



Nordkystens Fremtid

Kystteknisk Projektforslag

Bilag 02

Dato: 16. december 2024

Indhold

1.	Indledning	4
2.	Sammenfatning	5
2.1	Nordkystens Fremtid.....	5
2.1.1	Eksisterende kystbeskyttelse	5
2.1.2	Ny kystbeskyttelsesstrategi.....	5
2.2	Kystmorfologiske forhold.....	6
2.3	Kysttekniske forhold.....	8
2.4	Kystteknisk projektforslag.....	9
2.4.1	Dimensioneringskriterier	9
2.4.2	Kystteknisk projektforslag.....	10
2.4.3	Virkninger ved forslagens gennemførelse	12
2.4.4	Anbefalinger.....	12
2.5	Anlægsoverslag.....	12
3.	Kystteknisk grundlag	13
3.1	Forundersøgelser.....	13
3.1.1	Topografisk opmåling	13
3.1.2	Bathymetrisk opmåling og bestemmelse af sandlag.....	14
3.1.3	Bathymetrisk opmåling på lavt vand.....	17
3.1.4	Geoteknisk skrivebordsstudie	18
3.1.5	Sediment.....	20
3.1.6	Registrering af kystbeskyttelse	22
3.1.7	Tilstandsvurdering uden strandfodring.....	34
3.2	Kystteknisk modellering.....	45
3.2.1	Bølger.....	45
3.2.2	Vandstand	49
3.2.3	Kronisk erosion.....	54
3.2.4	Passage af sand forbi Gilleleje Havn og Hornbæk Havn.....	73
3.2.5	Sandtransport på tværs af stranden	74
3.3	Kystteknisk vurdering.....	85
3.3.1	Erosionspres	86
3.3.2	Kronisk erosion.....	86

3.3.3	Akut erosion	86
3.3.4	Forstærkning af eksisterende hård kystbeskyttelse.....	87
3.4	Indledende tilstandsvurdering af hård kystbeskyttelse med strandfodring	88
3.5	Indledende vurdering af fodringsmængder	90
4.	Kystteknisk Projektforlag	96
4.1	Formål	96
4.2	Fremgangsmåde og dimensioneringskriterier.....	96
4.3	Strandfodring i det kysttekniske projektforlag.....	97
4.3.1	Retningslinjer for strandfodring	99
4.4	Skråningsbeskyttelser i det kysttekniske projektforlag.....	99
4.4.1	Retningslinjer for hård kystbeskyttelse.....	100
5.	Strandfodring - myndighedsprojekt	104
5.1	Fodringsstrategi	104
5.1.1	Initialfodring	104
5.1.2	Vedligeholdelsesfodring.....	104
5.2	Strandfodringsmateriale	106
5.2.1	Bemærkninger til sandfodring	106
5.2.2	Bemærkninger til ralfodring.....	107
5.3	Visualiseringer af strandfodring	108
5.4	Strandfodringsmængder	112
5.5	Tab af fodringsmateriale	116
5.6	Risici	117
6.	Anlægsoverslag.....	117
6.1	Enhedspriser	117
6.1.1	Enhedspris for sand.....	117
6.1.2	Enhedspris for ral.....	120
6.2	Samlet anlægsoverslag for sandfodring og ralfodring	121
7.	Referencer	126

1. Indledning

Halsnæs Kommune, Gribskov Kommune og Helsingør Kommune har bedt rådgivergruppen NIRAS, DHI og Hasløv & Kjærsgaard om at udarbejde forundersøgelser, projektforslag og myndighedsprojekt for kystbeskyttelsen af Nordkysten. Projektet, som kaldes "Nordkystens Fremtid", omfatter beskyttelse af kysten fra Hundested til Helsingør, en strækning på i alt 57 km.

Formålet med projektet Nordkystens Fremtid er at skabe et langsigtet, helhedsorienteret og holdbart kystbeskyttelsesprojekt for hele Nordkysten fra Hundested til Helsingør, der giver den bedste beskyttelse mod kronisk og akut erosion på 50 års sigt. Projektets påvirkning skal vurderes inden for denne tidsramme. Kystbeskyttelsen skal være en langsigtet løsning, som tager højde for havspejlsstigninger og klimaforandringer med stadigt hyppigere kraftige stormhændelser til følge. Projektet skal endvidere imødekomme den usikkerhed, der er ved forudsigelse af klimaforandringerne over de kommende 50 år.

Denne rapport indeholder et kystteknisk projektforslag til den fremtidige kystbeskyttelse af Nordkysten. Med forslagens gennemførelse vil kysten være sikret de næste 50 år mod erosion og tilbagerykning under storme, der statistisk set kun optræder én gang i løbet af en periode på 50 år.

Beskyttelsen vil bestå af en kombination af løbende strandfodring med sand og ral, med udgangspunkt i den naturlige sedimentsammensætning langs Nordkysten, og skråningsbeskyttelser med sten.

Ved at strandfodre indarbejdes de naturlige kystprocesser langs Nordkysten i beskyttelsen. Strandfodring er en naturbaseret kystbeskyttelsesform, som tilrettelægges under hensyn til at minimere de skadevirkninger af stenrev og sandbanke, der er specielt beskyttet i udpegningen af Natura 2000-område nr. 195 Gilleleje Flak og Tragten.

Strandfodringerne skal ses i sammenhæng med en løbende forstærkning af den "hårde" kystbeskyttelse, som f.eks. skråningsbeskyttelser, høfder og bølgebrydere. Projektforslaget indeholder anbefalinger og princip-tværsnitstegninger til forstærkning af typiske skråningsbeskyttelser og anvisning af strækninger, hvor det på sigt kan vise sig at være fordelagtigt at anlægge eller optimere bølgebrydere, høfder, rev eller flak for at stabilisere stranden.

Gennemførelsen og finansieringen af den hårde kystbeskyttelse er de enkelte grundejeres og kystlags eget ansvar.

Denne rapport erstatter rapporten Nordkystens Fremtid - Kystteknisk Projekt (NIRAS, 2021).

2. Sammenfatning

Dette kapitel indeholder en sammenfatning af det kysttekniske projektforslag, som skal være med til realisere Nordkystens Fremtid. For at forstå baggrunden for projektforslaget indledes kapitlet med en kort beskrivelse af den eksisterende kystbeskyttelse langs Nordkysten og den nye kystbeskyttelsesstrategi for Nordkysten.

2.1 Nordkystens Fremtid

2.1.1 Eksisterende kystbeskyttelse

Den eksisterende kystbeskyttelse består i dag af høfder, bølgebrydere, rev og skråningsbeskyttelser, benævnt "hård" kystbeskyttelse. Den hårde kystbeskyttelse har gennem mange år standset tilbagerykningen af kystskrænterne og dermed beskyttet de mange bebyggelser langs kysten.

En del af den hårde kystbeskyttelse blev beskadiget under stormen Bodil den 6. december 2013, og er siden blevet repareret og mange steder væsentligt udbygget og forhøjet. Konstruktionerne er dog oftest genopbygget med eksisterende stenmaterialer, som ofte ikke er tilstrækkelig store til at modstå de fremtidige stærkere storme.

Det generelle billede er, at kysterosionen fortsætter ude i kystprofilen på trods af den hårde kystbeskyttelse, hvilket langsomt forværrer situationen, efterhånden som vanddybden øges. Herved bliver bølgerne, der kan nå stranden og kystbeskyttelseskonstruktionerne, stadigt større.

En stor del af den hårde kystbeskyttelse er i dag underdimensioneret og styrken af konstruktionerne reduceres yderligere i fremtiden som følge af erosion, hyppigere storme og havspejlsstigning.

Kystlagene administrerer typisk kyststrækninger på en halv til en hel kilometer, og hvert lag fokuserer ofte på at beskytte kystskrænten mod erosion, mens der ikke fokuseres på beskyttelse af selve stranden. Mange steder har man forsøgt at holde på stranden ved at opføre høfder eller kystnære bølgebrydere, men uden at tilføre sand til kysten. Der har derfor været en tendens til, at kystbeskyttelses anlæggene på én strækning har medført øget erosionspres på nabostrækningen mod øst, fordi tilførslen af sediment til nabostrækningen er blevet reduceret. På den måde er erosionspresset blevet flyttet langs kysten, og det er dermed blevet nødvendigt at anlægge hård kystbeskyttelse på lange strækninger nedstrøms for de først opførte anlæg.

Det er teknisk muligt at forstærke og udbygge den eksisterende hårde kystbeskyttelse og dermed opnå den ønskede beskyttelse af ejendomme og infrastruktur. Denne praksis vil dog medføre, at kysten vil blive yderligere udsat og resultere i smallere strande og et stejlere kystprofil og dermed stadig større påvirkning, som vil medføre at der er behov for yderligere udbygning af den hårde beskyttelse.

2.1.2 Ny kystbeskyttelsesstrategi

På grund af manglerne ved den eksisterende kystbeskyttelsesstrategi har Halsnæs Kommune, Gribskov Kommune og Helsingør Kommune vurderet, at det ikke er tilrådeligt at fortsætte den nuværende praksis for kystbeskyttelse, og de har derfor iværksat en ny helhedsorienteret strategi for beskyttelse af hele Nordkysten. Den består af de følgende strategiske hovedkomponenter:

1. Styrkelse af stranden med storskala strandfodring med sand og ral.
2. Optimering af eksisterende skråningsbeskyttelser og evt. andre hårde konstruktioner.

Strandfodring og skråningsbeskyttelser kombineres for at skabe den optimale kystbeskyttelse og sikre ensartet beskyttelsesniveau langs hele Nordkysten.

Initialfodringen varetages af kommunerne i fællesskab, mens de efterfølgende vedligeholdelsesfodringer forventes at blive varetaget af strandfodringslag, som oprettes i forbindelse med projektet. Udbygning og renovering samt finansiering af hård kystbeskyttelse skal fortsat varetages af grundejere og kystlag. Der er i forbindelse med det kysttekniske projektforslag udarbejdet principskitser af de anbefalede skråningsbeskyttelser, som i kombination med strandfodring, vil give den ønskede beskyttelse af kyststrækningen.

Ved strandfodring vil stranden blive bredere og fladere, med mindre vanddybder nær stranden.

Der er opstillet følgende målsætninger for den nye kystbeskyttelsesstrategi:

1. Tilbagerykningen af stranden på fodringsstrækningerne ud for den bebyggede del af Nordkysten skal standses med strandfodring med ral og sand foran skrænter og skråningsbeskyttelser til beskyttelse af ejendomme mod den nedbrydende virkning fra havet. Før en dimensionsgivende storm skal der ligge ral til kote +1,20 m DVR90 og ovenpå rallen sand til kote +1,50 m DVR90.
2. Strandens højde skal udbygges i takt med havspejlsstigningerne med sand og ral, så det ønskede beskyttelsesniveau opretholdes.
3. Skråningsbeskyttelser bør udbygges, hvis de i kombination med strandfodringen er vurderet til ikke at kunne modstå en 50-årshændelse de næste 50 år.

Strandfodringen vil være forbundet med nogle negative virkninger såsom:

- Tildækning af habitatnaturtypen rev (1170).
- Risiko for øget tilsanding i havnene i Gilleleje og Hornbæk.
- Påvirkning af afstrømning fra land gennem udløb til stranden pga. hævet strandprofil.

Alle disse forhold undersøges og afklares nærmere i forbindelse med udarbejdelsen af myndighedsprojektet (NIRAS, Nordkystens Fremtid. Myndighedsprojekt for strandfodring, 2024e) og miljøkonsekvensvurderingen, der udarbejdes i forbindelse med myndighedsprojektet (NIRAS, Nordkystens Fremtid. Miljøkonsekvensvurdering, 2024b).

2.2 Kystmorfologiske forhold

De kystmorfologiske forhold på Nordkysten er domineret af bølgepåvirkning og højvande, der giver anledning til erosion og kystnedbrydning. Nordkysten udsættes både for en gradvis erosion skabt af en stigende transportevne mod øst kombineret med mangel på sand i kystprofilet, den såkaldte "kroniske erosion", og for en pludselig erosion, som sker under kraftige storme, den såkaldte "akutte erosion".

Kronisk erosion

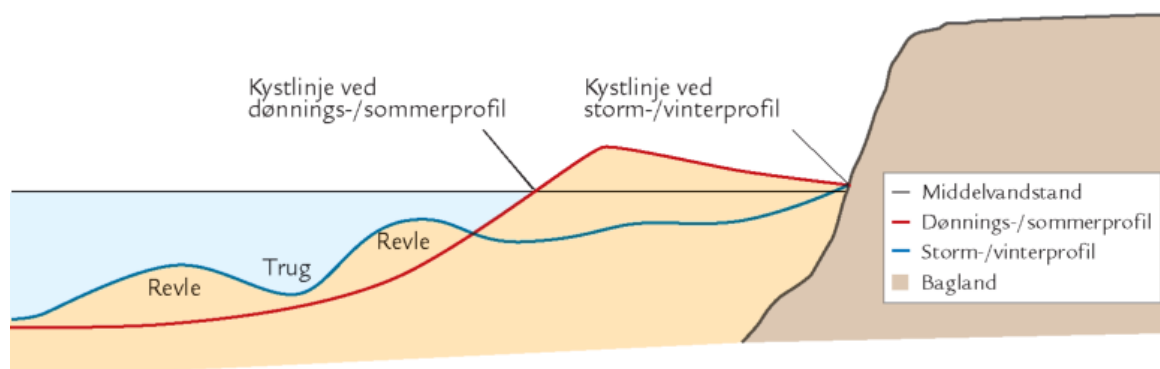
Nordkysten er udsat for et stort konstant kronisk erosionspres fra bølger og strøm. Som følge heraf er kysten rykket betydeligt tilbage gennem årene, med undtagelse af korte strækninger lige vest for Gilleleje Havn, Hornbæk Havn, Helsingør Havn og nord for Hundested Havn, hvor sandet hober sig op lige op ad havnemolerne. Denne erosionstendens vil fortsætte i fremtiden med øget hastighed på grund af klimaforandringerne. Udviklingen er yderligere forstærket af omfattende skråningsbeskyttelser, høfder og bølgebrydere, som reducerer tilførslen af sand og ral til stranden, som bliver smallere, helt forsvinder eller afløses af sten-/ralstrand. Resultatet bliver en ond cirkel, hvor erosionen rykker ud foran stranden, skaber større vanddybder og større bølger, som øger risikoen for forøget kronisk erosion. Figur 2.1 viser et eksempel på en stejl og høj skråning, hvor stranden er forsvundet foran skråningsbeskyttelsen.



Figur 2.1 Stejl og høj skråning ved Salgårdshøj med lav skråningsbeskyttelse, der beskytter mod erosion og dermed hindrer tilførsel af materiale til stranden, som er forsvundet foran skråningsbeskyttelsen. Fotoet er taget d. 31-10-2017 af NIRAS.

Akut erosion

Nordkysten er også udsat for et stort akut erosionspres i forbindelse med storme med kraftig bølgepåvirkning og højvande. I disse situationer eroderer den øverste del af kystprofilen, hvorved stranden bliver lavere og skrænterne rykker tilbage. Det eroderede sandmateriale føres (midlertidigt) længere ud i kystprofilen og transporteres relativt hurtigt langs med kysten på revlerne, se Figur 2.2. Størstedelen af det eroderede sand kommer ind på stranden igen i perioden efter stormen. Ral, som typisk bliver på stranden under storm, transporteres langsomt af bølger og højvande langs kysten. Der forekommer typisk ingen nævneværdig akut erosion af ral-strande foran skråningsbeskyttelserne.



Figur 2.2 Principskitse af akut erosion (Binderup, 2016) baseret på (Komar, 1998).

Stormen Bodil medførte ekstraordinært store bølger og langvarig ekstrem højvande. Kombinationen af forhøjet vanddybde langs kysten og den forhøjede vandstand under stormen medførte omfattende skader på den eksisterende kystbeskyttelse og skrænterne bagved, se Figur 2.3. Stormen viste, at der er behov for vedligeholdelse af strandene og kystbeskyttelsen på Nordkysten, dels for at beskytte mod fremtidig akut erosion under stormflod, og dels for at imødegå den kroniske erosion.



Figur 2.3 Havstokken ved Udsholt, Gribskov Kommune under stormen Bodil 06. december 2013, Kilde: (COWI, 2016)

2.3 Kysttekniske forhold

Implementeringen af den nye kystbeskyttelsesstrategi kræver et detaljeret kendskab til de kysttekniske forhold langs Nordkysten. Hertil er der indsamlet omfattende datamængder og udført adskillige analyser, som alle har dannet grundlag for dimensionering af kystbeskyttelsen. For at give et indtryk af omfanget er de vigtigste data, analyser og resultater præsenteret i det følgende:

Vandstand og bølger

- Vandstands- og bølgestatistik med ekstremværdier for returperioder 2, 10, 20 og 50 år langs hele kysten.
- Sammenhæng mellem vandstand, bølgehøjde, bølgeretning og bølgeperiode langs hele kysten.

Kronisk erosion

- Sedimenttransporten er beregnet og korrigeret for manglende sand i profilet, kystnære konstruktioner og transport forårsaget af regionale strømninger udenfor brydningszonen.
- Sandbudget og erosionsrater er bestemt for alle fodringsstrækninger, og analyserne er sammenholdt med tendenser fra historiske data af kysttilbagerykninger.
- Sedimenttransport, sandbudget og erosionsrater er bestemt for sandfodrede profiler – med fodringssand med en anelse højere middeldiameter og med sandet distribueret i den indre del af profilet. Analyserne viser ingen væsentlig påvirkning af den bagvedliggende erosionsproces. Fodringsandet fungerer således som en "neutral" buffer for baggrundserosionen.
- Beregninger med tilført sandfodringsmateriale viser, at sandfodring ikke vil ændre den overordnede transportdynamik, som dermed kan anvendes direkte til at modvirke den kroniske erosion.

Akut erosion af sand (ved storm)

- Akuterosionen i form af erosionsdybder, samt bølgehøjder og vandstande lige foran skråningsbeskyttelsen, er beregnet og angivet i tabelform og som kurver for en række forskellige placeringer af skråningsbeskyttelsen.
- For en 50-årshændelse svarende til det mest ekstreme hændelsesscenarie, hvor stormen varer 12 timer, vil der vest for Gilleleje eroderes mellem 0,9-1,8 m sand i højden foran skråningsbeskyttelsen, afhængig af den præcise placering. En stormvarighed på kun 6 timer i samme scenarie giver omkring 0,5 m mindre erosionsdybder.
- Den akutte erosion forårsager større dybder lige foran konstruktionen og mindre dybder længere ude i profilet, hvilket gør, at bølgerne bryder mere længere ude og mindre tæt på konstruktionen. Disse forhold bevirker, at erosionsraten aftager i slutningen af stormen.
- Beregninger viser, at der under meget ekstreme storme eroderes kraftigt på den øvre del af stranden og foran skråningsbeskyttelsen.
- Størstedelen af det eroderede sand vender dog tilbage til stranden efter stormen, hvorved stranden genopbygges.

Akut erosion af ral (ved storm)

- Ral transporteres typisk landværts under storm og der vil derfor ofte ikke forekomme nævneværdig akut erosion af ralstrande foran skråningsbeskyttelserne.
- Antages den akutte erosion af ralstranden foran en skråningsbeskyttelse at være begrænset under en storm, skal en ren ralstrand have en højde på minimum +1,2 m i forhold til middelvandstanden for at beskytte mod den erosion, der forekommer under en 50-årshændelse.

2.4 Kystteknisk projektforslag

Resultatet af analyser af de kysttekniske forhold har dannet grundlag for dimensioneringen af nærværende kysttekniske projekt. Projektet følger kystbeskyttelsesstrategien og opfylder målsætninger beskrevet i afsnit 2.1.

Strandfodring er en naturbaseret kystbeskyttelsesform, som kan imødekomme de naturlige kystprocesser langs Nordkysten med erosion og langsgående sedimenttransport. Strandfodring begrænser behovet for udbygning af skråningsbeskyttelse, og har den fordel, at sandmængderne, der fodres med, løbende kan tilpasses behovet på kysten.

2.4.1 Dimensioneringskriterier

Valget af den dimensionsgivende hændelse vælges på baggrund af konstruktionens levetid og valg af sandsynlighed for forekomst af returperioden, dvs. den designstorm/hændelse, som beskyttelsen designes til at kunne modstå, inden for levetiden.

Kriterierne for henholdsvis skråningsbeskyttelser og strandfodringsdimensioner er angivet i Tabel 2.1.

I Nordkystens Fremtid er det valgt at beskytte sig mod en returperiode på 50 år. Denne returperiode er valgt ud fra en afvejning af størrelsen af konstruktionerne og pris i forhold til de potentielle skaders omfang. Det vurderes at være forholdsvis billigt og let at reparere skråningsbeskyttelser i tilfælde af, at der opstår skader. På grund af den store usikkerhed omkring den fremtidige klimarelaterede havspejlsstigning er det besluttet, at projektets levetid skal være 50 år.

Der skal vedligeholdelsesfodres for at imødegå den kroniske erosion, der sker langs Nordkysten. Der fodres hvert 5. år for at opretholde at målsætningen om, at der altid skal ligge sand til kote +1,5 m over middelvandstanden før en storm. Der vedligeholdelsesfodres med samme mængde, som der forventes at ville erodere langs Nordkysten i løbet af 5 år. Levetiden for strandfodringen er derfor 5 år.

Tabel 2.1 Anbefalede dimensioneringskriterier for skråningsbeskyttelser og strandfodring på Nordkysten.

Sandsynligheden angiver risikoen for forekomst af 50-årshændelse (returperiode) indenfor levetiden på hhv. 50 eller 5 år.

Dimensionering	Kystbeskyttelsestype	
	Skråningsbeskyttelse	Strandfodring
Levetid, L	50 år	5 år
Klimascenarie (IPCC)	SSP5-8.5	SSP5-8.5
Returperiode	50 år	50 år
Sandsynligheden, R	64 %	10 %

Sandsynligheden for, at en 50-årshændelse forekommer i projektets levetid på 50 år er 64 %. Sandsynligheden for, at der forekommer en 50-årshændelse mellem vedligeholdelsesfodringerne hvert 5. år er 10 %.

Hvis en 50-årshændelse indtræffer, vil der være behov for udbedring af skader langs skråningsbeskyttelserne, og der kan være behov for at tilføre eller flytte rundt på noget sand. Hvis der indtræffer en stormflod, der er større end den designgivende 50-årshændelse, må det forventes, at skadesomfanget stiger.

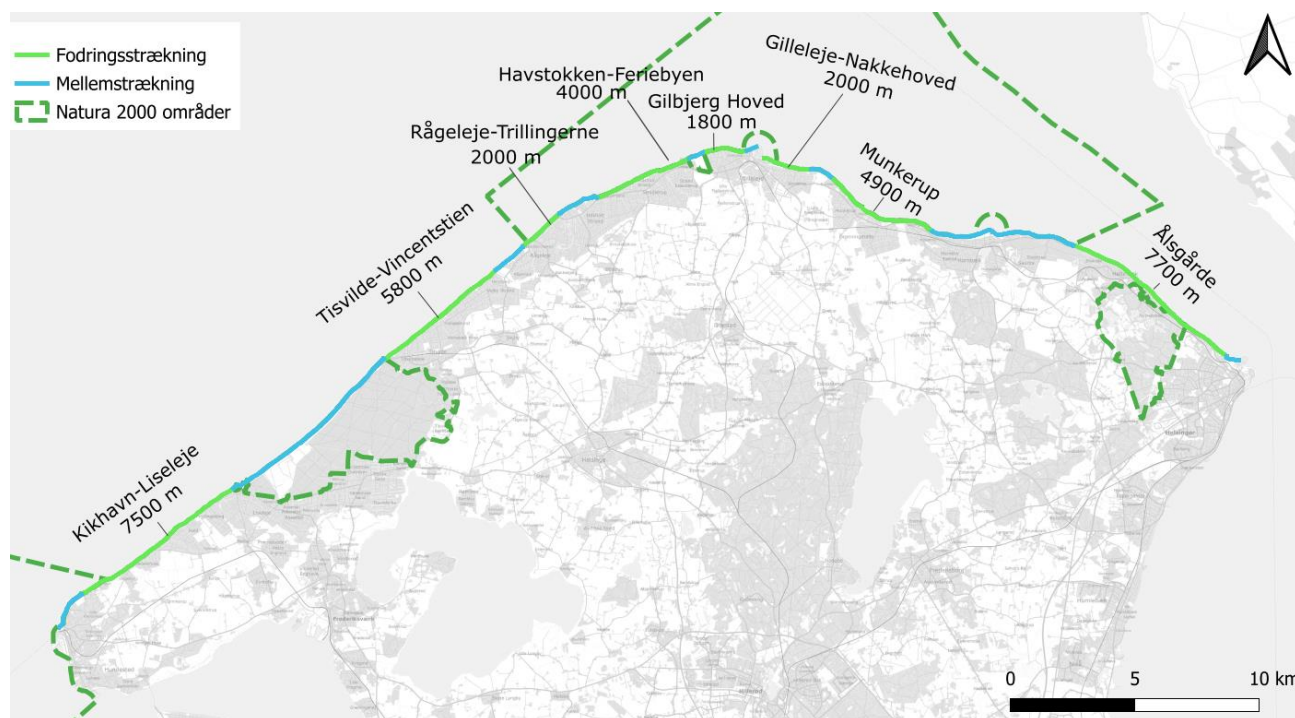
2.4.2 Kystteknisk projektforslag

Det kysttekniske projektforslag inkluderer strandfodring langs alle bebyggede grunde med kystbeskyttelsesbehov. Der strandfodres langs otte længere strækninger på Nordkysten med en samlet længde på 35,7 km ud af i alt 57 km kyst. Der fodres ikke ud for naturstrækninger. Strandfodringen indledes med en initialfodring, der løfter stranden op til det nødvendige beskyttelsesniveau. De otte fodringsstrækninger og mellemstrækningerne er vist i Figur 2.4.

Initialfodringen følges op med vedligeholdelsesfodringer hvert 5. år på alle otte fodringsstrækninger.

Det anbefales, at strandfodringerne udføres med en kombination af sand ($0,35 \text{ mm} < d_{50} < 0,6 \text{ mm}$) og ral (20-150 mm). Ifølge geoteknikkernes og geologernes kornstørrelsesskala kaldes kornstørrelser mellem 20-150 mm for groft grus og sten (Larsen, et al., 1995), men i dette projekt er betegnelsen ral anvendt.

For at reducere den akutte erosion strandfodres der med ral alle de steder, hvor der ikke er tilstrækkelig ral langs skråningsbeskyttelserne i dag. Hvor der skal fodres med ral, varierer langs fodringsstrækningerne. Detaljer om hvor der skal fodres med ral vil blive fastlagt i senere fase i forbindelse med detailprojekteringen.



Figur 2.4 De otte fodringsstrækninger og mellemstrækninger. OBS. Strækningen "Ålsgårde" strækker sig fra Ålsgårde til Helsingør. Skærmbort fra SDFI, type: dtk_skaermkort_graa_48_print, hentet d. 11-09-2024.

Følgende konkrete krav er opstillet for strandfodringerne, der udføres langs Nordkysten under Nordkystens Fremtid:

- Opbygningen sker ved strandfodring med sand og ral, der tilpasses hver enkelt fodringsstrækning således, at der ikke vil ske forringelse af den nuværende strandkvalitet.
- Strandens højde udbygges med sand og ral i takt med havspejlsstigningen, hvorved beskyttelsesniveauet opretholdes.
- Strandfodringerne skal stoppe tilbagerykning af stranden på de strækninger, hvor der er et kystbeskyttelsesbehov.
- Strandfodringerne skaber en gennemsnitlig strandbredde på 10-30 m, som sikrer passage langs kysten.
- Strandfodringerne skal sikre en langsigtet og helhedsorienteret beskyttelse af Nordkysten.
- Der strandfodres med både sand og ral, da blandingen af sand og ral er udbredt langs Nordkysten og det dermed er naturligt at kombinere sand og ral i fodringsmaterialet.
- Reduktion af sand til fordel for mere ral optimeres med henblik på at reducere den potentielle skadevirkning på stenrev og sandbanke, som er udpegningsgrundlaget for Natura 2000 område nr. 195 Gilleleje Flak og Tragten.
- Initialfodring udføres med 5 m³/m ral til minimum kote +1,2 m i forhold til middelvandstanden for at sikre mod akut erosion de steder, der kun er sandstrand i dag.
- Sandfodring udføres generelt til kote +1,5 m i forhold til middelvandstanden foran skråningsbeskyttelserne mod akut erosion og for at skabe passage langs kysten.
- Herover udlægges sand til vedligeholdelse op til kote +2,5 m i forhold til middelvandstanden vest for Gilleleje og kote +2,0 m i forhold til middelvandstanden øst for Gilleleje.
- Sandstranden forudsættes at have en hældning på 1:15.
- Vedligeholdelsesfodring udføres med sand og ral mod kronisk erosion, havspejlsstigning og randeffekter langs alle strækninger.
- Vedligeholdelse og opbygning af hård kystbeskyttelse skal varetages af de enkelte grundejere og kystbeskyttelseslag.

2.4.3 Virkninger ved forslagens gennemførelse

Følgende overordnede positive virkninger forventes:

- Strandfodringerne reducerer bølgepåvirkningen af skråningsbeskyttelser og skråninger bagved.
- Vedligeholdelsesfodringerne kompenserer for tabet af sand og ral langs kysten som følge af kronisk erosion, havspejlsstigning og randeffekter ved enderne af fodringsstrækningerne.
- Strandfodringsmaterialet vil gradvist spredes langs hele Nordkysten og således også reducere kysttilbagerykningen langs naturstrækninger og strækninger, hvor der ikke fodres direkte.
- Strandfodringerne vil forbedre kystbeskyttelseskonstruktionernes robusthed og kysttekniske virkning, samt sikre et mere ensartet beskyttelsesniveau langs Nordkysten.
- Strandfodring vil forbedre passagen langs kysten på de beskyttede strækninger.
- Strandfodring medfører ikke øget erosion på tilstødende strækninger (læsideerosion) og er derfor den eneste form for kystbeskyttelse, der kan standse erosionen i hele kystprofilen og kompensere for kronisk erosion og havspejlsstigning.

2.4.4 anbefalinger

I forbindelse med udarbejdelse af det kysttekniske projektforslag, er der fremkommet følgende overordnede anbefalinger:

- Strandfodring foretages af den fælles projektorganisation: Nordkystens Fremtid, som et fælleskommunalt projekt for grundejerne langs Nordkysten under ledelse af Halsnæs Kommune, Gribskov Kommune og Helsingør Kommune.
- Grundejerne anbefales at opgradere og udbygge skråningsbeskyttelserne således, at de kan modstå en 50-årshændelse nu og om 50 år i kombination med strandfodringerne. Optimering og omlægning af eksisterende hård kystbeskyttelse kræver individuelle tilladelser.
- Desuden anbefales grundejerne at optimere og anlægge nye bølgebrydere, høfder, rev eller flak på udsatte strækninger, hvor stranden ikke er tilstrækkelig stabil til, at den målsatte højde af stranden kan opretholdes foran skråningsbeskyttelserne. Det anbefales dog at vente med at opføre sådanne konstruktioner indtil cirka 5 år efter første fodring for at se det reelle behov efter initialfodringen.
- Grundejerne anbefales også at foretage oprydning og renovering af nedslidt og utilstrækkelig hård kystbeskyttelse, dvs. kystbeskyttelse der allerede nu ikke kan modstå en 50-årshændelse, før strandfodringen udføres. Stenmaterialerne kan med fordel indbygges i forstærkede skråningsbeskyttelser og derved nyttiggøres bedst muligt. Tilstandsvurdering af alle konstruktioner fremgår i rapporten *Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Tilstandsvurdering af kystbeskyttelse, Hundested - Helsingør* (NIRAS, 2018a).

2.5 Anlægsoverslag

Det samlede anlægsoverslag for materialeomkostninger og anlæg af initialfodringen er i størrelsesordenen 164 mio. kr. plus moms. Det samlede anlægsoverslag for materialeomkostninger og anlæg af vedligeholdelsesfodringerne er i størrelsesordenen 50 mio. kr. plus moms hvert 5. år.

Det skal bemærkes, at anlægsoverslagene ikke inkluderer usikkerheder eller udgifter til anstilling og rådgivning i forbindelse med detailprojektering.

3. Kystteknisk grundlag

På trods af at de forundersøgelser og beregninger, som ligger til grund for det kysttekniske projektforslag, er over fem år gamle, er de stadig gældende og kan bruges til analyserne, da forholdene på kysten ikke har ændret sig nævneværdigt. Siden gennemførelsen af forundersøgelserne og beregningerne er der sket yderligere akut og kronisk erosion langs Nordkysten, hvilket gør det endnu mere aktuelt at gennemføre det foreslåede kysttekniske projektforslag.

3.1 Forundersøgelser

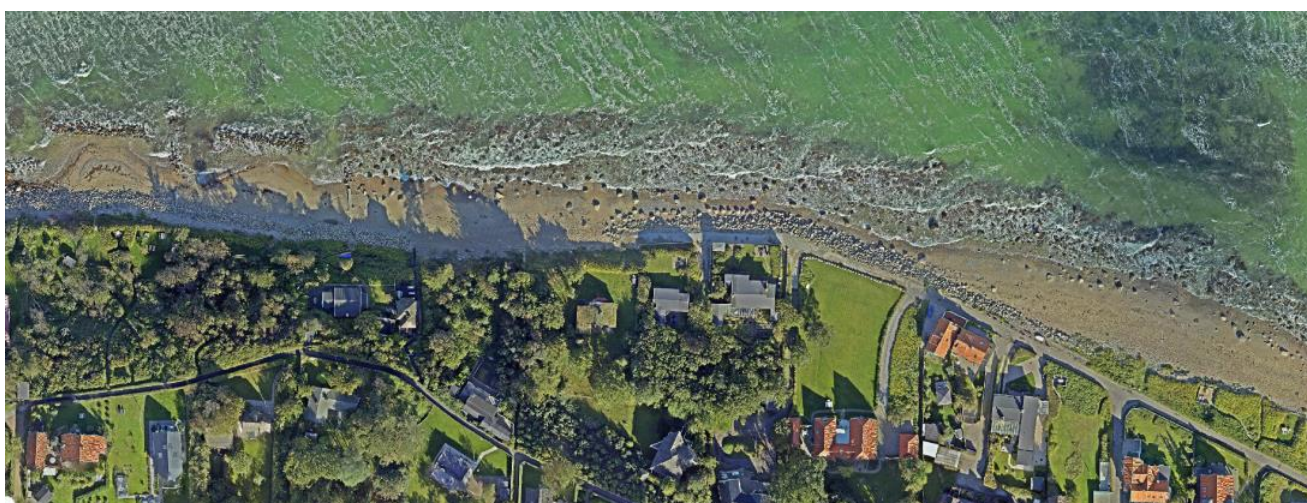
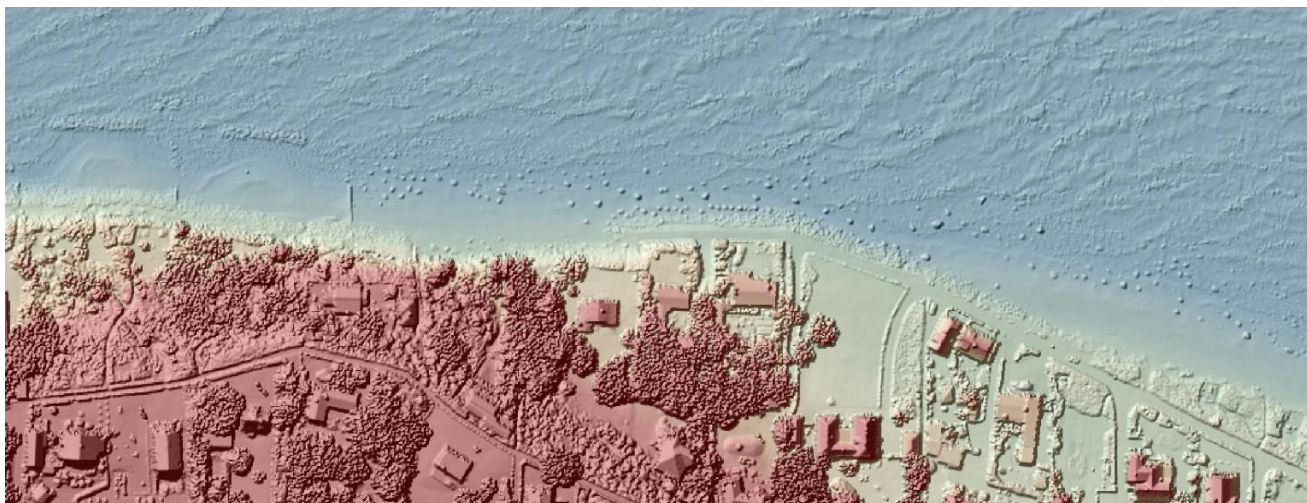
I det næste præsenteres de forundersøgelser, der ligger til grund for den kysttekniske modellering og det kysttekniske projektforslag.

3.1.1 Topografisk opmåling

NIRAS har den 9. oktober 2017 gennemført topografiske opmålinger med flybåren laserscanning og simultan lodfotografering af kyststrækningen mellem Helsingør og Hundested. Opmålingen er beskrevet mere detaljeret i Topografisk Survey Rapport (NIRAS, 2018e).

Det topografiske survey dækker kystkonstruktioner og strand samt et bælte på mindst 50 meter bag kystlinjen. Strækningen er overfløjet to gange for at sikre den bedst mulige beskrivelse af kyststrækningen med hensyn til både punktsky og billeder. Resultatet er en overflademodel, også benævnt Digital Surface Model (DSM), med en cellestørrelse på 40x40 cm. Eksempel på opmålingen ses i Figur 3.1.

Den dobbelte overflyvning af kyststrækningen mellem Helsingør og Hundested har resulteret i 1490 billeder. Billederne blev georefereret i forbindelse med optagelsen.



Figur 3.1 Den udarbejdede DSM viser tydeligt både kystsikringsanlæg og fritliggende store sten. Billederne viser den vestlige del af Nordre Strandvej vest for Gilleleje Havn.

3.1.2 Bathymetrisk opmåling og bestemmelse af sandlag

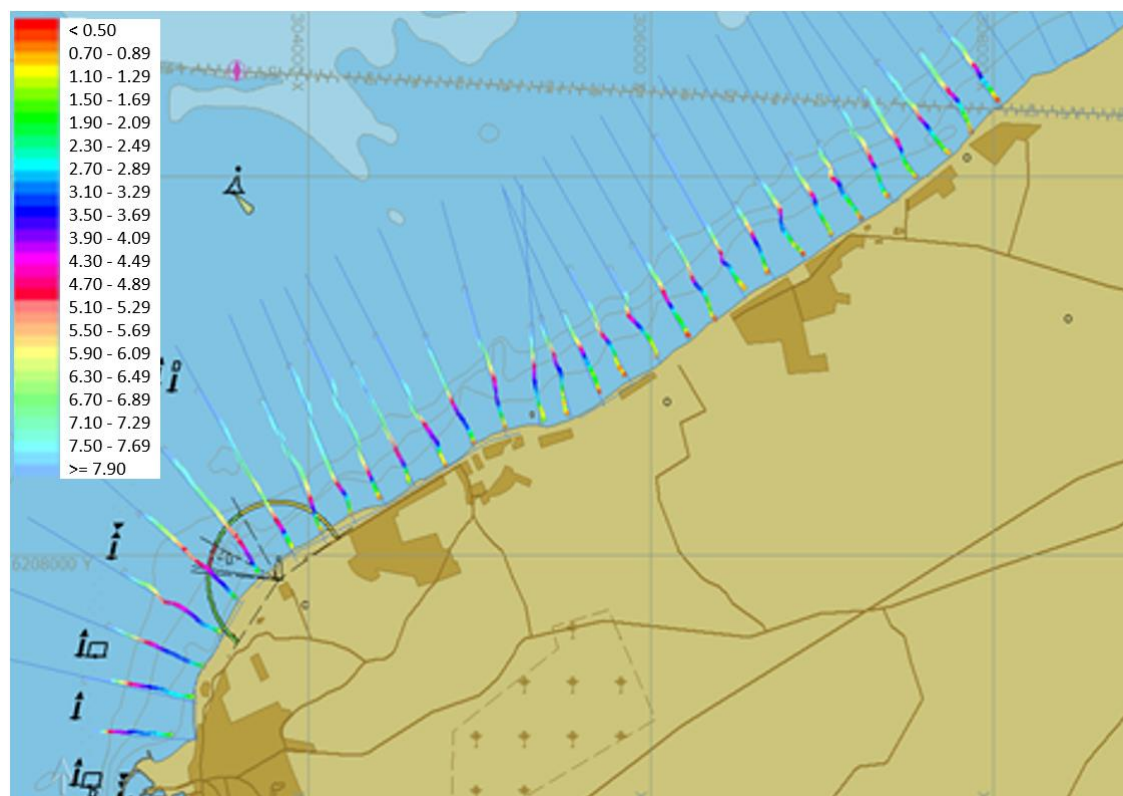
DHI har i efteråret 2017 foretaget opmåling af 286 linjer vinkelret på kysten med 200 m afstand på strækningen mellem Hundested og Helsingør, samt 5 kystparallelle linjer med en indbyrdes afstand på 50-100 m (DHI, 2018a). Opmålingerne er foretaget fra et opmålingsfartøj udstyret med præcisionsekkolod, som dels måler dybden og dels sandlagets tykkelse. Kystprofilerne er opmålt mellem ca. 0,8-8,0 m dybde. De kystparallelle linjer er opmålt inden for 8 m-kurven.

Opmålingen er udført med henblik på at opnå detaljeret data omkring kyststrækningens bathymetri (havedybde), og for at kortlægge tykkelsen af sandaflejringerne på strækningen.

De færdige kombinerede kystprofiler giver mulighed for at beskrive og analysere kystmorfologien på den undersøgte kyststrækning. I Figur 3.2 og Figur 3.3 er vist eksempel på opmålingen mellem Hundested og Asserbo Plantage.



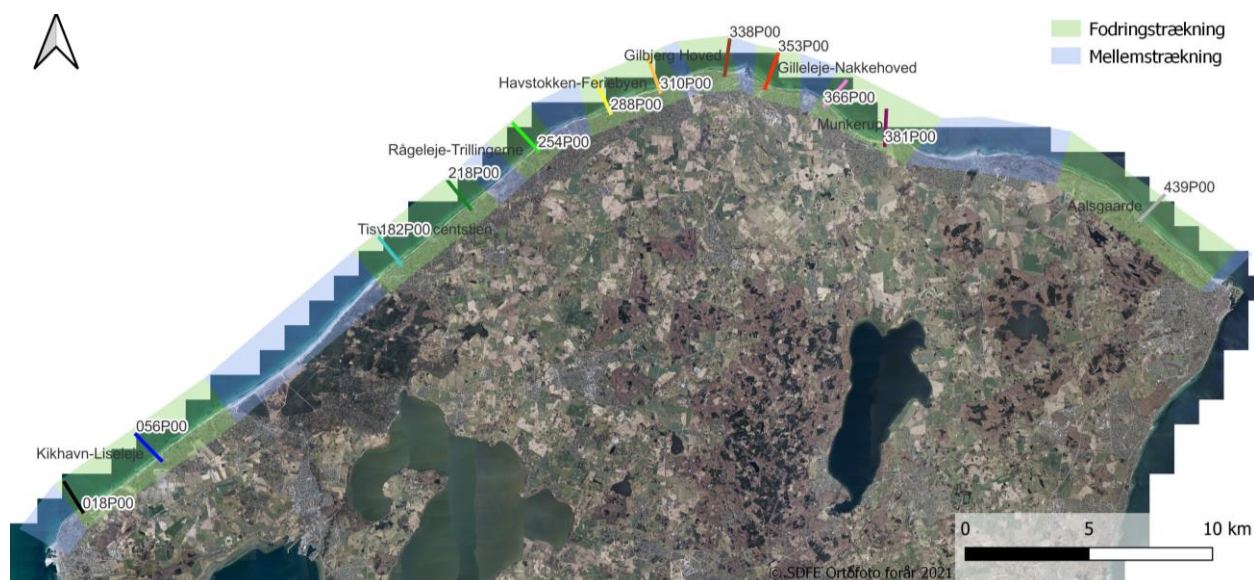
Figur 3.2 Survey-området med opmålte kystprofiler mellem Hundested og Asserbo Plantage. De sorte spor viser de faktisk sejlede linjer. De røde linjer (i vandet) viser de planlagte sejllinjer.



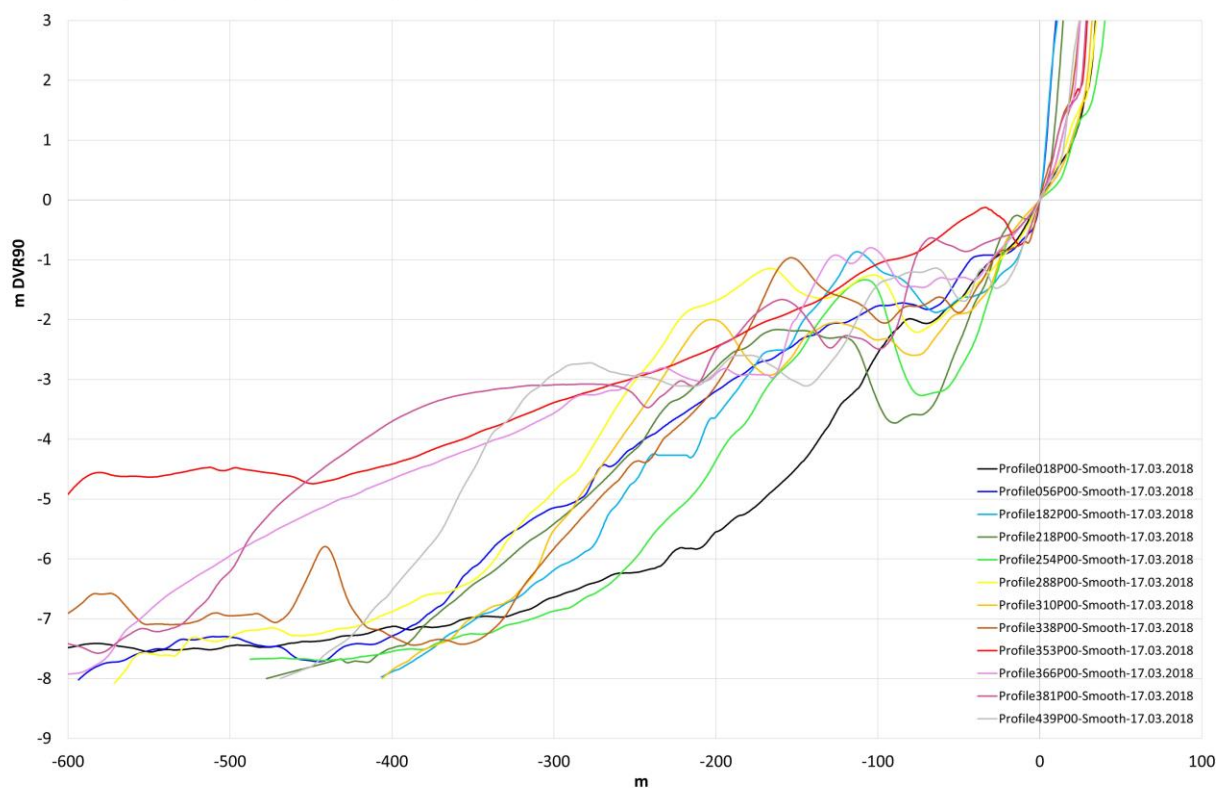
Figur 3.3 Kystprofiler med farveangivelse af dybden.

Figur 3.4 viser placering (øverst) og opmålingen (nederst) af udvalgte kystprofiler langs hele Nordkysten.

Der observeres generelt et fladere kystprofil på strækningen gående fra Hundested Havn til Tisvilde Hegn, med undtagelse af strækningen lige ud for Spodsbjerg Fyr. Derudover observeres der et generelt fladere kystprofil ved Gilleleje, Munkerup, Dronningmølle og mellem Hornbæk og Helsingør. Et generelt stejlere kystprofil observeres på strækningen mellem Tisvilde og Holløse Strand, Vejby Strand, Rågeleje, Udsholt Strand og Smidstrup Strand.

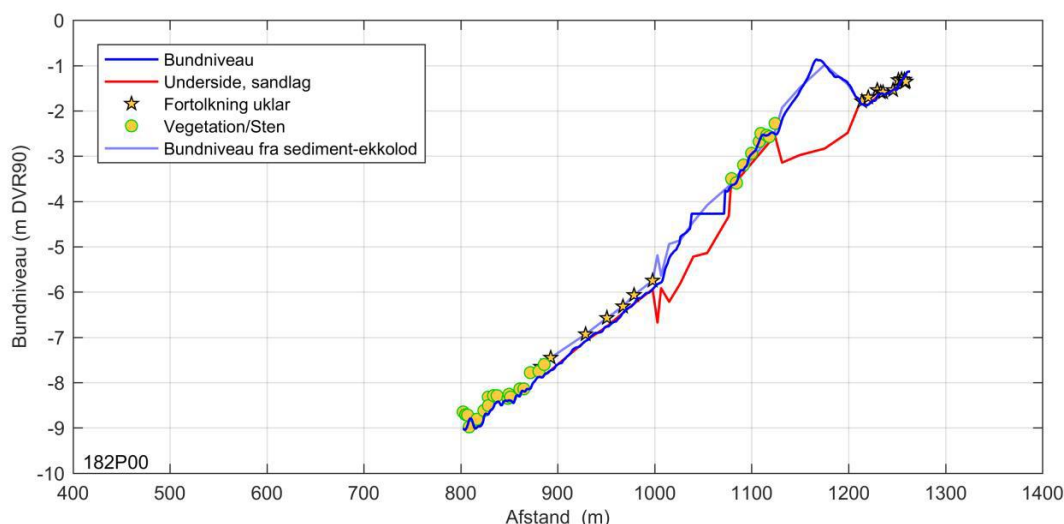


Udvalgte opmålte kystprofiler langs Nordkysten



Figur 3.4 Udvalgte kystprofiler langs hele Nordkysten. Øverste figur angiver placering af kystprofiler og nederste figur angiver opmålingen af kystprofilerne. Profilerne har samme farve i de to figurer, og profilnumre fremgår af begge figurer.

Dataene fra sediment-ekkolodet giver et overblik over, hvor på kyststrækningen, der findes sandaflejringer, samt hvordan tykkelsen af sandlagene varierer over den undersøgte strækning. Generelt ses de tykkeste sandakkumulationer over den inderste revle. Der ses dog store variationer i både sandlagstykkelse samt udbredelse selv over korte strækninger. Et eksempel ses i Figur 3.5, som viser tykkelsen af sandlaget ved kystprofil 182 ud for Helenekilde i Tisvildeleje.



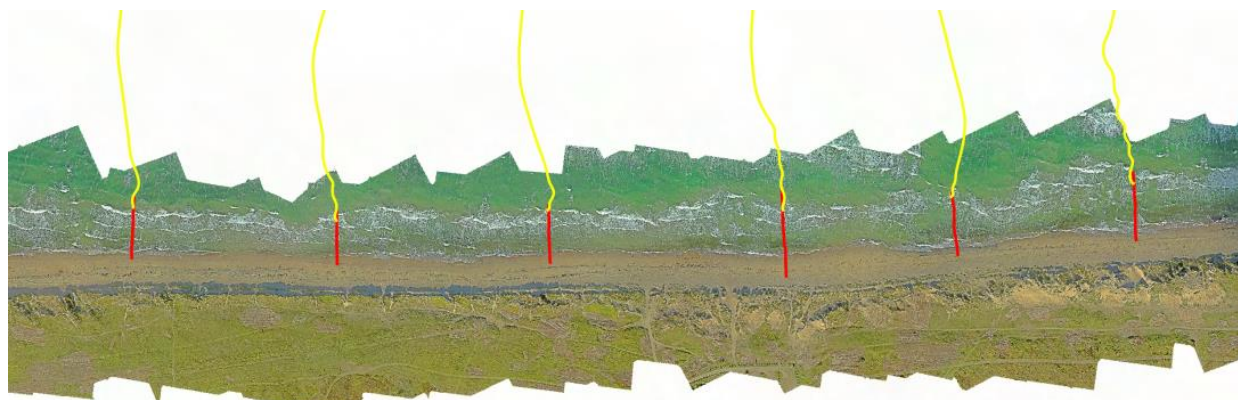
Figur 3.5 Kystprofil 182, ud for Helenekilde i Tisvildeleje. Den mørkeblå kurve viser havbundkurven opmålt med Navisound ekkolod, mens den lyseblå kurve viser havbundkurven baseret på tolkning af seismisk data. Den røde kurve markerer grænsen mellem sandaflejringer og underliggende havbund.

Opmålingen er beskrevet mere detaljeret i rapport vedrørende Bathymetrisk opmåling og bestemmelse af sandlagstykkelse (DHI, 2018a).

3.1.3 Bathymetrisk opmåling på lavt vand

Opmålingerne af topografi og bathymetri er suppleret med overlappende tværgående profiler opmålt med RTK-GPS¹ til fods fra midt på stranden ud til ca. 0,8 m dybde.

GPS-opmålingen er udført i perioden fra d. 6. november til d. 28. november efter stormen Ingolf d. 29. oktober 2017. Eksempel på opmålingen ses i Figur 3.6.



Figur 3.6 Overlap mellem bathymetriske opmåling fra båd (gul) og GPS-opmåling fra land (rød).

¹ GPS-systemer benyttet: Leica Viva GS14 antenne / Leica CS15 controller & Leica Viva GS14 antenne / Leica CS20 Disto controller.

For at sikre den bedst mulige sammenhæng mellem det bathymetriske survey fra båd og GPS-opmålingen fra land, er de planlagte survey-linjer indlæst på GPS'en, hvorefter disse, ved hjælp af den indbyggede afsætningsfunktion, har dannet grundlag for opmålingen af profilinjerne.

Opmålingen er beskrevet mere detaljeret i rapport vedrørende batymetrisk survey på lavt vand (NIRAS, 2018c).

Opmålingen af stranden over og under vand med fly og med dykker er foretaget henholdsvis før og efter stormen Ingolf d. 29. oktober 2017, som beskrives nærmere i afsnit 3.2.5.

3.1.4 Geoteknisk skrivebordsstudie

3.1.4.1 Generelle geologiske forhold

Geologien langs kysten er undersøgt og analyseret ud fra jordartskort, højdemodel samt eksisterende boringer i området. Herudfra vurderes, hvor meget sand, grus, ral og sten, der potentielt kan tilføres kysten fra baglandet langs de strækninger, der eroderer betydeligt tilbage (NIRAS, 2018d).

Langs knapt halvdelen af strækningen er der registreret hård kystbeskyttelse. Eksisterende skråningsbeskyttelser medfører, at erosionen af skråningerne er begrænset og i mange tilfælde for lille til at kunne blive identificeret ud fra luftfoto. Erosionen af skråningerne er betydeligt større på de ubeskyttede strækninger, hvor skrænten i mange tilfælde er rykket betydeligt tilbage de senere år.

De geologiske forhold er beskrevet ud fra karteringskortet vist i Figur 3.7.

Kystlinjen løber primært igennem et morænelandskab aflejret under gletsjerne i seneste istid. Nær kystlinjen er det øverste jordlag præget af postglaciale aflejringer, der ved tidligere fjorde og sunde har dannet strandvolde og flere steder lokale strandvoldssletter med flyvesand.

Det vestlige område fra Hundested til Liseleje er præget af postglaciale aflejringer af flyvesand og saltvandsgrus. Et bælte af senglaciale aflejringer som moræneler og smeltevandssand bryder kystlinjen lige øst for Hundested. Større områder af postglaciale aflejringer er også at finde i form af ferskvandstørv.

Mellem Liseleje og Tisvildeleje er geologien meget homogen med postglaciale aflejringer, saltvandssand og saltvandsgrus. Der er på strækningen fundet en stor strandvoldsslette dækket med flyvesand.

Strækningen Tisvildeleje til Rågeleje er præget af morænelandskab, hvor det kun er det helt kystnære område, der er dækket af saltvandsgrus. Strækningen fra Rågeleje til Gilleleje er kystnært præget af saltvandsgrus og sand med et stort bagvedliggende område med flyvesand.

Gilleleje ligger generelt placeret i et senglacialt område præget af moræneler og smeltevandssletter, dog er kysten præget af saltvandsgrus og sand. Øst for Gilleleje er kystlinjen præget af et morænelandskab med forekomster af moseområder med ferskvandstørv og gytje hele vejen til Helsingør. Kystlinjen fra Dronningmølle til Helsingør er præget af smeltevandssletter, samt en større strandvoldsslette øst for Hornbæk med flyvesand.



De 57 km kyst er gennemgået og alle strækninger med skrænter, som er eroderet betydeligt de seneste 10 år, er registreret. I alt er kystlinjen inddelt i 57 delstrækninger.

Der er foretaget en vurdering af det samlede volumen af sand, grus, ral og sten, der tilføres kysten fra skrænterne langs hele Nordkysten og langs delstrækninger defineret ud fra de foreslåede fodringsstrækninger. Tabel 3.1 viser den samlede længde af de forskellige dominerende sedimenttyper.

Tabel 3.1 Geologisk overblik for kyststrækningen fra Hundested – Helsingør. Se Figur 3.7 mht. geologiklassificering.

Geologi	Antal forekomster [-]	Vægtet gennemsnitshøjde [m]	Samlet udstrækning [m]
HS (Saltvandssand)	15	2,2	7410
HG (Saltvandsgrus)	38	2,2	13950
ES (Flyvesand)	10	7,4	3410
FT (Ferskvandstørv)	1	21,0	50
DS (Smeltevandssand)	3	15,9	460
DG (Smeltevandsgrus)	2	15,8	550
DL (Smeltevandssler)	1	26,0	80
ML (Moræneler)	11	5,9	2570
Sum	81	3,8	28480

Det estimerede sedimentvolumen, som frigives fra skrænterne til kysten, er regnet ud fra udstrækningen/længden (L), højden (H), den gennemsnitlige årlige erosionshastighed (E), og indholdet af sand, grus, ral og sten (S) af hver enkelt delstrækning:

$$V_{\text{sediment}} = \sum L_1 \cdot H_1 \cdot E_1 \cdot S_1 + L_2 \cdot H_2 \cdot E_2 \cdot S_2 + \dots + L_i \cdot H_i \cdot E_i \cdot S_i = 100.000 \frac{\text{m}^3}{\text{år}}$$

I runde tal viser analysen, at erosion af skrånningerne langs Nordkysten giver et samlet tilskud af sand, grus, ral og sten på 100.000 m³/år.

Ler og silt antages at forsvinde ud på dybt vand.

De geotekniske undersøgelser er beskrevet i flere detaljer i et notat, der beskriver det geologiske og geotekniske desk study (NIRAS, 2018d).

3.1.5 Sediment

3.1.5.1 Sedimentprøver

Under feltundersøgelserne er der indsamlet bundprøver på havbunden og på stranden langs fodringsstrækningerne, som beskrevet i skitseprojektet (COWI, 2016).

Sedimentprøverne, som er opsamlet under vandet, er analyseret og beskrevet i rapport udarbejdet af DHI (DHI, 2018) og sedimentprøverne på stranden er analyseret og beskrevet i rapport udarbejdet af NIRAS (NIRAS, 2018b).

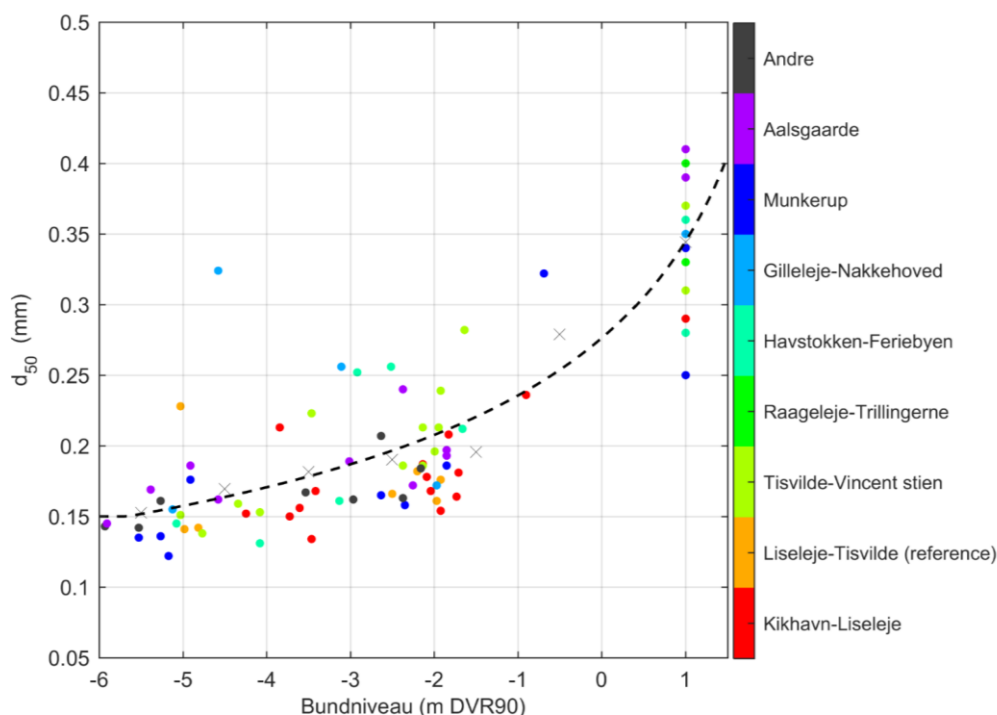
Der er indsamlet 68 prøver af bundsediment på to forskellige vanddybder ved i alt 36 lokaliteter på kyststrækningen mellem Hundested og Helsingør. Ved hver prøvetagningslokalitet er der indsamlet en prøve på lavt vand (1-3 m) og en på dybere vand (5 m).

Der er udtaget prøver af overfladesedimentet på stranden langs kysten mellem Hundested og Helsingør med henblik på bestemmelse af kornstørrelsesfordelingen. Der er i alt taget 28 sedimentprøver langs fodringsstrækninger.

Sedimentprøverne beskriver sandfraktionen af det sand, der ligger på stranden langs Nordkysten. Der er mange strækninger med ral langs Nordkysten. Rallen er dog ikke så mobil som sandfraktionen. Mængden af ral og kornstørrelsesfordelingen af ral er ikke analyseret. Fra kystinspektionen, udført som del af forundersøgelserne og beskrevet nærmere i afsnit 3.1.6, er det dog fundet, at rallet typisk varierer mellem 20-150 mm².

Figur 3.8 viser sammenhængen mellem middeldkornstørrelsen, d_{50} , og prøvetagningsdybden for alle indsamlede sedimentprøver. Figuren viser, at der er en tydelig trend med mindre kornstørrelse på større vanddybde og større kornstørrelse på lavere vanddybde og på stranden.

Analyserne viser, at det mobile bundmateriale på havbunden uden for 0,5 m vanddybde består af fint sand med middeldkornstørrelse $0,12 \text{ mm} < d_{50} < 0,25 \text{ mm}$.



Figur 3.8 Sammenhængen mellem middeldkornstørrelsen d_{50} og prøvetagningsdybden for alle indsamlede sedimentprøver. Stiplet linje er en trendlinje gennem punkterne.

I bølgebrydningszonen og på strandene varierer materialet fra mellemkornet sand over groftkornet sand og grus til ral og sten. For sandfraktionen af strandsandet er gennemsnittet af middeldkornstørrelsen for samtlige prøver $d_{50} = 0,35 \text{ mm}$, mens uensformighedstallet, $U = d_{60}/d_{10}$, ligger mellem 1,5 og 3, hvilket indikerer relativt velsorteret mellemkornet sand.

² Ifølge geoteknikernes og geologernes kornstørrelsesskala kaldes kornstørrelser mellem 20-150 mm for groft grus og sten (Larsen, et al., 1995).

3.1.5.2 Vurdering af sedimenterne langs kysten

Efter seneste istid bestod Nordkysten af moræneformationer, hovedsageligt opbygget af moræneler. Disse formationer er over de sidste ca. 10.000 år nedbrudt grundet påvirkninger fra højvande og stormbølger. Bugterne mellem de eroderende formationer er efterhånden fyldt ud med sand og ral, som er transporteret fra nedbrydningsområderne langs kysten i littoralzonen (kystzonen, hvor den langsgående sedimenttransport kan foregå) og hen til bugterne. Nettotransporten af sand og ral på Nordkysten er mod nordøst på strækningen mellem Kikhavn og Gilbjerg Hoved, mod sydvest på strækningen mellem Kikhavn og Hundested Havn og mod østsydøst på strækningen øst for Gilbjerg Hoved. Det eroderede materiale består af alle kornfraktioner fra ler over sand og grus til ral og sten.

Leret suspenderes i vandet og transporteres bort fra littoralzonen og aflejres typisk på dybere vand. Sandet transporteres langs kysten, hvor det udgør langstransporten. Ral transporteres langsomt langs kysten og har herudover en tendens til at blive transporteret landværts op på bagstranden i form af ralstrandvolde under højvande og bølgepåvirkning. Sten forbliver stort set på stedet, hvor de er eroderet ud af morænepartiet. På strækningerne med eroderende morænepartier, er der således dannet stejle klinter med en strand bestående af en blanding af store sten, ral og sand. På strækninger, som er fyldt ud med marint transporterede aflejringer, består kystsedimenterne hovedsageligt af sand og til dels ral samt flyvesand, som danner klitter. På mange kyststrækninger er der dannet sandrevler, hvor hovedparten af langstransporten foregår. Langstransporten kan således deles op i to dele, dels transporten på revlerne, som hovedsageligt består af fint sand, og dels transporten i havstokken og på forstranden, som hovedsageligt består af mellemkornet sand.

Ovennævnte processer skaber, i kombination med bølger, som forplanter sig næsten vinkelret ind på kysten, en såkaldt udligningskyst, der forløber næsten retlinet mellem klinten ved Hundested (Spodsbjerg) og Gilbjerg Hoved. Mellem Gilbjerg Hoved og Helsingør rammer de store bølger kysten under 45 grader, hvilket giver anledning til et mere bølgende kystlinjeforløb. I dag foregår der erosion langs stort set hele kyststrækningen fra Hundested til Helsingør. Havnene og de mange hårde kystbeskyttelses anlæg i form af høfder og bølgebrydere griber dog ind i transportforholdene langs kysten således, at der forekommer sandaflejring vest for disse anlæg og i læ af bølgebryderne på stranden.

De naturlige strande langs Nordkysten varierer som følger:

- Ved morænepartierne: Stenet strand med ral og sand samt sandrevler og kystklint.
- Ved områder, som er opfyldt med marint transporterede materialer: Sandstrand med varierende mængder ral samt sandrevler og sandklitter i bagland.
- Opstrøms for havne og større aktive kystbeskyttelseskonstruktioner: Sandstrand med ral samt evt. klitter i baglandet.

3.1.6 Registrering af kystbeskyttelse

NIRAS har i 2017 foretaget inspektion af kysten og eksisterende hård kystbeskyttelse langs Nordkysten mellem Hundested Havn og Helsingør Nordhavn.

Naturområdet Melby Overdrev og Tisvilde Hegn er ikke gennemgået, da strækningerne er ensartet naturlig kyst uden konstruktioner.

Kystinspektionerne og registrering af eksisterende kystkonstruktioner og vurdering af kystens tilstand er gennemført over 8 dage i perioden fra 17. oktober 2017 til 15. november 2017.

Stormen Ingolf ramte Nordkysten 28. oktober 2017, midt i registreringsperioden. Stormen medførte forhøjet vandstand på op til +1,2m DVR90 i Hornbæk Havn og stor bølgepåvirkning fra nord og nordvest. Alle inspektioner fra Hundested Havn til og med Tisvilde Hegn er foretaget før Ingolf, mens inspektion af strækningen fra Tisvilde Hegn til Helsingør Nordhavn er foretaget efter Ingolf. Flere steder var der tydelige spor på kysten efter stormen.

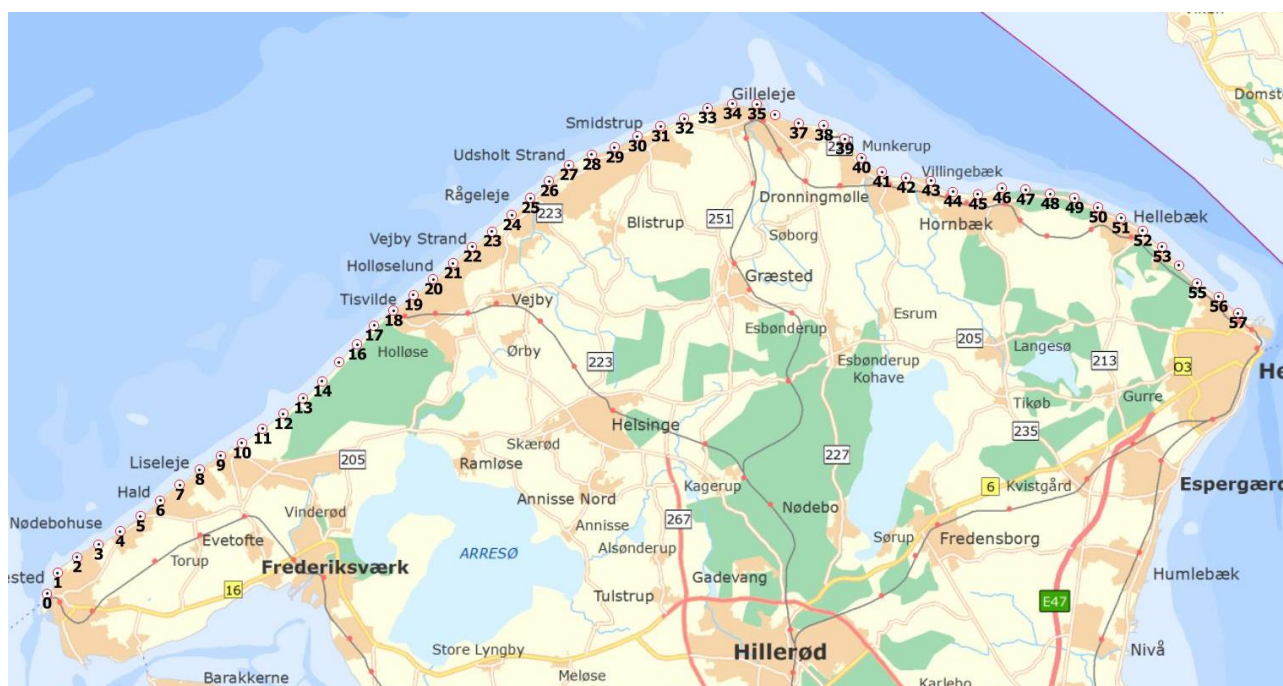
Til referering af alle beskrivelser, konstruktioner og observationer er der oprettet en stationering mellem Hundested Havn og Helsingør Nordhavn, se Figur 3.9.

Under inspektionerne blev alle tilgængelige kystkonstruktioner visuelt vurderet i forhold til geometri, materiale og tilstand.

Stenstørrelser for alle typer konstruktioner (høfder, bølgebrydere og skråningsbeskyttelser) blev bestemt, medmindre konstruktionen ikke var tilgængelig fra land. Ved visuel vurdering udvalgte en repræsentativ sten for stenstørrelserne henholdsvis d_{15} og d_{85} (15 % og 85 % fraktilen), som blev målt med tommestok.

Hældningen af forsiden af skråningsbeskyttelse blev målt med digital hældningsmåler. Opmåling af hældningen blev foretaget hver gang, der forekom ændring i enten hældning eller stenstørrelse på kystkonstruktionerne.

Derudover blev alle anlæg dokumenteret med georefererede foto.



Figur 3.9 Oversigtskort med stationering fra Hundested til Helsingør. De viste markeringer viser stationering for hver kilometer langs kysten.

Bund- og topkoter af skråningsbeskyttelser blev bestemt ved hjælp af GIS efter udarbejdelse af ortofoto og topografisk opmåling.

Efter endt registrering er alle informationer overført til GIS og knyttet til den oprettede stationering. Derudover er alle informationer om kystkonstruktionerne overført til en database, som benyttes som udgangspunkt for

vurdering af anlæggenes tilstand. I vurderingen indgår registrerede stenstørrelser, konstruktionernes hældning, topkote, bundkote og længde.

I det følgende vises en række fotos (Figur 3.10-Figur 3.35) fra kystinspektionerne, som dokumenterer kystens og kystbeskyttelsens aktuelle tilstand på udvalgte karakteristiske lokaliteter.



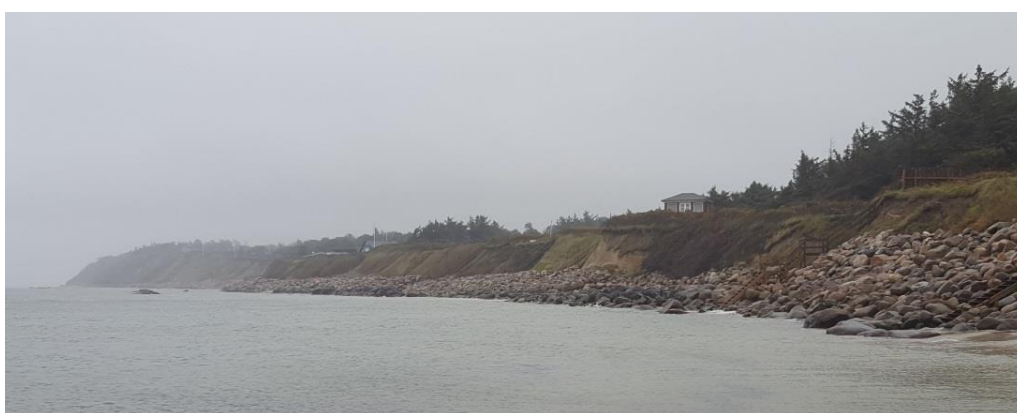
*Figur 3.10 Ubeskyttet strækning med aktiv skrænterosion, Spodsbjerg Øst (St. 1,4-1,9).
Fotoet er taget d. 17-10-2017.*



*Figur 3.11 Kikhavn beskyttet med bølgebrydere og skråningsbeskyttelse (St. 1,9-3,3).
Fotoet er taget d. 17-10-2017.*



Figur 3.12 Lavtliggende bagland beskyttet med skråningsbeskyttelse og bølgebrydere ved Galgebjerg (St. 3,3-4,4). Fotoet er taget d. 17-10-2017.



Figur 3.13 Aktiv skrænterosion over skråningsbeskyttelse ved Hald Strand (St. 4,4-6,8). Fotoet er taget d. 25-10-2017.



Figur 3.14 Bølgebryder og skråningsbeskyttelse ved Hyllingeberg (St. 6,8-7,7). Fotoet er taget d. 25-10-2017.



Figur 3.15 Skråningsbeskyttelse ved Liseleje (St. 7,7-9,5). I baggrunden ses også en bølgebryder. Fotoet er taget d. 25-10-2017.



Figur 3.16 Skråningsbeskyttelse ved Liseleje (St. 7,7-9,5). Fotoet er taget d. 25-10-2017.



Figur 3.17 Kyststrækning med skråningsbeskyttelse og erosion bag bølgebrydere ved Vejby Strand (St. 17,4-22,8). Fotoet er taget d. 31-10-2017.



Figur 3.18 Rågeleje Strandvej beskyttet mod erosion af betonmur (St. 24,9-26,4).
Fotoet er taget d. 31-10-2017.



Figur 3.19 Ubeskyttet strand ved Udsholt overvejende dækket med ral (St. 26,4-28,3).
Fotoet er taget d. 01-11-2017.



Figur 3.20 Smidstrup Strand beskyttet ralstrand (St. 28,3-32,0). Fotoet er taget d. 01-11-2017.



Figur 3.21 Smidstrup Strand ubeskyttet ralstrand (St. 28,3-32,0). Fotoet er taget d. 01-11-2017.



Figur 3.22 Erosionskyst med aktiv skrænterosion ved Gilbjerg Hoved (St. 32,0-33,0).
Fotoet er taget d. 01-11-2017



Figur 3.23 Gilleleje Strand beskyttet med skråningsbeskyttelse og bølgebrydere (St. 33,0- 35,2).
Fotoet er taget d. 01-11-2017.



Figur 3.24 Generelt ubeskyttet kyststrækning med aktiv skrænterosion ved Nakkehoved (St. 37,4-39,6). Fotoet er taget d. 06-11-2017.



Figur 3.25 Bølgebryder udført i betonelementer ved Nakkehoved Fyr (St. 37,4-39,6). Fotoet er taget d. 06-11-2017.



Figur 3.26 Kyststrækning ved Munkerup delvist beskyttet samt delvist dækket af ral (St. 39,6-41,1). Fotoet er taget d. 06-11-2017.



Figur 3.27 Dronningmølle Strand med klitter (St. 41,1-42,2). Fotoet er taget d. 06-11-2017.



Figur 3.28 Beskyttet kyst med skråningsbeskyttelser og høfder ved Villingebæk (St. 42,2-43,2). Fotoet er taget d. 08-11-2017.



Figur 3.29 Ubeskyttet aflejringskyst fra Horneby Strand mod øst til Hornbæk Strand (St. 43,2-45,9). Fotoet er taget d. 08-11-2017.



Figur 3.30 Ubeskyttet erosionskyst i den vestlige del af Hornbæk Plantage (St. 46,1-48,6). Bemærk erosionskant i strandfodringsmateriale efter stormen Ingolf 28. oktober 2017. Fotoet er taget d. 08-11-2017.



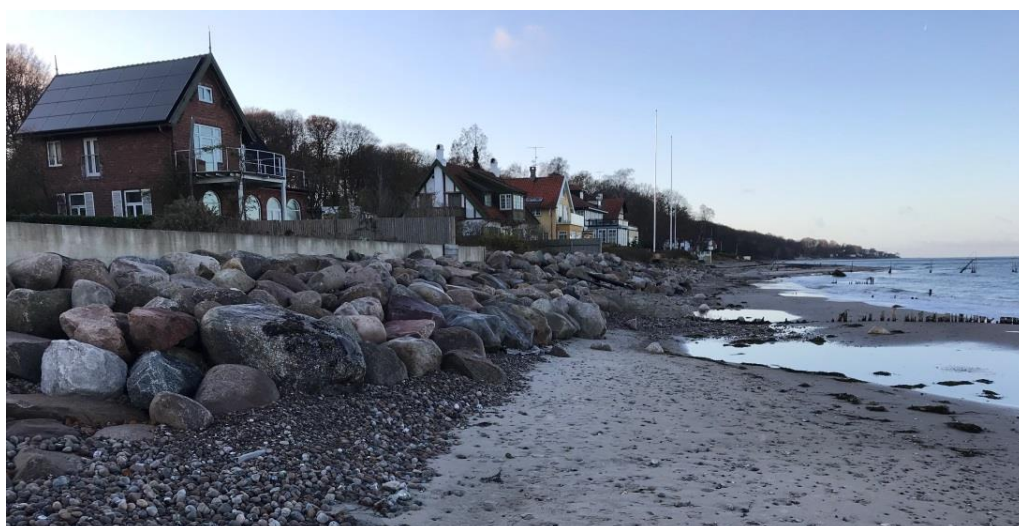
Figur 3.31 Kyststrækning ved Ålgårde beskyttet med skråningsbeskyttelse, bølgebrydere og høfder (St. 49,5-50,5). Fotoet er taget d. 14-11-2017.



Figur 3.32 Kystbeskyttelse i form af høfder og skråningsbeskyttelser ved Ålgårde (St. 50,5-53,2). Fotoet er taget d. 14-11-2017.



Figur 3.33 Kyststrækning præget af skråningsbeskyttelser og hølfer ved Hellebæk (St. 53,2-54,2). Fotoet er taget d. 15-11-2017.



Figur 3.34 Højstrup Strand præget af usammenhængende skråningsbeskyttelser (St. 55,2-57,2). Fotoet er taget d. 15-11-2017.



Figur 3.35 Marienlyst Strand præget af luvside aflejring vest for Helsingør Nordhavn (St. 57,2-57,8). Fotoet er taget d. 15-11-2017.

Inspektionerne viser, at der er mange kystkonstruktioner langs de bebyggede dele af Nordkysten i form af skråningsbeskyttelser, høfder og bølgebrydere.

Stranden er generelt meget smal på de strækninger, hvor der er anlagt hård kystbeskyttelse og der er i en lang række tilfælde tegn på erosion af skråningerne bag stranden.

Stranden består af en blanding af ral og sand. Rallen ligger ofte på den øverste del af stranden, mens sandet ligger foran.

3.1.7 Tilstandsvurdering uden strandfodring

3.1.7.1 Indledning

NIRAS har udarbejdet en tilstandsvurdering af eksisterende kystbeskyttelseskonstruktioner langs Nordkysten baseret på data indsamlet i forbindelse med kystinspektionerne (NIRAS, 2018a). Vurderingen er udført i 2017, hvorved det forventes, at tilstanden af anlæggene, hvis de ikke er blevet udbygget, vil være forværret siden analysen blev udført.

Tilstandsvurderingen er opdateret med resultaterne fra de numeriske modeller udarbejdet af DHI og er derfor anderledes end resultaterne præsenteret som del af forundersøgelserne (NIRAS, 2018a). Den nye tilstandsvurdering er baseret på mere detaljeret modellering og vurderes derfor at være mere præcis.

Indledningsvist er det vurderet om kystbeskyttelseskonstruktionerne, med nuværende beskyttelsespraksis uden strandfodring, vil kunne modstå den dimensionsgivende hændelse med en returperiode på 50 år i dag, om 25 og 50 år.

Konstruktionerne er desuden vurderet i forhold til, om de vil kunne opgraderes til det fastlagte beskyttelsesniveau ved forhøjelse, eller om konstruktionerne bør genopbygges fra bunden. Tilstandsvurderingen er tilgængelig på Halsnæs Kommunes hjemmeside³.

³<https://drift.kortinfo.net/Map.aspx?page=nkf&site=Halsnaes>

3.1.7.2 Dimensioneringskriterier

Valget af den dimensionsgivende returperiode, dvs. den designstorm/hændelse, beskyttelsen designs til at kunne modstå, vælges på baggrund af konstruktionens levetid og valg af sandsynlighed for, at returperioden forekommer indenfor levetiden.

Dimensioneringskriterier for skråningsbeskyttelser, bølgebrydere og høfder er angivet i Tabel 3.2.

Det er besluttet, at kystbeskyttelsen samlet set skal kunne modstå en stormhændelse, der i gennemsnit optræder én gang hvert 50. år (returperiode på 50 år). Den anbefalede standard af skråningsbeskyttelser, bølgebrydere og høfder på Nordkysten er, at de skal kunne modstå hændelsen over en levetid på 50 år uden betydelige skader.

Tabel 3.2 Anbefalede dimensioneringskriterier for hård kystbeskyttelse på Nordkysten. Sandsynligheden svarer til sandsynligheden for forekomst af 50-årshændelse (returperiode) indenfor levetiden på 50 år.

Dimensioneringskriterier	Hård kystbeskyttelse
Levetid, L	50 år
Klimascenarie (IPPC)	SSP5-8.5
Sandsynligheden for skader, R, indenfor levetiden	64 %
Returperiode	50 år

Tilstandsvurderingen af eksisterende skråningsbeskyttelser, bølgebrydere og høfder er udarbejdet i forhold til en returperiode på 50 år. Konstruktionernes tilstand vurderes for forholdende i dag, om 25 år og om 50 år.

3.1.7.3 Dimensionering af hård kystbeskyttelse uden strandfodring

Dimensionering af stenstørrelse og topkote af kystbeskyttelseskonstruktionerne varierer som funktion af vandstand, bølgehøjde, konstruktionens forsidehældning og strandkote.

Den nødvendige størrelse af dækstenene dimensioneres ud fra Van der Meers formel for lavt vand med et skadesniveau på $S_d \leq 3$ (CIRIA, CUR, CETMEF, 2007 (reprinted 2012)). Dette betyder, at der kan forekomme mindre skader på konstruktionen i forbindelse med en dimensionsgivende storm.

Bølgeoverskyl kan skabe oversvømmelse og erosion af bagvedliggende terræn. Langs Nordkysten er der oftest en høj skrænt bagved skråningsbeskyttelserne. Skråningerne er ofte sårbare over for bølgeoverskyl.

Skråningsbeskyttelsernes topkote fastlægges ud fra et gennemsnitlig tilladeligt bølgeoverskyl på maksimalt 2 l/s/m, der vurderes at være den tilladelige grænse for at hindre erosion af skrænten bag skråningsbeskyttelserne. Bølgeoverskyl beregnes ud fra EurOtop manualen (EurOtop, 2016).

Stabiliteten af bølgebrydere, høfder og skråningsbeskyttelser afhænger primært af størrelsen af dækstenene, opbygningen af tåen (bunden af anlægget), opbygningen af konstruktionen samt konstruktionens hældning på forside og bagside.

Hældningen af stenkonstruktionerne anbefales generelt at være 1:2. Denne hældning begrænser konstruktionens horisontale udstrækning og er sædvanligvis økonomisk optimal.

Lagstrukturen bør indeholde 2 lag dæksten udlagt på et lag af filtersten. Derudover anbefales en geotekstil under filterlaget, der sikrer, at underliggende materiale ikke suges ud gennem filterlaget og derved skaber sætninger.

Den teoretiske tykkelse af dækstenslaget er 1-2 gange den nominelle stenstørrelse, $D_{n50,a}$.

Omregning mellem den nominelle stenstørrelse (D_n) og den naturlige afrundede stenstørrelse (D) findes som (CIRIA, CUR, CETMEF, 2007 (reprinted 2012)):

$$D_n = 0.84D$$

Filterlaget bør som minimum være 3-4 gange den nominelle filterstenstørrelse, $D_{n50,f}$, og som minimum 0,40 m tykt.

For at sikre imod udvaskning af filterstenene gennem dækstenene, anvendes en gradering, som opfylder nedenstående filterlagskriterier:

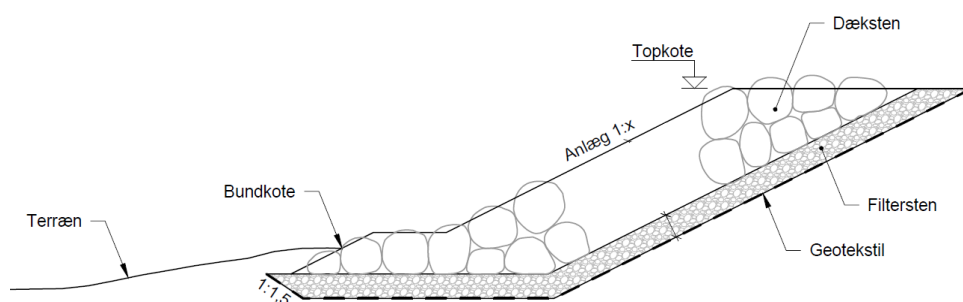
$$\frac{d_{15,a}}{d_{85,f}} \leq 4 \quad , \quad \frac{d_{50,a}}{d_{50,f}} \leq 7 \quad , \quad \frac{d_{15,a}}{d_{15,f}} \leq 7 \quad - \quad (\text{Thompson \& Schuttler, 1976})$$

og

$$\frac{d_{15,a}}{d_{85,f}} \leq 4 - 5 \quad , \quad \frac{d_{15,a}}{d_{15,f}} \leq 20 - 25 \quad - \quad (\text{Jensen, 1984})$$

Hvor "a" refererer til dæksten, "f" refererer til filtersten og 15, 50 og 85 refererer til hhv. 15 %, 50 % og 85 % fraktilen.

For skråningsbeskyttelser anbefales det i mange tilfælde at etablere en tå (bunden af anlægget) med en bredde svarende til 3 dæksten i 1 eller 2 lag og med filterlag og geotekstil nedenunder, se Figur 3.36. Tåen vil forhindre underminering af konstruktionen i tilfælde af, at stranden eroderer ned under funderingsniveauet foran. Tåen graves typisk ned i stranden til under erosionsniveauet ved akut erosion.

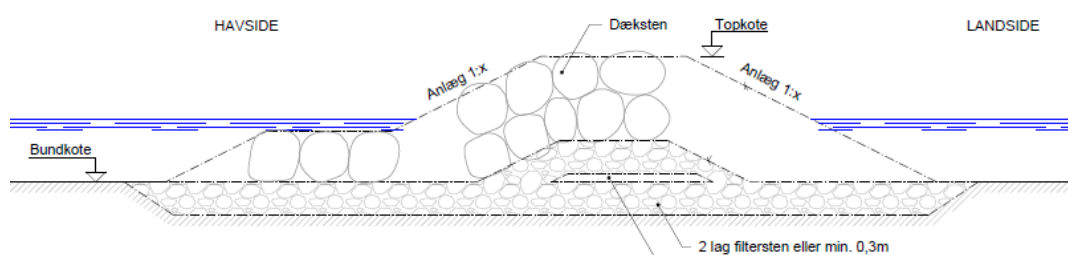


Figur 3.36 Principskitse af skråningsbeskyttelse uden betonblok.

Skråningsbeskyttelser kan med fordel opbygges med en betonblok til afgrænsning mellem dæksten og fyld ved konstruktionens top. Herved reduceres udvaskning og erosion af skråningen bagved.

For bølgebrydere og høfder bør tåen af dæksten være i et eller to lag på den bølgeeksponerede side og rundt om enderne, mens dæksten blot føres ned til filterlaget på landsiden, se Figur 3.37. Dækstenene rundt om enderne og langs bagsiden bør være 10-30 % større end på havsiden. Derudover bør hele konstruktionen placeres på en pude af filtersten, som er minimum 0,4 m tyk.

Ved etablering af bølgebrydere og høfder, bør rallaget placeres oven på den eksisterende bund eller graves lidt ned i havbunden. Med tiden vil tåen dog synke lidt ned i bunden.



Figur 3.37 Principskitse af bølgebryder.

Skråningsbeskyttelser, høfder og bølgebrydere dimensioneres med udgangspunkt i vanddybden umiddelbart foran konstruktionerne.

Vanddybden ved foden af konstruktionerne bestemmes ud fra det eksisterende strandniveau.

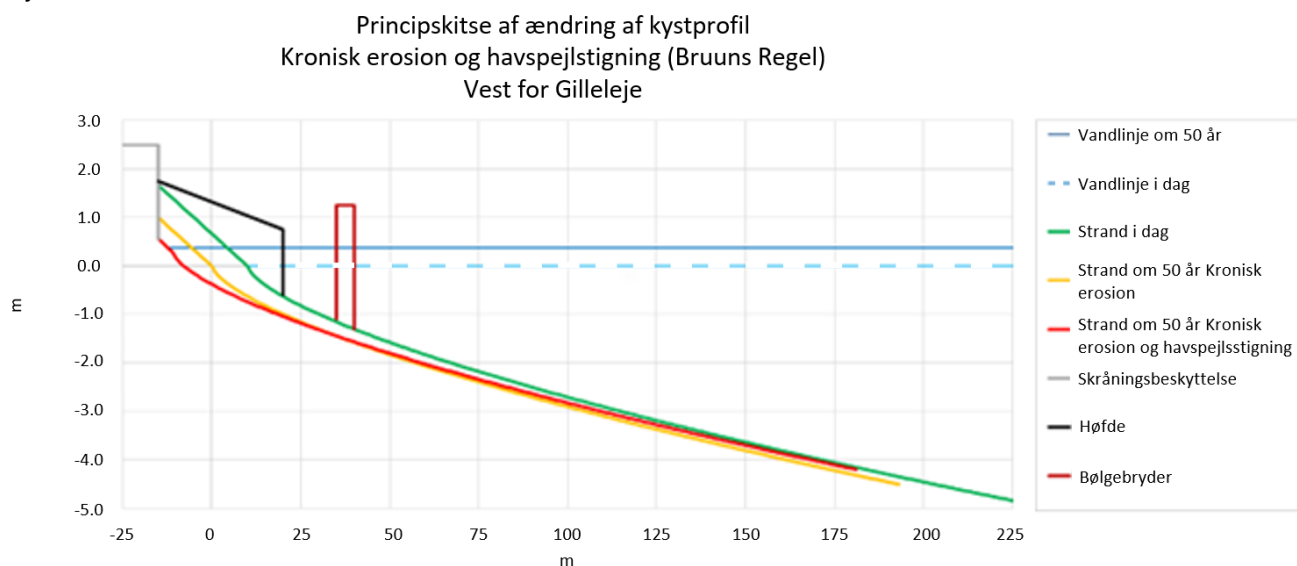
For skråningsbeskyttelserne er strandens højde aflæst fra den digitale højdemodel.

For høfder og bølgebrydere beregnes den nuværende dybde ved konstruktionen ud fra det teoretiske ligevægtsprofil for sand med en middeldkornstørrelse på $d_{50}=0,35$ mm og en strandhældning på 1:15. Der tages udgangspunkt i afstanden fra konstruktionen til den nuværende strandlinje langs kysten, når vanddybden ved konstruktionen beregnes.

Herefter reduceres strandens højde foran konstruktionerne i forhold til den historiske kroniske erosion på stedet, som medfører, at ligevægtsprofilen rykker tilbage. I Figur 3.38 er den grønne linje ligevægtsprofilen i dag og den gule linje fremtidens ligevægtsprofil, som er rykket tilbage pga. den kroniske erosion.

Dernæst korrigeres strandens højde foran konstruktionerne som funktion af havspejlsstigningens ændring af kystprofilen ved hjælp af Bruuns Regel. I Figur 3.38 er den gule kurve det fremtidige kystprofil som følge af kronisk erosion og den røde linje viser, hvordan kystprofilen ændres pga. havspejlsstigningerne. Figuren viser prin-

cippet for, hvorledes kystprofilen forventes at udvikle sig foran typiske skråningsbeskyttelser, høfder og bølgebrydere.



Figur 3.38 Ligevægtskystprofil benyttes til at beregne strandens højde foran kystbeskyttelseskonstruktioner som funktion af kronisk erosion og herefter som funktion af havspejlstigning. Grøn kurve: ligevægtsprofilen i dag, gul kurve; fremtidens ligevægtsprofil som følge af kronisk erosion, rød kurve: profil ændret pga. havspejlstigninger.

Den akutte erosion beregnes med udgangspunkt i den fastlagte højde af stranden foran konstruktionerne før en storm. Den akutte erosion er beregnet for sand med numerisk modellering for en række forskellige højder af stranden foran konstruktionerne.

Modelresultaterne er benyttet til at fastlægge den endelige minimumshøjde af stranden foran kystbeskyttelseskonstruktionerne samt den dimensionsgivende bølgehøjde og designvandstand, se Afsnit 3.2.5.4.

Den akutte erosion er ikke inkluderet i beregninger i tilfælde af, at der er betydelige mængder ral på stranden, da det vurderes, at rallen giver en god beskyttelse mod akut erosion.

For eksisterende forhold antages, at der er ral på stranden foran skråningsbeskyttelserne sydvest for pynten ved Kikhavn og nordøst for Heatherhill til Helsingør. Desuden antages, at der er sand på stranden mellem pynten ved Kikhavn og Heatherhill.

Ved bestemmelse af de dimensionsgivende parametre foran kystbeskyttelseskonstruktionerne, tages der hensyn til, om konstruktionerne er beliggende på den vestlige eller østlige del af Nordkysten.

De dimensionsgivende parametre bestemmes under nuværende forhold, om 25 år og om 50 år.

Den nødvendige stenstørrelse og topkote for en given konstruktion findes derefter ved lineær interpolation mellem beregnede værdier.

Kronisk og akut erosion samt havspejlstigning betyder, at vanddybden foran konstruktionerne øges med tiden. Dette medfører, at dimensioneringskravene ligeledes forøges fremover.

Til vurdering af tilstanden af eksisterende skråningsbeskyttelse, er der beregnet nødvendige stenstørrelser og frihøjder for 12 forskellige vanddybder, 4 forsidehældninger og for bølgeklimaet for den vestlige og den østlige del af Nordkysten. Nødvendig topkote af skråningsbeskyttelserne findes som summen af vandstanden foran

konstruktionen og frihøjden. Frihøjden er forskellen mellem konstruktionens højde og vandstanden under stormen.

De beregnede dimensioner er vist i Tabel 3.3 for den vestlige kyststrækning og i Tabel 3.4 for den østlige kyststrækning.

Resultaterne viser, at den nødvendige stenstørrelse reduceres ved faldende vanddybde og ved fladere anlæg.

Ligeledes reduceres frihøjden for skråningsbeskyttelserne ved faldende vanddybde.

*Tabel 3.3 Nødvendig dækstenstørrelse (D_{50}) og frihøjde (R_c) for forskellige kombinationer af forsidehældning og vanddybde for skråningsbeskyttelser **vest** for Gilleleje Havn.*

Forsidehældning [1:x]	1,5		2,0		2,5		3,0	
	D_{50} cm	R_c m	D_{50} cm	R_c m	D_{50} cm	R_c m	D_{50} cm	R_c m
0,63 [m]	24	0,42	21	0,42	19	0,42	18	0,42
0,98 [m]	42	0,85	38	0,85	34	0,85	32	0,85
1,33 [m]	62	1,32	55	1,32	50	1,32	47	1,32
1,63 [m]	79	1,76	71	1,76	65	1,76	60	1,76
1,91 [m]	96	2,18	85	2,18	78	2,18	72	2,18
2,17 [m]	110	2,56	98	2,56	89	2,56	83	2,56
2,43 [m]	122	2,90	109	2,90	100	2,90	92	2,90
2,60 [m]	130	3,11	116	3,11	106	3,11	96	3,11
2,90 [m]	140	3,38	124	3,38	111	3,38	101	3,38
3,39 [m]	150	3,66	130	3,66	116	3,66	106	3,66
3,89 [m]	159	3,98	138	3,98	123	3,98	112	3,98
4,38 [m]	167	4,28	145	4,28	130	4,28	118	4,28

Tabel 3.4 Nødvendig dækstenstørrelse (D_{50}) og frihøjde (R_c) for forskellige kombinationer af forsidehældning og vanddybde for skråningsbeskyttelser **øst** for Gilleleje Havn.

Forsidehældning [1:x]		1,5		2,0		2,5		3,0	
Vanddybde foran konstruktion		D_{50} cm	R_c m	D_{50} cm	R_c m	D_{50} cm	R_c m	D_{50} cm	R_c m
0,63	[m]	23	0,39	20	0,39	18	0,39	17	0,39
0,98	[m]	40	0,80	36	0,80	33	0,80	31	0,80
1,33	[m]	59	1,25	52	1,25	48	1,25	45	1,25
1,63	[m]	79	1,74	70	1,74	64	1,74	60	1,74
1,91	[m]	94	2,14	84	2,14	77	2,14	71	2,14
2,17	[m]	109	2,54	97	2,54	89	2,54	83	2,54
2,43	[m]	120	2,84	107	2,84	98	2,84	91	2,84
2,60	[m]	127	3,03	113	3,03	104	3,03	95	3,03
2,90	[m]	136	3,29	121	3,29	109	3,29	99	3,29
3,39	[m]	145	3,54	127	3,54	114	3,54	104	3,54
3,89	[m]	155	3,82	134	3,82	120	3,82	110	3,82
4,38	[m]	163	4,06	141	4,06	126	4,06	115	4,06

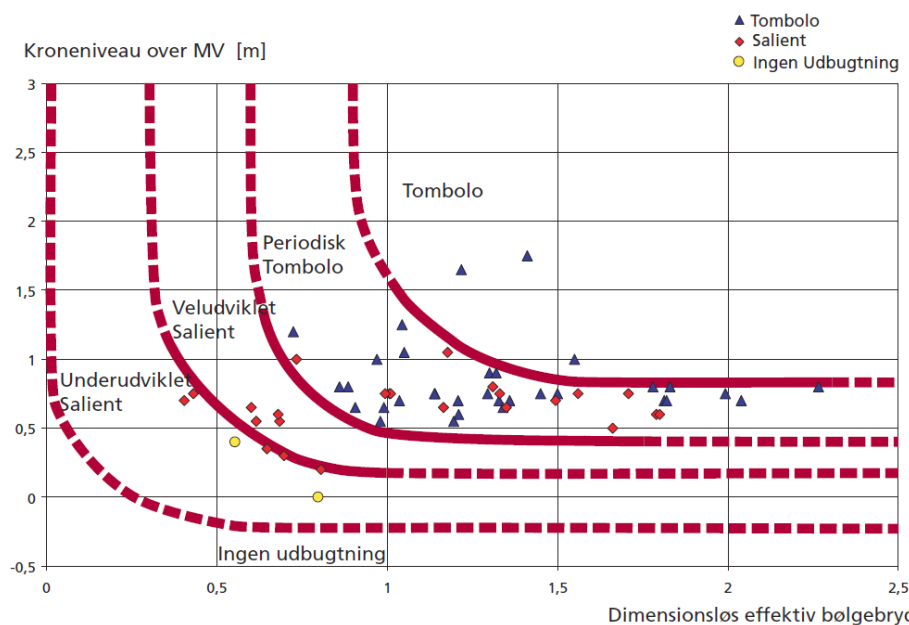
Bølgebrydernes og høfdernes funktion er ikke at beskytte mod bølgeoverskyl, men at stabilisere sand og ral i luvzonen (siden der vender mod den primære transportretning, hvor materialer aflejres) og ved tomboloen (landtange af sand eller sten der forbinder bølgebryder og strand) landværts for bølgebryderne og således opbygge en bredere strand. Dette vil reducere bølgeenergien og beskytte bagstranden og baglandet, samt eventuel skråningsbeskyttelse.

Topkoten for bølgebryderne vurderes ud fra bølgeklimaet og vandstandsforholdene. Længden af bølgebryderne vurderes ud fra det dimensionsløse bølgebryderindeks (L_B^*), som er bølgebryderens længde (L_B) ift. bølgebryderens afstand fra kystlinjen (x):

$$L_B^* = \frac{L_B}{x}$$

Kystdirektoratet har vurderet denne parameter i forhold til kystmorfologien bagved ud fra litteraturen.

Figur 3.39 er anvendt som udgangspunkt for tilstandsvurderingen og sammenlignet med 59 eksisterende bølgebrydere mellem Hundested og Helsingør (Kystdirektoratet, 2001).



Figur 3.39 Morfologisk respons-diagram baseret på 59 bølgebrydere på strækningen fra Kikhavn til Helsingør. De enkelte konstruktioners kroneniveau (topkote) i forhold til middelvandstanden er afsat som funktion af det dimensionsløse bølgebryderindeks, L_B^* (bølgebryderens længde divideret med bølgebryderens afstand til kysten) (Kystdirektoratet, 2001).

Figuren viser, at en effektiv bølgebryder med dimensionsløse bølgebryderindeks større end 1,3 skal have en topkote på minimum +1,0 m over daglig vande for dannelse af en permanent tombolo bagved. Det ses også, at de fleste bølgebryderes topkote langs Nordkysten er lavere og derfor kun har periodisk tombolo eller salient (fremspring af stranden bag bølgebryderen, uden at forbinde bølgebryder med stranden som en tombolo).

Det anbefales, at bølgebryderens topkote er minimum +1,25 m over daglige vande for at sikre permanent eller næsten permanent tombolo. Den valgte dimensionsløse effektive bølgebryderlængde er bestemmende for, om der ønskes en permanent tombolo.

Ved tilstandsvurderingen for år 2052 og 2077 tillægges forventet relativ havspejlsstigning til topkoten. Anbefalede topkoter er vist i Tabel 3.5.

Ved opførelse af nye bølgebrydere foreslås, at disse anlægges med en topkote på +1,6 m DVR90.

Tabel 3.5 Anbefalet topkote af hølfer og bølgebrydere.

Bølgebrydere og hølfer		2027	2052	2077
Dimensions-rende topkote	[cm DVR90]	+125	+137	+154

Opbygningen af hølfer og bølgebrydere er principielt ens, og vurderes derfor efter samme designkrav.

Bølgebrydere og hølfer forventes at stå under vand ved dimensionsgivende stormhændelser. Det er derfor vigtigt at dækstenene på bagsiden af konstruktionerne kan modstå bølgeoverskyllet. Derfor anbefales, at dækstenene på kronen og bagsiden og rundt om enderne er lidt større end dækstenene på forsiden.

3.1.7.4 Tilstandsvurdering af hård kystbeskyttelse

Eksisterende skråningsbeskyttelser er vurderet ud fra, om dækstenene er store nok og om topkoten er høj nok, til at kunne modstå og beskytte mod den dimensionsgivende hændelse.

Hvis forsidehældningen er stejlere end 1:1,5 er konstruktionen vurderet til at være ustabil og bør derfor genopbygges. Hvis hældningen er fladere end 1:3 anvendes dimensioneringskriterier for en hældning på 1:3.

Hvis stenene er for små, er det vurderet, at anlægget ikke er stærkt nok til at kunne modstå den dimensionsgivende hændelse. En genopbygning er derfor nødvendig.

Hvis anlægget er for lavt, er det vurderet om den rette højde kan opnås blot ved at lægge ekstra sten på af samme størrelse eller større oven på.

Medmindre andet var synligt under inspektionen, er det antaget, at de enkelte skråningsbeskyttelser er korrekt kystteknisk opbygget efter anbefalede standarder, som vist i Figur 3.36.

Bølgebrydernes og høfdernes tilstand og styrke vurderes udelukkende ud fra deres topkote og stenstørrelser.

For- og bagsidehældningen på bølgebryderne og høfderne er ikke registreret under inspektionen. Hældningen af konstruktionerne antages derfor at være 1:2.

I tilstandsvurderingen er det antaget, at bølgebrydere og høfder er opbygget kystteknisk korrekt.

3.1.7.5 Tilstandsvurdering af hård kystbeskyttelse uden strandfodring

Langs Nordkysten er der registreret i alt 38,3 km konstruktioner, se Tabel 3.6.

Af disse er der udført tilstandsvurdering på i alt 25,6 km. Der er ikke udført tilstandsvurdering på højvandsmure, betonhøfder og utilgængelige bølgebrydere, hvor stenstørrelsen ikke kunne registreres.

Der er ikke udført tilstandsvurdering på de skråningsbeskyttelser, som blot består af enkelte rækker sten placeret på stranden, pæleværker, palisadevægge, gabioner o. lign. Som udgangspunkt kan sådanne konstruktioner ikke anbefales som kystbeskyttelse på Nordkysten og bør derfor fjernes og erstattes af mere effektive og robuste løsninger.

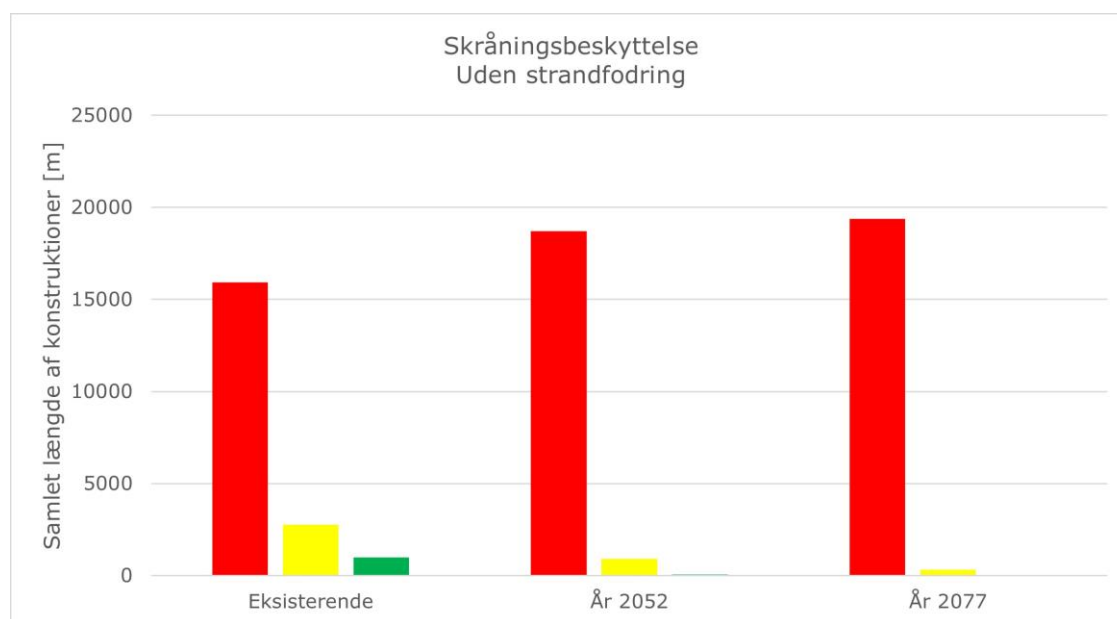
Tabel 3.6 Samlet længde af registrerede konstruktioner samt længde af konstruktioner, hvorpå der er udført tilstandsvurdering.

	Total længde	Længde med tilstandsvurdering
	[m]	[m]
Skråningsbeskyttelse	22.930	18.500
Højvandsmur	4.630	20
Bølgebryder	5.860	4.050
T-høfder	240	150
Høfder	4060	2.880
Total	38.330	25.600

Hvis der ikke udføres strandfodring, vil erosionen fortsætte, hvilket øger vanddybden og bølgehøjden foran konstruktionerne. Herved vil en større andel af kystbeskyttelseskonstruktioner ikke opfylde dimensioneringsforudsætningerne i fremtiden.

Figur 3.40 viser, at 80 % af de vurderede skråningsbeskyttelser målt ud fra længde er vurderet til Rød tilstand med eksisterende terrænforhold, 15 % er vurderet til Gul tilstand og kun 5 % er vurderet til Grøn tilstand i dag.

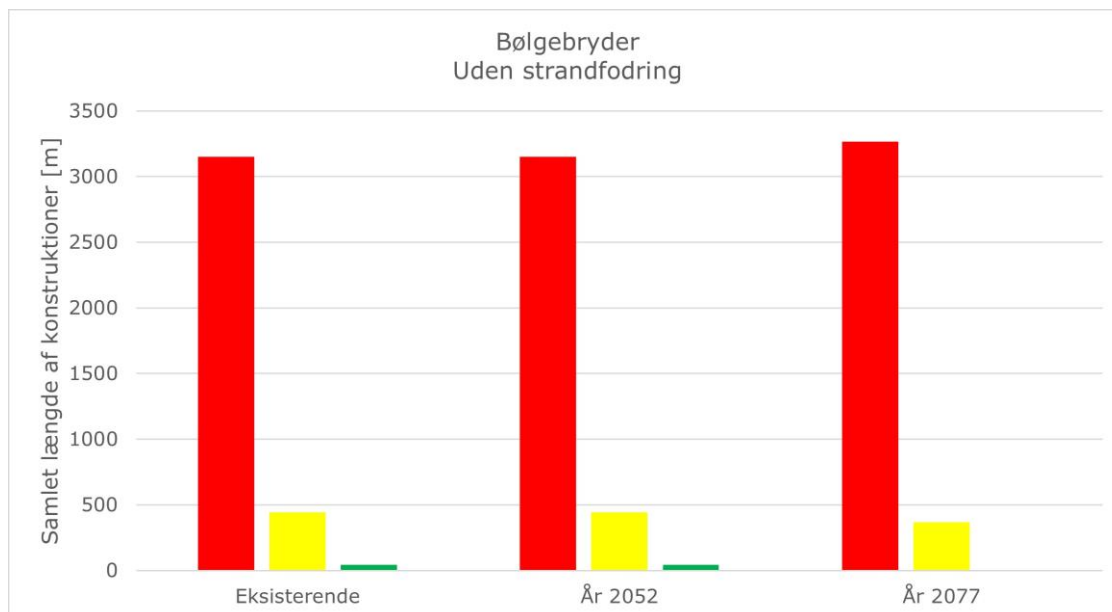
Allerede i år 2052 vil næsten alle skråningsbeskyttelser ikke opfylde dimensioneringskriterierne for at beskytte de bagvedliggende skrænter. Såfremt der ikke strandfodres langs Nordkysten, så skal skråningsbeskyttelserne genopbygges med endnu større sten for at modstå den øgede bølgepåvirkning, der kommer pga. stigende vandstande og et stejlere kystprofil.



Figur 3.40 Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser, hvis der ikke udføres strandfodring. **Grøn:** Vurderet at opfylde forudsætningerne. **Gul:** Vurderet at opfylde forudsætningerne efter forhøjelse. **Rød:** Vurderet at skulle genopbygges med større dæksten.

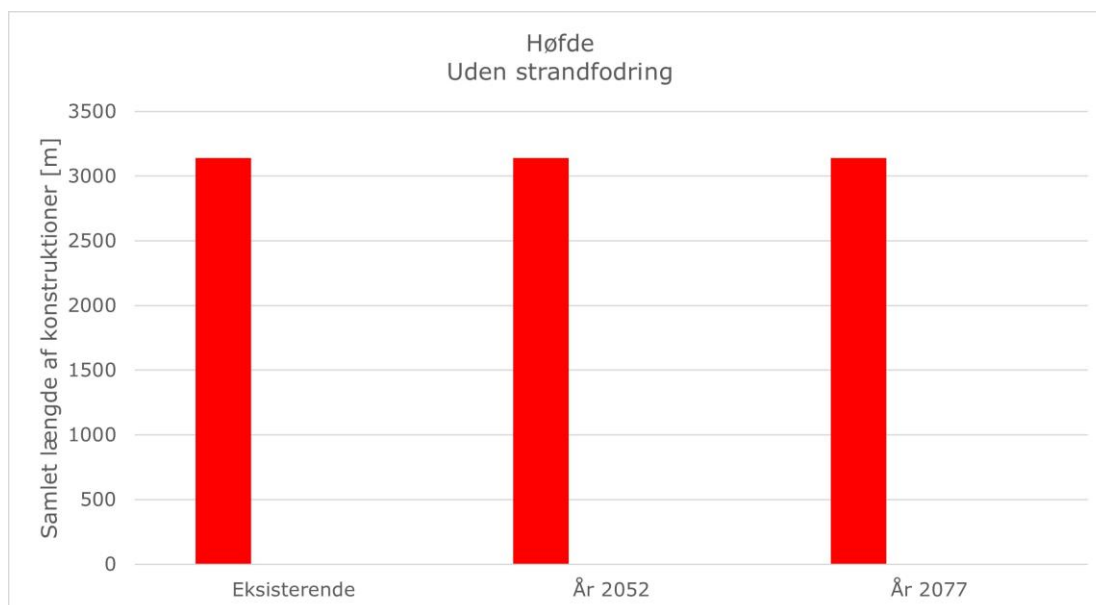
I 2077 vurderes alle nuværende skråningsbeskyttelser at skulle genopbygges med større dæksten for at kunne opfylde designkriterierne.

87 % af de vurderede bølgebrydere vurderes ikke at opfylde dimensioneringsforudsætningerne i dag, hvilket primært skyldes utilstrækkelige stenstørrelser, se Figur 3.41. Dette billede ændres kun minimalt frem mod 2077.



Figur 3.41 Tilstandsvurdering af bølgebrydere, hvis der ikke udføres strandfodring. **Grøn:** Vurderet at opfylde forudsætningerne. **Gul:** Vurderet at opfylde forudsætningerne efter forhøjelse. **Rød:** Vurderet at skulle genopbygges med større dæksten.

Samtlige vurderede hølfer opfylder ikke dimensioneringsforudsætningerne hverken i dag eller de næste 50 år, se Figur 3.42.



Figur 3.42 Tilstandsvurdering af hølfer, hvis der ikke udføres strandfodring. **Grøn:** Vurderet at opfylde forudsætningerne. **Gul:** Vurderet at opfylde forudsætningerne efter forhøjelse. **Rød:** Vurderet at skulle genopbygges med større dæksten.

Eksisterende hård kystbeskyttelse langs Nordkysten er generelt hverken tilstrækkelig til at beskytte mod en 50-årshændelse i dag eller om 50 år, hvilket er det dimensioneringskriterium, der er valgt i Nordkystens Fremtid.

3.2 Kystteknisk modellering

I det følgende præsenteres det kysttekniske datagrundlag som ligger til grund for det kysttekniske projektfor-slag. Data og analyser er udviklet ved hjælp af numerisk modellering med DHI's software og omfatter:

- **Meteomarine forhold:** Bølge- og vandstandsforhold langs kysten, herunder ekstremværdistatistikker for bølgehøjder og vandstande, samt korrelationer mellem parametrene.
- **Littoral transport:** Langtransport og bestemmelse af sandbudget og kronisk erosion for de foreslåede fodringsstrækninger.
- **Akut erosion:** Akut erosion af sandstrand for 50-årshændelsen og stormen Bodil 6. december 2013 og herunder erosionsdybder foran en repræsentativ skråningsbeskyttelse placeret ved forskellige niveauer på stranden for et repræsentativt middelkystprofil.

Til beskrivelse af de meteomarine forhold, dvs. vandstand, strøm og bølger, er der taget udgangspunkt i eksisterende DHI modelopsætninger, som er blevet genkørt med en forfinet modelopløsning langs Nordkysten.

Udarbejdelsen af det kysttekniske datagrundlag og modelopsætningerne er beskrevet mere detaljeret i rapport vedrørende Numerisk Modellering Fase 2 Kystteknisk Grundlag (DHI, 2018c).

3.2.1 Bølger

Bølgeklimate langs Nordkysten er styrende for langtransporten langs kysten. For at kunne beskrive materiale-vandringen gennem en række profiler, er det derfor nødvendigt at fastlægge bølgeklimate i en række punkter udenfor brydningszonen på strækningen fra Hundested til Helsingør. I dette studie er bølgeklimate fastlagt i 40 punkter, som er vist på Figur 3.43.



Figur 3.43 Placering af stationspunkter til fastlæggelse af vandstand og bølgeklimate langs Nordkysten fra Hundested (tv.) til Helsingør (th.)

Bølgeklimate i de 40 punkter er fastlagt ved hjælp af hindcast-modellering, hvilket betyder, at bølgeforholdene reproduceres/modelleres for en længere historisk periode ud fra tilgængelige vindfelter, samt modelleret vandstand og strømforhold. Bølgeforholdene i Kattegat og langs Nordkysten er blevet simuleret ved hjælp af DHIs

MIKE 21 SW numeriske bølgeberegningsmodel for en periode på 20 år, 1997-2016. For denne årrække råder DHI over vinddata fra meteorologiske modeller. Med vinden som drivende kraft, er det derved muligt at simulere bølgeforholdene time for time over det betragtede farvandsområde. Hermed er der etableret en simuleret tidsserie af bølgeforholdene i perioden 1997-2016 i ethvert punkt inden for modelområdet, indeholdende den signifikante bølgehøjde samt den tilhørende bølgeperiode, bølgeretning og retningsspredning. I tidsserierne er der også gemt information om vandstand.

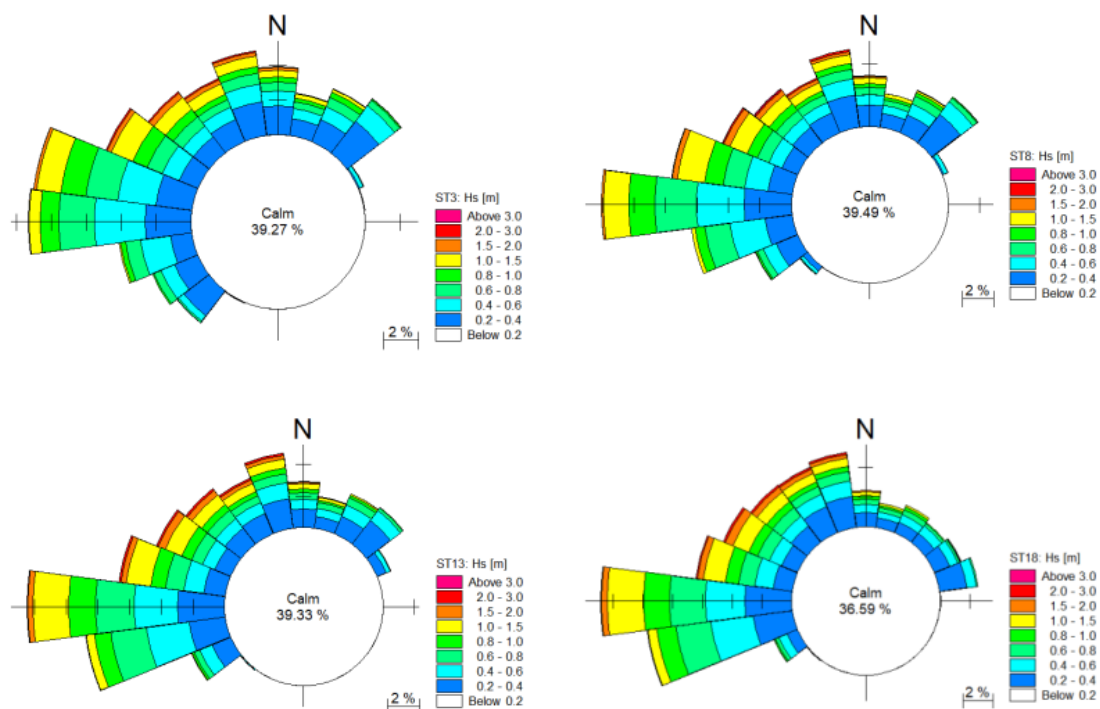
I hvert af de 40 punkter er der efterfølgende lavet en ekstremværdianalyse for vandstand og signifikant bølgehøjde, H_s . De udtrukne tidsserier er anvendt i studiet, der beskriver langstransporten og sedimentbudgettet.

Følgende typer data er blevet genereret for de 40 punkter vist på Figur 3.43:

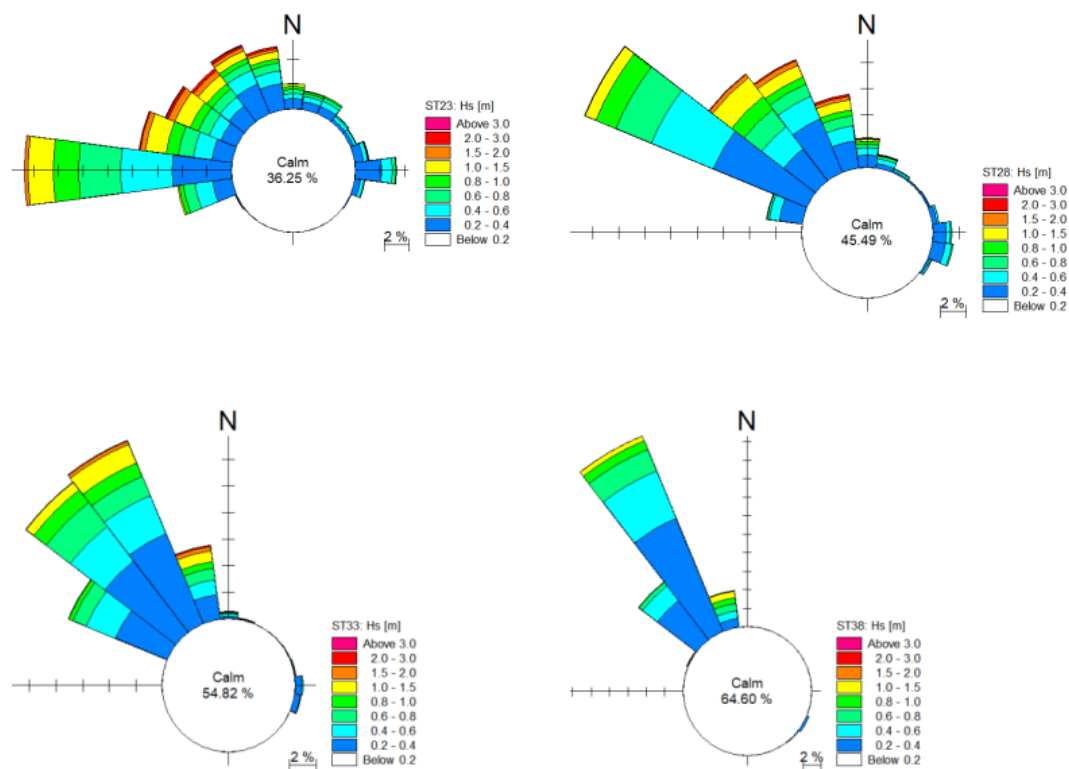
- Tidsserier, som danner grundlag for beregningen af langsgående sedimenttransport
- Scatter-tabeller, som viser sammenhæng
 - mellem bølgehøjde og vandstand
 - bølgehøjde og middelbølgeretning
 - bølgehøjde og peak bølgeperiode, T_p
- Bølgeroser og bølgehøjdens variation langs Nordkysten,
- Estimeret på ekstremvandstand og ekstrembølgehøjder med returperioder på 2, 5, 10, 20 og 50 år inkl. relation for de tilhørende bølgeperioder, T_p .

Eksempler på bølgeroser gældende for strækningen fra Hundested til Rågeleje er vist i Figur 3.44 for stationerne ST3, ST8, ST13 og ST18. Det ses, at de største bølger kommer fra NNV og N, men at den hyppigste bølgeretning er fra V. I Figur 3.45 er der vist eksempler på bølgeroser gældende for strækningen fra Gilleleje Vest til Helsingør (ST23, ST28, ST33 og ST38). Det bemærkes, at bølgeretningen gradvist koncentrerer sig i et smallere område, jo længere mod øst man kommer, samtidig med at bølgerne bliver mindre.

Bølgeklimaet langs hele Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør er beskrevet nærmere i (DHI, 2018c).



Figur 3.44 Bølgeroser for ST3, ST8, ST13 og ST18 beskrivende strækningen fra Hundested til Rågeleje (DHI, 2018c).



Figur 3.45 Bølgeroser for ST23, ST28, ST33 og ST38 beskrivende strækningen fra Gilleleje Vest til Helsingør (DHI, 2018c).

Baseret på modellerede tidsserier af bølgehøjder for perioden 2007-2016 er de signifikante bølgehøjder, som forventes at blive overskredet hvert 2, 5, 10, 20 og 50 år, estimeret.

Tabel 3.7 - Tabel 3.10 angiver estimerede ekstrembølgehøjder for de 40 definerede punkter fordelt langs med Nordkysten.

Tabel 3.7 Ekstrembølgehøjder, Hs i ST1-ST10 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år (DHI, 2018c).

Punkt	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	ST8	ST9	ST10
Returperiode [år]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]
2	2.396	2.544	2.612	2.587	2.618	2.682	2.695	2.744	2.739	2.813
5	2.729	2.899	2.985	2.957	2.994	3.071	3.083	3.147	3.133	3.216
10	2.942	3.126	3.225	3.197	3.236	3.323	3.333	3.408	3.387	3.476
20	3.142	3.339	3.452	3.423	3.466	3.562	3.568	3.655	3.626	3.721
50	3.394	3.609	3.74	3.712	3.758	3.867	3.869	3.97	3.93	4.033

Tabel 3.8 Ekstrembølgehøjder, Hs i ST11-ST20 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.

Punkt	ST11	ST12	ST13	ST14	ST15	ST16	ST17	ST18	ST19	ST20
Returperiode [år]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]
2	2.807	2.786	2.848	2.869	2.921	2.944	2.964	2.99	3.027	2.963
5	3.212	3.194	3.267	3.292	3.355	3.381	3.417	3.457	3.494	3.418
10	3.474	3.459	3.537	3.566	3.637	3.663	3.712	3.762	3.795	3.713
20	3.721	3.71	3.793	3.825	3.904	3.93	3.992	4.05	4.08	3.992
50	4.036	4.031	4.119	4.155	4.245	4.27	4.351	4.421	4.445	4.349

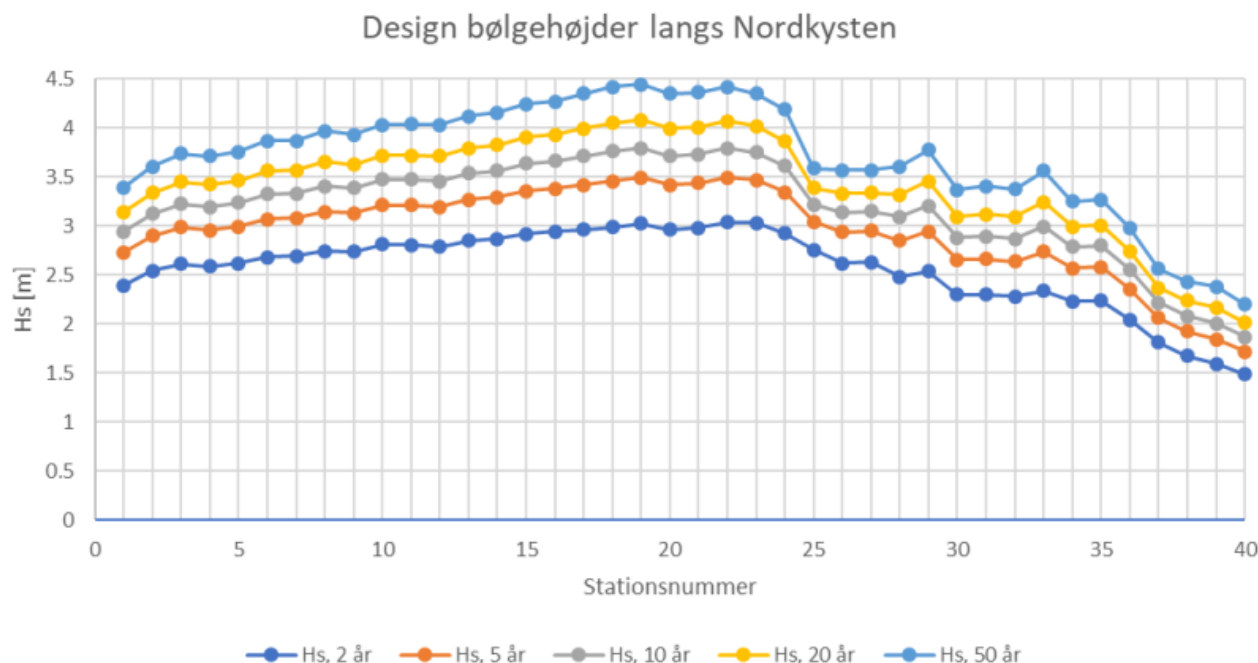
Tabel 3.9 Ekstrembølgehøjder, Hs i ST21-ST30 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år (DHI, 2018c).

Punkt	ST21	ST22	ST23	ST24	ST25	ST26	ST27	ST28	ST29	ST30
Returperiode [år]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]
2	2.983	3.04	3.032	2.923	2.756	2.619	2.632	2.484	2.54	2.303
5	3.437	3.497	3.472	3.343	3.043	2.939	2.95	2.853	2.944	2.654
10	3.73	3.792	3.753	3.612	3.221	3.141	3.151	3.092	3.207	2.881
20	4.007	4.069	4.017	3.865	3.385	3.33	3.337	3.317	3.456	3.096
50	4.361	4.422	4.352	4.186	3.589	3.567	3.572	3.604	3.774	3.37

Tabel 3.10 Ekstrembølgehøjder, Hs i ST31-ST40 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.

Punkt	ST31	ST32	ST33	ST34	ST35	ST36	ST37	ST38	ST39	ST40
Returperiode [år]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]
2	2.299	2.283	2.339	2.233	2.236	2.043	1.814	1.676	1.595	1.491
5	2.661	2.64	2.735	2.572	2.582	2.356	2.061	1.923	1.842	1.72
10	2.897	2.872	2.995	2.789	2.802	2.556	2.221	2.084	2.009	1.871
20	3.12	3.092	3.243	2.993	3.008	2.743	2.371	2.237	2.172	2.015
50	3.406	3.373	3.561	3.251	3.27	2.981	2.563	2.433	2.385	2.201

Designbølgenes variation langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør er vist i Figur 3.46.



Figur 3.46 Designbølgenes variation på dybt vand langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør (DHI, 2018c).

3.2.2 Vandstand

3.2.2.1 Normal vandstand

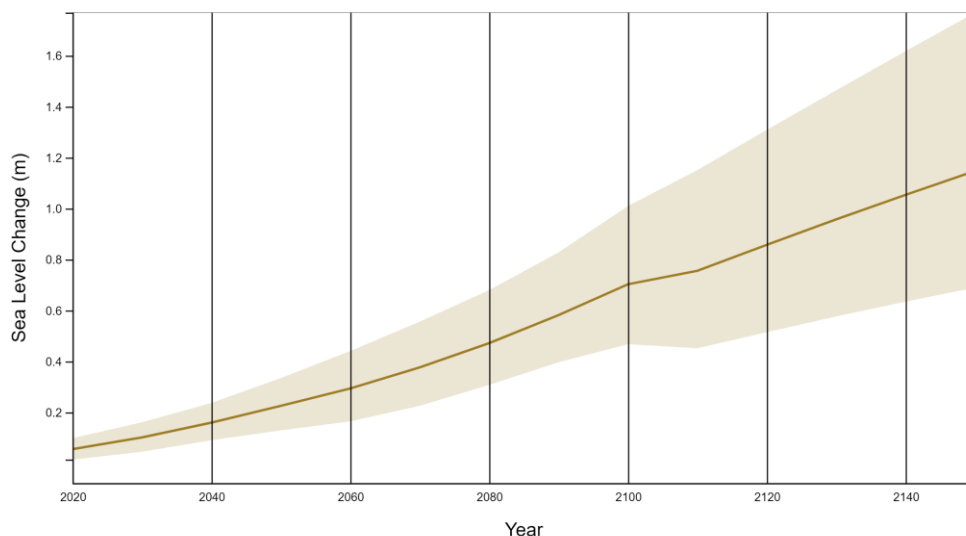
Det astronomiske tidevand langs Nordkysten er omkring 20 cm, hvilket vil sige, at vandstanden varierer ± 10 cm omkring middelvandstanden. De daglige tidevandsvariationer vurderes at være uden væsentlig betydning for kystens morfologi.

3.2.2.2 Klimarelateret havspejlsstigning

Klimaforandringerne resulterer i global eustatisk havspejlsstigning (ændring i selve vandspejlet), hvilket skal medregnes i den dimensionsgivende vandstand ud fra den ønskede levetid for kystbeskyttelsen.

Størrelsen af klimatillægget til den dimensionsgivende vandstand afhænger af, hvilken prognose for havspejlsstigningerne, der anvendes. FN's klimapanel (IPCC) har beregnet den forventede havspejlsstigning ved forskellige fremtidige klimascenarier (IPCC, 2021). Ved etablering af kystbeskyttelsesplanlægning med levetider, der strækker sig længere frem end til år 2050 anbefaler DMI og Miljøstyrelsen, at man anvender klimascenarie SSP5-8.5 (DMI, 2023). RCP-8.5 er scenariet, hvor den globale udledning af drivhusgasser ikke ændres radikalt.

IPCC's bedste bud på den fremtidige havspejlsstigning ved Hornbæk frem til år 2150 ved SSP5-8.5 scenariet er vist i Figur 3.47. Det forventes, at havspejlsstigningen vil vokse eksponentielt med tiden, hvilket giver en havspejlsstigning på omkring +45 cm frem til 2077. Det skal bemærkes, at dette er et centralt estimat og derfor er behæftet med en usikkerhed, angivet som det lysebrune skraverede areal i Figur 3.47. Havspejlsstigningen på +45 cm er uden landhævning beskrevet nærmere i afsnit 3.2.2.3. Den relative havspejlsstigning, som der designes efter, er derfor mindre.



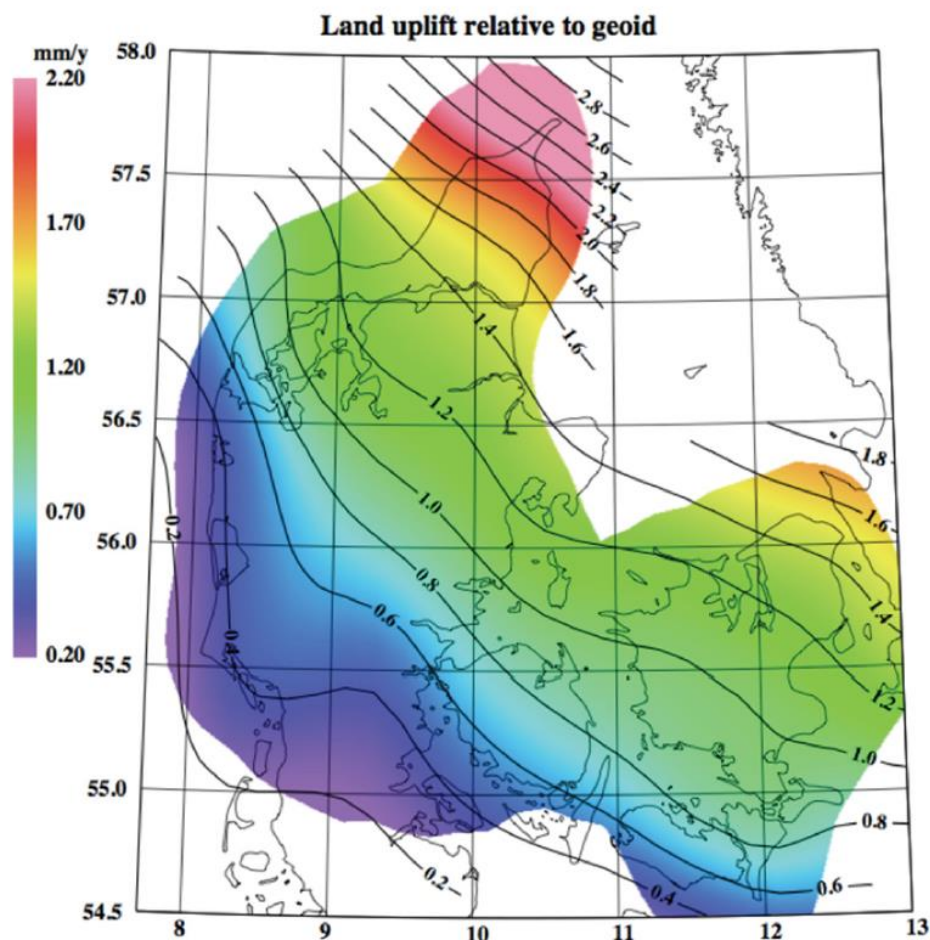
Figur 3.47 IPCC's bud på de globale havspejlsstigninger for SSP5-8.5 scenariet ved Hornbæk, fremvist ved NASAs "Sea level projection tool". Middelværdien i prognosen er vist som den brune linje og usikkerhedsintervallet er vist med det lysebrune skraverede område omkring linjen. Fremskrivningen af havspejlsstigning er baseret på temperaturscenarier og beregning af afsmeltning af iskapper, hvorfor der er et stort usikkerhedsinterval for værdierne som stiger med tiden. Kilde: (NASA, N/A).

3.2.2.3 Isostatisk landhævning

I Danmark foregår der i dag generelt en landhævning. Området blev trykket ned af isen under sidste istid. Da isen forsvandt, begyndte landet at hæve sig igen. Der er dog store regionale hastighedsforskelle, som kan ses på Figur 3.48.

Landhævningen bevirker, at kystprofilet og terrænet hæves, hvilket derved reducerer vanddybderne og hæver kystbeskyttelseskonstruktionerne. Landhævningen er dog mindre end den forventede havspejlsstigning, hvorfor der stadig forventes en relativ havspejlsstigning.

Mellem Hundested og Helsingør varierer landhævningen mellem 1,3-1,5 mm/år. For hele Nordkysten antages et gennemsnit på 1,5 mm/år, hvormed den resulterende landhævning i år 2077 bliver +8 cm i forhold til terrænniveau i 2027.



D1 viser landhævningen i mm. per år over Danmark. Landhævningen er effekten af den ophørte nedpresningseffekt efter afsmeltning af det Skandinaviske Iskjold fra sidste istid, som særligt påvirker den nordøstlige del af Danmark.
Kilde: DTU Space, 2015

Figur 3.48 Absolut landhævning i Danmark med nøjagtighed på 0,2 mm/år.

Størrelsen på den forventede landhævning har betydning ved beregning af vanddybden ud fra hvilken, den dimensionsgivende bølgehøjde skal findes.

Derudover har landhævningen også betydning for, hvilken kronekote kystbeskyttelsen skal bygges til, idet terrænet hæves med tiden.

3.2.2.4 Ekstrem vandstand

DHI har udarbejdet en ekstrem vandstandsstatistik langs Nordkysten (DHI, 2018c).

Ekstremvandstande er langt mere følsomme over for måletidsseriens længde end ekstrembølgehøjder. I estimerne er det derfor valgt at tage udgangspunkt i måletidsserien for Hornbæk, som dækker en observationsperiode på 127 år. Måletidsserien fra Hornbæk er i kombination med de 20 års modellerede vandstande anvendt til at udregne en korrektion til Hornbæk-statistikken langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør.

Tabel 3.11 viser de estimerede designvandstande ved Hornbæk.

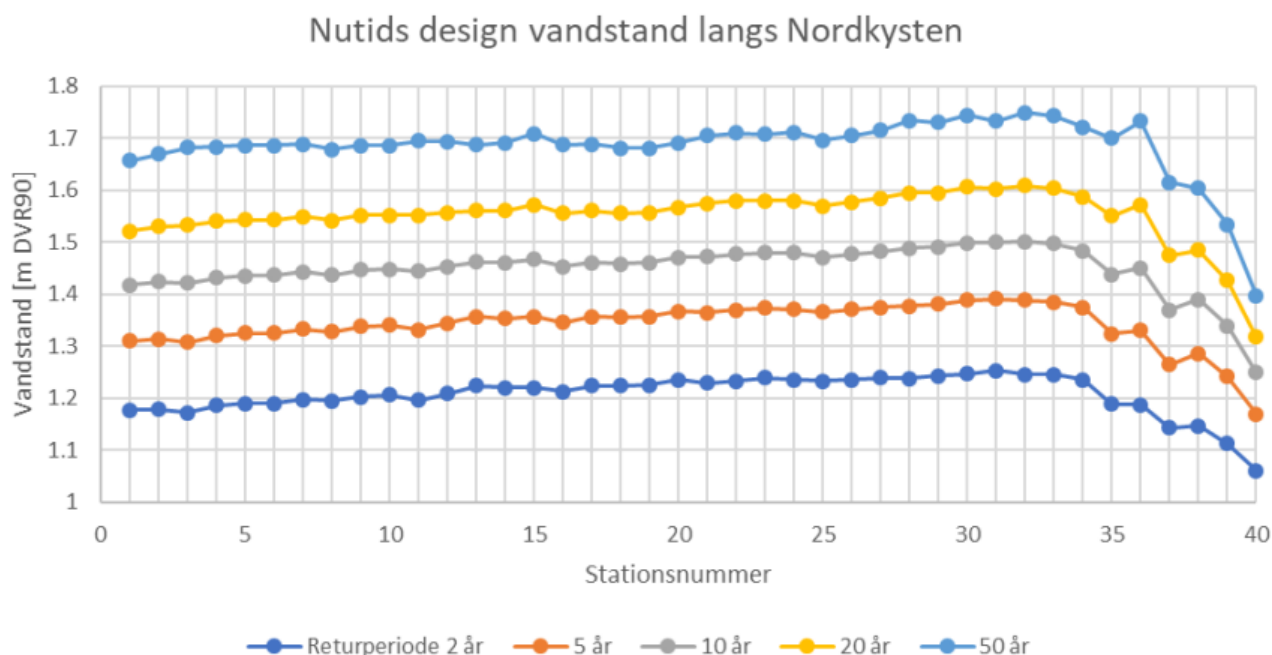
Tabel 3.11 Dimensionsgivende vandstand for Hornbæk (DHI, 2018c).

Returperiode [år]	Trendfri vandstand [m DVR90]	Vandstand år 2018 [m DVR90]	Spredning [m]
2	1,194	1,236	0,013
5	1,332	1,374	0,016
10	1,441	1,483	0,034
20	1,545	1,587	0,046
50	1,679	1,721	0,067
100	1,780	1,822	0,088

På baggrund af de 20 års modellerede vandstande (1997-2016) er der udført en ekstremværdianalyse for de 40 punkter langs Nordkysten, se Figur 3.43. Nutidsdesignvandstande med returperiode 2 år, 5 år, 10 år, 20 år og 50 år er angivet i Tabel 3.12 for de 40 punkter langs Nordkysten samt optegnet i et diagram i Figur 3.49.

Tabel 3.12 Estimeret ekstrem vandstand (VS) langs Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør baseret på en korrektion af Hornbæk-statistikken. De angivne værdier er nutidsestimater (2018) (DHI, 2018c).

Korrigerede designvandstande for Nordkysten										
Punkt	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	ST8	ST9	ST10
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.177	1.179	1.172	1.186	1.19	1.19	1.198	1.195	1.203	1.206
5	1.31	1.314	1.307	1.32	1.325	1.325	1.333	1.328	1.338	1.341
10	1.417	1.424	1.421	1.431	1.435	1.436	1.443	1.436	1.447	1.448
20	1.521	1.53	1.533	1.54	1.543	1.543	1.549	1.541	1.551	1.552
50	1.656	1.669	1.682	1.683	1.686	1.685	1.688	1.678	1.686	1.686
Punkt	ST11	ST12	ST13	ST14	ST15	ST16	ST17	ST18	ST19	ST20
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.196	1.209	1.224	1.22	1.22	1.213	1.224	1.224	1.225	1.236
5	1.332	1.344	1.357	1.353	1.357	1.346	1.357	1.355	1.357	1.367
10	1.444	1.453	1.462	1.46	1.467	1.453	1.461	1.458	1.46	1.471
20	1.552	1.557	1.56	1.561	1.572	1.555	1.56	1.555	1.556	1.567
50	1.695	1.693	1.687	1.691	1.709	1.687	1.688	1.68	1.68	1.691
Punkt	ST21	ST22	ST23	ST24	ST25	ST26	ST27	ST28	ST29	ST30
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.229	1.233	1.239	1.235	1.233	1.236	1.239	1.238	1.243	1.247
5	1.365	1.37	1.373	1.371	1.366	1.371	1.375	1.377	1.381	1.388
10	1.472	1.477	1.479	1.479	1.471	1.477	1.482	1.488	1.491	1.499
20	1.574	1.579	1.579	1.58	1.569	1.577	1.584	1.595	1.595	1.606
50	1.705	1.71	1.707	1.711	1.696	1.705	1.715	1.734	1.73	1.744
Punkt	ST31	ST32	ST33	ST34	ST35	ST36	ST37	ST38	ST39	ST40
Returperiode [år]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]	VS [m]
2	1.253	1.246	1.245	1.236	1.189	1.187	1.143	1.147	1.113	1.061
5	1.391	1.388	1.385	1.374	1.324	1.33	1.264	1.286	1.242	1.17
10	1.5	1.501	1.497	1.483	1.438	1.451	1.37	1.39	1.339	1.249
20	1.602	1.609	1.604	1.587	1.55	1.572	1.474	1.485	1.426	1.317
50	1.733	1.749	1.743	1.721	1.699	1.733	1.615	1.604	1.534	1.397



Figur 3.49 Designvandstandenes variation for returperioder på 2 år til 50 år langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør. Placering af punkter kan ses på Figur 3.43 (DHI, 2018c).

3.2.2.5 Dimensionsgivende vandstand på dybt vand

Den resulterende dimensionsgivende vandstand på dybt vand udenfor bølgebrydningszonen på Nordkysten er summen af vandstanden ved 50-årshændelsen samt havspejlsstigningen, som vist i Tabel 3.13.

Den dimensionsgivende vandstand på lavt vand får et ekstra bidrag fra bølge-setup, grundet bølgebrydning langs kysten, hvilket behandles nærmere i afsnit 3.2.5.

Vandstanden ved en 50-årshændelse stemmer overens med Kystdirektoratets højvandsstatistik fra 2024, hvor en 50-årshændelse uden at inkludere havspejlsstigning og landhævning er på 1,67 m DVR90 ved Hundested og 1,69 m DVR90 ved Hornbæk (Kystdirektoratet, 2024b).

Tabel 3.13 Dimensionsgivende vandstand på dybt vand udenfor brydningszonen ved nordkysten af Sjælland. Vest angiver kyststrækningen vest for Gilleleje Havn, Øst angiver kyststrækningen øst for Gilleleje Havn.

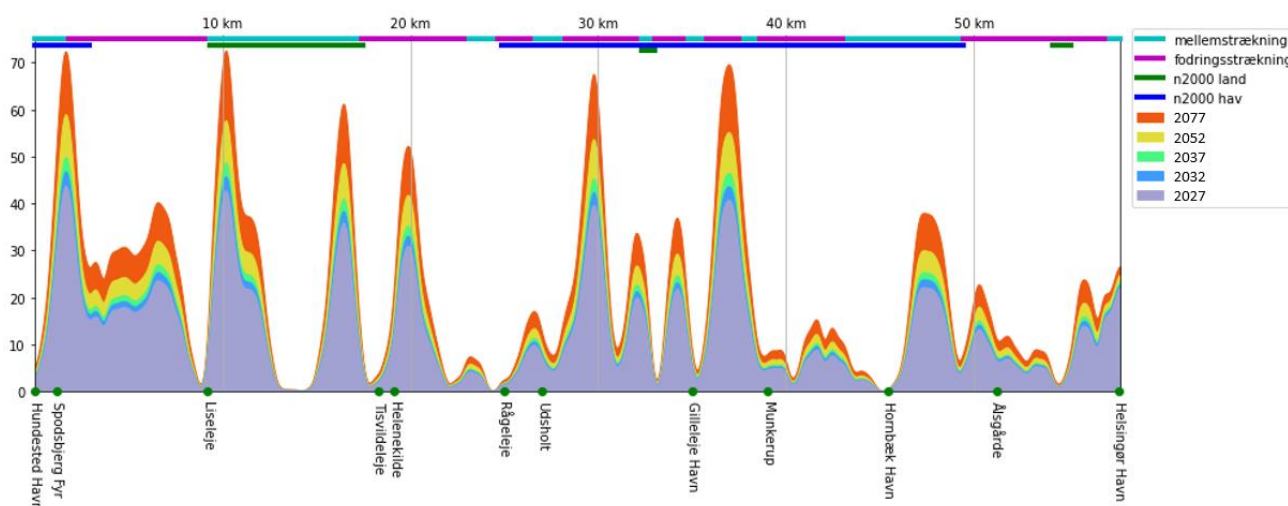
	VEST	ØST
Vandstand ved 50-årshændelse i 2027 [m DVR90]	+1,69	+1,72
Havspejlsstigning frem til 2052 ifølge IPCC's SSP5-8.5 scenarie [m]	+0,23	
Havspejlsstigning frem til 2077 ifølge IPCC's SSP5-8.5 scenarie [m]	+0,45	
Dimensionsgivende vandstand i år 2077 [m DVR90]	+2,06	+2,09

3.2.3 Kronisk erosion

3.2.3.1 Historisk kronisk erosion

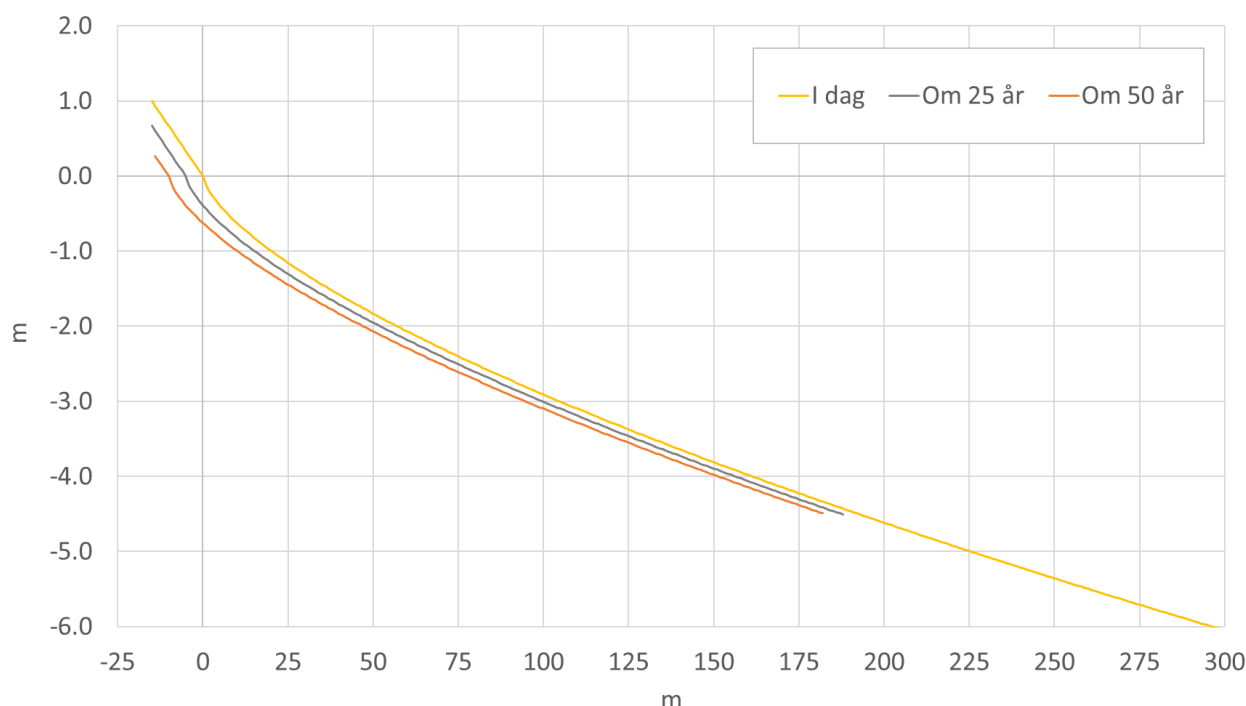
Kronisk erosion skyldes stigende nettotransport langs kysten, hvilket bevirker, at der fjernes mere sediment fra en kyststrækning end der tilføres. Den kroniske erosion varierer langs Sjællands nordkyst, som følge af kystens orientering, geologi, bølgeklima og omfanget af kystkonstruktioner.

NIRAS har udarbejdet Figur 3.50, der viser forventet erosion ved naturlig kystudvikling fra 1954 frem til hhv. 2027, 2032, 2037, 2052 og 2077. Analysen er baseret på historiske, topografiske kort fra 1897 og luftfoto fra 1954. Resultatet er i overensstemmelse med artiklen "Multidecadal shoreline changes in Denmark" (Knudsen et al. 2016), som også har analyseret den historiske kroniske erosion langs Nordkysten. Figuren viser tydeligt, at der uden kystbeskyttelse ville være sket en kraftig tilbagerykning af store dele af Nordkysten. Årsagen til, at erosionen på nogle strækninger er nul, f.eks. midt mellem Liseleje og Tisvildeleje, skyldes usikkerheder i kortet fra 1897, eller at der allerede i 1954 var anlagt hård skråningsbeskyttelse, som havde stoppet kysttilbagetrækningen. Overordnet set viser figuren dog en beregnet kysttilbagerykning på 20-40 m fra 1954 og frem til 2027, hvilket ville have truet ejendomme mm. ud til kysten, hvis der ikke var etableret skråningsbeskyttelse i perioden. De største kysttilbagerykninger findes langs ubeskyttede strækninger og nedstrøms for større kystkonstruktioner, herunder havnene.



Figur 3.50 Forventet erosion i meter (y-aksen) ved naturlig kystudvikling uden kystbeskyttelse i forhold til kystlinjen i 1954 langs strækningen (x-aksen). Erosionen er fundet som et løbende gennemsnit. Det vil sige, i hvert punkt er erosionen fundet som gennemsnittet af erosionen 500 m til hver side af punktet.

Figur 3.51 viser et eksempel på kronisk erosion af hele strandprofilen vest for Gilleleje, hvor den aktive dybde er i størrelsesorden 4,5 m og hvor den gennemsnitlige højde af stranden foran skråningsbeskyttelserne vurderes at være omkring +1,0 m. Den aktive dybde er et mål for, hvor langt ned i vandet bølgerne er i stand til at påvirke kystprofilen.



Figur 3.51 Eksempel på idealiseret beregning af kronisk erosion (0,2 m/år) af strandprofilet vest for Gilleleje foran skråningsbeskyttelse i kote +1,0 m.

På de beskyttede strækninger reducerer kystbeskyttelsen størrelsen af den kroniske erosion af bagstranden. Den kroniske erosion foran kystbeskyttelsen og ude i kystprofilet forventes dog at være større.

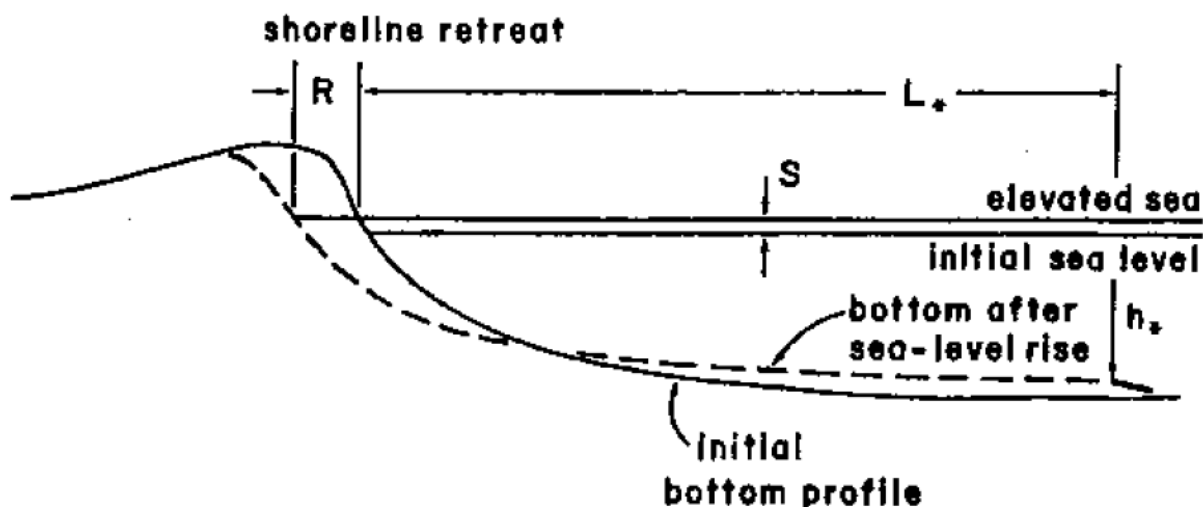
Tilstandsvurdering af eksisterende kystbeskyttelse er beregnet ud fra fremskrivning af historiske erosionsrater for de enkelte delstrækninger, som beskrevet i afsnit 3.2.3. Anvendelse af et typisk ligevægtsprofil muliggør, at der i tilstandsvurderingen tages højde for den enkelte konstruktions placering i kystprofilet, når vanddybden beregnes.

Den fremtidige kroniske erosion vurderes ved antagelse om, at den historiske erosionsrate vil fortsætte, samt at der vil forekomme en yderligere tilvækst i erosionen grundet havspejlsstigning.

3.2.3.2 Erosion grundet havspejlsstigning

I takt med at middelvandstanden stiger, vil kystprofilet naturligt opretholde en ligevægtsform. Dette medfører, at der vil ske erosion af den øverste del af kystprofilet og aflejring i den ydre del, se Figur 3.52. Kysttilbagerykningen som følge af havspejlsstigning beregnes ved hjælp af Bruuns regel.

Tilstandsvurdering af eksisterende kystbeskyttelse er beregnet med en korrektion af vanddybden ved konstruktionen som følge af ændring af kystprofilet, som skitseret i Figur 3.52.



Figur 3.52 Princip for kysterosion grundet stigning af middelhavspejlet. For at opretholde et ligevægtsprofil sker der erosion i den øverste del af kystprofilet og aflejring i den yderste del (Komar, 1998).

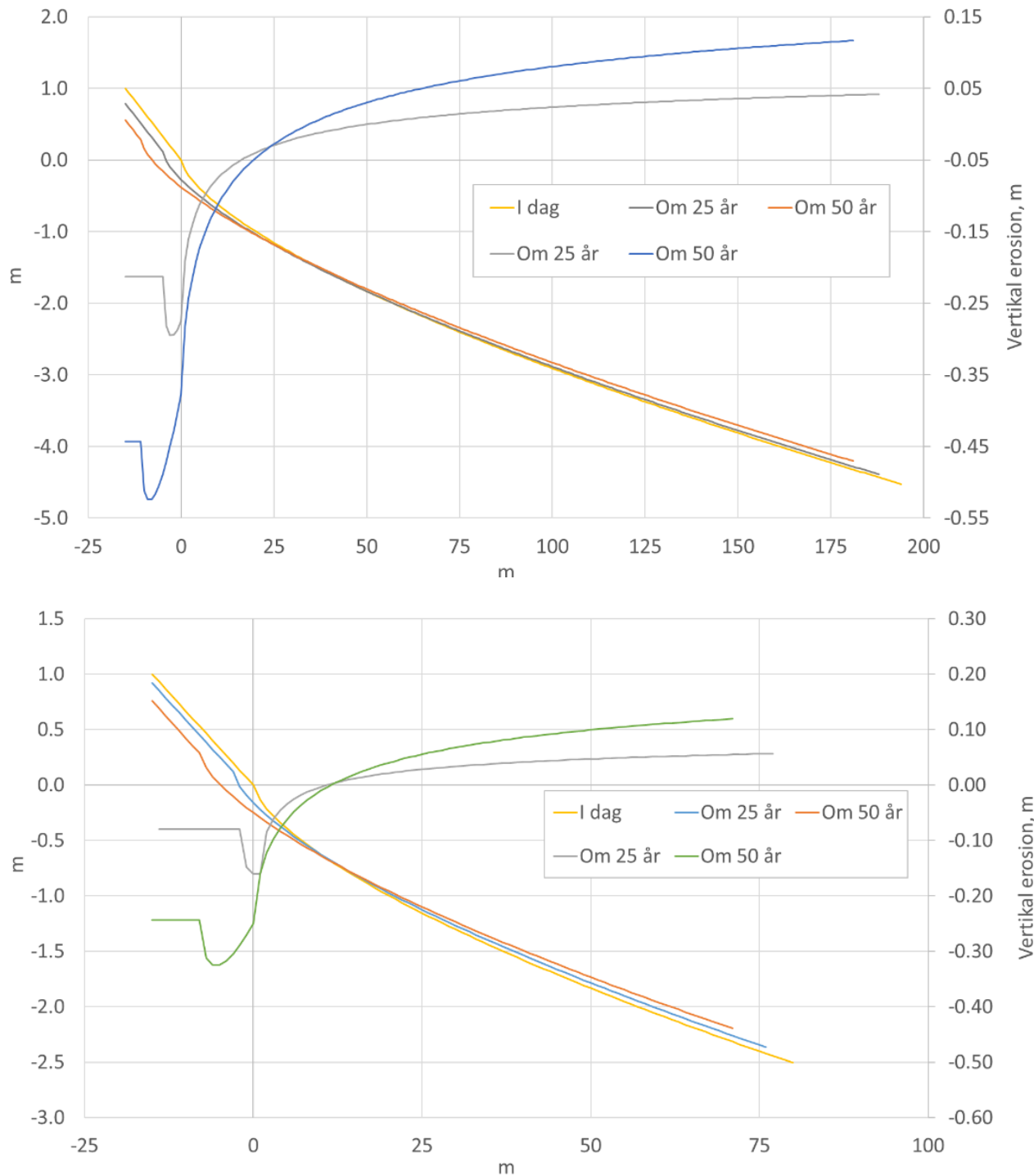
Beregningen er ens for hele den vestlige og den østlige del, hvor der er forskel på den aktive dybde. Den aktive dybde er vurderet til 4,5 m i gennemsnit vest for Gilleleje og 2,5 m øst for Gilleleje.

Den aktive dybde er et mål for, hvor langt ned i vandet bølgerne er i stand til at påvirke kystprofilet. Med andre ord, den aktive dybde beskriver ud til hvilken dybde, bundændringer over tid kan observeres. I praksis fortolkes dette som den dybde, hvortil bølgerne flytter sand på sandbunden. Aktiv dybde er her bestemt som den dybde, hvor den langsgående sedimenttransport i beregningerne er ubetydelig.

Beregningen er foretaget med udgangspunkt i en gennemsnitlig højde af stranden foran skråningsbeskyttelserne på ca. +1,0 m langs hele Nordkysten.

Den fremtidige erosion som følge af havspejlsstigning er beregnet med udgangspunkt i det kystprofil, som er eroderet tilbage som følge af kronisk erosion. Eksempler på kysttilbagerykningen forårsaget af havspejlstigninger er vist i Figur 3.53.

Anvendelse af et typisk ligevægtsprofil muliggør, at der i tilstandsvurderingen tages højde for den enkelte konstruktions placering i kystprofilet.



Figur 3.53 Kysttilbagerykning og vertikal erosion langs ligevægtskystprofil som følge af havspejlsstigning jf. Bruuns Regel. Øverste figur viser ændring af kystprofil vest for Gilleleje, og nederste figur viser ændringen øst for Gilleleje. Grå og blå linje i øverste figur, og grå og grøn linje i nederste figur angiver erosion af kystprofilerne fra i dag til hhv. om 25 år og om 50 år.

3.2.3.3 *Modellering af langstransport*

Den langsgående sedimenttransport på Nordkysten er primært drevet af den bølgeinducerede langsgående strøm og er derfor ofte i østlig retning. Men ved bølger fra nordlig og østlig retning er transporten mod vest.

Nettosedimenttransporten som er forskellen mellem sedimenttransporten i de to retninger langs kysten er på størstedelen af kyststrækning fra vest mod øst, dvs. der transporteres mere sediment i østlige retning end i vestlig retning. Dog er nettotransporten fra øst mod vest fra kyststrækningen Spodsbjerg-Kikhavn til Hundested. Det præcise punkt for hvor nettotransporten ændrer retning (kaldet et nulpunkt) vil variere fra år til år afhængig af det aktuelle bølgeklime.

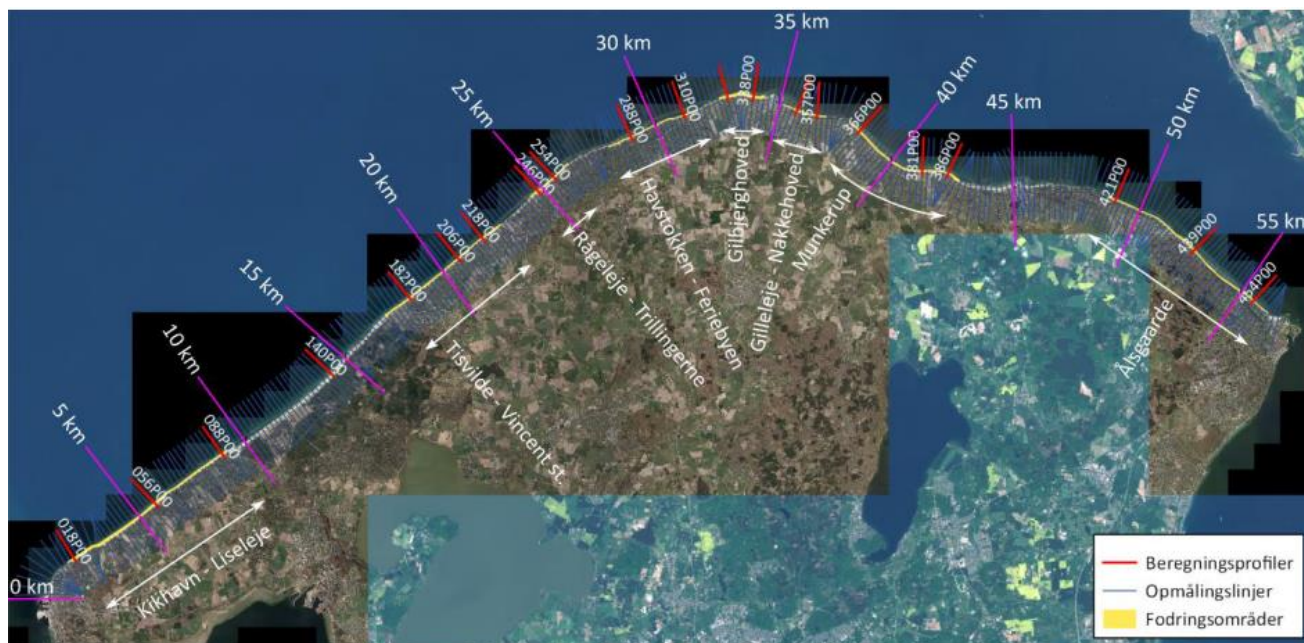
Det er ændringen i nettosedimenttransporten langs kysten, der afgør, om der sker erosion eller aflejring. Hvis transporten er stigende, sker der erosion, hvis den er faldende, sker der aflejring.

Nettotransporten er stigende fra Kikhavn mod Gilleleje, hvor havnen vil blokere for store dele af sedimenttransporten. Det har over tid medført fremrykning af stranden vest for havnen samt betydelige aflejringer af sand uden for den aktive transportzone. Fra Gilleleje Havn til Hornbæk Havn er transporten fortsat stigende og reduceres brat ved Hornbæk Havn som følge af havnens blokerende virkning. Øst for Hornbæk er transporten fortsat østgående og svagt stigende hen til Helsingør Nordhavn.

Som del af forundersøgelserne er der udarbejdet en opdateret vurdering af transportforholdene langs Nordkysten ved hjælp af numeriske modeller. Sedimentbudgettet bestemmes ved først at bruge numeriske modeller til at beregne transportkapaciteten, altså den transport af sand, der finder sted uden hensyn til sandtilgængelighed og kystkonstruktioner. Disse beregninger gennemføres med DHI's numeriske model "Littoral Processes FM". Den faktiske transport vurderes herefter ved at reducere transportkapaciteten langs med de områder, hvor målinger af sandlagstykkelser viser, at der ikke er tilgængeligt sand.

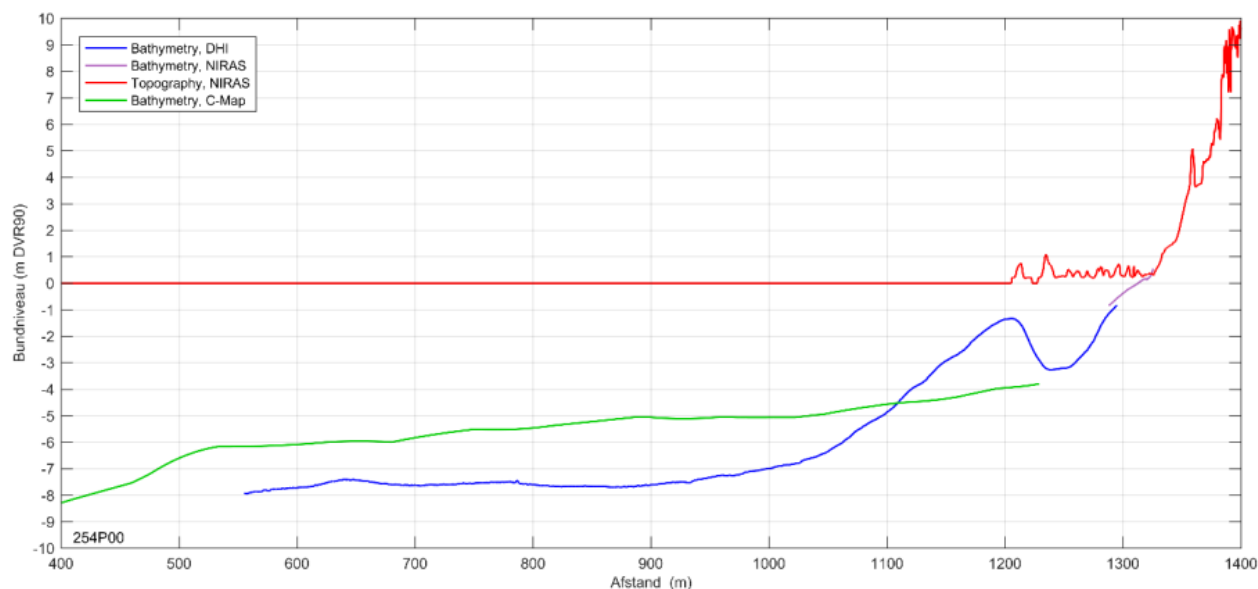
3.2.3.4 *Model*

Den langsgående sandtransport beregnes i 21 kystprofiler fordelt langs med Nordkysten, som vist med de røde profiler i Figur 3.54. De 8 fodringsområder, som undersøges, er desuden indtegnet i figuren (markeret med gult). Det bemærkes, at de 21 kystprofiler, som sandtransporten beregnes for, er koncentreret omkring fodringsstrækningerne.



Figur 3.54 Oversigt over 21 kystprofiler hvorpå langtransporten er beregnet. Fodringsområderne er indtegnet med gult og 5 km mærker for afstanden til Hundested er vist med lilla linjer.

Figur 3.55 viser et eksempel på de forskellige opmålinger, der er anvendt til fastlæggelse af kystprofilernes form.



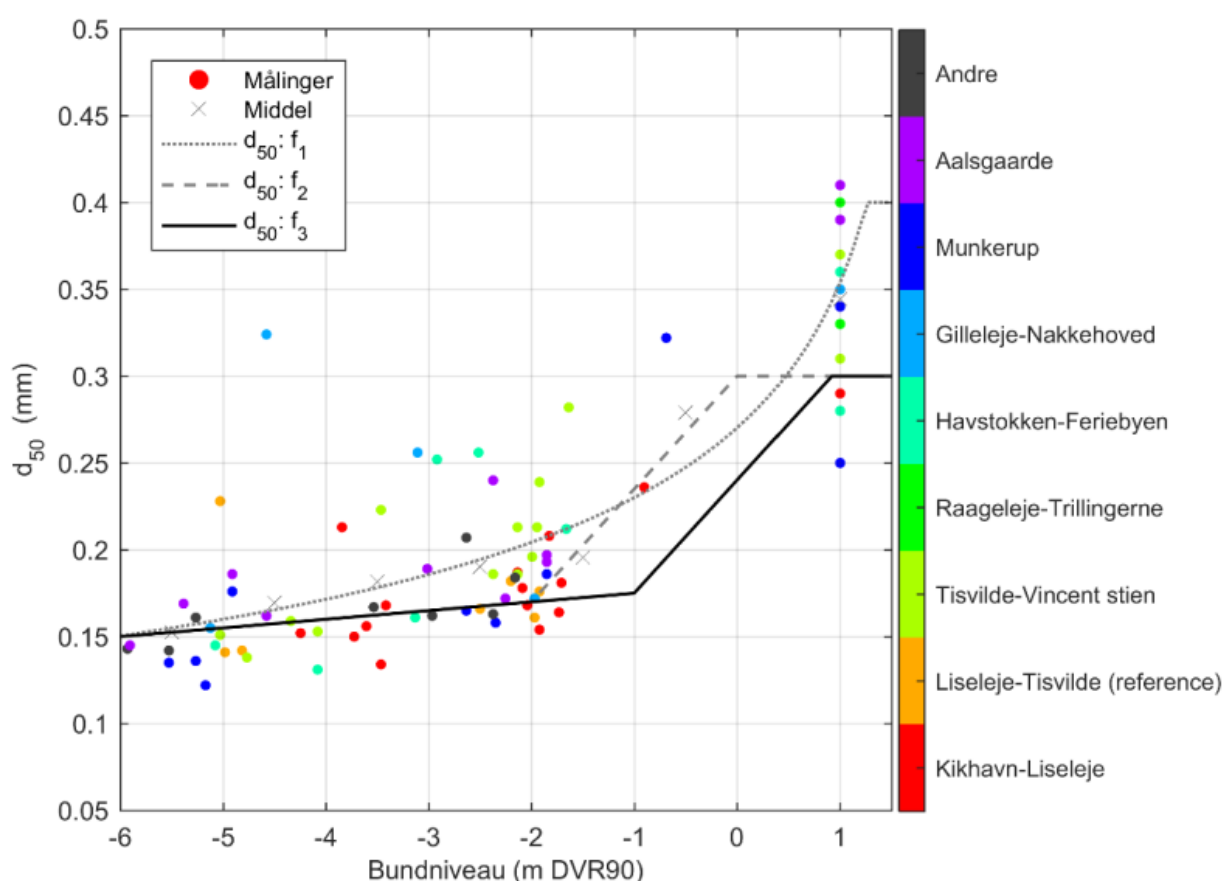
Figur 3.55 Eksempel på de anvendte opmålinger til fastlæggelse af kystprofilens form.

Kornstørrelsesfordelingen er opmålt i forbindelse med forundersøgelserne til nærværende projekt. 68 prøver er udtaget i den våde del af kystprofilet af DHI (DHI, 2018), og 28 prøver er udtaget på stranden af NIRAS (NIRAS, 2018b).

Sigteanalyser er gennemført for alle sandprøver til bestemmelse af middeldkornstørrelse (d_{50}) og den geometriske spredning af sandet, her defineret ved:

$$\left(\frac{d_{84}}{d_{16}}\right)^{0,5}$$

Til brug for sandtransportberegningerne er følsomheden over for tre forskellige kornstørrelsesfordelinger på tværs af kysten testet. Mindre forskelle noteredes og efter sammenholdning af kornstørrelsesfordelinger og inspektion af satellitbilleder vurderedes det, at den tredje fordeling ($d_{50}: f_3$) i Figur 3.56 repræsenterer forholdene ved Nordkysten bedst til fastlæggelse af det overordnede sandbudget.



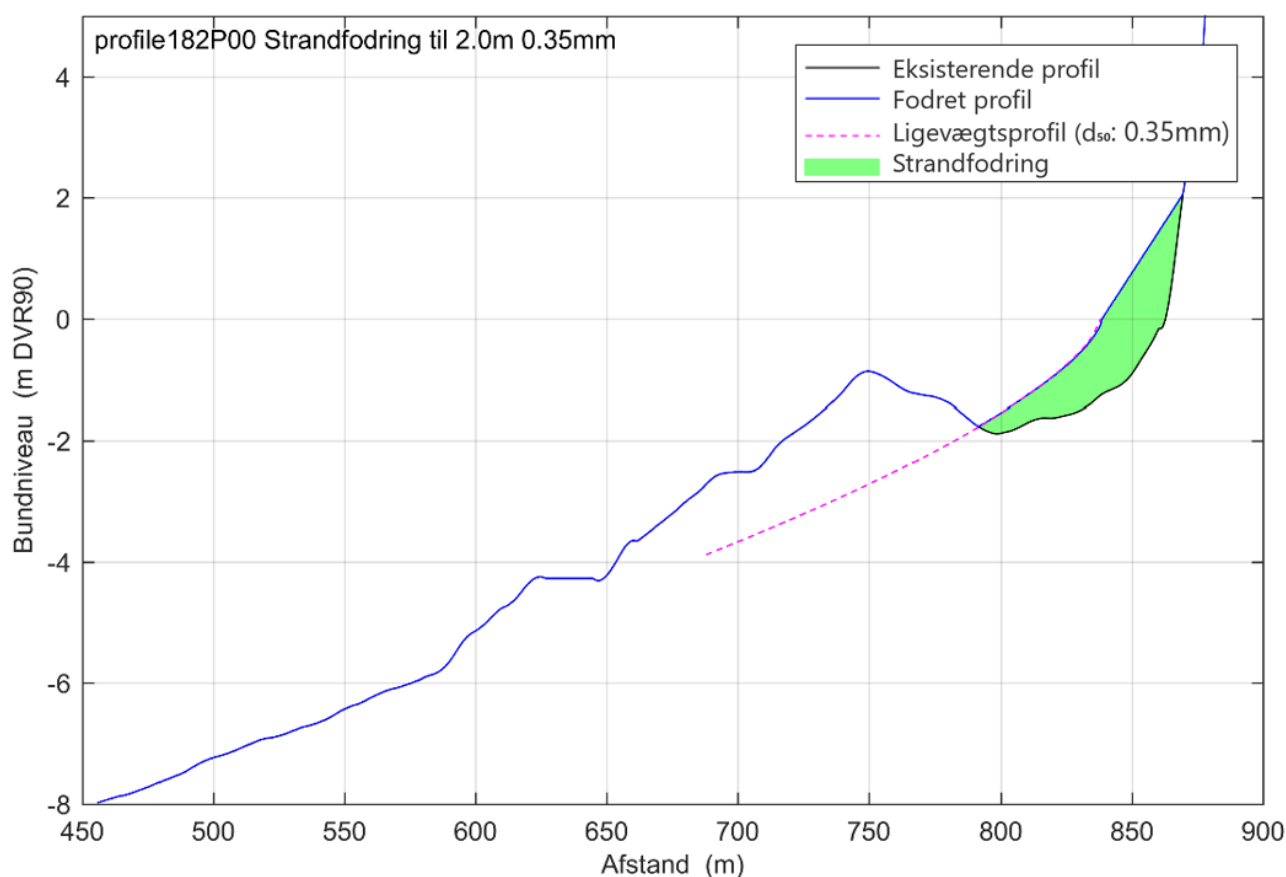
Figur 3.56 Kornstørrelsesfordeling over dybden. Farverne angiver lokalitet for sedimentprøve. Målingernes placering på langs af kysten er angivet med farveskalaen. Fuldt optrukken kurve viser den anvendte kornstørrelsesfordeling anvendt i sandtransportberegningerne. De stiplede kurver angiver to fordelinger, som er anvendt i vurdering af følsomheden af kornstørrelse i beregningerne af sedimenttransporten.

Tidsserier af vandstande og kystnære bølger sættes på i den søværts ende af kystprofilen. Som del af beregningerne transformeres de kystnære bølger længere ind fra ca. 8 m vanddybde til en såkaldt aktiv dybde, der er grænsen for, hvor langt ud i profilet den litorale transport påvirker bunden under normale forhold.

For at finde effekten af at strandfodre på den langsgående sandtransport ændres formen på kystprofilet svarende til følgende parametre:

- Kysten fremrykkes således, at man opnår en topkote på bagstranden på mindst +2,0 m i forhold til middelvandstanden.
- Bagstranden vurderes at have en hældning på 1:15.
- Kystprofilet under vand fastlægges som et såkaldt ligevægtsprofil svarende til en middeldkornstørrelse på $d_{50}=0,35$ mm.

Figur 3.57 sammenligner det eksisterende kystprofil (sort linje) med et kystprofil efter strandfodring (blå linje). Det grønne område angiver strandfodringen og den stiplede kurve (i rødt) viser formen på ligevægtsprofilet.



Figur 3.57 Eksempel på et strandfodret kystprofil (DHI, 2018c). Grøn skraivering angiver det tilførte sediment (strandfodringen).

Efter strandfodring vil bølger og strøm begynde at sortere fodringsmaterialet. Den del af sedimentet, der har kornstørrelser større end 0,3 mm vil forblive på stranden og i opskylszonen, mens det finere sediment transporteres ud i profilet under vand, hvor det vil sedimentere. Sedimentet med kornstørrelser på mellem 0,15-0,25 mm vil blive transporteret ud på revlerne på vanddybder mellem 1-4 m mens sedimentet finere end 0,15 mm vil

blive transporteret ud på dybere vand. Fordelingen af kornstørrelser, der i dag ses i kystprofilerne langs Nordkysten, vil derfor blive bevaret efter strandfodring.

De beregnede transportrater svarer til potentielle rater for bølgedrevne langsgående strømme over fuldt sanddækkede profiler. De beregnede transportrater korrigeres, idet der tages hensyn til, at profilet ikke alle steder er fuldt dækket med sand, og at der udenfor brydningszonen foregår langsgående transport pga. effekten af kontraherende regionale strømme langs kysten mod Helsingør (DHI, 2018c).

Transportfordelinger samt vurderinger af reduktionsfaktorer er angivet for hvert af de 21 kystprofiler i Bilag B.1-B.2 i DHIs modelleringsrapport (DHI, 2018c).

3.2.3.5 Resultater

Naturlige variationer i vejrforhold og tilstedeværelsen af storme nogle år og år med særligt stille vejr, påvirker den langsgående sandtransport.

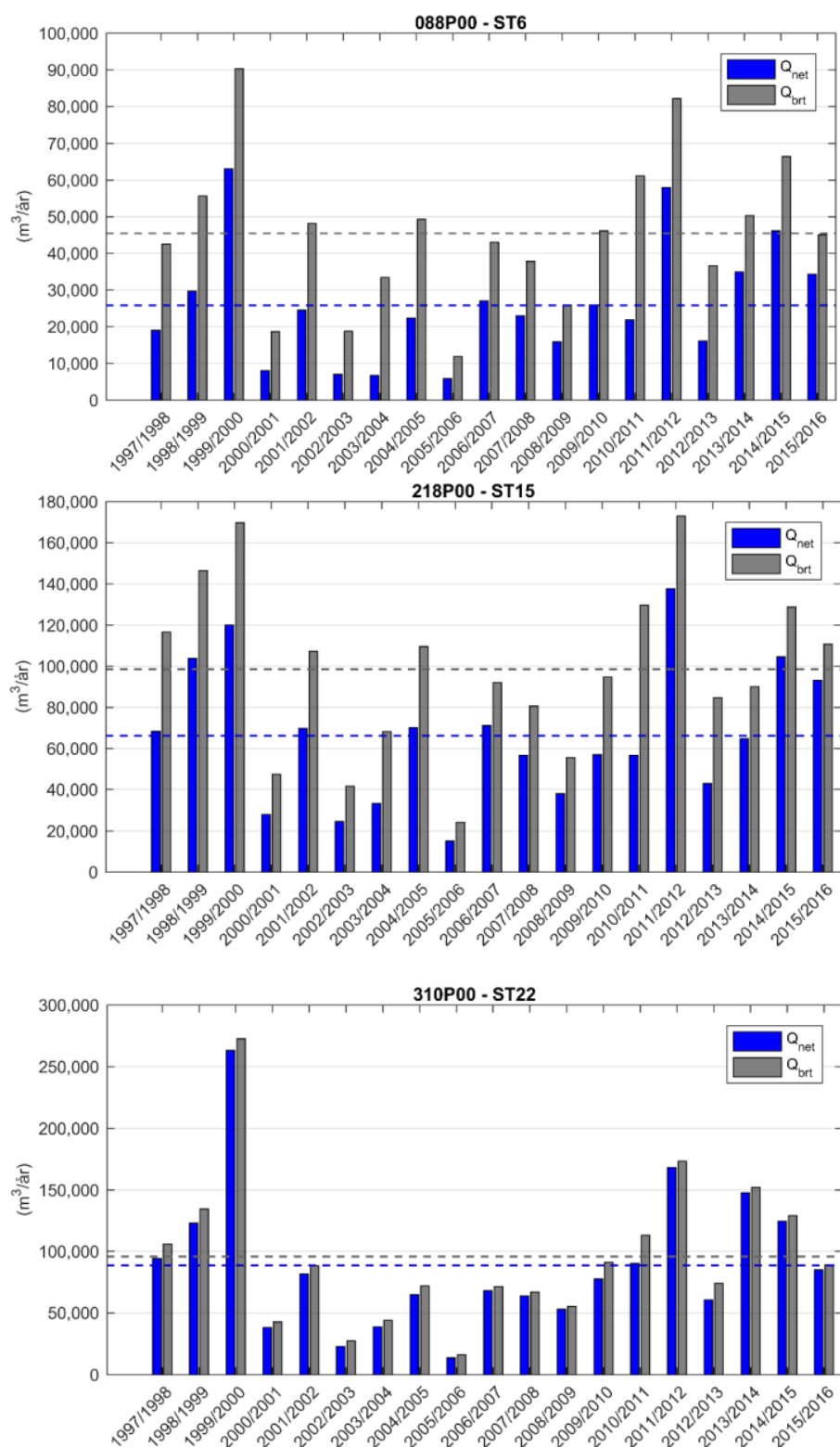
Figur 3.58 og Figur 3.59 viser år-til-år variationer i den langsgående sandtransport for hhv. tre profiler placeret vest for Gilleleje Havn og to profiler placeret øst for Gilleleje Havn.

For de vestligste kystprofiler gælder det, at den vestgående sandtransport er markant, men mindre end den østgående sandtransport. Dette medfører, at nettotransporten er positiv (mod øst) og at bruttotransporten (altid positiv) er betydelig større. Sandet transporteres både mod øst og mod vest langs Nordkysten, men mængden af sand der transporteres mod øst, er langt større end hvad der transporteres mod vest, hvorfor der overordnet er en østgående sedimenttransportsretning.

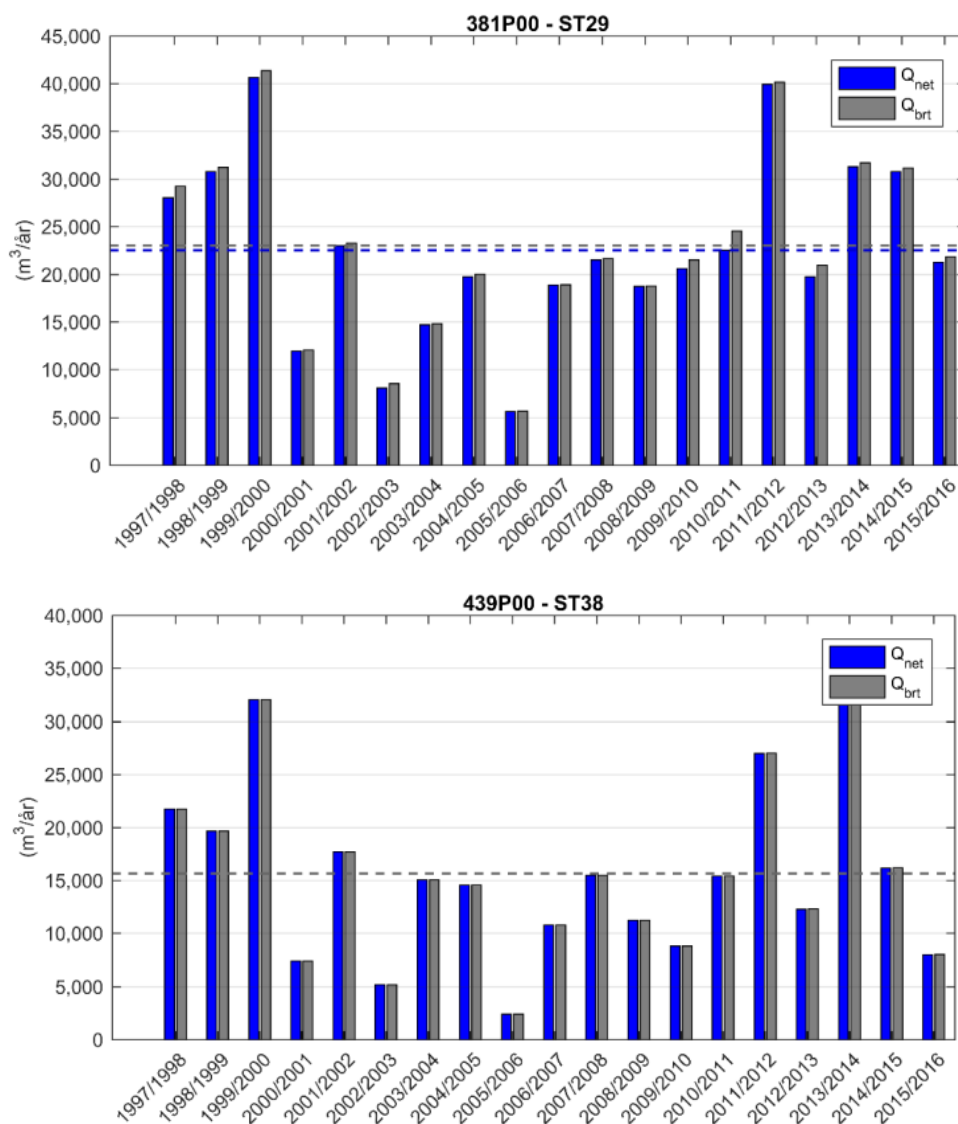
For kystprofiler længere østpå bliver den vestgående transport forsvindende lille. Netto- og bruttotransporterne vil derfor være af samme størrelsesorden.

Figurene viser, at der i årene 2000-2010 har været flere år med relativt stille vejr (bruttotransporten er mindre end middelværdien), mens årene efter 2010 generelt har haft transportrater over middel.

For fire ud af de fem viste kystprofiler er perioden juli 1999 - juni 2000 det år med de største transportrater efterfulgt af perioden fra juli 2011 til juni 2012. De stiplede linjer angiver middelværdien af nettotransporten og bruttotransporten.



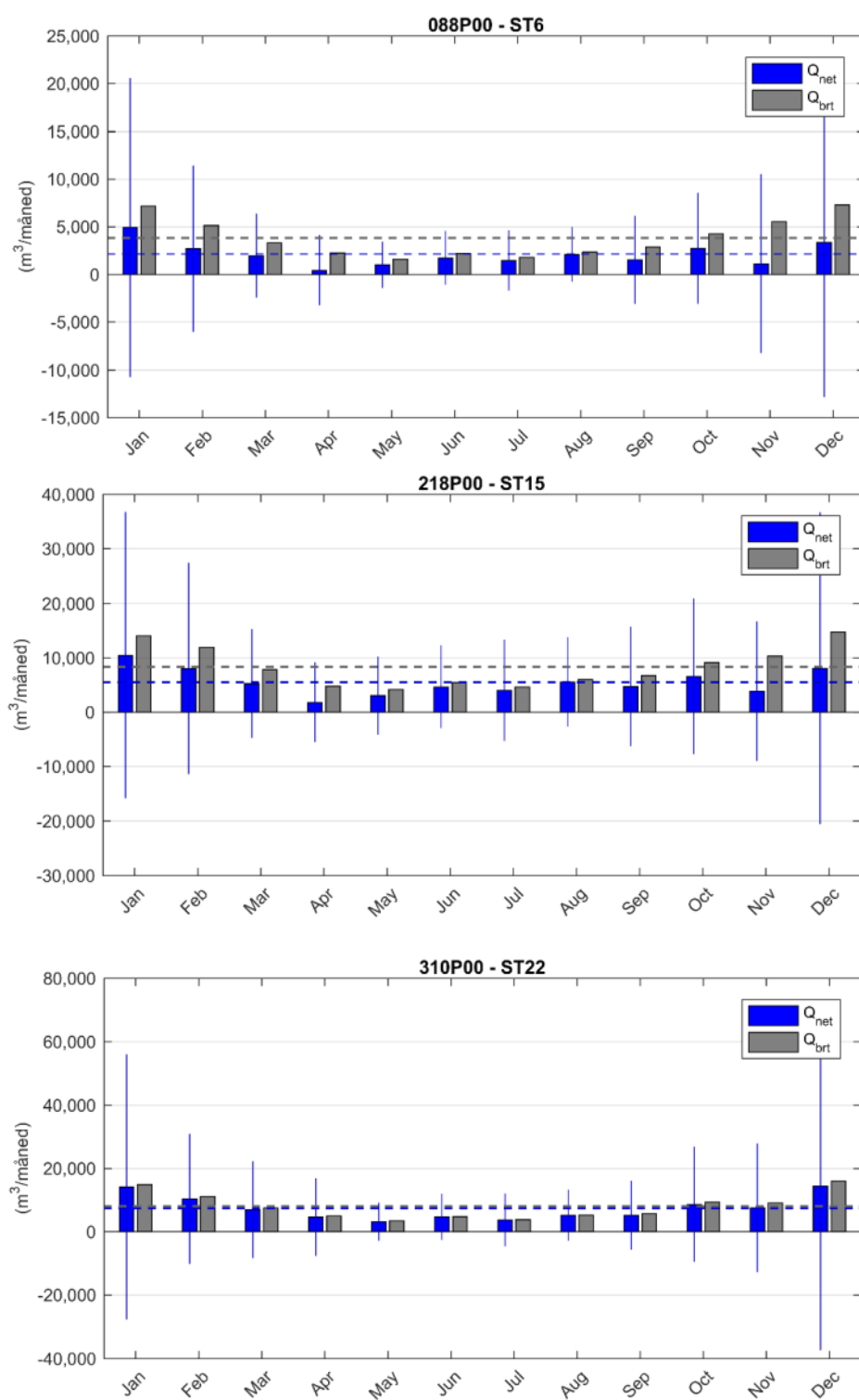
Figur 3.58 År-til-år variationer i langstransport for tre udvalgte profiler, placeret vest for Gilleleje Havn (DHI, 2018c). De stiplede linjer angiver middelværdien af nettotransporten Q_{net} og bruttotransporten Q_{brt} .



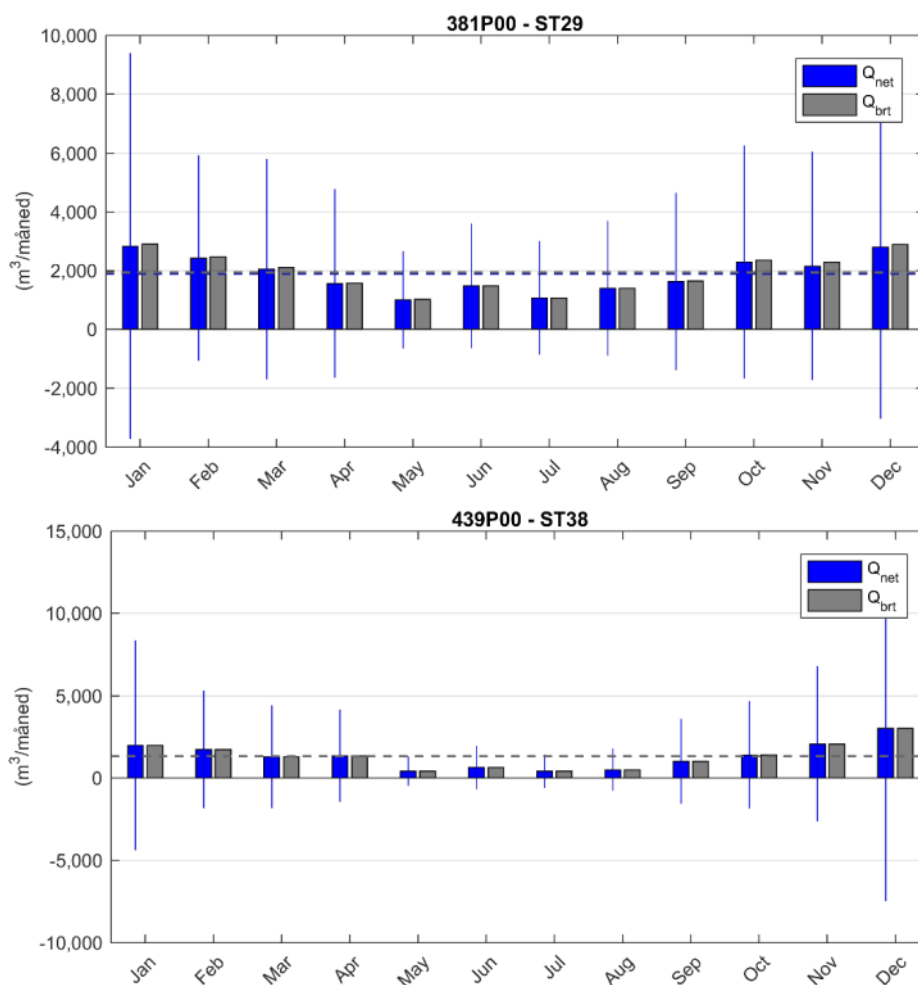
Figur 3.59 År-til-år variationer i langstransport for to udvalgte profiler, placeret øst for Gilleleje Havn (DHI, 2018c). De stiplede linjer angiver middelværdien af nettotransporten Q_{net} og bruttotransporten Q_{brt} . I nederste figur er middelværdien den samme, derfor ses kun en stiplede linje.

Sæsonvariationen af den langsgående sandtransport (netto og brutto) er vist for fem udvalgte kystprofiler i Figur 3.60 og Figur 3.61. Søjlediagrammet i figurerne viser middelværdier af den månedlige sandtransport beregnet over 20 år og de lodrette blå kurver viser spredningen af de månedlige værdier omkring middelværdien.

Figurene viser en tydelig variation i netto- og bruttotransport over sæsonen med de største transportrater og de største variationer i transportrater forekommende i efterårs- og vintermånederne.



Figur 3.60 Sæsonvariation i langtransporten for tre udvalgte profiler placeret vest for Gilleleje Havn (DHI, 2018c). De stiplede linjer angiver middelværdien af nettotransporten Q_{net} og bruttotransporten Q_{brt} .



Figur 3.61 Sæsonvariation i langstransporten for to udvalgte profiler, placeret øst for Gilleleje Havn (DHI, 2018c). De stiplede linjer angiver middelværdien af nettotransporten Q_{net} og bruttotransporten Q_{brt} .

Baseret på beregningerne af langstransporten på Nordkysten går den aktive dybde fra at være ca. 3 m (under middelvandstanden) ved Hundested stigende til ca. 4 m langs den vestlige halvdel af kysten. Nær Havstokken og Gilleleje Havn er den aktive dybde ca. 5 m. Øst for Gilleleje Havn er den aktive dybde lavere, fordi kysten her er drejet op mod Sverige. Kysten er derfor eksponeret for mindre bølger end det er tilfældet langs den vestlige halvdel af Nordkysten. Således varierer den aktive dybde mellem 3 m (nær Gilleleje) og 2 m (længst mod øst).

De beregnede transportrater svarer til potentielle rater for bølgedrevne langsgående strømme over fuldt sanddækkede profiler. I det følgende korrigeres disse rater, idet der tages hensyn til, at profilet ikke alle steder er fuldt dækket med sand, og at der udenfor brydningszonen foregår langsgående transport pga. effekten af kontraherende regionale strømme langs kysten mod Helsingør, se desuden (DHI, 2018c).

3.2.3.6 Vurdering af kronisk erosion langs fodringsstrækningerne

Den korrigerede langstransport er præsenteret på tabelform i Tabel 3.14. Tabellen giver desuden et mål for den kroniske erosion langs hvert af fodringsområderne under antagelse af, at den kroniske erosion beregnes som forskellen imellem det sand, der transporteres langs et profil i den vestlige ende af fodringsstrækningen og sandtransporten i et profil ved den østlige ende af fodringsstrækningen. Erosionen er angivet som $m^3/år/m$, der skal forstås som tabet af sand pr. løbende meter pr. år langs med den fodrede kyststrækning.

Tabel 3.14 Aktuelle transportrater samt kronisk erosion i hvert af fodringsområderne for eksisterende kyst og for fodringsscenarioet (DHI, 2018c). Positiv nettotransport er mod øst. Positiv erosion svarer til tab af sand. Beregningerne antyder, at visse områder i fodringsområdet ikke er under kronisk erosion markeret med en "*" (DHI, 2018c). Dette kan dog tillægges usikkerheder i modellerne pga. variation i bølgeindfald over årene og rumlige variationer langs strækningerne. Øst for Gilleleje er en stor del af transporten genereret af havstrømmen (ikke bølgegenereret) udenfor brydningszonen, som ikke er en del af modellen. Her har DHI vurderet nogle erosionsrater i et interval, som tager højde for transporten genereret af havstrømme og tidlige variationer.

Fodrings- område	Profil	Eksisterende forhold			Fodringsscenarie		
		Q _{net} (m ³ /år)	Q _{brt} (m ³ /år)	Kronisk ero- sion (m ³ /år/m)	Q _{net} (m ³ /år)	Q _{brt} (m ³ /år)	Kronisk ero- sion (m ³ /år/m)
Kikhavn – Liseleje	018P00	0	40.000	2,8	0	29.000	2,4
	056P00	5.000	36.000		6.000	35.000	
	088P00	21.000	40.000		18.000	34.000	
Tisvilde – Vincentstien	182P00	28.000	72.000	2,9	35.000	82.000	0*
	206P00	40.000	63.000		35.000	53.000	
	218P00	44.000	63.000		34.000	51.000	
Rågeleje – Trillingerne	246P00	29.000	65.000	0*	28.000	62.000	0*
	254P00	25.000	104.000		25.000	101.000	
Havstokken – Feriebyen	288P00	69.000	83.000	2,8	68.000	79.000	0*
	310P00	79.000	87.000		59.000	63.000	
Gilbjerg- hoved	328P00	109.000	113.000	7,2	107.000	112.000	11
	338P00	122.000	123.000		126.000	127.000	
Gilleleje – Nakkeho- ved	353P00	21.000	21.000	~0	21.000	21.000	0*
	357P00	20.000	22.000		17.000	17.000	
Munkerup	366P00	29.000	30.000	0 – 3,0*	31.000	32.000	1,3
	381P00	23.000	23.000		23.000	23.000	
	386P00	26.000	26.000		37.000	37.000	
Ålsgårde	421P00	84.000	84.000	0 – 2,0*	41.000	41.000	0-1,5*
	439P00	23.000	23.000		19.000	19.000	
	454P00	29.000	29.000		23.000	23.000	

Langtransporten er stigende fra kyststrækningen mellem Spodsbjerg og Kikhavn mod Gilleleje. Ved kyststrækningen mellem Spodsbjerg og Kikhavn er den kun svagt stigende men stiger tiltagende mod Gilleleje. Omkring Spodsbjerg er nettolangtransporten nul, hvilket betyder, at der transporteres lige så meget sediment i sydøstlig retning, som der transporteres i nordøstlig retning. Det vil sige, når vinden er nord-nordøst transporteres der sediment fra Liselejestrækningen og mod kyststrækning Spodsbjerg-Kikhavn og fra denne strækning mod Hundested. Og når vinden er i vest, transporteres der sand fra kyststrækningen Spodsbjerg-Kikhavn og mod Liselejestrækningen. Men da transporten er stigende fra strækningen Spodsbjerg-Kikhavn mod både sydvest og nordøst, betyder det, at der netto ikke tilføres sediment til denne kyststrækningen, der fjernes kun sediment.

Den aktuelle kroniske erosion ligger typisk omkring $3 \text{ m}^3/\text{år}/\text{m}$ vest for Gilleleje. Dog er den kroniske erosion ved Gilbjerg Hoved markant større og skyldes, at kysten her har et markant knæk i orienteringen. Fodringsområdet Rågeleje-Trillingerne er ifølge beregningerne ikke under mærkbar kronisk erosion. Variationen i erosionspresset er stor for fodringsområderne øst for Gilleleje.

Beregningerne af langtransporten er gentaget for nye kystprofiler, hvori der er indlagt en sandfodring, som påvirker kystprofilens form samt kornstørrelsen af sandet i kystprofilet. Beregningerne korrigeres desuden for sandtilgængelighed og kystkonstruktioner. Langtransporten og størrelsen af den kroniske erosion for tilfældet med udført strandfodring er også angivet i Tabel 3.14.

Sedimentbudgettet ændres ikke væsentligt i forhold til sedimentbudgettet for de eksisterende forhold. Generelt falder sandtransport nær stranden som følge af den ændrede kornstørrelse. I nogle profiler stiger transporten dog, fordi kystprofilens hældning øges ved stranden.

Høfder og bølgebryderes påvirkning af sandtransporten ændres ikke ved strandfodringen og er derfor den samme i beregningerne med strandfodring. Til gengæld medtages ikke reduktionen i transporten pga. af tilstedeværelse af meget ral på nogle strækninger. Fodringsvolumenet er så stort, at rallen tildækkes og dermed ikke har en reducerende virkning.

Sammenligning af transportraterne for eksisterende forhold og i tilfældet med strandfodring angivet i Tabel 3.14, at de fleste fodringsområder ikke påvirker eller påvirkes af den naturlige kroniske erosion.

Dette er dog ikke helt tilfældet, idet fodringsområderne mister sand langs enderne af de fodrede områder. Desuden vil den kontinuerte omfordeling af sand ændre på kornstørrelsesfordelingen på tværs af profilet og på langs af kysten og dermed gradvist føre kysten tilbage til sin naturligt eroderende tilstand. Denne effekt er medtaget i beregningerne af de endelige sandvolumener samt placering af disse i fodringsområderne.

Beregninger med tilført sandfodringsmateriale viser, at sandfodring ikke vil ændre den overordnede transportdynamik, som dermed kan anvendes direkte til at modgå den kroniske erosion.

3.2.3.7 *Anbefalinger til fodringsvolumener – til at modvirke kronisk erosion*

Det overordnede sandbudget er vurderet for de nuværende forhold og for tilfældet med sandfodring i afsnit 3.2.3.6. Heraf fremgår det, at det overordnede transportmønster er uændret før og efter sandfodringer med stigende transport mellem Hundested og Gilleleje samt stigende transport imellem Gilleleje og Helsingør. Sammenholdes beregnede sandtransportrater ind og ud af fodringsområderne vil flere af fodringsområderne tilsyneladende være stabile imod kronisk erosion efter fodring. Dette vurderes ikke af være tilfældet, men skyldes, at beregningerne er behæftet med en vis usikkerhed. Således er det nødvendigt at udlede nødvendige fodringsvolumener ved fortolkning af de tilgængelige modelresultater.

DHI's anbefalinger til nødvendige volumener til at modvirke kronisk erosion i fodringsområderne er baseret på følgende:

- Alle områder påvirkes af en baggrundserosion som udledes ved at vægte længden af fodringsområdet i forhold til den samlede kyststrækning med det samlede sandtab.
- Der tillægges et yderligere bidrag til det nødvendige sandvolumen til hvert af fodringsområderne på baggrund af de erosionsrater, som er vurderet i afsnit 3.2.3.6.

Baggrundserosionen bestemmes individuelt for strækningen Hundested – Gilleleje og for strækningen Gilleleje – Helsingør.

3.2.3.7.1 Baggrundserosion: Hundested – Gilleleje

Den aktuelle langsgående sandtransport går fra ca. 0 m³/år ved Kikhavn til ca. 125.000 m³/år ved Gilleleje. Når sedimenttransporten er stigende, betyder det, at der fjernes mere sediment på en strækning end der tilføres. Fordeles denne stigning i langstransport lineært over hele strækningen fås en erosion på ca. 3,7 m³/år/m. Denne rate ligger generelt højere end erosionsraterne i fodringsområderne, fordi beregningerne viser, at der foregår en betydelig erosion i naturområderne.

Dét at nettolangstransporten er nul ved Kikhavn betyder, at sedimenttransporten langs kysten er lige stor i begge retninger. Dette er dog ikke det samme som, at der ikke sker erosion på kysten, da dette kun er tilfældet, hvis transportkapaciteten er den samme langs med kysten. Som beskrevet ovenover er transporten stigende fra Kikhavn til Gilleleje men er også stigende fra Kikhavn til Hundested. En stigende transportrate resulterer i stigende langstransport. Der sker derfor kronisk erosion ved Kikhavn, da der transporteres mere sediment ud af området både mod nordøst og sydvest, end der tilføres.

3.2.3.7.2 Baggrundserosion: Gilleleje – Helsingør

Den aktuelle langstransport fra Gilleleje til Helsingør er omkring 20.000-40.000 m³/år, og der er overordnet stigende transport gående fra Gilleleje mod Helsingør. Derudover giver Gilleleje Havn og Hornbæk Havn anledning til erosion, idet en del af langstransporten blokeres og en del aflejres et stykke fra kysten, hvorved kysten umiddelbart øst for havnene udsættes for et erosionspres.

Havnene gennemfører en delvis kunstig bypass af sandet, men nogen erosion foregår stadig.

Øst for Gilleleje Havn vurderes området at blive tilført ca. 40.000 m³/år fordelt som 15.000 m³/år fra kystnær klapning og 25.000 m³/år som naturligt bypass.

Ved Hornbæk Havn vurderes kysten af miste ca. 20.000 m³/år som følge af et voksende klitlandskab, afgravning af stranden vest for havnen samt tilbageførsel af sand i form af kystfodring og kystnær klapning af oprenset sand.

Ved Helsingør vurderes den naturlige sandtransport ud af kystzonen at være ca. 25.000 m³/år.

Således fås en baggrundserosion for den østlige halvdel af Nordkysten svarende til ca. 0,5-1,3 m³/år/m.

3.2.3.7.3 Opsamling på anbefalede fodringsrater

Med baggrund i ovenstående overvejelser gives der i Tabel 3.15 anbefalinger til årlige fodringsvolumener til vedligeholdelse af strandfodringerne. Summen af de anbefalede fodringsvolumener beløber sig til ca. 110.000 m³/år. Hertil skal lægges et yderligere bidrag til fodringsvolumenerne pga. randeffekter.

Tabel 3.15 Anbefalinger til vedligeholdelsesfodringsvolumener som følge af kronisk erosion (DHI, 2018c).

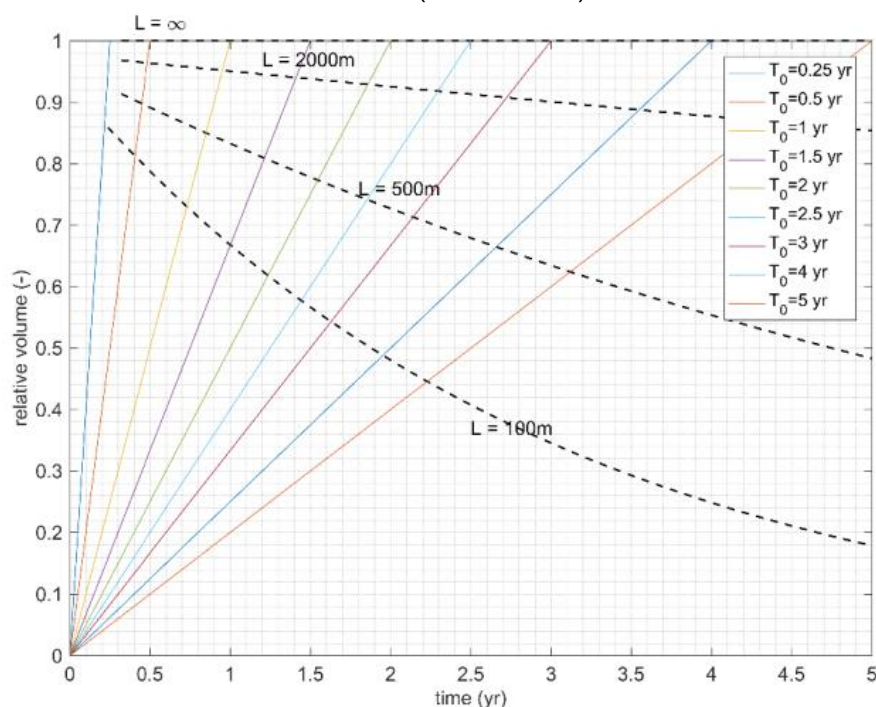
Fodringsområde	Årligt tab (m ³ /år/m)	Anbefalet fodringsrate (m ³ /år)
Kikhavn–Liseleje	3,7	28.000
Tisvilde–Vincentstien	3,7	21.000
Rågeleje–Trillingerne	3,7	7.500
Havstokken–Feriebyen	3,7	13.500
Gilbjergghoved	11,0	20.000
Gilleleje–Nakkehoved	0,5	1.000
Munkerup	1,3	6.5000
Ålsgårde	1,5	12.000

3.2.3.8 Randeffekter ved strandfodring

Strandfodringerne udgør sandformationer, der vil ændre form og jævnes ud som tiden går. Placeres sandet f.eks. uniformt i den langsgående retning og udelukkende i det område, der ønskes beskyttet, vil denne effekt opleves som et tab af sand til de omgivende strækninger. På den måde vil det fodrede sand i fodringsområdet forsvinde hurtigere end den bagvedliggende erosion tilsiger, mens de tilstødende kyststrækninger oplever tilførsel af sand fra fodringsstrækningerne.

Til vurdering af disse forhold kan nedenstående designkurver i Figur 3.62 benyttes (Drønen, Sørensen, Deigaard, Kristensen, & Ries, 2017). Kurverne svarer til reduktion af det effektive sandvolumen i et fodringsområde pga. randeffekter for typiske bølgeforhold, der svarer til Sjællands nordkyst. Kurverne svarer til fodringer med en uniform initialfodring i den langsgående retning. Fra kurverne aflæses, at man for en 5-årig periode vil opleve et tab af sand til omgivelserne som afhænger af længden af fodringsområdet. Tabet i procent er angivet i Tabel 3.16 og viser sammen med Figur 3.62 at ved at fodre over længere strækninger, vil der på sigt være et mindre eller langsommere tab af det tilførte sandvolumen pga. randeffekter end ved at fodre over kortere strækninger. Dette ses ved, at den relative volumen (sorte stiplede linjer i figuren) falder markant for strækningen, der er 100 m versus strækningen, der er 2000m. Hvis fodringsstrækningen er 2000 m, medfører randeffekterne kun, at der forsvinder 14 % af materialet (se Tabel 3.16). Hvis fodringsstrækningen er 100 m, medfører randeffekterne, at

der er forsvinder 82% af materialet (se Tabel 3.16).



Figur 3.62 Designkurver for randeffekter af sandfodringer for langsgående længder 100m, 500m og 2000m. T_0 svarer til den tid det tager for den kroniske erosion at fjerne sandfodringen 100 % i fald der ingen randeffekter er (Drønen, Sørensen, Deigaard, Kristensen, & Ries, 2017).

Tabel 3.16 Reduktion af sandvolumenet i fodringområde på grund af randeffekter (DHI, 2018c).

Fodringsstrækningens længde (m)	Reduktion hvert 5. år (%)
100	85
500	52
2000	14
Uendelig lang fodring	0

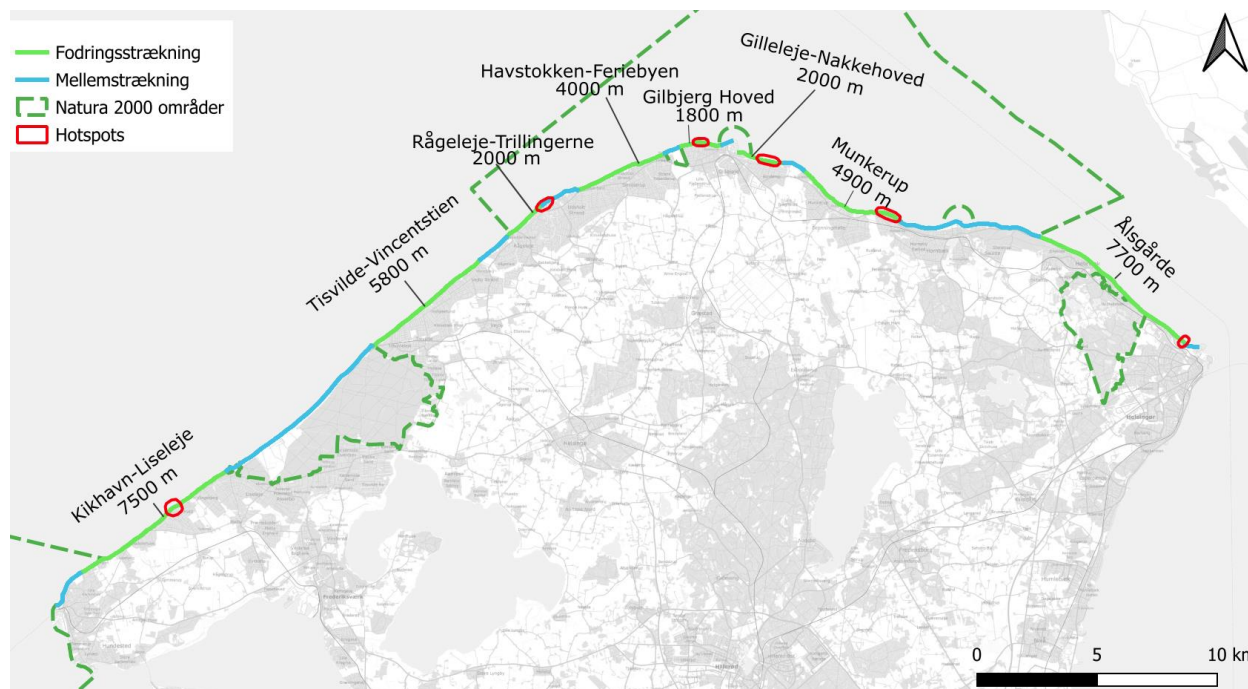
De valgte fodringsstrækninger er typisk længere end 2 km, og i det tilfælde vil tabet til omgivelserne relativt til den fodrede totalmængde være mindre end 14 %.

3.2.3.9 Vurdering af hotspots

På baggrund af det overordnede sandbudget vurderes det, at særligt Gilbjerg Hoved fodringsområdet vil være udsat for erosion. Dette skyldes, at fodringsområdet ligger på en pynt, hvor transportkapaciteten stiger.

Desuden vurderes det, at fodringsstrækningerne Kikhavn – Liseleje, Rågeleje-Trillingerne, Gilleleje-Nakkehoved, Villingebæk, Munkeup samt Ålsgårde omfatter enkelte lokaliteter vist på Figur 3.63, hvor det potentielt kan blive en udfordring at opretholde den målsatte højde af stranden foran skråningsbeskyttelserne.

På disse lokaliteter kan der blive behov for at supplere med hårde kystbeskyttelsestiltag for at sikre kystbeskyttelsen mellem vedligeholdelsesfodringerne. I alle tilfælde anbefales det dog at vente med at anlægge eventuelle nye hårde anlæg til man ser effekten af den initiale strandfodring, da det reelle behov først viser sig efter nogle år.



Figur 3.63 Forventede hotspots (røde cirkler) i fodringsområderne, hvor særlig indsats med hårde konstruktioner kan vise sig nødvendige for at fastholde den målsatte strand.

I den midterste del af fodringsstrækningen Kikhavn-Liseleje ved Hyllingeberg/Melby, umiddelbart sydvest for Liseleje Kystsikringslags er det et lille fremspring på kysten, hvor der i dag ikke er høfder/bølgebrydere, hvor der kan blive behov for at understøtte fodringen med enkelte nye hårde konstruktioner.

I den østlige ende af fodringsområdet ved Trillingerne kan der blive behov for at stabilisere fodringen med enkelte nye hårde konstruktioner.

Midt på strækningen ved selve Gilbjerg Hoved sker en markant ændring i gradienten i langtransporten, hvorfor fodringsmaterialet vanskeligt kan fastholdes. Nye hårde konstruktioner vil kunne medvirke til fastholdelse af en bredere og højere strand rundt om pynten.

Vest for Nakkehoved og umiddelbart øst for Strandbakkerne kan der blive behov for nye hårde konstruktioner for at fastholde det fodrede materiale.

Villingebæk ligger på et kystfremspring, hvor transportkapaciteten øges rundt om pynten. Fodringsmaterialet kan øst herfor have svært ved at blive liggende, hvis eksisterende høfder er for små. Et hotspot forventes at kunne forekomme ved og umiddelbart øst for pynten, som evt. kan afhjælpes med nye eller mere effektive konstruktioner.

Ud for Marienlyst Strandhotel kan der blive behov for nye hårde konstruktioner, som kan medvirke til fastholdelse af det fodrede sediment i form af en bred strand foran hotellet. Derved vil sandet i mindre grad passere Gummistranden og føres ud langs vestmolen i Nordhavnen og aflejres på Lappegrund.

3.2.4 Passage af sand forbi Gilleleje Havn og Hornbæk Havn

Af de fire havne på Nordkysten (Hundested, Gilleleje, Hornbæk og Helsingør) har Gilleleje og Hornbæk direkte indflydelse på sandtransporten og kystens erosionsforhold.

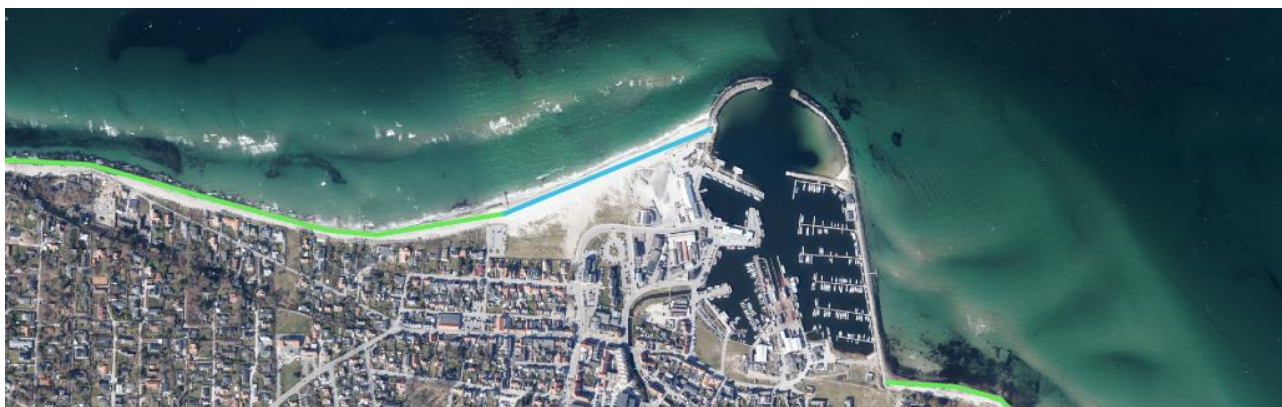
Havnene har delvist blokeret for langstransporten, hvilket har forårsaget fremrykning af kysten vest for havnen og erosion mod øst. Ved Hundested Havn er det omvendt.

Fremrykningen har gradvist givet forøget bypass af sand, reduceret den naturlige besejlingsdybde og krævet mere oprensning omkring indsejlingen.

De seneste omfattende analyser af havnenes samspil med kysterne er udført i (DHI; Hasløv & Kjærsgaard, 2013), som er anvendt i det følgende.

3.2.4.1 Gilleleje Havn

Havnen i Gilleleje blev etableret ved en eksisterende landingsplads i 1870-1880. Fremrykningen af kysten mod vest og erosionen øst for havnen er tydelig, se Figur 3.64. Revlesystemet omkring havnen kan også ses med revlen, der fører sand hen mod sejlløbet fra vest.



Figur 3.64 Gilleleje Havn. Grøn linje indikerer det er en fodringsstrækning, blå linje indikerer det er en mellemstrækning

Havnens betydning for sedimenttransporten er tidligere undersøgt ved at betragte de forskellige bidrag (Drønen, Sørensen, Deigaard, Kristensen, & Ries, 2017):

- Der aflejres sand på stranden vest for havnen, som stadig er under opbygning
- Der har foregået en afgravning af materiale på Vest stranden, som er nyttiggjort
- Der oprenses sand i sejlløbet og yderhavnen, som klappes kystnært
- En mindre oprensningsmængde fra lystbådehavnen og østlige del af yderhavnen klappes på godkendt klapplads
- En del aflejres i et større aflejningsområde øst for havnen og en del transporteres videre langs kysten øst for havnen

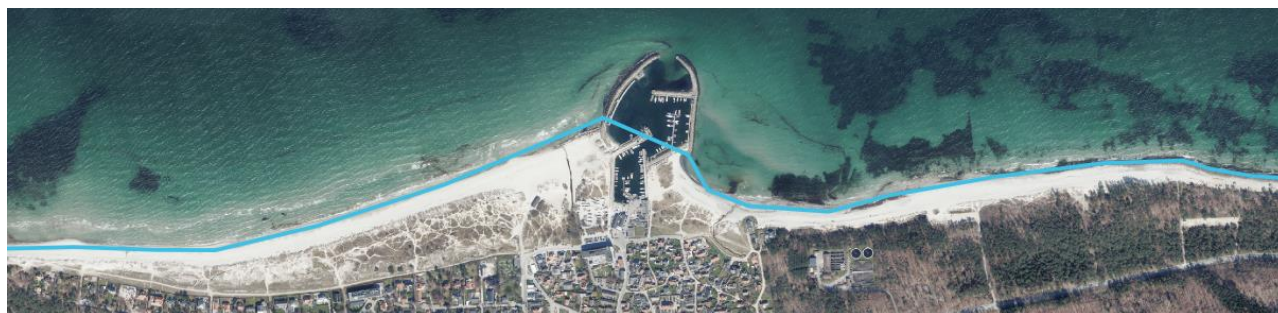
Samlet er det skønnet, at ca. 40.000 m³ årligt passerer havnen i form af naturlig bypass og kystnær klappning, og føres videre som langstransport langs kysten øst for havnen.

Det er tidligere foreslået, at tilsandingsproblemerne ved Gilleleje kunne løses for en årrække ved at foretage en massiv engangsoprensning på 200.000 m³ omkring havnen og anvende det indvundne sand til kystfodring (DHI; Hasløv & Kjærsgaard, 2013). Aflejringen vil så foregå i det etablerede reservoir uden at mindske havnens

besejlingsdybde. Der er dog ikke foretaget undersøgelser af de miljømæssige konsekvenser af projektet, og der er ikke gået videre med det.

3.2.4.2 Hornbæk Havn

Hornbæk Havn blev opført i 1881, og det daværende anlæg er i dag den mindre inderhavn. Kysten er rykket frem vest for havnen, hvorfor man har opført stadigt længere 'sandfangere' og til sidst en egentlig yderhavn med to dækværker, så sandet i nogen grad kan føres forbi uden at aflejres bag 'sandfangeren', se Figur 3.65.



Figur 3.65 Hornbæk Havn. Blå linje indikerer det er en mellemstrækning.

De forskellige hovedbidrag i sandbudgettet omkring havnen er tidligere blevet beskrevet (DHI; Hasløv & Kjærsgaard, 2013):

- Der aflejres stadig betydelige sandmængder vest for havnen, hvor sandet blæser ind i land og danner høje klitter.
- Der afgraves en betydelig del af det aflejrede sand på veststranden, som dels er blevet nyttiggjort og dels er klappet kystnært for her at indgå i langtransporten.
- Der aflejres sand i indsejlingen, som oprenses og klappes kystnært.
- Sandet, som passerer havnen, aflejres i læ-området øst for denne og har svært ved at komme ind til kysten og indgå i langtransporten.

Samlet blev det skønnet, at ca. 25.000 m³ årligt er ført videre og indgår i langtransporten øst for havnen.

I lighed med Gilleleje Havn er det tidligere foreslået, at tilsandingsproblemet ved Hornbæk Havn kan løses for en årrække ved at etablere et sedimentations-reservoir ved en større enkeltoprensning på ca. 100.000 m³ (DHI; Hasløv & Kjærsgaard, 2013). Der er dog ikke foretaget undersøgelser af de miljømæssige konsekvenser af projektet, og der er ikke gået videre med det.

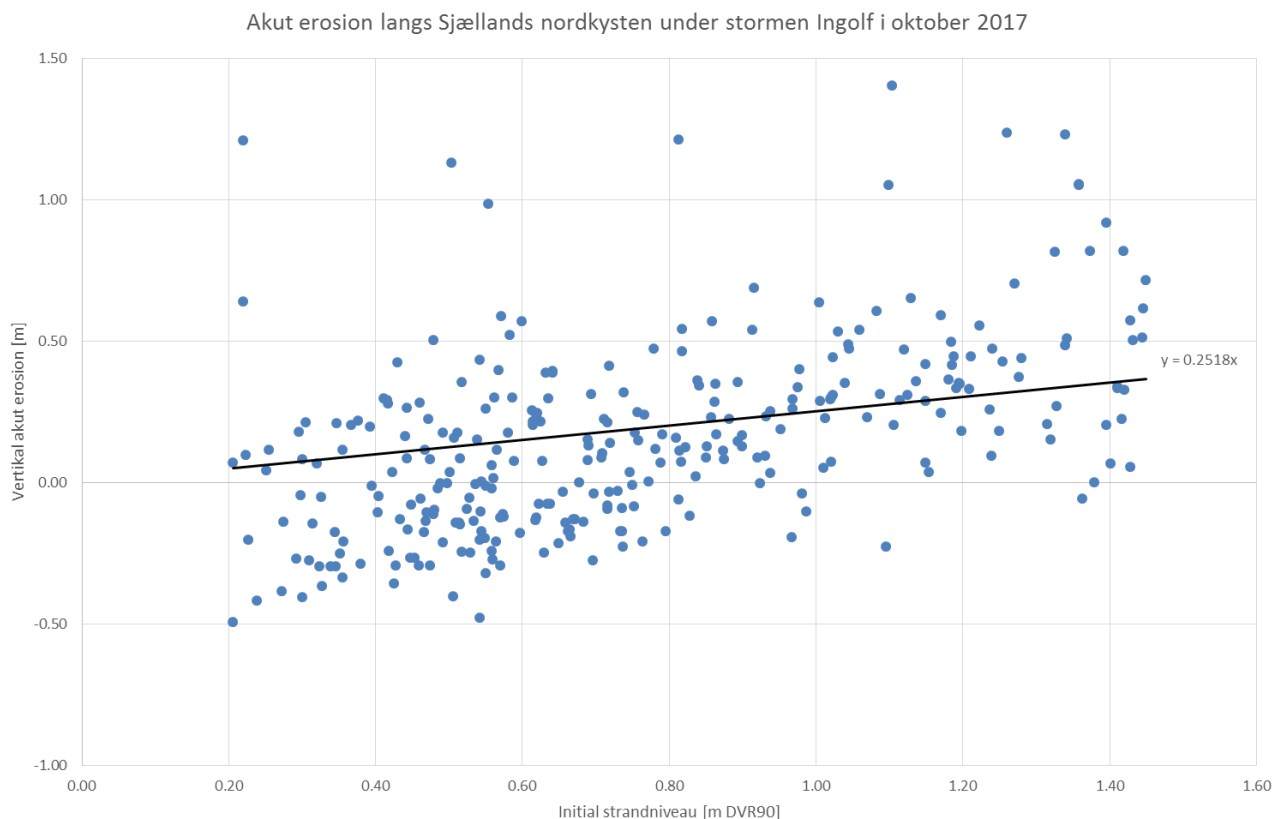
3.2.5 Sandtransport på tværs af stranden

3.2.5.1 Akut erosion

Akut erosion af stranden forekommer i forbindelse med storme som følge af forhøjet vandstand og bølger. Den akutte erosion sker primært i den stejle del af kystprofilen på stranden. Stranden bliver fladere og lavere samtidig med, at sand transporteres ud på lidt dybere vand. Ral bliver typisk på den øverste del af stranden. Efter stormen vil man typisk se, at stormen har medført erosion af strand og evt. klitter/klinter.

Mellem udførelsen af de topografiske og de bathymetriske opmålinger, blev Sjællands nordkyst ramt af stormen Ingolf d. 28. oktober 2017. Vandstanden under stormen Ingolf var omkring +1,20 m DVR90 i Hornbæk

Havn. Stormen forårsagede en betydelig akut erosion af stranden, som er kvantificeret ved at sammenligne højdemålinger i samme punkter foretaget før og efter stormen, se Figur 3.66.



Figur 3.66 Opmålt akut erosion efter stormen Ingolf d. 28. oktober 2017.

Figuren viser den vertikale erosion (forskel på strandniveau før og efter stormen Ingolf) som funktion af strandniveauet før Ingolf. Figuren viser, at der er en generel tendens til, at den akutte erosion stiger med den initiale højde af stranden. Opmålingerne viser, at den vertikale akutte erosion var op til 1,4 m under stormen Ingolf. Negligeres den akutte erosion i den fladere del af kystprofilen under kote 0, fås en trendlinje som vist i Figur 3.66. Trendlinjen viser, at den akutte erosion i gennemsnit udgør i størrelsesorden 25 % af det initiale strandniveau før stormen Ingolf på Nordkysten. Den akutte erosion forekommer primært i opskylszonen under stormen og har derfor en øvre grænse, som afhænger af vandstand og bølger under den givne storm.

Figuren viser, at der er stor spredning på dataene. Der er betydelig usikkerhed på analysen, idet de opmålte punkter er fordelt ud langs hele Nordkysten. Derved medtages data fra ralprofiler og sandprofiler i samme figur. Desuden indeholder figuren data fra ubeskyttede og beskyttede strækninger.

Generelt forventes det, at den største akutte erosion foregår på de sandede strækninger, hvorimod den akutte erosion langs strækninger med ralstrande er begrænset.

3.2.5.2 Modellering af akut erosion af sandstrand

Formålet med at modellere den akutte erosion er at give et modelbaseret datagrundlag til bestemmelse af akut erosion af en sandstrand, vandstand og bølgeforhold foran en typisk skråningsbeskyttelse på Nordkysten under en designstorm.

Skråningsbeskyttelser er et middel til at begrænse, hvor langt ind i baglandet den akutte erosion kan nå. Typisk vil skråningsbeskyttelsen ikke bremse den mængde af sand, der eroderes total set, men derimod forskyde, hvor i profilet sandet eroderes fra. Erosionspresset vil således øges i området lige foran skråningsbeskyttelsen sammenlignet med en situation uden beskyttelse.

Strandfodring vil reducere påvirkningen fra akut og kronisk erosion på skråningsbeskyttelserne og baglandet.

3.2.5.3 Model

Den akutte erosion af en sandstrand foran en skråningsbeskyttelse under en storm er modelleret med en kobling af modulerne for bølger, hydrodynamik, sedimenttransport og morfologi (MIKE 21 SW FM, MIKE 21 HD FM og MIKE 21 ST/MD FM) udviklet af DHI.

Modelopsætningen inkluderer samspillet mellem korte vindgenererede bølger, bølgegrupper samt understrøm og den resulterende tværgående sandtransport og tilhørende morfologiske udvikling (DHI, 2018c).

Tre designstorme er valgt som grundlag for at udvikle designkurver for typiske skråningsbeskyttelser på Nordkysten:

- Mest ekstreme storm med returperiode på 50 år langs kysten vest for Gilleleje
- Mest ekstreme storm med returperiode på 50 år langs kysten øst for Gilleleje
- Mest ekstreme vandstand og bølgehøjde svarende til stormen Bodil d. 6. december 2013

Vandstande og bølger er bestemt ud fra ekstremværdianalysen af de meteomarine modelresultater og en vurdering af en typisk varighed af designstormen.

Varigheden af designstormen har stor betydning for erosionsdybderne, og er derfor en vigtig parameter for bestemmelse af sikkerhedsniveauet. Fra analyser af tidsserier af ekstremhændelserne vurderes det, at hele stormforløbet for 50-årshændelser typisk har varigheder i størrelsesordenen 10-15 timer. Det tidsrum, hvor bølger og vandstand er maksimale og sammenfaldende under stormen, og dermed hvor den akutte erosion foregår højt i profilet, er i størrelsesordenen 5-6 timer.

For at vurdere følsomheden af de beregnede erosionsdybder overfor varigheden, beregnes erosionen i alle tilfælde videre fra de 6 timer og op til 12 timer. Forskellen i de resulterende erosionsdybder mellem en storm, der topper 6 timer og en storm der topper 12 timer noteredes til at være i størrelsesordenen 0,3-0,5 m afhængig af skræntbeskyttelsens placering i strandprofilet.

På baggrund af ovenstående vurderinger og overvejelser, er det i beregningerne valgt, at en storm, der svarer til en 50-årshændelse, har en varighed på 6 timer.

Stormen Bodils varighed er bestemt ud fra kombinerede vurderinger af målinger af vandstand ved Hornbæk og modelbaserede meteomarine bølger- og vandstandsresultater. Stormen Bodil vurderes ud fra de nyeste statistikker at have en returperiode på mere end 200 år og modelleres med en varighed på 15 timer.

Tabel 3.17 opsummerer de anvendte designparametre på dybt vand for designstormene.

Tabel 3.17 De tre stormscenarier.

Returperiode	Bølgehøjde, H_s (m)	Vandstand (m)	Varighed (timer)
50 år vest	4.4	1.69	6
50 år øst	3.6	1.73	6
Bodil	4.0	1.92	15

Der anvendes et ligevægtsprofil under kote 0 for sand med en middeldkornstørrelse på $d_{50}=0,35$ mm og en middel hældning på stranden på 1:15 over kote 0 som grundlag for beregningerne af den akutte erosion foran skråningsbeskyttelserne.

Kystprofilet har ingen revler og de beregnede erosionsdybder udgør dermed relativt konservative estimater, idet revler er med til at bryde bølgerne og tage en andel af energien ud, før bølgerne når den øvre del af profilet under stormvejr. Når revlerne ikke medtages, vil stranden typisk blive påvirket af højere bølger end hvis der havde været revler.

Der er i modellen ikke indregnet effekten af ral på den øverste del af stranden. Dette er konservativt, da rallen vil reducere den akutte erosion på mange strækninger langs Nordkysten. Dette har dog ingen reel betydning, da beregningerne er anvendt til at give en ide om erosionen under en stormhændelse. Efterfølgende er projektforslaget designet til at beskytte mod denne erosion. Der anvendes en skråningsbeskyttelse med en hældning på 1:2 i beregningerne. Den morfologiske udvikling beregnes for skråningsbeskyttelser placeret i forskellige niveauer på stranden, hvilket gør det muligt i beregningerne at fastslå betydningen af højden af strandfodringen.

3.2.5.4 Resultater

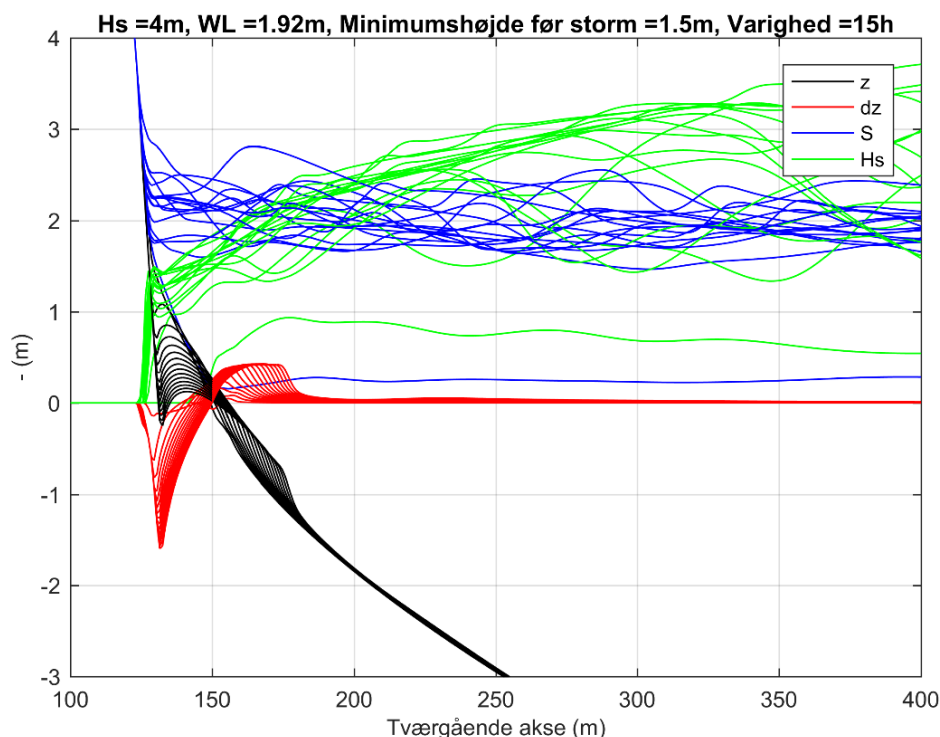
Der er udført følgende beregninger af den akutte erosion foran skråningsbeskyttelserne:

- Følsomhedstest for varighed af vestlig og østlig 50-årshændelse.
- Følsomhedstest for strandhældning for vestlig 50-årshændelse.
- Følsomhedstest for kornstørrelse for vestlig 50-årshændelse.
- Designsimuleringer baseret på de tre udvalgte storme (50-årshændelse med storm fra vest og øst – samt stormen Bodil) og syv højder af stranden, hvor skråningsbeskyttelse og stranden mødes.

Resultaterne for alle modellerede akuterosionshændelser ses i (DHI, 2018c) Bilag C. Resultaterne viser udviklingen af strandprofilet foran skråningsbeskyttelsen sammen med erosionsdybder, bølgehøjdefordeling og vandstandsfordeling for hver time over hver simuleret storm. I det næste præsenteres relevante modelresultater, der ligger til grund for det kysttekniske projektforslag.

Figur 3.67 giver et indtryk af den modellerede udvikling af morfologien foran skråningsbeskyttelsen. Som bølgerne nærmer sig kysten inducerer de vindgenererede bølger bølgegrupper, som forstærkes mod kysten og "frigives", idet de vindgenererede kortere bølger bryder. De lange frigivne bølger danner et opskyl på konstruktionen og skaber reflekterede bølger, der vandrer ud igennem profilet mod dybere vand.

De mere energiholdige bølger i grupperne bryder længere ude i den dybere del af profilet, mens bølgegrupper med mindre bølgeenergi bryder længere inde. Dette indebærer, at den gennemsnitlige bølgebrydning (gennemsnit over mange bølgeperioder) intensiveres som bølgerne nærmer sig konstruktionen. Den overskydende bølgeenergi tages ud af bølgebrydning på den stejle skråning.



Figur 3.67 Eksempel på erosionsberegning over stormen med 1-times mellemrum. Sorte kurver viser udviklingen af kystprofilet. Røde kurver viser udviklingen i erosion og aflejningsmønster. Grønne kurver viser øjebliksbilleder af bølgehøjdens variation over profilet. Blå kurver er øjebliksbilleder af vandstanden.

De bølgebevægelser og strømninger, der foregår i dette forløb, eroderer stranden tæt ved konstruktion og fører det eroderede sand længere ud i profilet, hvor det aflejres i den ydre del af det intensive bølgebrydningsområde. Dette betyder, at stranden ved konstruktionens fodpunkt eroderes således, at den før begravede del af konstruktionen bliver blotlagt mere og mere.

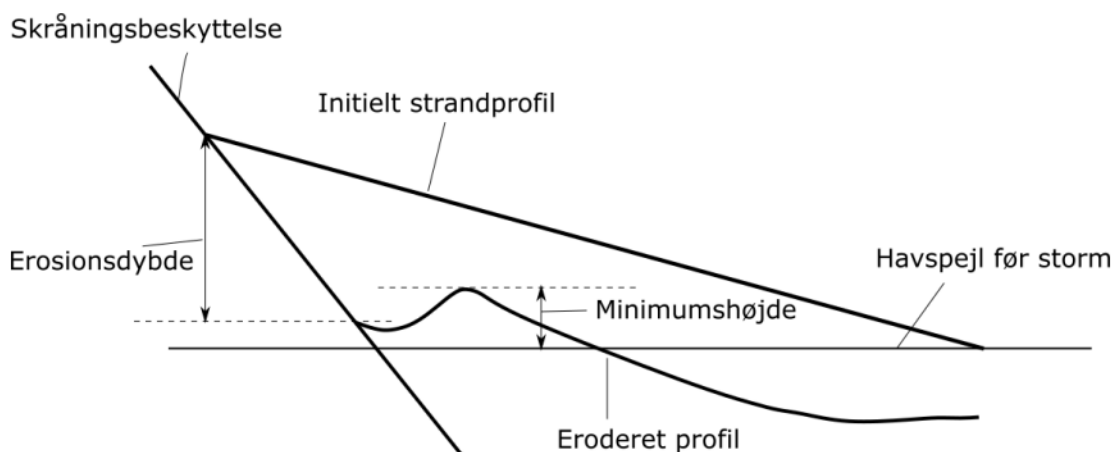
Samtidig ses der i beregningen en tendens til en kraftigere erosion tæt på konstruktionen end lidt foran, hvor en lokal "forhøjning" dannes efterhånden, som erosionen pågår. Sagt på en anden måde, er erosionen helt tæt på konstruktionen større end et lille stykke foran denne.

Fra beregningerne udtrækkes og præsenteres i det følgende en række størrelser, som benyttes som input til design af kystbeskyttelseskonstruktionerne på stranden:

- Strandhøjden lige foran konstruktionen (ved den lille forhøjning), herefter kaldet "minimumshøjden af stranden foran konstruktionen".
- Den maksimale erosionsdybde, som angiver højdeforskellen mellem startniveauet og slutniveauet efter stormen af det punkt, hvor konstruktion og strand mødes.
- Det eroderede sandvolumen.

- Gennemsnitsbølgehøjder foran konstruktion over de sidste 3 timer af stormen.
- Gennemsnitsvandstanden foran konstruktion over de sidste 3 timer af stormen.

Definitionerne af erosionsdybden og minimumshøjden ses desuden i principsnittet i Figur 3.68. Bemærk, at den maksimale erosionsdybde måles fra det punkt, hvor konstruktion og sandstrand mødes, mens minimumshøjden bestemmes ved den lille forhøjning, der dannes i simuleringen.



Figur 3.68 Definitioner af maksimal erosionsdybde og minimumshøjde i relation til det eroderede profil (DHI, 2018c)

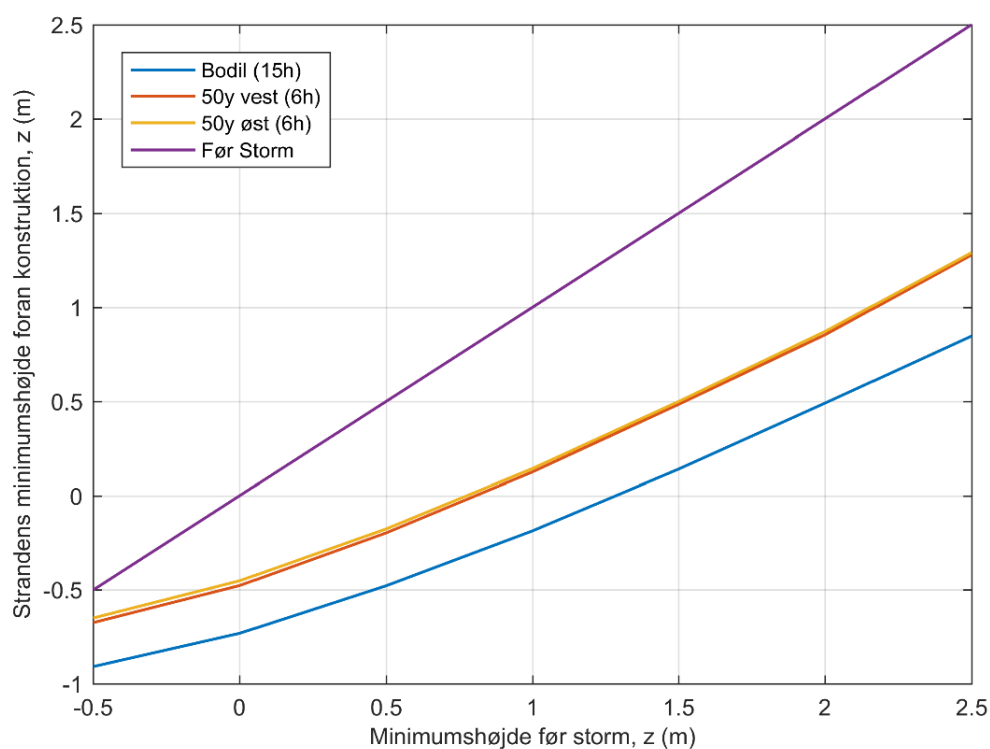
Som baggrund for design af skråningsbeskyttelsen beregnes den akutte erosion for syv placeringer af konstruktionen i strandprofilet for de tre stormhændelser præsenteret indledningsvist i Tabel 3.17.

Resultaterne af beregningerne kan ses i (DHI, 2018c), Bilag C i form af kurveskarer for forløbet af profiludviklingen. I

Tabel 3.18 og Figur 3.69 er minimumshøjden foran skråningsbeskyttelsen efter en storm angivet som funktion af strandens højde foran skråningsbeskyttelsen inden stormen. Det ses, at jo højere stranden er, jo mere sediment eroderes, dvs. forskellen mellem strandens kote før stormen og minimumshøjden efter stormen stiger jo højere stranden før stormen er. Hvis strandens højde er 2,0 m foran skråningsbeskyttelsen før en 50-årshændelse er den efter stormen omkring 0,9 m.

Tabel 3.18 Minimumshøjde af strand foran skråningsbeskyttelsen (konstruktion) efter storm, som funktion af strandens højde foran skråningsbeskyttelsen inden stormen (DHI, 2018c).

	Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm (m)		
Initial minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
- 0.5	-0.67	-0.65	-0,91
+0.0	-0.48	-0.45	-0,73
+0.5	-0.20	-0.18	-0,48
+1.0	+0.13	+0.14	-0,19
+1.5	+0.48	+0.50	+0,14
+2.0	+0.85	+0.87	+0,49
+2.5	+1.28	+1.29	+0,85



Figur 3.69 Minimumshøjde af strand efter storm som funktion af initial højde af punktet, hvor stranden møder skråningsbeskyttelsen (DHI, 2018c).

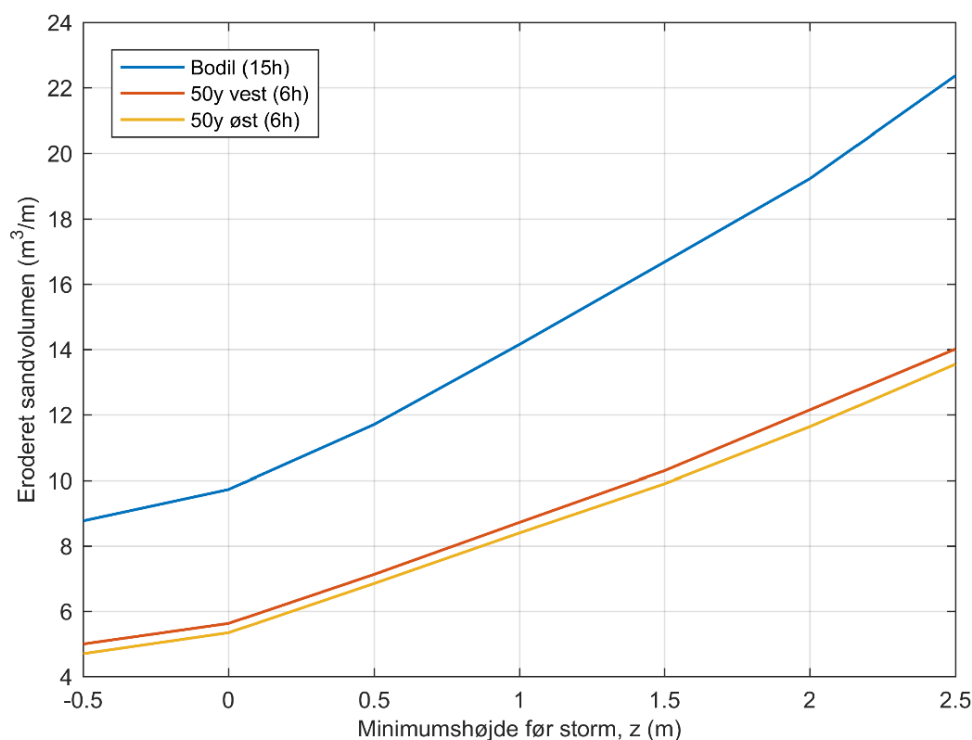
Det samme ses, hvis volumen af sandet der eroderes fra området tæt foran konstruktionen, og som aflejres længere ude i profilet undersøges. Tabel 3.19 og Figur 3.70 angiver det eroderede volumen pr. løbende meter

langs kysten som funktion af strandens højde foran skråningsbeskyttelsen inden stormen. Det ses her, at erosionsvolumenerne er i størrelsesordenen 7-22 m³/m afhængig af placeringen af skråningsbeskyttelsen. Jo højere skråningsbeskyttelsen er placeret oppe på stranden, des større volumener flyttes.

Beregninger viser, at der under meget ekstreme storme eroderes kraftigt på den øvre del af stranden og foran skråningsbeskyttelsen.

Tabel 3.19 Erosionsvolumener ved tre stormscenarier for forskellige placeringer af skråningsbeskyttelsen op af strandprofilen (DHI, 2018c).

Initial minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	Total akut erosion volumen (m ³ /m)		
	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
- 0.5	5.0	4.7	7.2
+0.0	5.6	5.3	8.1
+0.5	7.1	6.9	9.9
+1.0	8.7	8.4	12.1
+1.5	10.3	9.9	14.4
+2.0	12.2	11.6	16.8
+2.5	14.0	13.5	19.9



Figur 3.70 Erosionsvolumener ved de tre stormscenarier for forskellige placeringer af skråningsbeskyttelsen op af strandprofilen (DHI, 2018c).

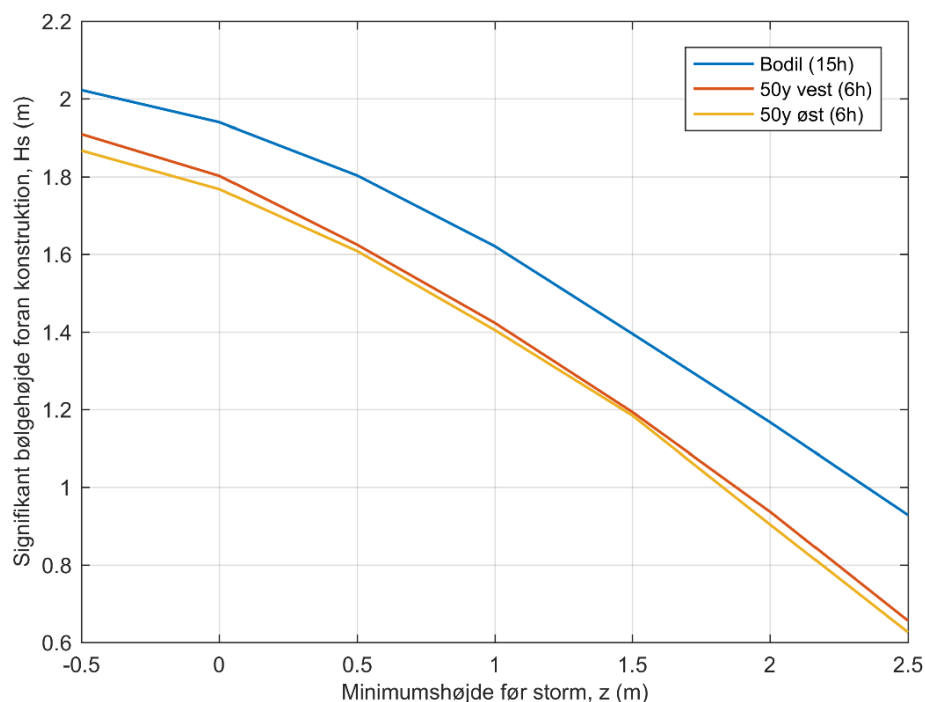
Modellen opløser bølgegrupperne i den hydrodynamiske model og inkluderer således både de inducerede bundne lange bølger, deres frigivelse i brydningszonen, opskyl og refleksion. For at bestemme en middelbølgehøjde og middelvandstande til brug i design af skråningsbeskyttelserne, udregnes middelværdierne af de øjeblikkelige værdier over stormen af bølgehøjder og vandstande ved toppunktet. Der gives derudover værdier for variationen i vandstanden omkring middel. Endelig vises den totale vanddybde, som afhænger af vandstanden og det eroderede bundniveau.

Middelbølgehøjden beregnes ved at finde gennemsnittet af den øjeblikkelige bølgeenergi over bølgegrupperne over de sidste 3 timer af stormen.

I Tabel 3.20 og Figur 3.71 ses den signifikante bølgehøjde foran konstruktionen som funktion af den initiale højde, hvor konstruktion og strand mødes før stormen. Der bemærkes overordnet, at der her er tale om en situation med dybdebegrænset bølgebrydning, idet variationen af bølgehøjden i store stræk følger den totale dybde foran konstruktionen.

Tabel 3.20 Signifikant bølgehøjde foran konstruktion (DHI, 2018c).

Initiel minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	Middel signifikant bølgehøjde, Hs (m)		
	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
- 0.5	1.91	1.87	2.02
+0.0	1.80	1.77	1.94
+0.5	1.62	1.61	1.80
+1.0	1.42	1.40	1.62
+1.5	1.19	1.18	1.39
+2.0	0.94	0.90	1.17
+2.5	0.66	0.63	0.93

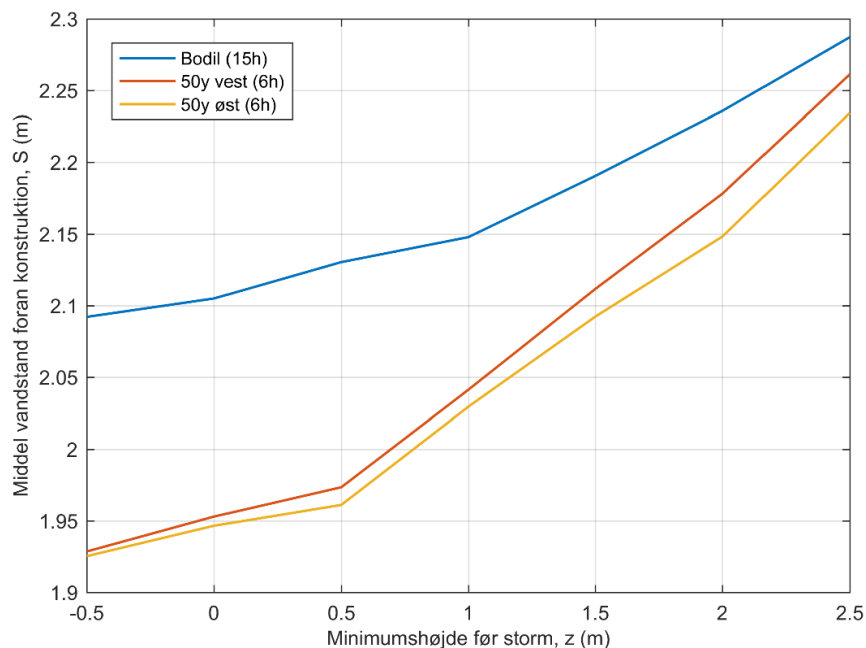


Figur 3.71 Signifikant bølgehøjde som funktion af initial strandhøjde ved konstruktion (DHI, 2018c).

Middelvandstanden er bestemt som gennemsnittet af vandstanden foran konstruktionen over de sidste 3 timer af den voldsomste del af stormen. I Tabel 3.21 og Figur 3.72 er resultatet af middelvandstanden foran konstruktion vist. Det ses, at punktet foran konstruktionen i alle tilfælde er påvirket af bølge-setup pga. kræfterne fra bølgebrydningen, idet alle vandstande er højere end vandstanden på dybt vand.

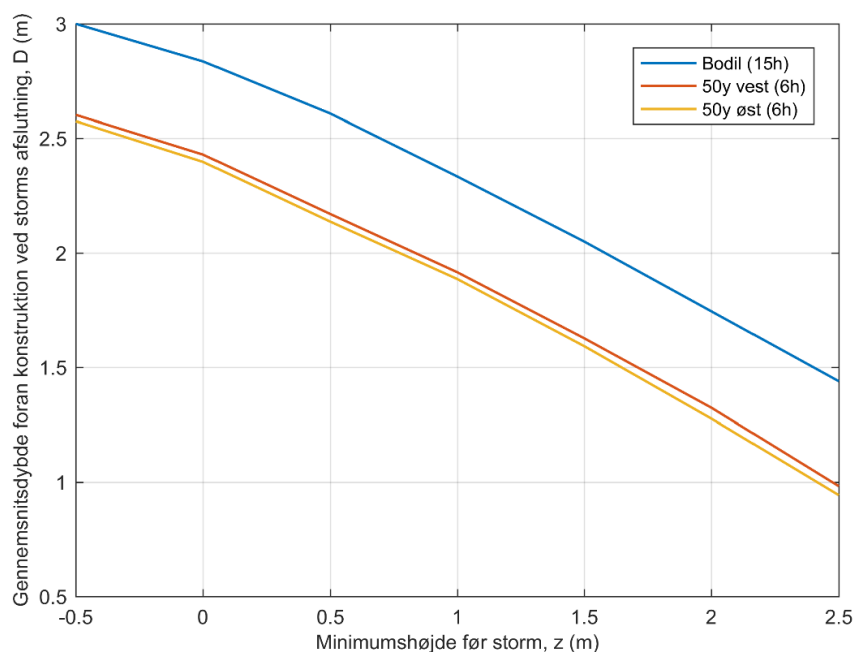
Tabel 3.21 Middelvandstand foran konstruktionen (DHI, 2018c).

Initiel minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	Middel vandstand, S (m)		
	50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
- 0.5	1.93	1.93	2.09
+0.0	1.95	1.95	2.11
+0.5	1.97	1.96	2.13
+1.0	2.04	2.03	2.15
+1.5	2.11	2.09	2.19
+2.0	2.18	2.15	2.24
+2.5	2.26	2.23	2.29



Figur 3.72 Middelvandsstand ved slutningen af stormen (DHI, 2018c).

Den totale middel-vanddybde er en relevant parameter, idet bølgerne er begrænsede af denne dybde. Dybden er bestemt af summen af vandstand og højde af den eroderede strand foran konstruktionen. I Figur 3.73 ses middeldybden som funktion af de forskellige placeringer af skråningsbeskyttelsen på stranden.



Figur 3.73 Gennemsnit vanddybde foran konstruktionen i slutningen af stormen, som funktion af strandens højde foran konstruktionen før stormen (DHI, 2018c).

3.2.5.5 Akut erosion af strand med ral og sand

Ral transporteres typisk landværts under storm og der vil derfor ofte ikke forekomme nævneværdig akut erosion af ralstrande foran skråningsbeskyttelserne.

Den akutte erosion af en sandstrand med initial højde af på +2,0 m i forhold til middelvandstanden foran en skråningsbeskyttelse er modelleret til ca. 1,1 m vest og øst for Gilleleje for en 50-årshændelse således, at strandniveauet efter stormen er +0,9 m i forhold til middelvandstanden (se Figur 3.69).

En kombinationsfodring hvor der nederst lægges et rallag som dækkes til af sand skal derfor kunne sikre en minimumsstrandhøjde under en 50-årshændelse på ca. +0,9 m i forhold til middelvandstanden vest og øst for Gilleleje foran en skråningsbeskyttelse.

Ralstranden er typisk stejlere end sandstranden, men også mere permeabel. Dette har betydning for bølgenes opløb og brydning på det øvre strandprofil, og dermed for, hvor store bølgerne kan blive foran skråningsbeskyttelserne.

Resultaterne af modelleringen af akut erosion af sandstranden viser, at den højeste del af strandprofilet ligger et stykke foran foden af skråningsbeskyttelsen efter stormen.

For at tage højde for, at sandstrandens højeste punkt under en storm ligger lidt foran skråningsbeskyttelsen og at ralstranden er stejlere end sandstranden skal højden af rallaget være i +1,2 m i forhold til middelvandstanden foran skråningsbeskyttelserne. Dette vil give samme beskyttelse mod erosion som en ren sandstrand til kote +2,0 m. For at sikre passage langs stranden og sikre, at der altid ligger sand på stranden foreslås det, at der som del af beskyttelsen mod akuterrosion lægges sand ovenpå rallen til mindst kote +1,5 m i forhold til middelvandstanden.

3.3 Kystteknisk vurdering

Den naturlige tilstand af Nordkysten er i dag moderat erosion. Kystområdet er over de sidste ca. 100 år blevet udbygget med sommerhusområder og fiskerisamfund. Derfor er der opstået et behov for at stabilisere kystlinjen mod yderligere tilbagerykning. Gennem de sidste ca. 100 år er der anlagt omfattende kystbeskyttelse langs de bebyggede dele af Nordkysten. Kystbeskyttelsen består af forskellige faste anlæg i form af hofdere, bølgebrydere og skråningsbeskyttelser. Hofdere og bølgebrydere virker ved at fange en del af det sand og ral, som transporteres langs kysten. Skråningsbeskyttelserne hindrer tilbagerykning af kystlinjen og sikrer den bagvedliggende klint eller klit mod erosion. Beskyttelsen af kysten imod erosion medfører derfor en reduktion i den mængde nedbrydningsprodukter, hovedsageligt sand, som tilføres kysten ved erosion af baglandet. Da kystprocesserne i resten af kystprofilet fortsætter, medfører sikringen af kysten med hårde konstruktioner, at den ikke-beskyttede del af kystprofilet fortsat eroderes. Dette betyder, at stranden efterhånden forsvinder fra de strækninger, som er beskyttet af hård kystbeskyttelse. Den pågående erosion af kystprofilet på de sikrede strækninger medfører således følgende forhold:

- Sandstranden forsvinder efterhånden og passage langs stranden vanskeliggøres eller forhindres helt. Derudover vil den tilbageværende strand oftest være stenet.
- Det lavere kystprofil foran den hårde kystbeskyttelse som følge af erosion medfører, at kystbeskyttelseskonstruktionerne bliver mere udsatte for påvirkninger fra større bølger, efterhånden som vanddybden øges. Derfor vil der til stadighed være behov for at forstærke eksisterende kystbeskyttelseskonstruktioner, selv uden havspejlsstigninger. Med det stigende havspejl vil behovet for forstærkning af de eksisterende kystbeskyttelseskonstruktioner øges yderligere med tiden.

- Hårde kystbeskyttelseskonstruktioner fastholder kystlinjen, dvs. sikrer kystkanten imod tilbagemykning. På kyststrækninger med hårde konstruktioner, er strandene nogle steder lidt bredere end langs nabostrækningerne og problematikken med erosion ser derfor mindre ud på disse strækninger. Dette skyldes dog kun, at høfder og bølgebrydere fanger en del af sedimentet i langstransporten. Dette medfører, at der sker erosion i kystprofilet og ubeskyttede skrånninger eroderes nedstrøms for de beskyttede strækninger, svarende til den mængde der tilbageholdes af de hårde kystbeskyttelseskonstruktioner. Hård kystbeskyttelse alene vil herved forskyde erosionsproblematikken ned langs kysten og derved flytte problemet hen til naboerne.

Det er denne situation, som store strækninger af Nordkysten befinder sig i. Fortsat anvendelse af hård kystbeskyttelse alene vil således ikke standse den pågående erosion i kystprofilet søværts for konstruktionerne og vil herudover øge behovet for forstærkning af eksisterende hård kystbeskyttelse og for yderligere udbygning af kystbeskyttelsen for fortsat at sikre ejendommene langs den udsatte kyst.

3.3.1 Erosionspres

Langs Nordkysten er en stor del af kystlinjen gennem årene rykket betydeligt tilbage primært med undtagelse af kysten vest for Gilleleje Havn, Hornbæk Havn og Helsingør Havn, samt øst for Hundested Havn. Kysterosionen vurderes at fortsætte i fremtiden med øget hastighed bl.a. som følge af havspejlsstigning.

Nordkysten er udsat for et stort erosionspres som følge af kronisk og akut erosion. Kronisk erosion er den løbende erosion i hele kystprofilet som skyldes ubalance i sedimentbudgettet, mens akut erosion er øjeblikkelig erosion i den øvre del af kystprofilet, som sker under stormhændelser (COWI, 2016).

3.3.2 Kronisk erosion

Der er i dag generelt mangel på sand og ral langs Nordkysten som følge af, at transporten af sand og ral langs kysten (langstransporten) stiger fra Kikhavn imod Gilleleje og igen fra Gilleleje til Hornbæk og fra Hornbæk til Helsingør, hvilket giver anledning til kronisk erosion. En af hovedårsagerne til manglen på sand og ral er, at havnene udgør barrierer for transporten langs Nordkysten, idet en stor del af langstransporten fanges/oprenses ved havnene og derved mangler øst herfor.

Den omfattende hårde kystbeskyttelse langs Nordkysten i form af skråningsbeskyttelser, høfder og bølgebrydere har medført, at tilførslen af sand og ral til kysten fra skrænterne med tiden er reduceret betydeligt. I takt med at den løbende udbygning af skråningsbeskyttelserne har stabiliseret skrånningerne, er der lange strækninger, hvor stranden er blevet smallere, helt forsvundet eller afløst af sten- og ralstrand. Vanddybderne foran den eksisterende hårde kystbeskyttelse er herved gradvist øget. Den kroniske erosion er ikke stoppet ved etableringen af hård kystbeskyttelse, men snarere forværret, da der bliver mindre og mindre tilførsel af sand og ral fra erosion af skrænterne. Så i stedet for erosion af skrænterne fortsætter erosionen i den ubeskyttede del af kystprofilet, dvs. fra stranden og ud i vandet til ca. 5 m vanddybde. Dette resulterer i, at dybden på strandplanet gradvist bliver større. (COWI, 2016).

3.3.3 Akut erosion

Nordkysten er også udsat for et stort erosionspres som følge af akut erosion i forbindelse med storme, hvor der er kraftig bølgepåvirkning og højvande samtidigt (stormflod). I disse situationer eroderer den øverste del af kystprofilet tilbage (bagstrand og skrænterne) og det eroderede materiale føres dels længere ud i kystprofilet og dels langs kysten.

Stormen Bodil i 2013 medførte ekstraordinært langvarigt ekstremt højvande. Kombinationen af større vanddybde langs kysten og den forhøjede vandstand under stormen medførte omfattende skader på den eksisterende kystbeskyttelse og skrånningerne bagved. Bodil og efterfølgende større storme såsom Ingolf i 2017 og

Malik i 2022 viste, at der er behov for vedligeholdelse af strandene og kystbeskyttelsen på Nordkysten, dels for at beskytte mod fremtidig akut erosion under stormflod, og dels for at beskytte mod den kroniske erosion.

Ral transporteres typisk landværts under storm og der vil derfor ofte ikke forekomme nævneværdig akut erosion af ralstrande foran skråningsbeskyttelserne. (COWI, 2016).

3.3.4 Forstærkning af eksisterende hård kystbeskyttelse

Der er mange steder langs Nordkysten gennem årene bygget hård kystbeskyttelse i form af høfder, bølgebrydere og skråningsbeskyttelser. En del af denne hårde kystbeskyttelse blev beskadiget både under stormen Bodil d. 6. december 2013 og under senere storme, og er siden blevet repareret og mange steder væsentligt udbygget og forhøjet. Konstruktionerne er dog oftest genopbygget med eksisterende stenmaterialer, som ofte ikke er tilstrækkelig store til at modstå nye storme, hverken i dag eller fremover, da vanddybden foran kystbeskyttelsesanlæggene er øget og vil fortsætte med at forøges yderligere fremover. Derudover er mange af de eksisterende anlæg ikke høje nok som følge af den forøgede vanddybde søværts for anlægget.

Kystlagene administrerer typisk kyststrækninger på en halv til en hel kilometer, og hvert lag fokuserer typisk på at beskytte kystskrænten mod erosion, mens der ikke fokuseres på beskyttelse af selve stranden. Der har været en tendens til at kystbeskyttelsesanlæggene på en strækning har medført øget erosionspres på nabostrækningen mod øst i og med, at tilførslen af sediment til nabostrækningen er blevet reduceret. På den måde er erosionspresset blevet flyttet langs kysten, og det er dermed blevet nødvendigt at anlægge hård kystbeskyttelse på lange strækninger.

Mange steder har man forsøgt at holde på stranden ved at opføre høfder eller kystnære bølgebrydere. Der kommer dog generelt ikke mere sand og ral i systemet ved, at de forskellige kystlag kæmper om at fange en del af den faldende mængde sand og ral, som vandrer langs kysten.

Det generelle billede er, at kysterosionen fortsætter ude i kystprofilen på trods af den hårde kystbeskyttelse, hvilket langsomt forværrer situationen, efterhånden som vanddybden øges. Herved bliver bølgerne, der kan nå stranden og skråningsbeskyttelserne, stadig større.

Den aktuelle og fremtidige kroniske og akutte erosion viser sig således i stigende grad at være en fælles udfordring for grundejerne langs hele Nordkysten.

Det er teknisk muligt at forstærke den eksisterende kystbeskyttelse ved at udbygge konstruktionerne for derved at opnå den ønskede beskyttelse af ejendomme og infrastruktur. Denne praksis vil dog medføre, at kysten bliver yderligere udsat i fremtiden, fordi erosionen og forstejlingen af kystprofilen vil fortsætte. Derfor er det ikke tilrådeligt at fortsætte denne praksis, hvor stranden gradvist forsvinder helt.

Den kysttekniske vurdering understøtter det kysttekniske skitseprojekt (COWI, 2016) som konkluderede, at det omfattende underskud af sand og ral på Nordkysten ikke kan afhjælpes med hård kystbeskyttelse alene. Det omfattende underskud af sand og ral på Nordkysten kræver strandfodring (sand/ral) fremover for at kunne skabe en langsigtet og tilstrækkelig beskyttelse af Nordkysten.

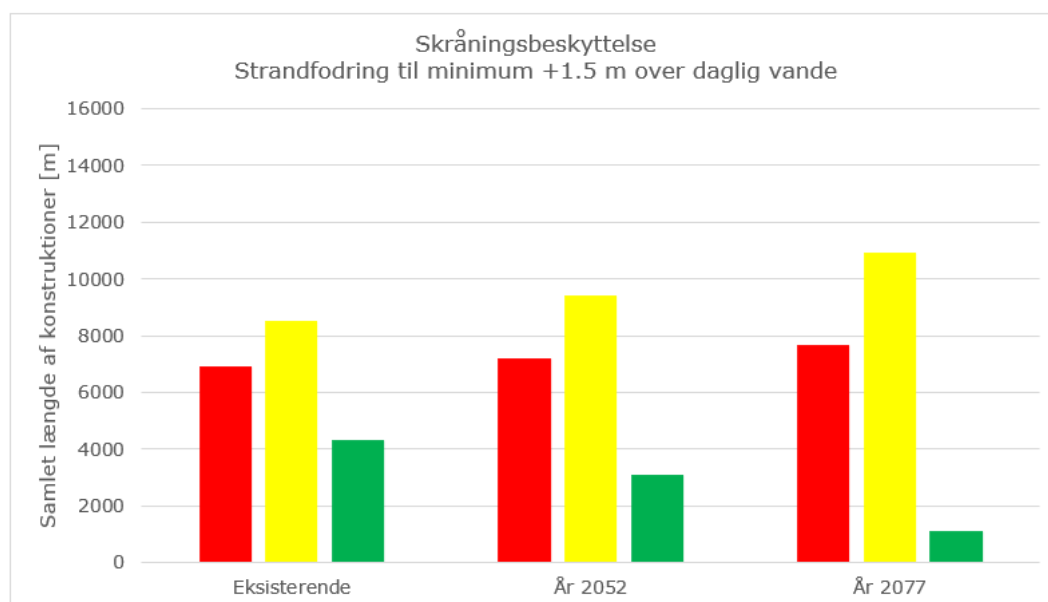
3.4 Indledende tilstandsvurdering af hård kystbeskyttelse med strandfodring

Der er foretaget en indledende tilstandsvurdering af eksisterende hård kystbeskyttelse langs hele Nordkysten med udgangspunkt i løbende strandfodring langs de udsatte og bebyggede strækninger langs Nordkysten. Her antages det, at stranden opbygges med strandfodring med sand alene således, at niveauet af stranden foran skråningsbeskyttelserne som minimum er henholdsvis +1,5 m, +2,0 m og +2,5 m DVR90 før en designstorm.

Det forudsættes, at strandfodringen vedligeholdes for at imødegå den kroniske erosion samtidigt med, at strandfodringen udbygges i takt med at havspejlet stiger.

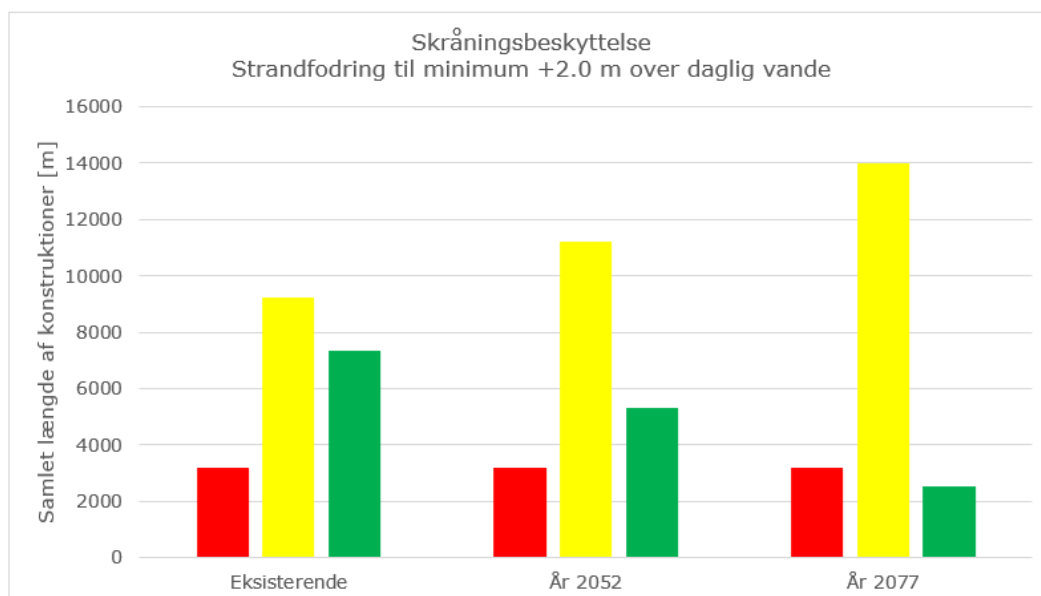
Strandfodringerne medfører, at bølgepåvirkningen af den hårde kystbeskyttelse overordnet set reduceres betydeligt.

Sammenlignes tilstandsvurderingen uden strandfodring (Figur 3.40 i afsnit 3.1.7.5) med Figur 3.74 ses en tydelig reduktion af længden af skråningsbeskyttelser vurderet til i dag at være Rød tilstand. Fra at udgøre 80 % uden sandfodring, udgør Rød tilstandsvurdering kun 35 % ved strandfodring til minimum +1,5 m i dag. Gul og Grøn tilstandsvurdering udgør henholdsvis 40 % og 25 %. Fremadrettet vil andelen af både Rød og Gul tilstandsvurdering stige samtidig med, at andelen af Grøn tilstandsvurdering vil falde efterhånden som havet stiger.

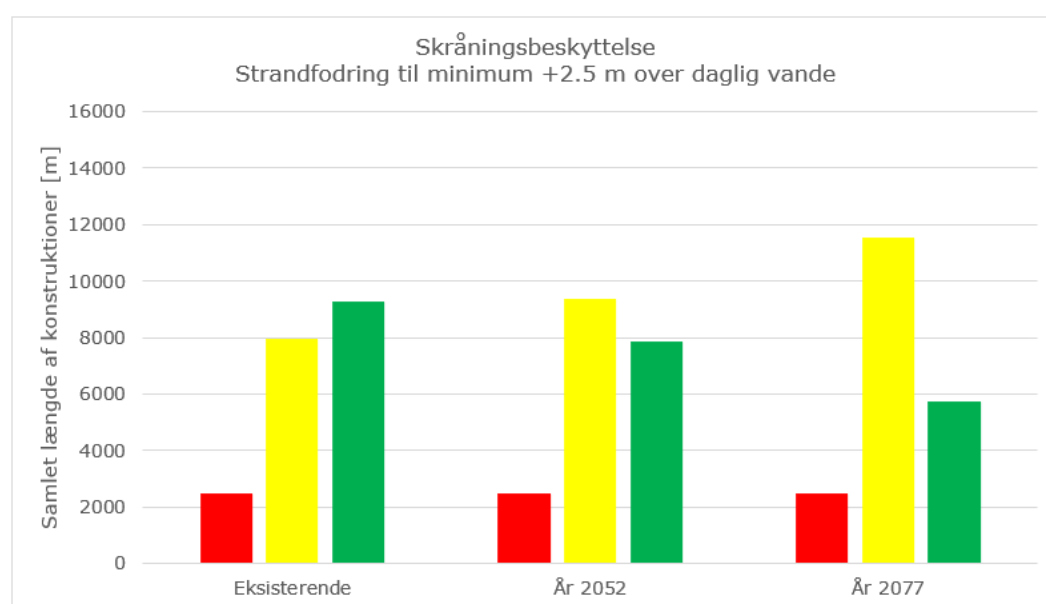


Figur 3.74 Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser med sandfodring foran til minimum +1,5 m DVR90. Strandfodringen forudsættes vedligeholdt og udbygget for at fastholde vanddybden foran konstruktionerne. **Grøn:** Vurderet at opfylde forudsætningerne. **Gul:** Vurderet at opfylde forudsætningerne efter forhøjelse. **Rød:** Vurderet at skulle genopbygges med større dæksten.

Øges minimumshøjden af stranden til +2,0 og +2,5 m DVR90 vurderes en større andel af skråningsbeskyttelserne til Grøn tilstand, se Figur 3.75-Figur 3.76.



Figur 3.75 Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser med sandfodring foran til minimum +2,0 m DVR90. Strandfodringen forudsættes vedligeholdt og udbygget for at fastholde vanddybden foran konstruktionerne. **Grøn:** Vurderet at opfylde forudsætningerne. **Gul:** Vurderet at opfylde forudsætningerne efter forhøjelse. **Rød:** Vurderet at skulle genopbygges med større dæksten.



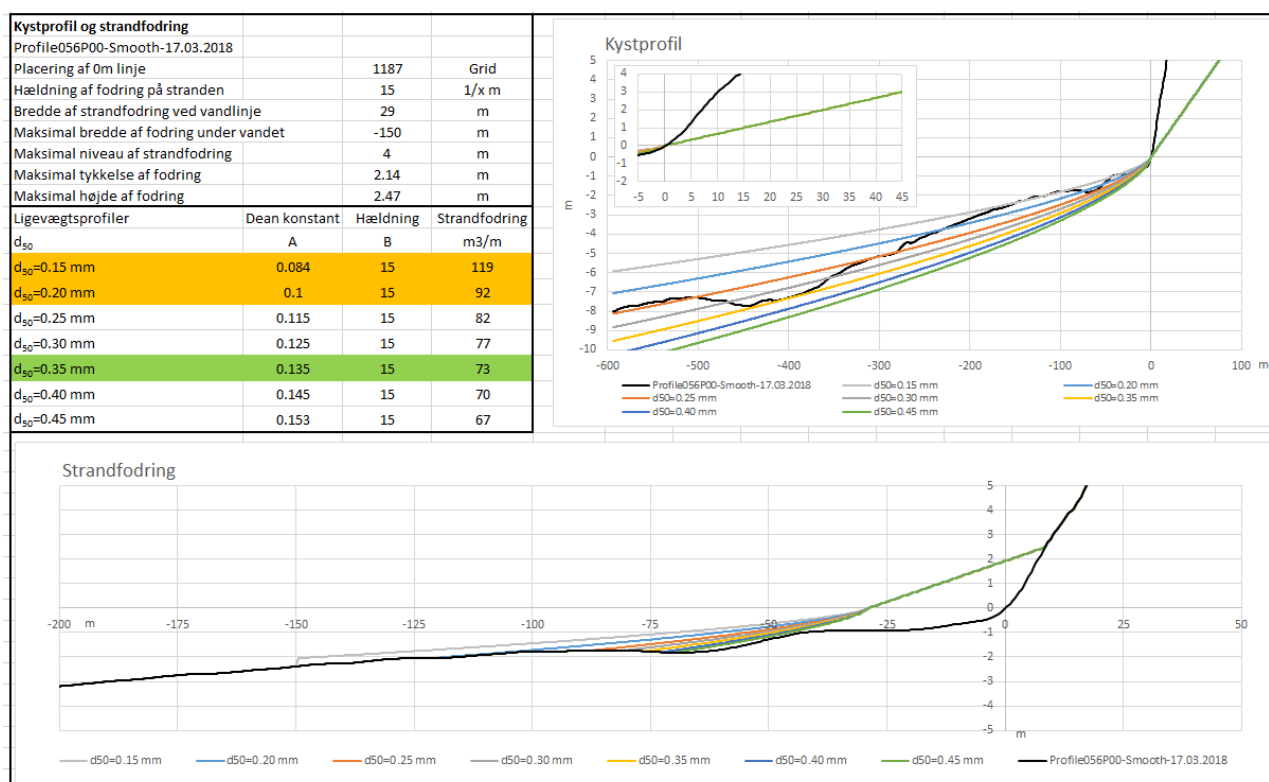
Figur 3.76 Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser med sandfodring foran til minimum +2,5 m DVR90. Strandfodringen forudsættes vedligeholdt og udbygget for at fastholde vanddybden foran konstruktionerne. **Grøn:** Vurderet at opfylde forudsætningerne. **Gul:** Vurderet at opfylde forudsætningerne efter forhøjelse. **Rød:** Vurderet at skulle genopbygges med større dæksten.

Der er dog stadig konstruktioner, der vurderes til Rød tilstand selv ved sandfodring til minimum +2,5 m DVR90. For disse konstruktioner er en genopbygning med større dæksten nødvendig for at sikre tilstrækkelig beskyttelse af baglandet.

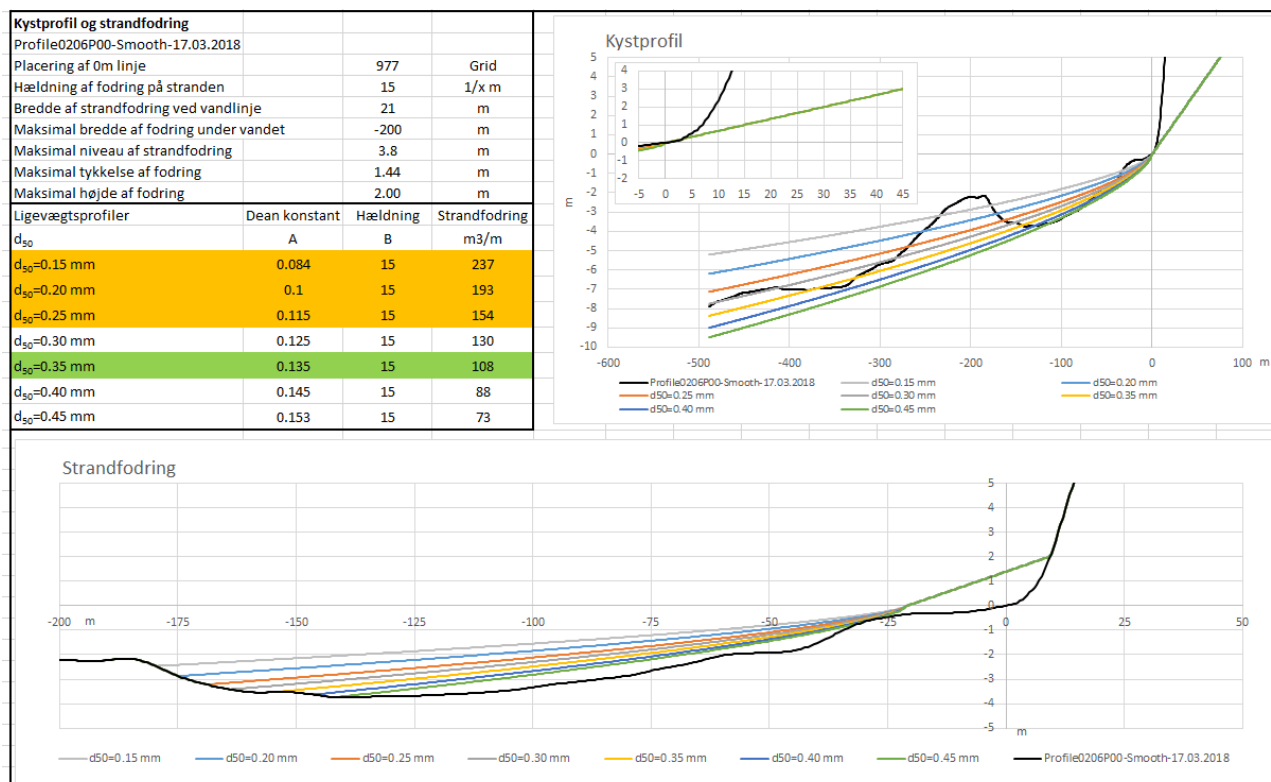
3.5 Indledende vurdering af fodringsmængder

Indledningsvist er de nødvendige strandfodringsmængder beregnet for 21 kystprofiler langs Nordkysten med strandhøjder på minimum +1,5 m, +2,0 m og +2,5 m DVR90 foran skråningsbeskyttelserne for ligevægtskystprofiler med middeldornstørrelser på $0,15 \text{ mm} < d_{50} < 0,45 \text{ mm}$. Strandens hældning over middelvandstanden er bestemt til 1:15 i gennemsnit for det foreslåede fodringmateriale. Analysen er udført for at sammenholde udgifter til strandfodring og udgifter til forstærkning af skråningsbeskyttelser.

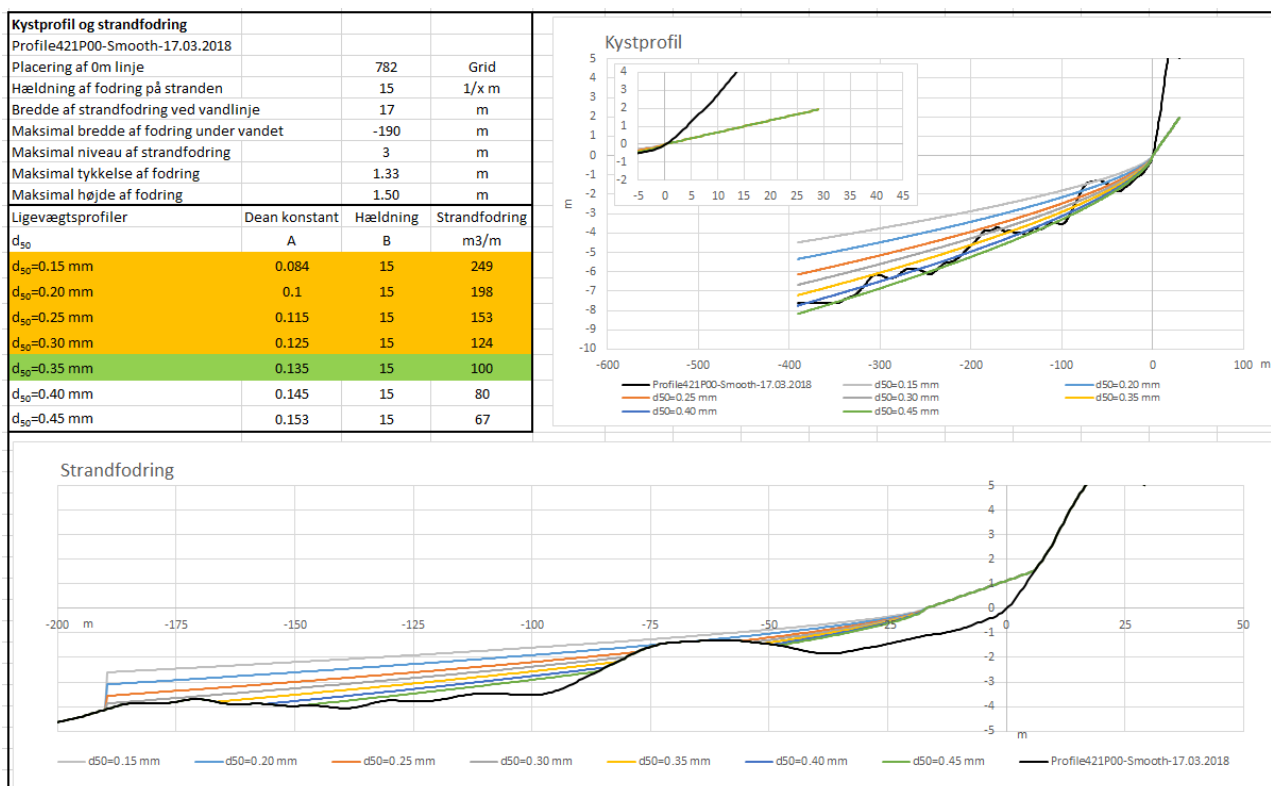
Figur 3.77, Figur 3.78 og Figur 3.79 viser eksempler på variationen i strandfodringsmængder og strandfodringsprofiler ved henholdsvis Hald Strand, Vejby og Ålsgårde som funktion af eksisterende kystprofil, middeldornstørrelse af fodringssandet og minimumshøjden af stranden foran skråningsbeskyttelserne.



Figur 3.77 Strandfodringsmængder for minimumshøjde af stranden foran skråningsbeskyttelserne på +2,5 m DVR90 ved Hald Strand.



Figur 3.78 Strandfodringsmængder for minimumshøjde af stranden foran skråningsbeskyttelserne på +2,0 m ved Vejby.



Figur 3.79 Strandfodringsmængder for minimumshøjde af stranden foran skråningsbeskyttelserne på +1,5 m DVR90 ved Åls-gårde.

Tabel 3.22 viser de totale strandfodringsmængder for de foreslåede fodringsstrækninger, der er nødvendig for at sikre en minimumshøjde af sandstranden på +1,5 m, +2,0 m og +2,5 m DVR90 foran skråningsbeskyttelserne før en designstorm for forskellige middeldkornstørrelser for sand.

Tabel 3.22 Strandfodringsmængder for foreslåede fodringsstrækninger (buffer mod akut erosion).

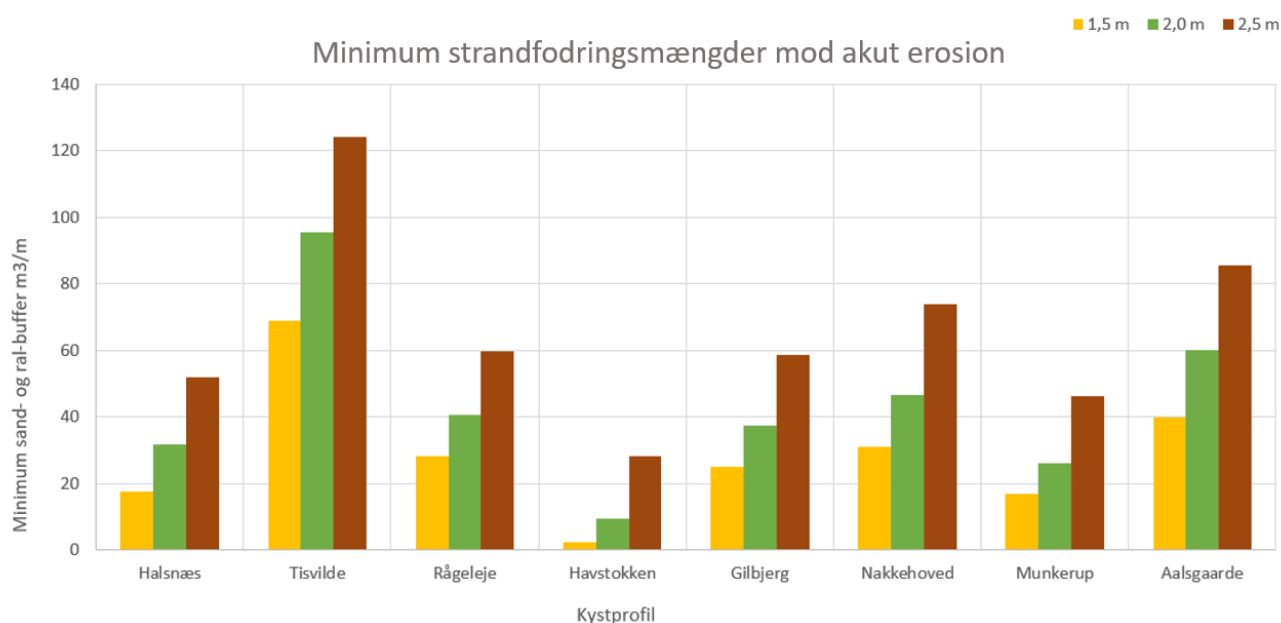
Strandfodringsbuffer foran skråningsbeskyttelser, m	1.5	2	2.5
Strandfodringsbuffer, m3 d ₅₀ =0.15 mm	2,900,000	3,500,000	4,300,000
Strandfodringsbuffer, m3 d ₅₀ =0.20 mm	2,100,000	2,700,000	3,500,000
Strandfodringsbuffer, m3 d ₅₀ =0.25 mm	1,500,000	2,100,000	3,000,000
Strandfodringsbuffer, m3 d ₅₀ =0.30 mm	1,300,000	1,900,000	2,700,000
Strandfodringsbuffer, m3 d ₅₀ =0.35 mm	1,100,000	1,600,000	2,400,000
Strandfodringsbuffer, m3 d ₅₀ =0.40 mm	900,000	1,500,000	2,300,000
Strandfodringsbuffer, m3 d ₅₀ =0.45 mm	800,000	1,300,000	2,100,000

Orange tal viser, at strandfodringsmængden er betydeligt større, når der benyttes finere sand, hvilket ikke kan anbefales. Grønne tal viser fodringsmængder for det mest finkornede fodringssand, der kan anbefales.

Ud fra analyse af 21 kystprofiler og indsamlede sedimentprøver er det vurderet, at sandfraktionen af fodringsmaterialet skal have en middeldkornstørrelse på $0,35 \text{ mm} < d_{50} < 0,60 \text{ mm}$ for at skabe et tilstrækkeligt stejlt ligevægtskystprofil til, at sandet i videst muligt omfang bliver inde ved og på stranden og i mindst muligt omfang flyttes ud på dybere vand.

Beregningerne i det følgende er baseret på fodring med sand med en middeldkornstørrelse på $d_{50} = 0,35 \text{ mm}$, hvilket er konservativt i forhold til, hvis der fodres med grovere sand.

Analysen af kystprofiler har vist, at der er stor variation i den nødvendige strandfodringsmængde langs kysten, se Figur 3.81. Generelt vil den nødvendige strandfodringsmængde stige betydeligt, når minimumshøjden af stranden foran skråningsbeskyttelserne øges.

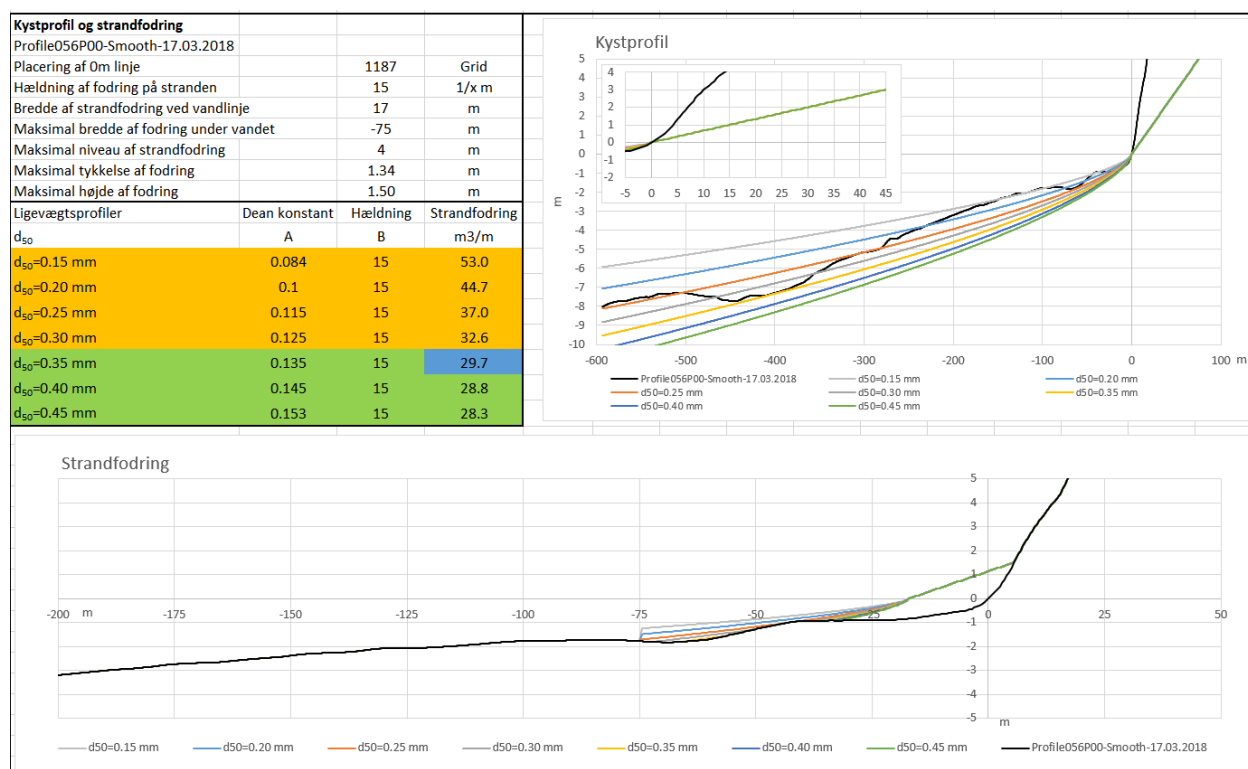


Figur 3.80 Variation i strandfodringsmængde langs Nordkysten som funktion af minimumshøjden af stranden foran skråningsbeskyttelserne for sand med $d_{50}=0,35 \text{ mm}$. Bemærk at mængderne ikke er de samme som i myndighedsprojektet, da disse

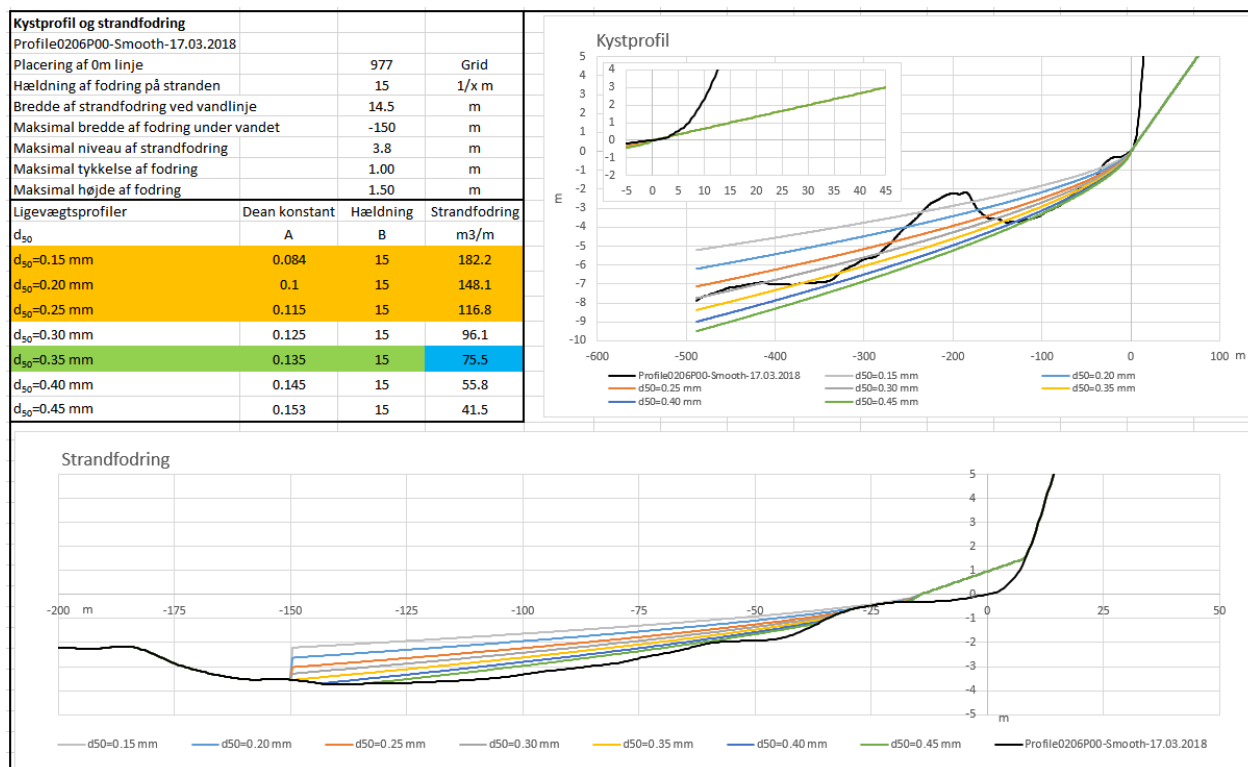
mængder er udarbejdet for et scenarie, hvor der kun fodres med sand. Der ses samme tendens, hvis strandfodringen består af både ral og sand.

Baseret på analyserne af strandfodringsmængderne og tilstandsvurderingerne for hård kystbeskyttelse er det besluttet, at der arbejdes videre med en målsætning om en minimumsbeskyttelse svarende til en strandhøjde foran skråningsbeskyttelserne på +2,0 m DVR90, som beskyttelse mod akut erosion i forbindelse med en designstorm, hvis der kun fodres med sand. Som beskrevet i afsnit 3.2.5.5 vil strandfodring med ral til +1,2 m i forhold til middelvandstanden og ovenpå rallaget strandfodring med sand til kote +1,5 m foran skråningsbeskyttelserne give samme beskyttelse mod erosion som en ren sandstrand til kote +2,0 m.

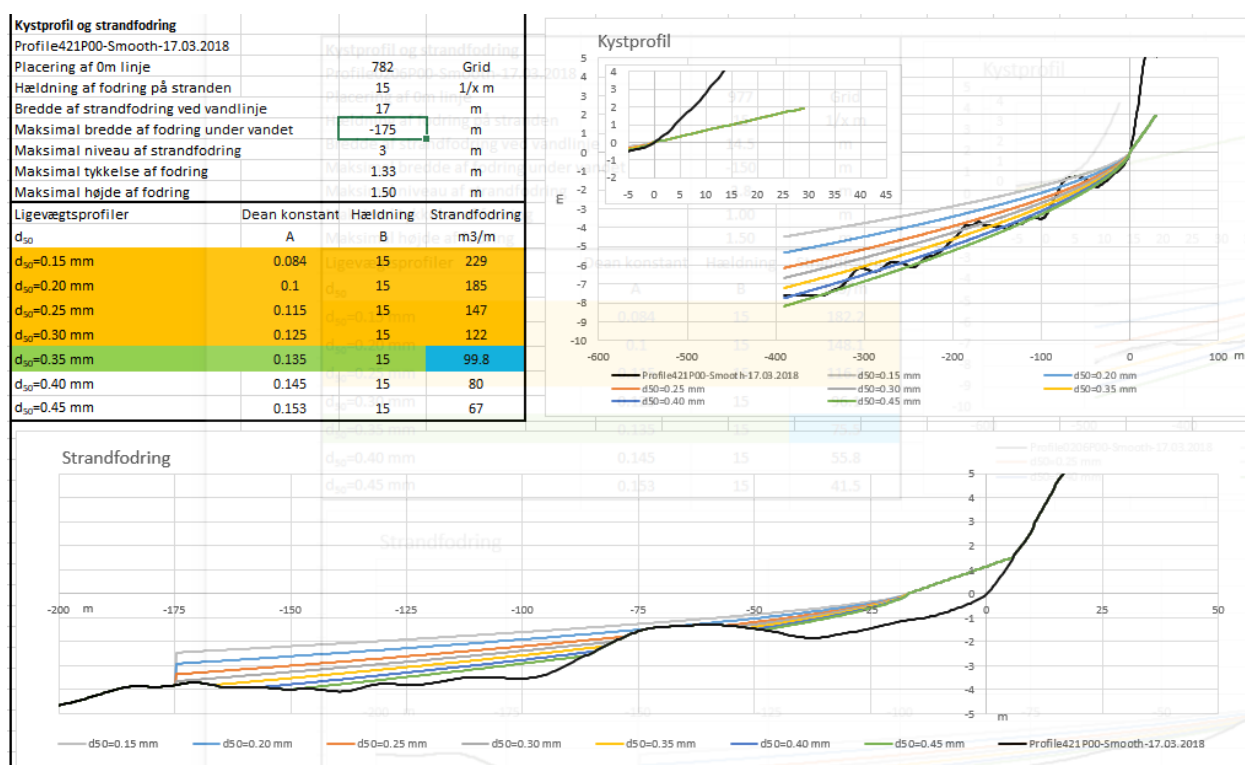
Figur 3.81, Figur 3.82 og Figur 3.83 viser strandfodringsprofilerne, hvis der fodres til kote +1,5 m.



Figur 3.81 Initiale fodringsmængde og initial strandprofil ved Hald Strand.



Figur 3.82 Initiale fodringsmængde og initial strandprofil ved Vejby.



Figur 3.83 Initiale fodringsmængde og initial strandprofil ved Ålgårde.

Beregningerne af højden af initialfodringen er foretaget parallelt for alle 21 kystprofiler og ud fra dette er mængden af sand til beskyttelsen mod akut erosion fundet.

På samme måde er det fundet, at for at tilføre tilstrækkeligt sand til kysten for at beskytte mod kronisk erosion, skal der indledningsvis og efterfølgende hvert 5. år fodres til +2,5 m DVR90 vest for Gilleleje Havn og op til +2,0 m DVR90 øst for Gilleleje Havn. Højderne gælder både for initialfodringen og efterfølgende vedligeholdelsesfodringer.

4. Kystteknisk Projektforslag

Det kysttekniske projektforslag er udarbejdet på baggrund af alle forundersøgelserne, den kysttekniske modellering, kysttekniske vurdering og de indledende tilstandsvurderinger og vurdering af fodringsmængder præsenteret i kapitel 3.

4.1 Formål

Formålet med projektet Nordkystens Fremtid er at skabe et langsigtet, helhedsorienteret og holdbart kystbeskyttelsesprojekt for hele Nordkysten fra Hundested til Helsingør, der giver den bedste beskyttelse mod kronisk og akut erosion på 50 års sigt. Kystbeskyttelsen skal være en langsigtet løsning, som tager højde for havspejlsstigninger og klimaforandringer med stadigt hyppigere kraftige stormhændelser til følge. Projektet har til formål at beskytte kysten mod de hændelser, som allerede forekommer såvel som at langtidssikre kysten, således, at de skader, som f.eks. Stormen Bodil medførte, undgås i fremtiden. Projektet skal endvidere imødekomme den usikkerhed, der er ved forudsigelse af klimaforandringerne over de kommende 50 år. Kystbeskyttelsesprojektet beskytter ejendomme, infrastruktur og kysten.

4.2 Fremgangsmåde og dimensioneringskriterier

Halsnæs Kommune, Gribskov Kommune og Helsingør Kommune har besluttet at iværksætte en ny overordnet strategi for beskyttelse af Nordkysten. Der tages udgangspunkt i de strækninger, hvor der er behov for at beskytte eksisterende bebyggelse og infrastruktur mod havet. Planen består af to hovedkomponenter:

1. Styrkelse af stranden med storskala strandfodring (Nordkystens Fremtid)
2. Mulighed for optimering af skråningsbeskyttelser (grundejere og kystlag)

Strandfodring og skråningsbeskyttelser kombineres for at skabe den optimale kystbeskyttelse.

Derudover kan der blive behov for at anlægge nye bølgebrydere, høfder, rev eller flak på udsatte strækninger og ved pynter, hvor sand og ral tilført ved strandfodring hurtigere forsvinder og den målsatte højde af stranden derfor potentielt blive være svær at opretholde foran skråningsbeskyttelserne. Strandfodring øger højden af stranden foran skråningsbeskyttelserne og skråningerne bagved. Herved reduceres behovet for at styrke og forhøje skråningsbeskyttelserne på kort så vel som på langt sigt. Desuden genetableres muligheden for passage langs kysten, hvilket ikke er muligt mange steder i dag. Stranden vil være lidt lavere end den fastsatte målsætning foran fremskudte skråningsbeskyttelser, da stranden vil have et udjævnet forløb langs kysten.

Ifølge Kystdirektoratet er kystfodring den eneste kystbeskyttelsesmetode, der kan tilføre kysten det sediment, som mangler for at standse kysttilbagerykningen (Kystdirektoratet, 2019) og (Kystdirektoratet, 2020). Ovenstående fremgangsmåde er derfor i overensstemmelse med Kystdirektoratets anbefaling.

Den dimensionsgivende hændelse vælges på baggrund af konstruktionens levetid og valg af sandsynlighed for forekomst af returperioden, dvs. den designstorm/hændelse, som beskyttelsen designes til at kunne modstå inden for levetiden.

Ved design af kystbeskyttelse skal valg af levetid afvejes mod værdien af det, der beskyttes, for at sikre, at beskyttelsen er samfundsøkonomisk rentabel. På grund af den store usikkerhed omkring den fremtidige klimarelaterede havspejlsstigning er det besluttet, at projektets levetid skal være 50 år. Efter 50 år kan man vælge at fortsætte projektet, men med tilpasninger til de klimaforandringer, som vi ser på det tidspunkt.

Udover levetiden skal man fastlægge, hvilken hændelse eller returperiode, der skal beskyttes imod. Returperioden er udtryk for den hændelse, der statistisk set kun forekommer eller overskrides én gang inden for levetiden. Jo længere returperiode, desto mindre risiko for, at designhændelsen indtræffer i projektets levetid, men anlægskostningerne vil også stige.

Ved erosionsbeskyttelse er det ofte selve kysten, der beskyttes og dermed indirekte boliger og infrastruktur, der ligger langs kysten. Da kystkonstruktioner er relativt nemme at genopbygge og sjældent falder helt sammen under en kraftig storm, har praksis i Danmark historisk været at etablere erosionsbeskyttelse imod en 30-årshændelse for en levetid på 30 år eller imod en 50-årshændelse for en levetid ligeledes på 50 år. Kystbeskyttelsen i form af både skråningsbeskyttelser og strandfodring langs Nordkysten foreslås dimensioneret og vurderet ud fra dimensioneringskriterier angivet i Tabel 4.1.

Det kysttekniske projektforslag anbefaler, at skråningsbeskyttelserne på Nordkysten opbygges så de kan modstå en 50-årshændelse (designstorm) med en levetid på 50 år. Sandsynligheden for at en 50-årshændelse forekommer i projektets levetid på 50 år er 64 %.

Tilstandsvurderingen har vist, at størstedelen af den hårde kystbeskyttelse er underdimensioneret i dag og styrken af konstruktionerne reduceres yderligere i fremtiden som følge af erosion og havspejlsstigning, se afsnit 3.1.7.5.

Tabel 4.1 Anbefalede dimensioneringskriterier for skråningsbeskyttelser og strandfodring på Nordkysten

Dimensionering	Kystbeskyttelsestype	
	Skråningsbeskyttelse	Strandfodring
Levetid, L	50 år	5 år
Havspejlsscenario	Middel	Middel
Sandsynlighed, R, for forekomst af MT indenfor L)	64%	10%
Returperiode	50 år	50 år

Strandfodring skal sikre, at der skabes og opretholdes en tilstrækkelig høj strand til, at det anbefalede design af skråningsbeskyttelse kan modstå en designhændelse med en returperiode på 50 år i dag og om 50 år.

Det er vigtigt at der vedligeholdes en målsat minimumshøjde af stranden foran skråningsbeskyttelserne som beskyttelse mod en designstorm. Derfor vedligeholdes og udbygges strandfodringen også løbende i takt med fremtidig havspejlsstigning for at opretholde beskyttelsesniveauet bedst muligt.

Strandfodring langs Nordkysten dimensioneres med en levetid på 5 år, som vurderes at være et optimalt interval mellem vedligeholdelsesfodringerne baseret på erfaringer fra lignende projekter i Danmark. Sandsynligheden for, at der forekommer en 50-årshændelse mellem vedligeholdelsesfodringerne hvert 5. år er 10 %.

4.3 Strandfodring i det kysttekniske projektforslag

Strandfodring er den væsentligste komponent af kystbeskyttelsesstrategi for Nordkystens Fremtid og udføres i regi af det fælleskommunale samarbejde mellem Halsnæs, Gribskov og Helsingør kommuner.

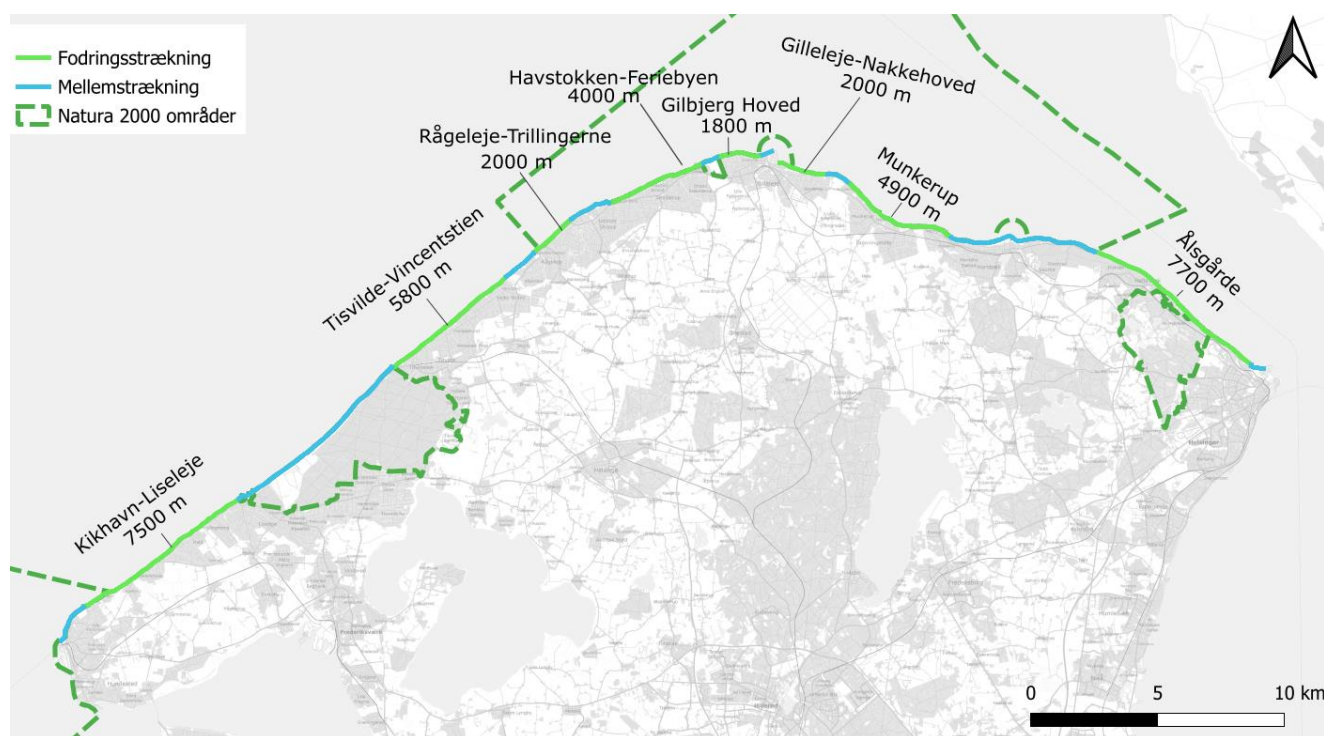
Fodring er den eneste form for kystbeskyttelse, som kan standse erosionen i hele kystprofilen og som kan kompensere for kronisk erosion og havspejlsstigning. Strandfodring sikrer en langsigtet og helhedsorienteret beskyttelse af Nordkysten med en stabiliserende strand foran skråningsbeskyttelserne.

Strandfodring udføres ved udlægning af sand og ral på stranden op mod skråningsbeskyttelser og skrænter for at øge den beskyttende virkning.

Fodringsmængden fastlægges således, at stranden har en målsat minimumshøjde foran skråningsbeskyttelserne og skråningerne bagved før en designstorm.

Strandfodringen skaber en buffer mod kysterosion ved søværts fremrykning af strandlinjen og forhøjelse af stranden.

Strandfodring udføres på alle de strækninger, hvor der er bebyggelse ud til kysten, og der således er et kystbeskyttelsesbehov. Her skal strandfodringerne stoppe tilbagerykning af stranden. Strandfodringen omfatter derfor stort set hele den bebyggede del af Nordkysten. Der udføres ikke strandfodring ud for naturkyststrækninger, da der her ikke er et behov for kystbeskyttelse, se Figur 4.1. Strækningerne, hvor der ikke fodres, kaldes mellemstrækninger.



Figur 4.1 De otte fodringsstrækninger og mellemstrækningerne i det kysttekniske projektforslag.

Der er delstrækninger, hvor husene ligger så langt fra stranden, at der ikke er et akut behov for kystbeskyttelse, og som derfor ikke er medtaget i fodringsstrækningerne. Disse strækninger vil dog få en sekundær beskyttelse i form af reducerede erosionsrater.

Strandfodringerne udføres over lange sammenhængende strækninger for at minimere tab fra fodringsområderne til tilstødende områder grundet udjævning af strandfodringen i randområderne.

Hele Nordkysten vil på sigt få glæde af strandfodringerne, som gradvist spredes ned langs hele kysten.

Strandfodringerne udføres som sandfodring og ralfodring med udgangspunkt i den naturlige sedimentsammensætning på den enkelte strækning. Ved at fodre med både sand og ral reduceres den potentielle skadevirkning på Natura 2000 område nr. 195 Gilleleje Flak og Tragten og herunder på udpegningsgrundlagene stenrev og sandbanke.

4.3.1 Retningslinjer for strandfodring

I forbindelse med strandfodring for Nordkystens Fremtid, skal der langs udpegede fodringsstrækninger, før en dimensionsgivende storm, lægges ral til kote +1,2 m i forhold til middelvandstanden og ovenpå rallen sand til mindst kote +1,5 m i forhold til middelvandstanden. For at tage højde for den kroniske erosion der er på kysten og dermed sikre at der altid er sand til kote +1,5 m i forhold til middelvandstanden, lægges der sand til kote +2,5 vest for Gilleleje Havn og +2,0 m øst for Gilleleje Havn.

Opbygning af stranden sker ved strandfodring med sand og ral, der tilpasses hver enkelt fodringsstrækning således, at der ikke vil ske forringelse af den nuværende strandkvalitet. Strandens højde udbygges med sand og ral i takt med havspejlstigningen, hvorved beskyttelsesniveauet opretholdes.

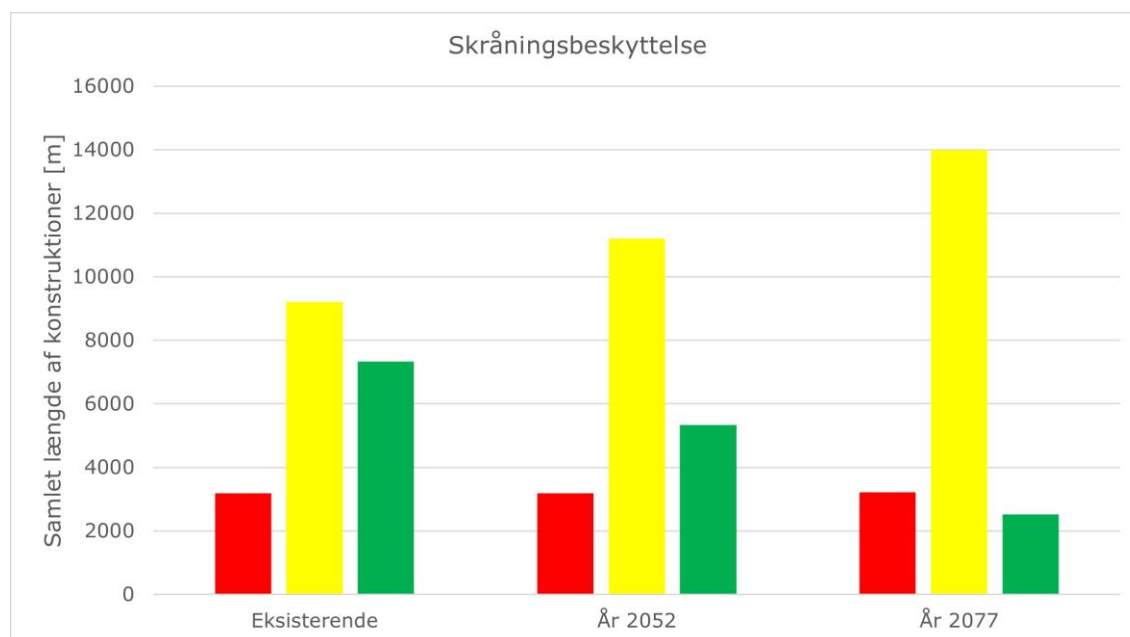
Strandfodringerne skaber en gennemsnitlig strandbredde på 10-30 m.

4.4 Skråningsbeskyttelser i det kysttekniske projektforslag

Strandfodringerne medfører, at bølgepåvirkningen af den hårde kystbeskyttelse reduceres betydeligt generelt set.

Tilstanden af skråningsbeskyttelserne er vurderet i tilfælde af, at der strandfodres med de anbefalede mængder af ral og sand. Vurderingen er vist i Figur 4.2. I tilstandsvurderingen af skråningsbeskyttelserne er det forudsat, at strandfodringen vedligeholdes for at imødegå den kroniske erosion samtidigt med, at strandfodringen udbygges i takt med at havspejlet stiger.

Sammenlignes Figur 4.2 med Figur 3.40 i afsnit 3.1.7.5 ses en tydelig reduktion af længden af skråningsbeskyttelser vurderet til Rød tilstand i dag. Fra at udgøre 80 % uden strandfodring, udgør Rød tilstandsvurdering kun 16 % ved strandfodring med sand og ral. Gul og Grøn tilstandsvurdering udgør henholdsvis 45 % og 39 %. I år 2052 og 2077 stiger andelen af Gul tilstandsvurdering samtidig med, at andelen af Grøn tilstandsvurdering falder. Dette skyldes havspejlstigningerne, som medfører at skråningsbeskyttelsernes topkote også bør stige. Vurderingen viser dog stadig, at det kun er 10-15 % af skråningsbeskyttelserne der kan modstå en 50-årshændelse i projektets levetid på 50 år, selvom der strandfodres med de anbefalede mængder sand og ral.



Figur 4.2 Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser med strandfodring.

4.4.1 Retningslinjer for hård kystbeskyttelse

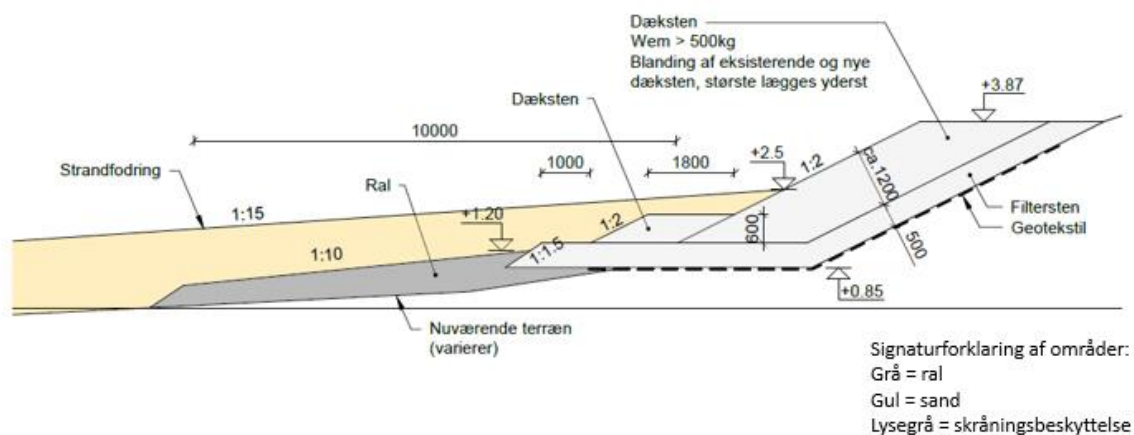
Eksisterende lovlige kystbeskyttelseskonstruktioner bibeholdes, som de forefindes og skal fremadrettet fortsat vedligeholdes af grundejere og kystlag.

Grundejere og kystlag står selv for ansøgning og etablering af forstærket og ny hård kystbeskyttelse samt lovliggørelse af ulovlige anlæg. Det anbefales at optimere skråningsbeskyttelser inden strandfodringen udføres.

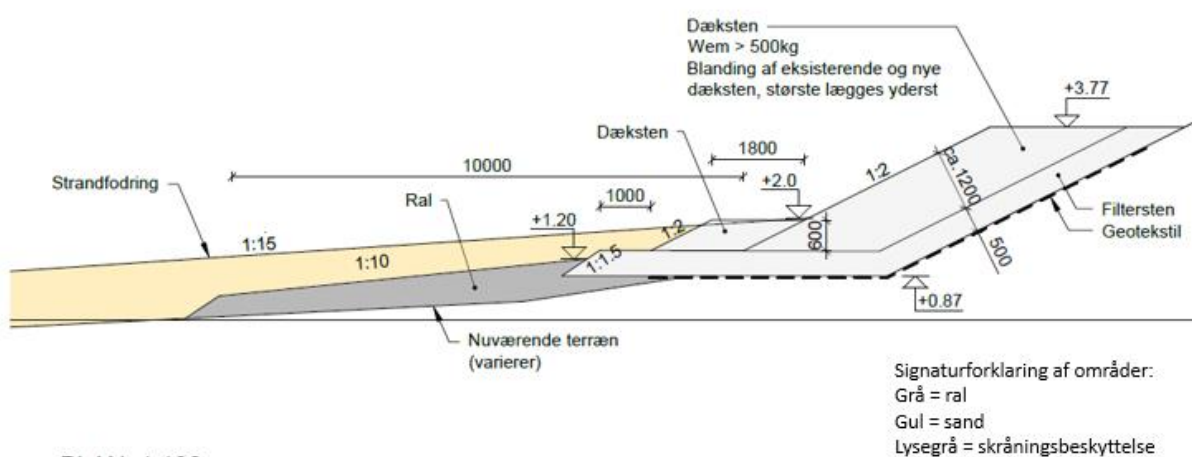
Principskitser af de anbefalede skråningsbeskyttelser under forudsætning af, at der samtidig strandfodres med de anbefalede mængder sand og ral er vist i Figur 4.3.

Strandfodringsprojektet vil medføre, at eksisterende bølgebrydere og hølfer kan fastholde en bredere strand, som derved øger beskyttelsen af baglandet.

Strandfodringsprojektet indeholder ikke optimering af eksisterende bølgebrydere og hølfer, men grundejere og kystlag opfordres til at optimere egne eksisterende konstruktioner inden strandfodringen udføres.



PLAN, 1:100



PLAN, 1:100

Figur 4.3: Principskitser af udlagt sandfodring, ralfodring og skråningsbeskyttelse vest for Gilleleje Havn (øverst) og øst for Gilleleje Havn (nederst).

Projektet har identificeret en række kyststrækninger, se afsnit 3.2.3.9, hvor der kan blive behov for at beskytte yderligere med nye eller større konstruktioner som høfder, bølgebrydere, rev eller flak. Det er ved steder, hvor den kystparallelle sedimenttransport øges over en kort strækning (Hotspots) og herunder ved pynter, hvor kystlinjen ændrer retning, se afsnit 3.2.3.9.

Figur 4.4 til Figur 4.6 viser eksempler på konstruktioner, som kan reducere den kystparallelle sedimenttransport lokalt og dermed medvirke til at stabilisere stranden på udsatte strækninger. Konstruktionerne kan medføre læsideerosion og skal derfor projekteres med særligt fokus på at afværge eventuelle problemer for naboerne nedstrøms herfor.

Det anbefales at vente med at anlægge nye bølgebrydere, høfder, rev og flak indtil nogle år efter den første strandfodring for at kunne se, hvordan det konkrete behov ser ud.

Optimering og anlæggelse af nye bølgebrydere, høfder, rev og flak kan kombineres med den løbende strandfodring under forudsætning af, at de ikke skader naboerne nedstrøms herfor. Sådanne anlæg kræver ansøgning og godkendelse.



Figur 4.4 Bølgebrydere ved Liseleje.



Figur 4.5 Høfder ved Tisvilde.



Figur 4.6 Stenflak ved Gilleleje.

5. Strandfodring - myndighedsprojekt

I det følgende beskrives strandfodringen, som er omfattet af myndighedsprojektet.

Udbygning af eksisterende og anlæg af nye skråningsbeskyttelser skal der søges om selvstændig tilladelse til.

5.1 Fodringsstrategi

Strandfodring består af en initialfodring, hvor der udlægges sand og ral på stranden op imod skråningsbeskyttelser og skrænter. Derudover vedligeholdelsesfodres der med sand og ral hvert 5. år for at kompensere for erosion langs kysten og vandstandsstigningerne de næste 50 år.

5.1.1 Initialfodring

Figur 4.1 viser et oversigtskort af initialfodringen med sand og ral.

For at reducere den akutte erosion strandfodres der med ral alle de steder, hvor der i dag ikke er tilstrækkelig med ral langs skråningsbeskyttelserne. Initialfodring udføres med op til 5 m³/m ral til minimum +1,2 m i forhold til middelvandstanden for at sikre mod akut erosion. Rallen udlægges på bagstranden umiddelbart foran skråningsbeskyttelserne, hvorved stranden styrkes mest muligt.

Herefter etableres et forstrandsprofil med sand med en hældning på 1:15 fra toppen af strandfodringen til eksisterende strandprofil.

Det foreslås at strandfodre op til en ensartet højde på de udpegede fodringsstrækninger. Stranden forventes dog at være lavere lokalt foran fremskudte skråningsbeskyttelser, da stranden har et udjævnet forløb langs kysten.

Sandfodring udføres til +1,5 m i forhold til middelvandstanden foran skråningsbeskyttelserne mod akut erosion og for at skabe passage langs kysten. Herover udlægges sand til beskyttelse mod kronisk erosion op til +2,5 m vest for Gilleleje og +2,0 m øst for Gilleleje, som vist i Figur 4.2.

Det nye strandprofil dækker i nogle tilfælde eksisterende høfder og bølgebrydere helt eller delvist.

I forbindelse med storme vil der ske erosion af fodringsmaterialet, og derved kan der skabes en lille klint. Med en hældning på 1:15 vil højden af klinten være begrænset, hvilket er en fordel i forhold til at sikre generel adgang til og langs kysten.

Når fodringsmaterialet koncentrerer på den bagerste del af stranden, vil den del af fodringsmaterialet, der består af ral gradvist forstærke stranden efterhånden, som sandet udvaskes. Det sand, der eroderes fra bagstranden, spredes ud over hele kystprofilet og stabiliserer herved hele kystprofilet, også udenfor strækninger med hård kystbeskyttelse. Derudover vil sandet forbedre adgangen langs kysten og øge den rekreative værdi af stranden.

Fodringsmaterialet vil forbedre beskyttelsen af eksisterende skråningsbeskyttelser og skrån timer bagved betydeligt.

5.1.2 Vedligeholdelsesfodring

Strandfodring skal vedligeholdes for at opretholde den ønskede beskyttelse langs fodringsstrækningerne, da der løbende sker en omlejring af sand på langs og på tværs af kysten. Vedligeholdelsesbehovet varierer fra strækning til strækning som følge af:

- Kronisk erosion
- Havspejlsstigning og aktiv dybde
- Randeffekter ved enderne af fodringsstrækningerne
- Akut erosion

Der udføres vedligeholdelsesfodringer hvert 5. år for at opretholde beskyttelsesniveauet langs kysten.

Vedligeholdelsesfodringerne tilfører samme mængde sediment hver gang for de enkelte fodringsstrækninger. Dog kan det variere langs fodringsstrækningerne, hvor meget der skal vedligeholdelsesfodres. Vedligeholdelsesfodring udføres med sand og ral mod kronisk erosion, havspejlsstigning og randeffekter langs alle strækninger. Strandfodringerne sikrer en langsigtet og helhedsorienteret beskyttelse af Nordkysten.

5.1.2.1 *Kompensation for kronisk erosion og randeffekter*

Størrelsen af vedligeholdelsesfodringerne vil lokalt være afhængig af omfanget af kronisk og akut erosion samt udjævning, som er foregået siden sidste fodring.

Vedligeholdelsesfodringerne planlægges således, at den kroniske erosion ikke medfører, at stranden bliver lavere end den målsatte minimumshøjde foran skråningsbeskyttelserne i løbet af fodringens 5-årige levetid i størst muligt omfang.

Daglige påvirkninger af kysten medfører, at fodringsmaterialet spredes langs kysten, dvs. at fodringsmaterialet også tilføres ikkefodrede nabostrækninger. Herved sikres, at skråningsbeskyttelserne, bølgebrydere og høfder ikke medfører øget erosion langs nabostrækningerne. Det betyder også, at strandfodringsprojektet vil reducere kysttilbagerykningen på ubebyggede og ubeskyttede strækninger.

Vedligeholdelsesfodringerne indeholder et bidrag som kompensation for tab af fodringsmateriale som følge af randeffekter, som beskrevet i afsnit 3.2.3.8. Inden hver vedligeholdelsesfodring bør man udføre terrænmåling på stranden og på det kystnære strandplan for at skaffe viden om fodringsbehovet langs Nordkysten, og dermed optimere vedligeholdelsesfodringerne til hvor der er et behov.

Der vil være et løbende tab af sand og ral langs kysten fra de fodrede strækninger som følge af nettotransporten mod øst. Sandet vil udvaskes hurtigere end rallen.

Den naturlige sortering af sedimentet langs kysten skal medregnes i planlægningen af vedligeholdelsesfodringerne for på den måde at opretholde et ensartet beskyttelsesniveau langs hele kysten.

Som udgangspunkt vedligeholdelsesfodres der mest i den vestlige del af de enkelte fodringsstrækninger for at øge værdien af fodringerne, da der løbende tabes sand og ral mod øst. Der vil dog ske en uensartet opbygning af ral, hvis der udelukkende fodres i den vestlige ende af fodringsstrækningerne hver gang. Derfor skal vedligeholdelsesfodringerne optimeres fra gang til gang for at sikre, at der fremover sker en ensartet opbygning af stranden med ral.

Der kan også være delstrækninger, som eroderer hurtigere tilbage, og som derfor skal have en større del af vedligeholdelsesfodringerne. På de mest udsatte strækninger kan det blive nødvendigt, at grundejerne forstærker eller anlægger nye bølgebrydere, høfder, rev eller flak for at den målsatte minimumshøjde af stranden kan opretholdes mellem vedligeholdelsesfodringerne.

5.1.2.2 *Kompensation for havspejlsstigninger*

I projektet indregnes effekten af de forventede globale havspejlsstigninger frem mod år 2077.

Strandens højde udbygges med sand og ral i takt med havspejlsstigningen, hvorved beskyttelsesniveauet opretholdes. Det medfører, at der løbende skal vedligeholdelsesfodres med et ekstra sand- og ralbidrag til at øge højden af hele det aktive kystprofil. I og med at klimatilpasningen sker løbende reduceres den initiale fodring til et minimum.

Udgiften til opbygningen af kystprofilet med strandfodring kan spredes over årene samtidig med, at fodringsindsatsen optimeres i forhold til de mest udsatte strækninger og for at sikre, at der sker en ensartet opbygning af ral på stranden langs kysten.

5.2 Strandfodringsmateriale

Der er en række krav til strandfodringsmaterialets gradering, som specificeres i det følgende.

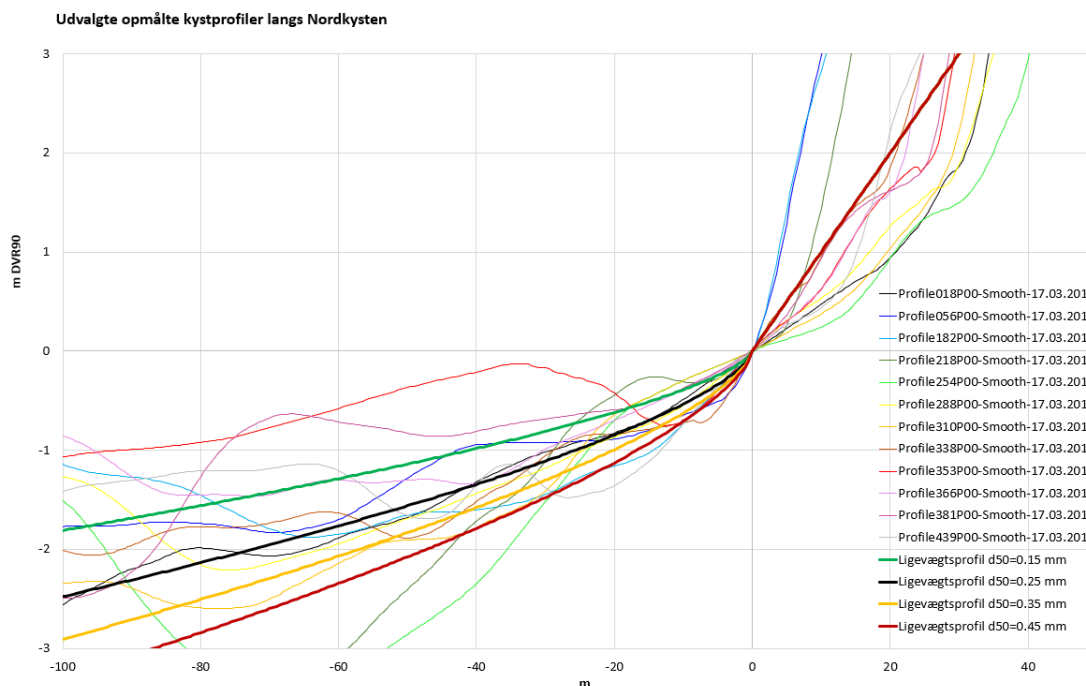
Det primære krav er, at det tilførte materiale skal forstærke stranden for derigennem at bidrage til beskyttelse af ejendomme og infrastruktur ud til kysten. Dette medfører et krav om, at graderingen af fodringsmaterialet skal være så stabilt som muligt. Stabiliteten af strandfodringen øges jo grovere fodringsmaterialet er, og jo større indholdet af ral er. Samtidig skal fodringsmaterialet af kystdynamiske og miljømæssige årsager have en gradering, som er tæt på graderingen af det nuværende sediment på stranden.

Analyserne af graderingen af de aktive havbunds- og strandmaterialer i de nuværende kystprofiler viser, at sedimenterne består af fint sand på revlerne og mellemkornet sand med et varierende indhold af ral i havstokken og på stranden.

Den ideelle gradering af fodringsmaterialet vil medvirke til, at der vil etablere sig et relativt stejlt og stabilt strandprofil, dvs. at sand og ral vil forstærke stranden foran skråningsbeskyttelserne. Herved reduceres kravet til styrke og højde af skråningsbeskyttelserne bagved.

5.2.1 Bemærkninger til sandfodring

Figur 5.1 viser en sammenligning af opmålte kystprofiler langs Nordkysten og teoretiske ligevægtsprofiler for en række forskellige kornstørrelser af sand. Det fodringssand der anvendes, skal have en kornstørrelse, som betinger, at ligevægtsprofilet er stejlere end det eksisterende kystprofil i brydningszonen og inde på stranden. Herved reduceres tabet af sand ud på dybere vand, og beskyttelsen af skråningsbeskyttelser og skråninger øges. Figuren viser, at middelkornstørrelsen af fodringssandet skal være grovere end $d_{50} > 0,35$ mm (fed orange kurve), hvilket også svarer til gennemsnittet af de sandprøver, der er indsamlet på stranden, se Figur 3.8.



Figur 5.1 Sammenligning af udvalgte opmålte kystprofiler langs Nordkysten og teoretiske ligevægtsprofiler med forskellige middeldkornstørrelser. X-aksen angiver afstanden søværts for strandlinjen og Y-aksen angiver højden i DVR90. Se Figur 3.4 for placering af kystprofiler på kyststrækningen.

Disse forhold medfører at det anbefales at middeldkornstørrelsen, d_{50} , af den del af fodringsmaterialet, som består af sand, skal være mellem 0,35 mm og 0,60 mm. Det anbefales, at sandet skal være sorteret til velsorteret, hvilket udtrykkes ved uensformighedstallet U , hvor $1,5 < U < 3,0$, hvor $U = d_{60}/d_{10}$. Dette svarer til sorteringen af det naturligt forekommende sand på strandene langs Nordkysten.

Indholdet af silt og finere fraktioner skal være minimalt for at sikre god dræning af stranden og dermed en attraktiv overflade samt for at minimere tab af sediment til dybt vand. Derfor skal indholdet af korn med diameter mindre end 0,06 mm være mindre end ca. 2 %.

Sandet skal være af marin oprindelse, hvilket indirekte sikrer, at sandet passer ind i det eksisterende miljø. Fodringsmaterialet skal være uden indhold af organisk materiale.

Efter strandfodringen vil fodringsmaterialet blive sorteret af bølger og strøm. Det fine sediment med kornstørrelser mindre end 0,25 mm vil blive transporteret ud i profilet under vand, mens den grovere del med kornstørrelser over 0,3 mm vil blive på stranden. Der sker dermed en fordeling af sedimentet svarende til det der er i dag og vist i Figur 3.8 i afsnit 3.1.5.

5.2.2 Bemærkninger til ralfodring

Rallet skal variere mellem $20 \text{ mm} < d < 150 \text{ mm}$ da dette svarer til de sten og rals størrelser der forekommer på de eksisterende strande langs Nordkysten.

Figur 5.2 viser et billede af den naturlige strand sydvest for Rågeleje, som består af sand og ral i princippet svarende til den ideelle gradering af strandfodringsmaterialet.



Figur 5.2 Eksempel på strand ved Rågeleje som består af sand og ral. Fotoet er taget d. 31-10-2017.

Rallen vil typisk befinde sig på den bagerste del af strandprofilet, hvilket skyldes, at de større fraktioner skubbes landværts under storm og højvande. Dette er heldigt i relation til rallens beskyttende virkning på bagvedliggende skråningsbeskyttelse, samt i relation til rekreativ udnyttelse af stranden. Sådan vil en tilført blanding af sand og ral også leje sig med tiden.

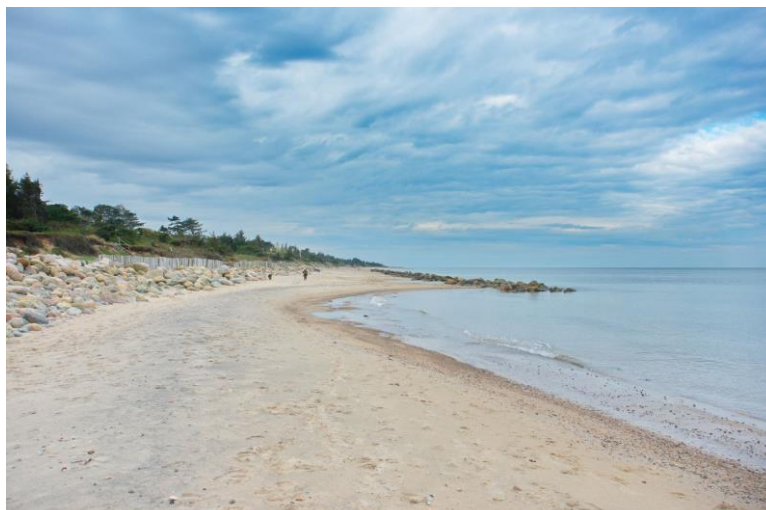
5.3 Visualiseringer af strandfodring

Initialfodringen udlægges foran skråningsbeskyttelser og skråninger op til +2,5 m i forhold til middelvandstanden langs fodringsstrækningerne vest for Gilleleje Havn og op til +2,0 m i forhold til middelvandstanden øst for Gilleleje Havn.

Figur 5.3, Figur 5.4 og Figur 5.5 viser visualiseringer af eksisterende forhold, initialfodring og stormprofil (stranden udsat for erosion efter storm) ved Hald Strand, vest for Feriebyen i Smidstrup og i Ålsgårde.



*Figur 5.3 Visualiseringer af strand og forstærkning af skråningsbeskyttelser ved Hald Strand.
Øverst: eksisterende forhold, midten: efter initial fodring og forstærkning af skråningsbeskyttelse, nederst: efter designstorm.*



*Figur 5.4 Visualiseringer af strand og forstærkning af skråningsbeskyttelser ved Smidstrup, vest for Feriebyen.
Øverst: eksisterende forhold, midten: efter initial fodring og forstærkning af skråningsbeskyttelse, nederst: efter designstorm.*



*Figur 5.5 Visualiseringer af strand og forstærkning af skråningsbeskyttelser ved Ålsgårde.
Øverst: eksisterende forhold, midten: efter initial fodring og forstærkning af skråningsbeskyttelse, nederst: efter designstorm.*

5.4 Strandfodringsmængder

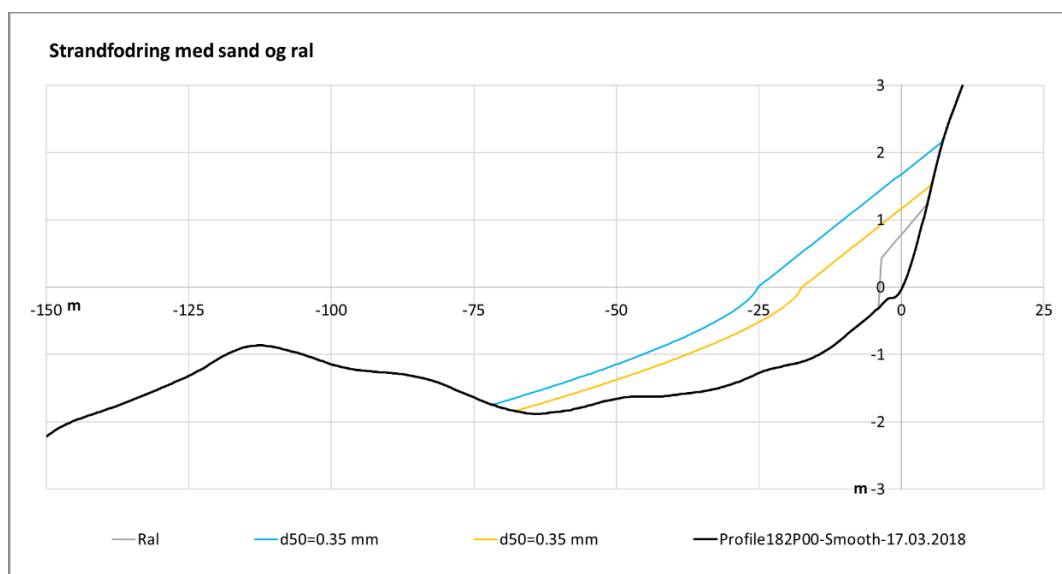
Beregningerne af fodringsmængderne er baseret på 21 kystprofiler vist i Figur 3.54.

Beregningerne i det følgende er baseret på fodring med sand med en middeldkornstørrelse på $d_{50} = 0,35$ mm, hvilket er konservativt i forhold til, hvis der fodres med grovere sand. Figur 5.6 viser et eksempel på strandfodring med sand og ral ved Tisvildeleje, som fodringsmængderne er beregnet ud fra.

For at begrænse mængden af ral fodres der med 5 m^3 ral pr m langs med kysten. Det svarer til den grå kurve i Figur 5.6.

Strandfodringsmængden mod akut erosion er fundet ud fra det gule profil, som viser strandfodringen til kote +1,5. I denne mængde fratrækkes de 5 m^3 ral.

Derudover har analyserne med kystprofilerne vist, at for at tilføre den nødvendige beskyttelse mod kronisk erosion og randeffekter, skal der strandfodres til +2,5 m DVR90 vest for Gilleleje Havn og op til +2,0 m DVR90 øst for Gilleleje Havn.



Figur 5.6 Strandfodring med sand og ral foran skråningsbeskyttelserne ved Tisvildeleje. Grå: Ralfodring på $5 \text{ m}^3/\text{m}$. Orange: Sandfodring op til +1,5 m i forhold til middelvandstanden mod akut erosion. Blå: Sandfodring op til +2,5 m i forhold til middelvandstanden mod kronisk erosion og vedligeholdelse.

Tabel 5.1 og Tabel 5.2 viser den samlede størrelse af initialfodring og vedligeholdelsesfodring med sand og ral.

Tabel 5.1 Mængder af initialfodring og vedligeholdelsesfodring med sand hvert 5. år langs fodringsstrækningerne langs hele Nordkysten.

		Kikhavn-Liseleje	Tisvilde-Vincentstien	Rågeleje-Trillingerne	Havstokken-Feriebyen	Gilbjergshoved	Gilleleje-Nakkehoved	Munkrup	Ålgårde	I alt
Sandfodringsmængder										
Sandbuffer mod akut erosion	m ³	107.000	372.000	52.000	2.000	38.000	51.000	80.000	269.000	
Sandbuffer mod kronisk erosion	m ³ /5år	139.000	107.000	37.000	74.000	33.000	5.000	32.000	58.000	
Sandbuffer mod havspejlsstigning	m ³ /5år	26.000	30.000	10.000	28.000	13.000	7.000	17.000	22.000	
Sandbuffer mod randeffekter	m ³ /5år	10.000	25.000	14.000	7.000	12.000	9.000	7.000	13.000	
Initialfodring	m ³	282.000	534.000	113.000	111.000	96.000	72.000	136.000	362.000	1.706.000
Vedligeholdelsesfodring	m ³ /5år	175.000	162.000	61.000	109.000	58.000	21.000	56.000	93.000	735.000

Tabel 5.2 Mængder af initialfodring og vedligeholdelsesfodring med ral hvert 5. år langs fodringsstrækningerne og langs hele Nordkysten.

		Kikhavn-Liseleje	Tisvilde-Vincentstien	Rågeleje-Trillingerne	Havstokken-Feriebyen	Gilbjergshoved	Gilleleje-Nakkehoved	Munkrup	Ålgårde	I alt
Ralfodringsmængder										
Ralbuffer mod akut erosion	m ³	25.300	29.000	4.500	9.500	9.000	10.000	5.000	38.500	130.800
Ralbuffer mod kronisk erosion	m ³ /5år	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ralbuffer mod havspejlsstigning	m ³ /5år	2.200	1.700	600	1.200	500	600	1.400	2.200	10.400
Ralbuffer mod randeffekter	m ³ /5år	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Initialfodring	m ³	27.500	30.700	5.100	10.700	9.500	10.600	6.400	40.700	141.200
Vedligeholdelsesfodring	m ³ /5år	2.200	1.700	600	1.200	500	600	1.400	2.200	10.400

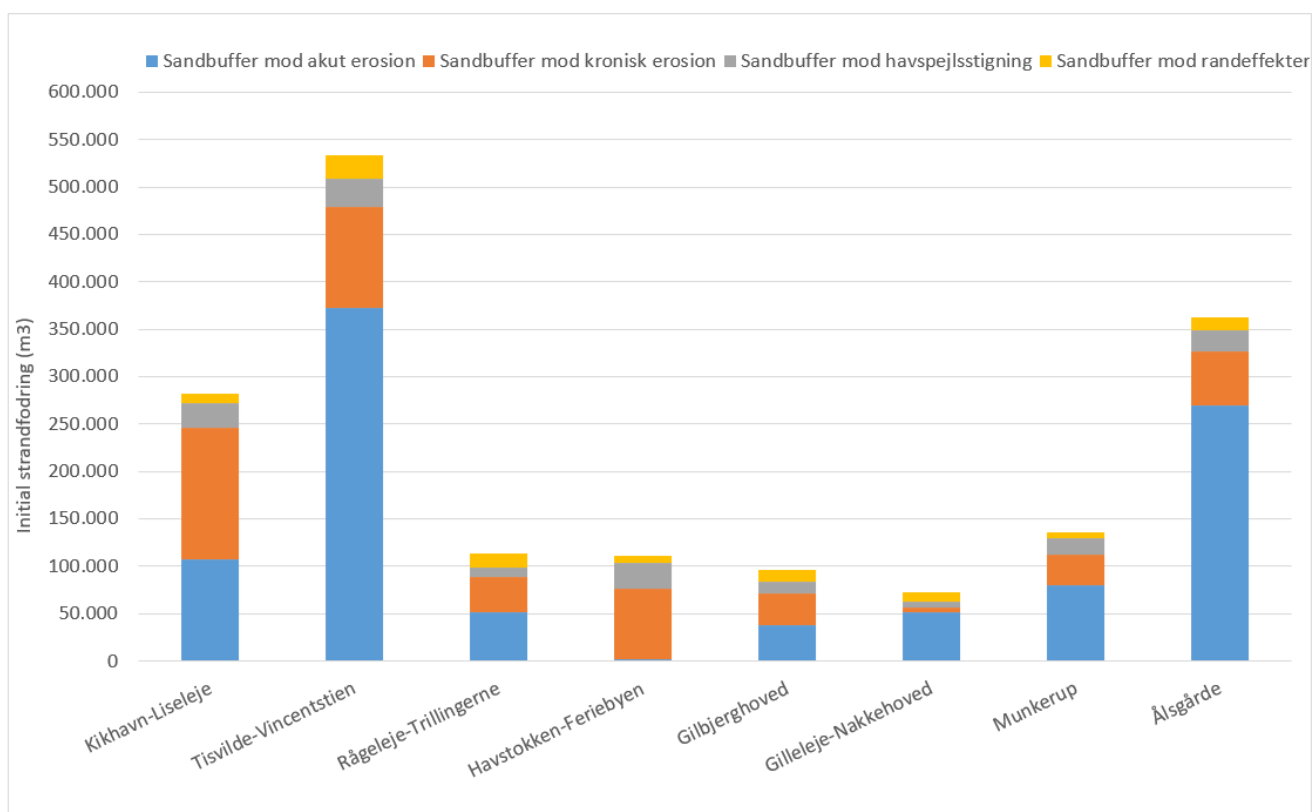
Beregningerne viser, at:

- der skal initialfodres med i størrelsesorden 1.706.000 m³ sand langs hele Nordkysten.
- der skal vedligeholdelsesfodres med i størrelsesorden 735.000 m³/5 år sand langs hele Nordkysten.
- der skal initialfodres med i størrelsesorden 141.000 m³ ral langs hele Nordkysten.
- der skal vedligeholdelsesfodres med i størrelsesorden 10.000 m³/5 år ral langs hele Nordkysten.

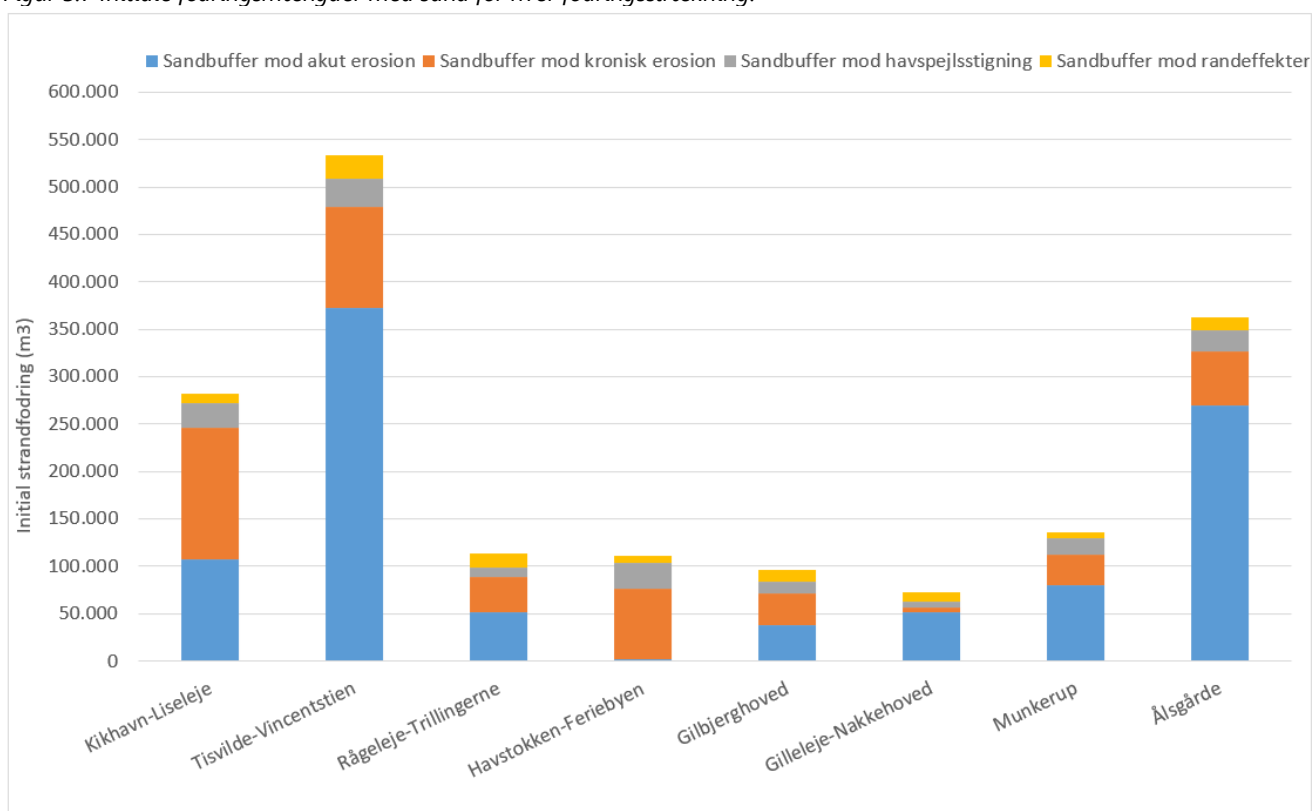
Figur 5.7 og Figur 5.8 viser fordelingen af fodringsmængder for henholdsvis sand og ral, som initialfodringen består af for hver enkelt fodringsstrækning.

Figurerne viser, at

- initialfodringen varierer mellem 72.000-534.000 m³ sand.
- initialfodringen varierer mellem 5.100-40.700 m³ ral.



Figur 5.7 Initiale fodningsmængder med sand for hver fodringsstrækning.

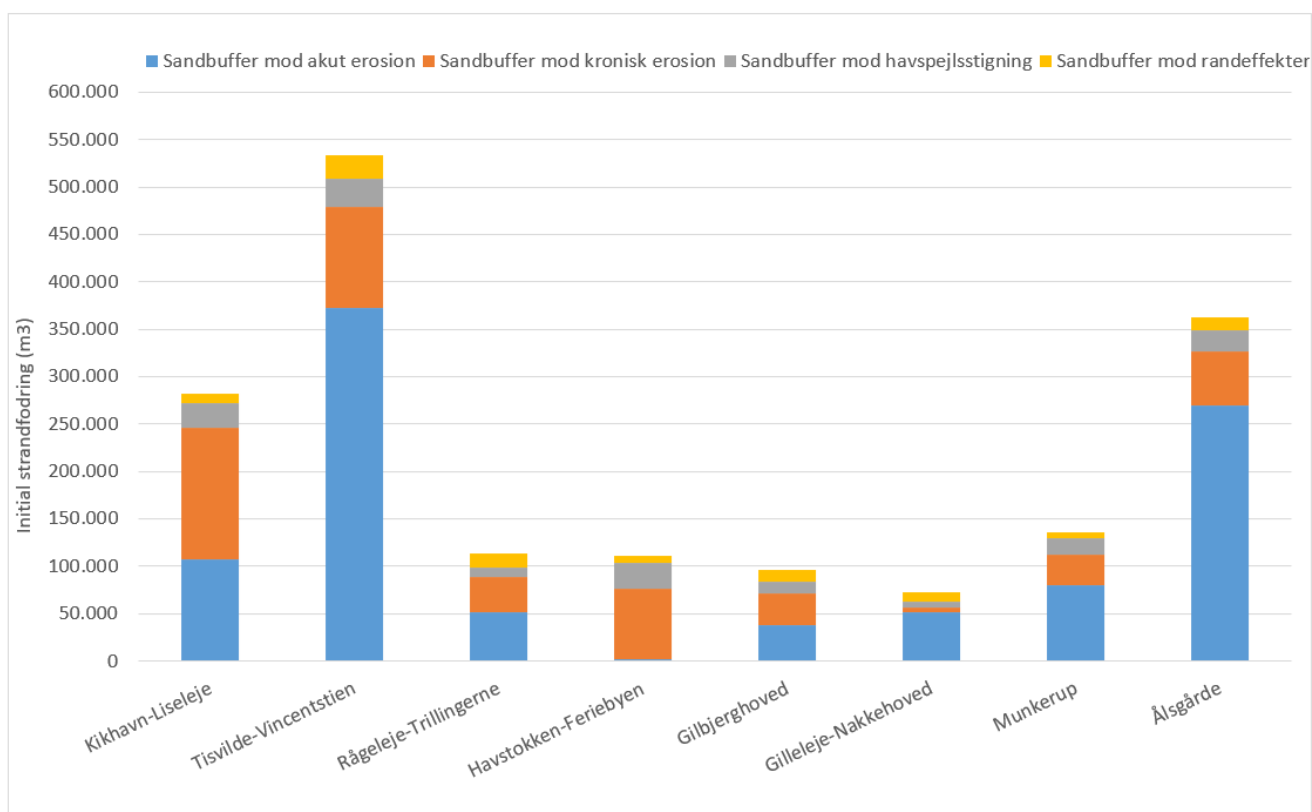


Figur 5.8 Initiale fodningsmængder med ral for hver fodringsstrækning.

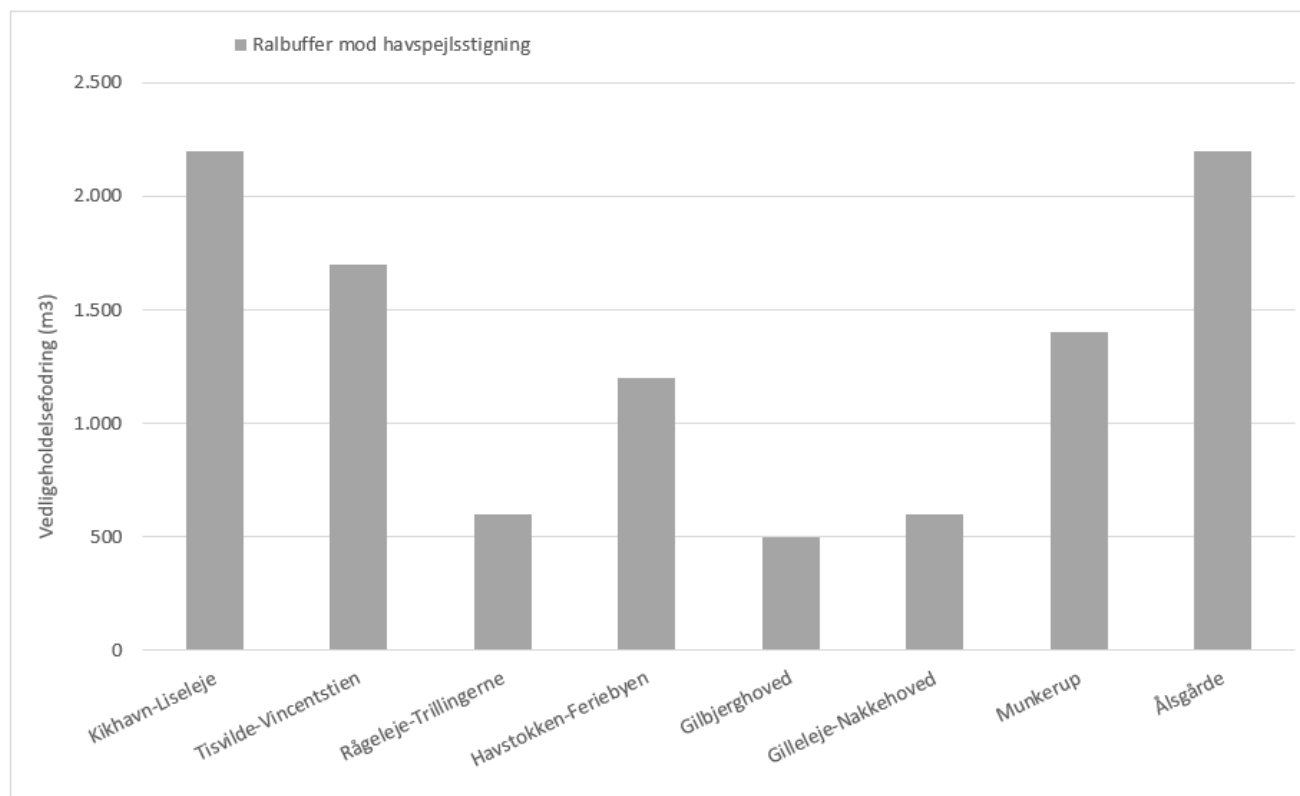
Figur 5.9 og Figur 5.10 viser de enkelte delmængder af henholdsvis sand og ral vedligeholdelsesfodringen består af for hver enkelt fodringsstrækning.

Vedligeholdelsesfodringen

- varierer mellem 21.000-175.000 m³/5. år sand.
- varierer mellem 600-2.200 m³/5. år ral.



Figur 5.9 Vedligeholdelsesstrandfodrmængder med sand for hver fodringsstrækning.



Figur 5.10 Vedligeholdelsesstrandfodningsmængder med ral for hver fodringsstrækning.

5.5 Tab af fodringsmateriale

5.5.1.1 Tab til dybt vand

Sand og ral vil generelt vandre langs kysten på revlerne og i opskylszonen fra vest mod øst. En del af sandet vil aflejres ved Gilleleje Havn, Hornbæk Havn samt Helsingør Lystbådehavn, alt imens en del vil passere forbi pyn-ten ved Kronborg for slutteligt at blive aflejret på Disken. En del af sandet, der trækkes ud i kystprofilet, vil aflej- res på Lappegrund, som det er foregået hidtil.

Det vurderes, at intet af sandet, hverken i anlægs- eller driftsfasen vil passere sejlrenden ned gennem Øresund, og der vil derfor ikke aflejres sand i svensk territorial farvand.

Det sediment, som aflejres ved Disken og Lappegrunden, er tabt for projektet, da det aldrig af den naturlige dynamik på kysten vil blive transporteret tilbage til projektstrækningen.

I den vestlige del af projektstrækningen vil der, når vinden enkelte gange er i nordnordøst, blive transporteret sediment fra den vestlige del af fodringsstrækningen Kikhavn-Liseleje mod Hundested Havn. Størstedelen af sedimentet forventes at blive fanget af de bølgebrydere og høfder, der ligger langs den vestlige del af fodrings- strækningen, men der vil blive transporteret sediment havværts bølgebryderne og høfderne. Da sedimenttrans- portkapaciteten er relativ stor og stigende mod Hundested Havn vil sedimentet blive transporteret ned til Hun- dested Havn, hvor det vil aflejre på stranden øst for havnen. Fra denne strand kan sandet blive backpasset til- bage til den vestlige del af fodringsstrækningen Kikhavn-Liseleje.

5.5.1.2 Sandflugt

Der er risiko for sandflugtsgener som følge af strandfodringerne. Sandflugten vurderes dog at være af minimalt omfang, da der fodres med forholdsvis groft sand med et vist indhold af ral. Der er desuden høje skråninger langs en stor del af fodringsstrækningerne. Sandflugten vil aftage med højden af skråningerne. Opbygningen af stranden med strandfodring vil desuden medføre, at skråningerne stabiliseres og efterhånden dækkes af vegetation, som vil dæmpe eventuelle gener af sandflugt yderligere.

Sandflugt vurderes ikke at være et alvorligt problem som følge af de foreslåede strandfodringerne, men kan skabe lokale gener. For at reducere omfanget af sandflugt kan der plantes marehalm på den bagerste del af stranden.

5.6 Risici

Der kan være delstrækninger, som eroderer hurtigere tilbage og som derfor skal have en større del af vedligeholdelsesfodringerne. På de mest udsatte strækninger (se afsnit 3.2.3.9) kan det blive nødvendigt, at grundejerne forstærker eller anlægger nye bølgebrydere, høfder, rev eller flak for at den målsatte minimumshøjde af stranden kan opretholdes før stormen indtræffer.

Strandfodringen vil medføre, at der tilføres mere sand til strandene øst for Hundested Havn og vest for Gilleleje og Hornbæk Havn. Kystlinjen vil rykke ud og øge sandtransporten til havnemundingen. For at modvirke dette forslås det, at der jævnligt afgraves sediment fra stranden vest for havnen, så den nuværende kystlinje fastholdes. På den måde vil forøget tilsanding af havnene kunne undgås. Det afgravede sand bør flyttes nedstrøms havnene eller nyttiggøres på anden vis.

Der er en variation i kystprofilerne langs kysten, som kan betyde at de estimerede mængder må opdateres i detailprojektet.

6. Anlægsoverslag

6.1 Enhedspriser

I det næste forklares de enhedspriser, som der er taget udgangspunkt i ifm. udarbejdelse af anlægsoverslaget. I henhold til *Bekendtgørelse om efterforskning og indvinding af råstoffer fra søterritoriet og kontinentalsoklen*⁴ skal der ikke betales for materialerne, da det anvendes til kystsikring. Priserne for sand og ral dækker derfor alene indvinding, transport samt indpumpning og tilretning på stranden.

6.1.1 Enhedspris for sand

Kystdirektoratets nøgletal for strandfodring svinger mellem 41-71 kr./m³, jf. Tabel 6.1. Dette nøgletal er inkl. usikkerhed på 20 %. Priserne stemmer overens med erfaringerne fra en række andre strandfodringsprojekter i Danmark.

⁴ <https://www.retsinformation.dk/eli/ta/2018/1680> Besøgt d. 18/9-2024

Tabel 6.1 Enhedspriser for strandfodring på Vestkysten, kr./m³. Anlægsoverslag for årlig vedligeholdelsesfodring på Vestkysten 2020-2024 (prismiveau 2019). Kilde: (Kystdirektoratet, 2020b).

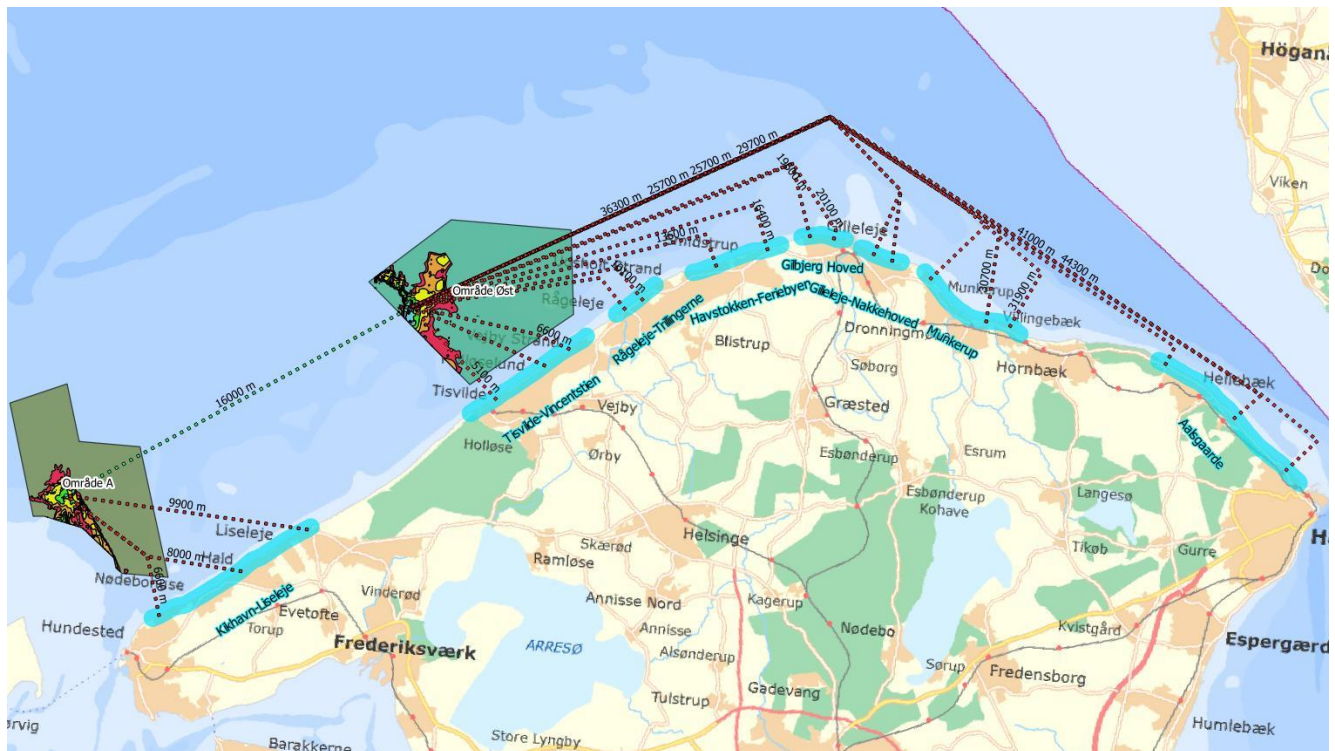
Mængder og udgifter pr. år 2020-24	Strandfodring		Kystnær fodring		Udgift
<i>Hovedstrækning</i>	<i>m³</i>	<i>kr./m³</i>	<i>m³</i>	<i>kr./m³</i>	<i>mio. kr./år</i>
Agger Tange	139.000	71	209.000	56	21,5
Harboøre Tange	115.000	64	173.000	50	16,0
Vrist - Ferring	234.000	52	352.000	37	25,0
Bovbjerg Klint					
Trans - Thorsminde	268.000	48	402.000	33	26,1
Thorsminde - Husby Klitplantage*	154.000	0 / 64	230.000	50	15,9
Husby Klitplantage - Søndervig	79.000	47	119.000	33	7,5
Ndr. Holmsland Tange	40.000	41	60.000	26	3,2
Sdr. Holmsland Tange*	451.000	8 / 66	677.000	53	54,3
I alt 3,7 mio. m³/år	1.481.000		2.222.000		169,5

* Oprensningssand fra indsejlingerne ved Thorsminde og Hvide Sande indgår i mængderne

I nuværende anlægsoverslag er der taget udgangspunkt i nøgletallet fra KDI, men for ikke at inkludere usikkerhed i enhedsprisen, da det i stedet indarbejdes i selve anlægsoverslaget, tages der udgangspunkt i et nøgletal på 45 kr./m³ ekskl. moms for fast mål. Nøgletallet er uden usikkerhed og indeholder sejlads op til 15 km. For at inkludere de seneste års generelle prisstigninger er nøgletallet øget med 15 % til 51,75 kr./m³ ekskl. moms for fast mål.

Fastmål er betegnelsen for sandet, når det ligger på havbunden eller på stranden – altså i naturligt lejret form. Når sandet suges op i skibet og bringes til fodringsområdet, er det ikke naturligt lejret mere og fylder derfor omkring 10 % mere – det kaldes skibsmål. Man afregner normalt i skibsmål selvom det beregnede fodringsbehov er i fastmål. Omregningen fra fastmål til skibsmål bevirker, at enhedsprisen stiger til 56,93 kr./m³ (41,75 kr. + 10 %) uden usikkerhed og med sejlads op til 15 km.

Sand til sandfodring forventes indvundet fra to indvindingsområder beliggende i relativ kort afstand fra fodringslokaliteterne, se oversigtskort Figur 6.1. Indvindingen af sand til fodring i Halsnæs Kommune foretages i det vestlige indvindingsområde, mens indvinding til fodring i Gribskov Kommune og Helsingør Kommune foretages i det østlige område.



Figur 6.1 Sandindvindingsområders placering med sejlafstande (stiplede linjer med afstand i m) til de analyserede kystprofiler i fodringsområderne (turkis markering).

Sejlafstanden varierer efter placering af sandindvindingsområderne i forhold til strandfodringsområderne. Som det fremgår af Figur 6.1, er der generelt længere sejlafstand til den østlige del af Sjællands nordkyst end til den vestlige del grundet placeringen af de to indvindingsområder.

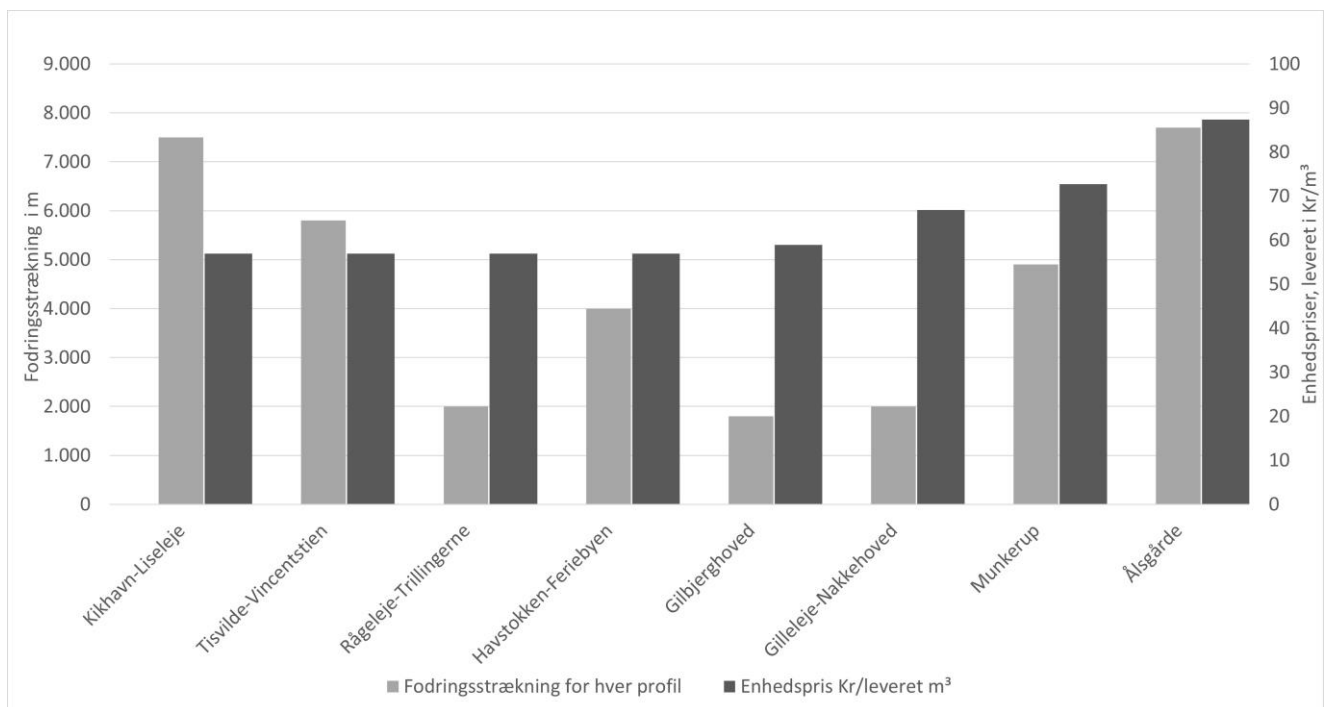
Sejlafstandene er opdelt i en kystnær del og en sejladsdel for dybder over 10 m. Den kystnære del håndteres ofte ved hjælp af en flydeledning, hvori sandet pumpes ind til stranden. Mange steder langs Nordkysten skal man langt ud fra kysten, for at finde dybder over 10 m, hvilket betyder, at flydeledningen flere steder skal være lang.

Større sandsugerskibe, kapacitet på 6.000 m³, har en fuld lastet dybgang på 7 m og vil kunne sejle ind til vanddybder på 8-10 m. Gilleleje Flak øst for Gilleleje Havn er en lavtliggende forhindring for sejlad med større skibe, så sejlruerne er lagt lige nord for kompasafmærkningsbøjen nord for dette flak.

Da sejlafstandene er så store for særligt den østligste del af fodringsområdet, kan det sandsynligvis ikke betale sig at benytte mindre sandsugningsfartøjer, der derved har mindre dybgang, men også mindre lastekapacitet og derfor skal sejle flere gange.

Sejlafstandene er estimeret til at variere mellem 5-45 km. For sejlafstande over 15 km beregnes hver kubikmeter sand i skibsmål at koste 1,15 kr./km ekstra.

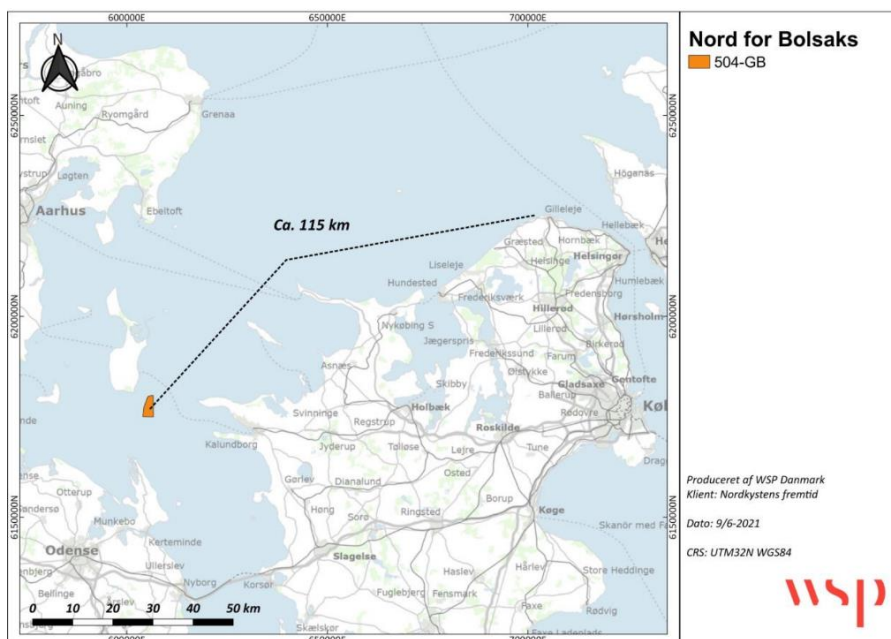
Derved stiger enhedsprisen fra 56,93 kr./m³ alene grundet den ekstra sejlafstand op til omkring 90 kr./m³ i den østligste del af projektområdet, se Figur 6.2.



Figur 6.2 Længder af fodringsstrækninger til venstre på y-aksen og enhedspriser med sejltillæg for hver fodringsstrækning til højre på y-aksen.

6.1.2 Enhedspris for ral

Rallet forventes indvundet fra Bolsaksen ved Samsø, Figur 6.3, som ligger omkring 115 km fra Gilleleje. Ral er en begrænset ressource og det er tidligere undersøgt af WSP, at den nødvendige mængde ral kun kan skaffes fra Bolsaksen (WSP, 2022).



Figur 6.3 Placering af Bolsaksen, hvor rallet indvindes.

Prisen på ral fra Bolsaksen vurderes overslagsmæssigt at ligge i størrelsesordenen 200 kr./m³ ekskl. moms, når der lastes med sold uden sand, dvs. at sandet sigtes fra. I denne enhedspris er de seneste års prisstigninger inkluderet. I tilfælde af, at der indvindes sediment ved Bolsaksen delvist over sold med et indhold af ral på 1/3 og 2/3 sand vurderes prisen som følge af den længere sejlaftand at ligge på mellem 275-360 kr./m³ ekskl. moms for ren ral for den vestligste og den østligste del af Nordkysten. Gennemsnittet på ca. 320 kr./m³ ekskl. moms for ren ral svarer nogenlunde til de 330 kr./ m³ ekskl. moms, der tidligere er forudsat baseret på tidligere erfaringer fra anlægsarbejder på Nordkysten. I nærværende anlægsoverslag er de 330 kr./ m³ ekskl. moms derfor fastholdt.

6.2 Samlet anlægsoverslag for sandfodring og ralfodring

Tabel 6.2 viser anlægsoverslag for strandfodring med sand og ral.

Anlægsoverslaget er præsenteret uden usikkerhed og eksklusive moms. Derudover indeholder det ikke udgifter til anstilling og rådgivning i forbindelse med detailprojektering.

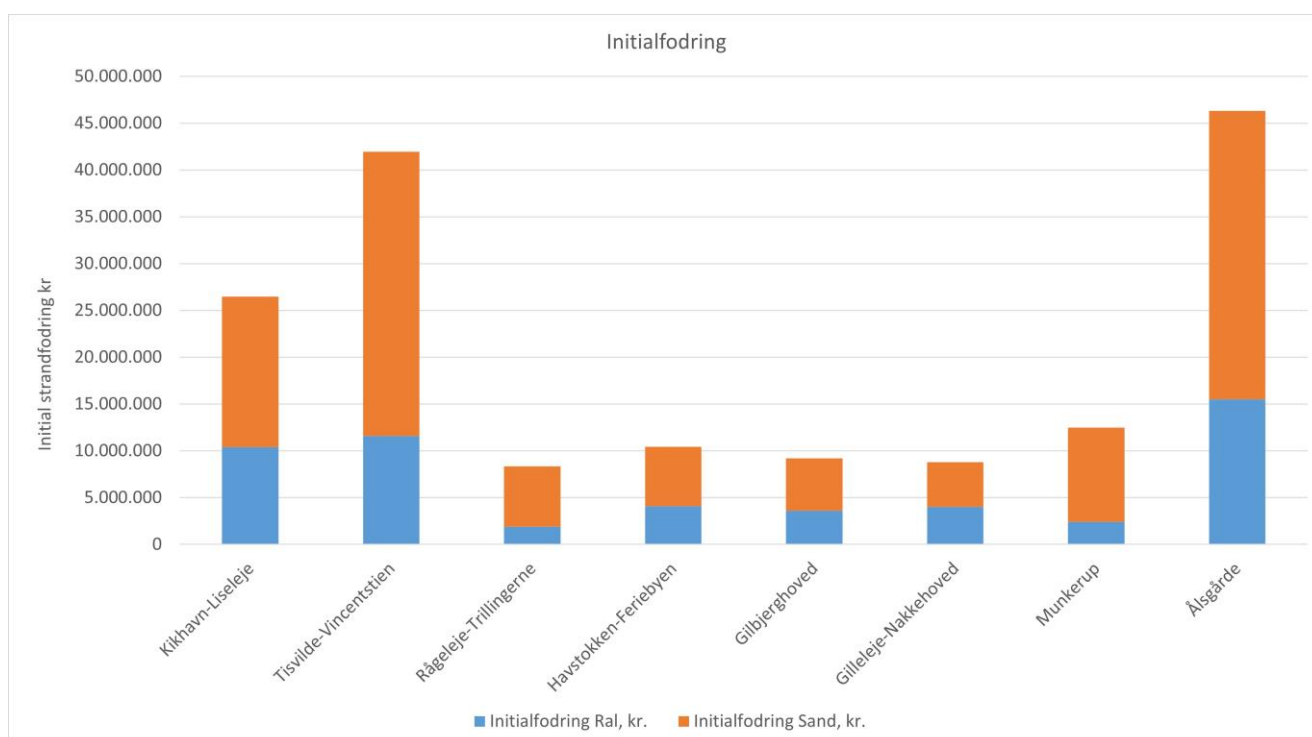
Tabel 6.2 Anlægsoverslag for initialfodring og vedligeholdelsesfodring med sand og ral pr. 5. år langs fodringsstrækningerne for hele Nordkysten. Priserne er ekskl. moms og uden usikkerhed.

Fodringsstrækning	Kikhavn-Liseleje	Tisvilde-Vincentstien	Rågeleje-Trillingerne	Havstokken-Feriebyen	Gilbjergshoved	Gilleleje-Nakkehoved	Munkerup	Ålgårde	Samlet pris
Initialfodring Ral, mio. kr.	10.4	11.6	1.9	4.1	3.6	4.0	2.4	15.5	53.6
Initialfodring Sand, mio. kr.	16.1	30.3	6.4	6.3	5.6	4.8	10.1	30.8	110.4
Initialfodring Ral og Sand, mio. kr.	26.5	42.0	8.4	10.4	9.2	8.8	12.5	46.3	164.0
Vedligeholdelsesfodring Ral, mio. kr./5år	0.8	0.6	0.2	0.4	0.2	0.2	0.5	0.8	3.9
Vedligeholdelsesfodring Sand, mio. kr./5år	10.0	9.2	3.5	6.2	3.4	1.4	4.1	8.1	45.8
Vedligeholdelsesfodring Ral og Sand, mio. kr./5år	10.8	9.8	3.7	6.7	3.6	1.6	4.6	9.0	49.8

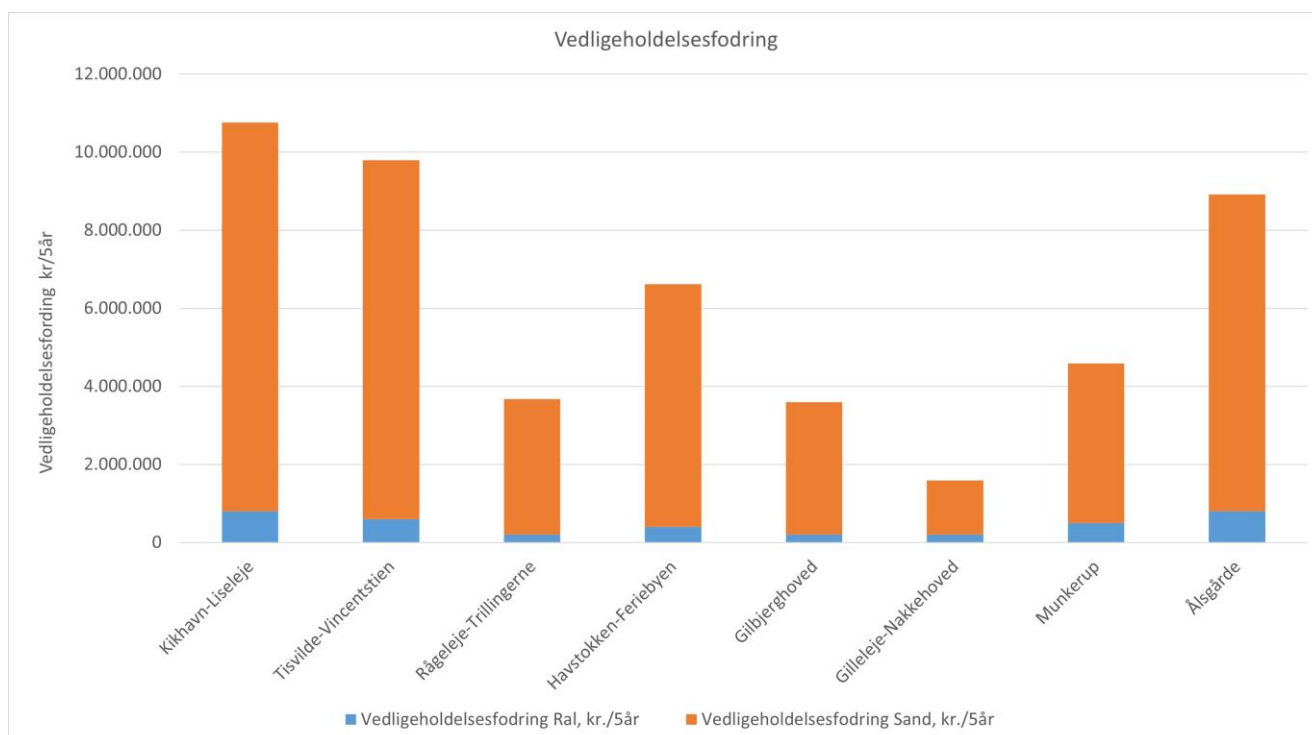
Det samlede anlægsoverslag for initialfodringen med sand og ral vurderes, ud fra analysen, til at være på ca. 164 millioner kr. ekskl. moms.

Det samlede anlægsoverslag for vedligeholdelsesstrandfodringen med sand og ral vurderes, ud fra analysen, til at være på ca. 50 millioner kr. ekskl. moms hvert 5. år.

Figur 6.4 og Figur 6.5 anlægsoverslaget på henholdsvis initialfodring og vedligeholdelsesfodring grafisk for de enkelte fodringsstrækninger for sand og ral.

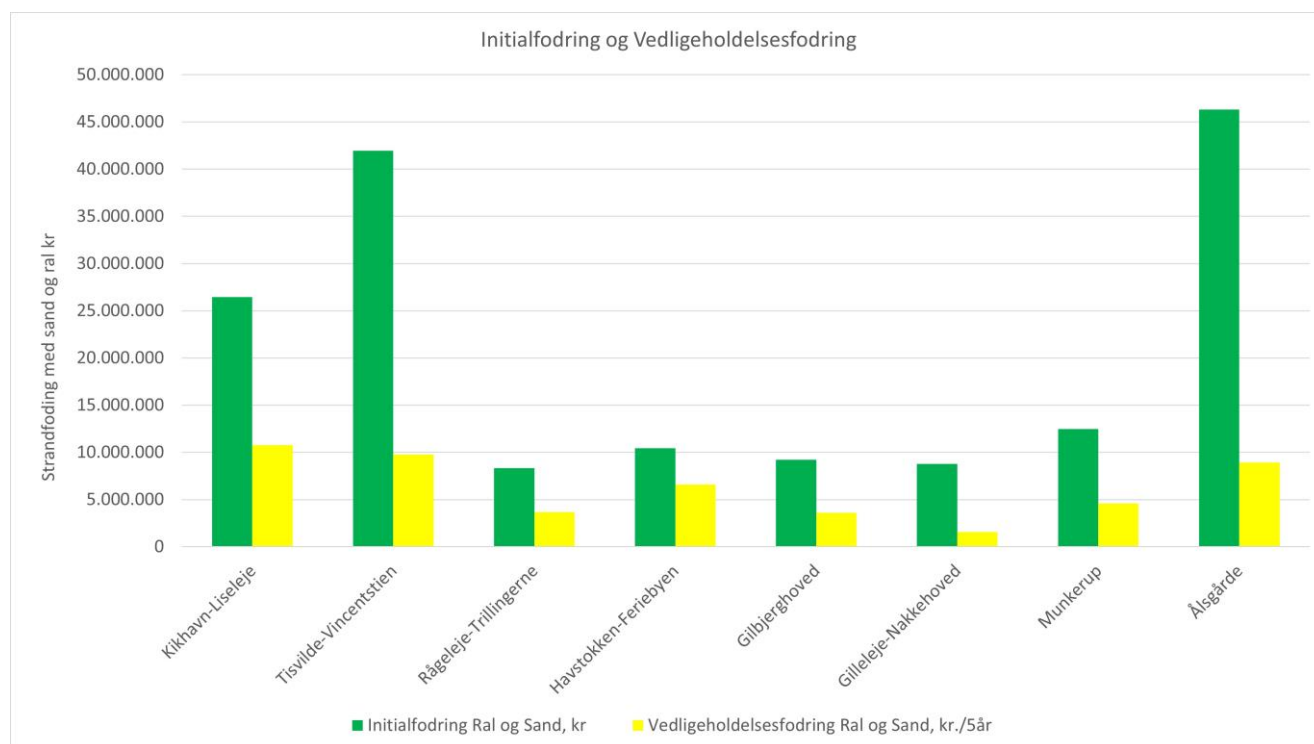


Figur 6.4 Anlægsoverslag for sand og ral fordelt på fodringsstrækninger for initialfodring. Anlægsoverslag er vist eksklusive moms og uden usikkerhed.



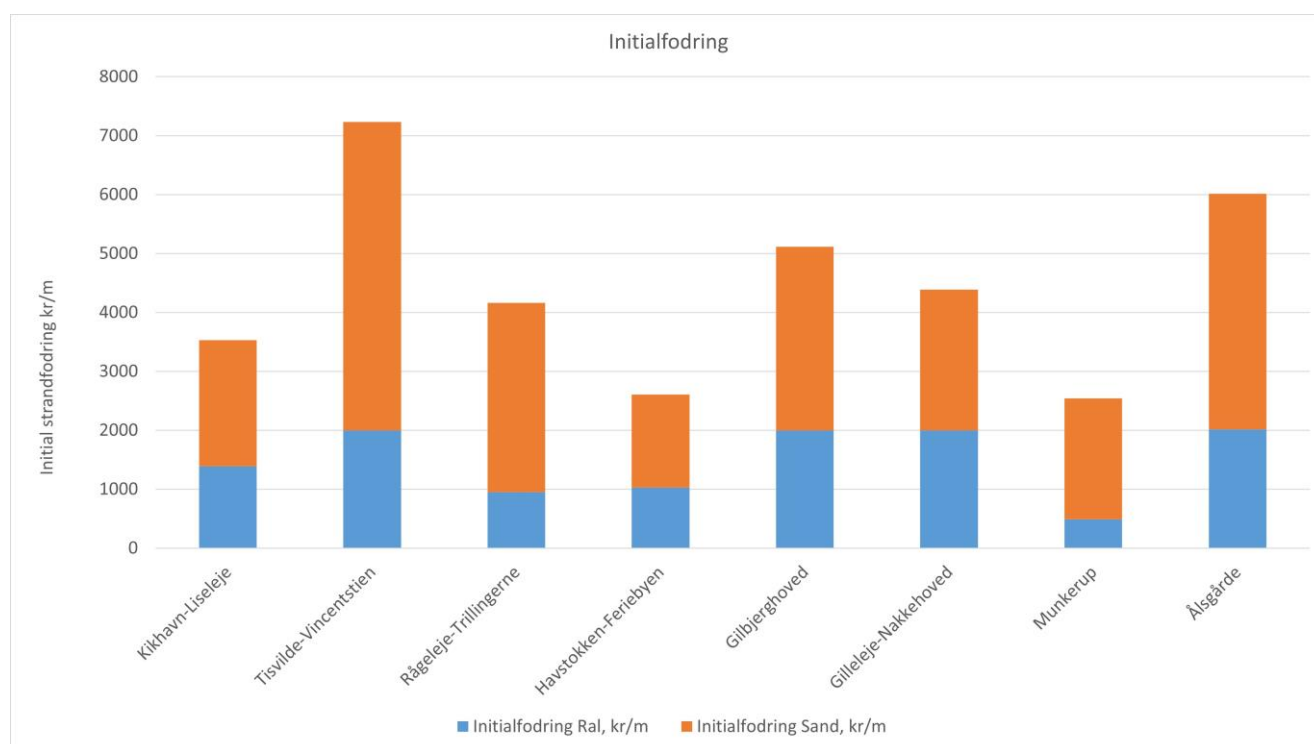
Figur 6.5 Anlægsoverslag for sand og ral fordelt på fodringsstrækninger for vedligeholdelsesfodring. Anlægsoverslag er vist eksklusive moms og uden usikkerhed.

Figur 6.6 viser en sammenligning af anlægsoverslag for initialfodring og vedligeholdelsesfodring for de enkelte fodringsstrækninger.

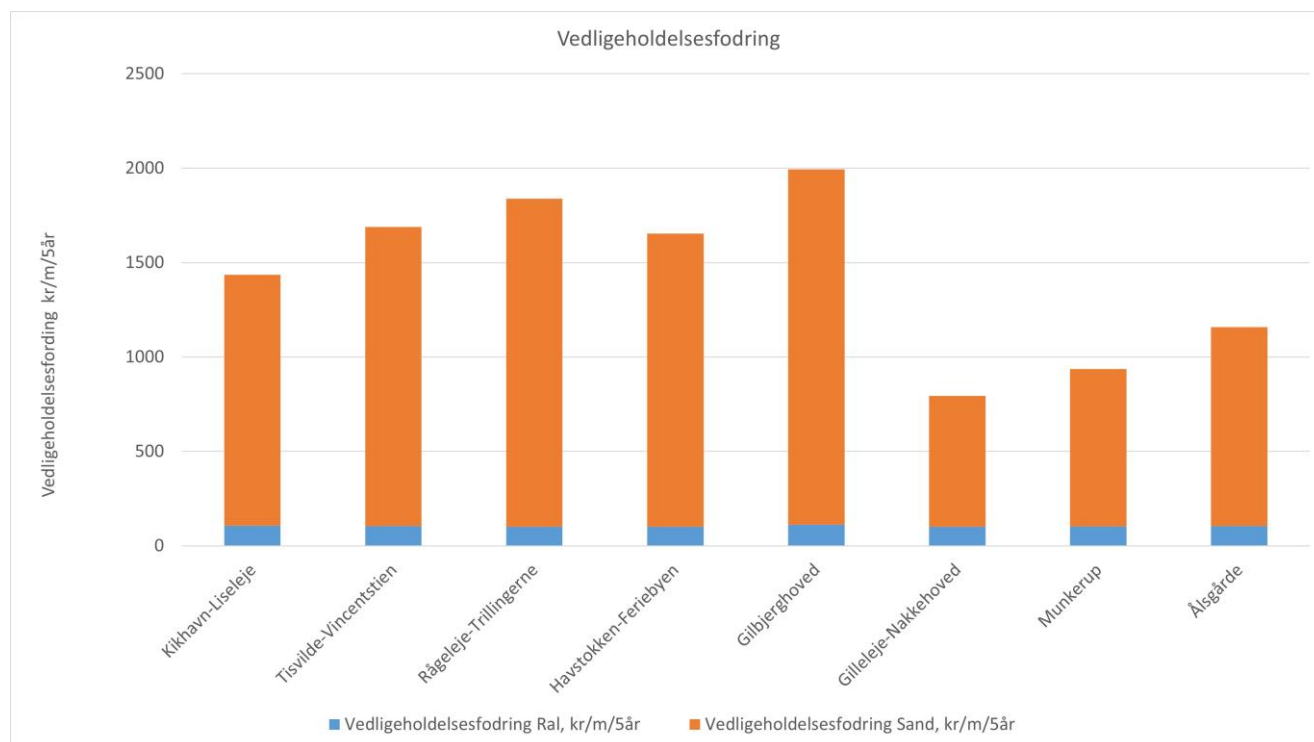


Figur 6.6 Anlægsoverslag for sand og ral fordelt på fodringsstrækninger for initialfodring og vedligeholdelsesfodring. Anlægsoverslag er vist eksklusive moms og uden usikkerhed.

Figur 6.7 og Figur 6.8 viser variationen af anlægsoverslaget pr. løbende meter kystlinje for hver fodringsstrækning for sand og ral for henholdsvis initialfodring og vedligeholdelsesfodring.

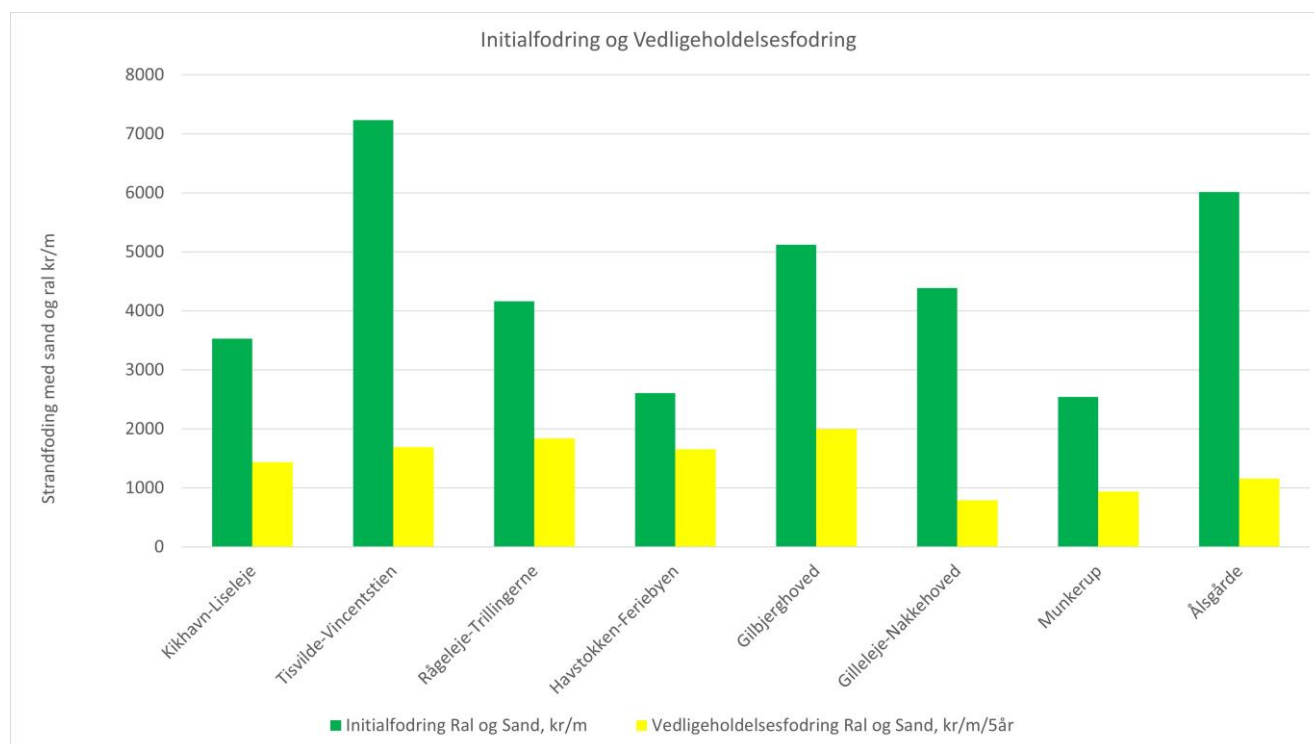


Figur 6.7 Anlægsoverslag pr. løbende meter kystlinje fordelt på fodringsstrækninger for initialfodring med sand og ral. Anlægsoverslag er vist eksklusive moms og uden usikkerhed.



Figur 6.8 Anlægsoverslag pr. løbende meter kystlinje fordelt på fodringsstrækninger for vedligeholdelsesfodring hvert 5. år med sand og ral. Anlægsoverslag er vist eksklusive moms og uden usikkerhed.

Figur 6.9 viser variationen i det samlede anlægsoverslag for sand og ral pr. løbende meter kystlinje for hver fodringsstrækning for henholdsvis initialfodring og vedligeholdelsesfodring. Tallene er også angivet i Tabel 6.3.



Figur 6.9 Anlægsoverslag pr. løbende meter kystlinje fordelt på fodringsstrækninger for initial- og vedligeholdelsesfodring hvert 5. år med sand og ral. Anlægsoverslag er vist eksklusive moms og uden usikkerhed.

Tabel 6.3 Initialfodring og vedligeholdelsesfodring angivet i kr. pr meter og ekskl. moms.

	Initialfodring (kr. pr. m)	Vedligeholdelsesfodring (kr. pr. m)
Kikhavn-Liseleje	3.500	1.400
Tisvilde-Vincentstien	7.200	1.700
Rågeleje-Trillingerne	4.200	1.800
Havstokken-Feriebyen	2.600	1.700
Gilbjerg Hoved	5.100	2.000
Gilleleje-Nakkehoved	4.400	800
Munkerup	2.500	900
Ålgårde	6.000	1.200

7. Referencer

- Binderup, M. (30. august 2016). *Hvordan formes kysten?* (Naturen i Danmark) Hentet 26. september 2023 fra https://naturenidanmark.lex.dk/Hvordan_formes_kysten%3F
- CIRIA, CUR, CETMEF. (2007 (reprinted 2012)). *The Rock Manual, The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA, London.
- COWI. (2016). *Nordkystens Fremtid. Kystteknisk Skitseprojekt*.
- DHI. (2018). *Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Sedimentprøver fra havbunden*.
- DHI. (2018a). *Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Bathymetrisk opmåling og bestemmelse af sandlag*.
- DHI. (2018c). *Nordkystens fremtid - Myndighedsprojekt. Numerisk modellering. Fase2: Kystteknisk grundlag*.
- DHI; Hasløv & Kjærsgaard. (2013). *Genanvendelse af havnesand fra Gilleleje og Hrbæk Havne*. Gribskov Kommune: Helsingør Kommune.
- DMI. (11. september 2023). *Klimaatlas*. Hentet fra <https://www.dmi.dk/klima-atlas/data-i-klimaatlas/?paramtype=sea&mapttype=kyst>
- Drønen, N., Sørensen, P., Deigaard, R., Kristensen, S., & Ries, O. (2017). A model based study of sand nourishment decay. *Coastal Dynamics 2017*. Helsingør.
- EurOtop. (2016). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*.
- IPCC. (2021). *IPCC Working Group I (WGI): Sixth Assessment Report*. Hentet fra <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- Jensen, O. J. (1984). *A Monograph on Rubble Mound Breakwaters*.
- Knudsen, P., Abbas Khan, S., Engsager, K., & Sorensen, C. (2016). *An uplift model for Denmark - and work ahead*. DTU Space.
- Komar, P. D. (1998). *Beach processes and sedimentation* (2 udg.). Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- Kystdirektoratet. (2001). *Lave Bølgebrydere*.
- Kystdirektoratet. (27. 08 2019). Kystdirektoratets udtalelse til kommunalt fællesprojekt "Nordkystens Fremtid" - Kystbeskyttelse i form af sandfodring mellem Hundested og Helsingør (Halsnæs, Gribskov og Helsingør Kommune).
- Kystdirektoratet. (2020). *Kystplanlægger*. Hentet fra <https://xn--kystplanlægger-cgb.dk/>
- Kystdirektoratet. (2020b). *Fællesaftalestrækningen Lodbjerg-Nyminddegab. Bilag til fællesaftale mellem staten og kystkommunerne om kystbeskyttelsen for perioden 2020-24*. Hentet 11. 09 2024 fra https://kyst.dk/media/d3kbywx3/bilag_til_faellesaftale_2020_24_lodbjerg_nyminddegab_januar2020.pdf
- Kystdirektoratet. (2024b). *Højvandsstatistikker 2024*.
- Larsen, G., Frederiksen, J., Villumsen, A., Fredericia, J., Gravesen, P., Foged, N., . . . Baumann, J. (1995). *Vedledning i Ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse*. Dansk Geoteknisk Forening.
- NASA. (N/A). *Sea level projection tool*. Hentet 26. september 2023 fra <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?type=global>
- NIRAS. (2018a). *Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Tilstandsvurdering af kystbeskyttelse, Hundested - Helsingør*.
- NIRAS. (2018b). *Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Sedimentprøver på land*.
- NIRAS. (2018c). *Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Bathymetrisk survey på lavt vand*.
- NIRAS. (2018d). *Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Geologisk og geoteknisk desk study*.
- NIRAS. (2018e). *Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Topografisk survey*.
- NIRAS. (2021). *Nordkystens Fremtid. Kystteknisk Projekt*.
- NIRAS. (2024b). *Nordkystens Fremtid. Miljøkonsekvensvurdering*.
- NIRAS. (2024e). *Nordkystens Fremtid. Myndighedsprojekt for strandfodring*.
- Thompson, D., & Schuttler, R. (1976). *Design of Riprap Slope Protection against Wind Waves*. CIRIA Report 61.
- WSP. (2022). *Nordkystens Fremtid. Undersøgelse af ral til kystfodring*.