

# Nordkystens Fremtid

## Forunder- søgelse

Tilstandsvurdering af  
kystbeskyttelse  
Hundested - Helsingør

**GRIBSKOV KOMMUNE**

**19. MARTS 2018**

# Indhold

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Dimensioneringskriterier</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Vandstand</b>	<b>7</b>
3.1	Normal vandstand	7
3.2	Ekstremvandstand	7
3.3	Korrelation af bølger og vandstand	7
3.4	Stormenes varighed	9
3.5	Eustatisk havspejlsstigning	9
3.6	Dimensionsgivende vandstand på dybt vand	10
3.7	Isostatisk landhævning	11
<b>4</b>	<b>Akut og kronisk erosion af kystprofilet</b>	<b>12</b>
4.1	Akut erosion	12
4.2	Kronisk erosion	13
4.2.1	Erosion grundet underskud i sedimentbudget	14
4.2.2	Erosion grundet havspejlsstigning	14
4.3	Effekt af erosion	15
<b>5</b>	<b>Bølgeklima på dybt vand</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Vandstand- og bølgeforhold på lavt vand</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Dimensionering af konstruktioner</b>	<b>18</b>
7.1	Generelt design	19
7.2	Skråningsbeskyttelse	21
7.2.1	Dimensionering	21
7.2.2	Vurdering	23
7.3	Bølgebrydere og høfder	24
7.3.1	Dimensionering	24
7.3.2	Vurdering	25
<b>8</b>	<b>Tilstandsvurdering</b>	<b>25</b>
8.1	Tilstand uden strandfodring	26
8.2	Tilstand med strandfodring	28

<b>9</b>	<b>Andre informationer</b>	<b>30</b>
<b>10</b>	<b>Referenceliste</b>	<b>32</b>

---

---

## Revisionslog

<b>Revision</b>	<b>Dato</b>	<b>Log</b>	<b>Udført</b>	<b>Kontrol</b>	<b>Godkendt</b>
01	22/12-17		MLV/PFKL	JAD	CHP
02	19/3-17	Opdateret designgrundlag	MML/KMR/CHLD	PFKL	CHLD

Projekt nr.: 228920  
Dokument nr.: 1226351915  
Project dokument nr.: 10-0501  
Revision 02

Udarbejdet af MLV, PFKL  
Kontrolleret af JAD  
Godkendt af CHP

## 1 Indledning

Niras har udarbejdet en tilstandsvurdering af kystkonstruktionerne langs Nordkysten baseret på data indsamlet i forbindelse med kystinspektionerne, se *10-0401 Registrering af eksisterende konstruktioner*.

Tilstandsvurderingen vurderer de eksisterende konstruktioner i forhold til karakteristiske standarder for kystbeskyttelse på Nordkysten.

I det følgende beskrives beregningerne bag tilstandsvurderingen af eksisterende konstruktioner.

Indledningsvist vurderes, om kystbeskyttelseskonstruktionerne med nuværende beskyttelsespraksis uden strandfodring vil kunne modstå den dimensionsgivende hændelse nu og i fremtiden.

Desuden vurderes, om konstruktionerne vil kunne modstå den dimensionsgivende hændelse, hvis der fremadrettet strandfodres langs bebyggede og truede strækninger på Nordkysten.

I begge tilfælde vurderes, om konstruktionerne vil kunne opgraderes til det nødvendige beskyttelsesniveau ved udbygning og eller forhøjelse, eller om konstruktionerne bør genbygges fra bunden.

Tilstandsvurderingen visualiseres med følgende farveskala:

- Grøn - Vurderet at opfylde dimensioneringsforudsætningerne
- Gul - Vurderet at opfylde dimensioneringsforudsætningerne efter udbygning og forstærkning
- Rød - Vurderet at skulle genopbygges
- Sort - Ikke vurderet

## 2 Dimensioneringskriterier

Kystbeskyttelsen vurderes i forhold til, om den bliver beskadiget ved en bestemt bølge- og højvandshændelse (middeltidshændelse).

Derudover inkluderes kystbeskyttelsens levetid,  $L$ , også kaldet planlægningshorisonten. Kystbeskyttelsens levetiden er den årrække man regner med, at kystbeskyttelsen skal kunne modstå dimensioneringshændelsen uden, at der opstår væsentlige skader.

I det følgende diskuteres dimensioneringskriterierne for den anbefalede kystbeskyttelse langs Nordkysten:

- Skråningsbeskyttelse
- Strandfodring

Anbefalet levetid  $L$ , acceptabel risiko,  $R$  for overskridelse af den dimensionsgivende hændelse i levetiden og middeltidshændelsen,  $MT$ , er forskellige for de to typer kystbeskyttelse.

Der er en sandsynlighed,  $R$  (risiko) for, at vandstand og bølgepåvirkning med den valgte middeltidshændelse vil forekomme eller overskrides inden for den valgte

levetid. Størrelsen på sandsynligheden er anskueliggjort i Tabel 2.1 og beregnet ud fra relationen mellem levetid, L, middeltidshændelse, MT og risiko for skade, R.

Tabel 2.1: Beregnet sandsynlighed, R, i % for at middeltidshændelsen, MT, i år optræder indenfor levetiden, L, i år og der derfor opstår skader på konstruktionen. Relationen mellem levetid, L, middeltidshændelse, MT, og risiko for skade, R:  $R=1-(1-1/MT)^L$ , [1].

Levetid (L) i år	Middeltidshændelse (MT) i år								
	1	5	10	25	50	100	250	500	1000
1	100	20	10	4	2	1	0	0	0
5	100	67	41	18	10	5	2	1	0
10	100	89	65	34	18	10	4	2	1
25	100	100	93	64	40	22	10	5	2
50	100	100	99	87	64	39	18	10	5
100	100	100	100	98	87	63	33	18	10

Tabellen viser, at der er 64 % risiko for, at en 50 års middeltidshændelse optræder inden for en levetid på 50 år og, at der derfor kan opstå skader på kystbeskyttelsen.

En større middeltidshændelse vil med en given levetid give en mindre sandsynlighed for, at dimensioneringskriterierne overskrides og at der kan ske skader på kystbeskyttelsen.

De forhold der skal undersøges og tages stilling til i forbindelse med fastlæggelse af dimensionskriterierne for kystbeskyttelse omfatter følgende trin:

1. **Ekstremstatistik baseret på historiske hændelser.**

Kystdirektoratet har udarbejdet en ekstremværdianalyse af vandstand på grundlag af historiske målinger af vandstande frem til 2017. Ekstremstatistikken gælder for den historiske periode som datagrundlaget dækker.

2. **Bestemmelse af levetiden.**

Bestemmelse af levetiden for kystbeskyttelsen afhænger af følgende elementer:

- Type af kystbeskyttelse; kort levetid for fleksible tiltag (strandfodring) og længere levetid for hårde ikke fleksible tiltag (skråningsbeskyttelse og bølgebrydere).
- Størrelse af beskyttet område; kort levetid for lille område og længere levetid for større område.
- Type af den facilitet som beskyttes; kort levetid for landbrugsjord, naturområder og rekreative faciliteter, medium levetid for spredt bebyggelse og sekundær infrastruktur og lang levetid for tæt bebyggelse, primære infrastruktur og offentlige værker/faciliteter.

3. **Valg af scenarie for havspejlsstigning.**

Nationale og internationale myndigheder og forskningsinstitutioner udgiver løbende forudsigelser for fremtidig havspejlsstigning, lufttemperatur og havtemperatur mm. Prognoserne bygger på forskellige antagelser og der er betydelig usikkerhed på estimerne. Der opstilles derfor typisk en række forskellige klimascenarier, eksempelvis et lavt, et middel og et højt. Valg af det relevante scenarie afhænger af typen af den facilitet, der skal

beskyttes og dens følsomhed for overskridelse af den dimensionsgivende hændelse:

- Lavt scenarie anbefales for landbrugsjord, naturområder og rekreative faciliteter.
- Mellem scenarie anbefales for spredt bebyggelse og sekundær infrastruktur.
- Højt scenarie anbefales for tæt bebyggelse, primære infrastruktur og offentlige faciliteter.

#### 4. **Fastlæggelse af acceptable risiko (%)**

Den acceptable risiko, R afhænger typisk af følgende forhold:

- Størrelse af det beskyttede område;
  - høj R-værdi for små områder
  - lav R-værdi for store områder
- Type af facilitet som beskyttes;
  - Høj R-værdi for landbrugsjord, naturområder og rekreative faciliteter
  - Middel R-værdi for spredt bebyggelse og sekundær infrastruktur
  - Lille R-værdi for tæt bebyggelse, primær infrastruktur og offentlige værker/faciliteter

#### 5. **Fastlæggelse af middeltidshændelsen MT (i år)**

Middeltidshændelsen fastlægges på grundlag af den valgte levetid af konstruktionen og den acceptable risiko for skader i henhold til sammenhængen angivet i Tabel 2.1.

På baggrund af ovenstående foreslås følgende dimensioneringskriterier for skråningsbeskyttelser og strandfodring på Nordkysten, se Tabel 2.2.

*Tabel 2.2: Anbefalede dimensioneringskriterier for skråningsbeskyttelser og strandfodring på Nordkysten*

Dimensioneringskridt	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 af eksisterende skråningsbeskyttelser er derfor udarbejdet i forhold til en middeltidshændelse på 50 år. Konstruktionernes tilstand vurderes i dag, om 25 år og om 50 år.

Strandfodring skal vedligeholdes og kan med fordel løbende udbygges i takt med fremtidig havspejlsstigning. Strandfodring er samtidig fleksibel kystbeskyttelse,

som beskytter eksisterende skråningsbeskyttelser og skråninger bagved. Det anbefales derfor, at strandfodring på Nordkysten dimensioneres, så minimums strandniveau lige inden vedligeholdelsesfodring kan modstå en middeltidshændelse på 50 år og med en dimensionsgivende levetid på 5 år.

Det forudsættes, at stranden løbende vedligeholdes og udbygges i takt med havspejlsstigningerne for at sikre, at der til enhver tid er nok sand og ral på stranden til at opretholde den definerede beskyttelse ved det samlede kystbeskyttelsesplanlæg bestående af både blød og hård kystbeskyttelse.

## 3 Vandstand

### 3.1 Normal vandstand

Det astronomiske tidevand ved 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 Ekstremvandstand

Når den dimensionsgivende højvandstand skal vurderes anvendes højvandsstatistikker. Som del af modelleringen udført af DHI er der udarbejdet højvandsstatistikker langs Nordkysten på baggrund af modelleret vandstande. Alle de udarbejdede statistikker er korrigeret således, at statistikken ved Hornbæk Havn er identisk med højvandsstatistikken udarbejdet af Kystdirektoratet [2].

For den østlige del af Nordkysten (øst for Gilleleje) anvendes ekstremstatistikken ud for Hornbæk Havn. For den vestlige del af Nordkysten (vest for Gilleleje) anvendes statistikken ud for Tisvildeleje. Ekstremværdierne ses i Tabel 3.1.

*Tabel 3.1: Højvandsstatistik for Hornbæk Havn og Gilleleje udarbejdet af DHI. Ekstremværdierne er opgivet i DVR90 med hændelse svarende til middelvandstand i 2018. Ekstremværdier er centrale estimater og er derved forbundet med usikkerhed.*

Middeltidshændelse [år]		10	20	50
<b>Hornbæk Havn (st34)</b>	<b>[cm DVR90]</b>	+148	+159	<b>+172</b>
<b>Tisvildeleje (st13)</b>	<b>[cm DVR90]</b>	+146	+156	<b>+169</b>

De opgivne ekstremværdier er centrale estimater og er derfor forbundet med usikkerhed. Denne usikkerhed tages der ikke højde for i det følgende.

Den højeste målte vandstand i Hornbæk Havn er +1,92 m over middelvandstand svarende til +2,00 m DVR90 i 2018 og forekom under stormen Bodil i begyndelsen af december 2013. Højvandsstatistikken viser, at stormen Bodil svarer nogenlunde til en statistisk 400 årsmiddeltidshændelse.

Ekstremværdien for en middeltidshændelse på 50 år er +1,72 m DVR90 for den østlige kyststrækning og +1,69 m DVR90 for den vestlige kyststrækning, som anvendes i denne tilstandsvurdering.

### 3.3 Korrelation af bølger og vandstand

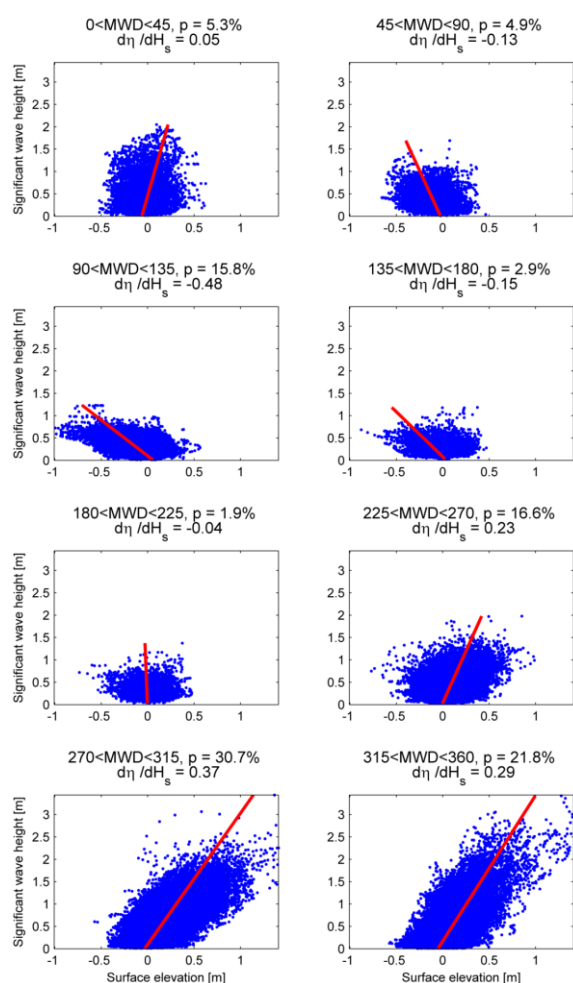
Ved dimensionering af kystbeskyttelse er det vigtigt at vurdere, om der er korrelation mellem ekstrem vandstand og ekstrem bølgehøjde.

For Nordkysten af Sjælland er der stor korrelation mellem forhøjet vandstand og ekstrem bølgepåvirkning, som det ses af nedenstående Figur 3.1.

Korrelationen skyldes, at bølge- og vandstandsforholdene i den sydlige del af Kattegat ud for Nordkysten begge er styret af vindforholdene. Når vinden blæser fra nordvestlige retninger presses vandet ind gennem Skagerrak og videre ned i Kattegat og skaber øget vandstand i de Indre Danske Farvande. Samtidigt er det fra nordvestlige vindretninger, at Sjællands Nordkyst har det længste frie stræk med pålandsvind og således de største bølger, se nederste to figurer i Figur 3.1. Det frie stræk betyder længden af det farvand, som bølgerne kan vokse over. Ligeledes vil kraftig vind fra sydøstlige retninger give fralandsvinde, som fører til lavvande og små bølger ved Nordkysten af Sjælland.

Kystbeskyttelseskonstruktionerne skal derfor dimensioneres for en ekstrem vandstand samtidig med ekstrem bølgepåvirkning. I dette tilfælde altså en høj vandstand med middeltidshændelse på 50 år samtidig med en bølgehøjde med en middeltidshændelse på 50 år.

Figur 3.1: Scatter-diagrammer viser sammenhæng mellem bølgehøjde ( $H_s$ ) og vandstand (surface elevation) ud for Gilleleje for forskellige bølgeretninger. Når den røde linje hælder mod positive værdier er der god sammenhæng mellem høje bølger og høj vandstand, altså en positiv korrelation. Jo tydeligere sammenhæng der er, jo større er  $p$ -værdien. [12]





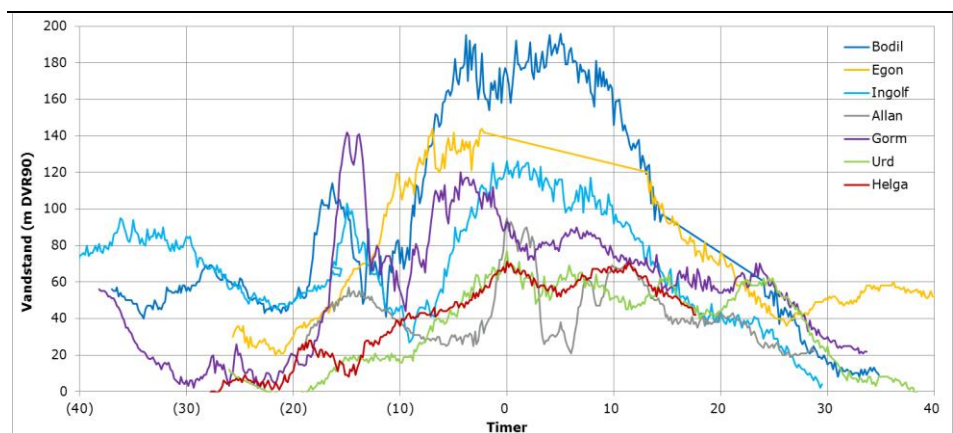
### 3.4 Stormenes varighed

Den nødvendige størrelse af dækstene i skråningsbeskyttelser, bølgebrydere og hølfer afhænger af designstormenes varighed.

God praksis har tidligere været at sætte designstormens varighed til 3 timer. Stormene Bodil, Urd og Ingolf varede imidlertid op mod 12 timer.

I dette projekt fastsættes designstormens varighed til 7 timer baseret på Figur 3.2.

Figur 3.2: Varighed af forhøjet vandstand under de seneste 7 storme på Nordkysten i perioden 2013 til 2017

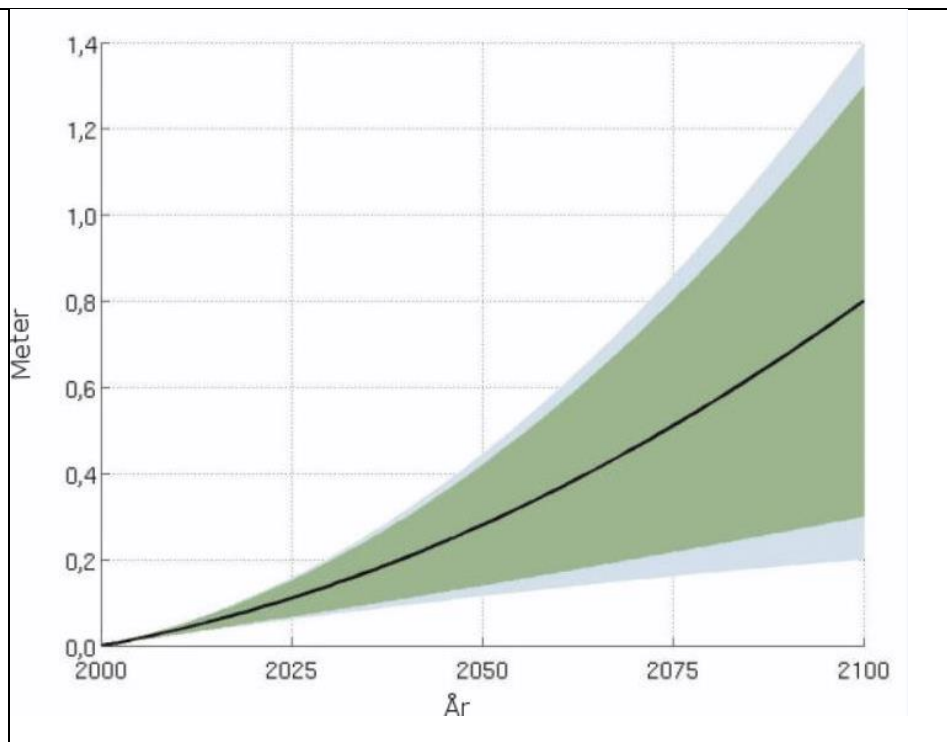


### 3.5 Eustatisk havspejlsstigning

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 3.3.

Figur 3.3: : 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, [3]



DMI's 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 er derfor behæftet med en usikkerhed, angivet med grøn og blå i Figur 3.3.

### 3.6 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 3.2.

Tabel 3.2: Beregning af dimensionsgivende vandstand på dybt vand udenfor brydningszonen ved nordkysten af Sjælland.

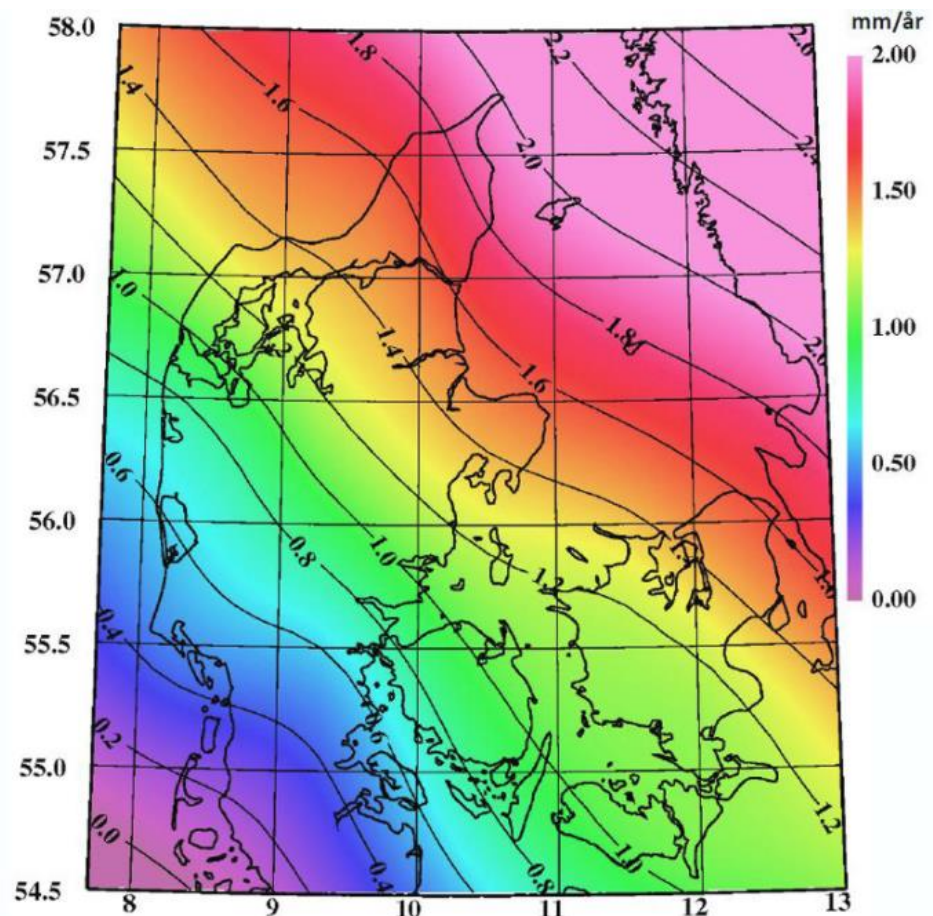
	VEST	ØST
Vandstand ved middeltidshændelse på 50 år i 2020 [m DVR90]	+1,69	+1,72
Havvandspejlsstigning mellem 2020 og 2045 ifølge DMI's bedste bud [m]	+0,16	
Havvandspejlsstigning mellem 2045 og 2070 ifølge DMI's bedste bud [m]	+0,21	
Dimensionsgivende vandstand i år 2070 [m DVR90]	+2,06	+2,09

Den dimensionsgivende vandstand på lavt vand får ekstra bidrag bølge-setup, grundet bølgebrydning langs kysten, hvilket behandles nærmere i Afsnit 6.

### 3.7 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 3.4.

Figur 3.4: Absolut landhævning i Danmark med nøjagtighed på 0,2 mm/år, [13].



Landhævningen bevirker, at kystprofilen og terrænet hæves som 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 1,4 - 1,6 mm/år. For hele Nordkysten af Sjælland antages derfor et gennemsnit på 1,5 mm/år, hvormed den resulterende landhævning i år 2070 bliver +8 cm i forhold til terrænniveau i 2017.

Størrelsen på den forventede landhævning er af betydning ved beregning af vanddybden ud fra hvilken, den dimensionsgivende bølgehøjde skal findes, se Afsnit 6.

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

## 4 Akut og kronisk erosion af kystprofillet

Gennem kystbeskyttelsens forudsatte levetid på 50 år vil kystprofillet erodere tilbage som følge af kronisk erosion. Den kroniske erosion skyldes den langsgående sedimenttransport, som medfører et generelt underskud i sedimentbudgettet på Nordkysten.

Dertil vil der under stormflod ske akut erosion af stranden foran kystbeskyttelsen, hvor sedimentet transporteres fra stranden ud i strandprofillet. I den efterfølgende stille-periode inden næste storm vil sedimentet ofte transporteres tilbage på stranden.

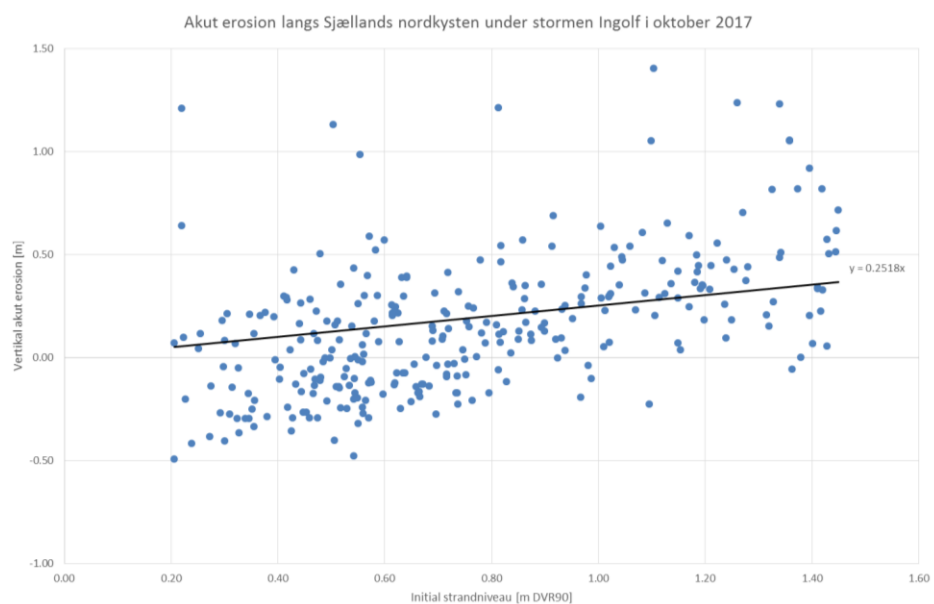
Den kroniske og akutte erosion forårsager en forstejling af kystprofillet og vanddybden foran konstruktionerne øges fremover. Dette medregnes i tilstandsvurderingen af kystbeskyttelsen.

### 4.1 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 kystprofillet på stranden. Strandene bliver fladere og lavere samtidig med, at sand og ral transporteres ud på lidt dybere vand.

Mellem udførelsen af de topografiske og de batymetriske opmålinger blev Sjællands nordkyst ramt af stormen Ingolf. Stormen forårsagede en kraftig akut erosion af stranden, som er kvantificeret ved at sammenligne højdemålinger i samme punkter foretaget før og efter stormen, se Figur 4.1. Figuren viser den vertikale erosion (forskel på strandniveau før og efter 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.

Figur 4.1: Opmålt akut erosion efter stormen Ingolf 28. oktober 2017.



Negligeres den akutte erosion i den fladere del af kystprofilen under kote 0, fås en trendlinje som vist i Figur 4.1. Trendlinjen viser, at den akutte erosion i gennemsnit udgør i størrelsesorden 25 % af det initiale strandniveau før stormen Ingolf på Nordkysten. Den akutte erosion forekommer primært i opskylszonen under stormen og har derfor en øvre grænse, som afhænger af vandstand og bølger under den givne storm

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

Med forbehold for de nævnte usikkerheder anvendes trendlinjen for den akutte erosion som udgangspunkt for at vurdere tilstanden af eksisterende konstruktioner. Trendlinjen vurderes dog at undervurdere den akutte erosion ved sandstrandene.

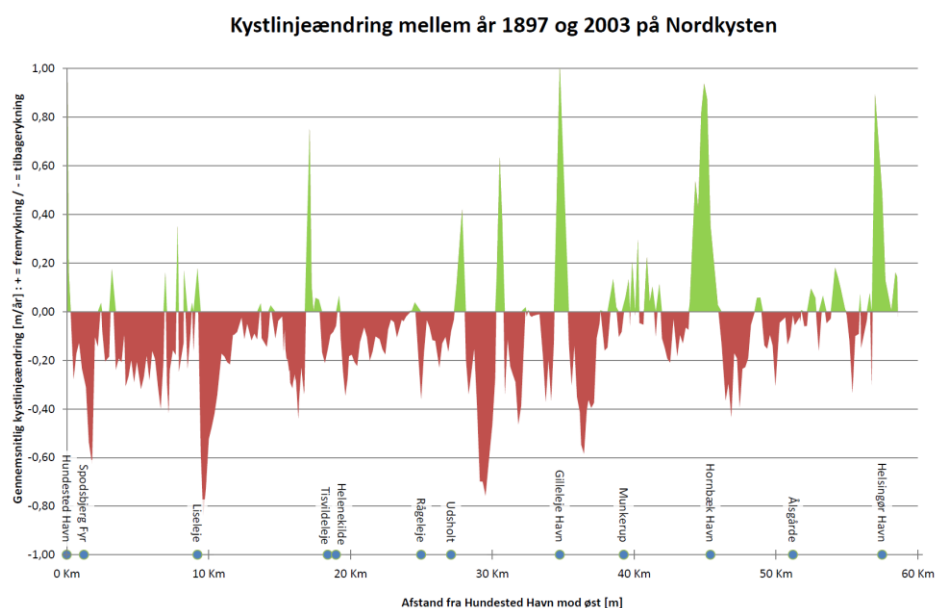
Størrelsen af den akutte erosion undersøges nærmere som en del af myndighedsprojektet.

## 4.2 Kronisk erosion

Kroniske erosion skyldes gradienter i den langsgående sedimenttransport, hvor 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 4.2.

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

Figur 4.2: 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)



#### 4.2.1 Erosion grundet underskud i sedimentbudget

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

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

De største kysttilbagerykninger findes langs ubeskyttet strækninger og nedstrøms for større kystkonstruktioner.

På de beskyttede strækninger reducerer kystbeskyttelsen størrelsen af den kroniske erosion af stranden. Den kroniske erosion ude i kystprofilen forventes dog at være større. Derfor anvendes kysttilbagerykningen på ubeskyttede strækninger også til at beskrive forholdene langs beskyttede strækninger.

På den ubeskyttede kyststrækning langs Tisvilde Hegn er der fundet en gennemsnitlig kysttilbagerykning på 21 m fra 1897 frem til 2003, svarende til en kysttilbagerykning på ca. 20 cm/år. Ved tilsvarende analyse af kyststrækningen ved Hornbæk Plantage fås en kysttilbagerykning i samme størrelsesorden.

Hældningen af strandprofilerne på Nordkysten varierer fra 1:10 på ralstrande og op til 1:20 for strande med fint sand. For nærværende anvendes en strandhældning på 1:15 som vurderes repræsentativ for Nordkystens sandstrande. Det betyder, at terrænniveauet foran en konstruktion i gennemsnit sænkes med 1,3 cm/år, hvilket giver en total reduktion af terrænniveau på 65 cm i år 2070.

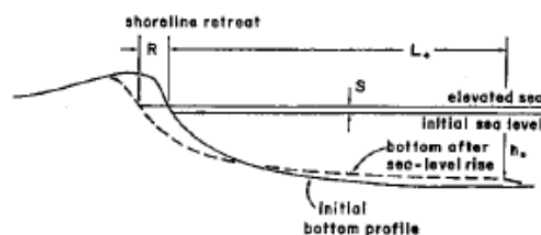
#### 4.2.2 Erosion grundet havspejlsstigning

I takt med at middelvandstanden stiger, vil kystprofilen naturligt opretholde en ligevægtform. Dette medfører, at der vil ske erosion af den øverste del af kystprofilen og aflejring i den ydre del, se Figur 4.3. Kysttilbagerykningen grundet dette forhold beregnes ved Bruuns Regel:

$$R = \frac{L_*}{B + h_*} S$$

hvor  $R$  er kysttilbagerykningen,  $L_*$  er afstanden fra kystlinjen til den aktive dybde,  $h_*$  er højden af stranden.  $S$  er havspejlsstigningen.

Figur 4.3: Princip for kysterrosion grundet stigning af middelhavspejlet. For at opretholde et ligevægtsprofil sker der erosion i den øverste del af profillet og aflejring i den yderste del.



Den vertikale erosion beregnes som produktet af kysttilbagerykningen og strandhældningen, som er 1:15 jf. Afsnit 4.2. Ved havspejlsstigninger som angivet

i Afsnit 3.6 fås kysttilbagerykning og dertil kommende vertikal erosion som angivet i Tabel 4.1. Det vurderes at den gennemsnitslige højde af stranden foran skråningsbeskyttelserne er +1,0m DVR90.

Tabel 4.1: Kysttilbagerykning og dertil kommende vertikale erosion grundet stigning i havvandsspejlet.

		Vest		Øst	
		2045	2070	2045	2070
Havspejlsstigning, $S$	[m]	0,16	0,37	0,16	0,37
Aktiv dybde, $h_*$	[m]	5,0	5,0	4,0	4,0
Længde af profil, $L_*$	[m]	225	225	161	161
Højde af strand, $B$	[M]	1,0	1,0	1,0	1,0
Kysttilbagerykning, $R$	[m]	6.0	13.9	5.2	11.9
Hældning af strand	[-]	1:15	1:15	1:15	1:15
Vertikal erosion	[m]	-0.40	-0.93	-0.34	-0.79

### 4.3 Effekt af erosion

Den kroniske erosion medvirker til en øget vanddybden foran konstruktionerne. Til den kroniske erosion skal effekten af den akutte erosion lægges til, der beregnes som 25 % af det eroderede terrænniveauet.

Tabel 4.2: Vertikal erosion af strandprofilet grundet kronisk erosion. Hertil skal den akutte erosion lægges til.

		Vest		Øst	
		2045	2070	2045	2070
Kronisk erosion	[cm]	33	65	33	65
Erosion grundet havspejlsstigning	[cm]	40	93	34	79
Total erosion	[cm]	73	158	67	144

Den øgede vanddybde foran konstruktionerne medfører, at bølgeenergien stiger, da bølgerne er dybdebegrænsede på lavt vand.

Tabel 4.3 og Tabel 4.4 viser de bidrag, der indgår i fastlæggelsen af vanddybden foran kystbeskyttelsen og som benyttes som udgangspunkt for tilstandsvurderingen på 25 års sigt og 50 års sigt. Til disse ændringer tillægges den akutte erosion, som er afhængig af det initiale terrænniveau foran konstruktionen.

Tabel 4.3: Faktorer der bidrager til ændring af vanddybden for den vestlige del af Nordkysten. Dertil tillægges bidrag fra akut erosion.

VEST	25 års sigt (år 2045)	50 års sigt (år 2070)
Erosion	+73 cm	+158 cm
Havspejlsstigning	+16 cm	+37 cm
Landhævning	-4,2 cm	-8,0 cm
<b>Total ændring af vanddybde</b>	<b>+85 cm</b>	<b>+187 cm</b>

Tabel 4.4: Faktorer der bidrager til ændring af vanddybden for den østlige del af Nordkysten. Dertil tillægges bidrag fra akut erosion.

ØST	25 års sigt (år 2045)	50 års sigt (år 2070)
Kronisk erosion	+67 cm	+144 cm
Havspejlsstigning	+16 cm	+37 cm
Landhævning	-4,2 cm	-8,0 cm
<b>Total ændring af vanddybde</b>	<b>+79 cm</b>	<b>+174 cm</b>

## 5 Bølgeklima på dybt vand

Nordkysten af Sjælland kan klassificeres som en moderat eksponeret kyst med det længste frie stræk mod vest og nord. De dominerende bølger er fra vestlige retninger.

Vest for Gilleleje er det længste frie stræk minimum 150 km fra vest og nord og enkelte steder helt fra det nordlige Skagerrak med over 300 km. Øst for Gilleleje er kystorienteringen mere mod nord og nordøst, hvorfor bølgeklimaet er mildere. Dette er også gældende under stormsituationer, hvor det længste frie stræk fra nord generelt er mindre end for den vestlige del af Nordkysten.

For grundigere gennemgang og overblik over bølgeklimaet på forskellige lokaliteter langs Sjællands Nordkyst henvises til Skitseprojektet for Nordkystens Fremtid, [4].

Til fastlæggelse af det valgte dimensioneringsscenario skal der anvendes en bølgehøjde med en middeltidshændelse på 50 år.

Designbølgeforholdene bestemmes først på dybt vand, hvorefter bølgerne transformeres ind til kysten.

Ekstrembølgehøjden ( $H_{m0}$ ) og den tilhørende bølgeperiode ( $T_p$ ) med en middeltidshændelse på 50 år er fundet ud fra DHI's MIKE 21 SW model for Kattegat baseret på 18 års vinddata (1994-2011). Bølgehøjden er udtrykt på to lokaliteter; ud for Tisvildeleje (punkt 36) og ud for Villingebæk (punkt 35), se Tabel 5.1. De to bølgeklimaer repræsenterer hhv. den vestlige del (Hundested til Gilleleje) og den østlige del (Gilleleje til Helsingør) af Sjællands nordkyst.



Tabel 5.1: Designbølgehøjde og tilhørende bølgeperiode på dybt vand for to lokaliteter ud for Sjællands nordkyst (Tisvildeleje og Villingebæk) med en middeltidshændelse på 50 år, [4] og [5].

Middeltidshændelse på 50 år	Tisvildeleje	Villingebæk
Bølgehøjde på dybt vand, $H_{m0}$ [m]	4,2	3,7
Bølgeperiode, $T_p$ [s]	8,8	9,1
Vanddybde [m]	11,6	22,6

Den dimensionsgivende bølge er den samme, som blev anvendt i skitseprojektet for Nordkystens Fremtid, [4]). Grundigere gennemgang af modellen og oversigt over udtrækspunkter kan ses i DHIs rapport fra 2012, [5].

## 6 Vandstand- og bølgeforskel på lavt vand

Når bølgerne bevæger sig ind på lavere vanddybder mod kysten, grunder de op og bryder. Bølgerne er dybdebegrænsede på lavt vand. LITDRIFT er anvendt til at transformere bølgerne hen over kystprofilen for at kunne estimere den dimensionsgivende bølgehøjde og bølge set-up ved foden af kystbeskyttelsen. LITDRIFT er en del af LITPACK software-pakken udviklet af DHI.

LITDRIFT er baseret på  $H_{rms}$ , som beregnes ved brug af følgende formel [6]:

$$H_{rms} = \left( 0,6725 + 0,2025 \left( \frac{H_{m0}}{h} \right) \right) H_{m0}$$

Hvor  $h$  vanddybden og  $H_{m0}$  er den signifikante bølgehøjde.

Transformationen af den dimensionsgivende bølge er foretaget for et ligevægtsprofil baseret på en mediankornstørrelse  $d_{50} = 0,35 \text{ mm}$  (se 10-0112 Sedimentprøver på land) og med en strandhældning på 1:15.

I LITDRIFT beregningerne anvendes en vandstand på dybt vand på +1,80 m DVR90, svarende til designvandstanden i dag jf. Afsnit 3.6. Den forventet havspejlsstigning og landhævning tages derfor ikke med i denne beregning, idet kystprofilen inde for den aktive dybde løbende naturligt justeres til den stigende vandstand og kysttilbagerykning.

I vurderingen af de eksisterende anlæg langs Nordkysten skal de nødvendige dimensioner findes for forskellige vanddybder. For hver af disse dybder (4,0; 3,5; 3,0; 2,5; 2,0; 1,5; 1,0; 0,5 m) er bølgehøjden og den forøget vandstand grundet bølge set-up aflæst af resultatet fra LITDRIFT modellen.  $H_{rms}$ -værdierne omregnes herefter til signifikante bølgehøjde, ( $H_{m0}$ ) ved brug af ovenstående formel.

De dimensionsgivende bølgehøjder og bølge set-up for forskellige vanddybder, er vist i Tabel 6.6.1 for kyststrækningen vest for Gilleleje og i Tabel 6.6.2 for kyststrækningen øst for Gilleleje.

Største vanddybde foran konstruktionen	[m]	4,0	3,4	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5
Signifikant bølgehøjde, $H_{m0}$ , vest for Gilleleje [m]	[m]	2,45	2,24	2,04	1,84	1,67	1,39	0,95	0,49
Bølge set-up, vest for Gilleleje [m]	[m]	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,24	0,35	0,45

Tabel 6.6.1: Dimensionsgivende signifikante bølgehøjder ( $H_{m0}$ ) og bølge-setup på lavt vand, for den vestlige del af Nordkysten.

Største vanddybde foran konstruktionen	[m]	4,0	3,4	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5
Signifikant bølgehøjde, $H_{m0}$ , øst for Gilleleje [m]	[m]	2,46	2,26	2,06	1,86	1,68	1,39	0,94	0,48
Bølge set-up, øst for Gilleleje [m]	[m]	0,06	0,09	0,11	0,13	0,15	0,21	0,31	0,42

Tabel 6.6.2: Dimensionsgivende signifikante bølgehøjder ( $H_{m0}$ ) og bølge-setup på lavt vand, for den østlige del af Nordkysten

## 7 Dimensionering af konstruktioner

I det følgende gennemgås designprincipperne for bølgebrydere og skråningsbeskyttelser. Opbygningen af høfder og bølgebrydere er principielt ens, og vurderes derfor efter samme designkrav.

Dimensionering af stenstørrelse og topkote af konstruktionerne varierer som funktion af vandstand, bølgehøjde, konstruktionens forsidehældning og funderingskote.

Den nødvendige størrelse af dækstenene dimensioneres ud fra Van der Meers metode for lavt vand med et skadesniveau på  $S_d \leq 3$ .

Bølgeoverskyl kan skabe oversvømmelse og erosion i det bagvedliggende terræn. Langs Nordkysten er der oftest en høj skrænt bagved skråningsbeskyttelserne. Skråningerne er oftest sårbare over for bølgeoverskyl. Frihøjden af skråningsbeskyttelsen er den vertikale afstand fra skråningsbeskyttelsens top til vandoverfladen uden hensynstagen til bølgebevægelse. Frihøjden 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. Den nødvendige topkoten af skråningsbeskyttelserne beregnes derefter som summen af vandstaden og frihøjden.

Bølgeoverskyllet beregnes ud fra EuroTop manualen, [7].

## 7.1 Generelt design

Stabiliteten af bølgebrydere og skråningsbeskyttelser afhænger primært af størrelsen af dækstenene, opbygningen af foden, lagstrukturen samt konstruktionens hældning på forside og bagside.

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

Lagstrukturen bør indeholde et eller to lag dæksten ovenpå et lag af filtersten. Derudover anbefales en geotekstil under filterlaget, der sikrer, at kernen ikke suges ud gennem filterlaget og derved skaber sætninger. For bølgebrydere består kernen typisk af ral, se Figur 7.1.

Den teoretiske tykkelse af dækstenslaget er én til to gange den nominelle stenstørrelse ( $2 \cdot D_{n50}$ ). Filterlaget bør som minimum være to gange den nominelle stenstørrelse ( $2 \cdot D_{n50}$ ) og som minimum 0,40 m tykt.

Omregning mellem den nominelle stenstørrelse ( $D_n$ ) og naturlige afrundet stenstørrelse ( $D$ ) foretages som ((3.10) i [6]):

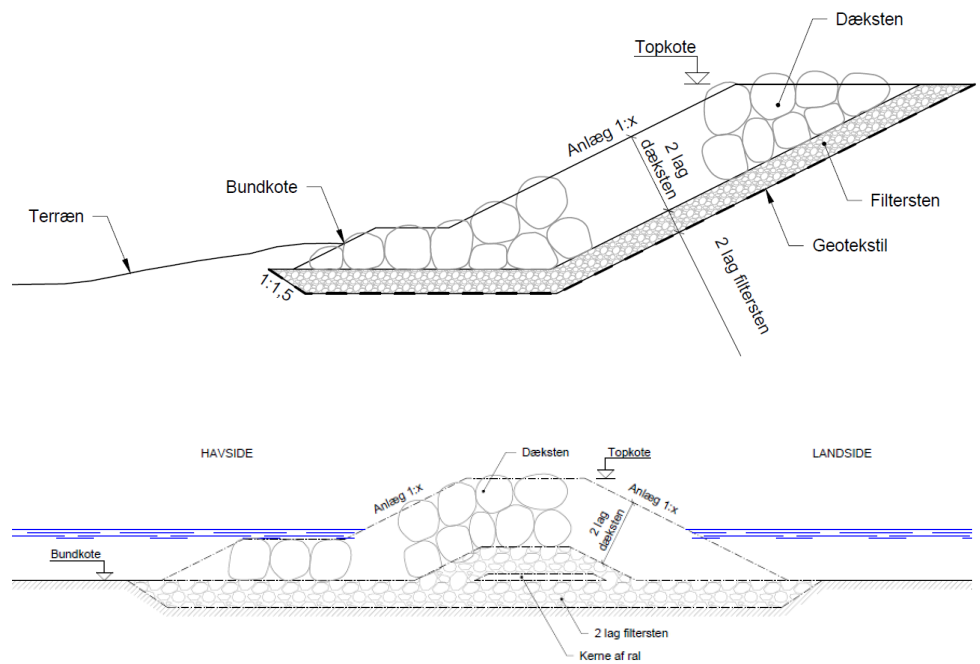
$$D_n = 0.84D$$

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 7.1.

For bølgebryderen bør tåen af dæksten være én til to lag på den bølgeeksponerede havside og rundt om enderne, mens dæksten blot føres ned til filterlaget på landsiden. Dækstenene rundt om enderne og langs bagsiden bør være 10-20% større end på havsiden. Derudover bør hele konstruktionen placeres på en pude af filtersten, der som er minimum 0,4m tykt.

Tåen og ralpuden etableres for at undgå underminering af konstruktionen. Ved etablering af bølgebryderen 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 7.1: Principskitse af skråningsbeskyttelse (øverst) og bølgebryder (nederst).



For at sikre imod udvaskning af filterstenene gennem dækstenene anvendes en gradering, som opfylder nedenstående filterlagskriterier af Thompson og Shuttler (1976) samt af Terzaghi [8].

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

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 % vægt-fraktilen.

## 7.2 Skråningsbeskyttelse

Tilstandsvurderingen af skråningsbeskyttelse foretages med baggrund i vanddybden umiddelbart foran konstruktionen.

Vanddybden foran konstruktionen bestemmes efter følgende metodik:

1. Initial terrænniveau er kendt fra registreringen
2. Fremtidig terrænkote bestemmes efter Tabel 4.3 og Tabel 4.4
3. Akut erosion bestemmes som 25 % af terrænkoten funden i punkt 2, hvis denne er over +0 m DVR90
4. Dimensionerende terrænkote bestemmes ved at fratække akut erosion
5. Bølge-setup bestemmes på baggrund af terrænkoten fundet i punkt 4
6. Vandstanden findes som summen af ekstremvandstand, havspejlsstigning (Tabel 3.2) og bølge-setup
7. Vanddybden bestemmes som differensen mellem vandstanden og terrænniveauet fundet ved punkt 4

Ved bestemmelse af vanddybden tages der højde for om konstruktionen er beliggende på den vestlige eller østlige del af Nordkysten.

Vanddybden bestemmes under nuværende forhold, 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. Grundet erosion og havspejlsstigning vil vanddybden foran konstruktionen forøges med tiden, hvorfor dimensioneringskravene ligeledes forøges.

### 7.2.1 Dimensionering

Til vurdering af tilstanden af eksisterende skråningsbeskyttelse er der beregnet nødvendige stenstørrelse og frihøjder for 8 forskellige vanddybder, 4 forsidehældninger og for bølgeklimate for den vestlige og østlige del af Nordkysten. Nødvendig topkote af skråningsbeskyttelserne findes som summen af vandstanden foran konstruktionen (punkt 6 i 7.2) og frihøjden.

De beregnede dimensioner er vist i Tabel 7.1 for den vestlige kyststrækning og Tabel 7.2 den østlige kyststrækning.

Resultaterne viser, at den nødvendige stenstørrelse reduceres ved faldende vanddybde og ved fladere anlæg af skråningsbeskyttelsen. Ligeledes reduceres frihøjden ved faldende vanddybde.

Idet der er minimal variation mellem bølgeklimate for den vestlige og østlige kyststrækning på en given vanddybde, er der ligeledes minimal variation mellem designkriterierne for de samme kyststrækninger.

Tabel 7.1: 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>0,5</b>	<b>[m]</b>	33	0,45	29	0,45	27	0,45	25	0,45
<b>1,0</b>	<b>[m]</b>	65	1,08	58	1,08	53	1,08	49	1,08
<b>1,5</b>	<b>[m]</b>	97	1,78	86	1,78	79	1,78	73	1,78
<b>2,0</b>	<b>[m]</b>	115	2,52	103	2,52	94	2,52	87	2,52
<b>2,5</b>	<b>[m]</b>	125	2,97	112	2,97	103	2,97	94	2,97
<b>3,0</b>	<b>[m]</b>	138	3,36	123	3,36	110	3,36	100	3,36
<b>3,5</b>	<b>[m]</b>	153	3,77	132	3,77	118	3,77	108	3,77
<b>4,0</b>	<b>[m]</b>	164	4,18	142	4,18	127	4,18	116	4,18

Tabel 7.2: 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>0,5</b>	<b>[m]</b>	32	0.45	29	0.45	26	0.45	24	0.45
<b>1,0</b>	<b>[m]</b>	64	1.08	57	1.08	52	1.08	48	1.08
<b>1,5</b>	<b>[m]</b>	97	1.78	86	1.78	79	1.78	73	1.78
<b>2,0</b>	<b>[m]</b>	116	2.52	103	2.52	95	2.52	88	2.52
<b>2,5</b>	<b>[m]</b>	127	3.01	113	3.01	104	3.01	95	3.01
<b>3,0</b>	<b>[m]</b>	140	3.40	124	3.40	111	3.40	101	3.40
<b>3,5</b>	<b>[m]</b>	154	3.81	133	3.81	119	3.81	109	3.81
<b>4,0</b>	<b>[m]</b>	164	4.20	142	4.20	127	4.20	116	4.20

### 7.2.2 Vurdering

Om eksisterende skråningsbeskyttelser er tilstrækkeligt dimensioneret til at kunne modstå den dimensionsgivende hændelse er overordnet vurderet efter om dækstenene er store nok og om topkoten er høj nok ift. kombinationen af forsidehældning og vanddybde.

Designkriterierne for den enkelte konstruktion er fundet ved lineær interpolation mellem de beregnede værdier.

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.

Med mindre andet var synligt under inspektionen er det antaget, at de enkelte skråningsbeskyttelser er korrekt kystteknisk opbygget efter anbefalede standarder, jf. Afsnit 7.1 og Figur 7.1.

Der er også foretaget en indledende tilstandsvurdering med udgangspunkt i den nye kystbeskyttelsespraksis, hvor der løbende strandfodres. Her antages det, at stranden opbygges med strandfodring således, at niveauet af stranden foran skråningsbeskyttelserne er +1,5 m DVR90 i dag, hvis denne er større end det eksisterende niveau. Desuden antages, at højden af stranden foran skråningsbeskyttelserne øges i takt med havspejlsstigningerne fremover. Den øgede strandhøjde vil medføre lavere vanddybder og derved lavere dimensioneringskrav i forhold til, hvis der ikke strandfodres.

## 7.3 Bølgebrydere og høfder

Bølgebrydere og høfder vurderes ud fra samme forudsætninger. Idet terrænniveauet foran bølgebryderne og høfderne ikke er kendt, kan der ikke laves en nøjagtig vurdering af tilstanden.

### 7.3.1 Dimensionering

Som overslag antages vanddybden foran bølgebryderne at være 3,5 m under design stormhændelsen (terrænniveau ca. -1,5 m DVR90), samt at bølgebryderne er anlagt med en forsidehældning på 1:2.

For at medtage effekten af havspejlsstigning anvendes en dimensionerende stenstørrelse svarende til en bølgepåvirkning på 4 meters vanddybde til tilstandsvurderingen i 2070. For tilstandsvurderingen i 2045 anvendes en lineær interpolation mellem stenstørrelser for 3,5 m og 4,0 m vanddybde. Dimensionerende dækstenstørrelser ses i Tabel 7.7.3.

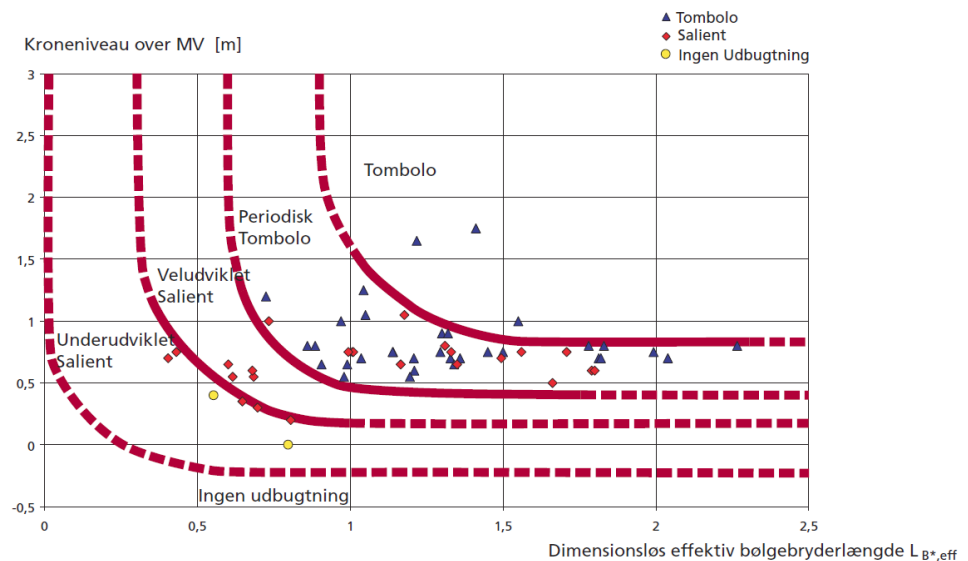
Bølgebrydernes og høfdernes funktion er ikke at beskytte mod bølgeoverskyl, men mere at stabilisere sand og ral i luvzonen og ved tomboloen bagved og således opbygge en bredere strand. Dette vil reducere bølgeenergien og beskytte bagstranden og baglandet.

Topkoten for bølgebryderne fastsættes ud fra en vurdering af normalbølgeklimaet og sammenligning med det dimensionsløse bølgebryderindeks ( $L_B^*$ ), som er bølgebryderens længde ( $L_B$ ) ift. bølgebryderens afstand fra kystlinien ( $x$ ):

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

Kystdirektoratet har vurderet denne parameter i forhold til kystmorfologien bagved ud fra litteraturen. Figuren er anvendt som udgangspunkt for tilstandsvurderingen og sammenlignet med 59 eksisterende bølgebrydere mellem Kikhavn og Ålsgårde, Figur 7.2, [9].

Figur 7.2: Morfologisk responsdiagram 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), [9].





Figuren viser, at en effektiv bølgebryder med permanent tombolo bagved skal have en topkote på minimum 0,8 m over daglig vande. Det ses også, at de fleste bølgebryderes topkoter langs Nordkysten af Sjælland er lavere og derfor kun har periodisk tombolo eller salient.

Det anbefales, at bølgebrydernes topkote er omtrent +1,0 m over daglig vande for at sikre permanent eller næsten permanent tombolo.

Ved tilstandsvurderingen for år 2045 og 2070 tillægges forventet havspejlsstigning og landhævning til topkoten. Dimensionerende topkoter ses i Tabel 7.7.3.

		Vest			Øst		
		2017	2045	2070	2017	2045	2070
<b>Dimensionerende dækstenstørrelse, <math>D_{50}</math></b>	<b>[cm]</b>	112	116	120	113	117	121
<b>Dimensionerende topkote</b>	<b>[cm DVR90]</b>	+100	+112	+129	+100	+112	+129

Tabel 7.7.3: Dimensionerende dækstenstørrelse og frihøjde for bølgebrydere.

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

### 7.3.2 Vurdering

Bølgebrydernes og høfderens tilstand og styrke vurderes udelukkende ud fra deres topkote og stenstørrelser baseret på kriterierne i Tabel 7.7.3.

Før- og bagsidehældningen på bølgebryderne og høfderne er ikke registreret under inspektionen. Det var dog tydeligt, at mange konstruktioner udelukkende består af en enkelt eller et par rækker sten. I tilstandsvurderingen er det antaget, at bølgebryderne og høfderne er opbygget kystteknisk korrekt.

Dimensioneringen er foretaget på baggrund af en funderingskote på -1,5 m DVR90 og en forside- og bagsidehældning på 1:2. Derfor er der heller ikke nogen forskel i vurderingen af deres egnethed før og efter storskala sandfodring.

## 8 Tilstandsvurdering

Langs Nordkysten er der registreret i alt 38,3 km konstruktioner, se Tabel 8.1. Af disse er der udført tilstandsvurdering på i alt 25,7 km. Der er ikke udført tilstandsvurdering på højvandsmure, betonhøfder og utilgængelige bølgebrydere, hvor stenstørrelsen ikke kunne registreres.

Der er ikke udført tilstandsvurdering på de dele af skråningsbeskyttelsen, som blot består af enkelte rækker sten placeret på stranden, pæleværker, palisadevægge, gabioner mm.

Tabel 8.1: Samlet længde af registreret konstruktioner samt længde af konstruktioner hvorpå der er udført tilstandsvurdering.

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

Tilstandsvurderingen sammenligner de eksisterende konstruktioner på Nordkysten med dimensioneringsforudsætninger beskrevet i Afsnit 7.

Tilstandsvurderingen visualiseres med følgende farveskala:

- Grøn - Vurderet at opfylde alle dimensioneringsforudsætningerne
- Gul - Vurderet at opfylde dimensioneringsforudsætningerne efter udbygning og forstærkning
- Rød - Vurderet at skulle genopbygges
- Sort - Ikke vurderet

Der foretages tilstandsvurdering efter eksisterende forhold samt forventet forhold i år 2045 og år 2070, samt med og uden strandfodring.

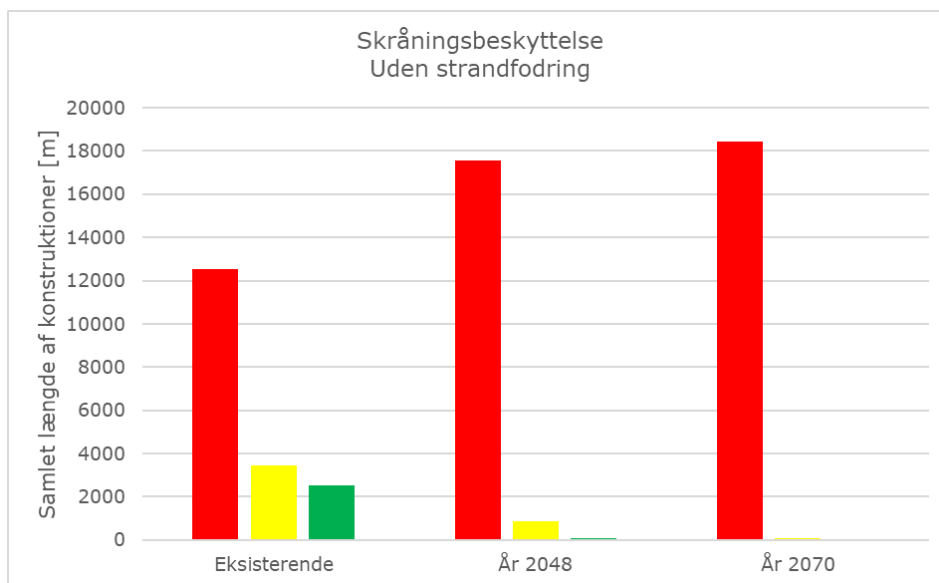
## 8.1 Tilstand uden strandfodring

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

Som det ses af Figur 8.1 er 65 % af vurderede skråningsbeskyttelser målt ud fra længder vurderet til en Rød standard med eksisterende terrænforhold. De resterende 35 % vurderes ligeligt til Gul og Grøn tilstand.

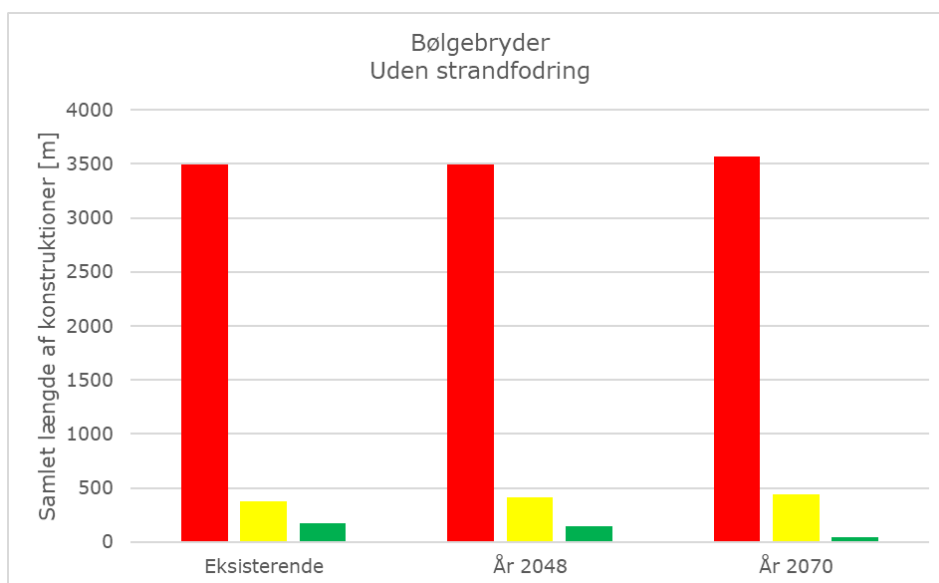
Allerede i år 2045 vil næsten alle skråningsbeskyttelser ikke opfylde dimensioneringskriterierne og vurderes at skulle genopbygges med større sten for at modstå den øgede bølgepåvirkning.

Figur 8.1: Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelser, hvis der ikke udføres strandfodring.



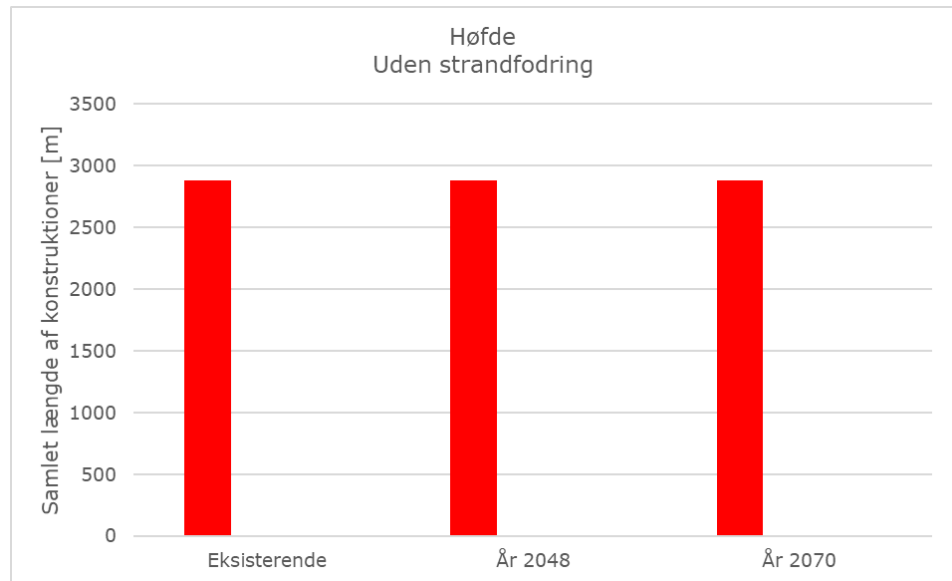
Størstedelen af de vurderede bølgebrydere vurderes ligeledes ikke at opfylde dimensioneringsforudsætningerne, hvilket skyldes utilstrækkelige stenstørrelser, se Figur 8.2.

Figur 8.2: Tilstandsvurdering af bølgebrydere, hvis der ikke udføres strandfodring.



Samtlige vurderede høfder vurderes ikke at opfylde dimensioneringsforudsætninger, se Figur 8.3.

Figur 8.3: Tilstandsvurdering af høfde, hvis der ikke udføres strandfodring.

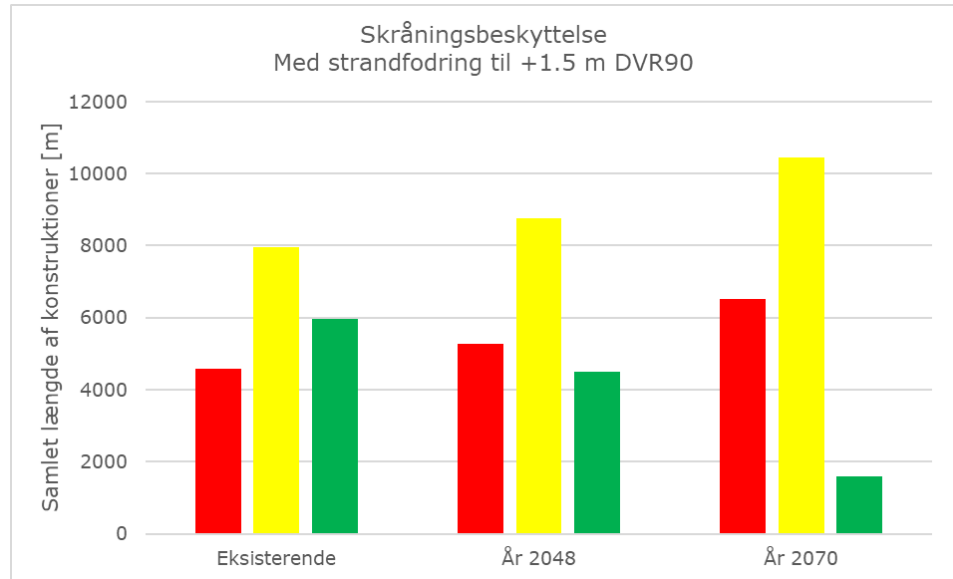


## 8.2 Tilstand med strandfodring

Ved en strandfodring forøges strandniveauet foran skråningsbeskyttelserne. Dette tages i regning ved at fastsætte det initiale terrænniveau (punkt 1 i Afsnit 7.2) som den største værdi af det registrerede terrænniveau og strandfodringsniveauet. Det forudsættes, at strandfodringen vedligeholdes for at imødegå den kroniske erosion samtidigt med, at strandfodringen udbygges i takt med at havspejlet stiger, således at vanddybden foran skråningsbeskyttelserne bibeholdes.

Udføres der en initial fodring til mindst +1,5 m DVR90 foran skråningsbeskyttelsen fås en betydelig reduktion i bølgepåvirkning, og dermed en reduktion af dimensioneringsforudsætningerne. Sammenlignes Figur 8.4 med Figur 8.1 ses en tydelig reduktion af skråningsbeskyttelse vurderet til Rød tilstand. Fra at udgøre 65 % uden strandfodring, udgør denne tilstandsvurdering kun 25 % ved en strandfodring til mindst +1,5 m DVR90. Gul og Grøn tilstandsvurdering udgør begge ca. 40 % og 30 %, henholdsvis. Fremadrettet vil andelen både Rød og Gul tilstandsvurdering stige, hvormed andelen af Grøn tilstandsvurdering vil falde.

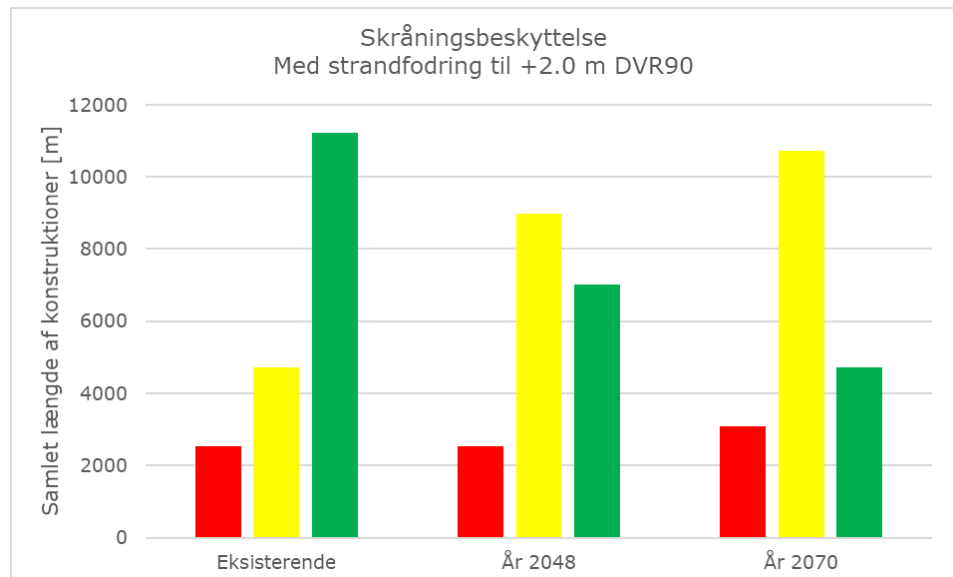
Figur 8.4: Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelse ved en initial strandfodring til mindst +1,5 m DVR90. Strandfodringen forudsættes vedligeholdt og udbygget for at fastholde vanddybden foran konstruktionerne.



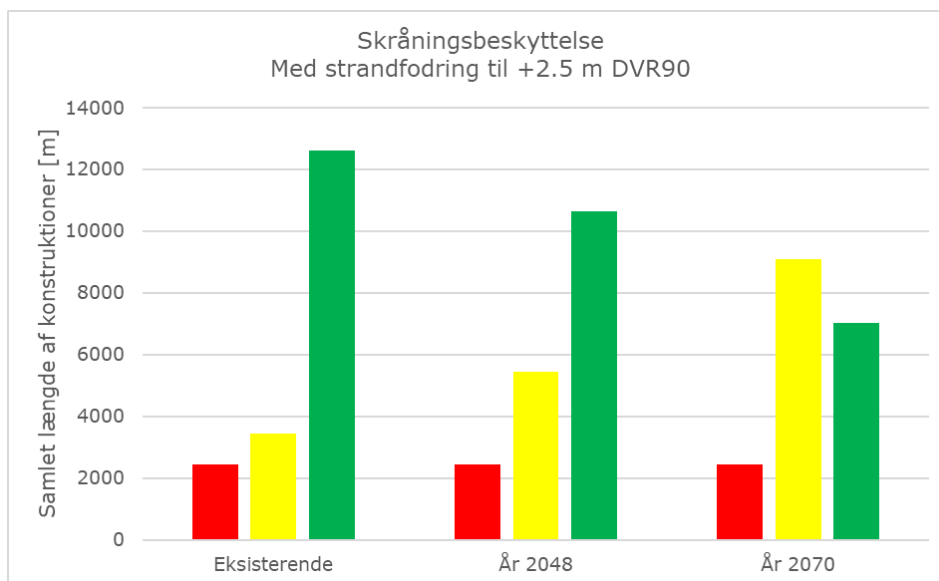
Øges niveauet af initialfodringen, vurderes en større andel af skråningsbeskyttelserne til Grøn tilstand, se Figur 8.5 og Figur 8.6 for tilstandsvurdering ved initialfodring til +2,0 og 2,5 m DVR90.

Fremadrette vil andelen af konstruktioner med Grøn tilstandsvurdering dog stadig falde samtidigt med at andelen med Gul tilstandsvurdering vil stige, hvilket betyder der fortsat er behov for en løbende udbygning af skråningsbeskyttelsen ved at forhøje topniveauet.

Figur 8.5: Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelse ved en initial strandfodring til mindst +2,0 m DVR90. Strandfodringen forudsættes vedligeholdt og udbygget for at fastholde vanddybden foran konstruktionerne.



Figur 8.6: Tilstandsvurdering af skråningsbeskyttelse ved en initial strandfodring til mindst +2,5 m DVR90. Strandfodringen forudsættes vedligeholdt og udbygget for at fastholde vanddybden foran konstruktionerne.



Der er dog konstruktioner, der vurderes til Rød tilstand selv ved en initialfodring til +2,5 m DVR90. For disse konstruktioner er en genopbygning med større dæksten nødvendig for at disse kan indgå i kystbeskyttelsen.

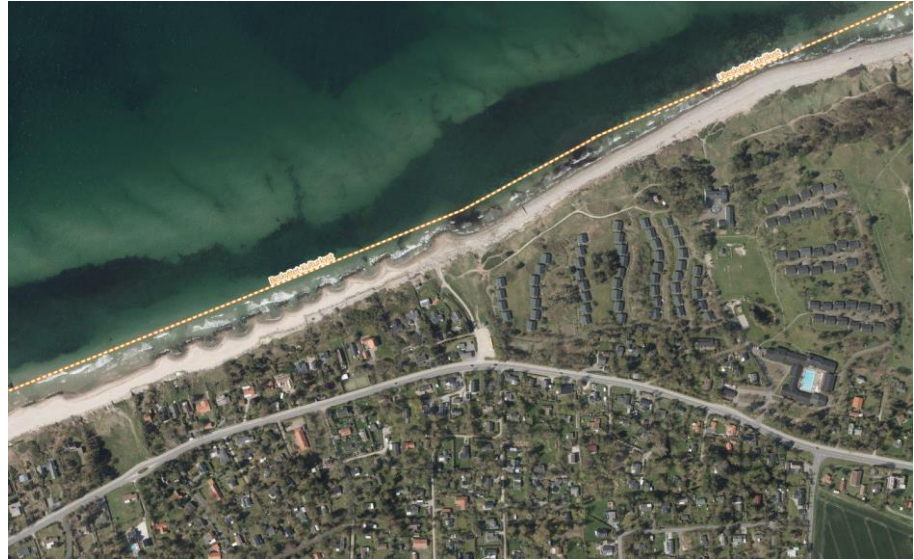
## 9 Andre informationer

Niras har samlet alle informationerne fra kystinspektionerne og tilstandsvurderingen i en GIS-database.

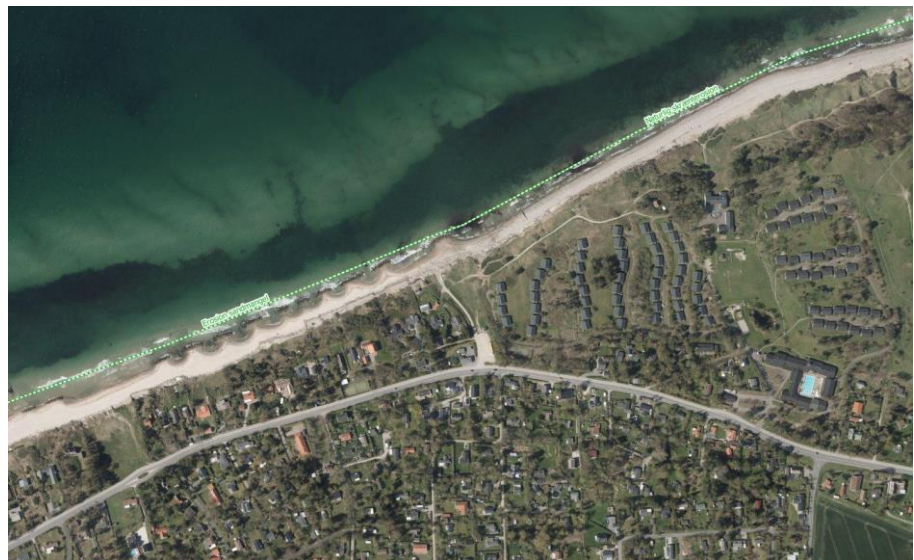
GIS-databasen indeholder herunder blandt andet kystmorfologiske karakteristika, se Figur 9.1, kystens udviklingstrin, se Figur 9.2 og de særlige forhold, der er identificeret i forbindelse med kystinspektionerne, se Figur 9.3.

GIS-databasen afleveres til Kommunerne når projektet afleveres endeligt.

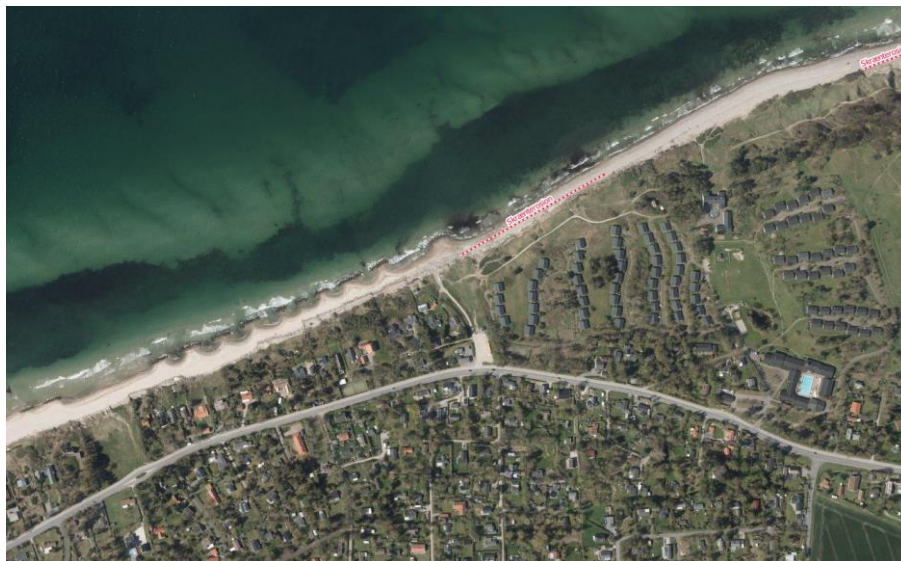
Figur 9.1: Kystmorfologiske karakteristika for hele Nordkysten – her vises eksempel fra Tinkerup Strand og Gilbjerg Hoved



Figur 9.2: Kystens udviklingstrin for hele Nordkysten – her vises eksempel fra Tinkerup Strand og Gilbjerg Hoved



Figur 9.3: Særlige forhold for hele Nordkysten, der er fremkommet ved inspektionen – her vises eksempel fra Tinkerup Strand og Gilbjerghoved



## 10 Referenceliste

- [1] K. Mangor, N. K. Drønen, K. H. Kærgaard og S. E. Kristensen, Shoreline management guidelines, 2017.
- [2] Kystdirektoratet, »Højvandsstatistikker 2017,« 2018.
- [3] DMI, »DMI - Vejr, klima og hav,« 2017. [Online]. Available: <http://www.dmi.dk/hav/>.
- [4] COWI, NIRAS, DHI, Hasløv & Kjærsgaard, »Nordkystens Fremtid - Kystteknisk Skitseprojekt,« 2016.
- [5] DHI, »Bølgeklima for 40 lokaliteter i danske farvande med vurdering af klimaeffekter for udvalgte lokaliteter,« 2012.
- [6] CIRIA, CUR, CETMEF, »The Rock Manual, The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition),« C683, CIRIA, London, 2007 (reprinted 2012).
- [7] EurOtop, »Manual on wave overtopping of sea defences and related structures,« 2016.
- [8] O. J. Jensen, A Monograph on Rubble Mound Breakwaters, 1984.
- [9] Kystdirektoratet, »Lave Bølgebrydere,« 2001.
- [10] NIRAS, »Kulhuse - Højvandsbeskyttelse Fr.Sund kommune -



Højvandsstatistik for Isefjord og Roskilde Fjord,« 2016.

- [11] G. Masselink og M. G. Hughes, Introduction to coastal processes & geomorphology, 2003.
- [12] DHI, »Erosionsatlas. Metodeudvikling og pilotprojekt for Sjælland nordkyst.,« Kystdirektoratet, 03.01.2013.
- [13] K. Vogensen, C. Sørensen, P. Knudsen, K. Engsager, A. Khan og O. B. Andersen, »Landbevægelser i Danmark,« 2017. [Online]. Available: <http://kysterne.kyst.dk/landbevaegelser-i-danmark.html>.