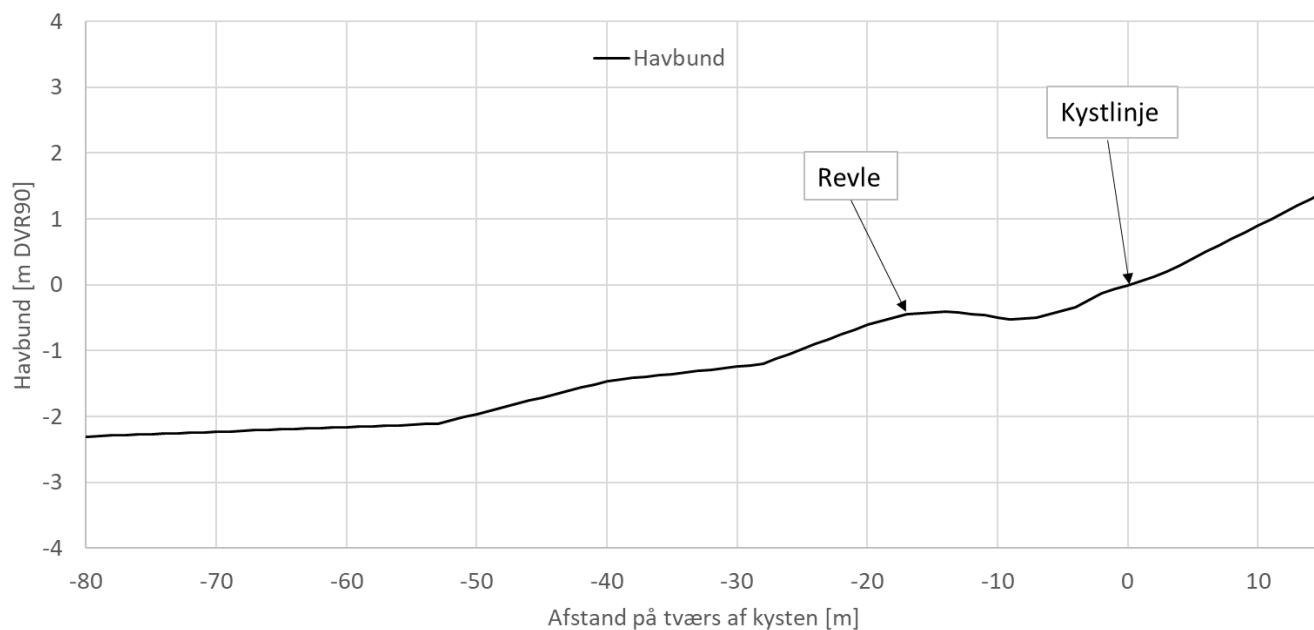
LITDRIFT beregner størrelsen og retningen på sedimenttransporten over kystprofilet i løbet af en given tidsserie med bølgehøjde, -periode og -retning samt vandstand.

Kystprofilet, der er brugt til beregningerne, er baseret på GPS-opmålinger foretaget i februar 2024 og den danske dybdemodel. Placeringen af opmålingspunkterne er vist i Figur 2.1. Profilet har en orientering på 237°N.



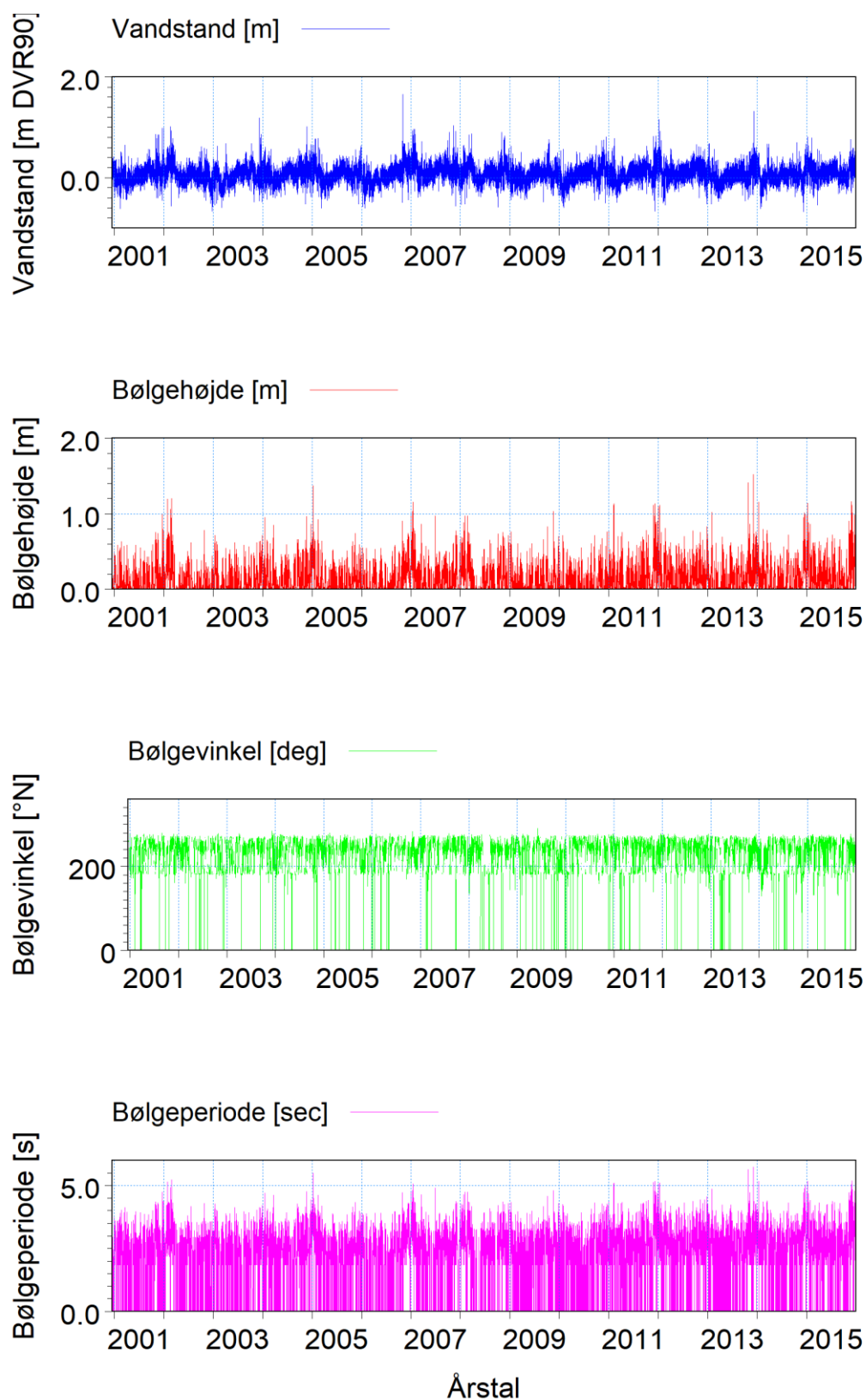
Figur 2.1: Placeringen af opmålingspunkterne der bruges som grundlag til kystprofilet.

Kystprofilets bathymetri er vist i Figur 2.2. Figuren viser, at der ligger en revle ca. 15 m fra kystlinjen.



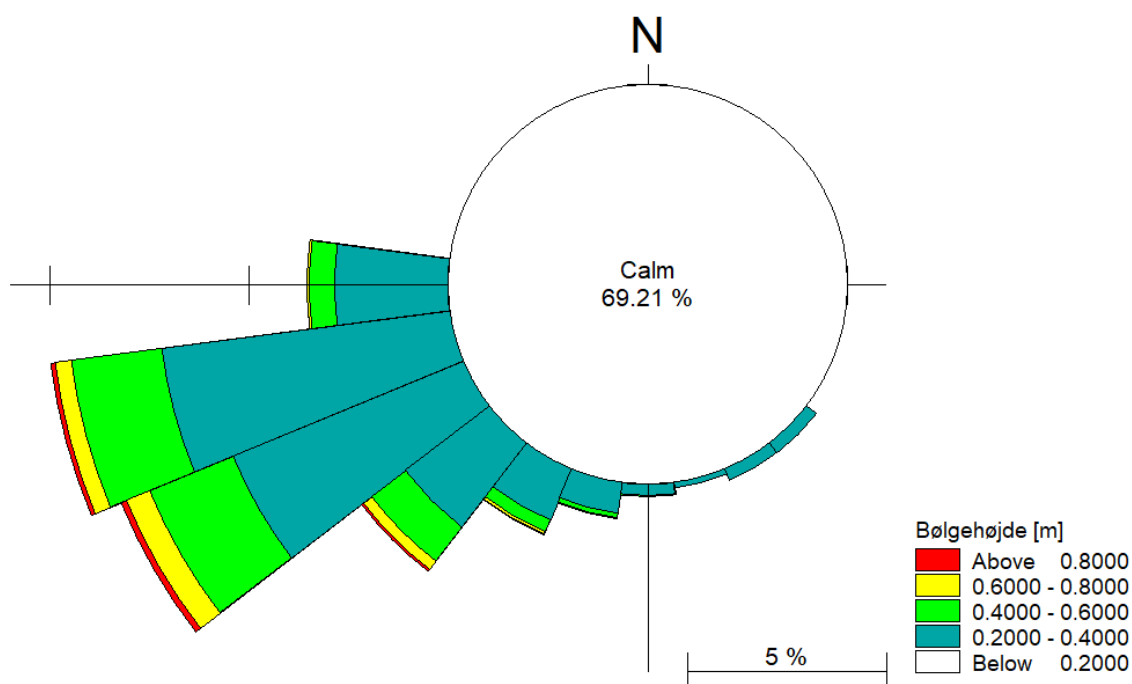
Figur 2.2: Tværprofil af kysten ud for Strandvej 31. Placeringen af kystlinjen og den inderste revle er markeret.

Bølgeparametrene er baseret på numerisk bølgemodellering, som NIRAS har foretaget i 2018 af Storebælt, Langelandsbælt og Smålandsfarvandet med DHI's MIKE 21 SW som del af kystbeskyttelsesprojektet ved Enø [1]. Figur 2.3 viser tidsserien af vandstand, bølgehøjde, bølgeperiode og bølgevinkel. Modelperioden går fra 2001-2015.



Figur 2.3: Tidsserier af vandstand, bølgehøjde, -vinkel og -periode. Bølgevinklen er i forhold til nord.

I Figur 2.4 er bølgerosen vist og angiver for hvilke retninger bølgerne kommer i forhold til nord. Bølgerne kommer primært fra vest-sydvestlig retning.



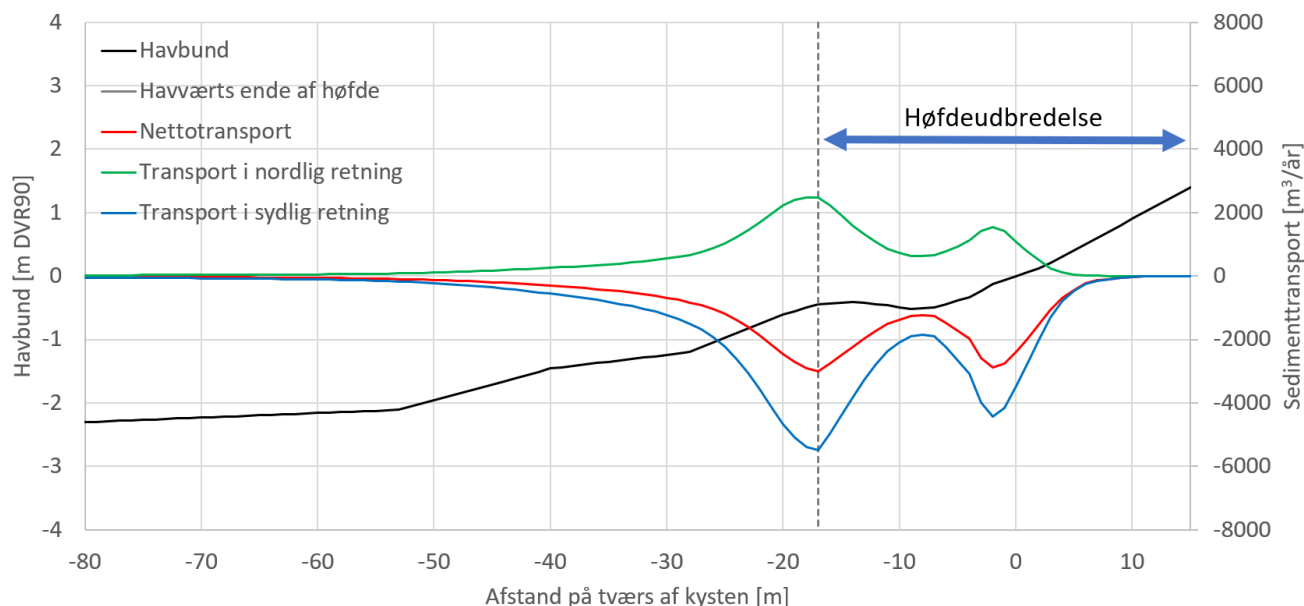
Figur 2.4: Bølgerose der viser hyppigheden af bølger fra forskellige bølgeretninger. I 69% af tiden er bølgehøjden under 0,2 m.

2.1 Længde af den aktive zone

Den aktive zone er del af kystprofilet, hvor 97,5 % af den kystparallelle sedimenttransport foregår indenfor. Udbredelsen af den aktive zone ved en lokalitet kan findes ved at beregne den kystparallelle sedimenttransport over en årrække. Beregningen giver også fordelingen af sedimenttransport i den aktive zone.

Kendskabet til udbredelsen af den aktive zone kan bruges til at vurdere, hvor stor del af transporten som høfden blokerer for.

Figur 2.5 viser den beregnede kystparallelle sedimenttransportkapacitet i både nordlig og sydlig retning samt den resulterende nettotransport over kystprofilet. Figuren viser, at der både er transport i nordlig og sydlig retning, hvor den sydlige transport er størst, hvilket resulterer i en nettotransport i sydlig retning. Derudover er der to punkter i profilet, hvor transporten er højere end den resterende del af profilet. Det ene sted er umiddelbart havværts kystlinjen, og det andet sted er på den inderste revle. Placeringen af de to punkter indikerer, at det er her bølgebrydning primært foregår i profilet.



Figur 2.5: Beregnet sedimenttransportkapacitet over kystprofil. Positive og negative værdier indikerer hhv. nordlig og sydlig transportretning. Den blå pil markerer hofdens udbredelse i kystprofil.

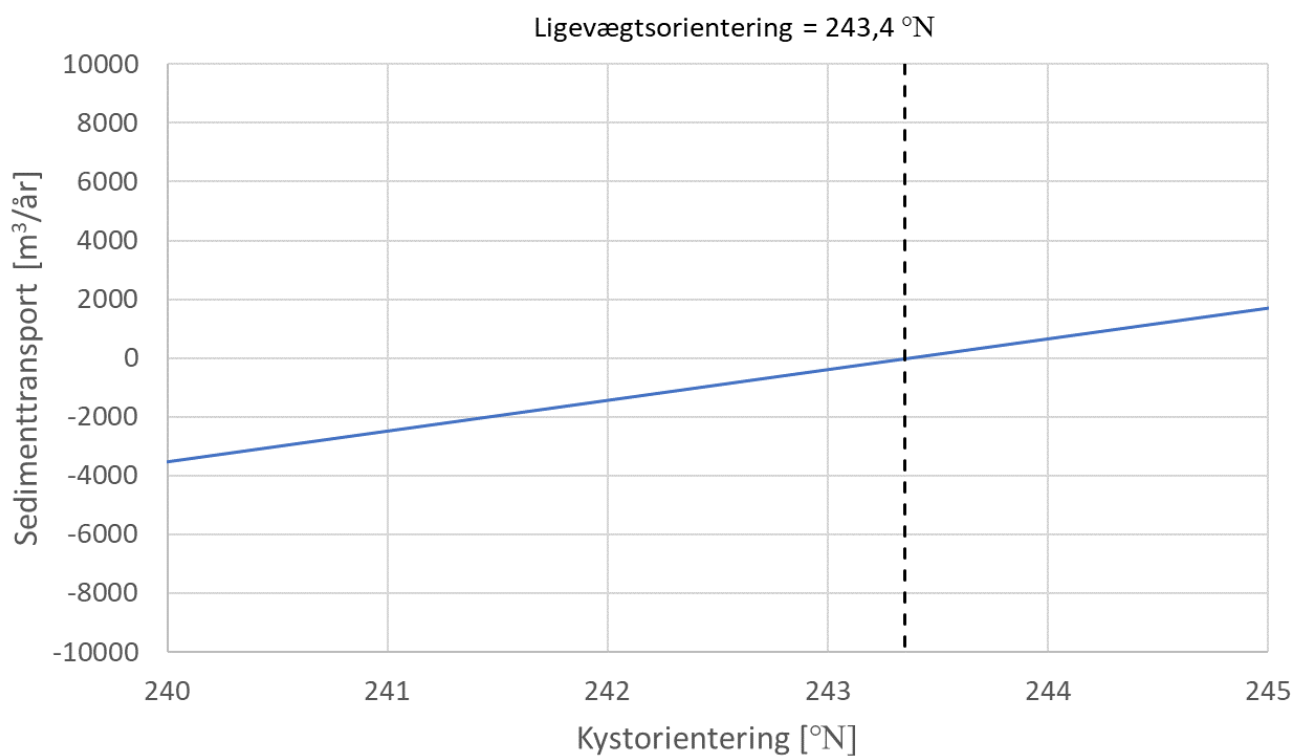
2.2 Ligevægtsorientering

Kystlinjens ligevægtsorientering findes ved at beregne størrelsen på den kystparallelle sedimenttransport ved forskellige orienteringer af kystprofil med samme bølge- og vandstandstidsserie. Resultaterne kan bruges til at udarbejde en såkaldt Q-alpha-kurve, som viser transporten (Q) ved forskellige orienteringer af kysten (alpha). Kurven bruges til at bestemme ved hvilken orientering, at transporten er nul, og kysten er i en form for ligevægt.

Det kan dog være svært at sikre en kystligevægt, da bølgeindfaldsvinklen varierer over året. Desuden forudsætter beregningen, at der ikke forsvinder sediment fra kysten, hvilket ofte er tilfældet på de danske erosionskyster.

Ved hjælp af et ortofoto fra foråret 2023 er det fundet, at kysten ved Strandvej 31 har en orientering på omkring 237°N. For at udarbejde Q-alpha-kurven er den kystparallelle transport beregnet for orienteringen i intervallet 227 – 257°N.

Figur 2.6 viser den beregnede Q-alpha-kurve. Figuren viser, at ligevægtsorienteringen er 243,4°N. Dermed er den nuværende kystlinjeorienteringen ca. 6 grader mere sydlig end den beregnede ligevægtsorientering.



Figur 2.6: Beregnet nettosedimenttransportkapacitet ved forskellige kystorienteringer samt en markering af ved hvilken orientering at nettotransportkapaciteten er lig med 0 m³.

3 Dimensionsgivende parametre

De dimensionsgivende parametre for høfden svarer til en 100 års-hændelse i 2070 og er tilsvarende de anvendte dimensionsgivende parameter i Enø Kystbeskyttelsesprojektet [1]. Tabel 3.1 viser de vandstande, bølgehøjder og -perioder på dybt vand, der svarer til en 100 års-hændelse.

Tabel 3.1: Kombinationer af vandstande og bølgehøjder samt tilhørende bølgeperioder for 100-års hændelse i Smålandsfarvandet på dybt vand ud for Enø og Lungshave [1].

Vandstand på dybt vand i år 2020 [m DVR90]	Vandstand på dybt vand i år 2070 [m DVR90]	Bølgehøjde på dybt vand (H_s) for 100 års MT [m]	T_p [s]
0,3	0,72	2,4	5,9
0,8	1,22	1,8	5,3
1,2	1,62	1,5	5,0
1,3	1,72	0,5	3,3
1,6	2,02	0,3	2,8

Bølgehøjden ved konstruktionen er beregnet ud fra en forudsætning om, at bølgerne er dybdebegrænset, dvs. at ved en given vanddybde er den maksimale bølgehøjde, der kan eksistere en funktion af vanddybden. Det såkaldte brydningskriterie, som beskriver forholdet mellem vanddybden og den dybdebegrænsede bølgehøjde, er sat til 0,7.

Den første sektion består af den yderste halvdel af høfden, og den anden sektion består den inderste halvdel.

Det forudsættes at havbunden foran høfden ligger i -1 m DVR90, som bruges til at dimensionere den yderste halvdel. Til dimensioneringen af den inderste halvdel forudsættes det, at havbunden ligger i -0,5 m DVR90.

Baseret på Tabel 3.1 vil kombinationen med en vandstand på 1,22 m medfører det største bølgebidrag er derfor dimensionsgivende. Bølgeperioden ved denne kombination er rundet op til 6 s som en konservativ sikkerhed.

Den dimensionsgivende bølgehøjde og vandstand ved høfden er beregnet til at være:

Vandstand = 1,22 m DVR90

Den signifikante bølgehøjde (H_s) = 1.55 m

Ved yderste halvdel

Den signifikante bølgehøjde (H_s) = 1.20 m

Ved inderste halvdel

Peak bølgeperiode (T_p) = 6 s

Parametrene bruges til at beregne de nødvendige stenstørrelser på høfden, for at denne kan modstå en storm, hvor parametrene forekommer.

4 Dimensionering

4.1.1 Dæksten

Dæksten til hølften beregnes med van der Meer's formel beskrevet i "The Rock Manual" [2]. Med denne formel medtages effekten af konstruktionens forside-/sidehældning, bølgehøjde og bølgeperiode, stormvarighed, konstruktionens permeabilitet samt accepteret skadesniveau. De anvendte parametre er vist i Figur 4.2.

Tabel 4.1: Designparametre anvendt til beregning af dæksten i hølften og skråningsbeskyttelse.

Parameter	Symbol	Værdi	Note
Stormvarighed	-	6 timer	
Skadesniveau	S_d	2	Svarende til begyndende skade.
Permeabilitet	P	0,5	P=0,5: Hølften med 2 lag dæksten, samt underliggende filtersten
Anlæg (hældning)	α	2	Forsidehældning
Relativ densitet	Δ	1,62	Forholdet mellem densiteten af sten (2650 kg/m^3) og vand (1020 kg/m^3) minus 1.

Dæksten omregnes fra masse til nominel diameter som:

$$D_{n,50} = \sqrt[3]{\frac{M_{50}}{\rho_s}}$$

$D_{n,50}$ er den nominelle median stendiameter (sidelængden på det kvadrat, som stenen lige akkurat kan passere igennem), M_{50} er median stenmassen og $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ er stendensiteten.

Da stenene ved hølftenhoved er udsat for en større bølgepåvirkning på grund af konstruktionens runding anbefales det at bruge sten, der er minimum 30% større end de beregnede sten.

Dækstenene kan være brudsten fra stenbrud eller natursten fra grusgrav eller genbrug fra eksisterende konstruktioner. Dækstenene skal være frostsikre og uden revner.

4.1.2 Filtersten

Filterstenene består af blandet stenfyld. For at undgå, at filterstenene skylles ud gennem dækstenene skal følgende filterkriterier opfyldes (Thompson and Shuttler 1976):

$$\frac{D_{15A}}{D_{15F}} \leq 7 \quad \frac{D_{15A}}{D_{85F}} \leq 4 \quad \frac{D_{50A}}{D_{50F}} \leq 4$$

D betyder stendiameter, A og F henviser til hhv. dæksten og filtersten, 15 og 85 henviser til hhv. 15 og 85 fraktilen af stenenes graderingskurve.

Filterstenene kan enten være natursten eller brudsten, men må maksimalt indeholde 10 % hvid flint og kalk. Stenmaterialet skal være velgraderet.

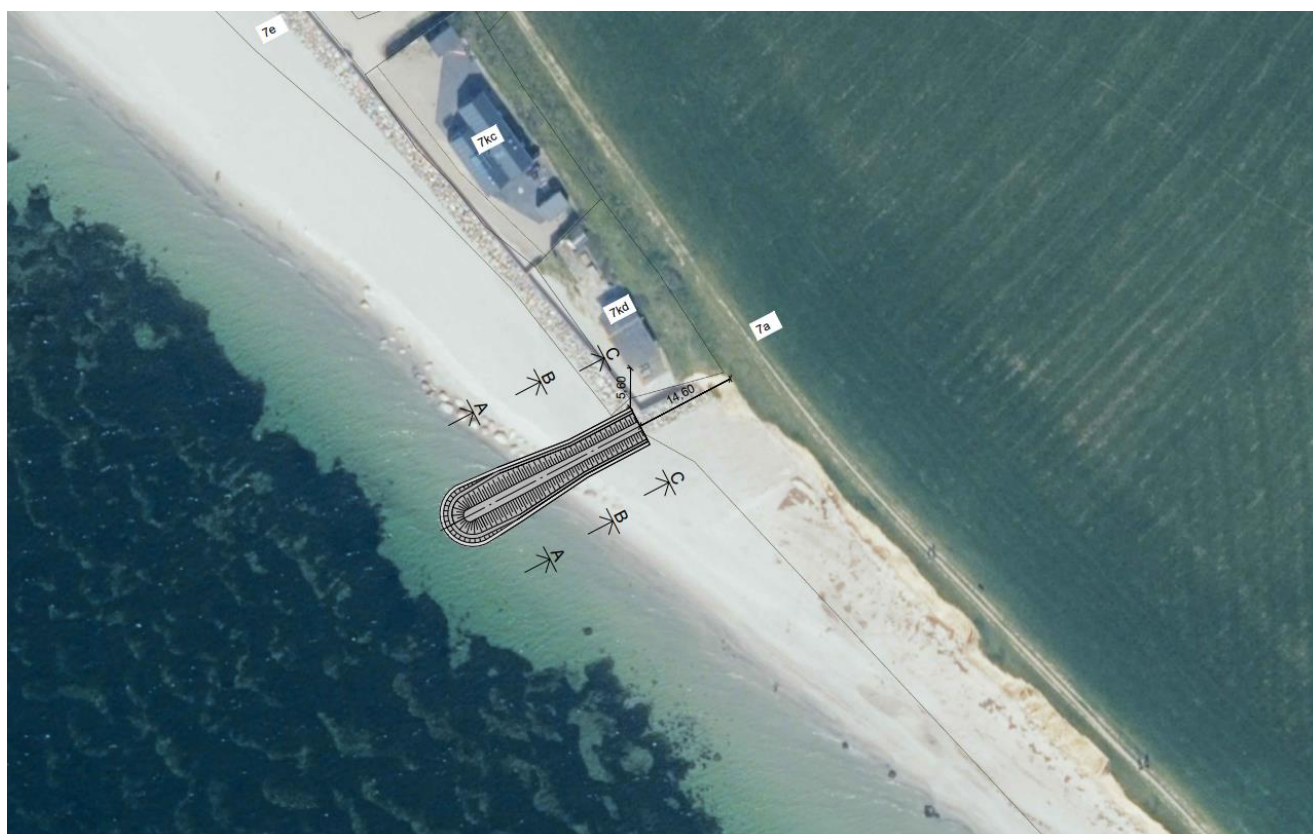
4.1.3 Geotekstil

Geotekstil skal være egnet til marine arbejder med en vægt på 400 g/m^2 . Geotekstil skal være nålebunden og må ikke efterfølgende være varmebehandlet. Der skal være 1 m overlap mellem hver enkelt bane. Geotekstil må ikke være synlig i det færdige stenarbejde.

4.2 Design af hofde

Længden af hofden er 30 m, så den dækker for 50 % af den beregnede sedimenttransportkapacitet (se Figur 2.5).

Hofden deles op i tre sektioner. Den første sektion består af den yderste 10 m af hofden, den anden sektion er den midterste 10 m og den tredje sektion består af den inderste 10 m. De yderste 10 m af hofden er hofdehoved, som er det sted, hvor den største bølgepåvirkning forekommer. Figur 4.1 viser plantegningen af hofden.



Figur 4.1: Plantegning af hofden der viser hofdens placering samt placeringen af tværsnit. Talværdierne viser afstanden af tilhørende linje i meter. Ortofoto er fra foråret 2023.

4.2.1 Dæksten og filtersten

Baseret på de dimensionsgivende parametre er de nødvendige stenstørrelser beregnet for de to sektioner. I den yderste og midterste del af høfden er følgende stenstørrelse beregnet:

$$D_{n,50} = 0,56 \text{ m}$$

$$M_{50} \approx 460 \text{ kg}$$

Da stenene ved høfdehoved er udsat for en større bølgepåvirkning på grund af konstruktionens rounding anbefales det at bruge sten, der er minimum 30% større end de beregnede sten. Det anbefales derfor at bruge standardgradering 300-1.000 kg jf. DS/EN 13383-1 med følgende specifikationer:

$$D_{n,50} = 0,62 \text{ m}$$

$$M_{50} = 650 \text{ kg}$$

På den inderste del af høfden er følgende stenstørrelse beregnet:

$$D_{n,50} = 0,45 \text{ m}$$

$$M_{50} \approx 250 \text{ kg}$$

For at opfylde filterkriterierne opstillet i Afsnit 4.1.2 anbefales at anvende filtersten med standardgradering 5-40 kg. Filterstenene skal som minimum have følgende gradering for at opfylde filterkriterierne:

$$D_{n,15} = 0,03 \text{ m}$$

$$D_{n,50} = 0,10 \text{ m}$$

$$D_{n,85} = 0,15 \text{ m}$$

4.2.2 Funderingsniveau

Høfdehovedet funderes i kote -1,0 m DVR90 og den inderste del funderes i kote 0,0 m DVR90, hvilket er ens med skråningsbeskyttelsen.

4.2.3 Tvær- og længdesnit

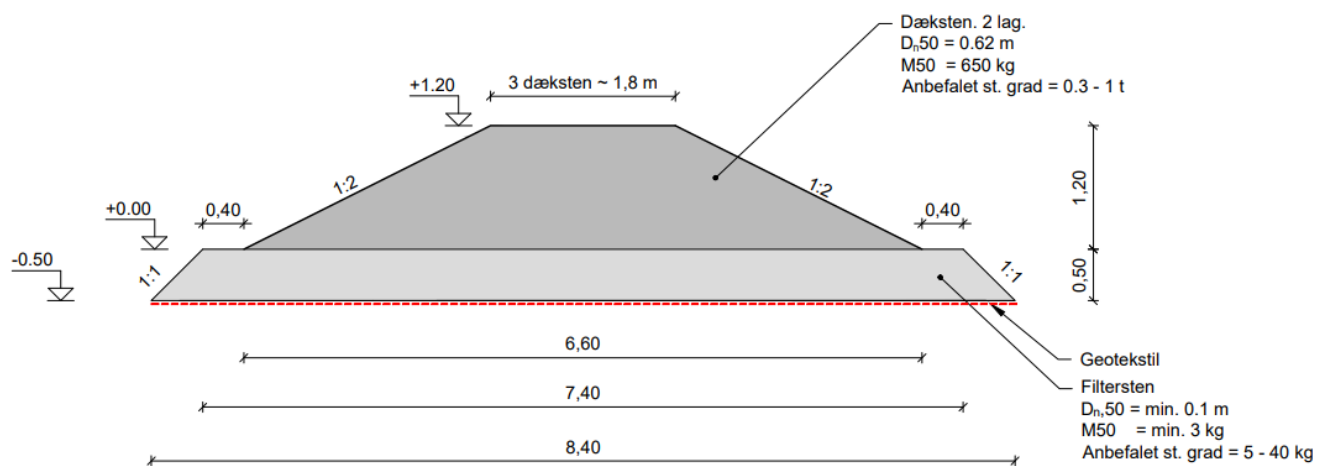
Et længdesnit af høfden er vist i Figur 4.2. Tre tværsnit af høfden er vist i Figur 4.3, Figur 4.4 og Figur 4.5 for hhv. høfdehoved, den midterste del og den inderste del.

Høfdens kronekote er +1,2 m DVR90.

Filterlaget på 0,5 m i tykkelse placeres i en udgravning, som en pude under dækstenene.

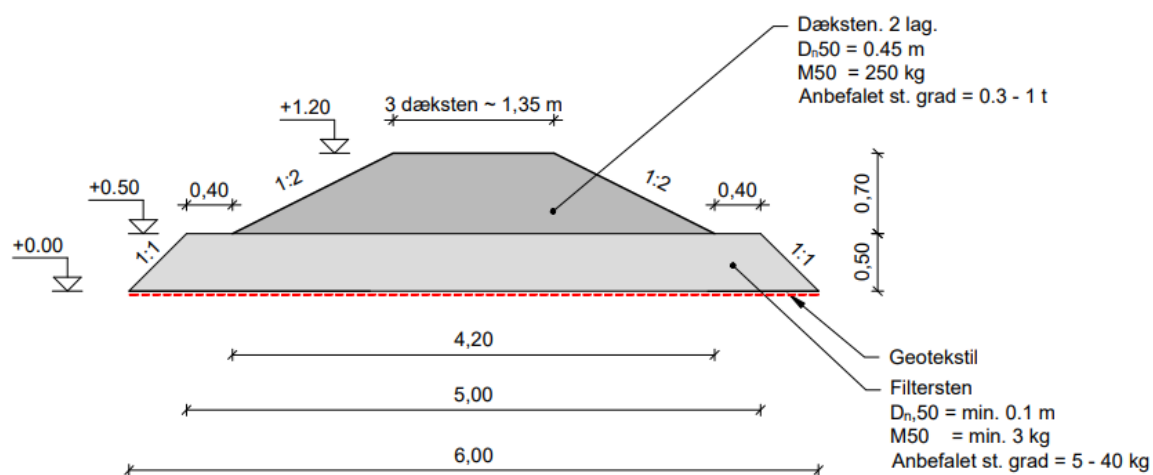
Dækstenslaget består af to lag dæksten. Ved høfdehoved lægges der på hver side en tå med ét lag dæksten.

På den yderste del af høfden, hvor dækstenslagets tykkelse er større end to lags dæksten, etableres der en kerne af filtersten mellem dækstenslaget og filterlaget i midten af høfden.



SNIT B - B, 1:50
 Høfdeskaft, yderste del

Figur 4.4: Tværsnit af den midterste del af høfdeskaftet.



SNIT C - C, 1:50
 Høfdeskaft, inderste del

Figur 4.5: Tværsnit af den inderste del af høfdeskaftet.

5 Påvirkning af nabostrækninger

Høfden vil medvirke, at stranden nord for høfden (opstrøms) bliver bredere og højere. Stranden syd for høfden vil dog blive smallere end da den initiale sandfodringen lige var blevet udført, da høfden vil holde på mere sediment.

Høfden er dog dimensioneret, så der stadig vil blive transporteret sediment forbi den og videre til stranden syd for. Umiddelbart efter etablering fastholdes mest sediment. Når kysten er bygget ud vil den hindre mindre sandtransport.

Dette betyder, at den fortsatte vedligeholdelse af sandfodringen på den nordlige del af projektstrækningen, vil bevirke en fortsat sedimenttilførsel på den nedstrøms side af høfden, og på denne måde forventes stranden syd for høfden, ikke at lide sedimenttab på længere sigt.

Ved sammenligning af historiske og nutidige flybilleder, kan det afledes, at stranden syd for høfden er bredere nu, end inden kystbeskyttelsesprojektets påbegyndelse og opførelsen af høfden.

Læsideerosion forventes derfor ikke at være et problem i denne situation, da sedimenttilførslen opstrøms kompenserer for erosionen.

6 Referencer

- [1] NIRAS, »Enø Kystbeskyttelse - Dimensioneringskriterier,« 2020.
- [2] CIRIA, CUR, CETMEF, »The Rock Manual, The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition),« C683, CIRIA, London, 2007 (reprinted 2012).