

# Nordkystens Fremtid

## Nordkystens Fremtid

Kystteknisk projekt

**GRIBSKOV KOMMUNE**

**30. OKTOBER 2020**

# Indhold

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Sammenfatning</b>	<b>6</b>
2.1	Konklusion	6
2.2	Forudsætninger for det kysttekniske projekt	9
2.3	Strategi for kystbeskyttelse	11
2.4	Kystteknisk grundlag	11
2.5	Kystteknisk vurdering	13
2.5.1	Erosionspres	13
2.5.2	Kronisk erosion	13
2.5.3	Akut erosion	15
2.5.4	Forstærkning af eksisterende hård kystbeskyttelse	16
2.6	Anlægsoverslag	17
2.7	Udførelsestidsplan	17
<b>3</b>	<b>Kystteknisk grundlag</b>	<b>18</b>
3.1	Forundersøgelser	18
3.1.1	Topografisk opmåling	18
3.1.2	Bathymetrisk opmåling og bestemmelse af sandlag	19
3.1.3	Bathymetrisk opmåling på lavt vand	21
3.1.4	Geoteknisk skrivebordsstudie	22
3.1.4.1	Generelle geologiske forhold	22
3.1.4.2	Eroderet sediment volumen	23
3.1.5	Sediment	24
3.1.5.1	Sedimentprøver	24
3.1.5.2	Vurdering af sedimenterne langs kysten	25
3.1.6	Registrering af kystbeskyttelse	26
3.1.7	Tilstandsvurdering uden strandfodring	36
3.1.7.1	Indledning	36
3.1.7.2	Dimensioneringskriterier	37
3.1.7.3	Dimensionering af hård kystbeskyttelse	37
3.1.7.4	Tilstandsvurdering af hård kystbeskyttelse	44
3.1.7.5	Tilstandsvurdering af hård kystbeskyttelse uden strandfodring	44
3.2	Kystteknisk modellering	47
3.2.1	Bølger	47

3.2.2	Vandstand	51
3.2.2.1	Normal vandstand	51
3.2.2.2	Eustatisk havspejlsstigning	51
3.2.2.3	Isostatisk landhævning	51
3.2.2.4	Ekstrem vandstand	53
3.2.2.5	Dimensionsgivende vandstand på dybt vand	54
3.2.3	Kronisk erosion	55
3.2.3.1	Historisk kronisk erosion	55
3.2.3.2	Erosion grundet havspejlsstigning	56
3.2.3.3	Modellering af langstransport	58
3.2.3.4	Model	59
3.2.3.5	Resultater	62
3.2.3.6	Vurdering af kronisk erosion langs fodringsstrækningerne	67
3.2.3.7	Anbefalinger til fodringsvolumener – modvirkning af kronisk erosion	69
3.2.3.8	Randeffekter ved strandfodring	70
3.2.3.9	Vurdering af hotspots	71
3.2.4	Passage af sand forbi Gilleleje Havn og Hornbæk Havn	73
3.2.4.1	Gilleleje Havn	73
3.2.4.2	Hornbæk Havn	74
3.2.5	Sandtransport på tværs af stranden	75
3.2.5.1	Akut erosion	75
3.2.5.2	Modellering af akut erosion af sandstrand	76
3.2.5.3	Model	76
3.2.5.4	Resultater	78
3.2.6	Raltransport på tværs af stranden	85
3.2.6.1	Akut erosion af ralstrand	85
3.3	Kystteknisk vurdering	86
3.3.1	Erosionspres	86
3.3.2	Kronisk erosion	87
3.3.3	Akut erosion	87
3.3.4	Forstærkning af eksisterende hård kystbeskyttelse	87
<b>4</b>	<b>Ny lov om kystbeskyttelse</b>	<b>89</b>
4.1	Behovet for kystbeskyttelse	89
4.2	Økonomiske hensyn	89
4.3	Kystbeskyttelsesforanstaltningens tekniske, natur- og miljømæssige kvalitet	89
4.4	Rekreativ udnyttelse af kysten	90
4.5	Andre forhold af væsentlig betydning for kystbeskyttelse	90
4.6	Lovændringens betydning for Nordkystens Fremtid	90



<b>5</b>	<b>Kystplan</b>	<b>91</b>
5.1	Formål med kystteknisk projekt	91
5.2	Målsætning for kystteknisk projekt	91
5.3	Strategi for hård kystbeskyttelse	92
5.4	Strategi for strandfodring	96
<b>6</b>	<b>Strandfodring under Nordkystens Fremtid</b>	<b>98</b>
6.1	Formål med myndighedsprojekt	98
6.2	Målsætning for myndighedsprojekt	98
6.3	Strandfodringsmateriale	99
6.4	Fodringsstrategi	101
6.4.1	Initial fodring	101
6.4.2	Vedligeholdelsesfodring	102
6.4.2.1	Kompensation for kronisk erosion og randeffekter	103
6.4.2.2	Kompensation for havspejlsstigninger	104
6.5	Tilstandsvurdering af hård kystbeskyttelse med sandfodring	104
6.6	Sandfodringsmængder	106
6.7	Visualiseringer af sandfodring	115
6.8	Tilstandsvurdering af hård kystbeskyttelse med sandfodring og ralfodring	119
6.9	Sand- og ralfodringsmængder	120
6.10	Tab af fodringsmateriale	127
6.10.1.1	Tab til dybt vand	127
6.10.1.2	Sandflugt	127
<b>7</b>	<b>Anlægsoverslag</b>	<b>127</b>
7.1	Enhedspriser	127
7.1.1	Enhedspris for sand	127
7.1.2	Enhedspris for ral	130
7.2	Samlet anlægsoverslag for sandfodring alene	130
7.3	Samlet anlægsoverslag for sandfodring og ralfodring	135
7.4	Oprensning ved havnene	139
7.5	Risici	139
<b>8</b>	<b>Udførelstid for strandfodring</b>	<b>140</b>
<b>9</b>	<b>Referencer</b>	<b>143</b>



Projekt nr.: 228920  
Dokument nr.: 1232386191  
Version 2

Udarbejdet af  
KBO, CHLD, KMR, MML, PFKL  
Kontrolleret af KMR, CHLD, KBO  
Godkendt af CHLD

## 1 Indledning

Halsnæs Kommune, Gribskov Kommune og Helsingør Kommune har bedt rådgivergruppen NIRAS, DHI og Hasløv & Kjærsgaard udarbejde forundersøgelser, myndighedsprojekt samt miljøvurdering for et kystbeskyttelsesprojekt for hele nordkysten af Sjælland.

Denne rapport indeholder opsummering af det kysttekniske baggrundsmateriale og beskrivelse af det kysttekniske projekt for den fremtidige kystbeskyttelse af Nordkysten.

Formålet med projektet er at beskytte de mange værdier langs Nordkysten mod havet og herunder sommerhusområder, helårsbebyggelse og vejanlæg mm.

Projektet er udarbejdet som et grundlag for kystbeskyttelsen langs hele nordkysten af Sjælland på en strækning på ca. 60 km mellem Hundested og Helsingør.

Formålet med det kysttekniske projekt er, at Nordkysten skal være beskyttet mod en 50 års hændelse (middeltidshændelse  $MT = 50$  år) de næste 50 år (projektets levetid  $L = 50$  år) frem til år 2070. Dette opnås ved en kombination af skråningsbeskyttelser med sten og løbende strandfodring med sand og ral.

Myndighedsprojekt for Nordkystens Fremtid omfatter udelukkende strandfodring langs bebyggede strækninger af Nordkysten, hvor der er behov for kystbeskyttelse.

Strandfodringerne udføres som sandfodring og eller ralfodring med udgangspunkt i den naturlige sedimentsammensætning på den enkelte strækning og fokuserer på at reducere den potentielle skadevirkning på Natura 2000 område Nr. 195 Gilleleje Flak og Tragten og herunder på udpegningsgrundlagene stenrev og sandbanke.

Strandfodringerne skal ses i sammenhæng med løbende forstærkning af private skråningsbeskyttelser, høfder og bølgebrydere, rev og flak. Den hårde kystbeskyttelse er ikke en del af myndighedsprojektet, men kan udføres i privat regi efter udarbejdelse af lokale projekter. De enkelte grundejere og kystlag skal selv ansøge om tilladelse til at ændre og udbygge den hårde kystbeskyttelse.

Det kysttekniske projekt 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.

Materialet er udformet ud fra behovet for kystbeskyttelse og kravene i Kystbeskyttelsesloven.

## 2 Sammenfatning

### 2.1 Konklusion

Formålet med det kysttekniske projekt er, at Nordkysten skal være beskyttet mod en 50 års hændelse (middeltidshændelse MT = 50 år) de næste 50 år (projektets levetid L = 50 år) frem til år 2070. Dette opnås ved en kombination af skråningsbeskyttelser med sten og løbende strandfodring med sand og ral.

Eksisterende hård kystbeskyttelse langs Nordkysten er generelt hverken tilstrækkelig til at beskytte mod en storm med en returperiode på 50 år i dag eller om 50 år.

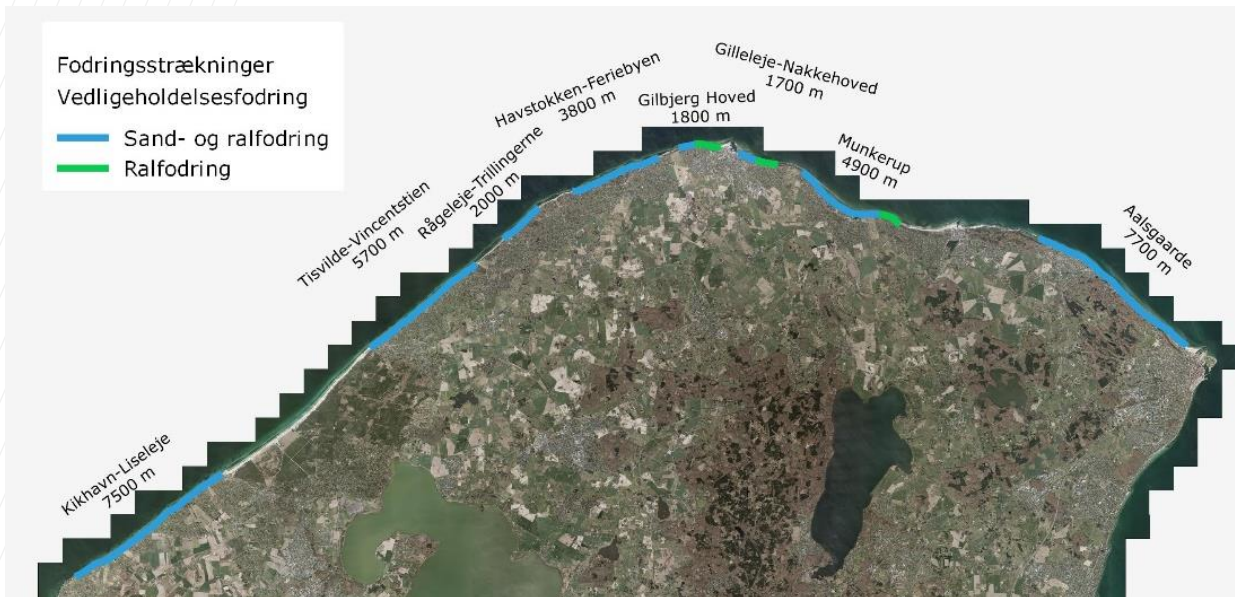
Det kysttekniske projekt viser, at strandfodring er nødvendig langs alle bebyggede grunde med kystbeskyttelsesbehov. Det foreslås, at der skal strandfodres langs 8 længere strækninger på Nordkysten med en samlet længde på 35 km ud af 56 km, se Figur 2.1 og Figur 2.2. Der fodres ikke ud for naturstrækninger.

Strandfodringerne reducerer bølgepåvirkningen af skråningsbeskyttelser og skråninger bagved.

Det anbefales, at strandfodringerne udføres med en kombination af sand (0,35 mm <  $d_{50}$  < 0,6 mm) og ral (20-150 mm).



Figur 2.1 Initialfodring



Figur 2.2 Vedligeholdelsesfodring

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

- Den overordnede målsætning for strandfodring i forbindelse med Nordkystens Fremtid er, at der langs udpegede fodringsstrækninger generelt er en beskyttelse foran skrænter og skråningsbeskyttelser svarende til minimum +2,0 m sandstrand i forhold til middelvandstanden før en dimensionsgivende stormhændelse, eller tilsvarende beskyttelsesniveau med ral svarende til minimum +1,2 m.
- Opbygning af sand- og ralstrand sker ved strandfodring med sand og eller ral, der tilpasses hver enkelt fodringsstrækning således, at der ikke vil ske forringelse af den nuværende strandkvalitet.
- Strandens højde udbygges med sand og eller ral i takt med havspejlsstigningen, hvorved beskyttelsesniveauet opretholdes.
- Strandfodringerne skal stoppe tilbagerykning af stranden på fodringsstrækningerne ud for den bebyggede del af Nordkysten.
- Strandfodringerne skaber en gennemsnitlig strandbredde på 10-30 meter, som sikrer passage langs kysten.
- Strandfodringerne skal sikre en langsigtet og helhedsorienteret beskyttelse af Nordkysten.
- Strandfodringerne tilpasses for at reducere den potentielle skadevirkning på Natura 2000 område Nr. 195 Gilleleje Flak og Tragten og herunder på udpegningsgrundlagene stenrev og sandbanke.

Strandfodring med sand og ral består af en initialfodring og efterfølgende vedligeholdelsesfodringer hvert 5. år.

- Initialfodring udføres med 5m<sup>3</sup>/m ral til minimum +1,2m for at sikre mod akut erosion de steder, der kun er sandstrand i dag.
- Sandfodring udføres til +1,5m foran skråningsbeskyttelserne mod akut erosion og for at skabe passage langs kysten.



- Herover udlægges sand til vedligeholdelse op til +2,5m vest for Gilleleje og +2,0m øst for Gilleleje.
- Sandstranden forudsættes at have en hældning på 1 på 15.
- Højden af ralstrandene øges til +1,5m de steder, der kun fodres med ral. Herover udlægges ral til vedligeholdelse op til +1,75m over dagligt vande.
- Ralstranden forudsættes at have en hældning på 1 på 10.
- Vedligeholdelsesfodring udføres med sand mod kronisk erosion og havspejlsstigning og randeffekter langs alle strækninger undtagen profilstrækningerne Gilleleje, Nakkehoved og Villingebæk, hvor initialfodring og vedligeholdelsesfodring udelukkende består af ral.
- Vedligeholdelsesfodring udføres med ral over inderste 10 m af stranden svarende til havspejlsstigningen langs hele kysten.

Den foreslåede strandfodring medfører, at der skal foretages en samlet initialfodring med cirka 1.500.000 m<sup>3</sup> sand og cirka 150.000 m<sup>3</sup> ral.

Det samlede anlægsoverslag for initialstrandfodringen forventes at være i størrelsesorden 135 mio. kr. plus moms.

Herefter skal der løbende vedligeholdelsesfodres med cirka 670.000 m<sup>3</sup> sand og cirka 17.000 m<sup>3</sup> ral cirka hvert 5. år.

Det samlede anlægsoverslag for vedligeholdelsesfodringerne forventes at være i størrelsesorden 42 mio. kr. plus moms cirka hvert 5. år.

Der er i de nævnte anlægsoverslag ikke taget højde for afværgeforanstaltninger som for eksempel i forbindelse med udløb til Kattegat og øget oprensning af havneindsejlingerne.

Fodringsmaterialet svarer som udgangspunkt til det sand og ral, der er på Nordkysten i dag.

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 øvrige ejendomme ud til kysten, hvor der ikke fodres direkte.

Strandfodringerne vil forbedre kystbeskyttelseskonstruktionernes robusthed og kysttekniske virkning, samt sikre et mere ensartet beskyttelsesniveau langs Nordkysten.

Strandfodring vil herudover sikre passage langs kysten på de beskyttede strækninger.

Fodring er den eneste form for kystbeskyttelse, der kan standse erosionen i hele kystprofilen og kan kompensere for kronisk erosion og havspejlsstigning, og som ikke medfører øget erosion på tilstødende strækninger.

Strandfodring foretages af den fælles projektorganisation: "Nordkystens Fremtid" som et fælles projekt for grundejerne langs Nordkysten under ledelse af Halsnæs Kommune, Gribskov Kommune og Helsingør Kommune.

Vedligeholdelse og udbygning af hård kystbeskyttelse skal varetages af de enkelte grundejere og kystbeskyttelseslag.

Grundejerne anbefales at opgradere og udbygge skråningsbeskyttelserne således, at de kan modstå en 50 års storm nu og om 50 år i kombination med strandfodringerne.

Skråningsbeskyttelserne anbefales opbygget til minimum +3,87m DVR90 vest for Gilleleje og +3,77m DVR90 øst for Gilleleje med en hældning på 1 på 2 og en middel stenvægt på  $W_{em} > 500\text{kg}$  ( $W_{em}$ : Effective mean weight).

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 initialstrandfodringen.

Grundejerne anbefales også til at foretage oprydning og renovering af nedslidt og utilstrækkelig hård kystbeskyttelse før strandfodringen udføres. Stenmaterialerne kan med fordel indbygges i forstærkede skråningsbeskyttelser og derved nyttiggøres bedst muligt.

Optimering og omlægning af eksisterende hård kystbeskyttelse kræver individuelle tilladelser.

Tilstandsvurdering og GIS database samt alle kysttekniske rapporter vil være offentligt tilgængelig på hjemmesiden Nordkystensfremtid.dk

## 2.2 Forudsætninger for det kysttekniske projekt

Halsnæs Kommune, Gribskov Kommune og Helsingør Kommune har besluttet at iværksætte en ny overordnet strategi for beskyttelse af Nordkysten ved udarbejdelse og gennemførelse af en helhedsplan.

Det kysttekniske projekt tager udgangspunkt i de strækninger, hvor der er behov for at beskytte eksisterende bebyggelse og infrastruktur mod havet. Kystplanen 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 skal kombineres for at skabe den optimale kystbeskyttelse og sikre ensartet beskyttelsesniveau langs hele Nordkysten.

Formålet med strandfodring er at øge højden af stranden foran skråningsbeskyttelserne og skråningerne bagved. Herved reduceres behovet for at styrke og forhøje skråningsbeskyttelserne på kort så vel som på lang sigt. Desuden genetableres muligheden for passage langs kysten, hvilket ikke er muligt mange steder i dag.

For at kunne gennemføre en storstilet strandfodring skal der udarbejdes et myndighedsprojektet, som alene omhandler den fælles strandfodring over længere strækninger.

Udbygning og renovering af hård kystbeskyttelse skal fremadrettet fortsat varetages af grundejere og kystlag. Strandfodringsprojektet vil kunne indgå som en del af fremtidige ansøgninger om lokal udbygning eller optimering af hård kystbeskyttelse.

Derudover kan det overvejes at anlægge nye bølgebrydere, høfder, rev eller flak på udsatte strækninger, hvor sand og ral har svært ved at blive liggende foran skråningsbeskyttelserne.

Kystbeskyttelsen langs Nordkysten foreslås dimensioneret og vurderet ud fra følgende dimensioneringskriterier for henholdsvis skråningsbeskyttelser og strandfodring, se Tabel 2.1.

*Tabel 2.1: Anbefalede dimensioneringskriterier for skråningsbeskyttelser og strandfodring på Nordkysten. Acceptabel risiko svarer til sandsynligheden for forekomst af MT indenfor L.*

Dimensionering	Kystbeskyttelsestype	
	Skråningsbeskyttelse	Strandfodring
Levetid, L	50 år	5 år
Havspejlsscenario	Middel	Middel
Acceptabel risiko, R	64%	10%
Middeltidshændelse, MT	50 år	50 år

Standarden for anbefalede skråningsbeskyttelser på Nordkysten er defineret til at kunne modstå en middeltidshændelse på 50 år med en levetid på 50 år.

Tilstandsvurderingen har vist, at en stor del af den hårde kystbeskyttelse er underdimensioneret i dag og styrken af konstruktionerne reduceres yderligere i fremtiden som følge af erosion og havspejlsstigning.

Strandfodring skal sikre, at der skabes og opretholdes en tilstrækkelig høj strand til, at typiske eksisterende skråningsbeskyttelser kan modstå en designhændelse med en returperiode på 50 år i dag og om 50 år.

Den overordnede målsætning for strandfodringen er, at der vedligeholdes en målsat minimumshøjde af stranden foran skråningsbeskyttelserne som beskyttelse mod en designstorm.

Strandfodring vedligeholdes og udbygges 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.

Stranden vil være lidt lavere end den generelt fastsatte målsætning foran fremskudte skråningsbeskyttelser, da stranden vil have et udjævnet forløb langs kysten.



## 2.3 Strategi for kystbeskyttelse

Strandfodring er den væsentligste komponent for at få en helhedsorienteret beskyttelse langs Nordkysten.

Strandfodring udføres på alle de strækninger, hvor der er bebyggelse ud til kysten, og der således er et kystbeskyttelsesbehov. 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.

Fodring er den eneste form for kystbeskyttelse, der kan standse erosionen i hele kystprofilen og kan kompensere for kronisk erosion og havspejlsstigning, og som ikke medfører øget erosion på tilstødende strækninger.

Strandfodring sikrer en langsigtet beskyttelse af Nordkysten med en stabiliserende strand foran skråningsbeskyttelserne ved udlægning af sand og eller ral.

Fodringsmængden fastlægges således, at stranden generelt har en udstrækning svarende til en målsat minimumshøjde foran skråningsbeskyttelserne.

Strandfodring vedligeholdes og udbygges løbende i takt med fremtidig havspejlsstigning og i takt med tab af sand og ral på fodringsstrækningerne, som følge af spredning af materiale på langs og på tværs af kysten således, at beskyttelsesniveauet opretholdes 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 og den årlige variation af langstransporten.

Strandfodringen sikre mulighed for passage på langs af kysten foran eksisterende hård kystbeskyttelse.

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

Hele Nordkysten vil på sigt få glæde af strandfodringerne, som gradvist spredes ned langs hele kysten og over hele det aktive kystprofil.

Strandfodringerne vil kunne øge tilsandingen af havnene langs Nordkysten, herunder specielt Gilleleje Havn og Hornbæk Havn, hvilket behandles nærmere i miljøkonsekvensvurderingen, [1].

Strandfodringerne vil kunne medføre reduceret afstrømning fra udløbene langs Nordkysten i og med, at højden af stranden øges, hvilket behandles nærmere i miljøkonsekvensvurderingen og skitseprojektet for offentlige udløb på Nordkysten, [1] og [2].

## 2.4 Kystteknisk grundlag

Der er udarbejdet et datagrundlag for dimensionering af kystbeskyttelsen langs Sjællands nordkyst. Data og analyser er udviklet ved anvendelse af DHIS numeriske modeller og indbefatter, se også [3]:

- **Meteomarine forhold:**
  - Modellerede ekstremvandstande matcher ekstremvandstande i måletidsserien ved Hornbæk 1994-2017 og variationen i ekstremværdier (for returperioder 2, 10, 20 og 50 år) er etableret langs hele kysten.
  - Kysten er eksponeret for 50 års bølgehændelser i størrelsesordenen 4 m (signifikant bølgehøjde) og variationen af middel og max bølgehøjder langs kysten er etableret for hele strækningen. Ligeledes er ekstremstatistikker med returperioder på 2, 10, 20 og 50 år etableret langs kysten.
  - Korrelationer mellem bølgehøjde, bølgeretning og bølgeperiode er etableret i form af diagrammer og korrelationsanalyser for bølgeparametre for hele kystens længde.
- **Langstransport:**
  - Langstransporten er beregnet og korrigeret for manglende sand i profilet, kystnære konstruktioner og transport forårsaget af regionale strømninger udenfor brydningszonen for 21 punkter dækkende alle fodringsområderne langs kysten.
  - Sandbudget og erosionsrater er bestemt for alle fodringsområder og analyserne er sammenholdt med tendenser fra historiske data af kysttilbagerykninger.
  - Langstransport, sandbudget og erosionsrater bestemt for sandfodrede profiler - med fodringssand med en anelse højere mediankorndiameter og med sandet distribueret i den indre del af profilet - 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 modgå den kroniske erosion.

- **Akut erosion af sand:**
  - 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 skræntfodsbeskyttelsen.
  - For en 50-årshændelse svarende til den mest ekstreme hændelse vest for Gilleleje og med en varighed af stormen på 12 timer eroderes mellem 0,9-1,8 m i højden foran skråningsbeskyttelsen afhængig af placering.
  - En stormvarighed på kun 6 timer giver omkring 0,5 m mindre erosionsdybder sammenlignet med erosionsdybder for en stormvarighed på 12 timer.
  - Erosionen 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:
  - 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 ralstrand have en højde på minimum +1,2m over dagligt vande for at beskytte mod akut erosion svarende til en sandstrand med en minimumshøjde på +2,0m over dagligt vande.

## 2.5 Kystteknisk vurdering

### 2.5.1 Erosionspres

Langs Nordkysten er en stor del af stranden gennem årene rykket betydeligt tilbage med undtagelse af kysten vest for Gilleleje Havn, Hornbæk Havn og Helsingør Havn og kysten øst for Hundested Havn, se Figur 2.3. Denne erosionstendens vurderes at fortsætte i fremtiden med øget hastighed bl.a. på grund af klimaændringer og manglende sand og ral i kystprofilet.

Nordkysten er udsat for et stort erosionspres som følge af kronisk og akut erosion. Kronisk erosion er den løbende erosion, som skyldes ubalance i sedimentbudgettet for langtransporten langs kysten. Akut erosion er delvis reversibel erosion af forstranden, hvor sandet transporteres udefter i kystprofilet, som sker under stormhændelser.

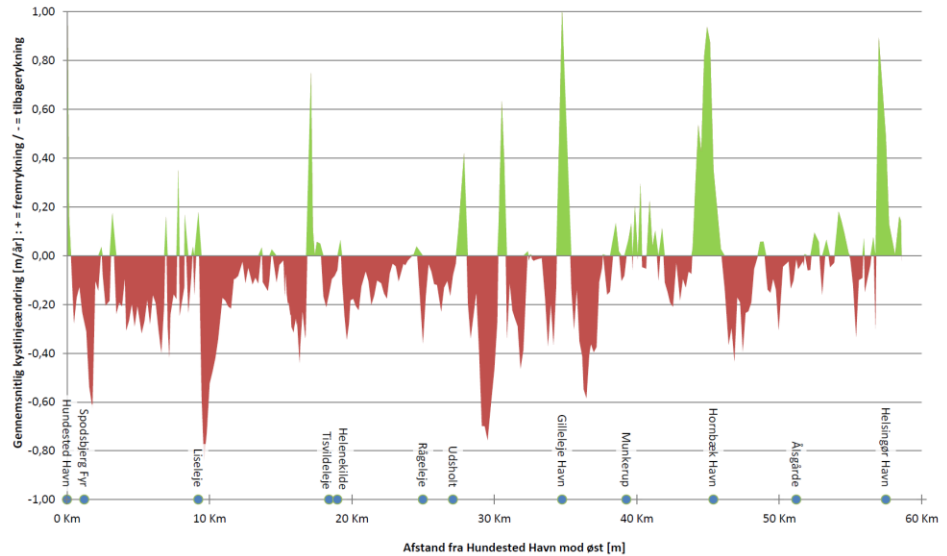
### 2.5.2 Kronisk erosion

Der er i dag generelt mangel på sand og ral langs Nordkysten som følge af, at transporten af sand og ral langs kysten 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 dels den intensive erosionsbeskyttelse med hårde konstruktioner og dels, at havnene udgør barrierer for transporten langs Nordkysten.

Den omfattende hårde kystbeskyttelse langs Nordkysten i form af skræntfodsbeskyttelser, høfder og bølgebrydere har medført, at tilførslen af sand og ral til kysten fra de eroderende skrænter med tiden er reduceret betydeligt. I takt med at den løbende udbygning af skråningsbeskyttelserne har stabiliseret skråningerne, er der lange strækninger, hvor stranden er blevet smallere, helt forsvundet eller afløst af sten/ral-strand. Vanddybderne foran den eksisterende hårde kystbeskyttelse er herved gradvist øget.



### Kystlinjeændring mellem år 1897 og 2003 på Nordkysten



Figur 2.3 Historisk kystlinjeudvikling (m/år) mellem Hundested og Helsingør i perioden 1897 og 2003. Grøn er kystfremrykning og rød er kysttilbagerykning (erosion). Kilde: Kabuth, A.K., Kroon, A., Pedersen, J.T., 2014. Figuren viser, at kysten generelt rykker tilbage (rød) primært på nær vest for havnene (grøn).

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 kystprofilen, dvs. fra stranden ud til en vanddybde på ca. 5 m. Dette resulterer i, at dybderne ud for kysten gradvist bliver større og større.

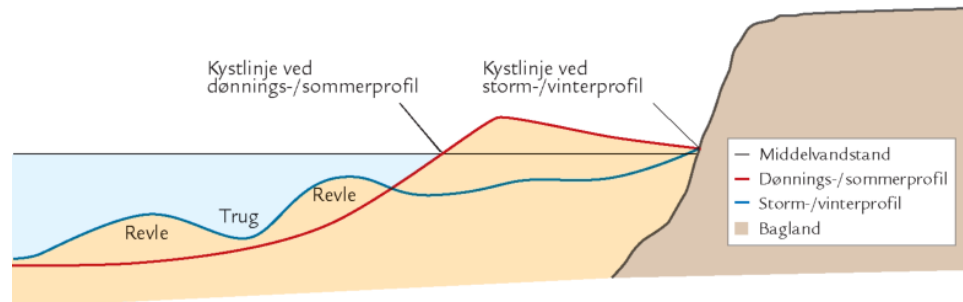
Figur 2.4 Stejl og høj skråning og lav skråningsbeskyttelse ved Salgårdshøj, hvor stranden er forsvundet foran skråningsbeskyttelsen.



### 2.5.3 Akut erosion

Nordkysten er også udsat for stort erosionspres som følge af akut erosion i forbindelse med storme, hvor der er kraftig bølgepåvirkning og højvande. I disse situationer eroderer den øverste del af kystprofilen, hvorved stranden bliver lavere og skrænterne rykker tilbage. Det eroderede materiale føres dels længere ud i kystprofilen og dels langs kysten, se Figur 2.5. Størstedelen af det eroderede sand og ral kommer ind på stranden igen i perioden efter stormfloden.

Figur 2.5 Principskitse af akut erosion



Stormen Bodil 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 skråningerne bagved, se Figur 2.6. 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 2.6 Havstokken ved Udsholt, Gribskov Kommune, under stormen Bodil 06.12.2013



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

#### **2.5.4 Forstærkning af eksisterende hård kystbeskyttelse**

Der er mange steder langs Nordkysten gennem årene bygget hård kystbeskyttelse i form af høfder, bølgebrydere, rev og skråningsbeskyttelser. En del af den hårde kystbeskyttelse blev beskadiget under stormen Bodil 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 nye storme, hverken i dag eller fremover, da vanddybden foran kystbeskyttelses anlæggene er øget og vil fortsætte med at øges fremover. Derudover er mange af de eksisterende anlæg ikke høje nok som følge af den forøgede vanddybde foran.

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 kystbeskyttelses anlæggene på en 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.

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

Det generelle billede er, at kysterrosionen fortsætter ude i kystprofilet på trods af den hårde kystbeskyttelse, hvilket langsomt forværrer situationen, efterhånden som vanddybden øges. Herved bliver bølgerne, der kan nå stranden og kystbeskyttelseskonstruktionerne 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 kan konkluderes, at det omfattende underskud af sand og ral på Nordkysten ikke kan afhjælpes med hård kystbeskyttelse.**

Det er teknisk muligt af forstærke den eksisterende kystbeskyttelse ved at udbygge den hårde kystbeskyttelse 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 kystprofilet vil fortsætte. Derfor er det ikke tilrådeligt at fortsætte denne praksis.

#### **Det konkluderes, at det omfattende underskud af sand og ral på Nordkysten kræver strandfodring (sand og ral) fremover for at kunne skabe en langsigtet og tilstrækkelig beskyttelse af Nordkysten med en fastholdt kystlinje.**



## 2.6 Anlægsoverslag

Det samlede anlægsoverslag for initialstrandfodringen er på i størrelsesorden 135 mio. kr. plus moms. Det samlede anlægsoverslag for vedligeholdelsesfodringerne er på i størrelsesorden 42 mio. kr. plus moms cirka hvert 5. år.

Det skal bemærkes, at anlægsoverslagene er uden usikkerhed og eksklusiv moms samt øvrige elementer som f.eks. mulige nødvendige tiltag i forbindelse med udløb og potentiel forøgelse af oprensning af havneindsejlinger mv.

## 2.7 Udførelsestidsplan

Det samlede strandfodringsprojekt kan være udført inden for 6 måneder efter bygherrens indgåelse af entreprisekontrakt.

### *Udbud af strandfodring*

I entreprenørudbuddet anbefales det at fastsætte et minimum af begrænsninger for udførelsen, ligesom det skal være op til den bydende selv at fastlægge dels udførelsessekvensen, dels antallet af fartøjer og deres lasteevne.

Det anbefales, at der er krav om successiv færdiggørelse af fodringsområderne, før flytning til det efterfølgende fodringsområde.

Ligeledes anbefales det, at entreprenøren selv skal planlægge den samlede udførelse af fodringerne inden for en periode på 6 måneder under overholdelse af de restriktioner, der er knyttet til såvel indvinding af materialer som udførelse af strandfodringen.

## 3 Kystteknisk grundlag

### 3.1 Forundersøgelser

#### 3.1.1 Topografisk opmåling

NIRAS har den 9. oktober 2017 gennemført topografiske survey med flybåren laserscanning og simultan lodfotografering af kyststrækningen mellem Helsingør og Hundested. Opmålingen er beskrevet mere detaljeret i Topografisk Survey Rapport, [4].

Det topografiske survey dækker kystkonstruktioner og strand samt et bælte på mindst 50 meter bag kystlinjen.

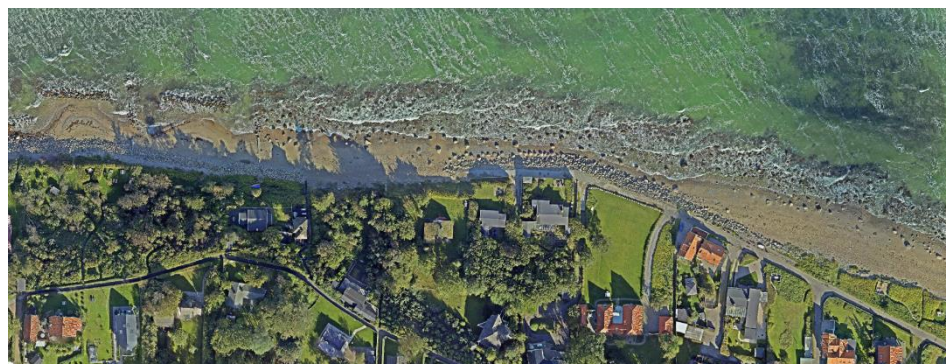
Strækningen er overfløjet to gange for at sikre den bedst mulige beskrivelse af kyststrækningen med hensyn til både punktsky og billeder.

Resultatet er en overflademodel også benævnt digital surface model (DSM) med en cellestørrelse på 40x40 cm.

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

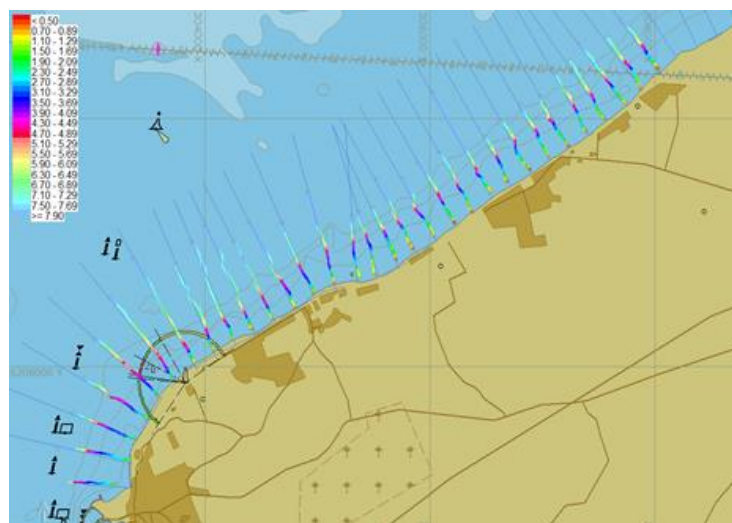
DHI har i efteråret 2017 foretaget opmåling af 286 linjer vinkelret på kysten med 200 meters afstand på strækningen mellem Hundested og Helsingør, samt 5 kystparallelle linjer med en indbyrdes afstand på 50-100 meter, se Figur 3.4 og [5]. Opmålingerne er foretaget fra et opmålingsfartøj udstyret med præcisions ekkolod, som dels måler dybden og dels sandlagets tykkelse. Kystprofilerne er opmålt fra ca. 0,8 meters dybde til ca. 8 meters dybde. De kystparallelle linjer er opmålt inden for 8 m kurven.

Opmålingen er udført med henblik på at opnå detaljeret data omkring kyststrækningens bathymetri, samt at kortlægge tykkelsen af sandaflejringerne på strækningen.

De færdige kombinerede kystprofiler giver mulighed for at beskrive og analysere kystmorfologien på den undersøgte kyststrækning, se Figur 3.2 - Figur 3.4.

Figur 3.2: Survey-området med opmålte kystprofiler mellem Hundested og Asserbo Plantage.

De sorte spor viser de faktisk sejlede linjer. Den røde linjer (i vandet) viser de planlagte sejllinjer.



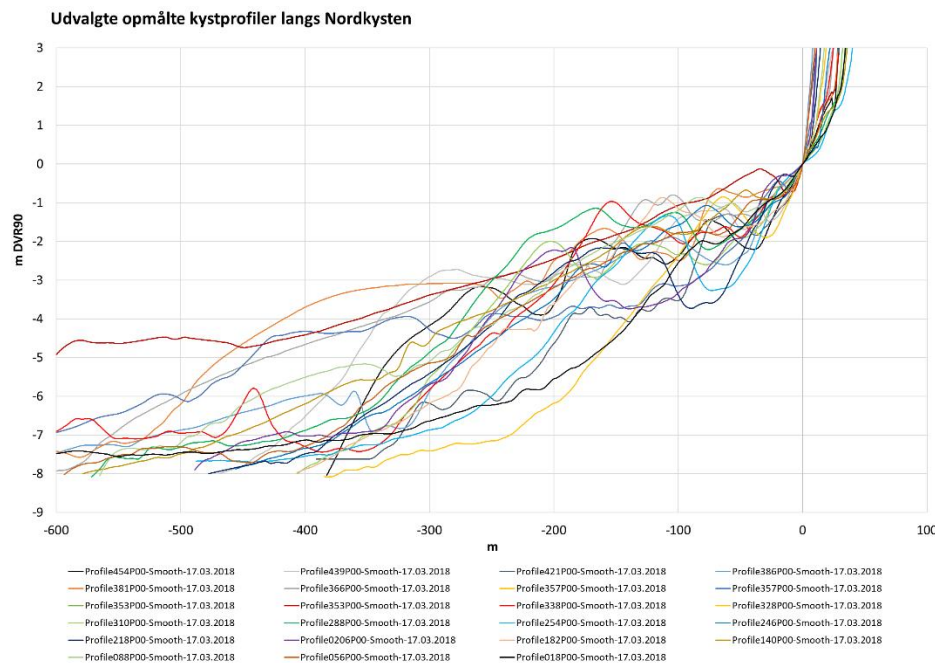
Figur 3.3 Kystprofiler med farveangivelse af dybden



Figur 3.4 viser lokalisering (øverst) og form (nederst) af udvalgte kombinerede kystprofiler langs hele Nordkysten sat op med samme placering af 0,0m DVR90.

Et generelt fladere kystprofil findes på strækningen fra Hundested Havn til Tisvilde Hegn, samt ved Gilleleje, Munkeup og Dronningmølle. Et generelt stejlere kystprofil findes på strækningen mellem Tisvilde og Holløse Strand, Vejby Strand, Rågeleje, Udsholt Strand og Smidstrup Strand. Ligeledes findes et stejlere kystprofil ved Nakkehoved og på strækningen fra Hornbæk til Helsingør.

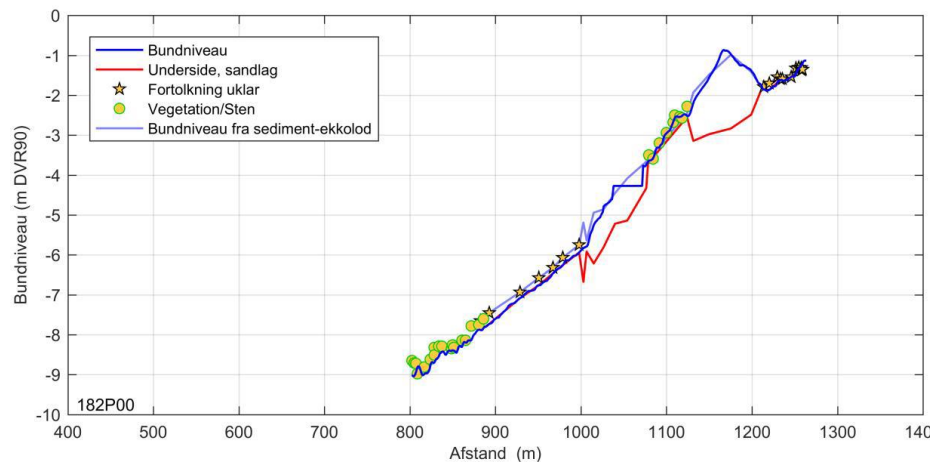
Figur 3.4: Udvalgte kystprofiler langs hele Nordkysten præsenteret med samme 0 m DVR90 kontur.



Dataene fra sediment-ekkoloddet 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.

Figur 3.5: Kystprofil 182. Den mørkeblå kurve viser havbundkurven opmålt med Navisound ekkolod, mens den lyse blå kurve viser havbundskurven baseret på tolkning af seismisk data. Den røde kurve markerer grænsen mellem sandaflejringer og underliggende havbund.



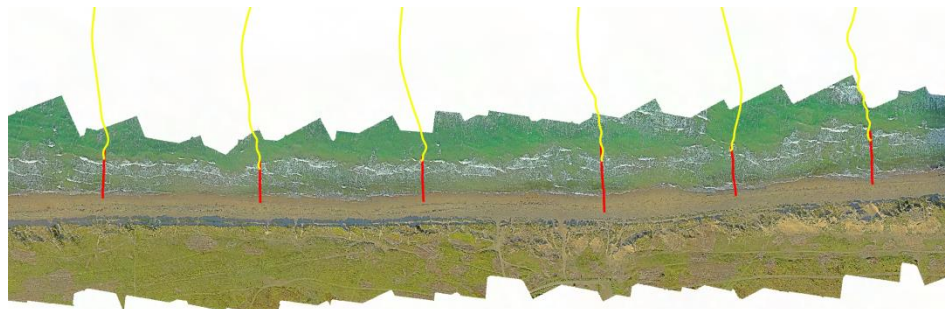
Opmålingen er beskrevet mere detaljeret i rapport vedrørende Bathymetrisk opmåling og bestemmelse af sandlagstykkelse, [5].

### 3.1.3 Bathymetrisk opmåling på lavt vand

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

GPS-opmålingen er udført i perioden fra 6. november til 28. november efter stormen Ingolf den 29. oktober 2017.

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



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 profillinjerne.

Opmålingen er beskrevet mere detaljeret i rapport vedrørende Bathymetrisk survey på lavt vand, [6].

Opmålingen af stranden med fly og med dykker er foretaget henholdsvis før og efter stormen Ingolf 28.10.2017, se også Figur 3.65.



### 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 borer 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, [7].

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

De geologiske forhold er beskrevet ud fra karteringskort.

Figur 3.7: Karteringskort for Nordkysten 1:200.000.



Postglaciale lag	Senglaciale lag	Glaciale lag
FG Ferskvandsgrus	TG Ferskvandsgrus	DG Smeltevandsgrus
FS Ferskvandssand	TS Ferskvandssand	DS Smeltevandssand
FI Ferskvandssilt	TI Ferskvandssilt	DI Smeltevandssilt
FL Ferskvandsler	TL Ferskvandsler	DL Smeltevandsler
FP Ferskvandsgytje	TT Ferskvandstøv	DV Vekslende tynde smeltevandslag
FT Ferskvandstøv	TV Vekslende tynde ferskvandslag	MG Morænegrus
FV Vekslende tynde ferskvandslag	YG Saltvandsgrus	MS Morænesand
FK Kilde-, mose- og søkalk	YS Saltvandssand	MI Morænesilt
FJ Okker og myremalm	YL Saltvandsler	ML Moræneler
FHG Deltagrus	YP Saltvandsgytje	MV Vekslende tynde morænelag
FHS Deltasand		KMG Kalkmorænegrus
FHL Deltaler	Marginal glaciale lag	KML Kalkmoræneler
HG Saltvandsgrus	ZG Issøgrus	KMS Kalkmorænesand
HS Saltvandssand	ZS Issesand	
HI Saltvandssilt	ZL Issøler	
HL Saltvandsler	ZV Vekslende lag af issesedimenter	
HP Saltvandsgytje		
HT Saltvandstøv		
HV Vekslende tynde saltvandslag, marsk		
HSG Saltvands skalgrus		
EK Klitsand		
ES Flyvesand		

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, saltvandsgrus og saltvandsgrus. Der er på strækningen fundet en stor strandvoldsslette dækket med flyvesand.

Fra Tisvildeleje til Rågeleje er det morænelandskabet der præger, 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 senglaciale område præget af moræneler og smeltevandsler, 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 smeltevandsgrus, samt en større strandvoldsslette øst for Hornbæk med flyvesand.

#### 3.1.4.2 Eroderet sediment volumen

De 58 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.

Det samlede eroderede volumen beregnes herefter ud fra geometrien af skråningerne og den beregnede historiske kysttilbagerykningshastighed.

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

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

Det estimerede sedimentvolumen, som frigives fra skrænterne til kysten, er regnet ud fra: udstrækning,  $L$  x højde,  $H$  x gennemsnitlig årlig erosionshastighed,  $E$  x indhold af sand, grus, ral og sten,  $S$  for 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 skråningerne langs Nordkysten giver et samlet tilskud af sand, grus, ral og sten på 100.000 m<sup>3</sup>/år.

Ler og silt antages at forsvinde ud på dybt vand.

De geotekniske undersøgelser er beskrevet mere detaljeret i [7].

### 3.1.5 Sediment

#### 3.1.5.1 Sedimentprøver

Under feltundersøgelserne er der indsamlet bundprøver på havbunden og på stranden langs fodringsstrækningerne beskrevet i skitseprojektet, [8].

Sedimentprøverne opsamlet under vandet er analyseret og beskrevet i rapport udarbejdet af DHI, [9] og sedimentprøverne på stranden er analyseret og beskrevet i rapport udarbejdet af NIRAS, [10].

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 til 3 m) og en på dybere vand (5 m).

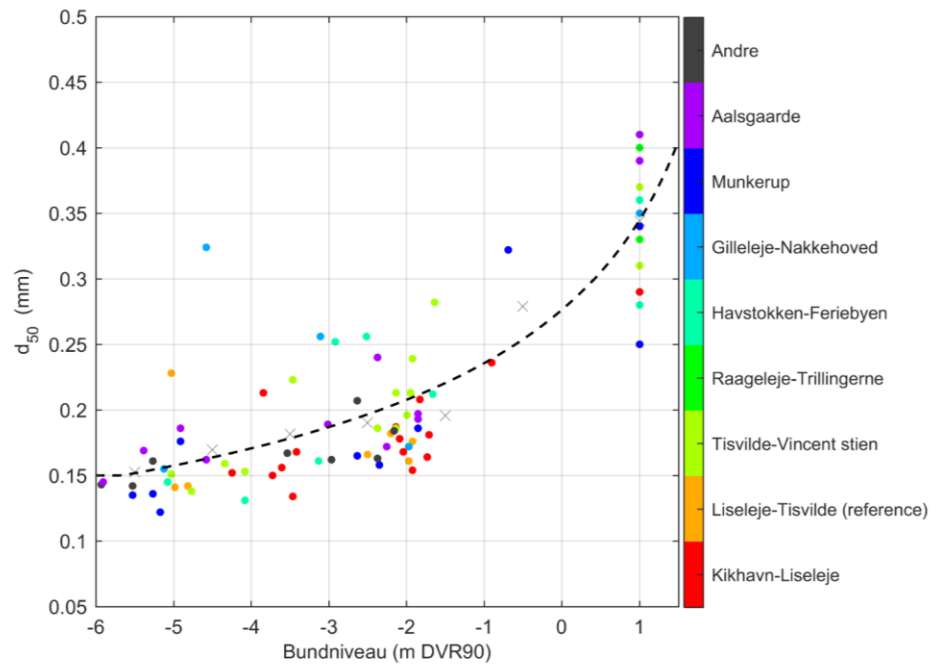
Der er udtaget prøver af overfladesedimentet på stranden langs kysten mellem Hundested og Helsingør med henblik på bestemmelse af kornstørrelsesfordelingen. Der er i alt taget 28 sedimentprøver langs fodringsstrækninger.

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.

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  $d_{50}$  på større vanddybde og større  $d_{50}$  på lavere vanddybde og på stranden.

Analyserne viser, at det mobile bundmateriale på havbunden udenfor 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 middeldørrelsen  $d_{50}$  og prøvetagningsdybden for alle indsamlede sedimentprøver



I havstokken og på strandene varierer materialet fra mellem-sand over groft-sand og grus til ral til sten. For sandfraktionen af strandsandet er gennemsnittet af middeldørrelsen for samtlige prøver  $d_{50} = 0,35$  mm og uensformighedstallet, ( $U=d_{60}/d_{10}$   $1,5 < U < 3,0$ ) indikerer relativt velsorteret mellemkornet sand.

### 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. Nettotransporten af sand og ral på Nordkysten er mod nordøst på strækningen mellem Spodsbjerg og Gilbjerg Hoved, mod sydvest på strækningen mellem Spodsbjerg 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 hovedsagelig 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 hovedsagelig består af fint sand, og dels transporten i havstokken og på forstranden, som hovedsagelig består af mellemkornet sand.

Ved ovennævnte processer er der fremkommet en såkaldt udligningskyst, således at strækningen mellem klinten ved Hundested (Spodsbjerg) og Gilbjerg Hoved næsten er retlinet, mens kyststrækningen mellem Gilbjerg Hoved og Helsingør er lidt mindre udlignet. Naturtilstanden i dag er, at der pågår 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 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 17.10.2017 til 15.11.2017.

Stormen Ingolf ramte Nordkysten 28.10.2017 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 oprettet en stationering mellem Hundested Havn og Helsingør Nordhavn jf. Figur 3.9.

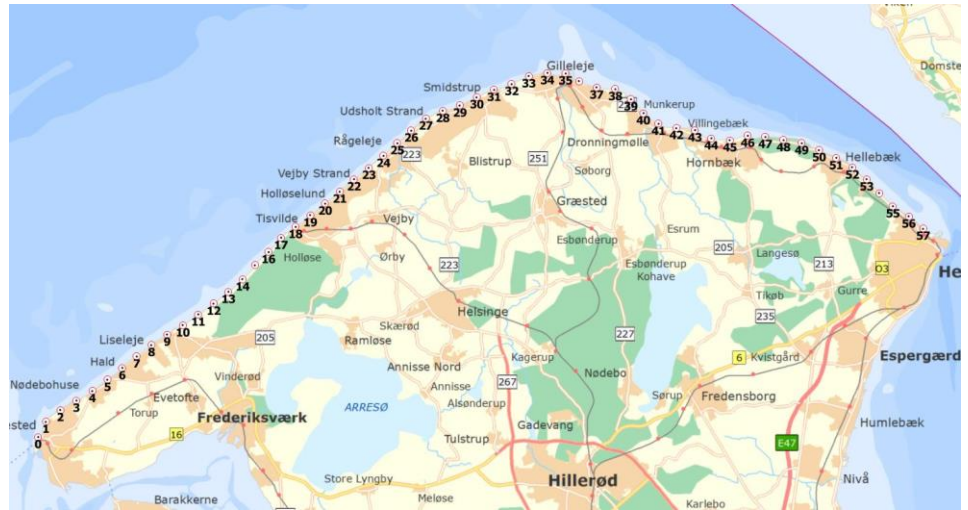
Under inspektionerne blev alle tilgængelige kystkonstruktioner visuelt vurderet i forhold til geometri, materiale og tilstand.

Stenstørrelser for alle typer konstruktioner (høfder, bølgebrydere og skråningsbeskyttelser) blev bestemt med mindre 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. Figur 3.10 viser udsnit af database med karakteristiske parametre for de registrerede kystkonstruktioner og stranden foran.

id	TypeKonstr	d50	d15	d85	Anlæg gr	Anlæg l	Kommentar	Topkote	Bundkote	St start	St end	Label	Length
	Skråningsbeskyttelse						1 række halvstore sten			26360	26370	1 række halvstore sten	17.7
	Skråningsbeskyttelse	50	140	39			Store sten. Rodet\nFaldet sammen\nFlest	3	1.1	26440	26450	Store sten. Rodet\nFaldet	18.6
	Skråningsbeskyttelse	50	160	35			Flest store	3.2	0.6	26450	26470	Flest store	18.8
	Skråningsbeskyttelse	40	90	43			Dårligt udført\nFaldet sammen	3	0.7	26480	26500	Dårligt udført\nFaldet sammen	22.9
	Skråningsbeskyttelse	50	160	30			Dårligt udført	3	0.5	26500	26530	Dårligt udført	29.6
	Skråningsbeskyttelse	40	120	26			Også gamle betonblokke	2.8	1.2	26530	26560	Også gamle betonblokke	31.4
	Skråningsbeskyttelse	50	95	23			Halvt op ad HV mur			26600	26620	Halvt op ad HV mur	28.0
	Højvandsmur				15		Beton kasse			27090	27100	Beton kasse	13.6
	Højvandsmur						Nyt beton			27100	27110	Nyt beton	18.8
	Bølgebryder	30	80				Bunke sten på stranden			28310	28350	Bunke sten på stranden	39.5
	Skråningsbeskyttelse	50					Ligger sten			28300	28290	Ligger sten	21.7
	Høfde	40	80				Faldet sammen			28350	28350	Faldet sammen	14.6
	Skråningsbeskyttelse	40	100	26			1 større i bunden	3.4	1.8	28310	28400	1 større i bunden	92.9
	Skråningsbeskyttelse	40	80	20			Kæmpe store i bunden	3.4	2.1	28420	28440	Kæmpe store i bunden	25.4
	Høfde						Gammel betonhøfde			28500	28500	Gammel betonhøfde	9.5
	Høfde						Gammel betonhøfde			28510	28510	Gammel betonhøfde	18.0
	Høfde						Gammel betonhøfde			28560	28560	Gammel betonhøfde	11.1
	Skråningsbeskyttelse	40	10	16				1.9	1.2	28520	28560	40/10 cm - 1/3.49	43.2
	Bølgebryder						1 stenrække			28510	28570	1 stenrække	53.4
	Højvandsmur						Jordvold / Bunke jord			28520	28630	Jordvold / Bunke jord	110.0
	Bølgebryder	130					Næsten neddykket	0.5		28660	28690	Næsten neddykket	21.1
	BB+Høfde	130					Næsten neddykket			28640	28660	Næsten neddykket	19.7
	Skråningsbeskyttelse	40	100	30				2.2	1.2	28560	28650	40/100 cm - 1/1.73	82.3
	Skråningsbeskyttelse	30	100	30				4.8	2.2	28650	28710	30/100 cm - 1/1.73	57.5
	Skråningsbeskyttelse	30	100	27			Kollapset	3.2	2	28710	28740	Kollapset	26.8
	Skråningsbeskyttelse	40	80	23				3.2	1.8	28800	28850	40/80 cm - 1/2.36	52.5
	Skråningsbeskyttelse	60	140					1		28830	28860	60/140 cm	29.0
	Skråningsbeskyttelse	30	90	30				4	1.8	28860	28920	30/90 cm - 1/1.73	60.9
	Skråningsbeskyttelse	40	90	20			Bedre/Pænt lagt op	4	0.8	28930	28980	Bedre/Pænt lagt op	44.9
	Skråningsbeskyttelse	40	90	36				4	1	28980	29110	40/90 cm - 1/1.38	127.0
	Skråningsbeskyttelse	40	90	25				3.4	1	29110	29130	40/90 cm - 1/2.14	24.2
	Skråningsbeskyttelse	155					1 række sten			29330	29340	1 række sten	14.2
	BB+Høfde	125					Nærmest helt neddykkede\n1 række			29350	29470	Nærmest helt neddykkede\n1 række	58.4
	Bølgebryder	60	120				Stenrev			29470	29490	Stenrev	20.7

Figur 3.10 Udsnit af database med karakteristiske parametre for de registrerede kystkonstruktioner og stranden foran

I det følgende vises en række foto fra kystinspektionerne, som dokumenterer kystens og kystbeskyttelsens aktuelle tilstand på udvalgte karakteristiske lokaliteter.



*Figur 3.11: Ubeskyttet strækning med aktiv skrænterosion, Spodsbjerg Øst (St. 1,4-1,9).*



*Figur 3.12: Kikhavn beskyttet med bølgebrydere og skråningsbeskyttelse (St. 1,9-3,3).*



*Figur 3.13: Lavtliggende bagland beskyttet med skråningsbeskyttelse og bølgebrydere ved Galgebjerg (St. 3,3-4,4).*



Figur 3.14: Aktiv skrænterosion over skråningsbeskyttelse ved Hald Strand (St. 4,4-6,8).



Figur 3.15: Skråntbeskyttelse ved Hyllingebjerg (St. 6,8-7,7).



Figur 3.16: Bølgebrydere og skråningsbeskyttelse ved Liseleje (St. 7,7-9,5).





*Figur 3.17: Kyststrækning med skråningsbeskyttelse og erosion bag bølgebrydere ved Vejby Strand (St. 17,4-22,8).*



*Figur 3.18: Rågeleje Strandvej beskyttet mod erosion af betonmur (St. 24,9-26,4).*



*Figur 3.19: Ubeskyttet strand ved Udsholt overvejende dækket med ral (St. 26.4-28.3).*



Figur 3.20: Smidstrup Strand beskyttet samt ubeskyttet ralstrand (St. 28,3-32,0).



Figur 3.21: Erosionskyst med aktiv skrænterosion ved Gilbjerg Hoved (St. 32,0-33,0).





*Figur 3.22: Gilleleje Strand beskyttet med skråningsbeskyttelse og bølgebrydere (St. 33,0-35,2).*



*Figur 3.23: Generelt ubeskyttet kyststrækning med aktiv skrænterosion ved Nakkehoved. I baggrunden ses bølgebryder udført i betonelementer ved Nakkehoved Fyr (St. 37,4-39,6).*



*Figur 3.24: Kyststrækning ved Munkerup delvist beskyttet samt delvist dækket af ral (St. 39,6-41,1).*



*Figur 3.25: Dronningmølle  
Strand med klitter  
(St. 41,1-42,2).*



*Figur 3.26: Beskyttet kyst med  
skråningsbeskyttelser og hølfer  
ved Villingebæk  
(St. 42,2-43,2).*



*Figur 3.27: Ubeskyttet  
aflejringskyst fra Horneby  
Strand mod øst til Hornbæk  
Strand (St. 43,2-45,9).*





*Figur 3.28: Ubeskyttet erosionskyst i den vestlige del af Hornbæk Plantage (St. 46,1-48,6). Bemærk erosionskant i strandfodringsmateriale efter stormen Ingolf 28.10.2017.*



*Figur 3.29: Kyststrækning ved Ålsgårde beskyttet med skråningsbeskyttelse, bølgebrydere og høfder (St. 49,5-50,5).*



*Figur 3.30: Kystbeskyttelse i form af høfder og skråningsbeskyttelser ved Ålsgårde (St. 50,5-53,2).*



*Figur 3.31: Kyststrækning præget af skråningsbeskyttelser og høfder ved Hellebæk (St. 53,2-54,2).*



*Figur 3.32: Højstrup Strand præget af usammenhængende skråningsbeskyttelser (St. 55,2-57,2).*





Figur 3.33: Marienlyst Strand præget af luvside aflejring vest for Helsingør Nordhavn (St. 57,2-57,8).



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 sand ligger foran.

### 3.1.7 Tilstandsvurdering uden strandfodring

#### 3.1.7.1 Indledning

NIRAS har udarbejdet tilstandsvurdering af eksisterende kystbeskyttelseskonstruktioner langs Nordkysten baseret på data indsamlet i forbindelse med kystinspektionerne, [11].

Tilstandsvurderingen er opdateret med resultaterne fra de numeriske modeller udarbejdet af DHI og er derfor anderledes end resultaterne præsenteret i [11].

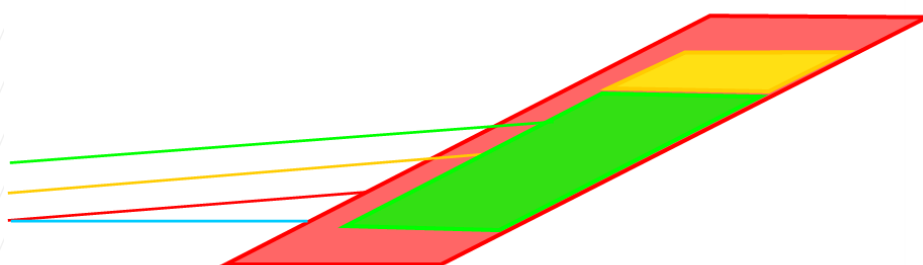
Indledningsvist er vurderet om kystbeskyttelseskonstruktionerne, med nuværende beskyttelsespraksis uden strandfodring, vil kunne modstå den dimensionsgivende hændelse med en returperiode på 50 år i dag, om 25 og 50 år.

Konstruktionerne vurderes desuden i forhold til, om de vil kunne opgraderes til det fastlagte beskyttelsesniveau ved forhøjelse, eller om konstruktionerne bør genopbygges fra bunden.

Tilstandsvurderingen visualiseres med følgende farveskala, se også Figur 3.34:

- Grøn - Vurderet at opfylde dimensioneringsforudsætningerne.
- Gul - Vurderet at opfylde dimensioneringsforudsætningerne efter forhøjelse.
- Rød - Vurderet at skulle genopbygges.
- Sort - Ikke vurderet

Figur 3.34  
Principskitse for  
tilstandsvurdering af  
skråningsbeskyttelse  
som funktion af  
højden af stranden  
foran



### 3.1.7.2 Dimensioneringskriterier

Kystbeskyttelsen langs Nordkysten foreslås dimensioneret og vurderet ud fra følgende dimensioneringskriterier for skråningsbeskyttelser, bølgebrydere og høfder, se Tabel 3.2.

Tabel 3.2: Anbefalede dimensioneringskriterier for hård kystbeskyttelse på Nordkysten

Dimensioneringskridt	Hård kystbeskyttelse
Levetid, L	50 år
Havspejlsscenario	Middel
Acceptabel risiko for skader, R, indenfor levetiden	64%
Middeltidshændelse, MT	50 år

Den anbefalede standard af skråningsbeskyttelser, bølgebrydere og høfder på Nordkysten er, at de skal kunne modstå en middeltidshændelse på 50 år over en levetid på 50 år uden betydelige skader.

Tilstandsvurderingen af eksisterende skråningsbeskyttelser, bølgebrydere og høfder er udarbejdet i forhold til en middeltidshændelse 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

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  $S_d \leq 3$ , [12]. 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, [13].

Stabiliteten af bølgebrydere, høfder og skråningsbeskyttelser afhænger primært af størrelsen af dækstenene, opbygningen af foden, lagstrukturen 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 1-2 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 en til to gange den nominelle stenstørrelse  $((1-2) \cdot D_{n50})$ .

Omregning mellem den nominelle stenstørrelse ( $D_n$ ) og den naturlige afrundet stenstørrelse ( $D$ ) foretages som (3.10) i [12]:

$$D_n = 0.84D$$

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

For at sikre imod udvaskning af filterstenene gennem dækstenene anvendes en gradering, som opfylder nedenstående filterlagskriterier af Thompson og Shuttler (1976) samt af Terzaghi [14].

$$\frac{d_{15,a}}{d_{85,f}} \leq 4 \quad , \quad \frac{d_{50,a}}{d_{50,f}} \leq 7 \quad , \quad \frac{d_{15,a}}{d_{15,f}} \leq 7$$

og

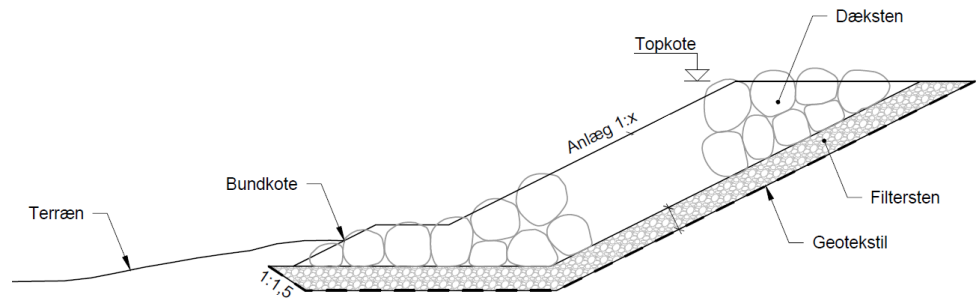
$$\frac{d_{15,a}}{d_{85,f}} \leq 4 - 5 \quad , \quad \frac{d_{15,a}}{d_{15,f}} \leq 20 - 25$$

Hvor d 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 med en bredde svarende til 3 dæksten i et eller to lag og med filterlag og geotekstil nedenunder, se Figur 3.35. 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.

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

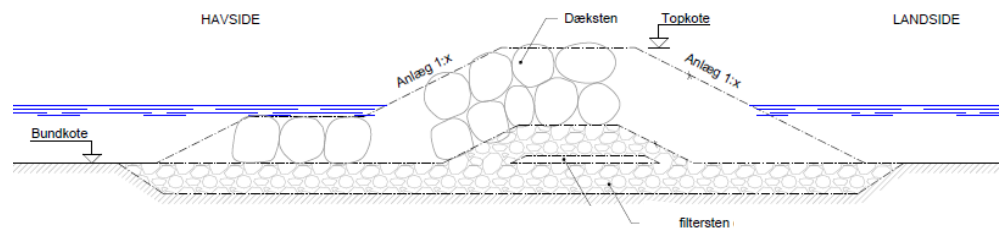
Figur 3.35: Principskitse af skråningsbeskyttelse



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 3.36. 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, der som er minimum 0,4 m tyk.

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

Figur 3.36: 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.

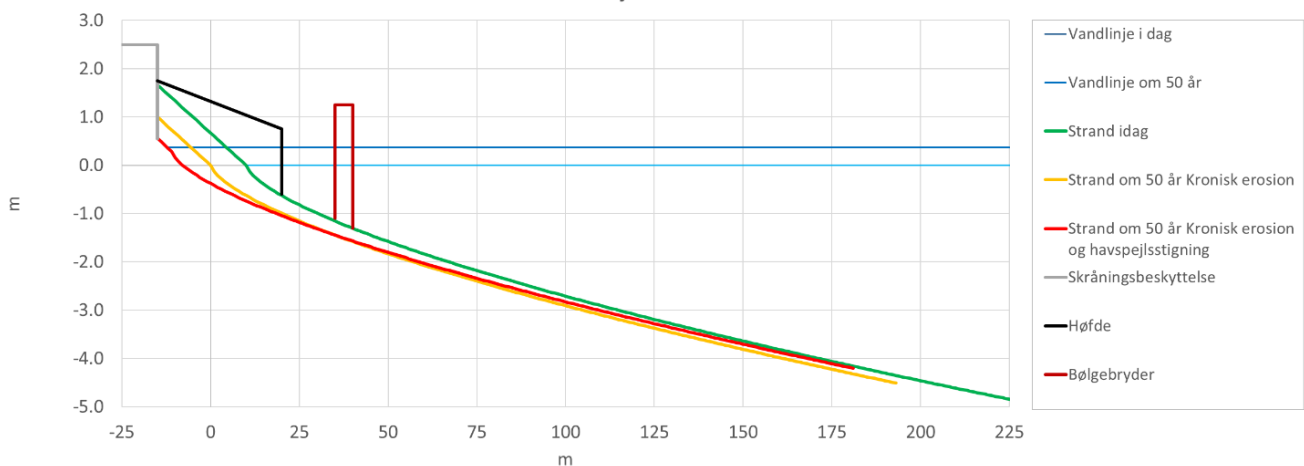
For skråningsbeskyttelserne er strandens højde aflæst fra den digitale højdemodel.

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, se Figur 3.37.

Principskitse af ændring af kystprofil  
Kronisk erosion og havspejlsstigning (Bruuns Regel)  
Vest for Gilleleje



Figur 3.37: Ligevægtskystprofil benyttes til at beregne strandens højde foran kystbeskyttelseskonstruktioner som funktion af kronisk erosion og herefter som funktion af havspejlsstigning.

Dernæst korrigeres strandens højde foran konstruktionerne som funktion af havspejlsstigningens ændring af kystprofilen ved hjælp af Bruuns Regel.

Figur 3.37 viser et eksempel på beregning af det fremtidige kystprofil som følge af kronisk erosion og havspejlsstigning. Figuren viser princippet for, hvorledes kystprofilen forventes at udvikle sig foran typiske skråningsbeskyttelser, høfder og bølgebrydere.

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 [3].

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.

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 hensyn til, om konstruktionerne er beliggende på den vestlige eller østlige del af Nordkysten.

De dimensionsgivende parametrene bestemmes under nuværende forhold, om 25 år (år 2045) og om 50 år (år 2070).

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

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

Til vurdering af tilstanden af eksisterende skråningsbeskyttelse er der beregnet nødvendige stenstørrelse og frihøjder for 12 forskellige vanddybder, 4 forsidehældninger og for bølgeklimate for den vestlige og den østlige del af Nordkysten. Nødvendig topkote af skråningsbeskyttelserne findes som summen af vandstanden foran konstruktionen og frihøjden. Frihøjden er konstruktionens højde over stormvandstanden foran.

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

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
<b>0,63</b> [m]	24	0,42	21	0,42	19	0,42	18	0,42
<b>0,98</b> [m]	42	0,85	38	0,85	34	0,85	32	0,85
<b>1,33</b> [m]	62	1,32	55	1,32	50	1,32	47	1,32
<b>1,63</b> [m]	79	1,76	71	1,76	65	1,76	60	1,76
<b>1,91</b> [m]	96	2,18	85	2,18	78	2,18	72	2,18
<b>2,17</b> [m]	110	2,56	98	2,56	89	2,56	83	2,56
<b>2,43</b> [m]	122	2,90	109	2,90	100	2,90	92	2,90
<b>2,60</b> [m]	130	3,11	116	3,11	106	3,11	96	3,11
<b>2,90</b> [m]	140	3,38	124	3,38	111	3,38	101	3,38
<b>3,39</b> [m]	150	3,66	130	3,66	116	3,66	106	3,66
<b>3,89</b> [m]	159	3,98	138	3,98	123	3,98	112	3,98
<b>4,38</b> [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	
		$D_{50}$ cm	$R_c$ m	$D_{50}$ cm	$R_c$ m	$D_{50}$ cm	$R_c$ m	$D_{50}$ cm	$R_c$ m
<b>0,63</b>	[m]	23	0,39	20	0,39	18	0,39	17	0,39
<b>0,98</b>	[m]	40	0,80	36	0,80	33	0,80	31	0,80
<b>1,33</b>	[m]	59	1,25	52	1,25	48	1,25	45	1,25
<b>1,63</b>	[m]	79	1,74	70	1,74	64	1,74	60	1,74
<b>1,91</b>	[m]	94	2,14	84	2,14	77	2,14	71	2,14
<b>2,17</b>	[m]	109	2,54	97	2,54	89	2,54	83	2,54
<b>2,43</b>	[m]	120	2,84	107	2,84	98	2,84	91	2,84
<b>2,60</b>	[m]	127	3,03	113	3,03	104	3,03	95	3,03
<b>2,90</b>	[m]	136	3,29	121	3,29	109	3,29	99	3,29
<b>3,39</b>	[m]	145	3,54	127	3,54	114	3,54	104	3,54
<b>3,89</b>	[m]	155	3,82	134	3,82	120	3,82	110	3,82
<b>4,38</b>	[m]	163	4,06	141	4,06	126	4,06	115	4,06

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

Ligeledes reduceres frihøjden for skråningsbeskyttelserne ved faldende vanddybde.

Bølgebrydernes og høfdernes funktion er ikke at beskytte mod bølgeoverskyl, men at stabilisere sand og ral i luvzonen og ved tomboloen landværts for bølgebryderne og således opbygge en bredere strand. Dette vil reducere bølgeenergien og beskytte bagstranden og baglandet, samt eventuel skråningsbeskyttelse.

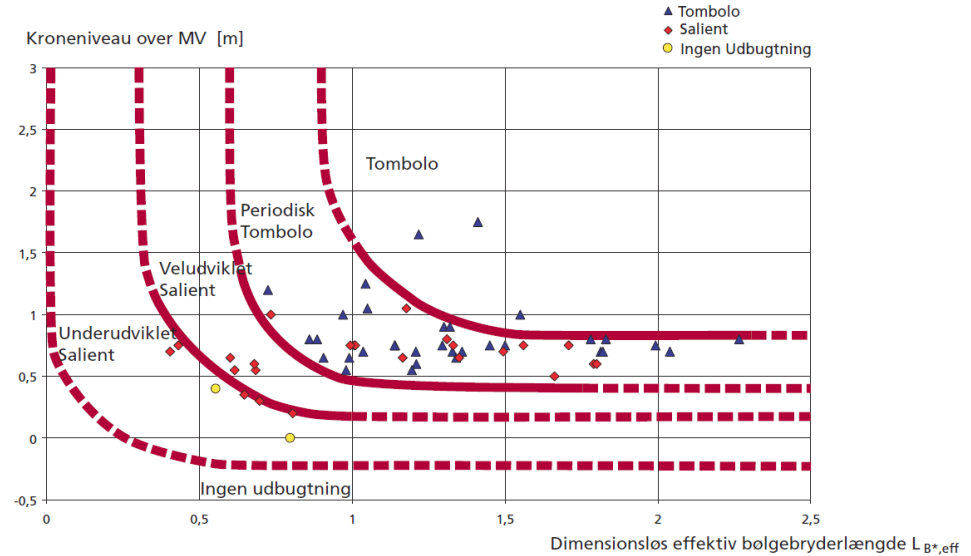
Topkoten for bølgebryderne vurderes ud fra bølgeklimaet og vandstandsforholdene. Længden af bølgebryderne vurderes ud fra det dimensionsløse bølgebryderindeks ( $L_b^*$ ), som er bølgebryderens længde ( $L_B$ ) ift. bølgebryderens afstand fra kystlinjen ( $x$ ):

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

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

Figur 3.38 er anvendt som udgangspunkt for tilstandsvurderingen og sammenlignet med 59 eksisterende bølgebrydere mellem Kikhavn og Ålsgårde, [15].

Figur 3.38: Morfologisk respons-diagram baseret på 59 bølgebrydere på strækningen fra Kikhavn til Ålsgårde. De enkelte konstruktioners kronekote (topkote) i forhold til middelvandstanden er afsat som funktion af det dimensionsløse bølgebryderindeks,  $L_B^*$  (bølgebryderens længde divideret med bølgebryderens afstand til kysten), [15].



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

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

Ved tilstandsvurderingen for år 2045 og 2070 tillægges forventet relative havspejlsstigning til topkoten. Anbefalede topkoter er vist i Tabel 3.5.

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

Tabel 3.5: Anbefalet topkote af hofdere og bølgebrydere.

Bølgebrydere og hofdere		2020	2045	2070
<b>Dimensionerende topkote</b>	<b>[cm DVR90]</b>	+125	+137	+154

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

Bølgebrydere og hofdere forventes at stå under vand ved dimensionsgivende stormhændelser. Det er derfor vigtigt, at dækstenene på bagsiden af konstruktionerne kan modstå bølgeoverskylling. 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 genombygges.

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.

Med mindre andet var synligt under inspektionen er det antaget, at de enkelte skråningsbeskyttelser er korrekt kystteknisk opbygget efter anbefalede standarder, se Figur 3.35.

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, betonthøfder 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. Grundejerne står selv for projektering, ansøgning om tilladelse og udførsel af ny eller ændring af hård kystbeskyttelse.



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

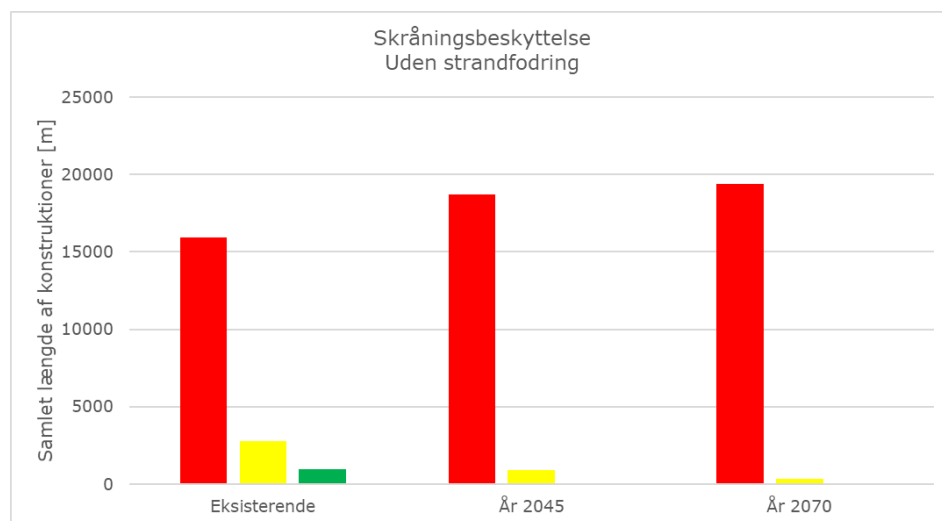
	Total længde	Længde med tilstandsvurdering
	[m]	[m]
Skråningsbeskyttelse	22.930	19.700
Højvandsmur	4.630	20
Bølgebryder	5.860	3.600
T-høfder	240	150
Høfder	4.060	3.100
<b>Total</b>	<b>38.330</b>	<b>26.570</b>

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

Allerede i år 2045 vil næsten alle skråningsbeskyttelser ikke opfylde dimensioneringskriterierne og vurderes uden strandfodring, at skulle genopbygges med større sten for at modstå den øgede bølgepåvirkning.

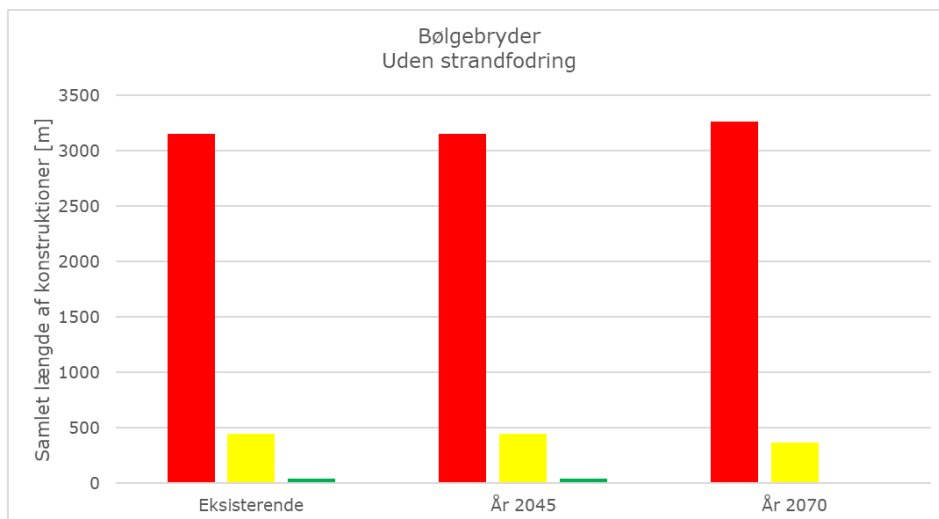
Figur 3.39 Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser, hvis der ikke udføres strandfodring.



I 2070 vurderes alle nuværende skråningsbeskyttelser at skulle genopbygges med større dæksten for at kunne opfylde designkriterierne.

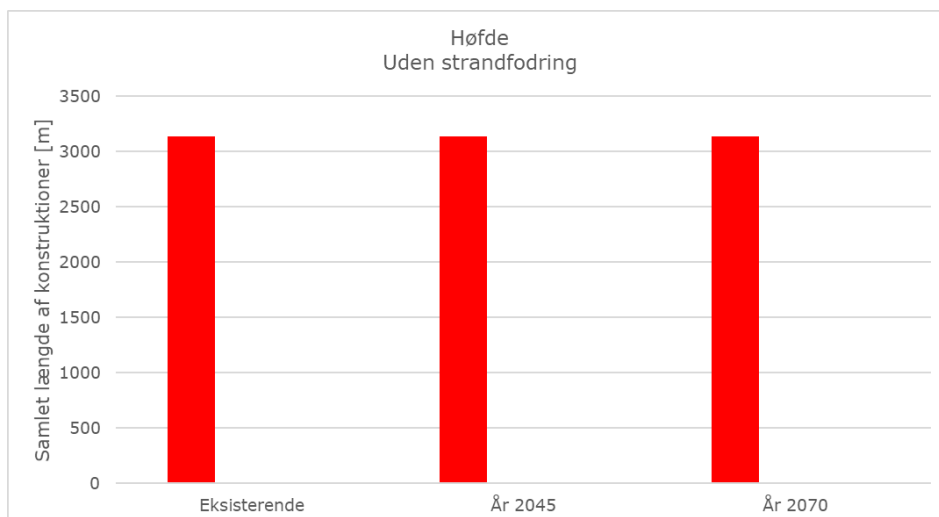
87 % af de vurderede bølgebrydere vurderes ikke at opfylde dimensioneringsforudsætningerne i dag, hvilket primært skyldes utilstrækkelige stenstørrelser, se Figur 3.40. Dette billede ændres kun minimalt frem mod 2070.

Figur 3.40 Tilstandsvurdering af bølgebrydere, hvis der ikke udføres strandfodring.



Samtlige vurderede høfder vurderes ikke at opfylde dimensioneringsforudsætningerne hverken i dag eller de næste 50 år, se Figur 3.41.

Figur 3.41 Tilstandsvurdering af høfder, hvis der ikke udføres strandfodring.



Eksisterende hård kystbeskyttelse langs Nordkysten er generelt hverken tilstrækkelig til at beskytte mod en stormflod med en returperiode på 50 år i dag eller om 50 år, hvilket er det anbefalede dimensioneringskriterie for hård kystbeskyttelse.

## 3.2 Kystteknisk modellering

I det følgende præsenteres det kysttekniske datagrundlag. Data og analyser er udviklet ved hjælp af numerisk modellering med DHI's software og omfatter:

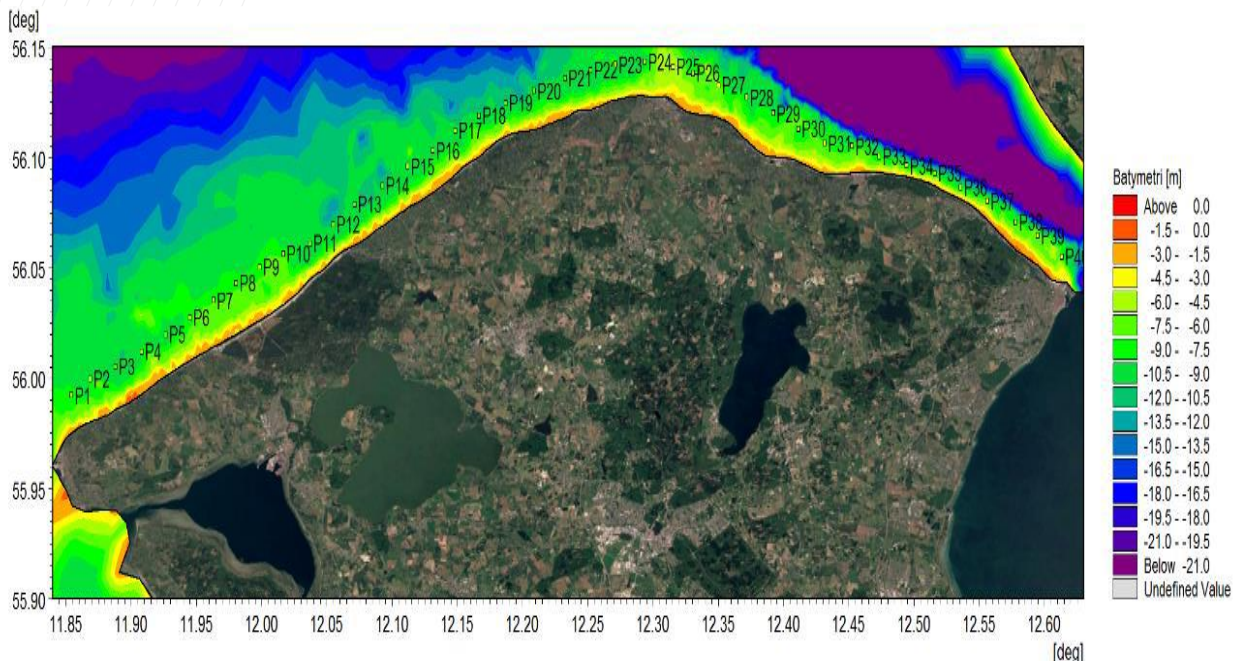
- **Meteomarine forhold.** Bølge- og vandstandsforhold langs kysten, herunder ekstremværdistatistikker for bølgehøjder og vandstande, samt korrelationer mellem parametrene.
- **Littoraltransport.** Langstransport og bestemmelse af sandbudget og kronisk erosion for de foreslåede fodringsstrækninger.
- **Akut erosion.** Akut erosion af sandstrand for 50 års hændelsen og stormen Bodil 06.12.2013 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, [3].

### 3.2.1 Bølger

Bølgeklimate langs Nordkysten er styrende for langstransporten langs kysten. For at kunne beskrive materialevandringen 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 3.42.



Figur 3.42 Analysepunkter til fastlæggelse af vandstand og bølgeklimate

Bølgeklimaet 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 2.1 SW numeriske bølgeberegningsmodel for en periode på 20 år, 1997-2016. For denne årrække råder DHI over vinddata fra meteorologiske modeller, hvormed det er muligt, med vinden som drivende kraft, at simulere bølgeforholdene time for time over det betragtede farvandsområde. Hermed er 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 sedimentbudget.

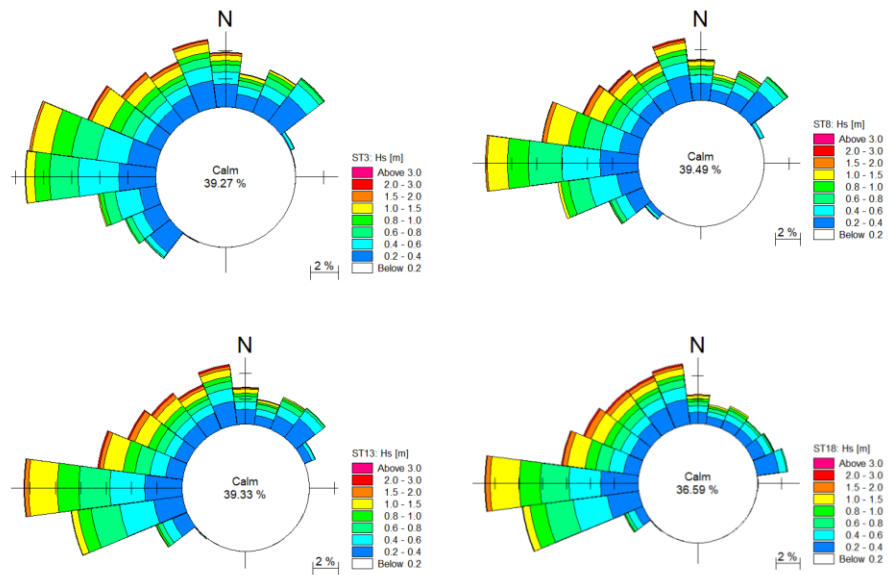
Følgende typer data er blevet genereret for de 40 punkter vist på Figur 3.42.

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

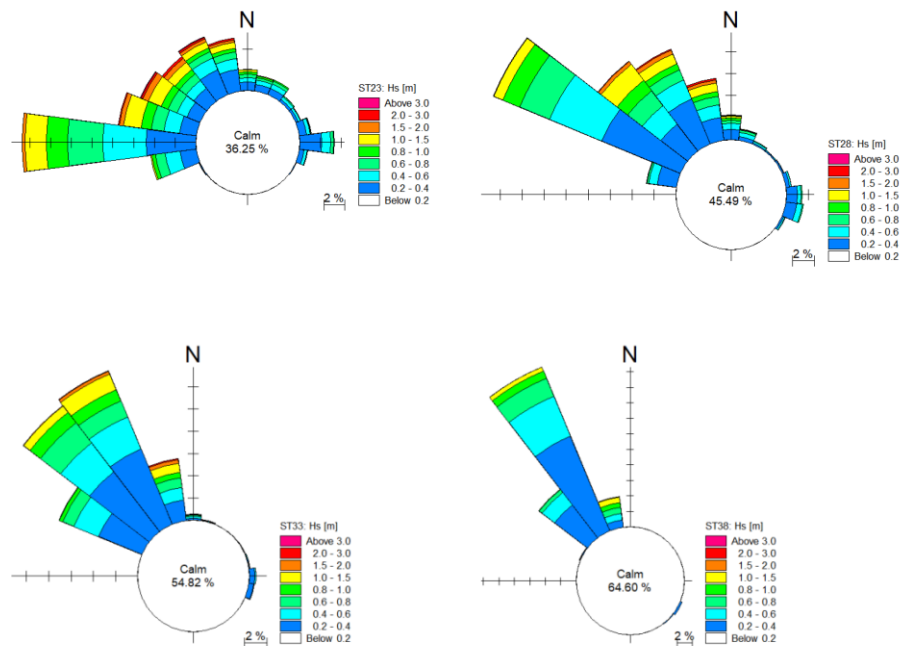
Eksempler på bølgeroser gældende for strækningen fra Hundested til Rågeleje er vist i Figur 3.43 for stationerne ST3, ST8, ST13 og ST18. Det ses, at de største bølger kommer fra NNV og N, men at den hyppigste bølgeretning er fra V. I Figur 3.44 er der vist eksempler på bølgeroser gældende for strækningen fra Gilleleje Vest til Helsingør (ST23, ST28, ST33 og ST38). Det ses, at bølgeretningen snævre sammen i et smallere bånd efterhånden, som man bevæger sig i retning mod øst samtidig med, at bølgerne bliver mindre.

Bølgeklimaet langs hele Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør er beskrevet nærmere i [3].

Figur 3.43  
Bølgeroser for ST3, ST8, ST13  
og ST18 beskrivende  
strækningen fra Hundested til  
Rågeleje.



Figur 3.44  
Bølgeroser for ST23, ST28,  
ST33 og ST38 beskrivende  
strækningen fra Gilleleje Vest til  
Helsingør.



Der er estimeret signifikante bølgehøjder, som forventes at blive overskredet for hver 2, 5, 10, 20 og 50 år baseret på modellerede bølgehøjder for perioden 2007-2016.

Tabel 3.7 til Tabel 3.10 angiver estimerede ekstrembølgehøjder samt deres spredning for de 40 definerede punkter fordelt langs med Nordkysten.



Tabel 3.7  
Ekstrembølgehøjder,  $H_s$  og tilhørende spredning,  $\sigma$  i ST1-ST10 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.

Punkt	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	ST8	ST9	ST10
Returperiode [år]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [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
Afskæringsniveau	1.6 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.7 m	1.8 m
Returperiode [år]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]
2	0.062	0.066	0.07	0.069	0.07	0.073	0.073	0.076	0.074	0.076
5	0.103	0.11	0.115	0.115	0.115	0.119	0.118	0.123	0.12	0.124
10	0.133	0.143	0.149	0.149	0.149	0.154	0.152	0.158	0.154	0.16
20	0.165	0.177	0.184	0.185	0.184	0.19	0.187	0.194	0.188	0.197
50	0.208	0.224	0.232	0.234	0.233	0.239	0.234	0.243	0.235	0.248

Tabel 3.8  
Ekstrembølgehøjder,  $H_s$  og tilhørende spredning,  $\sigma$  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]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [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
Afskæringsniveau	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m
Returperiode [år]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]
2	0.076	0.076	0.079	0.079	0.081	0.083	0.085	0.088	0.088	0.085
5	0.124	0.125	0.129	0.129	0.132	0.134	0.139	0.143	0.142	0.139
10	0.161	0.163	0.167	0.167	0.17	0.172	0.179	0.185	0.182	0.179
20	0.199	0.202	0.206	0.206	0.209	0.21	0.22	0.228	0.223	0.22
50	0.251	0.256	0.259	0.26	0.263	0.263	0.277	0.287	0.279	0.277

Tabel 3.9  
Ekstrembølgehøjder,  $H_s$  og tilhørende spredning,  $\sigma$  i ST21-ST30 for returperioder 2, 5, 10, 20 og 50 år.

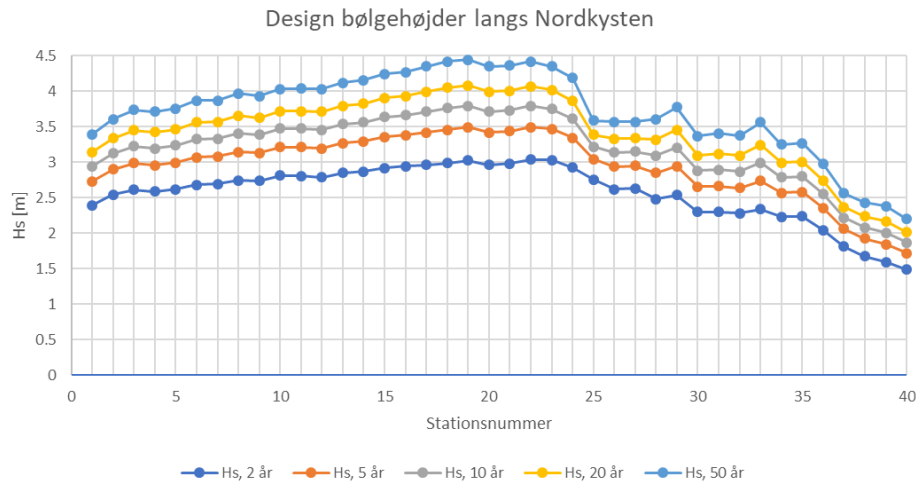
Punkt	ST21	ST22	ST23	ST24	ST25	ST26	ST27	ST28	ST29	ST30
Returperiode [år]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]
2	2.983	3.04	3.032	2.923	2.756	2.619	2.632	2.484	2.54	2.303
5	3.437	3.497	3.472	3.343	3.043	2.939	2.95	2.853	2.944	2.654
10	3.73	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
Afskæringsniveau	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.8 m	1.7 m	1.7 m	1.5 m	1.5 m	1.4 m
Returperiode [år]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]
2	0.086	0.086	0.083	0.08	0.055	0.061	0.06	0.07	0.075	0.066
5	0.139	0.138	0.13	0.128	0.082	0.095	0.094	0.112	0.123	0.107
10	0.178	0.176	0.166	0.163	0.102	0.12	0.118	0.144	0.159	0.138
20	0.219	0.215	0.202	0.2	0.121	0.146	0.142	0.176	0.195	0.17
50	0.274	0.268	0.25	0.249	0.146	0.18	0.175	0.219	0.245	0.213

Tabel 3.10  
Ekstrembølgehøjder,  $H_s$  og tilhørende spredning,  $\sigma$  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]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [m]	$H_s$ [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
Afskæringsniveau	1.4 m	1.4 m	1.4 m	1.4 m	1.4 m	1.3 m	1.3 m	1.2 m	1.2 m	1.2 m
Returperiode [år]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]	$\sigma$ [m]
2	0.068	0.067	0.073	0.063	0.064	0.058	0.045	0.045	0.043	0.038
5	0.113	0.11	0.123	0.104	0.106	0.096	0.078	0.08	0.083	0.074
10	0.146	0.143	0.161	0.134	0.138	0.126	0.104	0.107	0.117	0.105
20	0.18	0.176	0.2	0.166	0.17	0.155	0.131	0.136	0.153	0.14
50	0.227	0.222	0.255	0.209	0.214	0.196	0.168	0.177	0.206	0.19

Designbølgerne variation langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør er vist i Figur 3.45.

Figur 3.45 Designbølgenes variation på dybt vand langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør.



### 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 kysten.

#### 3.2.2.2 Eustatisk havspejlsstigning

Klimaforandringerne resulterer i globale eustatiske havvandspejlsstigning, 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 havvandspejlsstigningerne, der anvendes. DMI's bedste bud på vandstandsstigningerne de næste 100-år frem til år 2100, er vist i Figur 3.46.

DMIs bedste bud på den fremtidige havvandspejlsstigning er ca. +0,8 m mellem år 2000 og 2100. Det forventes, at havspejlsstigningen vil vokse eksponentielt med tiden, hvilket giver en havvandspejlsstigning på +37 cm mellem 2020 og 2070. Det skal bemærkes, at dette er et centralt estimat og derfor er behæftet med en usikkerhed, angivet med grøn og grå i Figur 3.46.

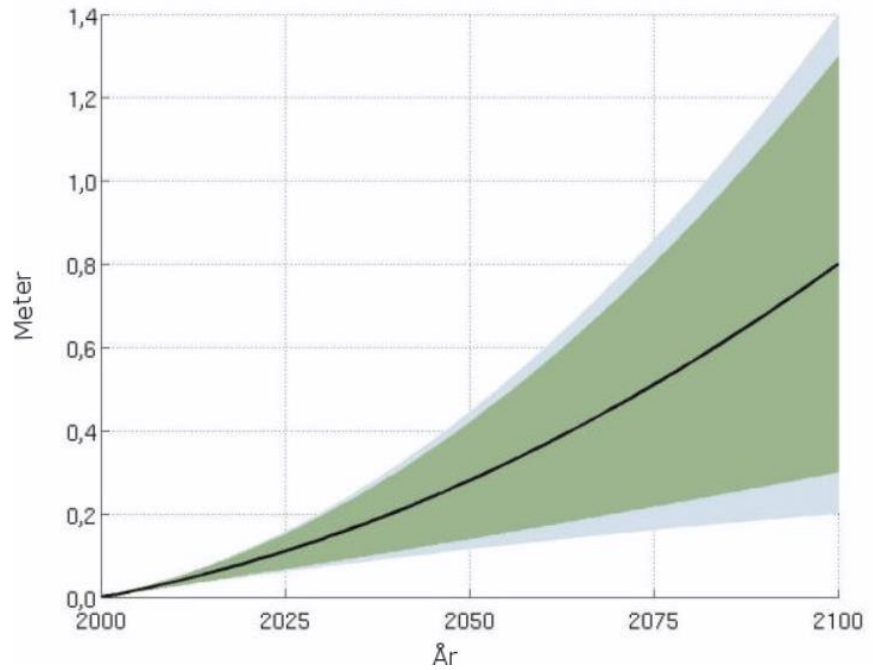
#### 3.2.2.3 Isostatisk landhævning

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 3.47.

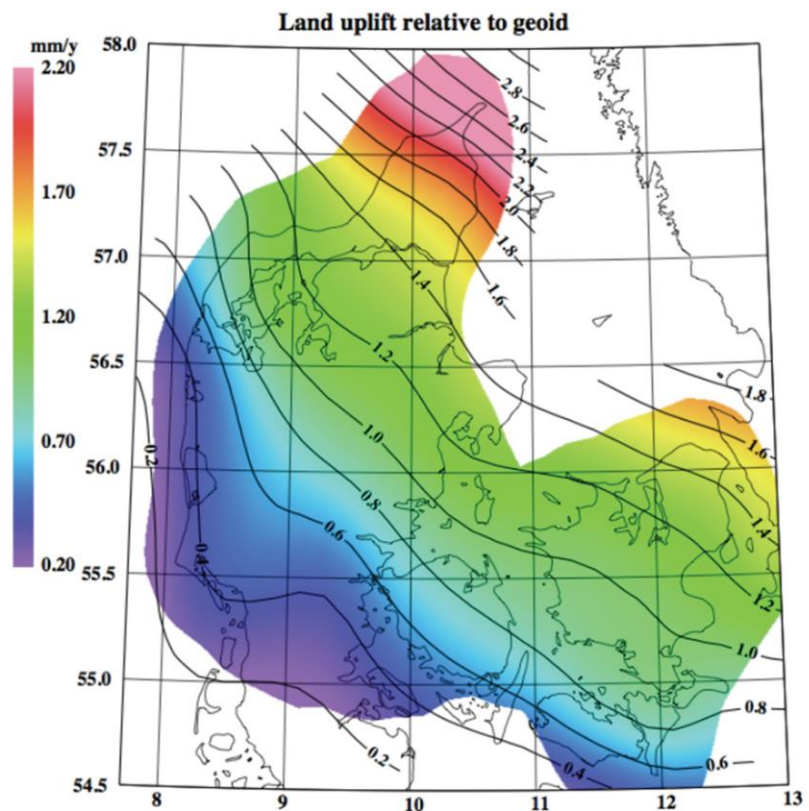
Landhævningen bevirker, at kystprofilen og terrænet hæves, hvilket derved reducerer vanddybderne og hæver kystbeskyttelseskonstruktionerne. Landhævningen er dog mindre end den forventede havspejlsstigning, hvorfor der stadig forventes en relativ havspejlsstigning.

Mellem Hundested og Helsingør varierer landhævningen mellem 1,3 og 1,5 mm/år. For hele Nordkysten antages et gennemsnit på 1,5 mm/år, hvormed den resulterende landhævning i år 2070 bliver +8 cm i forhold til terrænniveau i 2020.

Figur 3.46 DMI's bedste bud på havvandstandsstigninger mellem år 2000 – 2100, når der ses bort fra landhævning. Den sorte kurve viser middelværdien, mens det grønne og blå areal viser usikkerheden hhv. globalt og omkring Danmark.



Figur 3.47 Absolut landhævning i Danmark med nøjagtighed på 0,2 mm/år.



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

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

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

#### 3.2.2.4 Ekstrem vandstand

DHI har udarbejdet ny ekstrem vandstandsstatistik langs Nordkysten, [3].

Ekstremvandstande er langt mere følsomme over for måletidsseriens længde end ekstrembølgehøjder. I estimaterne er det derfor valgt at tage udgangspunkt i måletidsserien for Hornbæk, som dækker en observationsperiode på 127 år, og i kombination med denne blot bruge de 20 års modellerede vandstande 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.

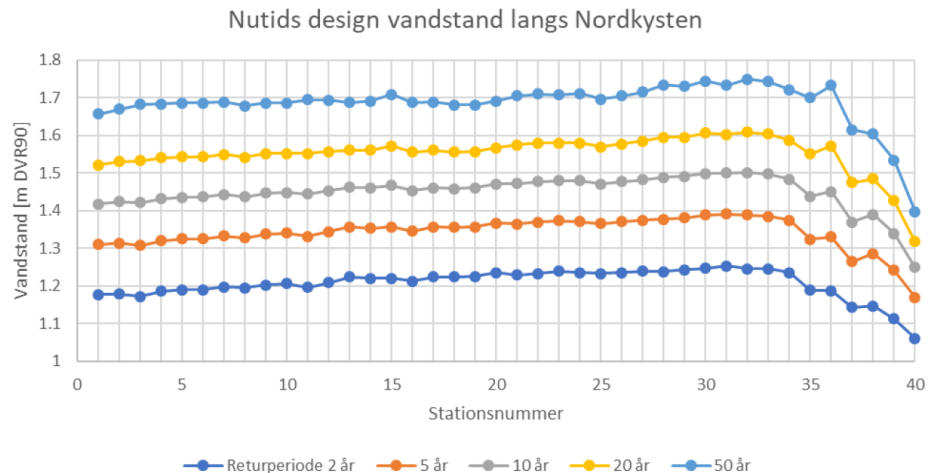
Returperiode [år]	Trendfri vandstand [m DVR90]	Vandstand år 2018 [m DVR90]	Spredning [m]
2	1,194	1,236	0,013
5	1,332	1,374	0,016
10	1,441	1,483	0,034
20	1,545	1,587	0,046
50	1,679	1,721	0,067
100	1,780	1,822	0,088

På baggrund af de 20 års modellerede vandstande (1997-2016) er der udført en ekstremværdianalyse for de 40 punkter langs Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør. Nutids designvandstande og de tilhørende spredninger 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 på strækningen fra Hundested til Helsingør. Endvidere er de optegnet i form af et diagram i Figur 3.48.

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).

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 3.48 Designvandstandenes variation langs med Nordkysten på strækningen fra Hundested til Helsingør.



### 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 middeltidshændelsen samt havvandspejlsstigningen, 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.



Tabel 3.13  
Dimensionsgivende vandstand  
på dybt vand udenfor  
brydningszonen ved  
nordkysten af Sjælland

	VEST	ØST
Vandstand ved middeltidshændelse på 50 år i 2020 [m DVR90]	+1,69	+1,72
Havvandspejlsstigning mellem 2020 og 2045 ifølge DMI's bedste bud [m]	+0,16	
Havvandspejlsstigning mellem 2045 og 2070 ifølge DMI's bedste bud [m]	+0,21	
Dimensionsgivende vandstand i år 2070 [m DVR90]	+2,06	+2,09

### 3.2.3 Kronisk erosion

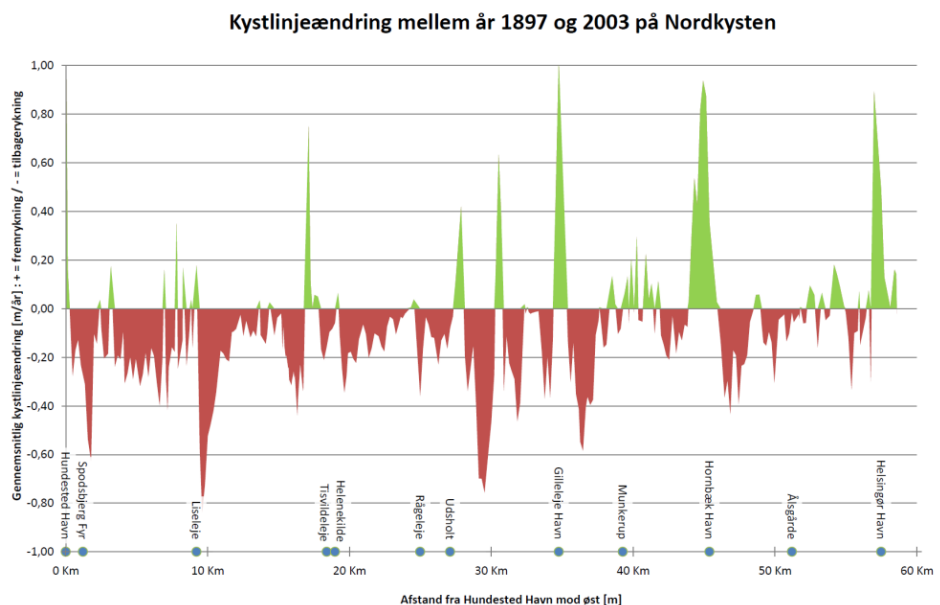
#### 3.2.3.1 Historisk kronisk erosion

Kroniske erosion skyldes stigende langtransport langs kysten, hvilket bevirker, at der fjernes mere sediment fra en kyststrækning end der tilføres. Den historiske kroniske erosion langs Nordkysten er beregnet ved sammenligning af historiske kystlinjer fra omkring år 1900 med kystlinjer fra omkring år 2000, se Figur 3.49.

Den kroniske erosion varierer langs Sjællands nordkyst, som følge af kystens orientering, geologi, bølgeklime og omfanget af kystkonstruktioner.

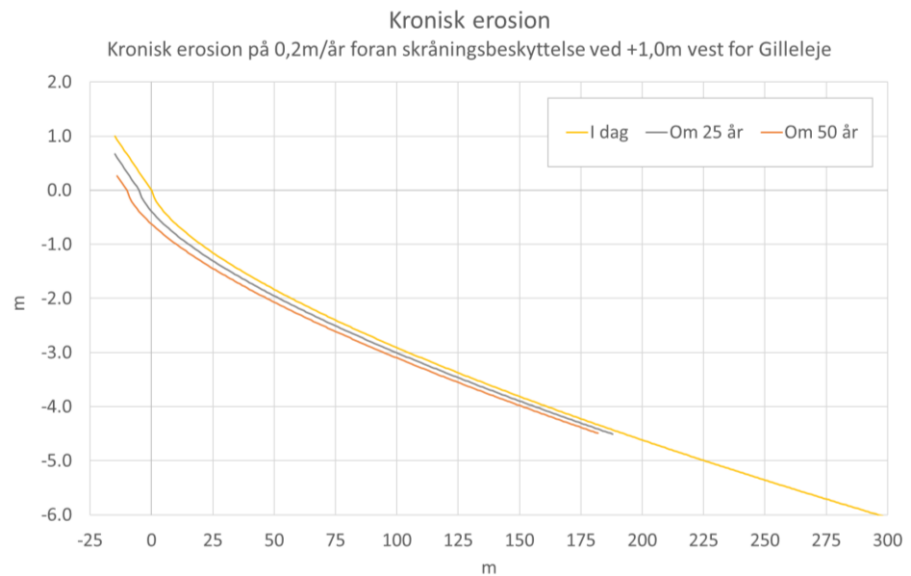
Vest for Gilleleje Havn, Hornbæk Havn og Helsingør Havn, og øst for Hundested Havn, er kysten rykket frem som følge af aflejring af sand og ral. Den øvrige del af Nordkysten rykker generelt tilbage.

Figur 3.49 Historisk  
kystlinjeudvikling (m/år)  
mellem Hundested og Helsingør  
i perioden 1897 og 2003. Grøn  
er kystfremrykning og rød er  
kysttilbagerykning (erosion).  
Kilde: Kabuth, A.K., Kroon, A.,  
Pedersen, J.T., 2014. Figuren  
viser, at kysten generelt rykker  
tilbage (rød) primært på nær  
vest for havnene (grøn)



Figur 3.50 viser et eksempel på kronisk erosion af hele strandprofilen vest for Gilleleje, hvor den aktive dybde er i størrelsesorden 4,5m og hvor den gennemsnitlige højde af stranden foran skråningsbeskyttelserne vurderes at være omkring +1,0m.

Figur 3.50 Eksempel på idealiseret beregning af kronisk erosion af strandprofilen vest for Gilleleje foran skråningsbeskyttelse i kote +1,0 m



De største kysttilbagerykninger findes langs ubeskyttede strækninger og nedstrøms for større kystkonstruktioner, herunder havnene.

På de beskyttede strækninger reducerer kystbeskyttelsen størrelsen af den kroniske erosion af stranden. Den kroniske erosion ude i kystprofilen forventes dog at være større.

Tilstandsvurdering af eksisterende kystbeskyttelse er beregnet ud fra fremskrivning af historiske erosionsrater for de enkelte delstrækninger baseret på Figur 3.49.

Anvendelse af et typisk ligevægtsprofil muliggør, at der i tilstandsvurderingen tages højde for den enkelte konstruktions placering i kystprofilen, når vanddybden beregnes.

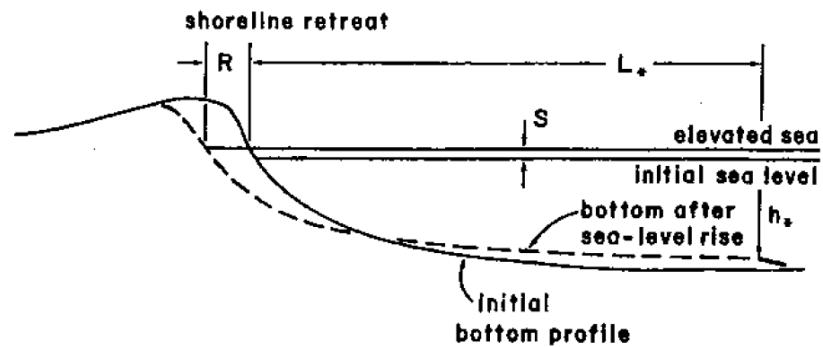
Den fremtidige kroniske erosion vurderes ved antagelse om, at den historiske erosionsrate vil fortsætte, samt at der vil forekomme en yderligere tilvækst i erosionen grundet havspejlsstigning.

Kystlinjen vurderes at være stabil i dag på de strækninger, der er markeret med grønt, da fremrykningen af stranden formodes at være stoppet i takt med at sedimentet vandrer uden om havnene og de gamle kystbeskyttelseskonstruktioner.

### 3.2.3.2 Erosion grundet havspejlsstigning

I takt med at middelvandstanden stiger, vil kystprofilen naturligt opretholde en ligevægtsform. Dette medfører, at der vil ske erosion af den øverste del af kystprofilen og aflejring i den ydre del, se Figur 3.51. Kysttilbagerykningen som følge af havspejlsstigning beregnes ved hjælp af Bruuns regel.

Figur 3.51 Princip for kysterosion grundet stigning af middelhavspejlet. For at opretholde et ligevægtsprofil sker der erosion i den øverste del af kystprofilen og aflejring i den yderste del.



Tilstandsvurdering af eksisterende kystbeskyttelse er beregnet med en korrektion af vanddybden ved konstruktionen som følge af ændring af kystprofilen som skitseret i Figur 3.51.

Beregningen er foretaget 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.

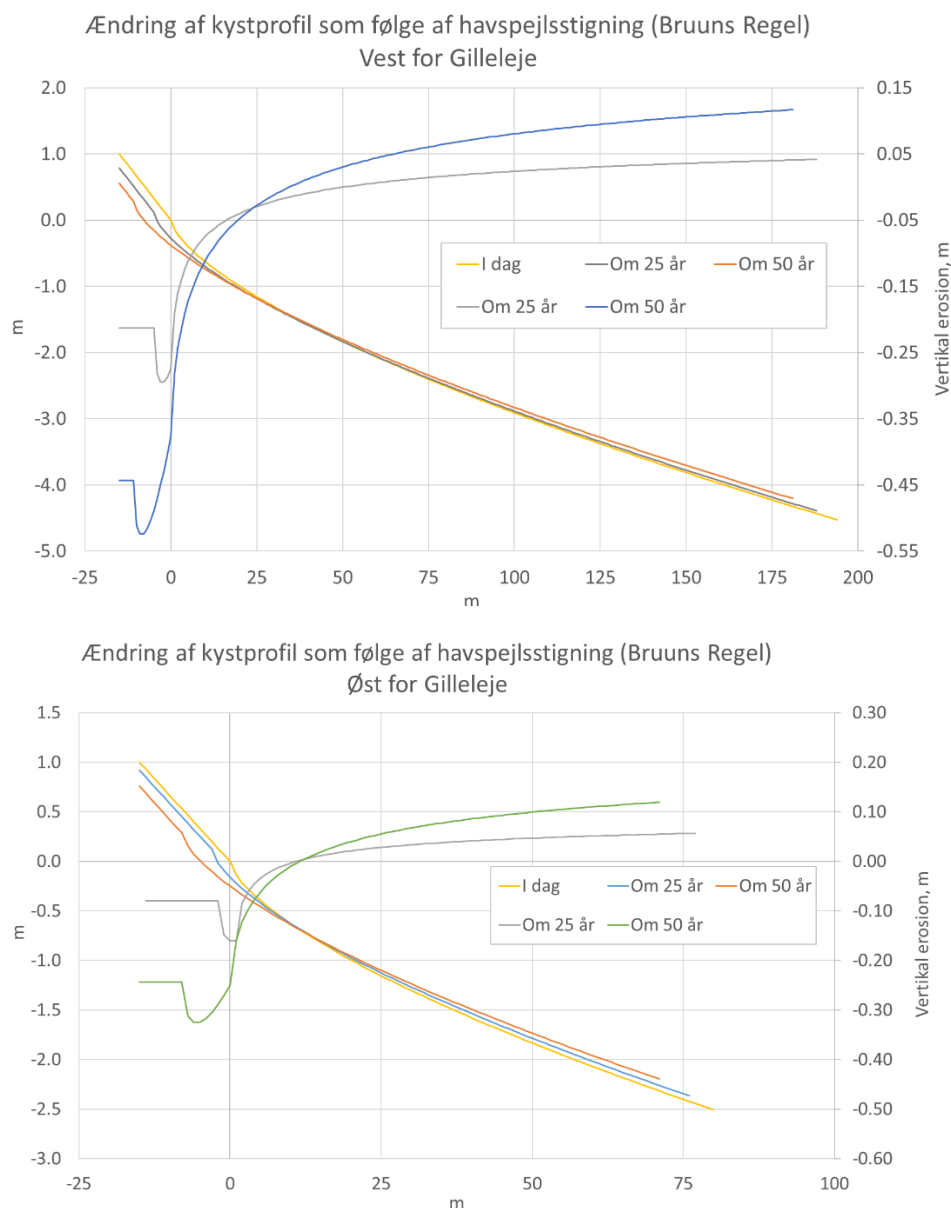
Den aktive dybde er et mål for, hvor langt ned i vandet bølgerne er i stand til at påvirke kystprofilen betydeligt på den givne lokalitet.

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.

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

Figur 3.52 Kysttilbagerykning og vertikale erosion langs ligevægtskystprofil som følge af havspejlsstigning jf. Bruuns Regel



### 3.2.3.3 Modellering af langstransport

Den langsgående sedimenttransport på Nordkysten går fra vest mod øst, dog imod vest fra Spodsbjerg/Kikhavn til Hundested. Langstransporten er primært drevet af den bølgeinducerede langsgående strøm.

Langstransporten går fra ingenting nær Kikhavn og stiger til Gilleleje. Gilleleje Havn blokerer store dele af sedimenttransporten, hvilket over tid har 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, men relativt stabil hen til Helsingør Nordhavn.

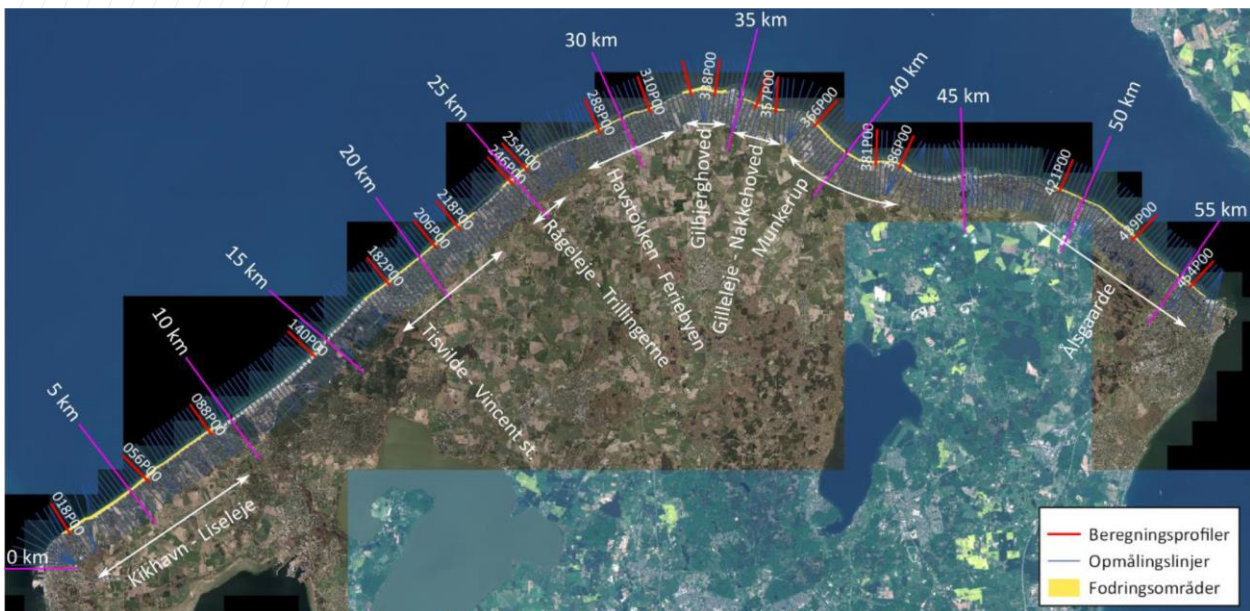
Nærværende studie giver en opdateret vurdering af transportforholdene langs Nordkysten ved hjælp af numeriske modeller. Sedimentbudgettet bestemmes ved



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 DHIs 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 sand tilgængeligt samt omkring kystkonstruktionerne.

#### 3.2.3.4 Model

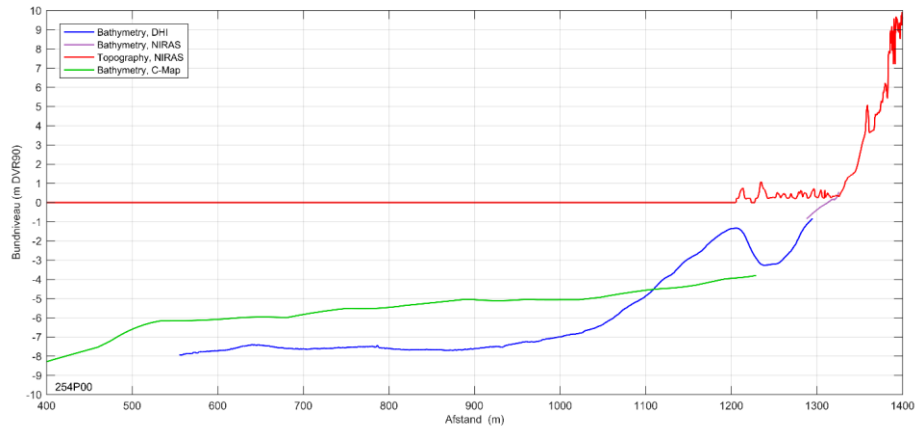
Den langsgående sandtransport beregnes i 21 kystprofiler fordelt langs med Nordkysten som vist med de røde profiler i Figur 3.53. De 8 fodringsområder som undersøges er desuden indtegnet i figuren (markeret med gult). Det bemærkes, at de 21 kystprofiler, som sandtransporten beregnes for, er koncentreret omkring fodringsstrækningerne.



Figur 3.53 Oversigtsplan for 21 kystprofiler hvorpå langstransporten er beregnet. Fodringsområderne er indtegnet med gult og 5 km mærker for afstanden til Hundested er vist med lilla linjer

Figur 3.54 viser et eksempel på de forskellige opmålinger, der er anvendt til fastlæggelse af kystprofilernes form.

Figur 3.54 Eksempel på de anvendte opmålinger til fastlæggelse af kystprofillets form.



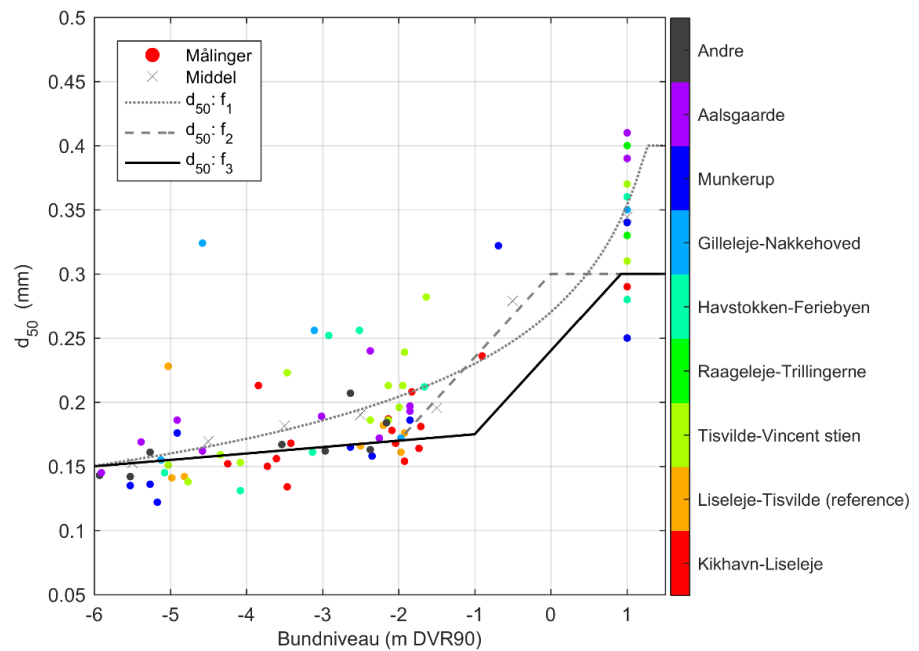
Kornstørrelsesfordelingen er opmålt i forbindelse med forundersøgelserne til nærværende projekt. 68 prøver er udtaget i den våde del af kystprofillet af DHI, [9], og 28 prøver er udtaget på stranden af NIRAS, [10].

Sigteanalyser er gennemført for alle sandprøver til bestemmelse af median kornstørrelse ( $d_{50}$ ) 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 ( $d_{50}: f_3$ , se Figur 3.55) repræsenterer forholdene ved Nordkysten bedst til fastlæggelse af det overordnede sandbudget.

Figur 3.55 Kornstørrelsesfordeling over dybden inklusiv lokaliteter. Målingernes placering på langs af kysten er angivet med farveskalaen. Fuldt optrukken kurve viser den anvendte kornstørrelsesfordeling. De stiplede kurver angiver to forskellige tilnærmelser, som er anvendt i studiet.



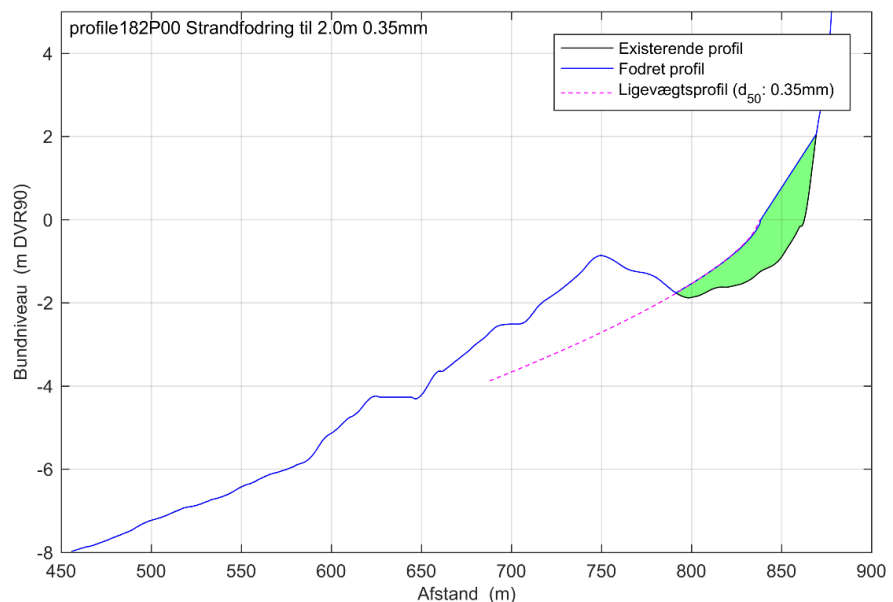
Tidsserier af vandstande og kystnære bølger sættes på søværts ende af kystprofilen. Undervejs blev det vurderet nødvendigt at transformere de kystnære bølger længere ind fra ca. 8 m vanddybde til en såkaldt aktiv dybde, der er grænsen for, hvor langt ud i profilet den litorale transport påvirker bunden under normale forhold.

Effekten af at strandfodre på den langsgående sandtransport vurderes ved at ændre formen på kystprofilen svarende til følgende parametre:

- Kysten fremrykkes således, at man opnår en topkote på bagstranden på mindst +2,0 m DVR90
- Bagstranden vurderes at have en hældning på 1/15
- Kystprofilen under vand fastlægges som et såkaldt ligevægtsprofil svarende til en median kornstørrelse på  $d_{50}=0,35$  mm.

Figur 3.56 sammenligner det eksisterende kystprofil (i sort) med et fodret kystprofil (i blå). Det grønne område angiver strandfodringen og den stiplede kurve (i rødt) viser formen på ligevægtsprofilen.

Figur 3.56 Eksempel på et strandfodret kystprofil



Udover at formen på kystprofilen ændres, ændres desuden median kornstørrelsen i visse dele af kystprofilen, idet der fodres med relativt groft sand. Kornstørrelsen ændres til  $d_{50}=0,35$  mm i det fodrede område samt ud til en bundkote på ca. -2 m.

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, [3].

Transportfordelinger samt vurderinger af reduktionsfaktorer er angivet for hvert af de 21 kystprofiler i [3] Bilag B.1 og B.2.

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

For de vestligste kystprofiler gælder der, 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.

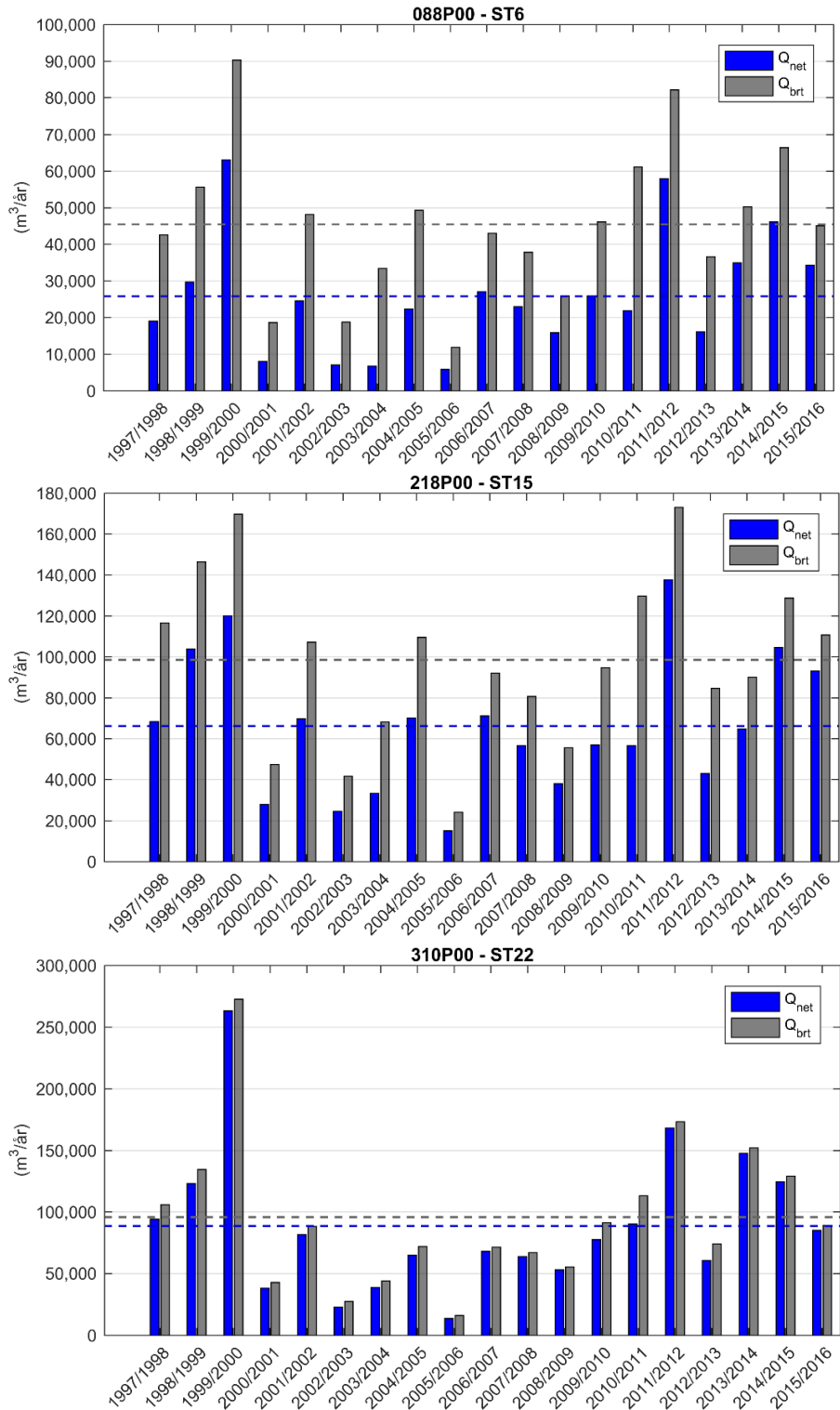
For kystprofiler længere østpå bliver den vestgående transport forsvindende lille. Netto- og bruttotransporterne vil derfor være af samme størrelsesorden.

Figurerne 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.

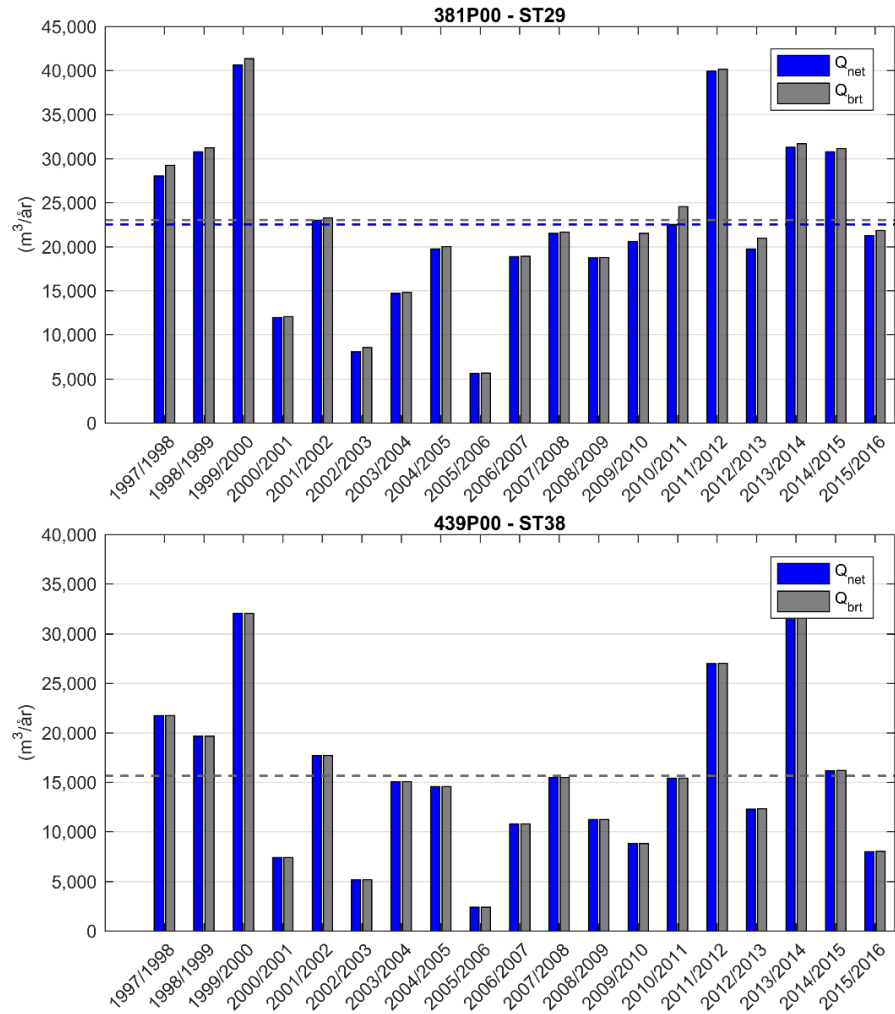
For fire ud af de fem viste kystprofiler er juli 1999 – juni 2000 det år med de største transportrater efterfulgt af perioden juli 2011 – juni 2012.



Figur 3.57 År-til-år variationer i langtransport for tre udvalgte profiler, placeret vest for Gilleleje Havn.



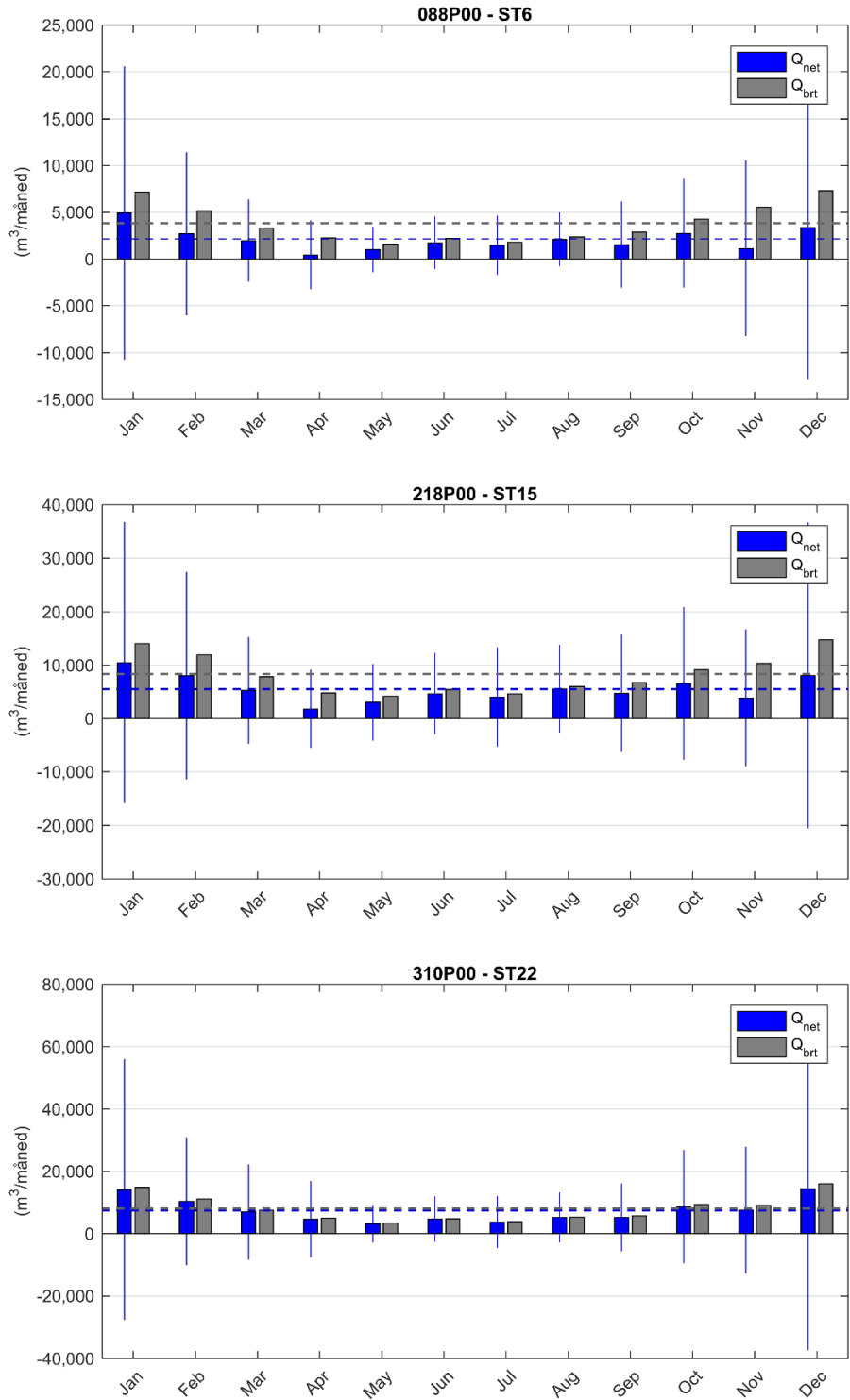
Figur 3.58 År-til-år variationer i langstransport for to udvalgte profiler, placeret øst for Gilleleje Havn.



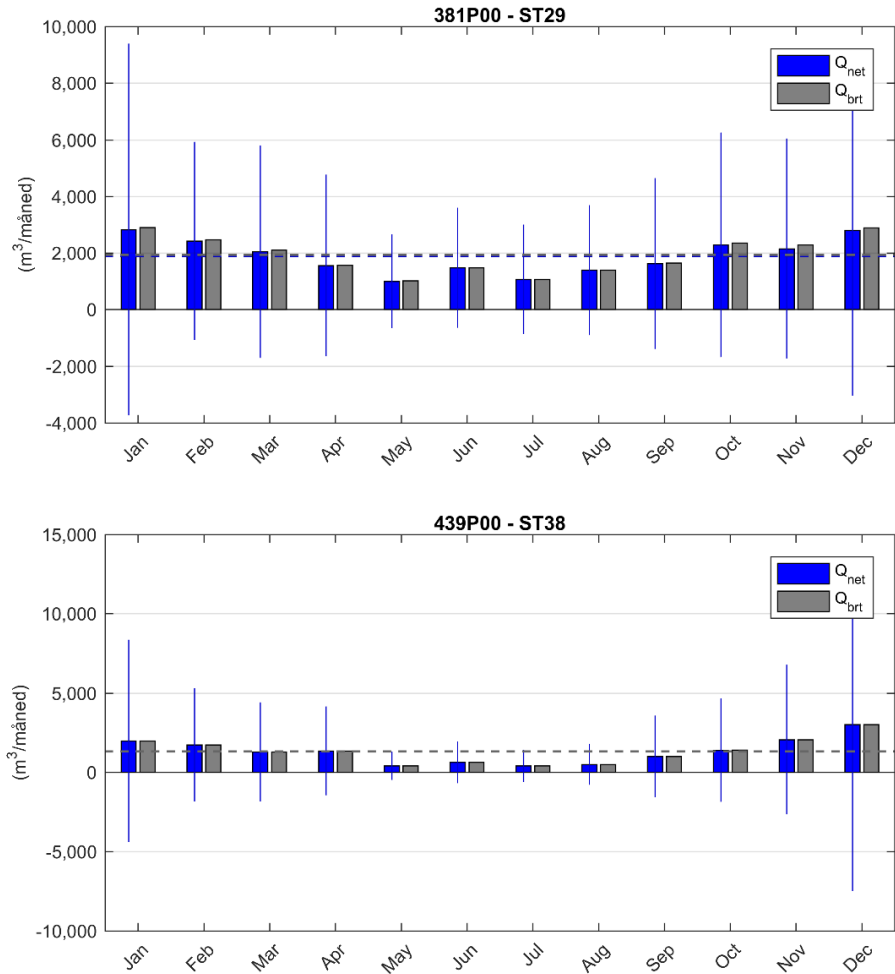
Sæsonvariationen af den langsgående sandtransport (Netto og brutto) er vist for fem udvalgte kystprofiler i Figur 3.59 og Figur 3.60. Søjlediagrammet i figurene viser middelværdier af den månedlige sandtransport beregnet over 20 år og de lodrette blå kurver viser spredningen af de månedlige værdier omkring 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 3.59 Sæsonvariation i langtransporten for tre udvalgte profiler placeret vest for Gilleleje Havn.



Figur 3.60 Sæsonvariation i langtransporten for to udvalgte profiler, placeret øst for Gilleleje Havn.



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 ud fra tværfordelingen af langtransporten, idet aktiv dybde aflæses ud fra det punkt på transportfordelingen, hvor sandtransporten er ubetydelig.

Baseret på beregningerne af langtransporten 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 og 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 [3].



### 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 fodringsområdet og sandtransporten i et profil ved den østlige ende af fodringsområdet. Erosionen er angivet som  $\text{m}^3/\text{år}/\text{m}$ , der skal forstås som tabet af sand per løbende meter langs med den fodrede kyststrækning.

*Tabel 3.14 Aktuelle transportrater samt kronisk erosion i hvert af fodringsområderne for eksisterende kyst. Positiv nettotransport er mod øst. Positiv erosion svarer til tab af sand. Beregningerne antyder, at visse områder i fodringsområdet ikke er under kronisk erosion.*

Profil	$Q_{\text{net}}$ ( $\text{m}^3/\text{år}$ )	$Q_{\text{brt}}$ ( $\text{m}^3/\text{år}$ )	Kronisk erosion ( $\text{m}^3/\text{år}/\text{m}$ )	Fodringsområde
018P00	0	40.000	2,8	Kikhavn – Liseleje (7.500 m)
056P00	5.000	36.000		
088P00	21.000	40.000		
140P00	11.000	50.000	-	-
182P00	28.000	72.000	2,9	Tisvilde – Vincent st. (5.600 m)
206P00	40.000	63.000		
218P00	44.000	63.000		
246P00	29.000	65.000	0*	Rågeleje – Trillingerne (2.000 m)
254P00	25.000	104.000		
288P00	69.000	83.000	2,8	Havstokken – Feriebyen (3.600 m)
310P00	79.000	87.000		
328P00	109.000	113.000	7,2	Gilbjerg Hoved (1.800 m)
338P00	122.000	123.000		
353P00	21.000	21.000	~0	Gilleleje – Nakkehoved (2.000 m)
357P00	20.000	22.000		
366P00	29.000	30.000	0 – 3,0*	Munkerup inkl. forlænget (4.800 m)
381P00	23.000	23.000		
386P00	26.000	26.000		
421P00	84.000	84.000	0 – 2,0*	Ålsgårde inkl. forlængelse (7.700 m)
439P00	23.000	23.000		
454P00	29.000	29.000		

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 erosion. Variationen i erosionspresset er stor for fodringsområderne øst for Gilleleje.

Beregningerne af littoraltransporten (langtransporten) er gentaget for nye kystprofiler, hvori der er indlagt en sandfodring, som påvirker kystprofilens form samt kornstørrelsen af sandet i kystprofilen. Beregningerne korrigeres desuden for sandtilgængelighed og kystkonstruktioner. Tabel 3.15 angiver langtransporten og størrelsen af den kroniske erosion for tilfældet med udført strandfodring.

*Tabel 3.15 Aktuelle transportrater samt kronisk erosion i hvert af fodringsområderne for Fodringsscenarie 1. Positiv nettotransport er mod øst. Positiv erosion svarer til tab af sand. Beregningerne antyder, at visse områder i fodringsområdet ikke er under erosion.*

Profil	$Q_{net}$ (m <sup>3</sup> /år)	$Q_{brt}$ (m <sup>3</sup> /år)	Kronisk erosion (m <sup>3</sup> /år/m)	Fodringsområde
018P00	0	29.000	2,4	Kikhavn – Liseleje (7.500 m)
056P00	6.000	35.000		
088P00	18.000	34.000		
140P00				-
182P00	35.000	82.000	0*	Tisvilde – Vincent st. (5.600 m)
206P00	35.000	53.000		
218P00	34.000	51.000		
246P00	28.000	62.000	0*	Rågeleje – Trillingerne (2.000 m)
254P00	25.000	101.000		
288P00	68.000	79.000	0*	Havstokken – Feriebyen (3.600 m)
310P00	59.000	63.000		
328P00	107.000	112.000	11	Gilbjergghoved (1.800 m)
338P00	126.000	127.000		
353P00	21.000	21.000	0*	Gilleleje – Nakkehoved (2.000 m)
357P00	17.000	17.000		
366P00	31.000	32.000	1,3	Munkerup inkl. forlænget (4.800 m)
381P00	23.000	23.000		
386P00	37.000	37.000		
421P00	41.000	41.000	0 – 1,5*	Ålsgårde inkl. forlængelse (7.700 m)
439P00	19.000	19.000		
454P00	23.000	23.000		

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.

Fodringsvolumenet af strandfodringerne medfører ikke væsentlige ændringer på reduktionen af sandtransport fra kystkonstruktioner. Fodringsvolumenet er dog tilstrækkeligt til, at reduktioner fra tilstedeværelsen af ral ikke medtages.

Sammenligning af transportraterne angivet i Tabel 3.14 og Tabel 3.15 antyder, 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 korntørrelsesfordelingen 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 – modvirkning af 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 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.

DHIs anbefalinger til nødvendige volumener til modvirkning af 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 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 ved Kikhavn til ca. 125.000 m<sup>3</sup>/år ved Gilleleje. Fordeles denne stigning i langstransport lineært over hele strækningen fås en erosion på ca. 3.7 m<sup>3</sup>/år/m. Denne rate ligger generelt højere end erosionsraterne i fodringsområderne, fordi beregningerne viser, at der foregår en betydelig erosion i naturområderne.

##### **3.2.3.7.2 Baggrundserosion: Gilleleje – Helsingør**

Den aktuelle langstransport fra Gilleleje til Helsingør er overordnet set jævn og omkring 20.000 – 40.000 m<sup>3</sup>/år. Dog 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 pågår.

Øst for Gilleleje Havn vurderes området at blive tilført ca. 40.000 m<sup>3</sup>/år fordelt som 15.000 m<sup>3</sup>/år fra kystnær klapping og 25.000 m<sup>3</sup>/år som naturligt bypass.

Ved Hornbæk Havn vurderes kysten af miste ca. 20.000 m<sup>3</sup>/år som følge af et voksende klitlandskab, afgravning af stranden vest for havnen samt tilbageførsel af sand i form af kystfodring og kystnær klapping af oprenset sand.

Ved Helsingør vurderes den naturlige sandtransport ud af kystzonen at være omkring 25.000 m<sup>3</sup>/år.

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

### 3.2.3.7.3 Opsamling på anbefalede fodringsrater

Med baggrund i ovenstående overvejelser gives der i Tabel 3.16 anbefalinger til årlige fodringsvolumener til vedligeholdelse af strandfodringerne. Summen af de anbefalede fodringsvolumener beløber sig til **ca. 110.000 m<sup>3</sup>/år**. Hertil skal lægges et yderligere bidrag pga. randeffekter.

Tabel 3.16 Anbefalinger til vedligeholdelsesfodringsvolumener som følge af kronisk erosion.

Fodringsområde	Længde (m)	Årligt tab (m <sup>3</sup> /år/m)	Anbefalet fodringsrate (m <sup>3</sup> /år)
Kikhavn – Liseleje	7.500	3,7	28.000
Tisvilde – Vincent st.	5.600	3,7	21.000
Rågeleje – Trillingerne	2.000	3,7	7.500
Havstokken – Feriebyen	3.600	3,7	13.500
Gilbjergshoved	1.800	11	20.000
Gilleleje – Nakkehoved	2.000	0,5	1.000
Munkerup inkl. forlænget	4.800	1,3	6.500
Ålsgårde inkl. forlængelse	7.700	1,5	12.000

### 3.2.3.8 Randeffekter ved strandfodring

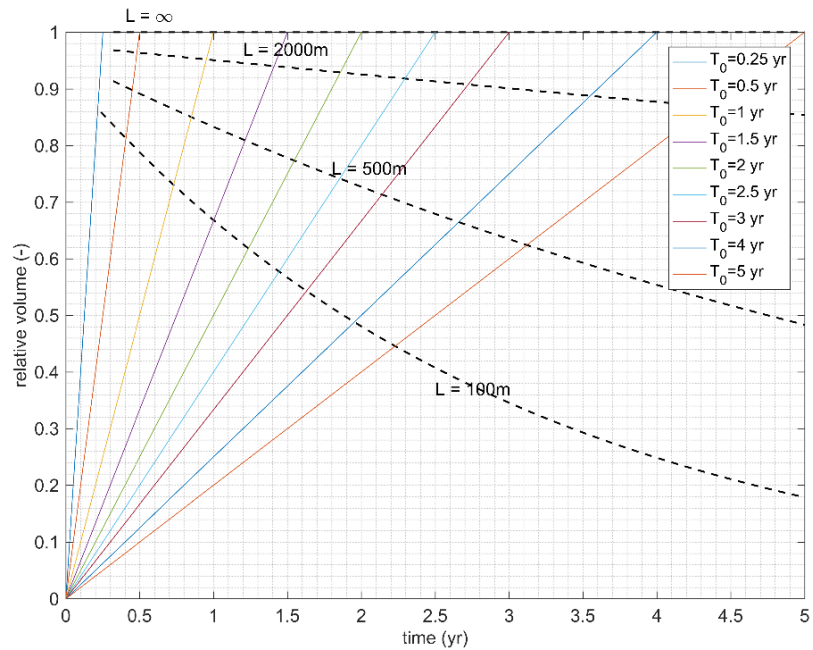
Strandfodringerne udgør sandformationer, der vil ændre form og jævnes ud som tiden går. Placeres sandet f.eks. uniformt i den langsgående retning og udelukkende i det område, der ønskes beskyttet, vil denne effekt opleves som et tab af sand til de omgivende strækninger. På den måde vil det fodrede sand 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 3.61 [16] benyttes. 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 3.17.

Figur 3.61 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, [16].



Tabel 3.17 Reduktion af sandvolumenet i fodringområde på grund af randeffekter.

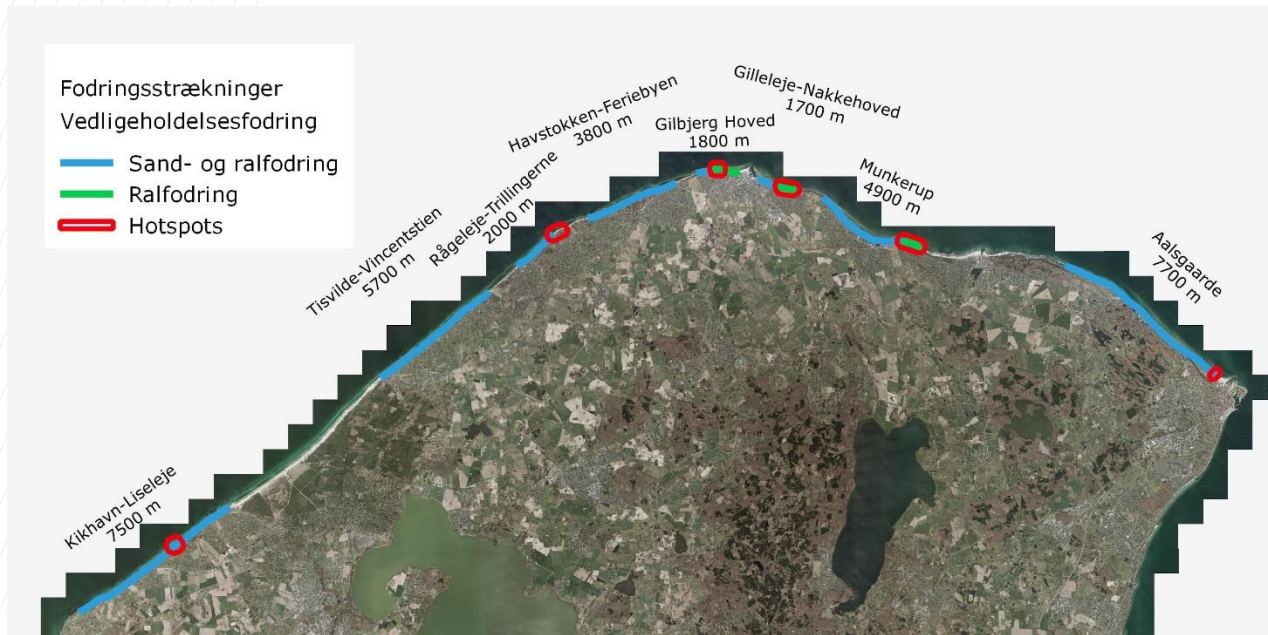
Fodringsstræknings længde	Reduktion (5 år)
100m	82 %
500m	52 %
2000m	14 %
Uendelig lang fodring	0%

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, at fodringsområderne **Kikhavn – Liseleje, Rågeleje-Trillingerne, Gilleleje-Nakkehoved, Villingebæk, Munkeup samt Ålsgårde** omfatter lokaliteter, hvor det forventes at være vanskeligt at fastholde sedimentet lokalt på de mest udsatte strækninger, hvor langstransporten stiger mest, som indikeret på figur 3.62.



Figur 3.62: Forventede hotspots i fodringsområderne, hvor særlig indsats med hårde konstruktioner kan vise sig nødvendige for at fastholde den målsatte strand.

Kikhavn – Liseleje fodringsområdet er udsat for erosion fordi dette område ligger i et kritisk punkt for den langsgående sandtransport, idet sand fjernes naturligt fra området, mens der ikke er nogen væsentlig tilførsel fra opstrøms strande. Tilførsel af sand i dette område i form af fodringer vil således gavne selve fodringsområdet, men også give anledning til sandtilførsel til det nedstrøms område mellem Liseleje og Tisvilde. I den midterste del af området ved pynten umiddelbart sydvest for Liseleje Kystsikringslags strækning kan fodringen med fordel støttes ved enkelte nye hårde konstruktioner.

I den østlige ende af fodringsområdet ved Trillingerne forventes fodringen med fordel at kunne stabiliseres ved enkelte nye hårde konstruktioner.

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

Vest for Nakkehoved og umiddelbart øst for Strandbakkerne vurderes det vanskeligt at fastholde det fodrede materiale uden nye hårde konstruktioner.

Villingebæk ligger på et kystfremspring, hvor transportkapaciteten øges rundt om pynten. Fodringsmaterialet kan øst herfor have svært ved at blive liggende såfremt 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 kan nye hårde konstruktioner medvirke til fastholdelse af det fodrede sediment i form af en bred strand foran hotellet, hvorved dette i mindre grad passerer Gummistranden og føres ud langs vestmolen i Nordhavnen om aflejres på Lappegrund.

I alle tilfælde anbefales det at vente med at anlægge nye hårde anlæg til man ser effekten af den initiale strandfodring og det reelle behov viser sig før første vedligeholdelsesfodring.

### 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 [17], 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 åbenbar. Revlesystemet omkring havnen kan også ses med revlen, der fører sand hen mod sejlløbet fra vest.

Figur 3.63 Gilleleje Havn.



I [16] er havnens betydning for sedimenttransporten opgjort ved at betragte de forskellige bidrag:

- Der aflejres sand på stranden vest for havnen, som stadig er under opbygning
- Der har foregået en afgravning af materiale på Veststranden, som er nyttiggjort

- Der oprenses sand i sejløbet 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 cirka 40.000 kubikmeter årligt passerer havnen i form af naturlig bypass og kystnær klappning, og føres videre som langtransport langs kysten øst for havnen.

I [17] blev det foreslået, at tilsandingsproblemerne ved Gilleleje kunne løses for en årrække ved at foretage en massiv engangsoprensning på 200.000 kubikmeter omkring havnen og anvende det indvundne sand til kystfodring. 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 stadig længere 'sandfangere' og til sidst en egentlig yderhavn med to dækværker, så sandet i nogen grad kan føres forbi uden at aflejres bag 'sandfangeren'.

Figur 3.64 Hornbæk Havn.



De forskellige hovedbidrag i sandbudgettet omkring havnen er beskrevet i [17]:

- 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 omkring 25.000 kubikmeter årligt er ført videre og indgår i langtransporten øst for havnen.

I lighed med Gilleleje Havn er det i [17] forslået, at tilsandingsproblemet ved Hornbæk Havn kan løses for en årrække ved at etablere et sedimentationsreservoir ved en større enkeltoprensning på omkring 100.000 kubikmeter.

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

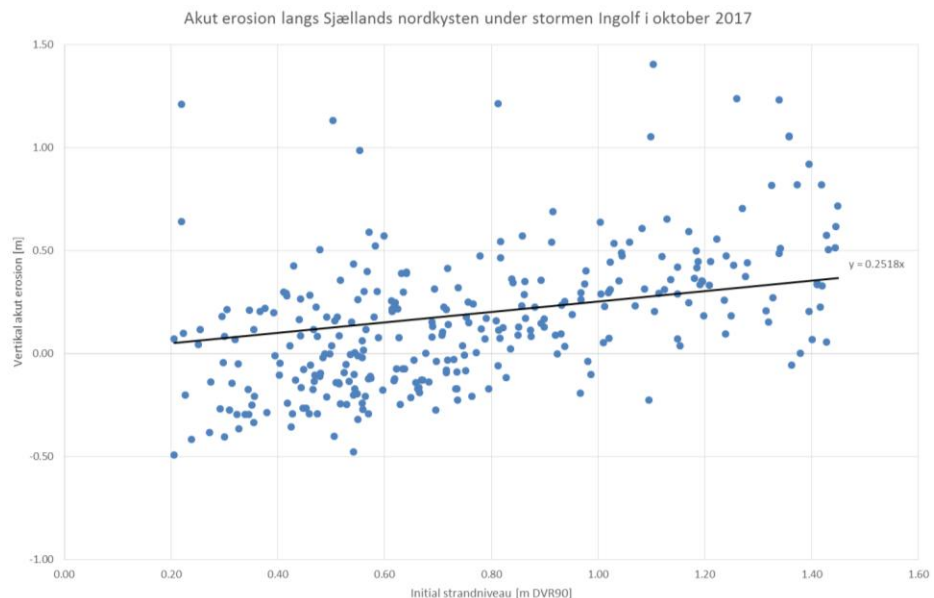
### 3.2.5 Sandtransport på tværs af stranden

#### 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 28.10.2017. Vandstanden under stormen Ingolf var omkring +1,20m 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 3.65.

Figur 3.65 Opmålt akut erosion efter stormen Ingolf 28. oktober 2017.



Figuren viser den vertikale erosion (forskul 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 3.65. Trendlinjen viser, at den



akutte erosion i gennemsnit udgør i størrelsesordenen 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 analysen 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 totalt 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, [3].

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 06.12.2013

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 beregnedes 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 0,3-0,5m afhængig af skræntbeskyttelsens placering i strandprofilen.

På baggrund af ovenstående vurderinger og overvejelser er varigheden for 50 års designstormen valgt til 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 en 200 år og modelleres med en varighed på 15 timer.

Tabel 3.18 opsummerende de anvendte designparametre på dybt vand for designstormene.

Tabel 3.18 De tre stormscenarier.

Returperiode	Bølgehøjde, Hs (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

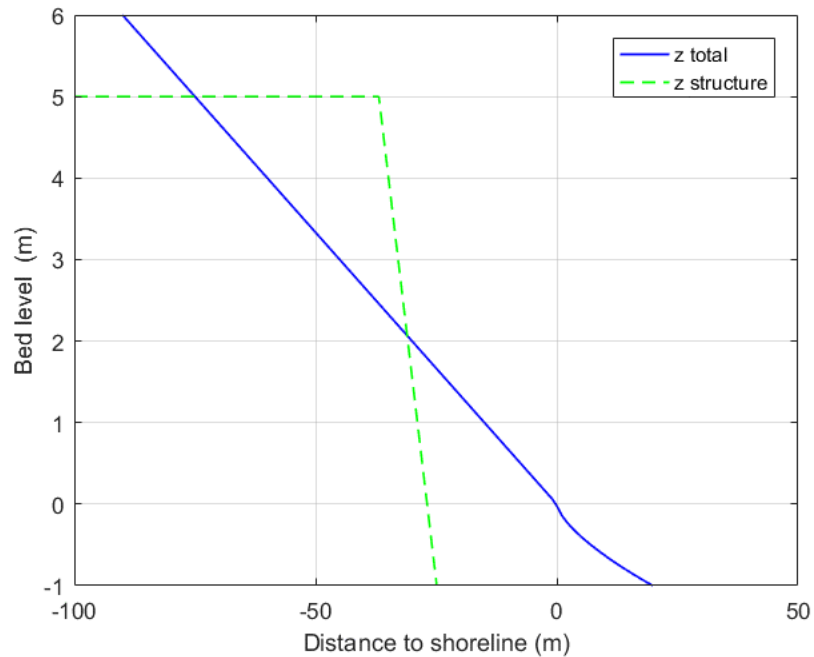
Der anvendes et ligevægtsprofil under kote 0 for sand med en middelnørrelse på  $d_{50}=0,35\text{mm}$  og en middel hældning på stranden på 1:15 over kote 0 som grundlag for beregningerne af den akutte erosion foran skråningsbeskyttelserne.

Kystprofilen 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.

Der anvendes en skråningsbeskyttelse med en hældning på 1:2. Den morfologiske udvikling beregnes for skråningsbeskyttelser placeret i forskellige niveauer på stranden.

Figur 3.66 Eksempel på placeringer af skråningsbeskyttelsen med skæring af stranden i kote +2,0 m.



#### 3.2.5.4 Resultater

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

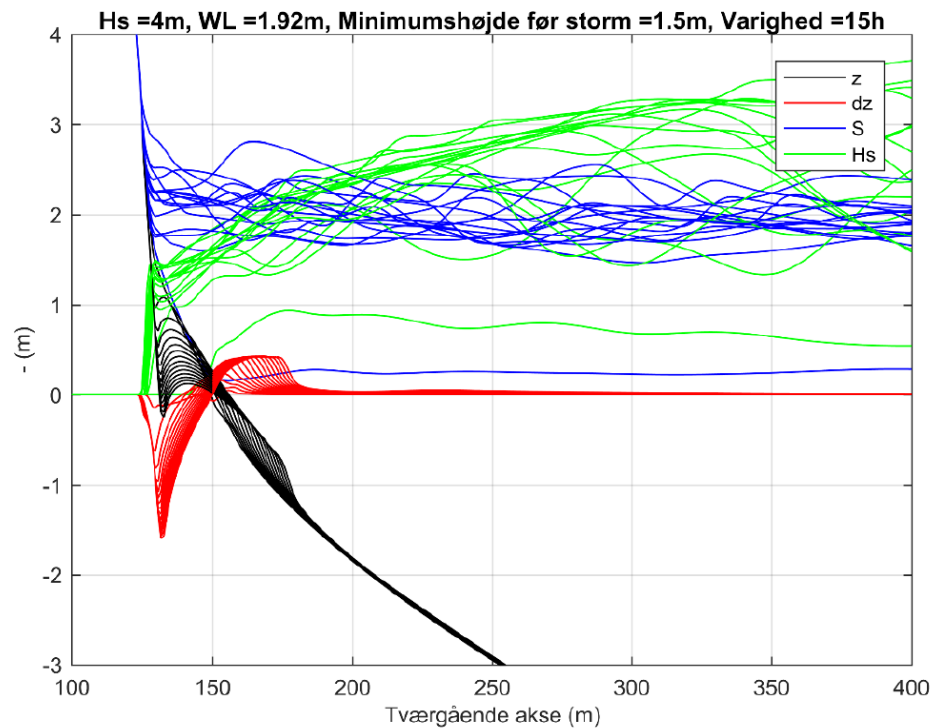
- Følsomhedstest for varighed af vestlig og østlig 50års hændelse
- Følsomhedstest for strandhældning for vestlig 50års hændelse
- Følsomhedstest for kornstørrelse for vestlig 50års hændelse
- Designsimuleringer baseret på de 3 udvalgte storme (50 års storm vest og øst – samt stormen Bodil) og 7 højder af stranden, hvor skråningsbeskyttelse og stranden mødes

Resultaterne for alle modellerede akutererosionshændelser ses i [3] Bilag C. Resultaterne viser udviklingen af strandprofilen foran skråningsbeskyttelsen sammen med erosionsdybder, bølgehøjdefordeling og vandstandsfordeling for hver time over hver simuleret storm. Nedenstående Figur 3.67 giver et indtryk af den modellerede udvikling af morfologien foran skråningsbeskyttelsen.

Figuren indikerer, hvordan de vindgenererede bølger inducerer bølgegrupper, og hvordan disse 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.

Figuren viser også, hvordan 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 kystprofillet. Røde kurver viser udviklingen i erosion og aflejningsmønstre. 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.

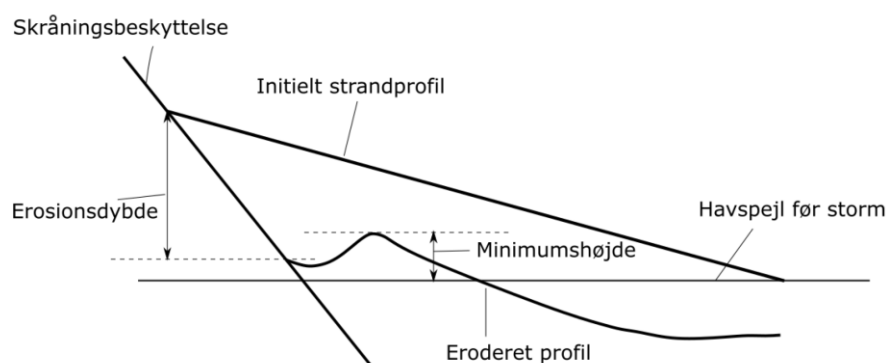
Samtidig ses der i beregningen en tendens til en kraftigere erosion tæt konstruktionen end lidt foran, hvor en lokal "forhøjning" dannes efterhånden som erosionen pågår. Sagt på en anden måde er erosionen helt tæt på konstruktionen større end et lille stykke foran denne.

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 nedenstående principsnit, se 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



Som baggrund for design af skråningsbeskyttelsen beregnes den akutte erosion for 7 placeringer af konstruktionen i strandprofilen for de tre stormhændelser præsenteret indledningsvist.

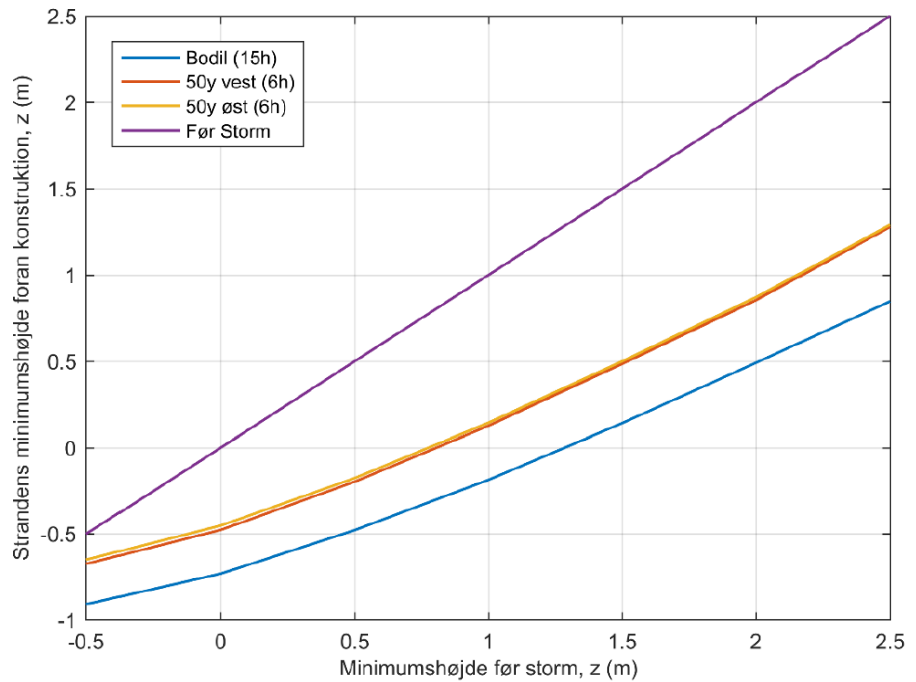
Resultaterne af beregningerne kan ses i [3], Bilag C i form af kurveskarer for forløbet af profiludviklingen. I det efterfølgende gives resultaterne i form af erosionsdybder og minimumshøjder samt erosionsvolumener foran konstruktionen.

Tabel 3.19 Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm.

Initial minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	Minimumshøjde af strand foran konstruktion efter storm (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.



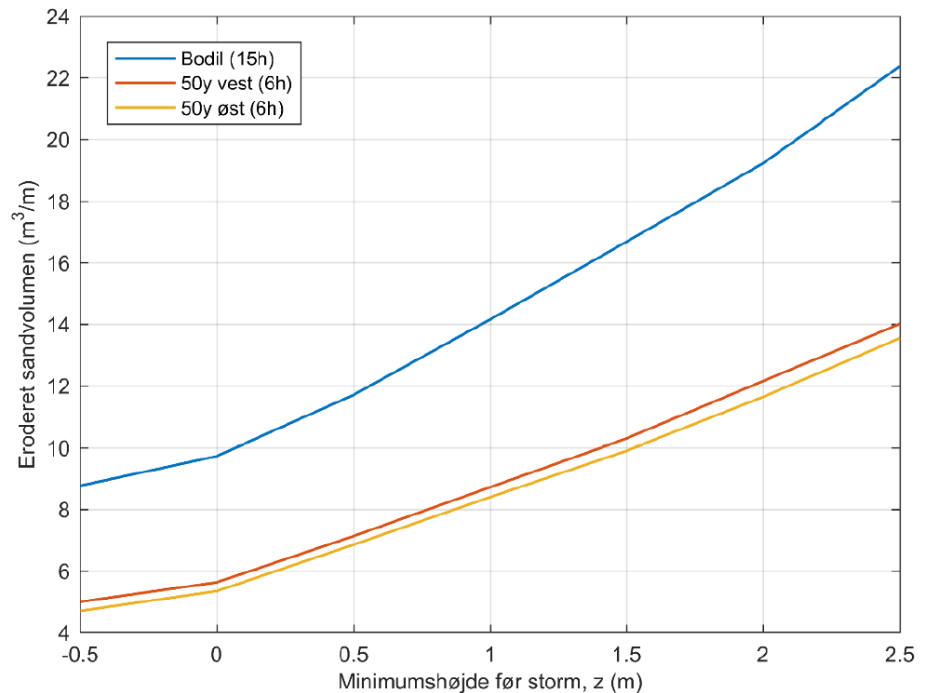
Volumenet af sandet der eroderes fra området tæt foran konstruktionen og som aflejres længere ude i profilet er angivet i nedenstående Tabel 3.20 og Figur 3.70, som eroderet volumen per løbende meter langs kysten. Det ses her, at erosionsvolumenerne er i størrelsesordenen 7-22 m<sup>3</sup>/m afhængig 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 3.20 Erosionsvolumener ved tre stormscenarier for forskellige placeringer af skråningsbeskyttelsen.

Initial minimumshøjde af strand foran konstruktionen (m)	Total akut erosion volumen (m <sup>3</sup> /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 placering af konstruktion.



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.

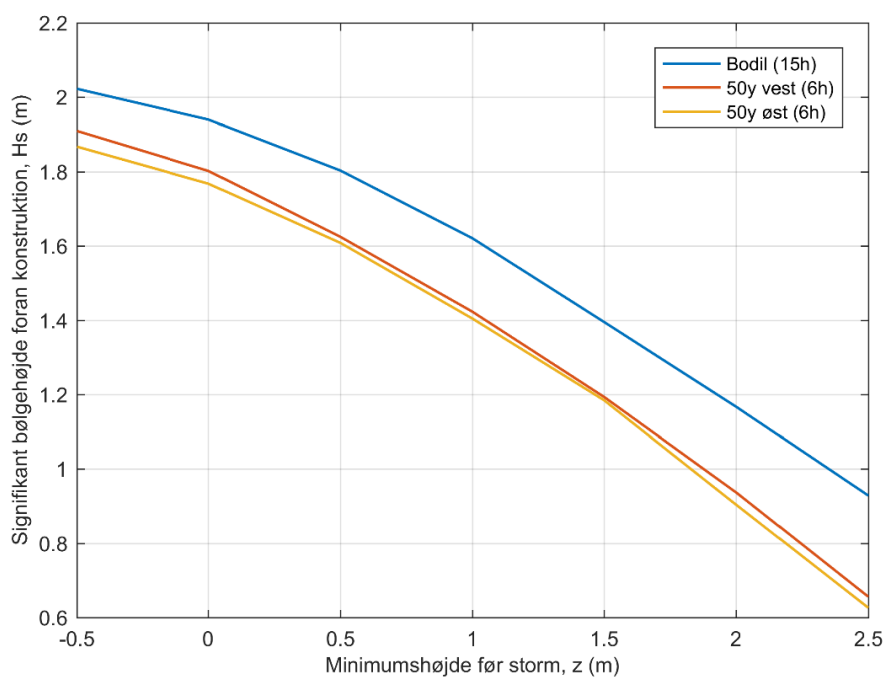
Middelbølgehøjden beregnes ved at midle den øjeblikkelige bølgeenergi over bølgegrupperne over de sidste 3 timer af stormen.

I Tabel 3.21 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 3.21 Signifikant bølgehøjde foran konstruktion.

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.

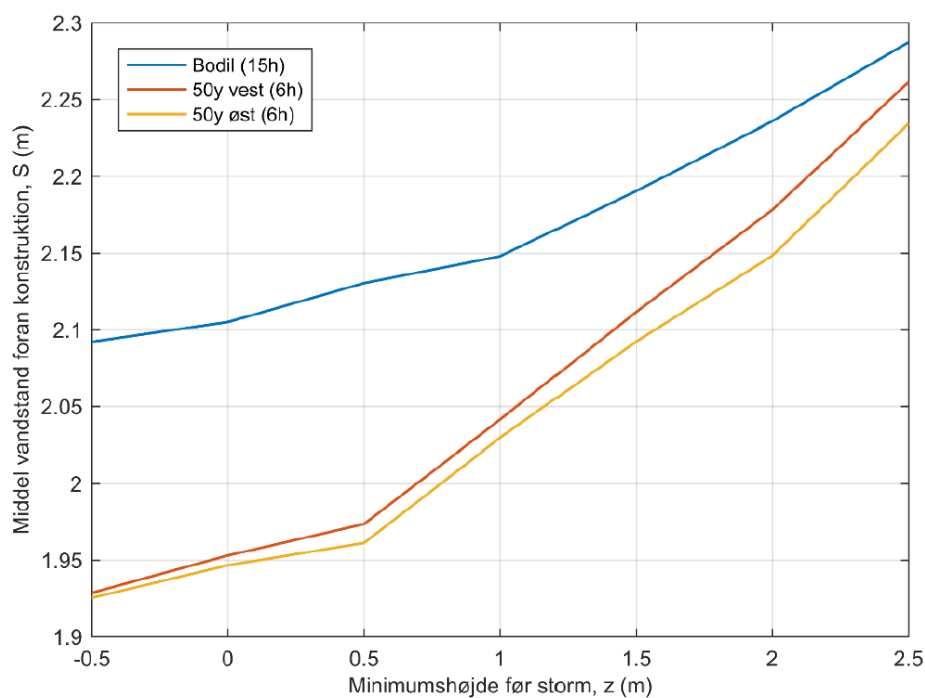


Middelvandstanden er bestemt som gennemsnittet af vandstanden foran konstruktionen over de sidste 3 timer af den voldsomste del af stormen. I Tabel 3.22 og Figur 3.72 er resultatet af middelvandstanden foran konstruktion vist. Det ses, at punktet foran konstruktionen i alle tilfælde er påvirket af bølge-setup pga. kræfterne fra bølgebrydningen, idet alle vandstande er højere end vandstanden på dybt vand.

Tabel 3.22 Middelvandstand foran konstruktionen.

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

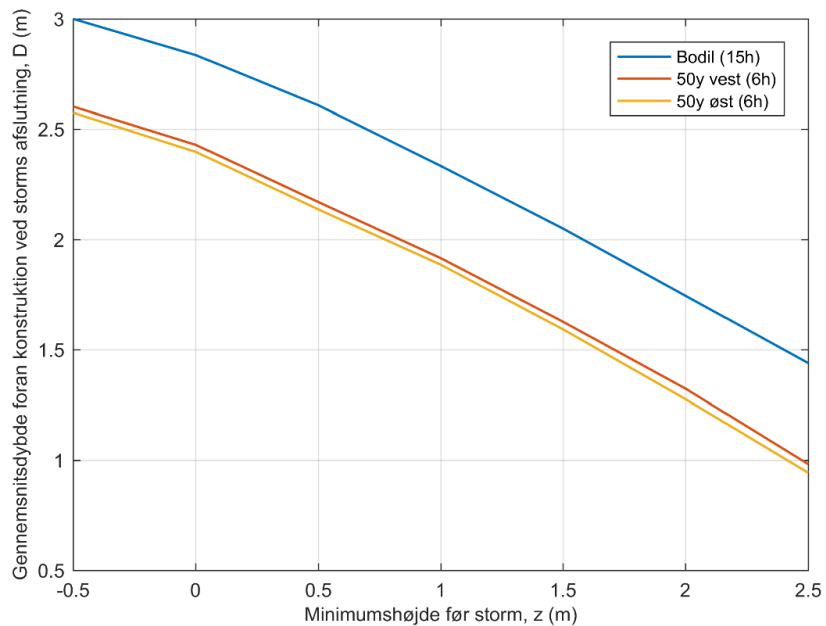


Tabel 3.23 Vandstandens variation om middel angivet som spredningen for de tre stormscenarier.

Variation af vandstand om middel, spredning, dS (m)		
50 års hændelse, Vest	50 årshændelse, Øst	Bodil
0.27	0.25	0.30

Den total 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: Gennemsnitlig vanddybde foran konstruktionen i slutningen af stormen, som funktion højde af stranden foran konstruktionen før stormen.



### 3.2.6 Raltransport på tværs af stranden

#### 3.2.6.1 Akut erosion af ralstrand

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 +2,0m foran en skråningsbeskyttelse er modelleret til cirka 1,1m vest og øst for Gilleleje for en 50 års stormhændelse således, at strandniveauet efter stormen er +0,9 m over dagligt vande.

En ralfodring med tilsvarende beskyttelse mod en 50 års stormhændelse skal derfor kunne sikre en minimumsstrandhøjde under en storm svarende til cirka +0,9m over dagligt vande 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. Dette forhold er ikke vurderet nærmere i denne indledende fase.

Resultaterne af modelleringen af akut erosion af sandstranden viser, at den højeste del af strandprofilen 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 foretages beregningerne ud fra en antagelse om, at højden af ralstranden er +1,2m over dagligt vande foran skråningsbeskyttelserne svarende til en sandstrand på +2,0m over dagligt vande.



### 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 høfder, bølgebrydere og skråningsbeskyttelser. Høfder og bølgebrydere virker ved at fange en del af det sand og ral, som transporteres langs kysten. Derfor kaldes denne form for konstruktioner for passiv kystbeskyttelse. 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, hovedsagelig sand, som tilføres kysten ved erosion af baglandet. Da kystprocesserne i resten af kystprofilen fortsætter, medfører sikringen af kysten med hårde konstruktioner, at den ikke beskyttede del af kystprofilen fortsat eroderes. Dette betyder, at stranden efterhånden forsvinder fra de strækninger, som er beskyttet af hård kystbeskyttelse. Den pågående erosion af kystprofilen 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 tilbagerykning. Herudover fanger høfder og bølgebrydere en del af langstransporten. Dette medfører, at erosionen af kystprofilen og ubeskyttede skråninger nedstrøms for beskyttede strækninger øges tilsvarende. 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 kystprofilen 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. Kysterrosionen 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 kystprofilen som skyldes ubalance i sedimentbudgettet, mens akut erosion er øjeblikkelig erosion i den øvre del af kystprofilen, som sker under stormflodshændelser.

### 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 (langtransporten) 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 langtransporten fanges/oprenses ved havnene og derved mangler øst herfor.

Den omfattende hårde kystbeskyttelse langs Nordkysten i form af skræntfodsbeskyttelse, 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 skråningerne, er der lange strækninger, hvor stranden er blevet smallere, helt forsvundet eller afløst af sten- og ral-strand. 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 kystprofilen, dvs. fra stranden og ud i vandet til ca. 5 m vanddybde. Dette resulterer i, at dybden på strandplanet gradvist bliver større.

### 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 kystprofilen tilbage (bagstrand og skrænterne) og det eroderede materiale føres dels længere ud i kystprofilen og dels langs kysten.

Stormen Bodil 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 skråningerne bagved. 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 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.

### 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 under stormen Bodil 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 nye storme, hverken i dag eller fremover, da vanddybden foran kystbeskyttelses anlæggene 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 kystbeskyttelses anlæggene 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 hofder 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 kysterrosionen 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 skræntfodsbeskyttelserne, 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 kan konkluderes, at det omfattende underskud af sand og ral på Nordkysten ikke kan afhjælpes med hård kystbeskyttelse.**

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.

**Det konkluderes, at 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.**

## 4 Ny lov om kystbeskyttelse

Folketinget har i januar 2018 vedtaget en række ændringer i kystbeskyttelsesloven med virkning fra 1. februar 2018.

I det følgende beskrives de nye lovrammer, som Nordkystens Fremtid skal realiseres indenfor.

Med lovændringen ændres vægtningen i kystbeskyttelseslovens formålsbestemmelse.

Formålet med kystbeskyttelse er at beskytte mennesker og ejendom ved at reducere risikoen for oversvømmelser eller kystnedbrydning fra havet, fjorde eller andre dele af søterritoriet. Dette formål varetages ved en afvejning af en række hensyn, som beskrives i det følgende.

### 4.1 Behovet for kystbeskyttelse

Lovændringen giver mulighed for, at der kan etableres kystbeskyttelse af bl.a. landbrugsarealer, haver mv., da beskyttelsesobjektet udvides.

Ejendom skal nu tolkes meget bredt.

Med lovændringen fjernes kravet om, at der skal være et behov for kystbeskyttelse indenfor en tidshorisont på 25 år.

### 4.2 Økonomiske hensyn

Myndighederne skal fremover ikke foretage en vurdering af, om beskyttelsesobjektet repræsenterer en tilstrækkelig værdi til, at der kan gives tilladelse til etablering af et kystbeskyttelses anlæg.

Ved Kapitel 1a kystbeskyttelsessager over flere ejendomme skal det fortsat afvejes om udgifterne til kystbeskyttelsen står mål med værdien af det som ønskes kystbeskyttet.

### 4.3 Kystbeskyttelsesforanstaltningens tekniske, natur- og miljømæssige kvalitet

Kystbeskyttelsen skal kunne opfylde behovet for beskyttelse.

Hvor der er flere mulige løsninger, skal grundejeren have metodefrihed.

Kystbeskyttelsen må som udgangspunkt ikke påføre læsideerosion.

Der er dog undtagelser på strækninger, som er intensivt beskyttet, hvor der fremover ikke stilles krav om kompenserende foranstaltninger.

Der vil blive stillet krav om kompenserende fodring på ikke intensivt beskyttede kyster.

Kystbeskyttelsen skal opføres af ikke forurenende naturmaterialer afpasset det pågældende sted.

Der er ikke længere krav om at anlægget skal være teknisk optimeret.

Der kan blive stillet krav om hensyn til kystlandskabets bevarelse og den naturlige dynamik.

#### **4.4 Rekreativ udnyttelse af kysten**

Der kan være rekreative forhold, som skal afvejes.

Det skal sikres, at kystbeskyttelsen ikke hindrer adgang til og langs stranden, også på lang sigt.

#### **4.5 Andre forhold af væsentlig betydning for kystbeskyttelse**

Der kan være lokale forhold som skal afvejes. Det kan være kulturarv.

Miljø- og fødevarerministeren kan meddele tilladelse til forsøgsprojekter til afprøvning af virkningen af nye og endnu uprøvede kystbeskyttelsesmetoder, når metoderne har til formål at reducere risikoen for oversvømmelser eller kystnedbrydning fra havet, fjorde eller andre dele af søterritoriet. Tilladelse kan meddeles til en forsøgsperiode på op til 5 år.

Der kan i forbindelse med meddelelse om tilladelse stilles vilkår eksempelvis materialevalg og hensyn til kyststrækningen og til naboer.

#### **4.6 Lovændringens betydning for Nordkystens Fremtid**

Lovændringen kan have betydning for kystbeskyttelsesprojektet på Nordkysten.

Der er ikke krav om kompensationsfodring ved opgradering eller udbygning af hård kystbeskyttelse på intensivt beskyttede kyster.

Dog må ny kystbeskyttelse på ikke intensivt beskyttede kyster ikke skade nabostrækningen.

Passage langs stranden skal sikres.



## 5 Kystplan

### 5.1 Formål med kystteknisk projekt

Formålet med projektet er at beskytte de mange værdier langs Nordkysten mod havet og herunder sommerhusområder, helårsbebyggelse og vejanlæg mm.

Formålet med det kysttekniske projekt er desuden, at Nordkysten skal være beskyttet mod en 50 års hændelse (middeltidshændelse  $MT = 50$  år) de næste 50 år (projektets levetid  $L = 50$  år) frem til år 2070. Dette opnås ved en kombination af skråningsbeskyttelser med sten og løbende strandfodring med sand og ral.

### 5.2 Målsætning for kystteknisk projekt

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)

Projektet forudsætter, at strandfodring og skråningsbeskyttelser kombineres for at skabe den optimale kystbeskyttelse.

Derudover kan der anlægges nye bølgebrydere, høfder, rev eller flak på udsatte strækninger og ved pynter, hvor sand og ral tilført ved strandfodring har svært ved at blive liggende 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.

Myndighedsprojektet omhandler udelukkende den fælles strandfodring over længere strækninger, [18].

Udbygning og renovering af hård kystbeskyttelse skal fremadrettet fortsat varetages af grundejere og kystlag. Strandfodringsprojektet vil kunne indgå som en del af fremtidige ansøgninger om lokal udbygning eller optimering af hård kystbeskyttelse.

Kystbeskyttelsen langs Nordkysten foreslås dimensioneret og vurderet ud fra følgende dimensioneringskriterier for henholdsvis skråningsbeskyttelser og strandfodring, se Tabel 5.1.

Standarden for anbefalede skråningsbeskyttelser på Nordkysten er defineret til at kunne modstå en middeltidshændelse på 50 år med en levetid på 50 år.

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 5.1 Anbefalede dimensioneringskriterier for skråningsbeskyttelser og strandfodring på Nordkysten

Dimensionering	Kystbeskyttelsestype	
	Skråningsbeskyttelse	Strandfodring
Levetid, L	50 år	5 år
Havspejlsscenario	Middel	Middel
Acceptabel risiko, R (sandsynlighed for forekomst af MT indenfor L)	64%	10%
Middeltidshændelse, MT	50 år	50 år

Strandfodring skal sikre, at der skabes og opretholdes en tilstrækkelig høj strand til, at typiske eksisterende skråningsbeskyttelser kan modstå en designhændelse med en returperiode på 50 år i dag og om 50 år.

Den overordnede målsætning for strandfodringen er, at der vedligeholdes en målsat minimumshøjde af stranden foran skråningsbeskyttelserne som beskyttelse mod en designstorm.

Strandfodring vedligeholdes og udbygges 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.

Stranden vil være lidt lavere end den fastsatte målsætning foran fremskudte skråningsbeskyttelser, da stranden vil have et udjævnet forløb langs kysten.

### 5.3 Strategi 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.

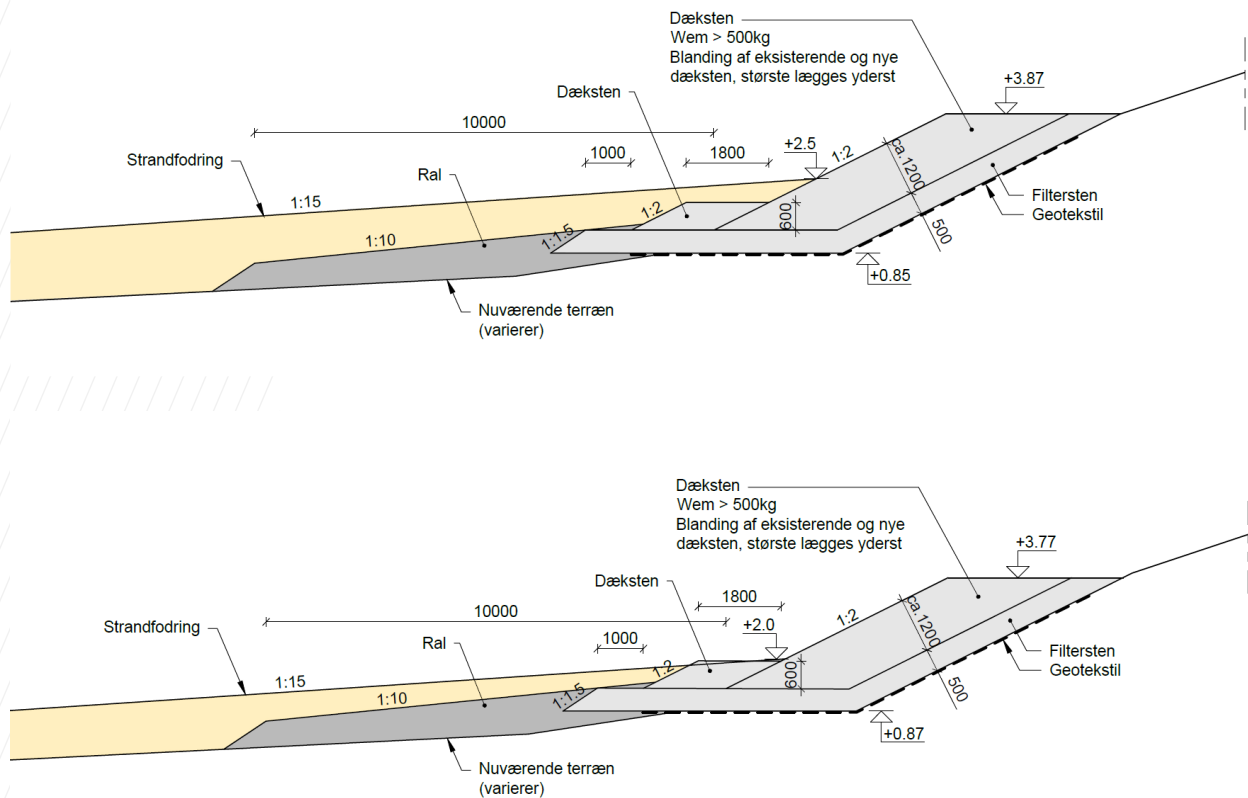
En fortsat udbygning af de hårde anlæg kan ikke standse tilbagerykningen af kystprofilen på Nordkysten med mindre, der samtidig tilføres sand og ral til at bremse den kroniske erosion.

Grundejere og kystlag anbefales at optimere egne skråningsbeskyttelser inden strandfodringen udføres. Figur 5.1 og Figur 5.2 viser principskitser af de anbefalede skråningsbeskyttelser under forudsætning af, at der samtidig strandfodres med anbefalede mængder sand og eller ral.

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

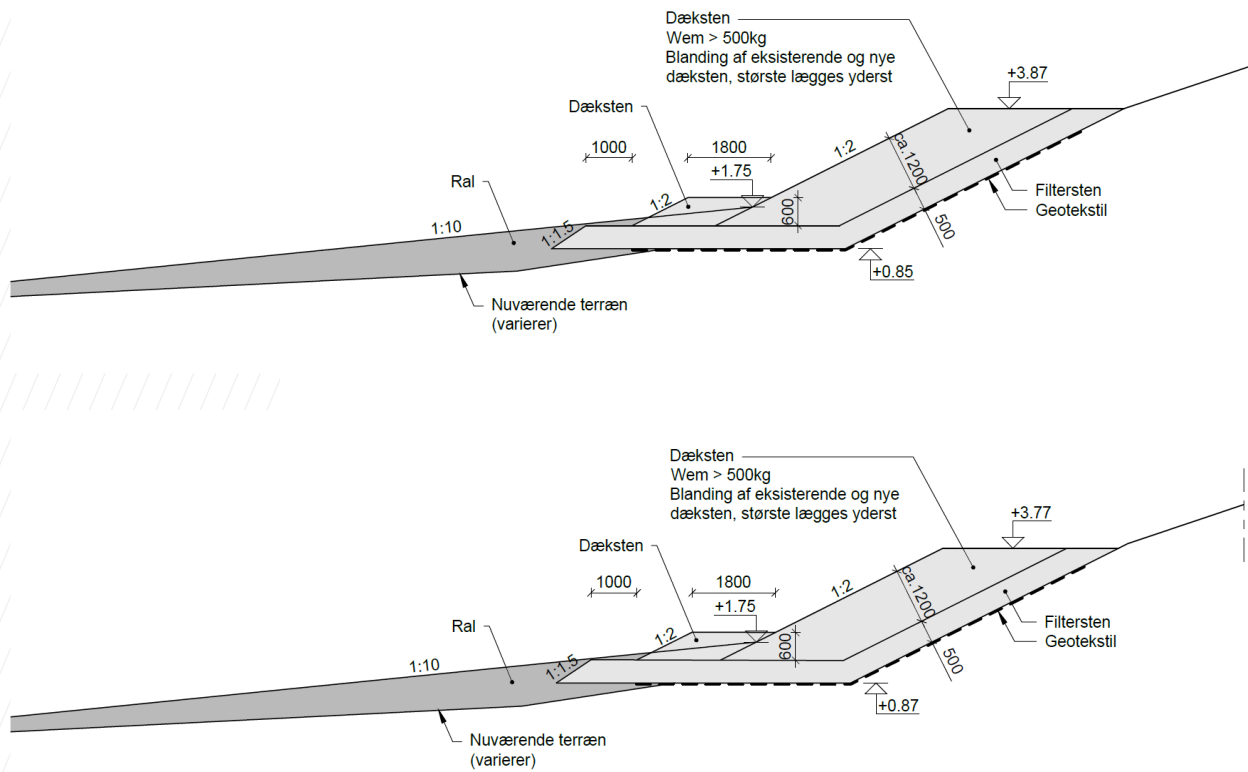
Strandfodringsprojektet (Myndighedsprojekt) indeholder ikke optimering af eksisterende bølgebrydere og høfder, men grundejere og kystlag opfordres til at optimere egne eksisterende konstruktioner inden strandfodringen udføres.

Projektet har identificeret en række kyststrækninger, se Afsnit 3.2.3.9, som med fordel kunne beskyttes med nye eller større konstruktioner som høfder, bølgebrydere, rev eller flak.



Figur 5.1 Principkitser af udlagt sandfodring, ralfodring og skråningsbeskyttelse vest for Gilleleje Havn (øverst) og øst for Gilleleje Havn (nederst)

Erfaringerne viser, at det kan være fordelagtigt at anlægge bølgebrydere, høfder, rev eller flak på strækninger, hvor den kystparallelle sedimenttransport øges over en kort strækning (Hot Spots) og herunder ved pynter, hvor kystlinjen ændrer retning, se Afsnit 3.2.3.9.



Figur 5.2 Principskitser af udlagt ralfodring og skråningsbeskyttelse vest for Gilleleje Havn (øverst) og øst for Gilleleje Havn (nederst)

Figur 5.3 til Figur 5.7 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.

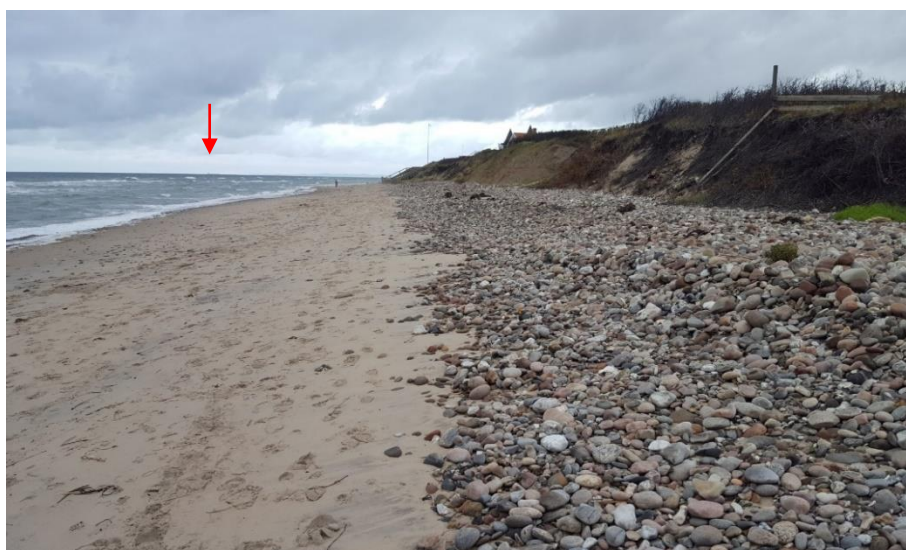
Figur 5.3 Bølgebrydere ved Liseleje.



Figur 5.4 Høfder ved Tisvilde.



Figur 5.5 Sten-rev ved Rågeleje.





Figur 5.6 Sten-flak ved Gilleleje.



Figur 5.7 Sten-flak ved Sjællands Odde.



## 5.4 Strategi for strandfodring

Strandfodring er den væsentligste komponent af kystplanen for Nordkystens Fremtid.

Fodring er den eneste form for kystbeskyttelse, som kan standse erosionen i hele kystprofilet og som kan kompensere for kronisk erosion og havspejlsstigning.

Strandfodring sikrer en langsigtet beskyttelse af Nordkysten med en stabiliserende strand foran skråningsbeskyttelserne.

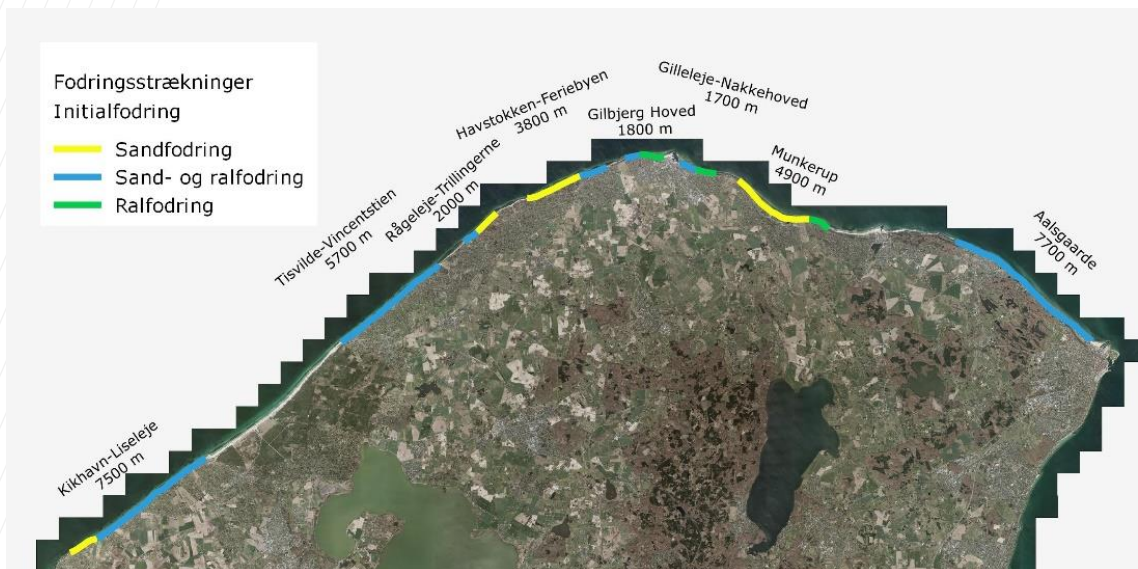
Strandfodring udføres ved udlægning af sand og eller ral på stranden op mod skråningsbeskyttelser og skrænter for at øge den beskyttende virkning.

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

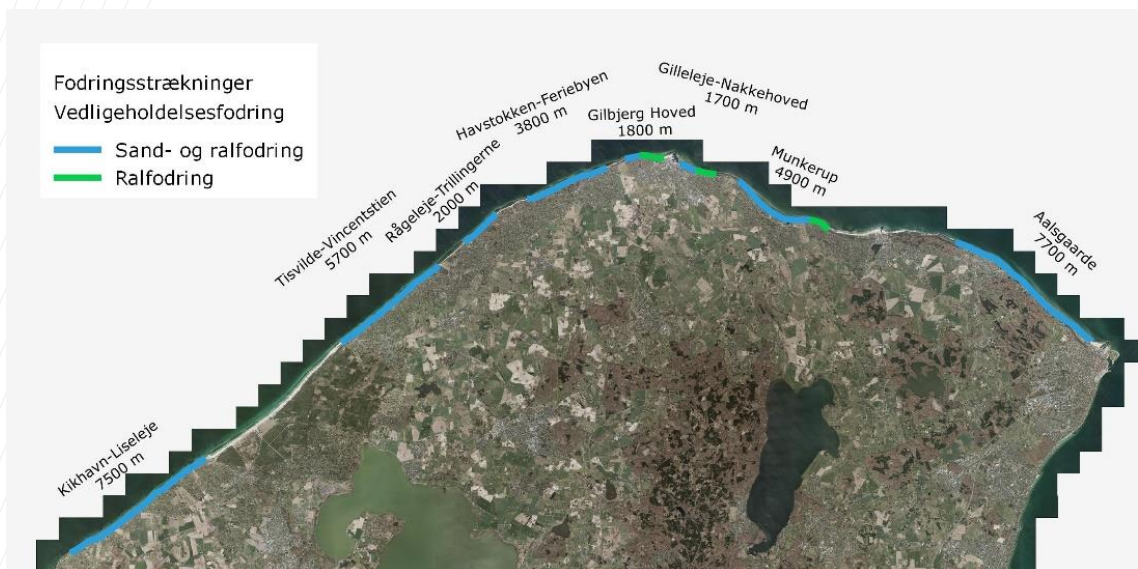
Strandfodringen skaber en buffer mod kysterosion ved søværts fremrykning af strandlinjen og forhøjelse af stranden.

Strandfodringen sikrer mulighed for passage på langs af kysten foran eksisterende hård kystbeskyttelse.

Strandfodring udføres på alle de strækninger, hvor der er bebyggelse ud til kysten, og der således er et kystbeskyttelsesbehov. 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 5.8 og Figur 5.9.



Figur 5.8 Initialfodring



Figur 5.9 Vedligeholdelsesfodring

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 vil kunne øge tilsandingen af havnene langs Nordkysten og herunder specielt Gilleleje Havn og Hornbæk Havn, hvilket behandles nærmere i miljøkonsekvensvurderingen, [1].

Strandfodringerne vil kunne medføre reduceret afstrømning fra udløbene langs Nordkysten i og med, at højden af stranden øges, hvilket behandles nærmere i miljøkonsekvensvurderingen og skitseprojektet for offentlige udløb på Nordkysten, [1] og [2].

Strandfodringerne udføres som sandfodring og eller ralfodring med udgangspunkt i den naturlige sedimentsammensætning på den enkelte strækning og fokuserer på at reducere den potentielle skadevirkning på Natura 2000 område Nr. 195 Gilleleje Flak og Tragten og herunder på udpegningsgrundlagene stenrev og sandbanke.

## **6 Strandfodring under Nordkystens Fremtid**

### **6.1 Formål med myndighedsprojekt**

Formålet med myndighedsprojektet for strandfodring er at øge kystbeskyttelsen af ejendommene langs Nordkysten ved strandfodring med sand og eller ral de kommende 50 år.

### **6.2 Målsætning for myndighedsprojekt**

Den overordnede målsætning for strandfodring i forbindelse med Nordkystens Fremtid er, at der langs udpegede fodringsstrækninger generelt er en beskyttelse foran skrænter og skråningsbeskyttelser svarende til minimum +2,0 m sandstrand i forhold til middelvandstanden før en dimensionsgivende stormhændelse, eller tilsvarende beskyttelsesniveau med ral svarende til minimum +1,2 m.

Opbygning af sand- og ralstrand sker ved strandfodring med sand og eller ral, der tilpasses hver enkelt fodringsstrækning således, at der ikke vil ske forringelse af den nuværende strandkvalitet.

Strandens højde udbygges med sand og eller ral i takt med havspejlsstigningen, hvorved beskyttelsesniveauet opretholdes.

Strandfodringerne skal stoppe tilbagerykning af stranden på fodringsstrækningerne ud for den bebyggede del af Nordkysten.

Strandfodringerne skaber en gennemsnitlig strandbredde på 10-30 meter, som sikrer passage langs kysten.

Strandfodringerne skal sikre en langsigtet og helhedsorienteret beskyttelse af Nordkysten.

### 6.3 Strandfodringsmateriale

Den foreslåede strandfodring består i at tilføre en passende mængde sand og eller ral.

Materialet indvindes på dybt vand ud for kysten med sandsuger. Det vurderes, at sand og ral indvundet på dybt vand er den billigste form for materiale, der kan tilføres kysten, som compensation for den erosion som foregår. Alternativt kan der tilføres ral fra grusgrave, hvilket dog forventes at være dyre.

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. Dette opnås ved grovkornet fodringsmateriale. 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.

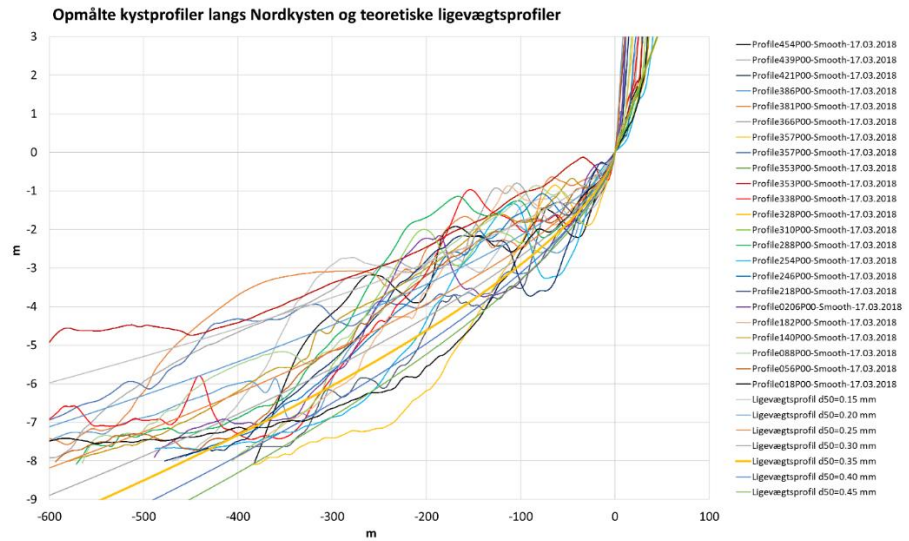
Stabiliteten af strandfodringen øges jo grovere fodringsmaterialet er, og jo større indholdet af ral er.

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.

Figur 6.1 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 ligevægtsprofilen er stejlere end det eksisterende kystprofil. 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  $d_{50} > 0,35\text{mm}$  (fed orange kurve), hvilket også svarer til gennemsnittet af de sandprøver, der er indsamlet på stranden, se Figur 3.8.



Figur 6.1 Sammenligning af udvalgte opmålte kystprofiler langs Nordkysten og teoretiske ligevægtsprofiler med forskellige middeldornstørrelser. X-aksen angiver afstanden søværts for strandlinjen og Y-aksen angiver højden i DVR90



Disse forhold medfører følgende anbefaling til middeldornstørrelsen,  $d_{50}$  af den del af fodringsmaterialet, som består af sand:

- $0,35 \text{ mm} < d_{50} < 0,60 \text{ mm}$ .

Herudover er der et krav til sorteringen af sandfraktionen af fodringsmaterialet. Det anbefales, at sandet skal være sorteret til velsorteret, hvilket udtrykkes ved uensformighedsstallet U:

- $1,5 < U < 3,0$ , 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:

- indholdet af korn med  $d < 0,06 \text{ mm}$  skal 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.

Det anbefales herudover, at der skal være et rimelig indhold af ral ( $20 \text{ mm} < d < 150 \text{ mm}$ ) i fodringsmaterialet, fordi det styrker det nye kystprofil og fordi dette også forekommer på de eksisterende strande langs Nordkysten. Alternativt skal der tilføres ral separat fra indvindingsområde eller grusgrav.

Det tilstræbes at tilpasse ralindholdet i fodringsmaterialet til det naturlige ralindhold på de givne lokaliteter.

Figur 6.2 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 6.2 Eksempel på strand ved Rågeleje som består af sand og ral.



Det bemærkes, at rallen typisk vil 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 lejre sig med tiden.

For at reducere den akutte erosion strandfodres med ral alle de steder, der ikke er ral langs skråningsbeskyttelserne i dag.

Desuden strandfodres med ral alene på udsatte pynter, hvor der er en stor gradient i den kystparallelle sedimenttransport og herved et stort erosionspres for at reducere tabet langs kysten og herunder langs profilstrækningerne Gilleleje, Nakkehoved og Villingebæk, hvor initialfodring og vedligeholdelsesfodring udelukkende består af ral.

Ralfodringerne udføres desuden for, at reducere påvirkningen af kystnære stenrev indenfor Natura 2000 område Nr. 195.

## 6.4 Fodringsstrategi

Strandfodring består af en initialfodring, hvor der udlægges sand og eller ral på stranden op imod skråningsbeskyttelser og skrænter.

Derudover vedligeholdelsesfodres med sand og eller ral hvert 5. år for at kompensere for erosion langs kysten og vandstandsstigningerne de næste 50 år.

### 6.4.1 Initial fodring

Figur 5.8 viser et oversigtskort af initialfodringen med sand og eller ral.

Initialfodring udføres med  $5\text{m}^3/\text{m}$  ral til minimum  $+1,2\text{m}$  for at sikre mod akut erosion de steder, der kun er sandstrand i dag. 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 +1,5m foran skråningsbeskyttelserne mod akut erosion og for at skabe passage langs kysten.

Herover udlægges sand til vedligeholdelse op til +2,5m vest for Gilleleje og +2,0m øst for Gilleleje.

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

Langs profilstrækningerne Gilleleje, Nakkehoved og Villingebæk udføres initialfodring og vedligeholdelsesfodring udelukkende med ral, da strækningerne er beliggende ved markante pynter på kysten, hvor gradienten i langstransporten og dermed den koniske erosion er størst.

Højden af ralstrandene øges til +1,5m de steder, der kun fodres med ral. Herover udlægges ral til vedligeholdelse op til +1,75m over dagligt vande.

Ralstranden etableres med hældning på 1 på 10.

Sandfodring modregnes den mængde ral, der fodres med i profilet.

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 kystprofilen og stabiliserer herved hele kystprofilen også udenfor strækninger med hård kystbeskyttelse. Derudover vil sandet forbedre adgangen langs kysten og øge den rekreative værdi af stranden.

Fodringmaterialet vil forbedre beskyttelsen af eksisterende skråningsbeskyttelser og skråninger bagved betydeligt.

#### **6.4.2 Vedligeholdelsesfodring**

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

Figur 5.9 viser et oversigtskort af vedligeholdelsesfodringerne med sand og eller ral.

Fodringshøjden langs skråningsbeskyttelserne hæves i takt med havspejlsstigningen.

Vedligeholdelsesfodringerne tilfører samme mængde sediment hver gang total set for de enkelte fodringsstrækninger.

Vedligeholdelsesfodring udføres med sand mod kronisk erosion og havspejlsstigning og randeffekter langs alle strækninger undtagen profilstrækningerne Gilleleje, Nakkehoved og Villingebæk, hvor initialfodring og vedligeholdelsesfodring udelukkende består af ral.

Vedligeholdelsesfodring udføres med ral over inderste 10 m af stranden svarende til havspejlsstigningen langs hele kysten.

Sandfodring modregnes den mængde ral, der fodres med i profilet.

Strandfodringerne sikre en langsigtet og helhedsorienteret beskyttelse af Nordkysten.

#### 6.4.2.1 *Kompensation for kronisk erosion og randeffekter*

Størrelsen af vedligeholdelsesfodringerne vil lokalt være afhængig af omfanget af kronisk og akut erosion samt udjævning, som er pågået 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 mulig omfang.

Daglige påvirkninger af kysten medfører, at fodringsmaterialet spredes langs kysten, dvs. at fodringsmaterialet også tilføres ikke fodrede nabostrækninger. Herved sikres at skræntfodsbeskyttelser, bølgebryder 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.

Vedligeholdelsesfodringerne foretages efter løbende opmåling af kysten for at sikre et ensartet sikringsniveau langs kysten.

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. Med tiden vil der ske en opbygning af bagstranden med ral.

Den naturlige sorteringen 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 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. Da det anbefales at fodre med et materiale med betydeligt indhold af ral skal vedligeholdelsesfodringerne optimeres fra gang til gang for at sikre, at der sker en ensartet opbygning af stranden med ral fremover.

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.

#### 6.4.2.2 *Kompensation for havspejlsstigninger*

I projektet indregnes effekten af de forventede globale havspejlsstigninger frem mod år 2070.

Strandens højde udbygges med sand og eller ral i takt med havspejlsstigningen, hvorved beskyttelsesniveauet opretholdes.

Det medfører, at der løbende skal vedligeholdelsesfodres med et ekstra sandbidrag til at øge højden af hele det aktive kystprofil.

Vedligeholdelsesfodring udføres med ral over inderste 10 m af stranden svarende til havspejlsstigningen langs hele kysten.

I og med at klimatilpasningen sker løbende reduceres den initiale fodring til et minimum.

Udgiften til opbygningen af kystprofilen 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.

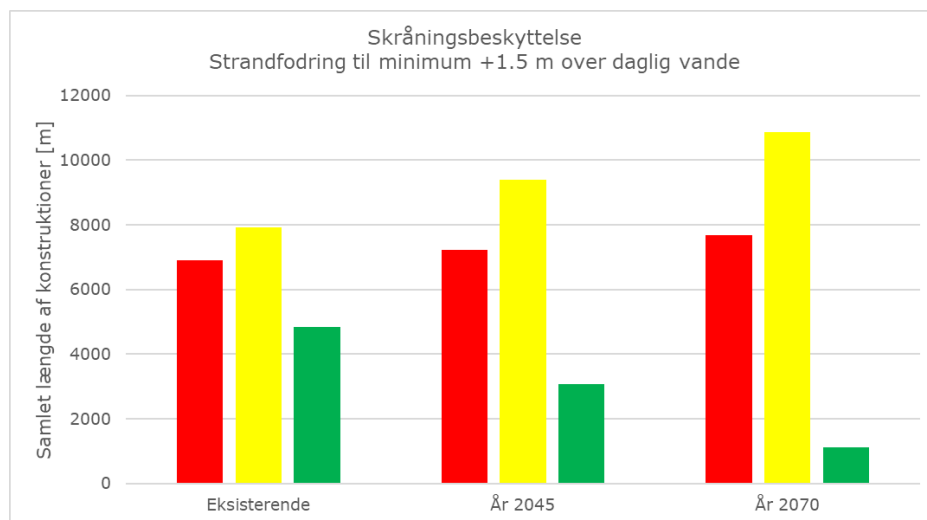
## 6.5 **Tilstandsvurdering af hård kystbeskyttelse med sandfodring**

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

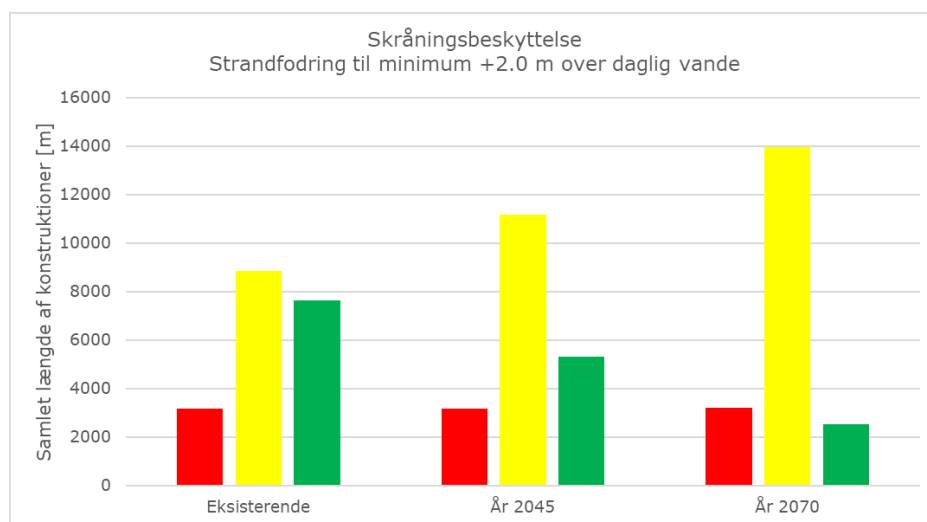
Strandfodringerne medfører, at bølgepåvirkningen af den hårde kystbeskyttelse reduceres betydeligt generelt set.

Sammenlignes Figur 6.3 med Figur 3.39 ses en tydelig reduktion af længden af skråningsbeskyttelser vurderet til Rød tilstand i dag. 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.



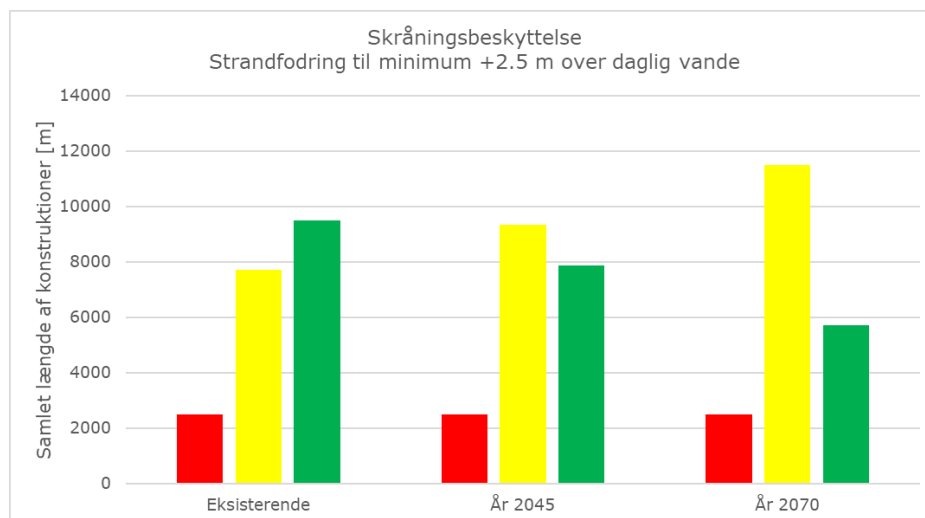
Figur 6.3 Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser med sandfodring foran til minimum +1,5 m over daglig vande.

Øges minimumshøjden af stranden til +2,0 og +2,5 m over daglig vande vurderes en større andel af skråningsbeskyttelserne til Grøn tilstand, se Figur 6.4 og Figur 6.5.



Figur 6.4 Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser med sandfodring foran til minimum +2,0 m over daglig vande.





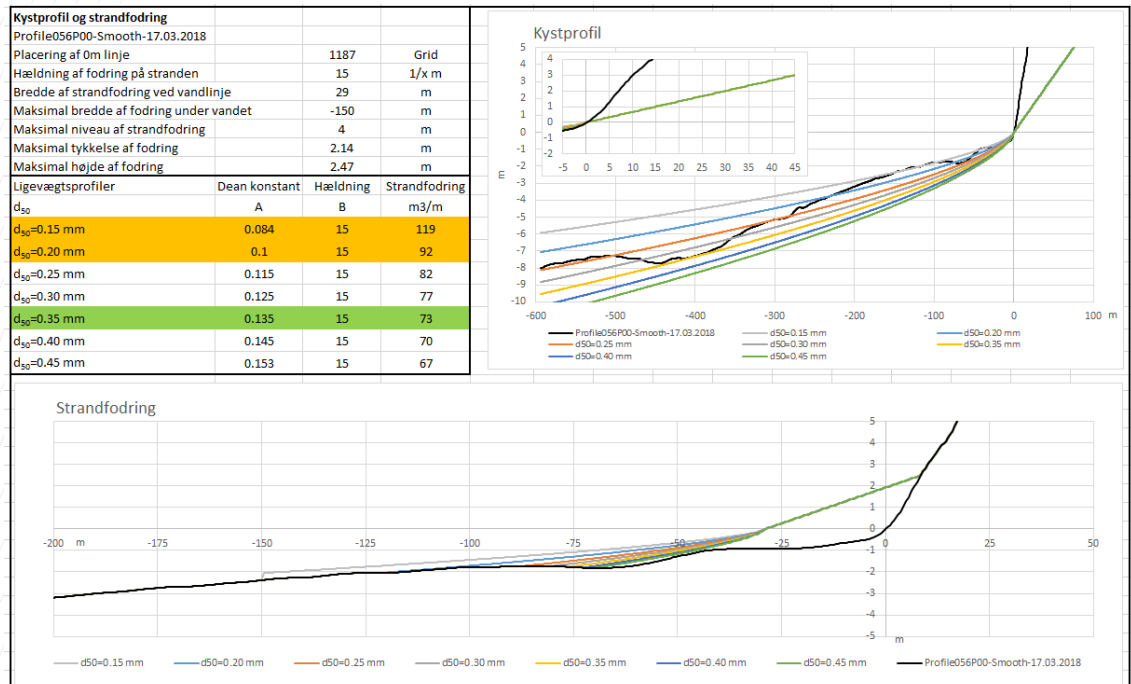
Figur 6.5 Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser med sandfodring foran til minimum +2,5 m over daglig vande.

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

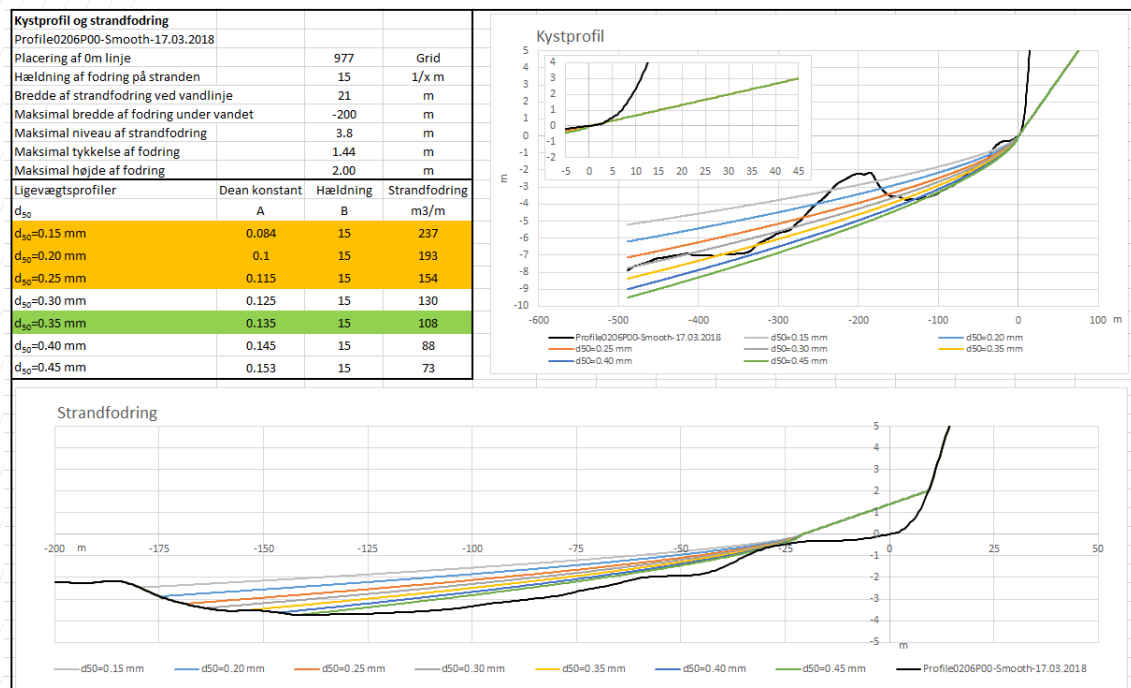
## 6.6 Sandfodringsmængder

Indledningsvist er de nødvendige strandfodringsmængder beregnet for 21 kystprofiler langs Nordkysten med strandhøjder på minimum +1,5m, +2,0m og +2,5m sand foran skråningsbeskyttelserne for ligevægtskystprofiler med middeldkornstørrelser på  $0,15 \text{ mm} < d_{50} < 0,45 \text{ mm}$ . Strandens hældningen over middelvandstanden er bestemt til 1:15 i gennemsnit for det foreslåede fodringmateriale.

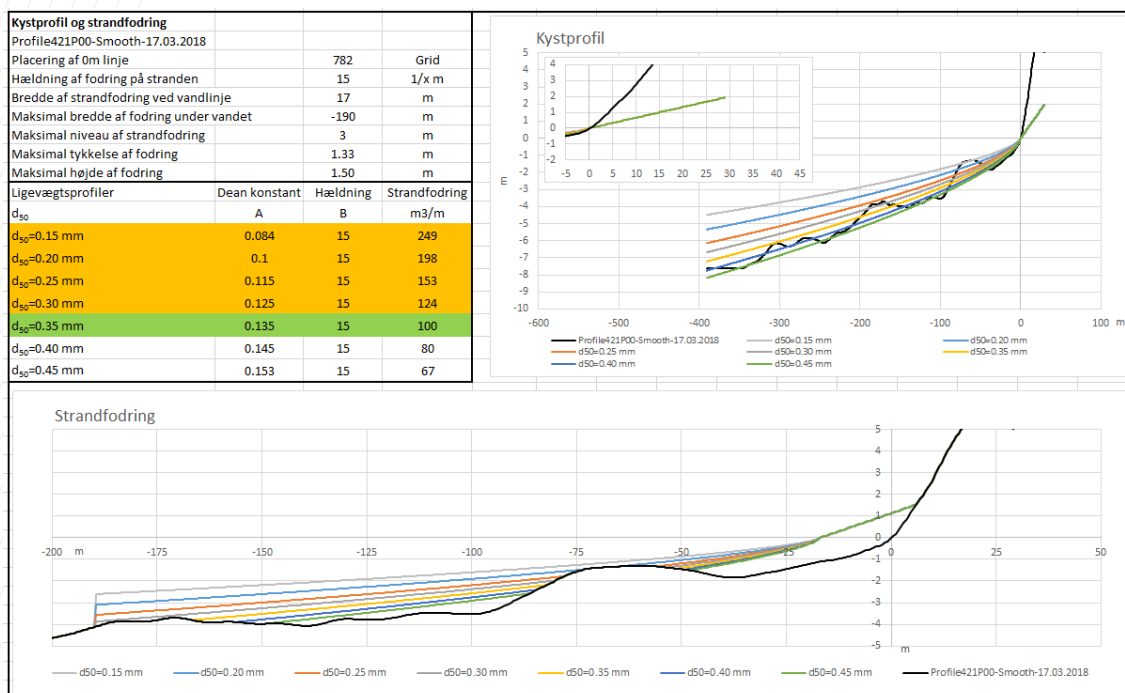
Figur 6.6, Figur 6.7 og Figur 6.8 viser eksempler på variationen i sandfodringsmængderne ved Hald Strand, Vejby og Ålsgårde som funktion af eksisterende kystprofil, middeldkornstørrelse af fodringssandet og minimums højden af stranden foran skråningsbeskyttelserne.



Figur 6.6 Sandfodningsmængder for minimumshøjde af stranden foran skråningsbeskyttelserne på +2,5m ved Hald Strand.



Figur 6.7 Sandfodningsmængder for minimumshøjde af stranden foran skråningsbeskyttelserne på +2,0 m ved Vejby.



Figur 6.8 Sandfodningsmængder for minimumshøjde af stranden foran skråningsbeskyttelserne på +1,5m ved Ålsgårde.

Tabel 6.1 viser de totale sandfodningsmængder for de foreslåede fodringsstrækninger, der er nødvendig for at sikre en minimumshøjde af sandstranden på +1,5m, +2,0m og +2,5m foran skråningsbeskyttelserne før en designstorm for forskellige middeldkornstørrelser for sand.

Strandfodningsbuffer foran skråningsbeskyttelser, m	1.5	2	2.5
Strandfodningsbuffer, m <sup>3</sup> $d_{50}=0.15$ mm	2,900,000	3,500,000	4,300,000
Strandfodningsbuffer, m <sup>3</sup> $d_{50}=0.20$ mm	2,100,000	2,700,000	3,500,000
Strandfodningsbuffer, m <sup>3</sup> $d_{50}=0.25$ mm	1,500,000	2,100,000	3,000,000
Strandfodningsbuffer, m <sup>3</sup> $d_{50}=0.30$ mm	1,300,000	1,900,000	2,700,000
Strandfodningsbuffer, m <sup>3</sup> $d_{50}=0.35$ mm	1,100,000	1,600,000	2,400,000
Strandfodningsbuffer, m <sup>3</sup> $d_{50}=0.40$ mm	900,000	1,500,000	2,300,000
Strandfodningsbuffer, m <sup>3</sup> $d_{50}=0.45$ mm	800,000	1,300,000	2,100,000

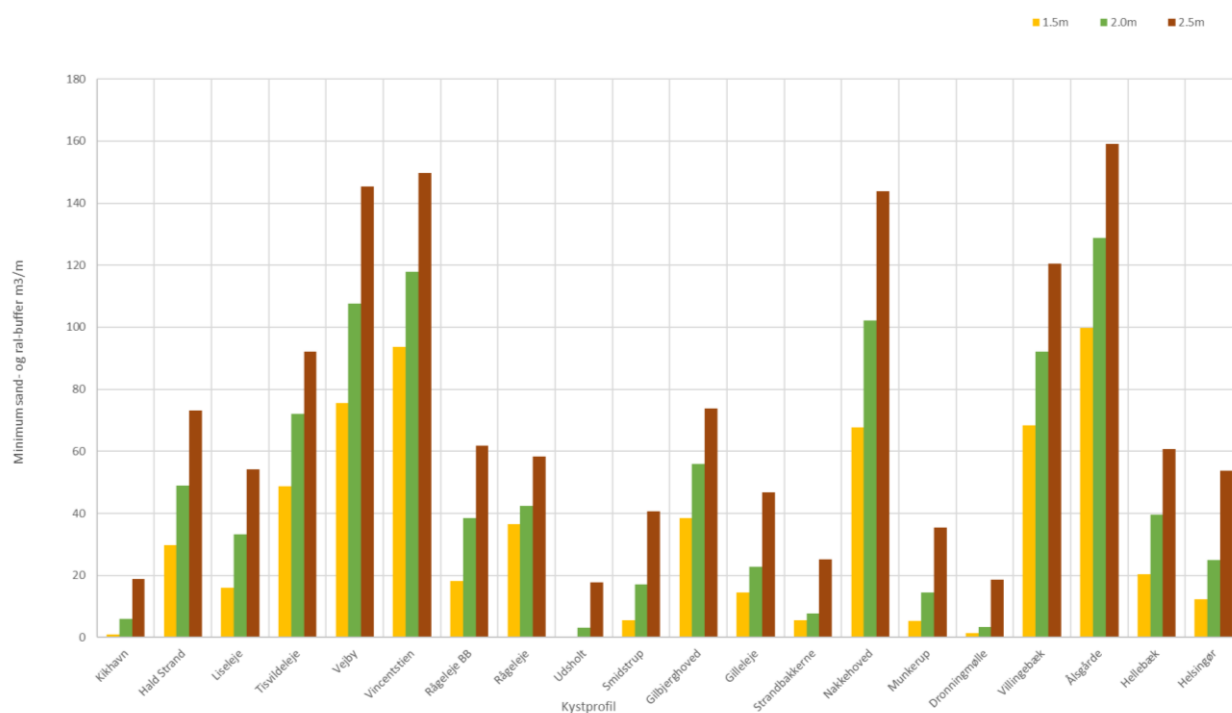
Tabel 6.1 Sandfodningsmængder for foreslåede fodringsstrækninger (buffer mod akut erosion)

Orange tal viser, at sandfodningsmængden er betydelig større, når der benyttes finere sand, hvilket ikke kan anbefales. Grønne tal viser fodringsmængder for det mest finkornede fodringsmateriale, der kan anbefales.

Ud fra analyse af 21 kystprofiler og indsamlede sedimentprøver er det vurderet, at sandfraktionen af fodringsmateriale skal have en middeldkornstørrelse på  $0,35 \text{ mm} < d_{50} < 0,6 \text{ mm}$  for at skabe et tilstrækkeligt stejlt ligevægtskystprofil til, at sandet i videst mulig omfang bliver inde ved og på stranden og i mindst mulig omfang flyttes ud på dybere vand.

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.

Analysen af kystprofiler har vist, at der er stor variation i den nødvendige strandfodningsmængde langs kysten, se Figur 6.9. Generelt vil den nødvendige strandfodningsmængde stige betydeligt, når minimumshøjden af stranden foran skråningsbeskyttelserne øges.



Figur 6.9 Variation i sandfodningsmængde langs Nordkysten som funktion af minimumshøjden af stranden foran skråningsbeskyttelserne for sand med  $d_{50}=0,35$  mm.

Baseret på analyserne af sandfodningsmængderne og tilstandsvurderingerne for hård kystbeskyttelse er det besluttet, at der arbejdes videre med en målsætning om en minimum strandhøjde foran skråningsbeskyttelserne på +2,0m sand over dagligt vande, som beskyttelse mod akut erosion i forbindelse med en designstorm.

Der kan være enkelte fremskudte konstruktioner eller ved pynter, hvor det kan vise sig at være svært at opretholde denne målsætning og det derfor er nødvendige på sigt at optimere eller anlægge nye konstruktioner til at stabilisere stranden.

Figurerne i det følgende er baseret på en fodningsmængder svarende til en minimumsstrandhøjde på +2,0m sand over dagligt vande foran skråningsbeskyttelserne.

Strandfodring skal vedligeholdes for at opretholde den ønskede beskyttelse langs fodringsstrækningerne, da der løbende sker omlejring af sand på langs og på tværs af kysten.

Vedligeholdelsesbehovet varierer fra strækning til strækning som følge af:

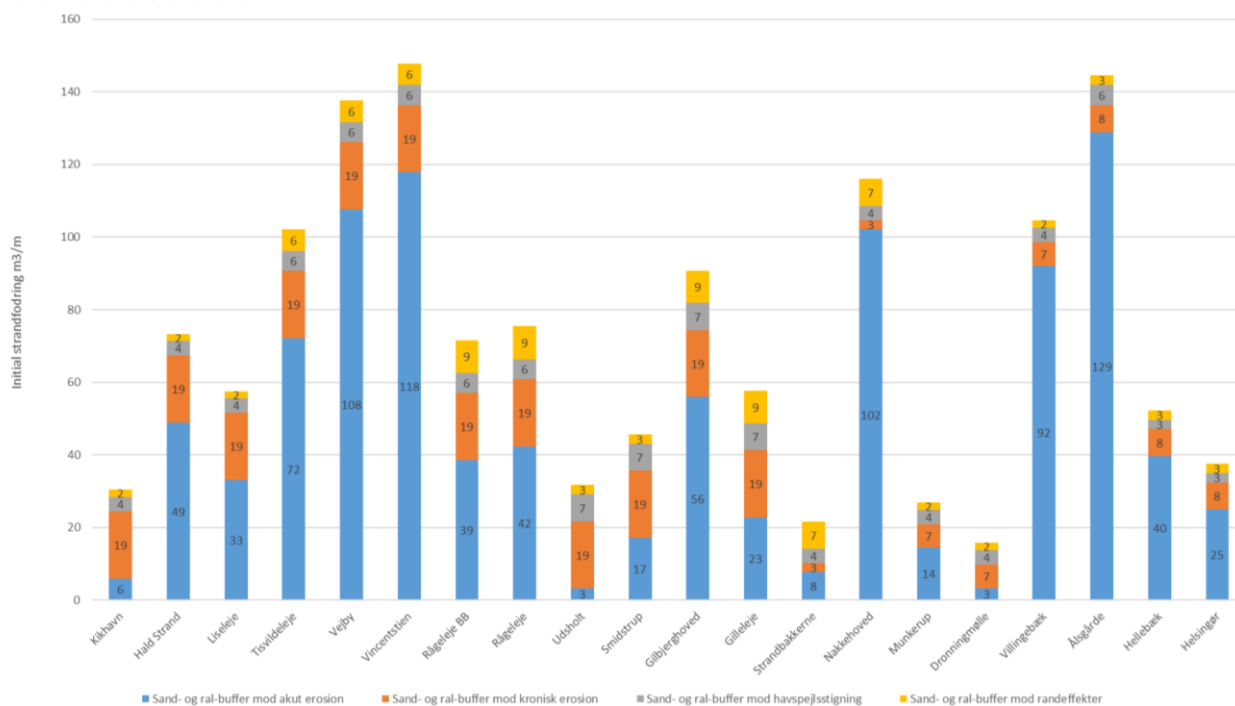
- Kroniske erosion
- Havspejlsstigning og aktiv dybde
- Randeffekter ved enderne af fodringsstrækningerne
- Akut erosion

Figur 6.10 viser fordelingen af fodringsmængder, som initialstrandfodringen består af for hvert enkelt kystprofil. Figuren viser, at initialfodringen varierer mellem 15 og 150 m<sup>3</sup>/m sand.

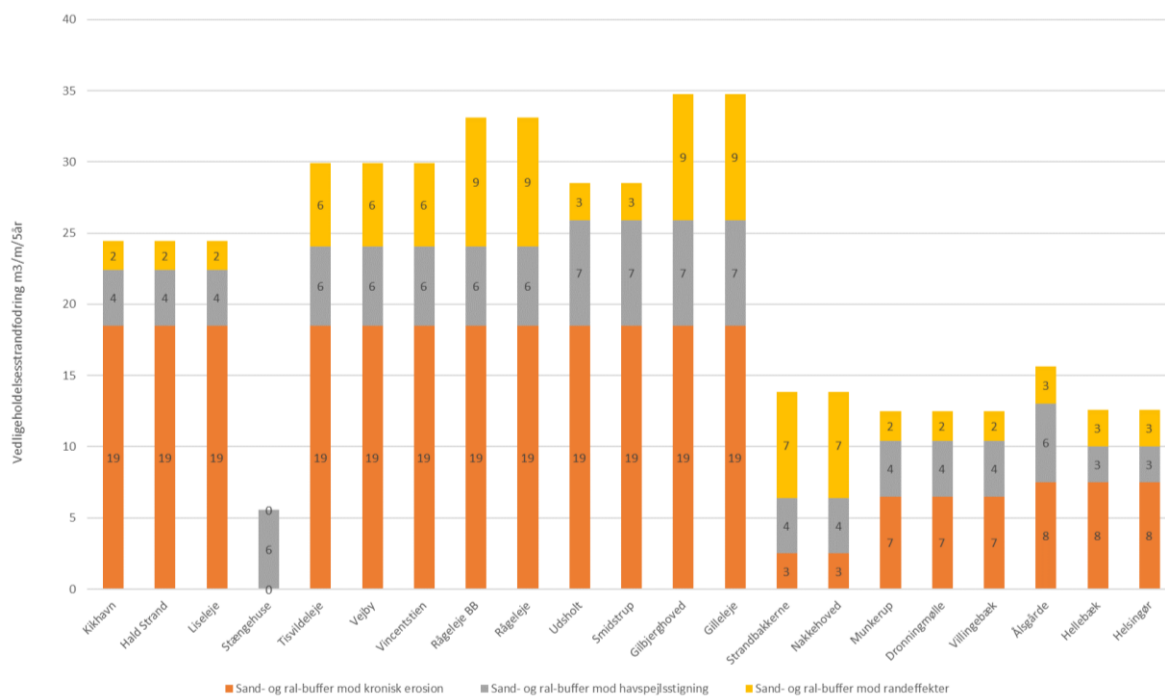
Figur 6.11 viser fordelingen af fodringsmængder, som vedligeholdelsesfodringen består af for hvert enkelt kystprofil. Figuren viser, at vedligeholdelsesfodringen varierer mellem 13 og 35 m<sup>3</sup>/m/5 år sand.

Figur 6.12 viser fordelingen af fodringsmængder, som initialstrandfodringen består af for hver enkelt fodringsstrækning. Figuren viser, at initialfodringen varierer mellem 100.000 og 700.000 m<sup>3</sup> sand.

Figur 6.13 viser de enkelte delmængder vedligeholdelsesfodringen består af for hver enkelt fodringsstrækning. Vedligeholdelsesfodringen varierer mellem 25.000 og 180.000 m<sup>3</sup>/5 år sand.

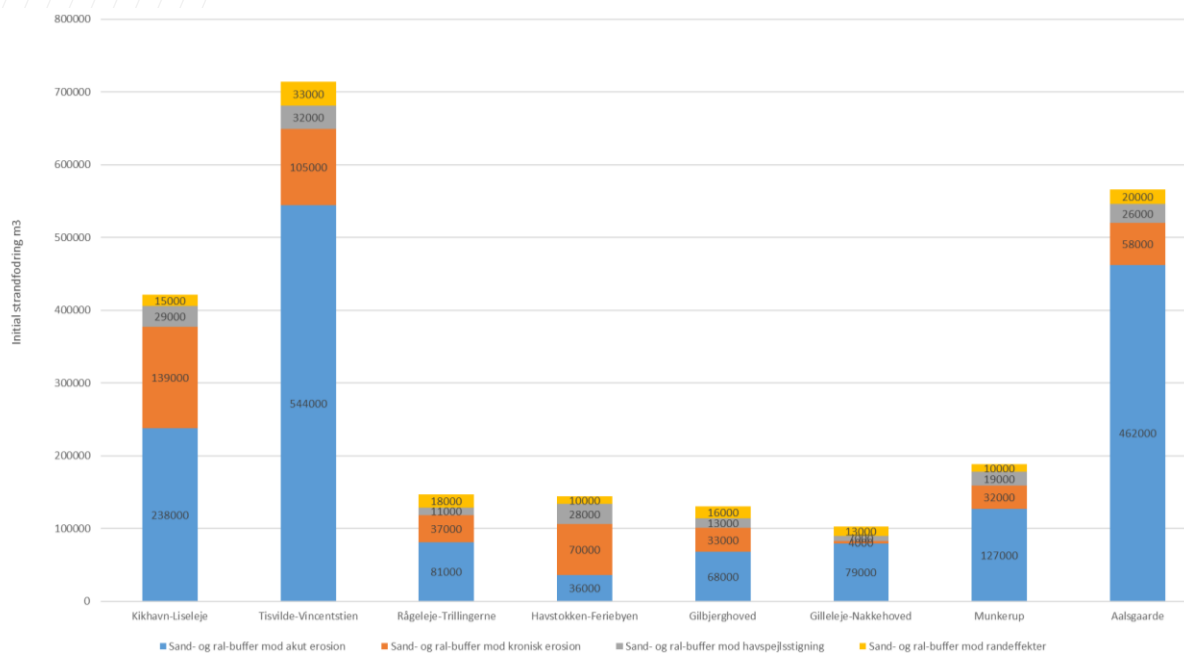


Figur 6.10 Variation af initial strandfodningsmængder med sand for hver kystprofil.

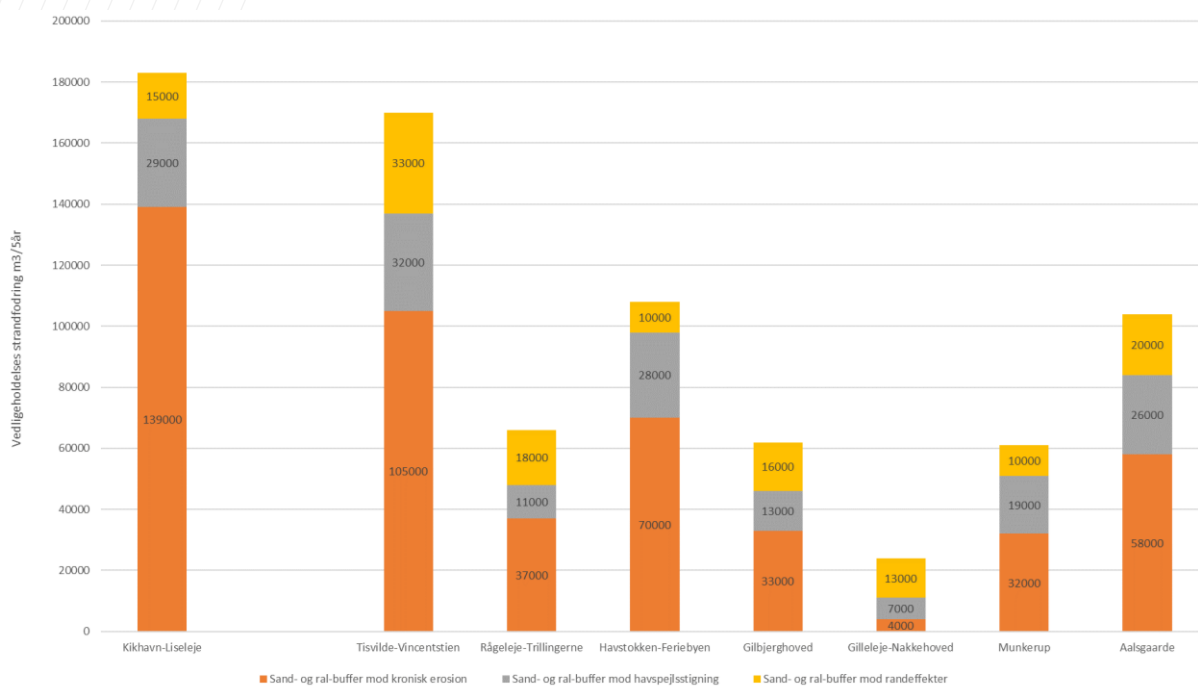


Figur 6.11 Variation af vedligeholdelsesstrandfodningsmængder med sand for hver kystprofil.





Figur 6.12 Initial strandfodringsmængder med sand for hver fodringsstrækning.



Figur 6.13 Vedligeholdelsesstrandfodringsmængder med sand for hver fodringsstrækning.

Tabel 6.2 viser den samlede opgørelse af initialfodring og vedligeholdelsesfodring med sand for de enkelte fodringsstrækninger for en fodringsmængde svarende til en minimums strandhøjde på +2,0m sand foran skråningsbeskyttelser til beskyttelse mod en designstorm.

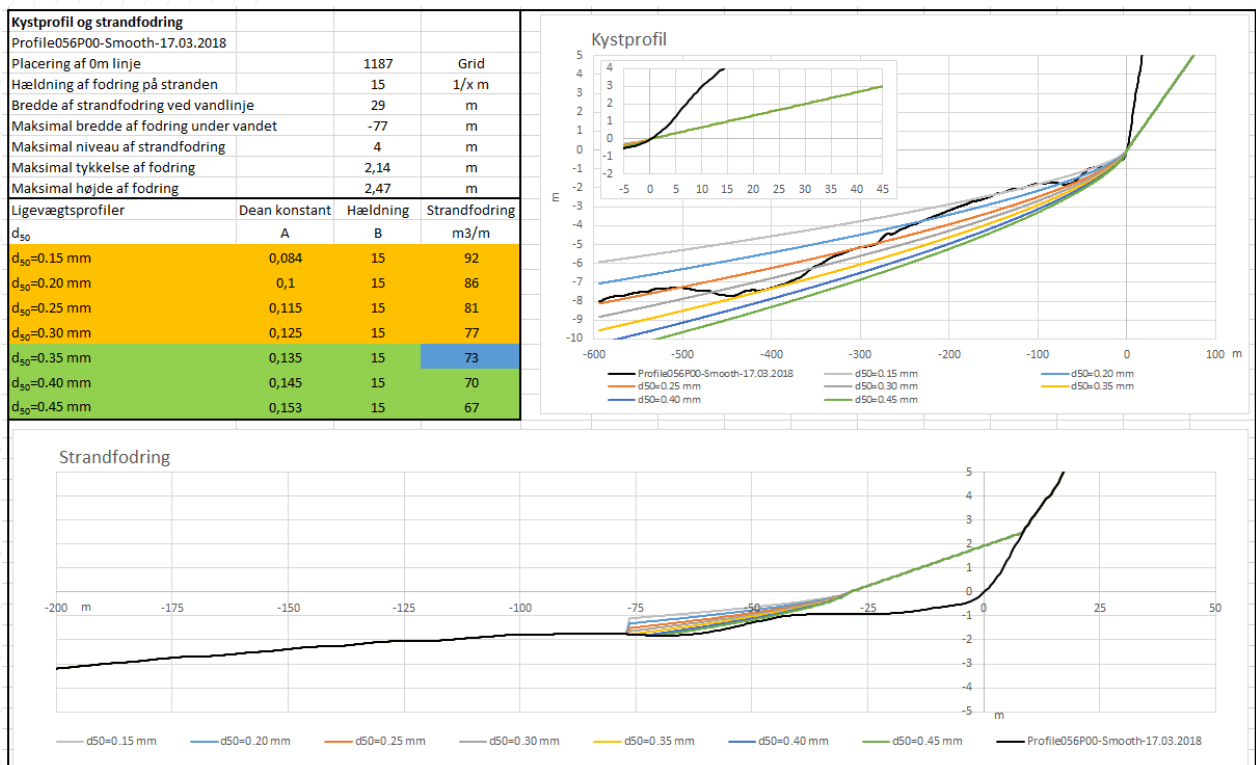
		Kikhavn-Liseleje	Tisvilde-Vincentstien	Rågeleje-Trillingerne	Havstokke-Feriebyen	Gilbjerg hoved	Gilleleje-Nakkehoved	Munkerup	Aalsgaarde	I alt
<b>Strandfodringsmængder</b>										
Sand- og ral-buffer mod akut erosion	m <sup>3</sup>	238.000	544.000	81.000	36.000	68.000	79.000	127.000	462.000	
Sand- og ral-buffer mod kronisk erosion	m <sup>3</sup> /5år	139.000	105.000	37.000	70.000	33.000	4.000	32.000	58.000	
Sand- og ral-buffer mod havspejlsstigning	m <sup>3</sup> /5år	29.000	32.000	11.000	28.000	13.000	7.000	19.000	26.000	
Sand- og ral-buffer mod randeffekter	m <sup>3</sup> /5år	15.000	33.000	18.000	10.000	16.000	13.000	10.000	20.000	
Initialfodring	m <sup>3</sup>	421.000	714.000	147.000	144.000	130.000	103.000	188.000	566.000	2.400.000
Vedligeholdelsesfodring	m <sup>3</sup> /5år	183.000	170.000	66.000	108.000	62.000	24.000	61.000	104.000	780.000

Tabel 6.2 Initialfodring og vedligeholdelsesfodring med sand for fodringsstrækningerne

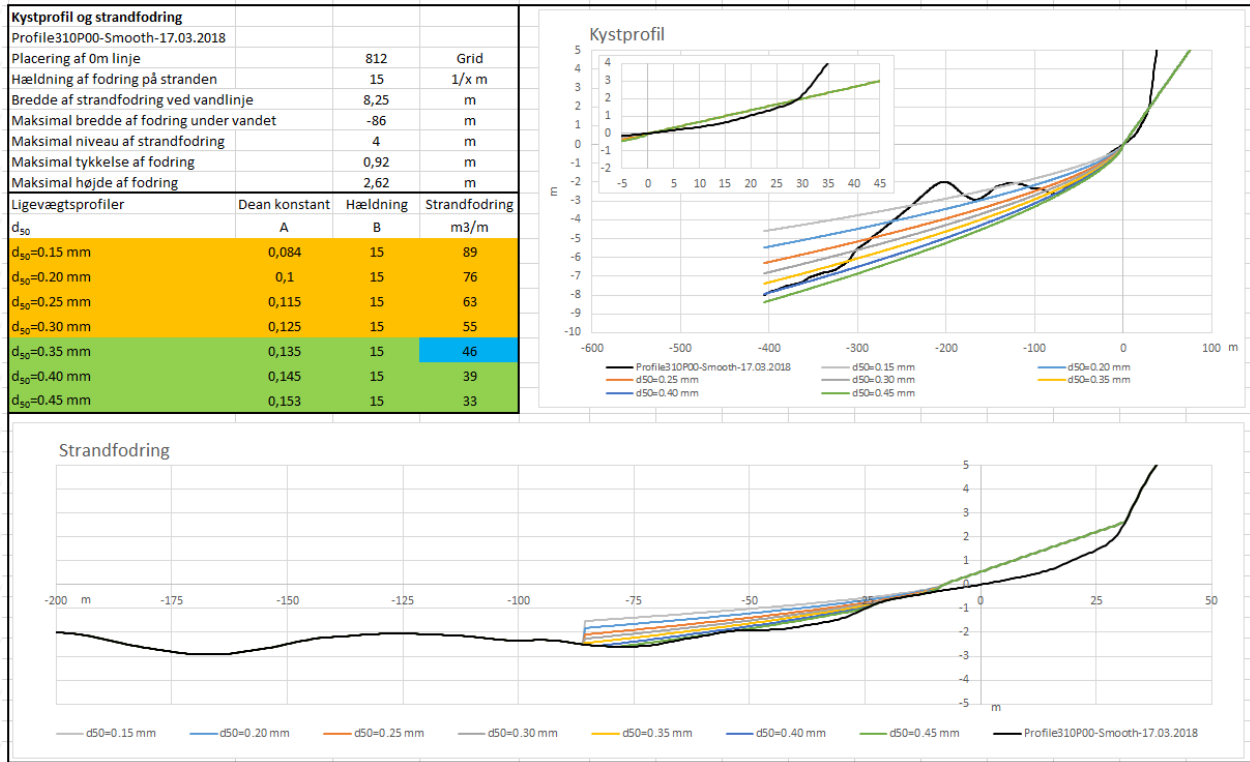
Samlet set er initialfodringen på 2.400.000 m<sup>3</sup> sand.

Der foretages herefter vedligeholdelsesfodring hvert 5. år med en samlet mængde på 780.000 m<sup>3</sup>/5år sand.

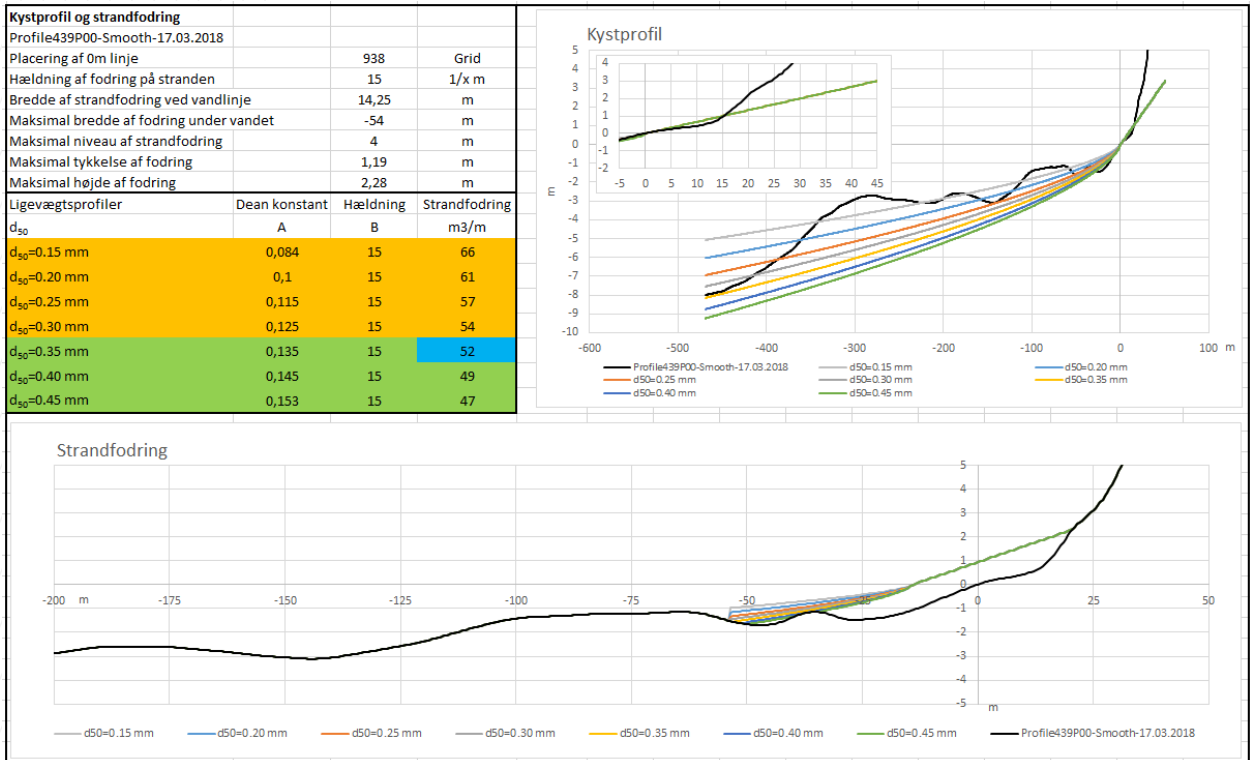
Figur 6.14, Figur 6.15 og Figur 6.16 viser initiale strandfodringsprofiler, som indeholder alle bidrag og herunder buffer mod akut erosion (minimumshøjde foran skråningsbeskyttelser på +2,0m sand før designstorm), vedligeholdelse mod kronisk erosion, havspejlsstigning og randeffekter, som præsenteret i Figur 6.10.



Figur 6.14 Initial sandfodringsmængde og initial strandprofil ved Hald Strand



Figur 6.15 Initial sandfodningsmængde og initial strandprofil ved Smidstrup



Figur 6.16 Initial sandfodningsmængde og initial strandprofil ved Hellebæk

Højden af sandstranden er fastlagt ud fra initialfodringmængden markeret med blå for sand med  $d_{50}=0,35\text{mm}$ .

Beregningerne af højden af den initiale sandfodring er foretaget parallelt for alle 21 kystprofiler.

Ud fra beregningerne skal stranden foran skråningsbeskyttelserne opbygges til +2,75m i forhold til daglig vande vest for Gilleleje Havn og op til +2,25m i forhold til daglig vande øst for Gilleleje Havn, når der strandfodres med sand alene. Højderne gælder både for initialfodringen og efterfølgende vedligeholdelsesfodringer.

## 6.7 Visualiseringer af sandfodring

Initialsandfodringen udlægges foran skråningsbeskyttelser og skråninger op til +2,75m DVR90 langs fodringsstrækningerne vest for Gilleleje Havn og op til +2,25m DVR90 øst for Gilleleje Havn.

Figur 6.17, Figur 6.18 og Figur 6.19 viser visualiseringer af eksisterende forhold, initialfodring og stormprofil ved Hald Strand, vest for Feriebyen i Smidstrup og i Ålsgårde.

Visualiseringerne viser forholdene, når der udelukkende strandfodres med sand.



Nordkystens Fremtid, visualisering 01.07.2019

Standpunkt 03, Hald Strand v/Kirkevej

eksisterende forhold



Nordkystens Fremtid, visualisering 01.07.2019

Standpunkt 03, Hald Strand v/Kirkevej

hærdige turst



Nordkystens Fremtid, visualisering 01.07.2019

Standpunkt 03, Hald Strand v/Kirkevej

hærdige forhold, stormsvik

Figur 6.17 Visualiseringer af strand og forstærkning af skråningsbeskyttelser ved Hald Strand. Øverst: eksisterende forhold, midten: efter initial sandfodring, nederst: efter designstorm



Nordkystens Fremtid, visualisering 01.07.2019

Standpunkt 08, Feriebyen

eksisterende forhold



Nordkystens Fremtid, visualisering 01.07.2019

Standpunkt 08, Feriebyen

heridags forhold



Nordkystens Fremtid, visualisering 01.07.2019

Standpunkt 08, Feriebyen

heridags forhold, stormbrak

Figur 6.18 Visualiseringer af strand og forstærkning af skråningsbeskyttelser ved Smidstrup, vest for Feriebyen. Øverst: eksisterende forhold, midten: efter initial sandfodring, nederst: efter designstorm





Figur 6.19 Visualiseringer af strand og forstærkning af skråningsbeskyttelser ved Ålsgårde. Øverst: eksisterende forhold, midten: efter initial sandfodring, nederst: efter designstorm

## 6.8 Tilstandsvurdering af hård kystbeskyttelse med sandfodring og ralfodring

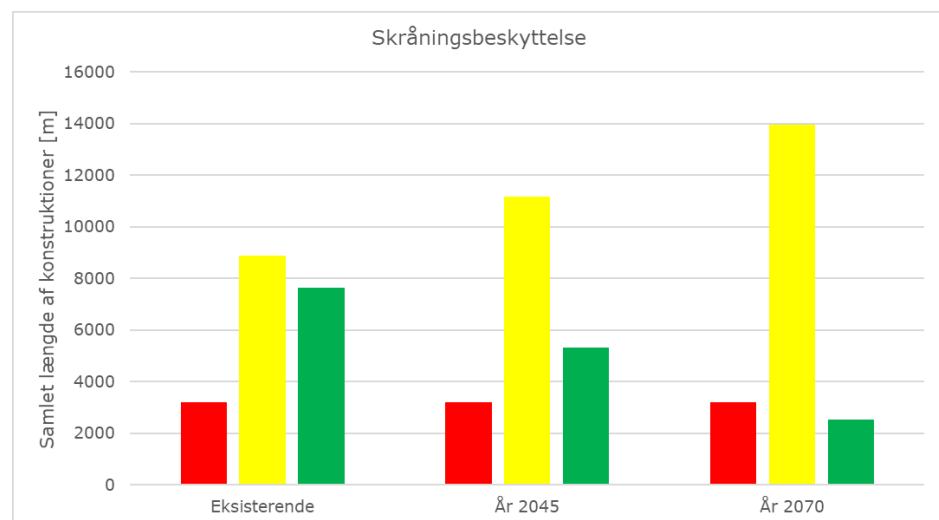
Strandfodringen er optimeret til at inkludere sand og ral som beskrevet i Afsnit 6.4:

- Initialfodring udføres med 5m<sup>3</sup>/m ral til minimum +1,2m for at sikre mod akut erosion de steder, der kun er sandstrand i dag.
- Sandfodring udføres til +1,5m foran skråningsbeskyttelserne mod akut erosion og for at skabe passage langs kysten.
- Herover udlægges sand til vedligeholdelse op til +2,5m vest for Gilleleje og +2,0m øst for Gilleleje.
- Højden af ralstrandene øges til +1,5m de steder, der kun fodres med ral. Herover udlægges ral til vedligeholdelse op til +1,75m over dagligt vande.

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 reduceres betydeligt generelt set.

Sammenlignes Figur 6.20 med Figur 3.39 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 %. Fremadrettet vil andelen af Gul tilstandsvurdering stige samtidig med, at andelen af Grøn tilstandsvurdering vil falde efterhånden som havet stiger.



Figur 6.20 Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser med sandfodring og ralfodring.

## 6.9 Sand- og ralfodringsmængder

Strandfodringen er optimeret til at inkludere sand og ral som beskrevet i Afsnit 6.4. Beregningerne af fodringsmængderne for de 21 anvendte kystprofiler er herefter opdateret og præsenteres i det følgende.

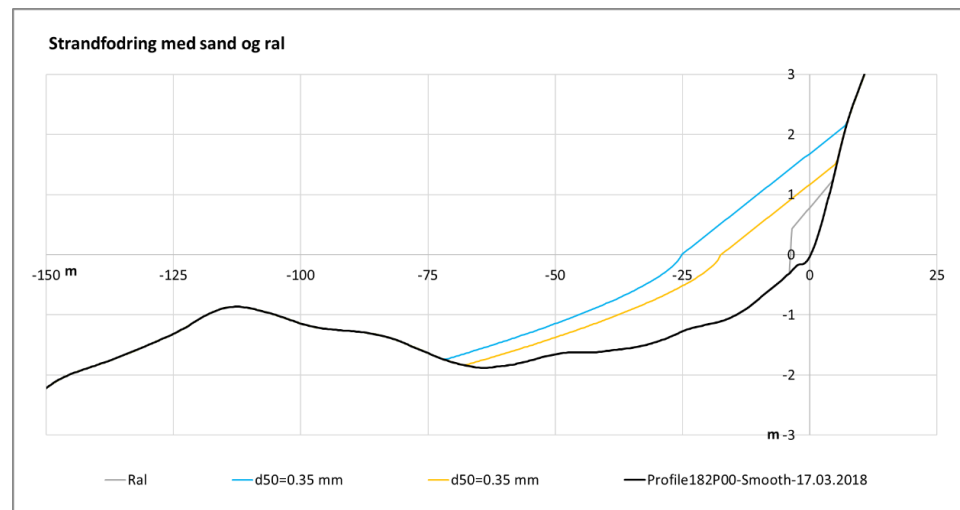
Beregningerne i det følgende er baseret på fodring med sand med en middeldkornstørrelse på  $d_{50}=0,35$  mm, hvilket er konservativt i forhold til, hvis der fodres med grovere sand.

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:

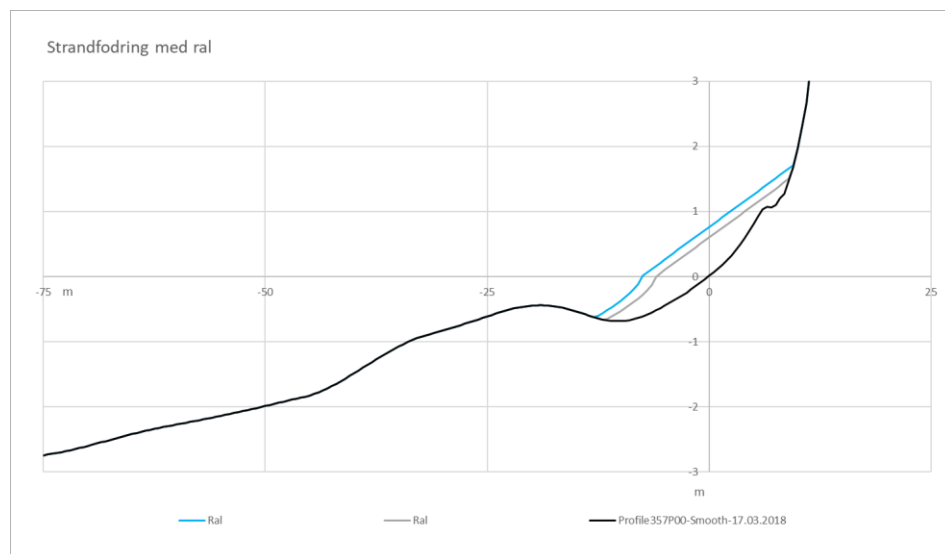
- Kroniske erosion
- Havspejlsstigning og aktiv dybde
- Randeffecter ved enderne af fodringsstrækningerne
- Akut erosion

Figur 6.21 viser et eksempel på strandfodring med sand og ral ved Tisvildeleje, som fodringsmængderne er beregnet ud fra.



Figur 6.21 Strandfodring med sand og ral foran skråningsbeskyttelserne ved Tisvildeleje.  
Grå: Ralfodring på  $5\text{m}^3/\text{m}$   
Orange: Sandfodring op til  $+1,5\text{m}$  mod akut erosion  
Blå: Sandfodring op til  $+2,5\text{m}$  mod akut erosion og vedligeholdelse

Figur 6.22 viser eksempel på strandfodring med ral ved Nakkehoved, som fodringsmængderne er beregnet ud fra.



Figur 6.22 Ralfodring foran skråningsbeskyttelserne ved Nakkehoved.  
 Grå: Ralfodring op til +1,5m mod akut erosion  
 Blå: Ralfodring op til +1,75 mod akut erosion og vedligeholdelse

Tabel 6.3 og Tabel 6.4 viser størrelsen af initialfodring og vedligeholdelsesfodring med sand og ral samlet set og for de enkelte fodringsstrækninger indenfor Natura 2000 Område nr. 195.

		Kikhavn-Liseleje	Tisvilde-Vincentstien	Rågeleje-Trillingerne	Havstokken-Feriebyen	Gilbjergshoved	Gilleleje-Nakkehoved	Munkerup	Aalsgaarde	I alt
<b>Sandfodringsmængder</b>										
Sandbuffer mod akut erosion	m <sup>3</sup>	107,000	365,000	52,000	2,000	27,000	0	11,000	269,000	
Sandbuffer mod kronisk erosion	m <sup>3</sup> /5år	139,000	105,000	37,000	70,000	15,000	3,000	25,000	58,000	
Sandbuffer mod havspejlsstigning	m <sup>3</sup> /5år	26,000	29,000	10,000	26,000	6,000	3,000	14,000	22,000	
Sandbuffer mod randeffekter	m <sup>3</sup> /5år	10,000	25,000	14,000	7,000	7,000	1,000	4,000	13,000	
Initialfodring	m <sup>3</sup>	282,000	524,000	113,000	105,000	55,000	7,000	54,000	362,000	1,500,000
Vedligeholdelsesfodring	m <sup>3</sup> /5år	175,000	159,000	61,000	103,000	28,000	7,000	43,000	93,000	670,000
Initialfodring	m <sup>3</sup>			113,000	105,000	55,000	7,000	54,000		330,000
Vedligeholdelsesfodring	m <sup>3</sup> /5år			61,000	103,000	28,000	7,000	43,000		240,000

Tabel 6.3 Mængder af initialfodring og vedligeholdelsesfodring med sand per 5 år langs fodringsstrækningerne indenfor Natura 2000 Område nr. 195 og langs hele Nordkysten

		Kikhavn-Liseleje	Tisvilde-Vincentstien	Rågeleje-Trillingerne	Havstokken-Feriebyen	Gilbjergshoved	Gilleleje-Nakkehoved	Munkerup	Aalsgaarde	I alt
<b>Ralfodringsmængder</b>										
Ralbuffer mod akut erosion	m <sup>3</sup>	25,300	28,500	4,500	8,500	9,000	10,700	13,700	38,500	139,000
Ralbuffer mod kronisk erosion	m <sup>3</sup> /5år	0	0	0	0	2,500	2,500	1,400	0	6,000
Ralbuffer mod havspejlsstigning	m <sup>3</sup> /5år	2,200	1,700	600	1,100	500	500	1,400	2,200	10,000
Ralbuffer mod randeffekter	m <sup>3</sup> /5år	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Initialfodring	m <sup>3</sup>	27,500	30,100	5,100	9,600	12,000	13,700	16,500	40,700	155,000
Vedligeholdelsesfodring	m <sup>3</sup> /5år	2,200	1,700	600	1,100	3,000	3,000	2,800	2,200	17,000
Initialfodring	m <sup>3</sup>			5,100	9,600	12,000	13,700	16,500		57,000
Vedligeholdelsesfodring	m <sup>3</sup> /5år			600	1,100	3,000	3,000	2,800		11,000

Tabel 6.4 Mængder af initialfodring og vedligeholdelsesfodring med **ral** per 5 år langs fodringsstrækningerne indenfor Natura 2000 Område nr. 195 og langs hele Nordkysten

Beregningerne viser, at der skal initialfodres med i størrelsesorden 1.500.000 m<sup>3</sup> sand langs hele Nordkysten og herunder i størrelsesorden 330.000 m<sup>3</sup> i Natura 2000 Område nr. 195.

Beregningerne viser, at der skal vedligeholdelsesfodres med i størrelsesorden 670.000 m<sup>3</sup>/5år sand langs hele Nordkysten og herunder i størrelsesorden 240.000 m<sup>3</sup>/5år i Natura 2000 Område nr. 195.

Beregningerne viser, at der skal initialfodres med i størrelsesorden 150.000 m<sup>3</sup> ral langs hele Nordkysten og herunder i størrelsesorden 57.000 m<sup>3</sup> i Natura 2000 Område nr. 195.

Beregningerne viser, at der skal vedligeholdelsesfodres med i størrelsesorden 17.000 m<sup>3</sup>/5år ral langs hele Nordkysten og i herunder i størrelsesorden 11.000 m<sup>3</sup>/5år i Natura 2000 Område nr. 195.

Figur 6.23 og Figur 6.24 viser fordelingen af fodringsmængder med henholdsvis sand og ral, som initialstrandfodringen består af for hvert enkelt kystprofil. Figuren viser, at initialfodringen varierer mellem 0 og ca. 120 m<sup>3</sup>/m sand og mellem 0,3 og ca. 15 m<sup>3</sup>/m ral.

Figur 6.25 og Figur 6.26 viser fordelingen af fodringsmængder med henholdsvis sand og ral, som vedligeholdelsesfodringerne består af for hvert enkelt kystprofil. Figuren viser, at vedligeholdelsesfodringen varierer mellem 0 og ca. 35 m<sup>3</sup>/m/5år sand og mellem 0,3 og ca. 4 m<sup>3</sup>/m/5år ral.

Figur 6.27 og Figur 6.28 viser fordelingen af fodringsmængder for henholdsvis sand og ral, som initialstrandfodringen består af for hver enkelt fodringsstrækning.

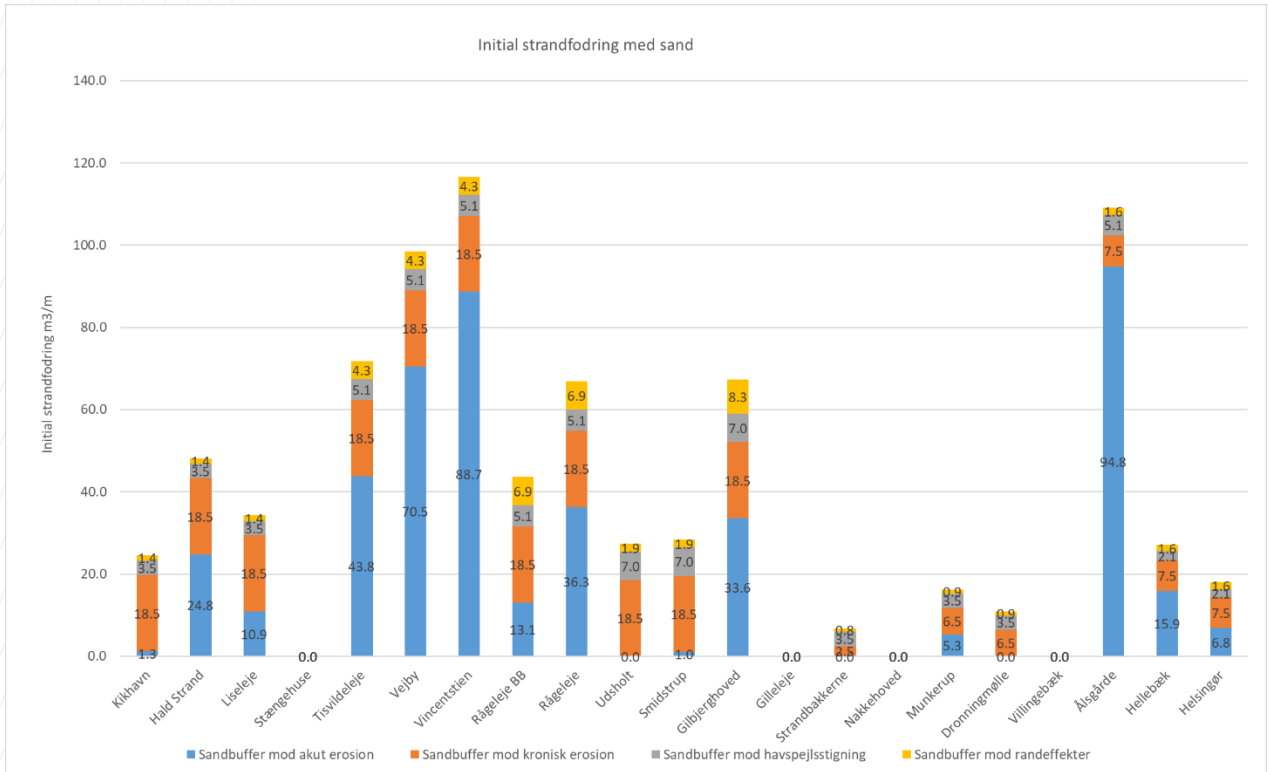
Figureerne viser, at initialfodringen varierer mellem 10.000 og 500.000 m<sup>3</sup> sand.

Figureerne viser, at initialfodringen varierer mellem 5.000 og 40.000 m<sup>3</sup> ral.

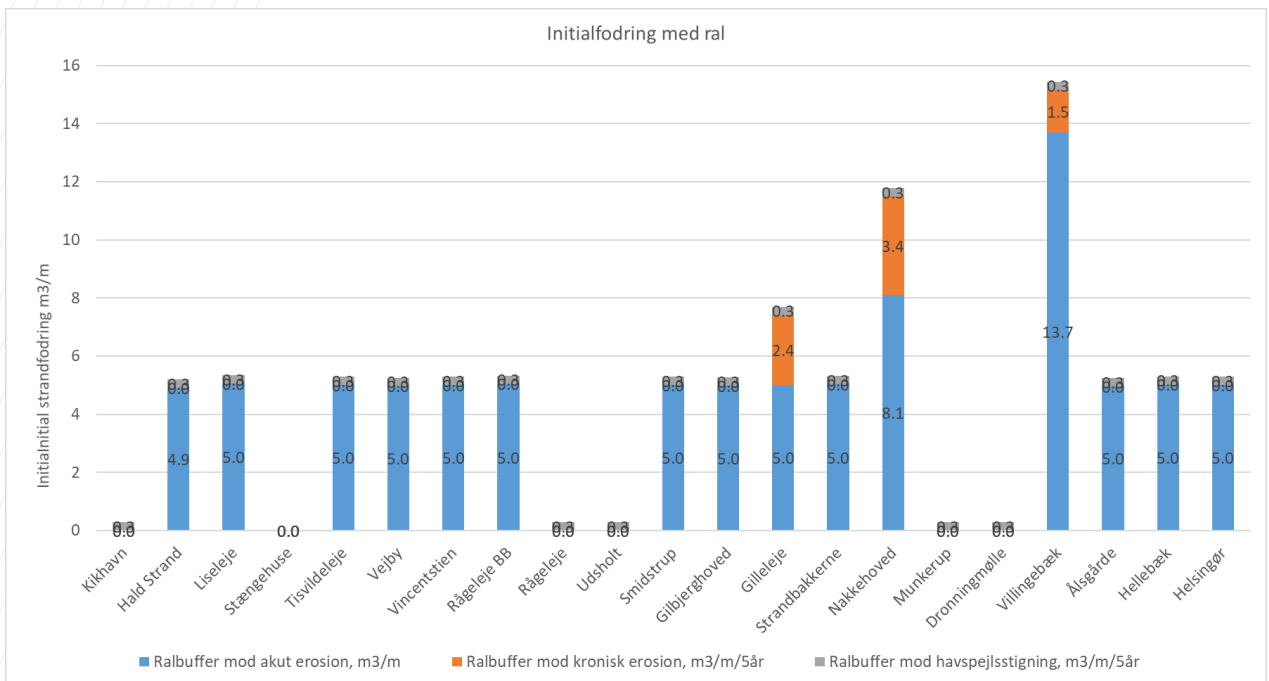
Figur 6.29 og Figur 6.30 viser de enkelte delmængder af henholdsvis sand og ral vedligeholdelsesfodringen består af for hver enkelt fodringsstrækning.

Vedligeholdelsesfodringen varierer mellem 10.000 og 175.000 m<sup>3</sup>/5 år sand.

Vedligeholdelsesfodringen varierer mellem 500 og 3.000 m<sup>3</sup>/5 år ral.

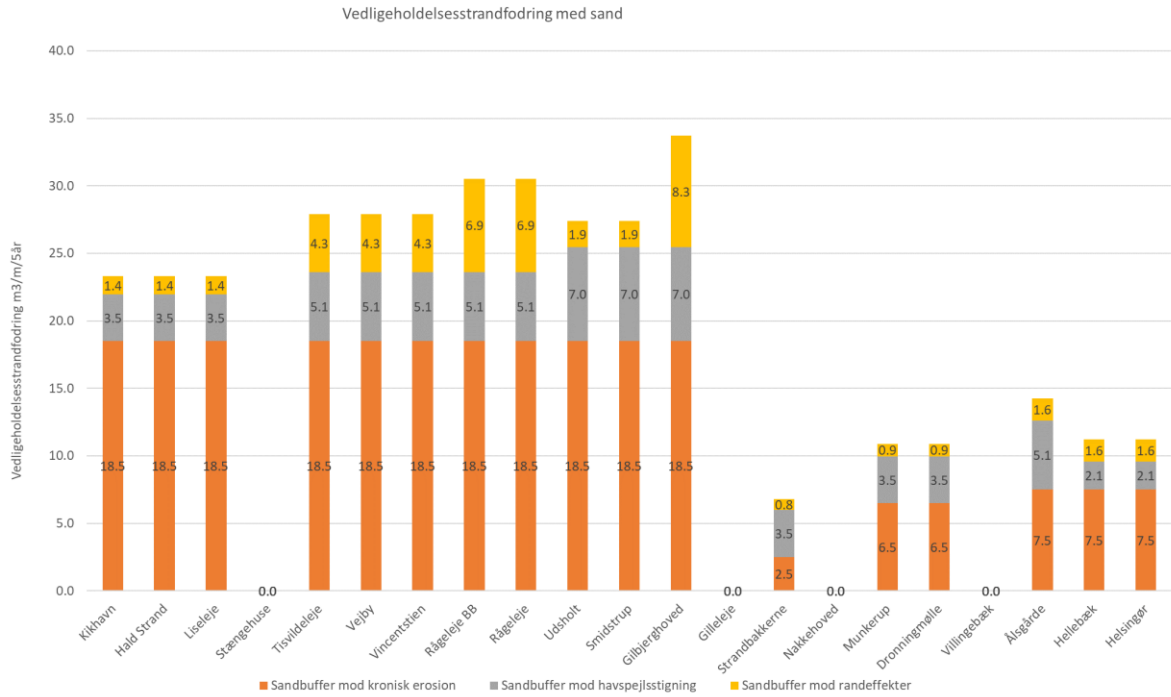


Figur 6.23 Variation af initial strandfodningsmængder med sand for hver kystprofil.

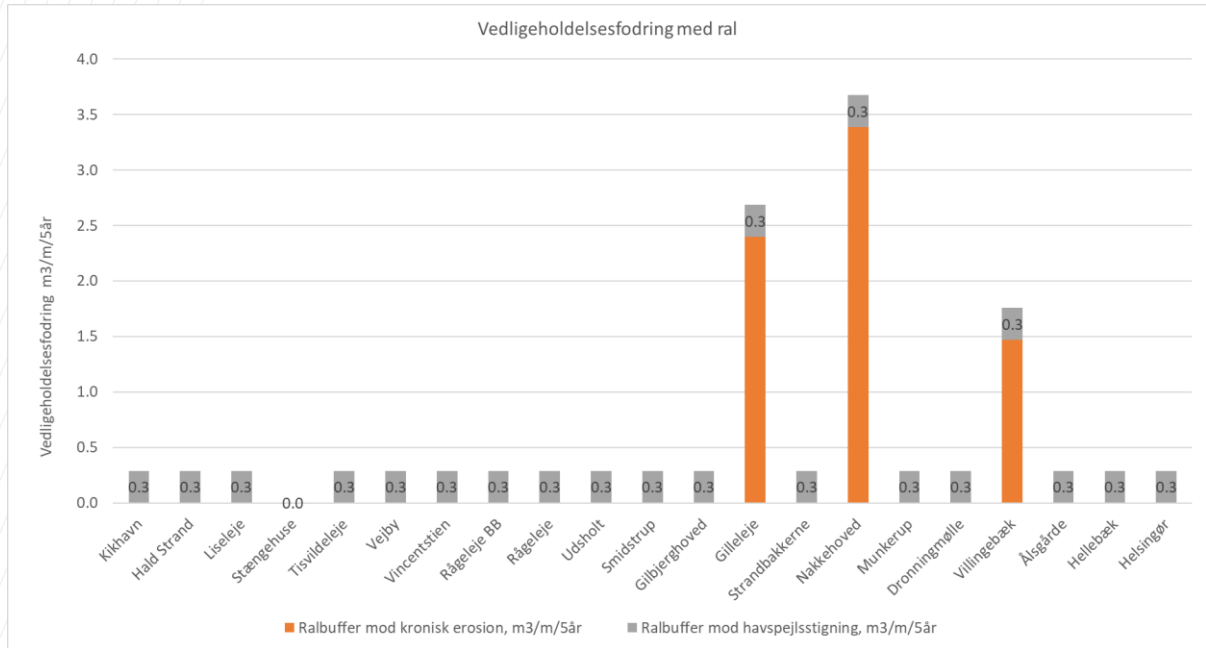


Figur 6.24 Variation af initial strandfodningsmængder med ral for hver kystprofil.

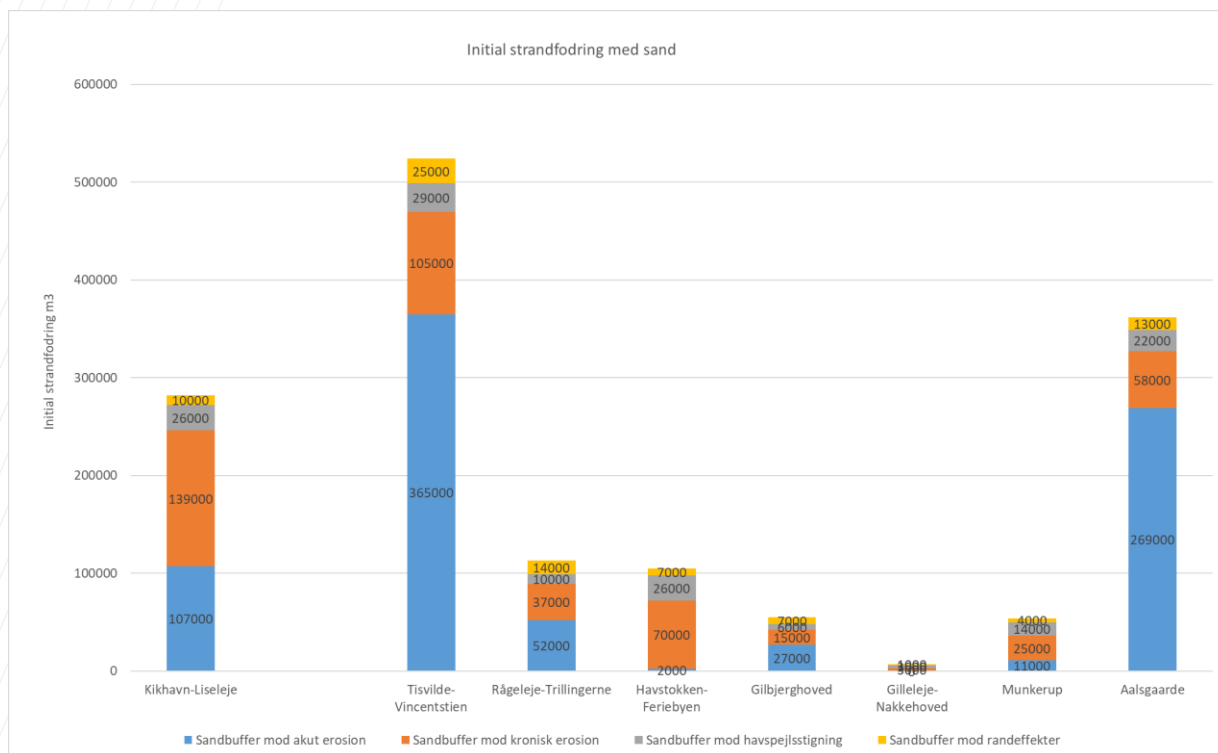




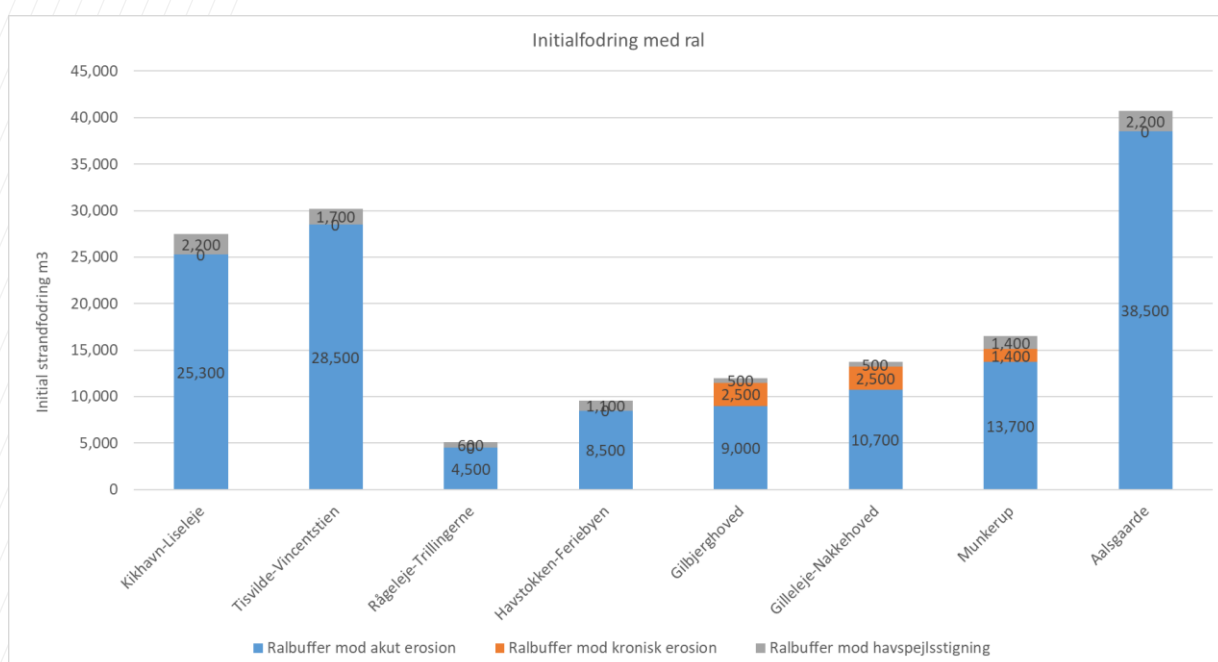
Figur 6.25 Variation af vedligeholdelsesstrandfodringsmængder med sand for hver kystprofil.



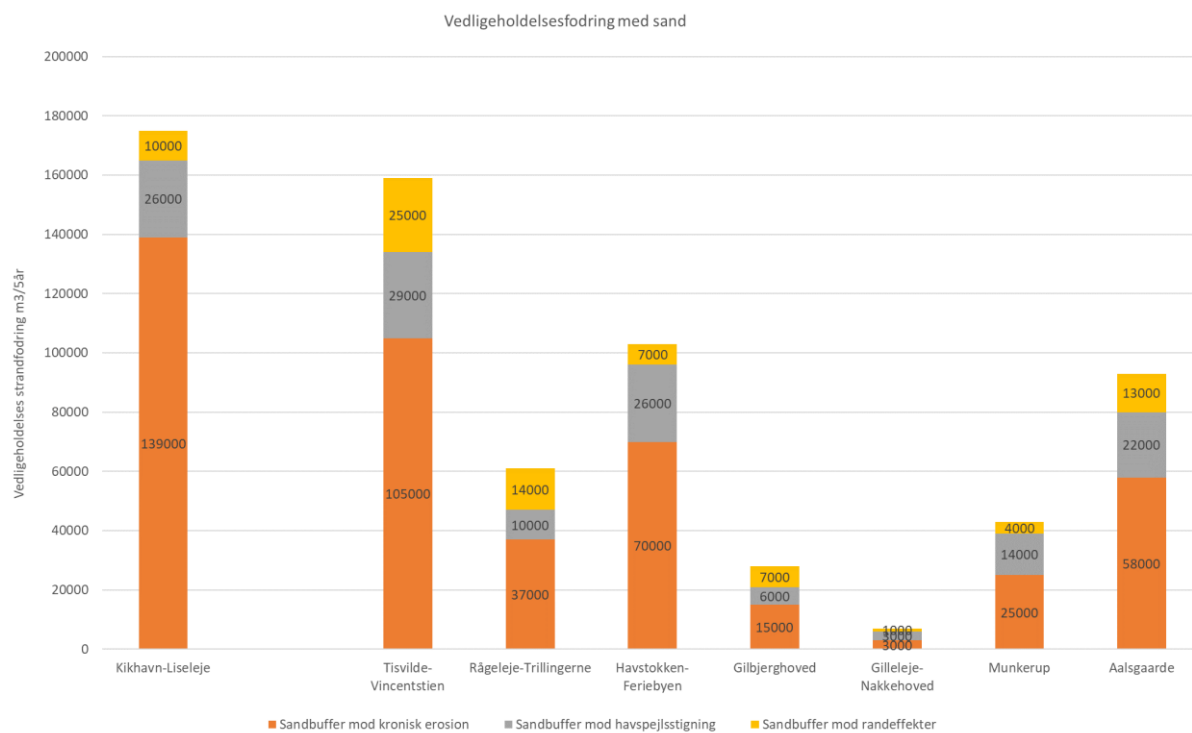
Figur 6.26 Variation af vedligeholdelsesstrandfodringsmængder med ral for hver kystprofil.



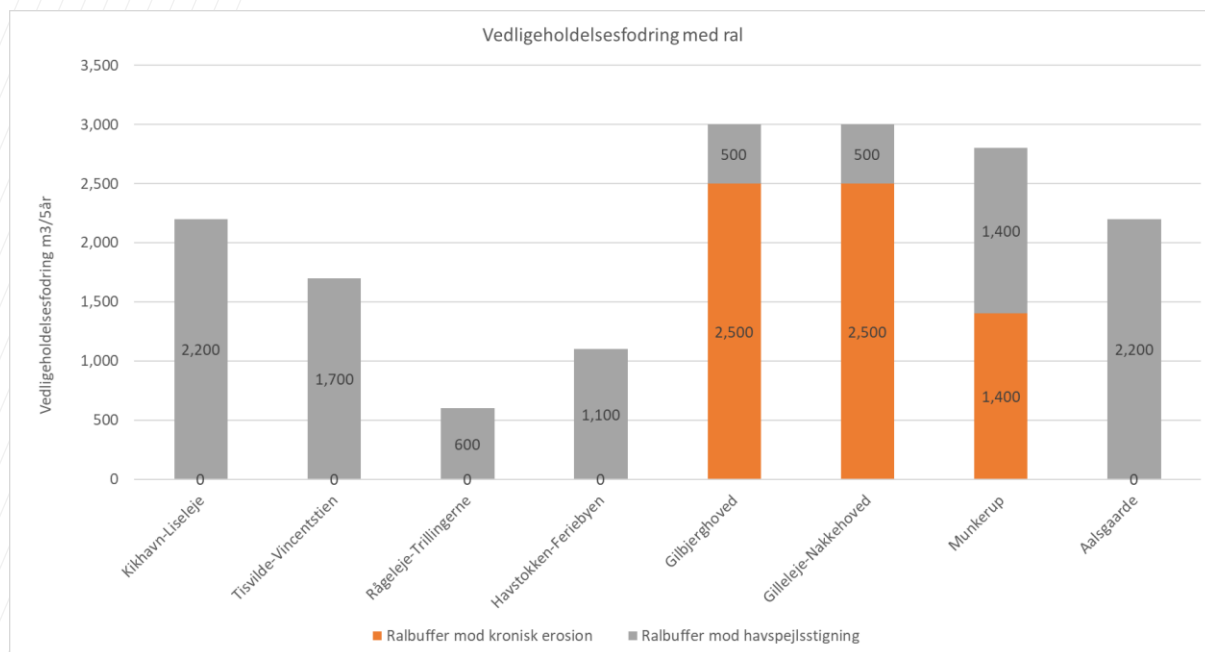
Figur 6.27 Initial strandfodringsmængder med sand for hver fodringsstrækning.



Figur 6.28 Initial strandfodringsmængder med ral for hver fodringsstrækning.



Figur 6.29 Vedligeholdelsesstrandfodringsmængder med sand for hver fodringsstrækning.



Figur 6.30 Vedligeholdelsesstrandfodringsmængder med ral for hver fodringsstrækning.

## 6.10 Tab af fodringsmateriale

### 6.10.1.1 *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 og Hornbæk Havn samt ved Helsingør Lystbådehavn og en del passere forbi pynten ved Kronborg for slutteligt at blive aflejret på Disken. Herudover vil der aflejres en del sand ved de store bølgebrydere ved Liseleje og Tisvildeleje.

En del af sandet, der trækkes ud i kystprofilen, vil aflejres på Lappegrund, som det er foregået hidtil.

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

### 6.10.1.2 *Sandflugt*

Der er risiko for sandflugtsgener som følge af strandfodringerne.

Sandflugten vurderes dog at være af minimal 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 de foreslåede strandfodringerne, men kan skabe lokale gener.

For at reducere omfanget af sandflugt kan der plantes marehalm på den bagerste del af stranden, se også [1].

## 7 Anlægsoverslag

### 7.1 Enhedspriser

#### 7.1.1 Enhedspris for sand

Kystdirektoratets nøgletal for strandfodring svinger mellem 50-53 Kr./m<sup>3</sup>, jf. Tabel 7.1. Dette nøgletal er inklusiv sejlads op til 10-20 Km og inklusiv usikkerhed på 20%. Uden usikkerhed er nøgletallet 40-43 Kr./m<sup>3</sup>, hvilket stemmer overens med erfaringerne fra en række andre strandfodringsprojekter i Danmark.

Tabel 7.1: Enhedspriser for strandfodring på Vestkysten, Kr./m<sup>3</sup>. Anlægsoverslag for årlig vedligeholdelsesfodring på Vestkysten 2014-2018. Kilde: Kystdirektoratet (2013) Bilag til Fællesaftale 2014-2018.

Mængder og udgifter pr. år 2014-18	Strandfodring		Strandnær fodring		Revlefodring		Udgift	
	Hovedstrækning	m <sup>3</sup>	kr./m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	kr./m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>		kr./m <sup>3</sup>
Agger Tange	59.000	53,00	89.000	43,00				6,9
Harboøre Tange	64.000	52,00	96.000	43,00				7,5
Vrist - Ferring	88.000	52,00	132.000	43,00				10,3
Bovbjerg Klint								0
Trans - Thorsminde	148.000	52,00			222.000	32,00		14,8
Thorsminde – Husby Klitplantage*	85.000	0						0
Husby Klitplantage - Søndervig	79.000	53,00			119.000	32,00		8,0
Ndr. Holmsland Tange	40.000	50,00			61.000	31,00		3,9
Sdr. Holmsland Tange*	239.000	14,00/74,00			358.000	54,00		25,6
<b>I alt 1.879.000 m<sup>3</sup>/år</b>	<b>802.000</b>	<b>-</b>	<b>317.000</b>	<b>-</b>	<b>760.000</b>	<b>-</b>		<b>77,0</b>

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

I skitseprojektet i Nordkystens Fremtid er der benyttet et nøgletal på 50 Kr./m<sup>3</sup> plus moms, der inkluderer usikkerhed og sejlfafstand op til en vis afstand, [8].

I nuværende anlægsoverslag er nøgletallet ændret til 45 Kr./m<sup>3</sup> plus moms for fastmål, der er uden usikkerhed og med sejlfads op til 15 Km.

Fast mål 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 fast mål. Omregningen fra fast mål til skibsmål bevirker, at enhedsprisen stiger til 49,5 kr./m<sup>3</sup> (45 Kr. + 10%).

Dertil kan man lægge +/- 5 til 10% usikkerhed på det samlede budget for at imødekomme uforudsete udgifter. Det er ikke gjort i disse beregninger. Først efter budafgivelse fra entreprenøren, kendes den endelige enhedspris.

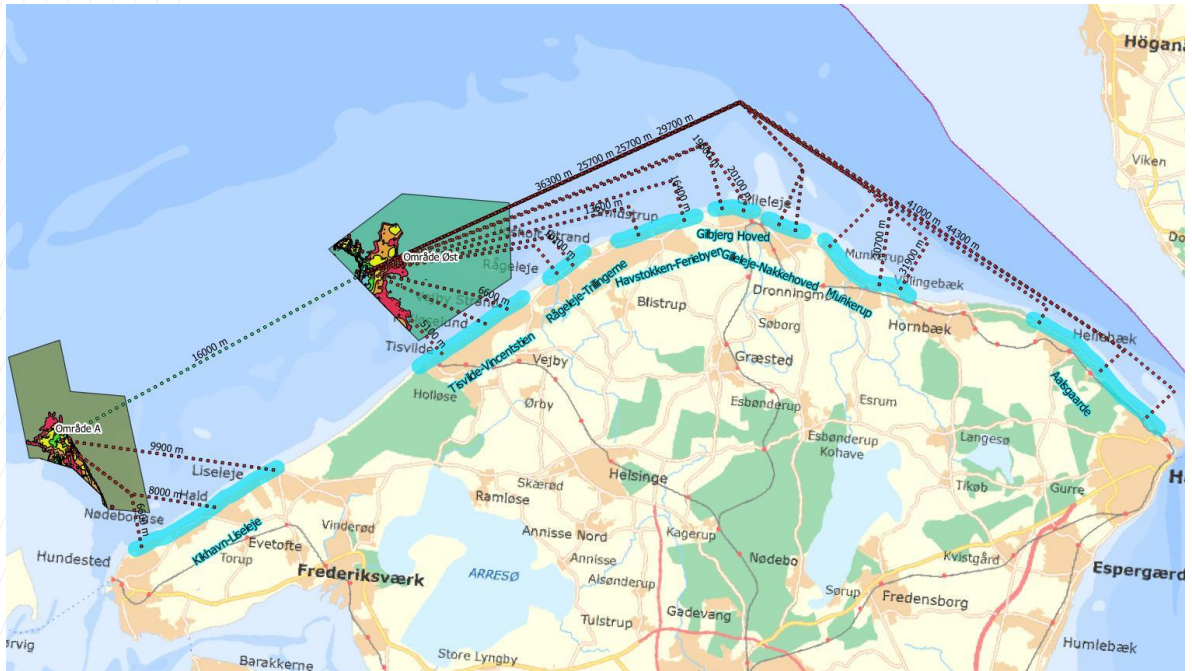
Der er undersøgt 2 sandindvindingsområder, som tilsyneladende indeholder tilstrækkeligt store mængder egnet sand til strandfodring på Nordkysten og som derfor benyttes i anlægsoverslaget, se Figur 7.1.

Her er indvindingsområderne delt i et vestligt Område A (Prøvelokalitet NA) og et Område Øst (Prøvelokalitet NE), se Figur 7.1.

Sejlfafstanden varierer efter placering af sandindvindingsområderne i forhold til strandfodringsområderne. Som det fremgår af Figur 7.1 er der generelt længere sejlfafstand til den østlige del af Sjællands nordkyst end til den vestlige del grundet placeringen af de 2 indvindingsområder.

Sejlfafstandene er opdelt i en kystnær del og en sejlfads-del for dybder over 10 m. Den kystnære del håndteres ofte ved hjælp af en flydeledning, hvori sandet bliver pumpet 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 relativt lang.

Større sandsugerskibe – kapacitet 6.000 m<sup>3</sup> - har en fuldlasten dybgang på 7 m og vil anduve på vanddybder på 8-10 m. Som det fremgår af Figur 7.1, udgør Gilleleje Flak en lavvandet forhindring for sejlfads med større skibe, så sejlruterne er lagt lige nord for kompasafmærkningsbøjen nord for dette flak.

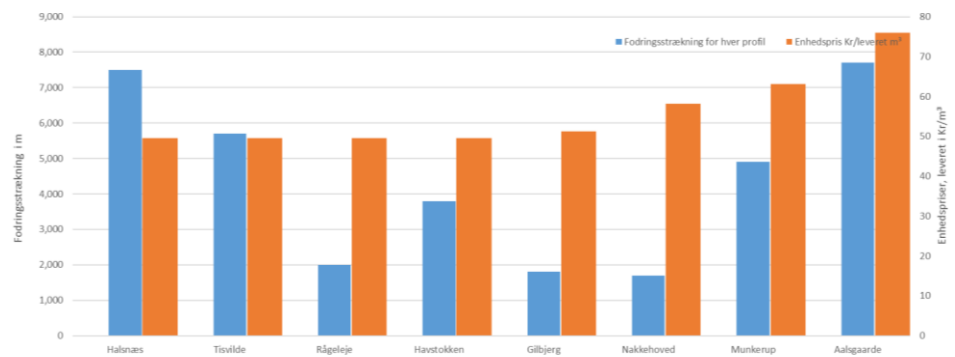


Figur 7.1 Sandindvindingsområders placering med sejlfafstande (stiplede linjer med afstand i m) til de analyserede kystprofiler i fodringsområderne (turkis markering)

Da sejlfafstandene 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.

Sejlfafstandene er estimeret til at variere fra 5 Km til 45 Km. For sejlfafstande over 15 Km beregnes hver kubikmeter sand i skibsmål at koste 1 Kr./Km ekstra.

Derved stiger enhedsprisen fra 49,5 kr./m<sup>3</sup> alene grundet den ekstra sejlfafstand op til 80 kr./m<sup>3</sup> i den østligste del af projektområdet, se Figur 7.1 og Figur 7.2.



Figur 7.2 Længder af fodringsstrækninger til venstre og enhedspriser med sejltillæg for hver fodringsstrækning til højre.



### 7.1.2 Enhedspris for ral

Det antages, at prisen for ral er 330 kr./m<sup>3</sup> plus moms baseret på tidligere erfaringer fra anlægsarbejder på Nordkysten i det tilfælde, at der benyttes grusgrave på land.

## 7.2 Samlet anlægsoverslag for sandfodring alene

Den samlede pris for initialstrandfodringen med sand alene vurderes ud fra analysen at være på ca. 137,5 million kr. plus moms.

Den samlede pris for vedligeholdelsesstrandfodringen med sand alene vurderes ud fra analysen at være på ca. 42,4 million kr. plus moms pr. 5 år.

Tabel 7.2 viser opgørelse af anlægsoverslaget samlet set og for de enkelte fodringsstrækninger, se desuden [19].

Anlægsoverslagene er præsenteret uden usikkerhed og eksklusiv moms. Herunder er der ikke indregnet ekstra budget til uforudsete udgifter og eventuelt højere priser fra entreprenøren. I tilfælde af, at prisen for projektet bliver højere end budgetteret, kan fodringsmængderne eventuelt tilpasses lidt før arbejdet går i gang.

Fodringsstrækning	Kikhavn-Liseleje	Tisvilde-Vincentstien	Rågeleje-Trillingerne	Havstokken-Feriebyen	Gilbjergshoved	Gilleleje-Nakkehoved	Munkerup	Aalsgaarde	Samlet pris
Længde af fodringsstrækning, m	7500	5700	2000	3800	1800	1700	4900	7700	
Initialfodring, kr.	20.900.000	35.400.000	7.300.000	7.100.000	6.700.000	6.000.000	12.100.000	42.200.000	137.500.000
Vedligeholdelsesfodring, kr.	9.100.000	8.400.000	3.300.000	5.400.000	3.200.000	1.400.000	3.900.000	7.900.000	42.400.000

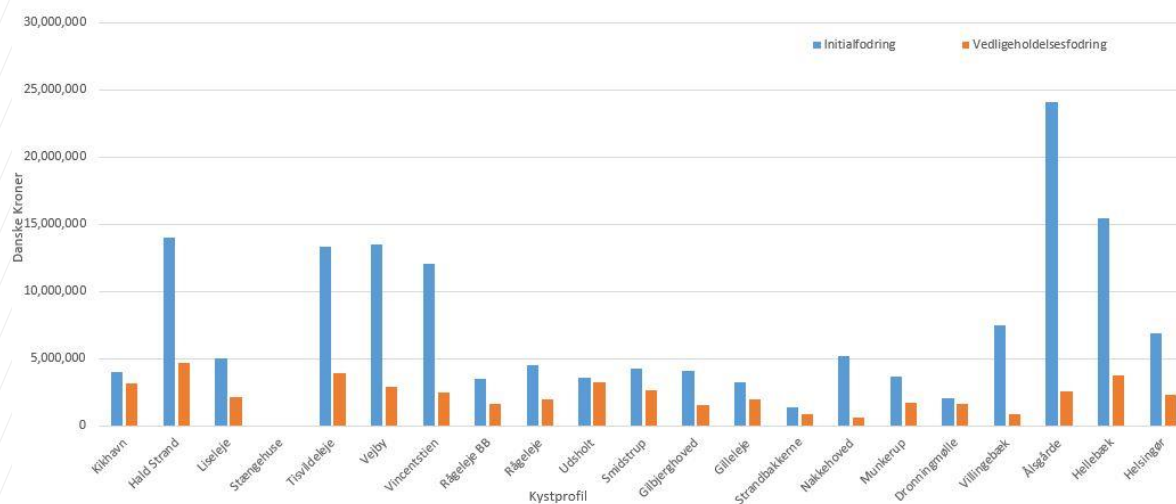
Tabel 7.2 Anlægsoverslag for initialfodring og vedligeholdelsesfodring med sand for fodringsstrækningerne

Der er stor variation på anlægsoverslaget for de enkelte kystprofiler, se Figur 7.3.

Der er også stor variation i anlægsoverslaget mellem de enkelte fodringsstrækninger, se Figur 7.4. Generelt er Ålsgårde dyrest at fodre med sand, mens Gilleleje-Nakkehoved er billigst.

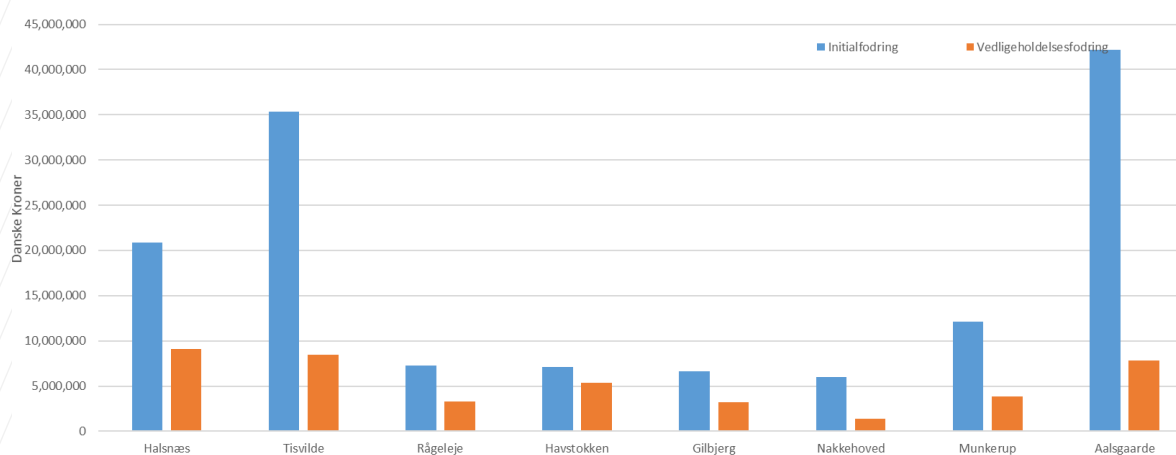
Andelen af sejltillæg stiger mod øst, se Figur 7.5 og Figur 7.6.

## Initial strand- og vedligeholdelsesfodring

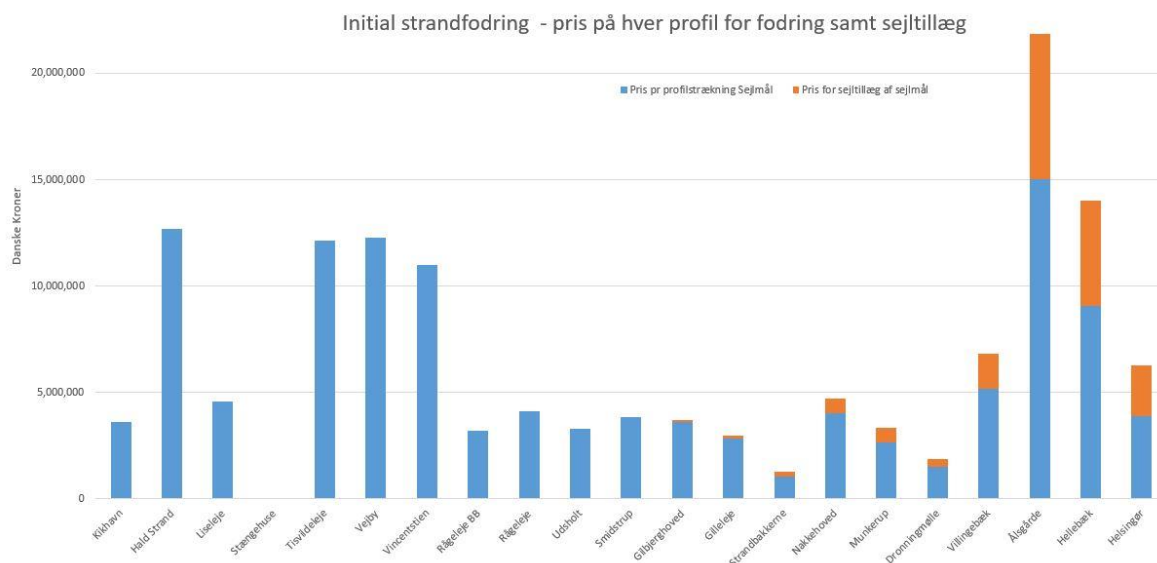


Figur 7.3 Anlægsoverslag fordelt på profilstrækninger for initial- og vedligeholdelsesfodring hvert 5. år med sand alene. Priser er vist eksklusiv moms.

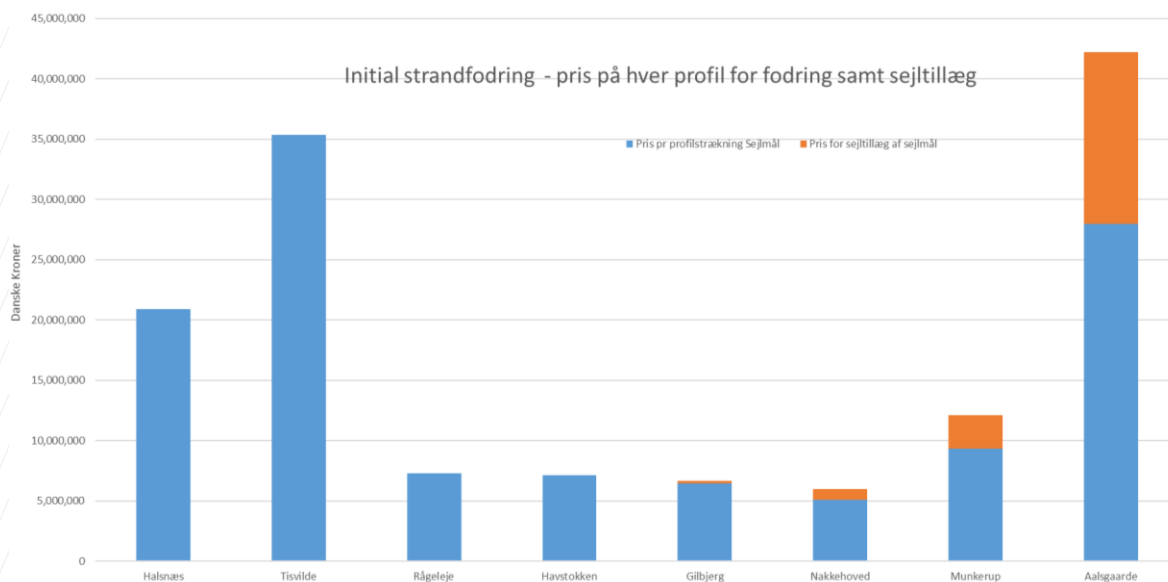
## Initial strand- og vedligeholdelsesfodring



Figur 7.4 Anlægsoverslag fordelt på fodringsstrækninger for initial- og vedligeholdelsesfodring hvert 5. år med sand alene. Priser er vist eksklusiv moms.



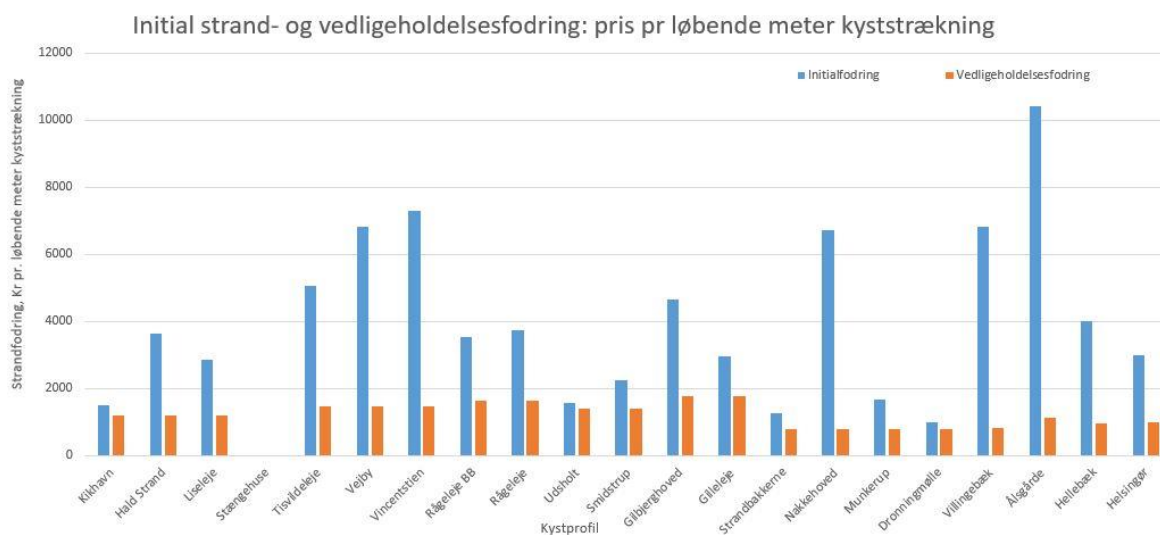
Figur 7.5 Anlægsoverslag fordelt på profilstrækninger for initialfodring med sand alene og med sejltillæg. Priser er vist eksklusiv moms.



Figur 7.6 Anlægsoverslag fordelt på fodringsstrækninger for initialfodring med sejltillæg. Priser er vist eksklusiv moms.

Figur 7.7 og Tabel 7.3 viser variationen af fodringsprisen for sand alene per løbende meter for hvert af de beregnede kystprofiler.

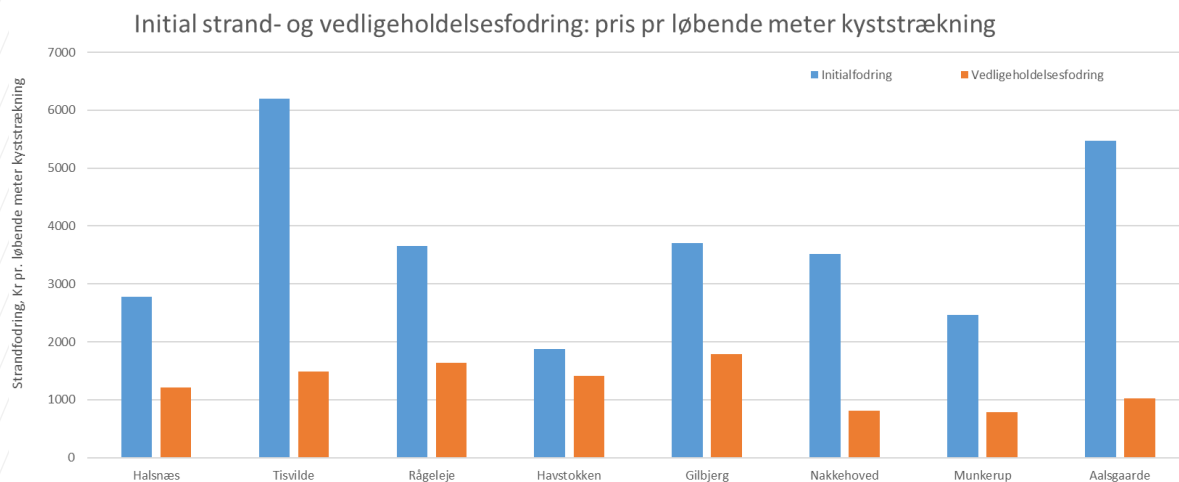
Figur 7.8 og Tabel 7.4 viser variationen af fodringsprisen for sand alene per løbende meter for hvert af de beregnede fodringsstrækninger.



Figur 7.7 Anlægsoverslag pr. løbende meter kystlinje fordelt på profilstrækninger for initial- og vedligeholdelsesfodring hvert 5. år for sand alene. Priser er vist eksklusiv moms.

Tabel 7.3: Enhedspriser for initialfodring og vedligeholdelsesfodring med sand alene pr. løbende meter kyst for hvert kystprofil.

Fodringsprofil	Enhedspris, Initialfodring [kr./lbm.]	Enhedspris, Vedligeholdelsesfodring [kr./lbm./5år]
Kikhavn	1.504	1.209
Hald Strand	3.630	1.209
Liseleje	2.850	1.209
Stængehuse	0	0
Tisvildeleje	5.053	1.481
Vejby	6.809	1.481
Vincentstien	7.314	1.481
Rågeleje BB	3.547	1.639
Rågeleje	3.734	1.639
Udsholt	1.569	1.411
Smidstrup	2.259	1.411
Gilbjergghoved	4.640	1.779
Gilleleje	2.953	1.783
Strandbakkerne	1.254	805
Nakkehoved	6.738	803
Munkerup	1.676	777
Dronningmølle	996	787
Villingebæk	6.834	816
Åsgårde	10.413	1.126
Hellebæk	4.005	966
Helsingør	2.995	1.006



Figur 7.8 Anlægsoverslag pr. løbende meter kystlinje fordelt på fodringsstrækninger for initial- og vedligeholdelsesfodring hvert 5. år med sand alene. Priser er vist eksklusiv moms.

Tabel 7.4: Enhedspriser for initialfodring og vedligeholdelsesfodring pr. løbende meter kyst fordelt på hver fodringsstrækning.

Fodringsstrækning	Enhedspris, Initialfodring [kr./lbm.]	Enhedspris, Vedligeholdelsesfodring [kr./lbm./5år]
Halsnæs	2.783	1.209
Tisvilde	6.202	1.481
Rågeleje	3.650	1.639
Havstokken	1.878	1.411
Gilbjerg	3.703	1.782
Nakkehoved	3.512	804
Munkerup	2.465	789
Aalsgaarde	5.477	1.020

### 7.3 Samlet anlægsoverslag for sandfodring og ralfodring

Tabel 7.2 viser anlægsoverslaget for strandfodring med sand og ral samlet set og for de enkelte fodringsstrækninger indenfor Natura 2000 Område Nr. 195 [18].

Fodringsstrækning	Kikhavn-Liseleje	Trivilde-Vincentstien	Rågeleje-Trillingerne	Havstokken-Feriebyen	Gilbjergshoved	Gilleleje-Nakkehoved	Munkrup	Aalsgaarde	Samlet pris
Initialfodring Ral, kr.	9.100.000	9.900.000	1.700.000	3.200.000	4.000.000	4.500.000	5.500.000	13.400.000	51.300.000
Initialfodring Sand, kr.	14.000.000	25.900.000	5.600.000	5.200.000	2.800.000	400.000	3.300.000	26.800.000	84.000.000
Initialfodring Ral og Sand, kr.	23.100.000	35.800.000	7.300.000	8.400.000	6.800.000	4.900.000	8.800.000	40.200.000	135.300.000
Vedligeholdelsesfodring Ral, kr./5år	700.000	500.000	200.000	400.000	1.000.000	1.000.000	900.000	700.000	5.500.000
Vedligeholdelsesfodring Sand, kr./5år	8.700.000	7.900.000	3.000.000	5.200.000	1.400.000	400.000	2.700.000	7.100.000	36.200.000
Vedligeholdelsesfodring Ral og Sand, kr./5år	9.400.000	8.400.000	3.200.000	5.600.000	2.400.000	1.400.000	3.600.000	7.800.000	41.800.000
Initialfodring Ral, kr.			1.700.000	3.200.000	4.000.000	4.500.000	5.500.000		18.900.000
Initialfodring Sand, kr.			5.600.000	5.200.000	2.800.000	400.000	3.300.000		17.300.000
Initialfodring Ral og Sand, kr.			7.300.000	8.400.000	6.800.000	4.900.000	8.800.000		36.200.000
Vedligeholdelsesfodring Ral, kr./5år			200.000	400.000	1.000.000	1.000.000	900.000		3.500.000
Vedligeholdelsesfodring Sand, kr./5år			3.000.000	5.200.000	1.400.000	400.000	2.700.000		12.700.000
Vedligeholdelsesfodring Ral og Sand, kr./5år			3.200.000	5.600.000	2.400.000	1.400.000	3.600.000		16.200.000

Tabel 7.5 Anlægsoverslag for initialfodring og vedligeholdelsesfodring med sand og ral per 5 år langs fodringsstrækningerne indenfor Natura 2000 Område Nr. 195 og for hele Nordkysten

Anlægsoverslaget er præsenteret uden usikkerhed og eksklusive moms. Herunder er der ikke indregnet ekstra budget til uforudsete udgifter og eventuelt højere priser fra entreprenøren. I tilfælde af, at prisen for projektet bliver højere end budgetteret, kan fodringsmængderne eventuelt tilpasses lidt før arbejdet går i gang.

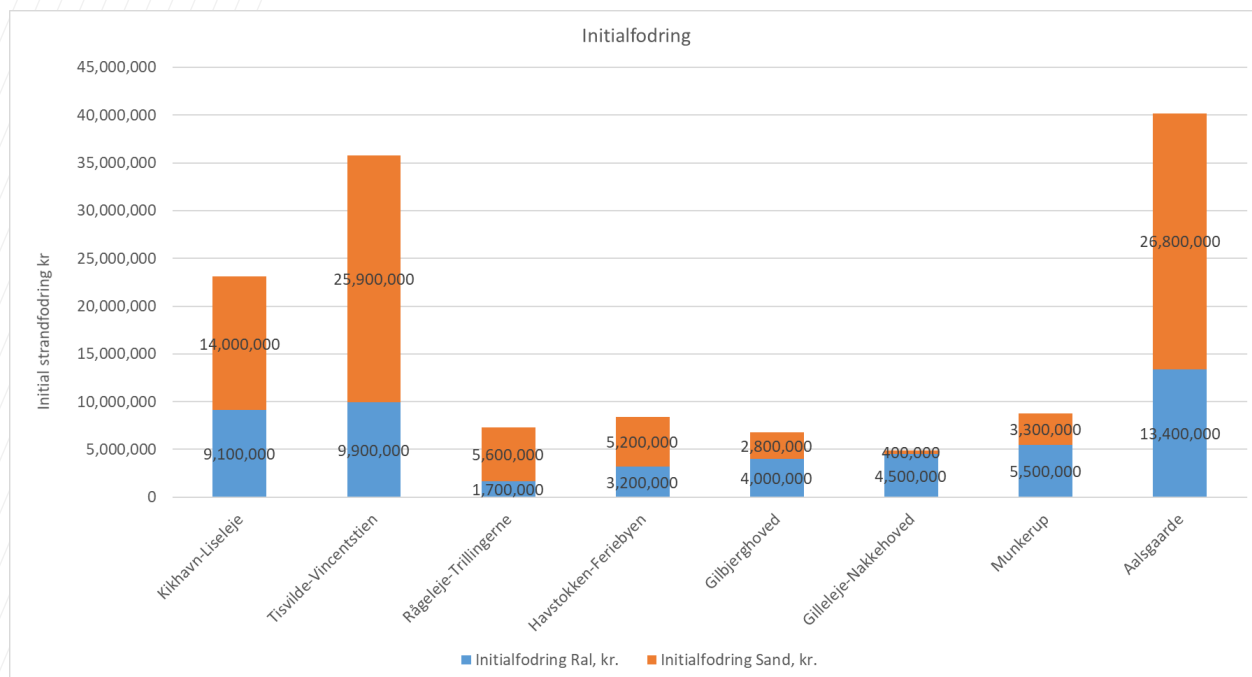
Det samlede anlægsoverslag for initialstrandfodringen med sand og ral vurderes ud fra analysen at være på ca. 135 million kr. plus moms.

Det samlede anlægsoverslag for vedligeholdelsesstrandfodringen vurderes ud fra analysen at være på ca. 42 million kr. plus moms pr. 5 år.

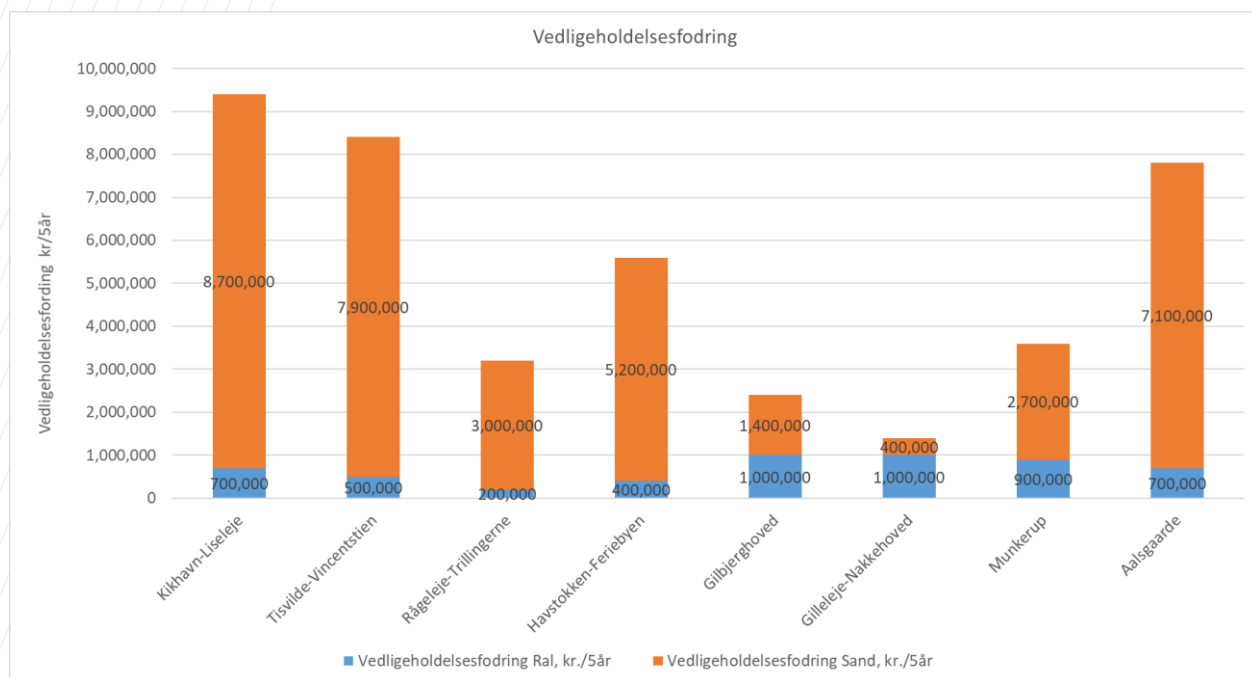
Figur 7.9 og Figur 7.10 viser anlægsoverslaget på henholdsvis initialfodring og vedligeholdelsesfodring grafisk for de enkelte fodringsstrækninger for sand og ral.

Figur 7.12 visen en sammenligning af anlægsoverslag for initialfodring og vedligeholdelsesfodring for de enkelte fodringsstrækninger.

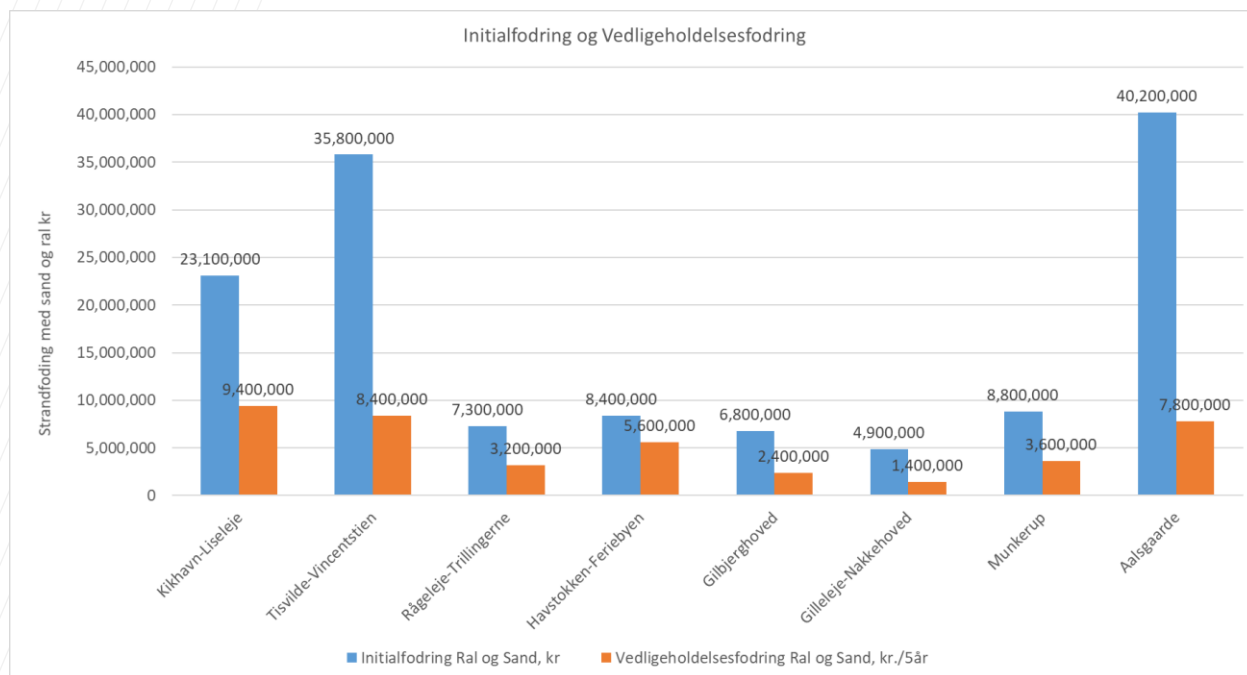




Figur 7.9 Anlægsoverslag for sand og ral fordelt på fodringsstrækninger for initialfodring. Anlægsoverslag er vist eksklusiv moms.



Figur 7.10 Anlægsoverslag for sand og ral fordelt på fodringsstrækninger for vedligeholdelsesfodring. Anlægsoverslag er vist eksklusiv moms.



Figur 7.11 Anlægsoverslag for sand og ral fordelt på fodringsstrækninger for initialfodring og vedligeholdelsesfodring. Anlægsoverslag er vist eksklusiv moms.

Figur 7.12 og Figur 7.13 viser variationen af anlægsoverslaget per løbende meter for hver fodringsstrækning for sand og ral for henholdsvis initialfodring og vedligeholdelsesfodring.

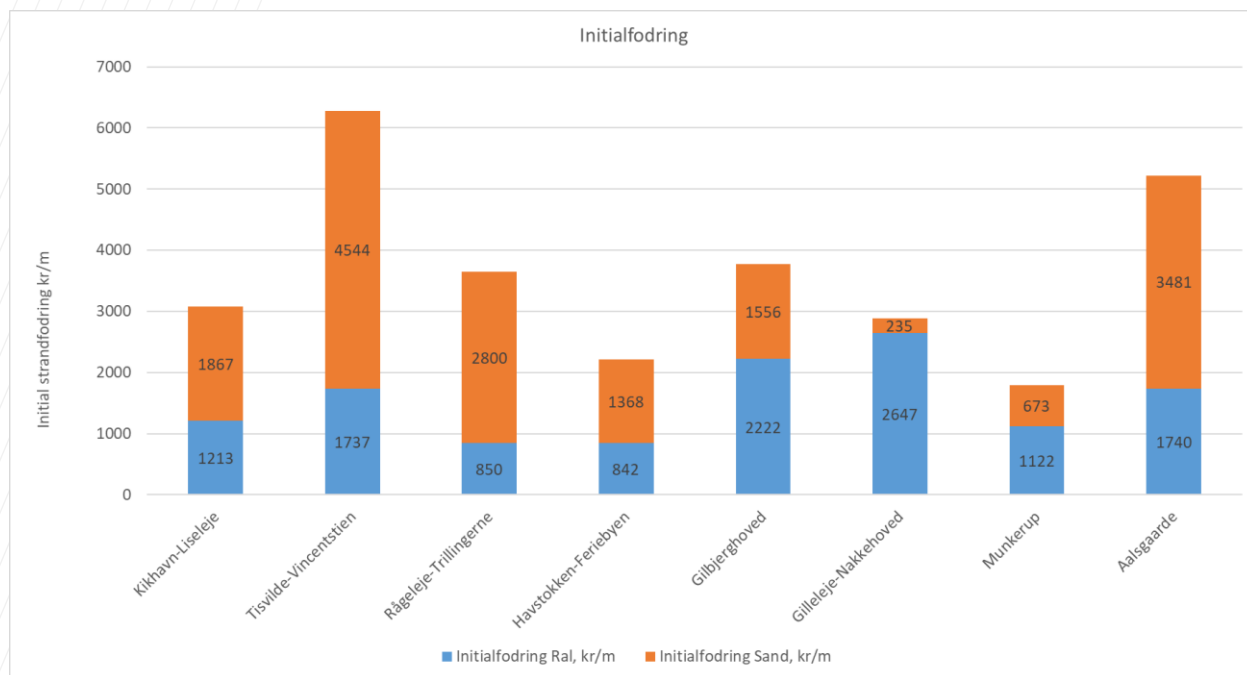
Figur 7.14 viser variationen af den samlede fodringspris for sand og ral per løbende meter for hver fodringsstrækning for henholdsvis initialfodring og vedligeholdelsesfodring.

Anlægsomkostningerne varierer fra den ene fodringsstrækning til den anden.

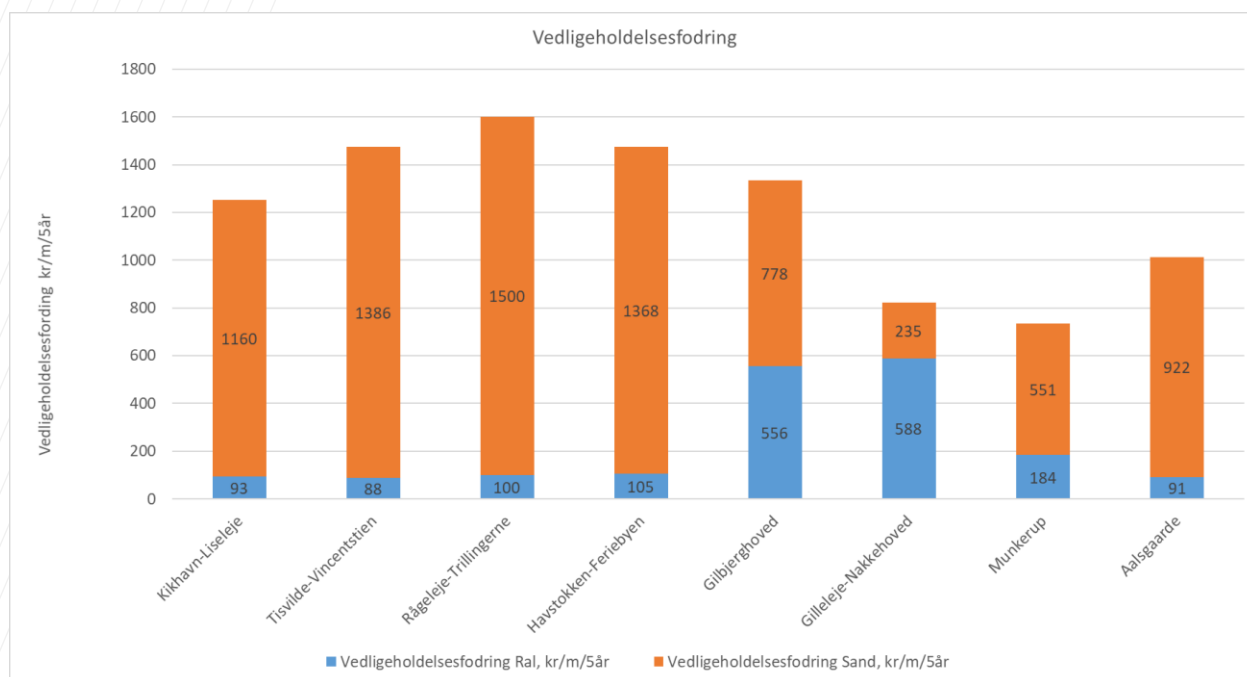
Initialfodringen ligger mellem 1800 kr/m plus moms ved Munkerup til 6300kr/m mellem Tisvildeleje og Vincentstien.

Vedligeholdelsesfordringerne ligger mellem 735kr/m ved Munkerup til 1600kr/m mellem Rågeleje og Trillingerne.

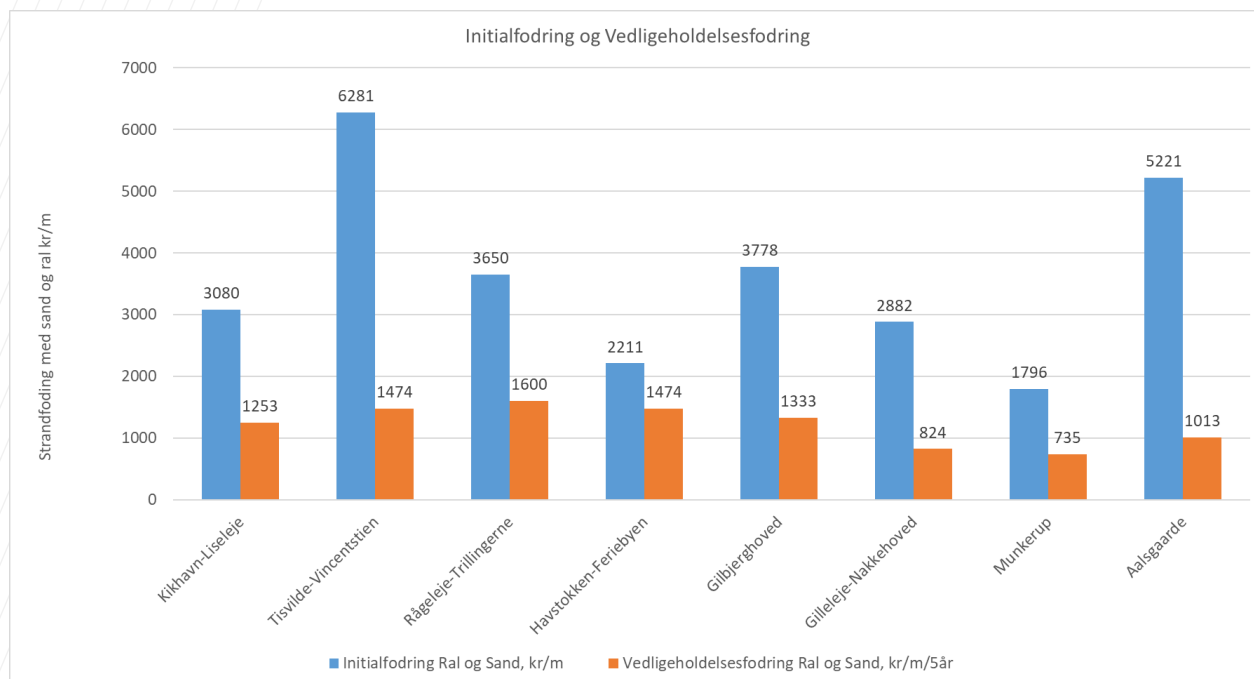
Vedligeholdelsesomkostningerne er generelt større vest for Gilleleje end øst for Gilleleje som følge af forskellig bølgeklime.



Figur 7.12 Anlægsoverslag pr. løbende meter kystlinje fordelt på fodringsstrækninger for initialfodring med sand og ral. Anlægsoverslag er vist eksklusiv moms.



Figur 7.13 Anlægsoverslag pr. løbende meter kystlinje fordelt på fodringsstrækninger for vedligeholdelsesfodring hvert 5. år med sand og ral. Anlægsoverslag er vist eksklusiv moms.



Figur 7.14 Anlægsoverslag pr. løbende meter kystlinje fordelt på fodringsstrækninger for initial- og vedligeholdelsesfodring hvert 5. år med sand og ral. Anlægsoverslag er vist eksklusiv moms.

## 7.4 Oprensning ved havnene

Den del af sandet, der med langtransporten bliver aflejret i havnene, kan med fordel bypasses tilbage på stranden nedstrøms for havnen og derved indgå i den samlede sandtransport. Mængderne af sand, der skal transporteres fra havnene til stranden nedstrøms for er endnu ukendte og transportmetoden er ikke endeligt afklaret. Sandet kan bypasses via permanente rørledninger eller med gravemaskiner og dumpere eller ved traditionel oprensning med sandsuger og indpumpning på stranden.

Ifølge Kystdirektoratet er der endog meget stor forskel på nøgletallet for havnesand, se Tabel 7.1. Her er der en variation fra 14-74 Kr./m<sup>3</sup> inklusiv 20% usikkerhed.

Endeligt er kornstørrelsen vigtig for havnesandet. I tilfælde af, at det primært er sand med kornstørrelse under 0,2 mm, vil sandet have naturlig tendens til at aflejres på revler og havbunden i stedet for på stranden.

## 7.5 Risici

Der kan 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 før storm kan opretholdes.

Strandfodringen vil kunne øge tilsandingen af havnene langs Nordkysten, herunder specielt Gilleleje Havn og Hornbæk Havn.

Strandfodringerne vil kunne medføre reduceret afstrømning fra udløbene langs Nordkysten i og med, at højden på stranden øges.

Sandflugt minimeres ved anvendelse af forholdsvis groft sand. Der kan evt. plantes marehalm på bagstranden, hvis sandfygning ønskes reduceret.

Tilstrækkelige fodringsmængder i den specificerede gradering og materialesammensætning er ikke tilstede i de efterforskede råstofressourceområder.

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

## 8 Udførselstid for strandfodring

Strandfodringerne udføres med sandsugerfartøj, der pumper materialet gennem en flydeledning til stranden, se Figur 8.1. Her kobles ledningen til faste rør, der løbende forlænges til udledning af materialet på den ønskede position, hvor det fordeles med entreprenørmateriel.

Det samlede strandfodringsprojekt kan udføres i løbet af en 6 måneders periode ved benyttelse af ét fartøj og hvor fodringsstrækningerne fuldføres successivt inden, der flyttes til den næste fodringsstrækning.

Det antages, at fodringerne udføres udelukkende med ét fartøj med en rimelig kapacitet, der er vurderet til 6.000 m<sup>3</sup>.

Sejladsafstanden fra indvindingsområde til fodringsområde er hovedsagelig bestemmende for den mængde materiale, der kan ind-pumpes pr. døgn.

Det vurderes, at der kan leveres 3 til 4 laster pr. døgn, svarende til i alt 20.000 m<sup>3</sup>/dg.

Varigheden for de forskellige fodringsstrækninger er estimeret i Tabel 8.1.

Udførelsestiden kan muligvis reduceres ved samtidigt udførelse med flere fartøjer og muligvis ved optimering af lastekapaciteten.

Figur 8.1 Strandfodring med indvindingsfartøj tilkøbet rørledning, der pumper sand og ral ind på stranden til videre fordeling, KDI.



Strækning	Længde m	Totalt initial volumen m <sup>3</sup>	Ind-pumpning varighed dage	Flytning/opstart <sup>2)</sup> dage	Vejrlig <sup>1)</sup> nedbrud dage	I alt dage
1. Kikhavn-Liseleje	7.500	282.000	15	4	5	24
2. Tisvilde-Vincentstien,	5.700	524.000	27	3	8	38
3. Rågeleje-Trillingerne	2.000	113.000	7	1	1	9
4. Havstokken-Feriebyen Udsholt-Smidstrup	3.800	105.000	6	2	1	9
5. Gilbjerg Hoved	1.800	55.000	4	1	1	6
6. Gilleleje-Nakkehoved	1.700	7.000	1	1	1	3
7. Munkerup	4.900	54.000	3	3	1	7
8. Ålsgårde	7.700	362.000	18	4	6	28
I alt	35.100	1.500.000	81	19	24	124

Note: <sup>1)</sup> Vejrlig-nedbrud ansat til 2 dage pr. uge. Dog min 1 dag pr. lokalitet

<sup>2)</sup> Flytning/opstart ansat til 1 dage pr. 2.000 m.

Tabel 8.1: Vurderet varighed af strandfodringen på delstrækninger.



### *Mobilisering*

Følgende materiel skal mobiliseres:

- Sandsugerfartøj
- Flydeledning
- Pumperør
- Entreprenør materiel (gummiged, gravemaskine og dumper)

Mobilisering af ovennævnte materiel vurderes at kunne udføres på 2 – 3 uger efter indgåelse af entreprisekontrakt.

Flytning af materiel til efterfølgende fodringsområde vurderes at kunne udføres på 2 – 3 dage.

### *Udbud af strandfodring*

I entreprenørudbuddet anbefales det at fastsætte et minimum af begrænsninger for udførelsen, ligesom det skal være op til den bydende selv at fastlægge dels udførelsessekvensen, dels antallet af fartøjer og fartøjernes lasteevne.

Det anbefales, at være et krav med færdiggørelse af et fodringsområde før flytning til et andet fodringsområde.

Ligeledes anbefales, at entreprenøren selv skal planlægge den samlede udførelse af fodringerne inden for en periode af 6 måneder under overholdelse af de restriktioner, der er knyttet til såvel indvinding af materialer som udførelse af strandfodringen.

### *Sammenfatning*

Det samlede strandfodringsprojekt kan være udført inden for 6 måneder efter bygherrens indgåelse af entreprisekontrakt.

## 9 Referencer

- [1] NIRAS, »Nordkystens Fremtid. Miljøkonsekvensvurdering,« 2020.
- [2] NIRAS, »Nordkystens Fremtid. Skitseprojekt for offentlige udløb på Nordkysten,« 2019.
- [3] DHI, »Nordkystens Fremtid. Myndighedsprojekt, Numerisk modellering,« 2018.
- [4] NIRAS, »Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Topografisk survey,« 2018.
- [5] DHI, »Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Bathymetrisk opmåling og bestemmelse af sandlag,« 2018.
- [6] NIRAS, »Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Bathymetrisk survey på lavt vand,« 2018.
- [7] NIRAS, »Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Geologisk og getoteknisk desk study,« 2018.
- [8] COWI, »Nordkystens Fremtid. Kystteknisk Skitseprojekt,« 2016.
- [9] DHI, »Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Sedimentprøver fra havbunden,« 2018.
- [10] NIRAS, »Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Sedimentprøver på land,« 2018.
- [11] NIRAS, »Nordkystens Fremtid. Forundersøgelser, Tilstandsvurdering af kystbeskyttelse, Hundested - Helsingør,« 2018.
- [12] CIRIA, CUR, CETMEF, »The Rock Manual, The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition),« C683, CIRIA, London, 2007 (reprinted 2012).
- [13] EurOtop, »Manual on wave overtopping of sea defences and related structures,« 2016.
- [14] O. J. Jensen, A Monograph on Rubble Mound Breakwaters, 1984.
- [15] Kystdirektoratet, »Lave Bølgebrydere,« 2001.
- [16] N. Drønen, P. Sørensen, R. Deigaard, S. Kristensen og O. Ries, »A model based study of sand nourishment decay,« i *Coastal Dynamics 2017*, Helsingør, 2017.

- [17] DHI; Hasløv & Kjærsgaard, »Genanvendelse af havnesand fra Gilleleje og Hrbæk Havne,« Gribskov Kommune: Helsingør Kommune, 2013.
- [18] NIRAS, »Nordkystens Fremtid. Myndighedsprojekt for strandfodring,« 2020.
- [19] NIRAS, »Nordkystens Fremtid. Cost-effectiveness analyse af kystbeskyttelse på Nordkysten,« 2020.
- [20] NIRAS, Nordkystens Fremtid. Kystteknisk projekt, 2020.
- [21] NIRAS, Nordkystens Fremtid. Kystteknisk projekt, 2020.