

# Klimaændringers effekt på kysten



# Klimaændringers effekt på kysten





## **Klimaændringers effekt på kysten**

**Marts 2008**

## Tegningsoversigt

## Bilagsfortegnelse

## Referenceliste

<b>1 Indledning</b>	<b>9</b>
<b>2 Resumé</b>	<b>10</b>
2.1 Generelt	10
2.2 Kvantitativ forudsigtelse af klimaeffekt	10
2.3 Konsekvenser for de danske kyster generelt	11
2.4 Vestkysten	12
2.4.1 Generelt	12
2.4.2 Konsekvenser ved en uændret indsats	13
2.4.3 Mulighed for tilpasset indsats	13
2.5 De vestjyske fjorde	13
2.5.1 Generelt	13
2.5.2 Konsekvenser ved uændret indsats	14
2.5.3 Muligheder for tilpasset indsats	14
2.6 Indre kyster	14
2.6.1 Generelt	14
2.6.2 Konsekvenser med uændret indsats	15
2.6.3 Muligheder for tilpasset indsats	15
<b>3 Fremskrivning af klimaets udvikling de næste 100 år</b>	<b>17</b>
3.1 Generelt	17
3.2 Drivhuseffekten	18
3.3 Klimamodeller	18
3.4 Emmissionsscenarier	19
3.5 Global fremskrivning af klima	19

3.6	Fremskrivning af klima i Danmark	21
3.7	Praktisk anvendelig kvantificering af parametre til beskrivelse af klimaændring	23
<b>4</b>	<b>Klimaændringers betydning for kysten og for kystbeskyttelsen</b>	<b>24</b>
4.1	Generelt	24
4.2	Konsekvenser for kystudviklingen af ændring af vandstand	25
4.3	Konstruktioners effektivitet og holdbarhed ved generel havspejlsstigning	26
4.4	Konsekvenser for kysten af hyppigere og kraftigere storme	27
4.5	Konstruktioners effektivitet og holdbarhed ved hyppigere og kraftigere storme	28
4.6	Konsekvenser for slusedrift af større nedbørsmængde	29
4.7	Sammenfatning	29
<b>5</b>	<b>Vestkysten. Scenarier, undersøgelsesmetodik og konsekvenser</b>	<b>30</b>
5.1	Generelt	30
5.2	Undersøgte scenarier	31
5.3	Metodik for undersøgelse	32
5.3.1	Fremskrivning af klimaudvikling samt afledte effekter	33
5.3.2	Kystudvikling	36
5.3.3	Oversvømmelsesrisiko	37
5.4	Konsekvenser på kysten	38
5.4.1	Klitter uden skråningsbeskyttelse	38
5.4.2	Klitter/diger med skråningsbeskyttelse	39
5.4.3	Bølgebrydere	41
5.4.4	Høfder	41
<b>6</b>	<b>Vestkysten. Fremtidig indsats</b>	<b>43</b>
6.1	Vedligeholdelse af kysten samt kystbeskyttelsen	43
6.2	Scenarier med større grad af miljøvenlige tiltag	43
6.2.1	Skråningsbeskyttelse	44
6.2.2	Bølgebrydere	44
6.2.3	Høfder	45
6.3	Øvrige scenarier	45
6.3.1	Fodring	45
6.3.2	Klitter uden skråningsbeskyttelse	46
6.3.3	Klit/diger med skråningsbeskyttelse	47
6.3.4	Bølgebrydere	48
6.3.5	Høfder	50
<b>7</b>	<b>De vestjyske fjorde</b>	<b>51</b>
7.1	Generelt	51
7.2	Problematik	52
7.3	Prognoser	52
7.4	Ny slusepraksis	53

7.5 Øget påvirkning	53
7.5.1 Datagrundlag	53
7.5.2 Højvandsstatistikker	54
7.5.3 Bølgepåvirkning	55
7.5.4 Scenarier for fremtidigt vandspejlsniveau i fjordene	55
7.6 Forstærkning af diger	56
<b>8 Indre Kyster</b>	<b>58</b>
8.1 Generelt	58
8.2 Prognoser	58
8.2.1 Generel havspejlsstigning	58
8.2.2 Øvrige klimaeffekter	60
8.3 Kysten	60
8.3.1 Kysttyper	60
8.3.2 Profilhældning	61
8.4 Kysttilbagerykning	61
8.5 Arealtab	63
8.6 Konstruktioner	64
8.6.1 Forstærkning af diger	65
8.6.2 Forhøjelse af skråningsbeskyttelse	67
8.6.3 Forlængelse af hofder	68
8.6.4 Forhøjelse af hofder og bølgebrydere	69



## Tegninger

<b>Tegn.nr.</b>	<b>Tegning</b>
5.1	Nordlig del af Vestkysten. Oversigtsplan med hoved- og delstrækninger.
5.2	Sydlig del af Vestkysten. Oversigtsplan med hoved- og delstrækninger.
5.3	Klitbeskyttelse ved Krylen
8.1	Indre Kyster, nord. Klassifikation af kysten.
8.2	Indre Kyster, sydvest. Klassifikation af kysten.
8.3	Indre Kyster, øst. Klassifikation af kysten.
8.4	Indre Kyster, Limfjorden. Klassifikation af kysten.

<b>Bilags nr.</b>	<b>Titel</b>
1	Tillæg til fodringsmængde grundet klimaændringer
2	Klitter uden skråningsbeskyttelse
3	Skråningsbeskyttelse
4	Bølgebrydere
5	Høfder
6	Fjordene
7	Indre kyster (beregningsbilag)





## Referencer

### Reference nr. Titel

- Ref. 1 Kystdirektoratet. Kystdirektoratets udviklingsprogram 2002-05.
- Ref. 2 Kystdirektoratet. Højvandsstatistikker 2002.
- Ref. 3 CRU's hjemmeside. Climatic Research Unit, University of East. Anglia. September 2004. <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>
- Ref. 4 Danmarks Klimacenter. Klimaændringer 2001, Den Videnskabelige Baggrund. Rapport 01-9. En rapport fra IPCC's Arbejdsgruppe I. Danmarks Meteorologiske Instituts oversættelse af CLIMATE CHANGE 2001 – The Scientific Basis, Summary for Policymakers. 2001.
- Ref. 5 Storch et al.: Reconstructing Past Climates from Noisy Data: Published online September 2004. 10.1126/science.1096109 (Science Express).
- Ref. 6 DMI's hjemmeside. Den menneskeskabte drivhuseffekt og global opvarmning. Fra DMI's sider om klimaundersøgelser, august 2004. <http://www.dmi.dk/dmi/index/vi-den/drivhuseffekten.htm>
- Ref. 7 Danish Environmental Protection Agency. Denmark's Third National Communication on Climate Change. 2003.
- Ref. 8 Duun-Christensen, J.T.: Vandstandsændringer i Danmark. Fra udgivelsen Drivhuseffekt og klimaændringer – hvad kan det betyde for Danmark. Miljøministeriet, 1992.
- Ref. 9 Jes Fenger et al.: Monitoring and Impacts of Sea Level Rise at Danish Coasts and Near Shore Infrastructures. Danish Climate Centre. Climate Change Research. Danish Contributions. Gads Forlag. 2001.
- Ref. 10 Kaas et al. 2001: Synthesis of the STOWASUS-2100 project: Regional Storm, Wave and Surge Scenarios for the 2100 Century. Denmark's Climate Center Report 01-03. DMI.
- Ref. 11 Personlig kommunikation med Eigil Kaas, DMI

- Ref. 12 Katja Woth, R. Weisse and H. von Storch : Dynamical modelling of North Sea storm surge under climate change conditions – an ensemble study. GKSS Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft, 2005.
- Ref. 13 Danish Climate Centre. Climate Change Research. Danish Contributions. Gad 2001.
- Ref. 14 Dean, Robert G. Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. Journal of Coastal Research, Vol.7, No.1.1991.
- Ref. 15 Kystdirektoratet. Vestkysten '02. December 2003.
- Ref. 16 Kystdirektoratet. Vestkysten 1998. December 1998.
- Ref. 17 Technical Advisory Committee on Protection against Inundation. Wave Run-Up and Overtopping. Government Publishing Office. Den Haag, 1974.
- Ref. 18 Kystdirektoratet. Digeregistrering. Diger ved Ringkøbing Fjord. April 2001.
- Ref. 19 Kystdirektoratet. Digeregistrering. Diger ved Nissum Fjord. Marts 2001.
- Ref. 20 Kystinspektoret. Danmarks indre kyster. Kortlægning af kystbeskyttelsen. Oktober 1999.
- Ref. 21 KDI's digeregistrering for indre kyster. Flere bind udarbejdet i perioden 1997-2001.
- Ref. 22 Technical Advisory Committee on Flood Defence. Technical Report. Wave Run-Up and Wave Overtopping at Dikes. Delft, May 2002.

# Indledning

## 1.1 Indledning

Nærværende undersøgelse er led i Kystdirektoratets (KDI) udviklingsprogram 2002-05, ref.1. Formålet med programmet er at forbedre grundlaget for planlægning og projektering af kystbeskyttelsen på Vestkysten og i Vadehavet. Desuden at kunne rådgive Transport- og Energiministeriet i kystbeskyttelsessager på landets øvrige kyster.

Første delundersøgelse i projektet "Klimaændringers effekt på kysten" var en revision af højvandsstatistikker for hele landet. Arbejdet blev foretaget i 2002 og er rapporteret, se ref.2.

Arbejdet bygger på offentliggjorte prognoser for udvikling i vejret og den relaterede udvikling i vandstandsniveauet i havet udgivet af anerkendte forskningsinstitutter. Det grundlæggende litteraturstudie er foretaget i efteråret 2004. Derudover er der suppleret med resultater fra det på det tidspunkt igangværende internationale projekt PRUDENCE. Det kan i øvrigt konstateres, at Danmarks Meteorologiske Instituts fjerde bidrag til Danmarks 4. nationale afrapportering til FN's klimakonvention UNFCCC udsendt i 2005 ikke indeholder nye oplysninger i relation til de relevante fysiske parametre for undersøgelsen.

Intentionen var oprindeligt at udarbejde konsekvensberegninger for to emissionsscenarier, et middelhøjt, A2, og et middel lavt, B2. Primært på grund af den minimale forskel, der kunne udledes af forudsigelsen på vandstandsforøgelsen frem til år 2050 og sekundært manglen på prognoseberegninger for øvrige relevante parametre i scenariet B2, blev det besluttet kun at fortsætte med det ene scenarie A2.

Selve analysearbejdet er udført i perioden juli 2005-maj 2006.

I foråret 2007 udgav FN's klimapanel IPCC en ny klimarapport, der opdaterer forudsigelsen på fremtidige globale havspejlsstigninger frem til år 2100. Afvigelserne på de centrale værdier af havspejlsstigningerne for de forskellige scenarier i forhold til forudsigelsen i IPCC-rapporten fra 2001 er dog beskedne.

## Resumé

### 2.1 Generelt

Nærværende undersøgelse er opdelt i flere strenge. Der foretages et litteraturstudium af klimaændringerne med fokus på de parametre, som har betydning for kystens udvikling og kystbeskyttelsen. På baggrund af specifikt scenario for klimaændringer koblet med tidligere beregnede effekter udledes den forventede regionale havspejlsstigning i Danmark samt forøgelsen af højvande på den jyske vestkyst. Der gives en generel, kvalitativ beskrivelse af konsekvenser på kysten og for kystbeskyttelsen af de forventede klimaændringer. Konsekvenserne behandles kvantitativt for tre områder i Danmark: Vestkysten fra Lodbjerg til Nymindegab, Nisum og Ringkøbing fjorde samt Indre Kyster inden for Skagen.

### 2.2 Kvantitativ forudsigtelse af klimaeffekt

FN's klimapanel IPCC har siden dets oprettelse i 1988 haft til opgave at klarlægge de menneskeskabte klimaforandringer og de konsekvenser, som klimaændringerne vil få på kort og på lang sigt. Dette sker på basis af publiceret og "peer reviewed" videnskabelig litteratur.

IPCC offentliggør med mellemrum rapporter, som med udgangspunkt i forskellige scenarier for udviklingen i menneskelig aktivitet såsom befolkningstilvækst og økonomisk og teknologisk udvikling beskriver de klimamæssige konsekvenser og mulighederne for modvirkning af og tilpasning til klimaeffekten.

Nærværende rapport tager udgangspunkt i IPCC's rapport fra 2001. Denne rapport beskriver temperaturændringer og globale havspejlsstigninger for forskellige scenarier frem til år 2100.

For den globale havspejlsstigning viser de forskellige scenarier, at havspejlsstigningen i forhold til 1990 vil blive mellem 9 og 88 cm frem til år 2100 afhængig af hvilket scenario, der er udgangspunkt for beregningerne. Der er altså en relativt stor usikkerhed omkring den globale havspejls-

stigning. IPCC anbefaler derfor, at man i vurderinger af konsekvenserne bruger flere scenarier. IPCC's rapport indeholder scenarierne A1, A2, B1 og B2.

I vurderingen af klimaeffekterne er der i danske undersøgelser taget udgangspunkt i scenarierne A2 og B2. Når effekterne af klimaændringer skal vurderes, er det nødvendigt at omsætte de globale scenarier til regionale forhold, da klimaudviklingen ikke vil få de samme konsekvenser på jorden. For eksempel vil udviklingen i vindforholdene forskellige steder på jorden være meget forskellig. Disse omsætninger foretages med regionale klimamodeller og betegnes regional nedskalering. DMI/Danmarks Klimacenter har nedskaleret scenario A2 til danske forhold.

For scenario A2 angiver IPCC-rapporten en global havspejlsstigning fra 1990 frem til 2100 på mellem 15 og 75 cm med en central værdi på 42 cm. Under hensyn til den regionale isostatisk landhævning bliver den regionale havspejlsstigning fra 2005 frem til 2100 beregnet til 20-35 cm langs Jyllands vestkyst, størst mod syd.

De forhold, der har betydning for udviklingen på kysterne, relaterer sig i hovedsagen til udviklingen i vandstand og i ændringen af vindforholdene. For kysterne er det specielt forudsigelsen af udviklingen i stormsituationerne, der er interessant, da det er i disse situationer, det største slid på kysterne forekommer. For scenario A2 er der med hydrauliske modeller gennemført beregninger af ændringer i den maksimale vandstand og bølgehøjde ved Vestkysten, som ændringen i vindforholdene vil føre til.

Der er ikke tilsvarende gennemført en nedskalering af højvande og bølger for scenario B2. Da disse parametre har væsentlig betydning for påvirkningen på kysterne, er der alene vurderet på det nedskalerede scenario A2. Rent faktisk viser beregningerne for A2 og B2 også, at den reelle forskel mellem forudsigelserne i år 2050 for havspejlsstigningen er minimal.

Forøgelsen på højvandsstanden på Vestkysten er beregnet til tæt på 10 %. Ændringen af bølgeklimate følger vindkraften nøje. Beregninger viser, at middel signifikant bølgehøjde vokser med ca. 5 % i Nordsøen

Det skal her bemærkes, at øgningen i både vindstyrker og vandstande navnlig forekommer i sidste halvdel af århundredet.

Vinternedbøren forudses at stige 10-25 %, hvilket forventes at forøge afstrømningen i vandløbene i størrelsen 10 %.

## 2.3 Konsekvenser for de danske kyster generelt

De danske kyster forventes ifølge forudsigelserne påvirket dels af stigende vandspejl og dels af hyppigere og kraftigere storme og dermed stormfloder. Det vil generelt føre til øget erosion på kysterne og en reduceret sikkerhed mod oversvømmelse for de lavtliggende områder.

Der findes forskellige typer konstruktioner til kystbeskyttelse afhængig af formålet. Konstruktioner til nedsættelse af den generelle kysttilbagegang udgøres typisk af hølde og bølgebrydere. Konstruktioner til beskyt-

telse mod erosion i skrænter i højvandsituationer udgøres typisk af skråningsbeskyttelse og konstruktioner til beskyttelse mod oversvømmelse af bagvedliggende lave områder er typisk diger.

Resultatet af en generel vandspejlsstigning i havet er isoleret set, at den generelle kysttilbagerykning vokser. Kysttilbagerykningen medfører, at nedskæringen i profilet øges, hvilket igen betyder, at kystprofilen foran konstruktionerne svækkes. Bliver nedskæringen tilstrækkelig stor vil konstruktionen sætte sig – i sidste instans med kollaps til følge.

Forværrede vindforhold vil også øge tilbagerykningen såfremt den dominerende vindretning fastholdes. Ændres vindretningen samtidigt, afhænger bidraget til kystudviklingen af til hvilken side retningen ændres. Større vindpåvirkning vil medføre større bølgeuro foran konstruktionerne. Dette bevirker større strøm- og hvirveeffekter, hvilket kan betyde større nedskæring foran konstruktionerne.

Hvorvidt konstruktionerne vil være stabile eller virke på en hensigtsmæssig måde under de øgede påvirkninger afhænger i høj grad af den i sin tid foretagne dimensionering.

Under forudsætning af forventede ændringer af de klimabetingede hydrauliske påvirkninger må man vurdere om svækkelsen af kysten og konstruktionerne er acceptabel. I modsat fald må man tage stilling til hvilke forholdsregler, man vil tage i anvendelse. En afhjælpning af en situation, hvor udviklingen bevirker, at konstruktionerne er underdimensionerede, kan afhængig af problemet foretages ved forskellige konstruktive tiltag eller alternativt ved forstærkning af kystprofilen gennem en fodringsindsats. Man kan også vælge løsningen ikke at gøre noget. Den valgte løsningsmodel afhænger i høj grad af den fysiske planlægning for det pågældende område og de dermed forbundne økonomiske interesser.

## 2.4 Vestkysten

### 2.4.1 Generelt

For Vestkysten er opstillet en flerårig handlingsplan for kystbeskyttelse. Indsatsen foregår i et økonomisk samarbejde mellem staten og kystkommunerne i det tidligere Ringkøbing Amt.

Kystbeskyttelsen på Vestkysten har til formål at imødegå risikoen for oversvømmelse af de lave områder bag klitrækken. I den forstand udgør klitten et naturligt dige, som på nogle strækninger er forstærket med skråningsbeskyttelse for at opretholde et rimeligt sikkerhedsniveau på Vestkysten mod gennembrud og oversvømmelse. Der foretages også klitforstærkning, når dette af sikkerhedsmæssige årsager viser sig nødvendigt.

Vestkysten er en naturlig erosionskyst. Uden kystbeskyttelsesindsat vil Vestkysten rykke tilbage, som den har gjort det i århundreder, og klitterne vil efterhånden blive smalle. Dette vil øge risikoen for gennembrud i højvandsituationer. For at forhindre eller formindske tilbagerykningen gennemføres årlige sandfodringer som kompensation for det sand, som

havet naturligt eroderer. Der kan være tale om enten strandfodring, hvor sandet pumpes direkte op på stranden eller revlefodring, hvor sandet placeres på en revle ud for kysten.

Denne indsats forstærkes af de eksisterende, faste konstruktioner såsom høfder og bølgebrydere, som ligeledes udgør en væsentlig del af den samlede beskyttelse.

#### **2.4.2 Konsekvenser ved en uændret indsats**

Problematikken og den fremtidige kystudvikling belyses ved hjælp af seks scenarier eller målsætninger. Disse adskiller sig ved forskelle i ambitionsniveau for kystudviklingen og i forskelle i selve kystbeskyttelsesindsatsen.

Kortfattet kan det siges, at hvis kystbeskyttelsesindsatsen fortsætter på uændret niveau, uden hensyntagen til de forventede klimaændringer, vil det betyde, at klimaeffekterne i form af højere vandstand og hyppigere og kraftigere storme vil øge påvirkningen på kysten med større erosion til følge, hvilken ikke vil blive kompenseret via fodringerne.

Den deraf følgende tilbagerykning af kysten vil på sigt medføre, en større risiko for oversvømmelse i stormsituationer. Dette skyldes, at fodringen ikke længere vil være tilstrækkelig til, at sikre klitten mod gennembrud og at dybden foran konstruktioner som høfder og bølgebrydere vil blive større, hvilket øger belastningen af konstruktionerne. Konstruktionerne vil med tiden blive undermineret, sætte sig og i yderste konsekvens kollapse.

#### **2.4.3 Mulighed for tilpasset indsats**

En gradvis tilpasning af kystbeskyttelsesniveauet, der tager udgangspunkt i det nuværende sikkerhedsniveau mod oversvømmelse, kan gennemføres ved hjælp af en øget fodringsindsats.

Det forventes – med udgangspunkt scenario A2 og en global havspejlsstigning på 42 cm i år 2100 – at klimaændringerne vil øge sandfodringsbehovet med 9 % i gennemsnit i perioden 2005-25 og 18 % i perioden 2025-2050 med det nuværende sikkerhedsniveau og med de samme kystbeskyttelsestiltag som i dag.

Samtidig med den øgede fodringsindsats vil det være relevant at forstærke klitter og diger foran særligt udsatte områder. Hvis fodringsindsatsen gradvist øges i takt med, at klimaændringerne slår igennem, vurderes det, at det ikke vil være nødvendigt med forstærkning eller flytning af faste konstruktioner såsom høfder eller bølgebrydere, her dog undtaget landværts forlængelse af høfder på delstrækning med tilladt naturlig tilbagerykning.

## **2.5 De vestjyske fjorde**

### **2.5.1 Generelt**

Afvandingen af store oplandsarealer i Midt- og Vestjylland opsamles i Nissum Fjord og Ringkøbing Fjord.

Vandstandsvariationen i fjordene er bestemt dels af tilstrømningen fra de forskellige å-udløb og dels af kapaciteten af de to afvandingsluser. For Nissum Fjord foretages denne udledning gennem slusen i Thorsminde, mens den for Ringkøbing Fjord foretages gennem slusen i Hvide Sande.

Sluserne er ejet af staten og drives af Kystdirektoratet. Forskellige erhvervsmæssige og miljømæssige interesser er knyttet til vandstandsforholdene i fjordene. Vandstanden reguleres efter en vedtaget slusepraksis for slusedriften og er fastsat af et sluseudvalg med repræsentanter fra forskellige interessegrupper.

### **2.5.2 Konsekvenser ved uændret indsats**

De forventede klimaændringer vil primært medføre udfordringer omkring det fremtidige vandstands niveau i fjordene og dermed sikkerheden af digerne rundt om fjordene.

En højere vandstand i havet vil medføre færre og kortere perioder, hvor fjordvandet kan ledes ud i havet. Klimascenariet forudsiger desuden, at der kan forventes mere intensiv nedbør, hvilket vil medføre større tilstrømning fra oplandet til fjordene.

Digesikkerheden for fjorddigerne forringes såfremt vandstanden i fjordene stiger. Øget vindpåvirkning vil desuden medføre, at vandet presses yderligere op mod de kyststrækninger, der har pålandsvind, hvilket yderligere vil medføre øget risiko for oversvømmelse.

### **2.5.3 Muligheder for tilpasset indsats**

For Nissum Fjord vurderes det ikke at være realistisk at bevare det nuværende vandstands niveau, når vandstanden i havet stiger. Det skyldes, at slusekapaciteten i Thorsminde vurderes at være fuldt udnyttet i de kritiske vintermåneder, hvor der er risiko for perioder med både store nedbørmængder og høje vandstande i havet. For at opretholde nuværende sikkerhed af fjorddigerne skal disse forhøjes, når vandstands niveauet i fjorden øges.

I Ringkøbing Fjord har Hvide Sande sluse i dag overskydende kapacitet, og det forventes derfor, at der vil være mulighed for at bibeholde det nuværende vandstands niveau i Ringkøbing Fjord i år 2100. Det vil dog alligevel på sigt være nødvendigt at overveje en forhøjelse af digerne ved Ringkøbing Fjord selv ved fastholdt fjordvandstand, bl.a. fordi de kraftigere vinde vil stuve fjordvandet højere på kyster med pålandsvind.

## **2.6 Indre kyster**

### **2.6.1 Generelt**

Indre kyster er de danske kyster inden for Skagens Gren og omfatter sammenlagt en ca. 6.500 km kyststrækning.

Modsat Vestkysten gælder det for de øvrige danske kyster, at initiativet til etablering og vedligeholdelse af kystbeskyttelse er de enkelte grundejeres eller kystbeskyttelseslags ansvar. Beslutning om eventuel tilpasning af



kystbeskyttelsen på de indre kyster som følge af mulige klimaændringer er derfor også de enkelte grundejeres eller lags ansvar.

For de indre kyster gælder, at forholdene varierer meget med hensyn til de påvirkninger, som kysterne udsættes for. Den generelle havspejlsstigning vil slå igennem for alle kyster, og den vil i sig selv give anledning til øget erosion. Samtidig vil havspejlsstigningen formindske digesikkerheden, så risikoen for oversvømmelse øges.

Det er derimod ikke alle kyster, der bliver lige hårdt udsat for den påvirkning, der kommer fra en forøgelse af stormstyrken. Dels vil østvendte kyster ikke blive så hårdt udsat, og dels er udstrækningen af de vandområder, som vinden blæser hen over mindre, så både forøgelsen af højvande og bølgehøjde bliver mindre end på Vestkysten.

Primært afhængig af bølgepåvirkningen er kysterne her inddelt i tre typer: eksponeret kyst, moderat eksponeret kyst og beskyttet kyst.

### **2.6.2 Konsekvenser med uændret indsats**

Beregningerne viser, at kysttilbagerykningen som følge af klimaændringerne for de beskyttede kyststrækninger og de moderat eksponerede kyststrækninger vil være forholdsvist beskeden for scenario A2 med en global havspejlsstigning på 42 cm frem til år 2100. Tilbagerykningen vil frem til 2050 være på 1-2 m og frem til år 2100 på 5-9 m i alt.

For de eksponerede kyster viser beregningerne, at kysttilbagerykningen som følge af klimaændringerne frem til 2050 vil være på samme beskeden niveau, hvorefter tilbagerykningen øges væsentlig, så den gennemsnitlige tilbagerykning i år 2100 vil være ca. 14 m.

Den forholdsvis beskeden tilbagerykning vil dog betyde, at høfderne vil blive bagskåret, hvilket kan medføre lokal øget erosion omkring høfdestrækningerne.

I takt med havspejlsstigningen og forværringen af vindforholdene vil sikkerheden mod oversvømmelse gradvis blive forringet.

### **2.6.3 Muligheder for tilpasset indsats**

Hvis udgangspunktet i stedet er en bibeholdelse af det nuværende sikkerhedsniveau, er der flere forhold at tage i betragtning.

For at modvirke effekten af almindelig havspejlsstigning og forøget vindstuvning, herunder højere og længere bølger, kan digerne forhøjes, ligesom der kan anlægges diger på kyststrækninger, der i dag ikke er beskyttet af diger.

I forbindelse med eventuel etablering af nye diger vil den enkelte lods-ejer skulle tage stilling til nødvendigheden af at foretage investeringer i kystbeskyttelse set i forhold til de værdier, diget beskytter, ligeledes ved beslutning om forstærkning og vedligeholdelse af et dige til beskyttelse af landbrugsjord.

Under forudsætning af vedligeholdelse og evt. forstærkning/udbygning af eksisterende diger og skråningsbeskyttelse er det kun de fritliggende

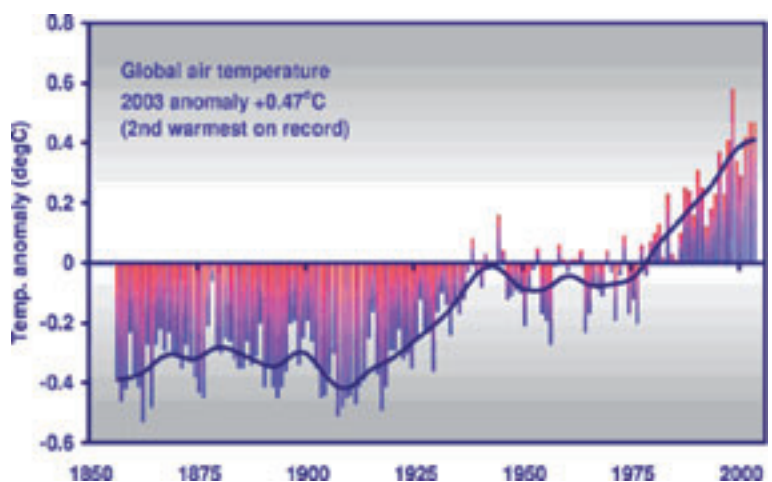
høfder, der bør forlænges i takt med kysttilbagerykningen. Høfdeforlængelserne kan med fordel foretages etapevis hen over århundredet.

Endelig bør bølgebrydere og hovederne i T-høfder forhøjes i takt med havspejlsstigningen, såfremt konstruktionerne forbliver i deres nuværende position. Såfremt det vælges at flytte konstruktionerne i takt med tilbagerykningen, kan dette set i forhold til den forventede udvikling vente til sidste halvdel af århundredet.

## Fremskrivning af klimaets udvikling de næste 100 år

### 3.1 Generelt

Jorden er blevet varmere i løbet af det seneste hundrede år. Jordens gennemsnitlige overfladetemperatur er i denne periode øget med omkring 0,8 grader og omkring 0,5 grader alene gennem de sidste 50 år, se figur 3.1. En sandsynlig forklaring på denne opvarmning gennem det 20. århundrede bygger på øgede koncentrationer af drivhusgasser i atmosfæren, hvilket skyldes menneskelige aktiviteter (ref.3).



Figur 3.1 Udviklingen i den globale, årlige middeltemperatur (lufttemperaturen ved jord- og havoverfladen) fra 1856 til 2003. (Kilde: Climate Research Unit, University of East Anglia, ref.3).

Den større stigning i temperaturen gennem det 20. århundrede understøttes af de såkaldte proxydata, som er temperaturer, der er rekonstrueret på basis af analyser af tykkelsen af vækstringe i træer, koraller, iskerner samt historiske optegnelser. De viser, at det er sandsynligt, at temperaturstigningen i det 20. århundrede har været den højeste i noget århundrede gennem det sidste tusind år (ref.4). For en ordens skyld skal

det dog fremhæves, at en nylig offentliggjort undersøgelse sår tvivl om sidstnævnte konklusion (ref.5).

Ændringer i middeltemperaturen vil medføre ændringer i havspejlsniveauet set over en tidsskala, som går fra årtier til århundreder. Dette skyldes fortrinsvis termisk udvidelse af vandet i oceanerne og afsmeltning af isen på land. På grund af den langsomme transmission af varme fra atmosfæren til oceanerne vil havspejlet kunne fortsætte med at stige i mange år efter, at udledningen af gasser er blevet stabiliseret (ref.4).

## 3.2 Drivhuseffekten

Når jordoverfladen opvarmes af solens lys, udsender den varmestråling (ref.6). Denne stråling er rettet tilbage mod verdensrummet, men bliver holdt tilbage af skyer, partikler og visse luftarter i atmosfæren og opvarmer dermed atmosfæren. Disse luftarter kaldes under ét for drivhusgasser. Hvis drivhuseffekten øges, vil jordoverfladen modtage en større mængde infrarød stråling fra atmosfæren, og vil derfor blive varmere.

Mange af de luftarter, der sendes ud i atmosfæren af det moderne industrisamfund, er drivhusgasser (ref.6). Den vigtigste er kuldioxid,  $\text{CO}_2$ , der udgør ca. 0,4 % af Jordens atmosfære. Luftarten forekommer naturligt i atmosfæren, men koncentrationen er vokset med ca. 30 % siden den industrielle revolution i midten af forrige århundrede. Men også klor-flour-kulstofforbindelser (CFC-gasser), kvælstofilter ( $\text{NO}_x$ 'er), metan ( $\text{CH}_4$ ) og ozon ( $\text{O}_3$ ) er i denne sammenhæng vigtige luftarter. Den vigtigste af alle drivhusgasser er i øvrigt vanddamp, der forekommer naturligt.

## 3.3 Klimamodeller

Klimamodeller er matematiske programmer, som ud fra fysikkens love og konstaterede sammenhænge giver detaljerede beskrivelser af atmosfæren og oceanerne i tid og sted, og som også kobler vekselvirkningen mellem atmosfæren og oceanerne. De to elementer påvirker hinanden gennem vindens træk på vandet, havoverfladetemperatur, nedbør, fordampning og lignende. Øvrige komponenter, som indgår i klimasystemet, er is og sne, landoverfladen og biosfæren. Modelberegningerne dækker meget lange perioder, så den statistiske usikkerhed på de beregnede hyppigheder bliver lille. Begyndelsestilstanden af atmosfæren er stort set uden betydning, hvorimod begyndelsestilstanden af oceanerne er væsentlig for klimamodellerne, fordi havstrømme har meget lange tidsskalaer.

Modellerne kan endnu ikke simulere alle klimaets aspekter. Det er især usikkerheder forbundet med skyerne og deres vekselvirkning med strålingen og aerosolerne (ref.4). Ikke desto mindre er tiltroen til disse modellers evne til at frembringe anvendelige fremskrivninger af klimaet større som følge af deres påviste formåen på en række rumlige og tidlige skalaer.

De nuværende klimamodelberegninger viser, at det er meget usandsynligt, at opvarmningen i løbet af de sidste 100 år alene skyldes intern variabilitet i vejret.

Den bedste overensstemmelse mellem modelsimuleringer og observationer i løbet af de seneste 140 år er fundet, når en vis, angiven række menneskeskabte og naturlige faktorer, som påvirker klimaet, er blevet kombineret (ref.4). Resultaterne viser, at de medregnede påvirkninger er tilstrækkelige til at forklare de observerede ændringer. Modsat udelukker de dog ikke muligheden for at andre påvirkninger også kan have været medvirkende hertil.

Når der tages højde for de tilbageværende usikkerheder er det sandsynligt, at størstedelen af den observerede opvarmning i løbet af de seneste 50 år skyldes stigningen i koncentrationen af drivhusgasser.

Det er ydermere meget sandsynligt, at opvarmningen i det 20. århundrede har medvirket betydeligt til den observerede stigning i havniveauet som følge af havvandets udvidelse og den udbredte afsmeltning af isdække på land (ref.4). Inden for de nuværende usikkerheder viser både observationer og modelberegninger, at der ikke har været en signifikant acceleration i havniveaustigningen i løbet af det 20. århundrede.

### 3.4 Emissionsscenerier

Klimamodellerne er benyttet på de emissionsscenerier, som er angivet i en særberetning fra IPCC (Special Report on Emission Scenarios) og med en fællesbetegnelse kaldes de for SRES. Scenerierne er knyttet op på forskellige forventninger om udviklingen i befolkningstilvæksten, den økonomiske udvikling, teknologiudviklingen samt det teknologiske og sociale samspil mellem verdens forskellige regioner.

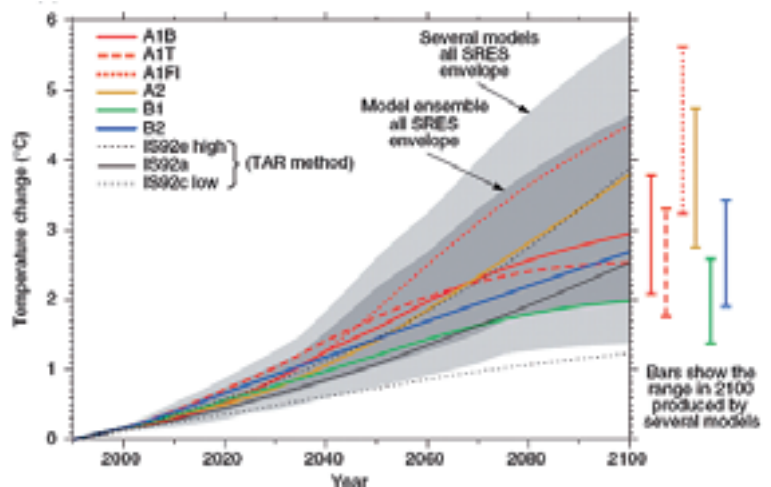
Scenerierne beskriver atmosfærens koncentrationer af drivhusgasser og aerosoler i de næste hundrede år. De er blevet udviklet med henblik på at opdatere IS92-serien, som blev anvendt i IPCC's Second Assessment Report (SAR) fra 1996.

### 3.5 Global fremskrivning af klima

FN's klimapanel, IPCC, udsendte sin tredje og foreløbig sidste vurderingsrapport i 2001. Nedenfor følger et udvalgt udtræk af IPCC's forudsigelser (ref.4) for det fremtidige globale klima, som specielt er relevant for de breddegrader, hvor Danmark er beliggende:

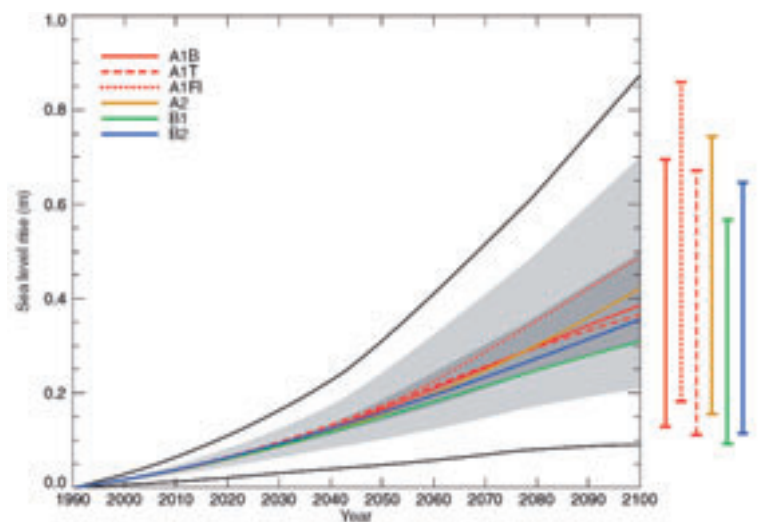
- Den globale gennemsnitlige overfladetemperatur er fremskrevet til at stige med 1,4 til 5,8 °C i løbet af perioden fra 1990 til 2100, se figur 3.2.
- Det er sandsynligt, at nedbøren fremme ved anden halvdel af det 21. århundrede vil være forøget over de nordlige mellem- og høje breddegrader om vinteren. Større årlige variationer er meget sandsynlige over de fleste områder, hvor der er fremskrevet en stigning i den gennemsnitlige nedbør.
- Det globale gennemsnitlige havniveau er fremskrevet til at stige med 0,09 til 0,88 m i perioden fra 1990 til 2100 i hele viften af SRES-scenerier, se figur 3.3. Det skyldes hovedsageligt termisk udvidelse og afsmeltning fra gletchere og iskapper.
- Stigninger i den globale middelloverfladetemperatur samt havniveaustigningen som følge af oceanernes varmeudvidelse er fremskrevet

til at fortsætte i flere hundrede år efter at koncentrationerne af drivhusgasserne er stabiliseret (selv på de nuværende niveauer) som følge af de dybe havs lange tilpasningstid til klimaændringerne.



Figur 3.2 Fremskrivning af den globale middeltemperatur frem til år 2100 baseret på klimamodelberegninger og forskellige scenarier (kilde: IPCC's Technical Summary of the Working Group, ref.4).

Der er ingen konklusioner om en fremtidig ændring af stormintensitet og -hyppighed i områderne uden for troperne. Under afsnittet (ref.4), hvor man refererer resultater fra simuleringer, hvor historiske datasæt er tilgængelige, nævnes, at modstridende analyser gør det vanskeligt at drage endegyldige konklusioner om skete ændringer af stormaktiviteterne. Endvidere henvises der til observerede variationer fra årti til årti uden signifikante tendenser i løbet af det 20. århundrede.



Figur 3.3 Fremskrivning af den globale middel havspejlsstigning frem til år 2100 baseret på klimamodelberegninger og forskellige SRES-scenarier (kilde: IPCC's Technical Summary of the Working Group, ref.4).

Selvom det skulle lykkes, at reducere udledningen af CO<sub>2</sub> i løbet af få årtier, vil der gå mange år, før temperaturen og havniveau når en ny ligevægtstilstand. Selv med en stabilisering af Jordens temperatur – og dette forudsætter, at de globale udslip af drivhusgasser topper inden for et par årtier og derefter reduceres til en brøkdel af de nuværende udslip

– vil havstigningen fortsætte gennem mange hundrede år. Det betyder, at man står med en langtidsudfordring med et fortsat stigende havniveau.

### 3.6 Fremskrivning af klima i Danmark

DMI/Danmarks Klimacenter har i et internationalt samarbejde med andre institutter udført såvel globale som regionale klimamodelberegninger for fremtidige emissionsscenarioer for drivhusgasser og aerosoler. Man har dels benyttet IPCC's IS92a – Business-as-Usual scenarie – og dels A2 og B2-scenarierne fra de seneste SRES-scenarier (ref.7).

Resultatet for klimaet i Danmark i 2100 sammenlignet med 1990 er angivet nedenfor (ref.7):

- Afhængig af det valgte scenario vil der være en forøgelse af den årlige middeltemperatur på 3-5 °C. Den største opvarmning vil finde sted om natten og om vinteren. Det vil generelt medføre mindre daglige og sæsonbetingede udsving i temperaturen. Der vil kun være en mindre forskel i temperaturstigningen sommer og vinter.
- En stigning på 10-40 % i vinternedbøren og formentlig et mindre fald på 10-25 % i sommernedbøren. Om sommeren vil der være tendens til længere perioder uden nedbør med risiko for tørke. Samtidigt vil der være flere hændelser med kraftig nedbør specielt i efteråret på grund af, at nedbørsmængden, som falder som byger med en intensitet på mere end 15 mm/dag, vil vokse med ca. 50 %.
- En tendens mod en generel forøgelse af vinde fra vestlige retninger samtidigt med, at stormlavtryksbanerne over Nordatlanten ændres lidt i østlig retning. Det fører til en mindre forøgelse af stormaktiviteten over Danmark og de omgivende vande. Selvom det er forbundet med stor usikkerhed viser beregningerne, at max. vandstanden i de største stormfloder vil kunne stige med 5-10 % i forhold til i dag.

Der vil være en forøget effekt af afstrømning i vandløbene. Det vil være en forøgelse af afstrømningen i størrelsen 10 % i perioden fra december til april.

De udførte beregninger tilvejebringer ikke umiddelbart scenarier for fremtidige ændringer af vandstanden omkring Danmark. Tidligere undersøgelser (ref.8) viser imidlertid at havspejlsstigningen omkring Danmark vil blive lidt mindre end den gennemsnitlige globale vandspejlstigning på grund af landets vertikale bevægelser (den direkte postglaciale rebound synes at være afsluttet, men der kan stadig spores tektonisk bevægelse i undergrunden, ref.9) Det er vurderet, at en global havspejlsstigning på 0,5 m vil medføre en stigning på 0,4 m omkring Danmark. Disse tal tager ikke højde for den regionale effekt på vandstanden af ændrede oceaniske strøm- og temperaturforhold samt vindforhold. IPCC estimerer som tidligere nævnt, at den globale havspejlsstigning vil ligge indenfor intervallet 0,1-0,9 m i perioden indtil 2100 set i forhold til SRES-scenarierne. I danske undersøgelser over påvirkning og sårbarhed, er sædvanligvis anvendt havspejlsstigninger på 0,25-0,50 m (ref.7).

Rapporteringen af STOWASUS-projektet (ref.10) indeholder en mere detaljeret beskrivelse af den forventede effekt på vandstanden forårsaget af ændringer af vinden. For Nordsøen generelt afhænger forudsigelsen på vandstanden af den fordelingsfunktion, der er valgt. Beregningerne giver således her både mindre tilvækst og mindre reduktion på 50 års MT-vandstanden. Forøgelsen af vandstanden står mest klar langs den jyske vestkyst, hvor det med en bestemt fordeling af data findes statistisk signifikant. Forøgelsen på vandstanden på den jyske vestkyst lokalt er tæt på 10 %. For indre kyster vurderes langtidstendensen på vandstanden forårsaget af vinden at være 2-3 cm. Sidstnævnte prognose vurderes at være for lavt sat (ref.11). Den hydrodynamiske model har haft østlig modelgrænse i den sydlige del af Østersøen, hvorfor effekten af vandets bevægelse til og fra den Botniske Bugt ikke er indregnet.

Selvom forøgelsen af vandstanden langs den jyske vestkyst er statistisk signifikant er det usikkert om det skyldes drivhuseffekten eller – i nogen grad – skyldes naturlig variation. Det skyldes at forøgelsen relaterer sig til en regional øgning i ekstremvinde fra vestlige og sydvestlige retninger, som måske og måske ikke kan henføres til drivhusgassernes effekt.

Ændringen i bølgeklimate følger vindkraften nøje. Middel signifikant bølgehøjde vokser med ca. 5 % i Nordsøen for GHG (se nedenfor) i forhold til PRD og med næsten 10 % i Norskehavet om efteråret. For ekstreme bølger (99,9 %-fraktilen) kan øgningen kun ses klart i Norskehavet, hvor det når 10 %. GHG og PRD er to 30-årige scenarieperioder. PRD (present day period) går fra 1970 til 1999 og GHG (greenhouse gas period) er 2060-2089. Simuleringerne er påvirket af drivhusgasser ifølge emissions-scenariet IS92a. Det nævnes, at påvirkningen i GHG-perioden i forhold til PRD-perioden er meget lig påvirkningen i SRES A2-scenarie, når den estimerede direkte og indirekte aerosol påvirkning inkluderes.

I PRUDENCE-projektet er der arbejdet videre med forudsigelserne på ekstra bidrag til stormflodsvandstande forårsaget af ændringer i vindforholdene i og omkring Nordsøen (ref.12). En kontrolperiode 1961-90 er blevet sammenlignet med modelforudsigelser for perioden 2071-2100 gennemregnet med fire regionale klimamodeller for scenariet A2 SRES. Gennemsnittet af årlige 99%-fraktiler for vind og 1%-fraktiler for atmosfærisk tryk i de to tredivårsperioder er anvendt som inddata til den hydrodynamiske model. Beregningerne viser en signifikant ændring af stormflodsvandstande for det meste af Nordsøen. Undtagelsen er Skotlands og Englands østkyst, som ikke bliver berørt. På den vestlige del af kontinentet er stigningen primært resultatet af hyppigere ekstremsituationer, medens det på den østlige del af kontinentet – Tyske Bugt og ud for Jylland – er ændringer i varigheden og intensiteten af højvandsekstremer, som er de væsentlige årsager. I Tyske Bugt vokser 99,5 % fraktilen af ekstremhøjvandet langs 10 m dybdekurven signifikant i alle modelkørsler med 20-30 cm, hvilket svarer til et plus på ca. 20 % vandstandshøjde. For den jyske vestkyst er bidraget forholdsmæssigt i samme størrelsesorden.

Forfatterne peger på, at projektet kun har undersøgt usikkerheder relateret til brugen af forskellige klimamodeller. Anvendelse af andre scenarier og/eller anvendelse af globale cirkulationsmodeller vil kunne have større effekt på højvandsstatistikken.



### 3.7 Praktisk anvendelig kvantificering af parametre til beskrivelse af klimaændring

Der er naturligvis indbygget nogen usikkerhed i den kvantitative fremskrivning af klimaændringerne over så lang en periode. Usikkerheden kan groft opdeles i:

- Usikkerhed i valg af scenario
- Spredning på modelresultater
- Usikkerhed på ændring af den naturlige påvirkning.

Resultatet af fremskrivningerne i ovennævnte referencer er angivet som intervaller.

Med tanke på praktisk anvendelighed i de senere beregninger er der i nedenstående tabel kun valgt én værdi for hver parameter. Det er ikke nødvendigvis den centrale værdi i det angivne interval. Med baggrund i ovennævnte usikkerhed på bestemmelsen, er der her, såfremt andre forhold ikke taler imod, valgt et rundt tal.

Tabel 3.1 Kvantificering af parametre for A2 og B2-scenarier

	Scenarie A2			Scenarie B2
	År 2025	År 2050	År 2100	År 2100
Global havspejlsstigning pga. temperaturstigning	+0,07 m	+0,16 m	+0,42 m	+0,36 m
Højere ekstreme højvande (50 år MT) pga. ændret stormaktivitet Vestkysten*	-	-	+ 10 %	-
Højere ekstreme højvande (50 år MT) pga. ændret stormaktivitet indre kyster*	-	-	2-3 cm	-
Større bølgehøjde, Vestkysten*	-	-	+ 5 %	-
Stigende nedbør om vinteren, hele landet	-	-	+ 25 %	-
Forøget afstrømning i vandløb	-	-	+10 %	-

\* Resultaterne fra STOWASUS-undersøgelsen er beregnet for de to perioder PRD (1970-1999) og GHG (2060-2089).

Havspejlsstigning 2025 og 2050 fundet ved aflæsning af figur 3.1. For at afspejle, at den forventede udvikling i havspejlsstigningen ikke er lineær, er denne angivet med to decimaler.

Det skal påpeges, at regionale effekter vil have betydning for den faktiske havspejlsudvikling i landet.

Tillæg til ekstreme vandstande på Vestkysten er valgt ud fra resultatet i STOWASUS-undersøgelsen, som arbejder med 50 års MT-vandstande. I PRUDENCE-projektet arbejdes med mere hyppigt forekommende vandstande. Det angivne tillæg til ekstreme vandstande for indre kyster er formentligt, som tidligere omtalt, for lavt sat.

# Klimaændringers betydning for kysten og for kystbeskyttelsen

## 4.1 Generelt

Først nu er der ved at indfinde sig en bevidsthed i samfundet og blandt besluttende myndigheder om hvilken betydning klimaændringerne kvalitativt vil medføre for landets fysiske og økonomiske udvikling. Det er stadig sjældent, at den fysiske planlægning og projekteringen tager højde for de klimaeffekter, som kan forudsiges. En af årsagerne er muligvis, at det er svært at kvantificere størrelsen af effekterne, dels på grund af uvisheden om, hvilken retning den globale udvikling tager og dels på grund af den usikkerhed resultatet af klimamodellerne stadig indebærer. Konsekvenserne vil også først for alvor – bedømt ud fra prognoserne – indfinde sig efter flere dekader.

Kysten omkring Danmark består i den nordlige del af landet af hævet havbund og forholdsvis brede strande, medens den i den sydlige del har karakter af et archipelago (øhav) (ref. 13). Den samlede kystlinje er omkring 7.400 km lang, hvilket sammenlignet med andre lande er meget i forhold til landets størrelse. Ca. 80 % af befolkningen bor i bymæssig bebyggelse med forbindelse til kysten. De mest sårbare områder udgøres specielt af hævet havbund, marskland og tidligere indvundne områder, hvor der tilsammen ligger 60-70.000 ejendomme

Omkring 900 km kystlinje er beskyttet af dige og omkring 700 km er beskyttet af skråningsbeskyttelse. Derudover er mange strækninger beskyttet af høfder og bølgebrydere. Kun meget få steder i landet udføres regelmæssig fodring, og dette udføres oftest for offentlige midler.

Klimaændringerne vil som gennemgået i afsnit 3 medføre stigende havspejlsniveau, flere og kraftigere stormsituationer samt mere nedbør om vinteren og større intensitet i efterårsmånederne. Dette vil indebære nogle konsekvenser dels for kystudviklingen og dels for effekten af den nuværende kystbeskyttelse. I dette afsnit gives en kvalitativ vurdering af disse effekter.

## 4.2 Konsekvenser for kystudviklingen af ændring af vandstand

Kysterne formes i et dynamisk samspil mellem vind, vandstand, kysttopografi og det materiale kysten er opbygget af. Hvis den resulterende retning af pålandsbølger er vinkelret på kysten vil nettomaterialtransporten – også kaldet den langsgående nettotransport – være nul og der vil formes en stabil kyst, hvor bølgeenergien nedbrydes over havbunden, inden den når helt ind til stranden.

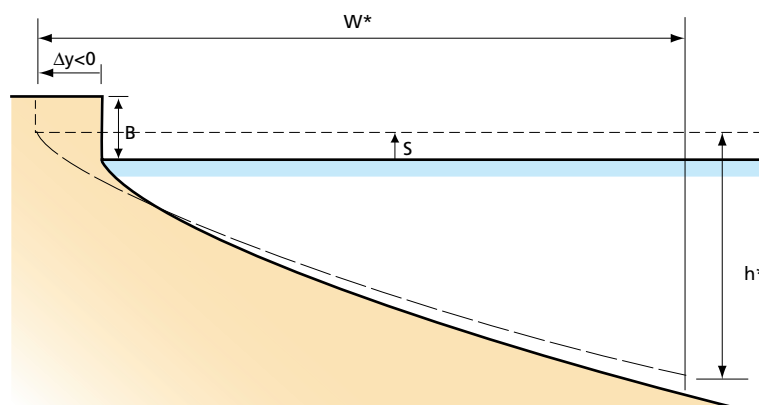
En vandstandsstigning vil umiddelbart føre til dybere vand og derved til, at mere bølgeenergi når ind til kysten. Dette vil starte en kysterosion og en kysttilbagerykning, indtil der er ført så meget materiale ud i profilet, at havbunden atter kan dissipere bølgeenergien.

Hvis den resulterende bølgeretning ikke er vinkelret på kysten, vil der foregå en nettotransport langs kysten. Der kan derfor ikke etableres en stabil situation på kysten. Såfremt nettotransporten stiger kræver dette tilførsel af materiale, hvorfor der vil foregå en stadig kysterosion, som får kysten til at rykke tilbage. Den omvendte situation, hvor nettomaterialtransporten falder, medfører aflejring af materiale på kysten med deraf følgende kystfremrykning.

Det er de ekstreme højvandsituationer, der forårsager de største skader på kysterne. Skaderne stiger med varigheden af højvandsperioden.

En forøgelse af vandstanden vil alt andet lige betyde en forøgelse af kysttilbagerykningen. Såfremt der er tale om en kyst under fremrykning vil fremrykningen blive reduceret tilsvarende og den vil eventuelt kunne vendes til tilbagerykning.

Der findes en enkel, teoretisk sammenhæng mellem vandstandsstigning og kysttilbagerykning. Den gælder for et kystprofil, som er i ligevægt, hvor den langsgående nettotransport er nul. Reglen kaldes Bruuns Regel. Den siger, at en given vandstandsforøgelse vil medføre en tilsvarende hævnning af kystprofilet, se figur 4.1. Tilførslen af materialer til denne opfyldning af kystprofilet stammer fra erosion af strand og af skrænt. Dette medfører tilbagerykning af kysten. Når denne omfordeling af materiale er tilendebragt er det nye profil i balance med den nye vandstand.



Figur 4.1 Bruuns Regel. Skitse af kystrespons pga. vandstandsstigning efter ref. 14. Tilbagerykningen findes som  $\Delta y = \pm S \cdot (W^* / (h^* + B))$ .

Denne sammenhæng gælder både for korttids- og i langtidstilstanden. I korttidssituationen vil høje og lave vandstande skiftevist afløse hinanden. Eksempelvis vil en høj vandstand med tilhørende erosion afløses af en lav vandstand med hel eller delvis tilbageførsel af det eroderede volumen til profilet.

I langtidssituationen, her med stigende vandstand på grund af klimaændringerne, vil kysten få et generelt bidrag til tilbageerykningen.

### 4.3 Konstruktioners effektivitet og holdbarhed ved generel havspejlsstigning

Der skelnes overordnet set mellem erosionsbeskyttelse til nedsættelse af den generelle kysttilbageerykning, højvandsbeskyttelse til beskyttelse mod erosion i skrænter i højvandsituationer og oversvømmelsesbeskyttelse til hindring af oversvømmelse af lavtliggende baglandsarealer.

*Konstruktioner til dæmpning/nedsættelse af den generelle kysttilbageerykning* er typisk hølde og bølgebrydere.

Hølde virker først og fremmest ved, at de blokerer den langsgående materialtransport i den del af kystprofilet, de afskærer. Ved højere vandstande ligger de stadig som en barriere på kysten. Koncentrationen af sand i vandsøjlen aftager kraftigt med afstanden fra bunden. Derfor vil der ved højere vandstande stadig være en høldeeffekt. Selv hvis hølde ligger undersøisk, vil den have en effekt på transporten, selv om denne naturligvis reduceres.

Den største bølgepåvirkning på konstruktionens skråning og krone er mulig, når vandstanden er så høj at den når lidt over toppen af konstruktionen. Her vil de største bølger kunne påvirke konstruktionen direkte. Under endnu større højvande overskyldes hølde og selvom bølgerne kan blive større, dæmpes bølgeslaget af vandsøjlen over konstruktionen. Påvirkningerne på stenene bliver følgelig formindsket. Hvorvidt dækstenslaget vil være stabil under en øget vandstand afhænger derfor af den i sin tid foretagne dimensionering.

Den generelle tilbageerykning på grund af havspejlsstigningen betyder at kystprofilet rykker tilbage. Herved sker en nedskæring i kystprofilet. Det medfører, at konstruktionen efterhånden bliver underskåret. I sidste ende vil det føre til sætninger af konstruktionen og i yderste fald kollaps.

Bølgebrydere her i landet ligger normalt på lavt vand. Bølgebryderne er stort set bygget enten i eller umiddelbart uden for den daværende kystlinje. Bølgebryderne virker ved dæmpning af den indkommende bølgeenergi – enten ved transmission eller overskyld af bølger, som rammer konstruktionen, eller diffraktion af bølgerne i bølgebrydermellemmene. Reduktionen af bølgeenergien betyder, at en større del af sandet tilbageholdes på stranden.

Ved stigende vandstand reduceres de ovennævnte bølgedæmpningsmekanismer og effekten aftager.

For stabiliteten af konstruktionen gælder de samme forhold som beskrevet ovenfor for høfderne.

**Konstruktioner til beskyttelse mod erosion i skrænter under højvande** er typisk skråningsbeskyttelse – også hyppigt benævnt skræntfodsbeskyttelse. Skråningsbeskyttelse hindrer bølger i at ramme og dermed erodere i skrænten, den beskytter.

Hæves vandstanden vil frihøjden til optagelse af bølgeopløb reduceres. Det medfører større risiko for overskyl af konstruktionen. Den vandmængde, som bølgen fører hen over toppen af konstruktionen vil enten føres direkte tilbage til stranden eller vil, såfremt der er tale om bagvedliggende klit eller dige, kunne blive skyllet over kronen og løbe ned af bagskråningen. Vand, der løber tilbage vil ofte samle sig i tilbageskylsrender bag toppen af skråningsbeskyttelsen. Nedskæringen i renderne kan akkumulere med begyndende ødelæggelse af konstruktionen ovenfra til følge. Overskylsvandet vil ofte danne render på selve bagskråningen og dermed svække klitten eller diget.

Som en afledet effekt af en højere vandstand vil en større del af bølgeenergien nå helt frem til konstruktionen. Dette indebærer i sig selv et bidrag til bølgeopløbet. Samtidigt medfører det risiko for forøget erosion ved foden af konstruktionen.

Endelig vil den almindelige tilbagerykning og nedskæring i kystprofilet på grund af forøget havspejlsstigning vokse. Konstruktionen risikerer herved at blive undermineret med kollaps til følge.

**Konstruktioner til beskyttelse mod oversvømmelse** er typisk diger. Digerne fungerer som en barriere mod vandets indtrængen til baglandet i højvandssituationer. Ofte vil diget være kombineret med en skråningsbeskyttelse på digets forskråning.

En stigende vandstand betyder, at digets frihøjde falder. Det betyder risiko for større overløb og dermed mere overskyl. Dette indebærer naturligvis en svækkelse af den pågældende oversvømmelsesbeskyttelse. Skadesmekanismen er meget lig dem, som er nævnt ovenfor for skråningsbeskyttelsen.

Længerevarende høj vandstand på forskråningen eventuelt kombineret med overskyl vil ved gennemsivning af diget kunne medføre forhøjet vandstand inde i diget, som vil kunne fremkalde jordbrud i diget.

## 4.4 Konsekvenser for kysten af hyppigere og kraftigere storme

Under storm udsættes kysten for det største angreb. Vandstanden kan være ekstrem og bølgerne kan blive meget store. Det typiske forløb er, at bølger og strøm fjerner sandet fra stranden og det nære kystprofil og flytter det længere ud i profilet. Såfremt vandstanden er tilstrækkelig høj, vil

også klitten eller skrænten blive angrebet. Der dannes et nyt ligevægtsprofil tilpasset de givne hydrauliske forhold.

Når stormen og dermed bølgerne løjer af og vandstanden samtidigt falder, vil der dannes et nyt ligevægtsprofil. Herved vil en del af det sand, som blev ført ud af i profilet blive ført med tilbage til det nære kystprofil og til stranden.

En del af sandet vender dog ikke tilbage, men føres af den langsgående strøm til andre steder langs kysten, hvor det aflejres. Alt i alt lider en given kyststrækning dog et netto materialtab, som medfører erosion på kysten.

Storme med større intensitet – og dermed større vindhastigheder – vil påvirke kysten i større grad. Hyppigere storme vil betyde, at kysten oftere udsættes for ovennævnte påvirkning, og det betyder, at der i snit vil være mindre tid for kysten til at rehabiliteres. Hver for sig og sammen virker prognosen for hyppigere og kraftigere storme for øget erosion på kysten. Dette gælder under forudsætning af, at den dominerende bølgeindfaldsretning ikke ændres.

Vindresultanten har betydning for den dominerende bølgeindfaldsretning. Ændres denne vil bidraget til nettomaterialtabet på kysten kunne ændres i enten positiv eller negativ retning. Ændres den dominerende bølgeindfaldsretning hen mod en orientering på ca. 45° med kystnormalen øges nettotabet med øget erosion til følge. Og omvendt - bevæges bølgeindfaldsretningen modsat reduceres nettotabet med mindre erosion til følge.

## 4.5 Konstruktioners effektivitet og holdbarhed ved hyppigere og kraftigere storme

Bidraget til kysttilbagerykningen på grund af et forøget nettotab i langstransporten vil medvirke til tilbagerykning af kystprofilen. Dette bidrager til, at konstruktionen efterhånden kan blive underskåret. I sidste ende vil det føre til sætninger af konstruktionen og i yderste fald kollaps.

De højere ekstremvandstande betyder, at konstruktionerne bliver udsat for voldsommere kræfter, som medfører større risiko for, at dæklaget vil være underdimensioneret, større risiko for underskæring samt større opløb med deraf større risiko for overløb med tilhørende bagskæring af konstruktionerne. Omtale af problematikken omkring de forskellige fejlmekanismer er tidligere foretaget i afsnit 4.3.

En forudsigelig effekt af større ekstrem-situationer – selvom den formentlig er i en mere beskeden skala end den, der er forårsaget af den generelle tilbagerykning – er, at større bølger i højere grad vil påvirke bunden og medføre større bølgeuro omkring foden. Det kan medføre forøget risiko for bortskæring af bunden omkring foden af konstruktionen.

Hvorvidt konstruktionerne fortsat vil være stabile under de øgede påvirkninger afhænger i høj grad af den i sin tid foretagne dimensionering.

## 4.6 Konsekvenser for slusedrift af større nedbørsmængde

Prognoserne taler om større nedbørsmængde om vinteren og ikke mindst større intensitet i bygerne om efteråret. Afstrømningen fra oplandet vil derfor blive større med behov for større kapacitet af afvandingsluserne. Afstrømningen kan isoleret set afvikles ved større differensvandspejl mellem fjord og hav, såfremt sluser og omgivende ledeværker er dimensioneret til de større strømhastigheder. Samme effekt kan alternativt opnås ved længere tids åbning af sluserne.

Problemet er, at havspejlet ifølge prognoserne også stiger, således at effekten af de to ovennævnte, mulige løsninger reduceres. Konsekvensen af manglende afvandning af fjordene og vandløbene bliver større risiko for, at de ubeskyttede, lave engarealer lejlighedsvis eller permanent bliver oversvømmet. Fjorddigerne vil også komme under større pres.

## 4.7 Sammenfatning

Resultatet af en generel vandspejlsstigning i havet er isoleret set, at kysttilbagerykningen vokser. Kysttilbagerykningen medfører, at nedskæringen i profilet øges, hvilket igen betyder, at kystprofilet foran konstruktionen svækkes. Bliver nedskæringen tilstrækkelig stor vil konstruktionen sætte sig – i sidste instans med efterfølgende kollaps til følge.

Forværrede vindforhold vil også øge tilbagerykningen såfremt den dominerende vindretning fastholdes. Ændres vindretningen samtidigt afhænger bidraget til kystudviklingen af til hvilken side retningen ændres. Større vindpåvirkning vil ligeledes medføre større bølgeuro foran konstruktionen. Dette bevirker større strøm- og hvirveeffekter, hvilket kan betyde større nedskæring foran konstruktionerne.

Hvorvidt konstruktionerne vil være stabile eller virke på hensigtsmæssig måde under øgede påvirkninger afhænger i høj grad af den i sin tid foretagne dimensionering.

Under forudsætning af ændringerne af de klimabetingede hydrauliske påvirkninger må man vurdere om svækkelsen af kysten og konstruktionerne er acceptabel. I modsat fald må man tage stilling til hvilke forholdsregler, man vil tage i anvendelse. En afhjælpning af en situation, hvor udviklingen implicerer, at konstruktionen er underdimensioneret, kan afhængig af problemet foretages ved forskellige konstruktive tiltag eller alternativt ved forstærkning af kystprofilet gennem en fodringsindsats. Man kan også vælge at lade stå til. Den valgte løsningsmodel afhænger i høj grad af den fysiske planlægning for det pågældende område og de dermed forbundne økonomiske interesser.

# Vestkysten. Scenarier, undersøgelsesmetodik og konsekvenser

## 5.1 Generelt

Kystdirektoratet udfører løbende kystbeskyttelse på den centrale del af den jyske vestkyst fra Lodbjerg til Nyminddegab, herefter omtalt som Vestkysten, se figur 5.1. Hvert femte år analyserer Kystdirektoratet kystens udvikling og planlægger den fremtidige kystbeskyttelse i samarbejde med de bevilgende myndigheder. I den sammenhæng opstilles en række scenarier for kystudviklingen med forskellig ambitionsniveau. Til hver af scenarierne knyttes en differentieret målsætning om kystudviklingen langs Vestkysten og der udarbejdes tilhørende økonomisk oversigt.



Figur 5.1 Vestkysten

Tilsvarende her – med udgangspunkt i en række scenarier om kystens udvikling – konkretiseres problemstillingen omkring effekten af klimaæn-



dringer og den forventede fremtidige udvikling og nødvendige indsats belyses.

Der arbejdes med to tidshorisonter – én periode frem til år 2025 og en anden frem til år 2050. Det ligger ikke i opdraget at fortsætte med en tidshorizont frem til år 2100, selv om klimamodellerne leverer forudsigelse for vandstande, bølgehøjde m.v.

## 5.2 Undersøgte scenarier

Problematikken og den fremtidige kystudvikling belyses i nærværende afsnit ved hjælp af seks scenarier, som adskiller sig dels ved forskelle i ambitionsniveau, dels ved principielle forskelle i selve kystbeskyttelsesindsatsen.

Scenarierne er defineret nedenfor:

- S 1.1 Naturlig udvikling uden indgreb
- S 1.2 Naturlig udvikling med samtidig løbende forstærkning/forhøjelse af kystkonstruktioner
- S 2.1 Indsats for bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau med samme kystbeskyttelsestiltag som i dag
- S 2.2 Indsats for bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau med større grad af miljøvenlige tiltag end i dag
- S 3.1 Indsats for ingen tilbagerykning med samme kystbeskyttelsestiltag som i dag
- S 3.2 Indsats for ingen tilbagerykning med større grad af miljøvenlige tiltag end i dag.

Med hensyn til kystudviklingen betragtes kun den del af kystprofilet (klittop til kote  $\pm 6$ ), som traditionelt er blevet betragtet som den aktive del af kystprofilet, og på hvilke det beregnede fodringsbehov på Vestkysten bygger.

Den accepterede risiko for gennembrud af diger/klitter på Vestkysten er 100 års MT, den er dog 1.000 års MT foran Thyborøn By.

Bevarelse af det nuværende sikkerhedsniveau (scenarierne S 2..) defineres her som bevarelse af en sikkerhed svarende til 100 års MT – Thyborøn By svarende til 1.000 års MT – frem til 2050. Med udgangspunkt i den aktuelle målsætning skærpes denne på visse delstrækninger, således at alle delstrækninger beregningsmæssigt fastholder en sikkerhed svarende til mindst 100 års MT, se afsnit 5.3.2.

## 5.3 Metodik for undersøgelse

Undersøgelsen dækker en strækning på ca. 112 km. Alene i kraft af strækningens størrelse vil undersøgelsen holde sig på et overordnet niveau.

Undersøgelsen tager derfor udgangspunkt i Kystdirektoratets linjesystem til vestkystmålinger, se tegn.nr. 5.1 og 5.2. Linjerne ligger med ca. 1 km indbyrdes mellemrum – på den nordlige strækning nord for Fjand ved Nissum Bredning ligger de dog med en mindre indbyrdes afstand. Det er i disse linjer profilmålingerne foretages. Det betyder, at en lokal svækkelse af klitten, som ikke afspejles i selve profilopmålingen i den nærmeste vestkystlinje, ikke behandles.

Klimaændringerne forudses at have flere følgeefferter, der hver især vil påvirke kystudviklingen samt konstruktionernes funktion og stabilitet.

Klimaændringerne vil bevirke større erosion af følgende årsager:

- Almindelig havspejlsstigning
- Større bølger
- Forøget profilstejlhed.

Større bølger skyldes forudsigelsen om større intensitet af vinden og hyppigere storme. Både bølgehøjde og -periode vokser derfor. Profilstejlheden vokser på grund af havspejlsstigningen. Det medfører, at større bølger når ind til kysten, hvor de bryder. Under forudsætning af, at den dominerende bølgeindfaldsretning ikke ændres vil begge dele medføre større kapacitet af den langsgående sedimenttransport og dermed forøget erosion.

Sikkerheden af højvands- og oversvømmelsesbeskyttelsen påvirkes af:

- Almindelig havspejlsstigning
- Større stuvning (surge)
- Større bølger.

Større surge og større bølger ventes på grund af forudsigelserne om vinden som nævnt ovenfor. Begge faktorer medvirker til større bølgeopløb på skråningerne.

Som grundlag for fastsættelsen af de dimensionsbestemmende vandstande benyttes højvandsstatikker fra tre vandstandsstationer jævnt placeret langs Vestkysten:

- Thyborøn Havmåler
- Thorsminde Havn
- Hvide Sande Havn

Begrundelsen for ikke at bruge data fra havmålerne i Thorsminde og Hvide Sande er, at disse - i den i forvejen forholdsvis korte måletidsserie - fysisk er flyttet. En ændret fysisk placering medfører også ændrede fysiske forhold omkring måleren. Der er derfor usikkerhed omkring konsistens af data, såfremt de anvendes i samme statistik.

På grund af de ekstreme vandstandsforhold på Vestkysten under orkanen den 8. januar 2005 er det valgt at opdatere statistikkerne givet i ref.2. Vandstanden under denne orkan influerer signifikant på højvandsstatistikken. Til sammenligning er udtræk fra de tidligere statistikker også angivet i tabel 5.1. Specielt i de to nordlige stationer er statistikken ændret væsentligt.

Tabel 5.1 40 års og 100 års MT-vandstande på Vestkysten

Vandstandsstation	Højvandsstatistik fra 2002		Opdateret højvandsstatistik (incl. 2005)	
	40 års MT m	100 års MT m	40 års MT m	100 års MT m
Thyborøn Hav	2,43	2,56	2,49	2,64
Thorsminde Havn	2,97	3,18	3,05	3,29
Hvide Sande Havn	3,04	3,27	3,07	3,31

Vandstande aflæst i de opdaterede vandstandsstatistikker,  $vs_{tør}$ , på en given kyststrækning interpoleres lineært mellem de to nærmeste vandstandsstationer. For at tage højde for den fremtidige effekt af klimaændringerne gives de et tillæg dels for almindelig havspejlsstigning,  $\Delta vs_{generel}$ , og dels et tillæg for øget stuvning (surge),  $\Delta vs_{surge}$ . Disse parametre indgår forskelligt i beregningerne:

- Beregning af naturlig kysttilbagerykning udtrykt ved normal havspejlsniveau:  $vs_{ny} = vs_{tør} + \Delta vs_{generel}$
- Beregning af sikkerhedsniveau af højvandsbelyttelse udtrykt ved middeltidshændelse (MT):

$$vs_{MT,ny} = vs_{MT,tør} + \Delta vs_{generel} + \Delta vs_{MT,surge}$$

Udgangspunkt for beregninger af dels kysttilbagerykningen og dels sikkerhedsniveauet er det aktuelle kystprofils øjeblikkelige styrke. Ved undersøgelsens igangsættelse var den seneste opmåling på Vestkysten 2004-målingen. Ud fra 2004-opmålingen fastlægges strandens profil, herunder hældninger i de forskellige benyttede profilafsnit.

### 5.3.1 Fremskrivning af klimaudvikling samt afledte effekter

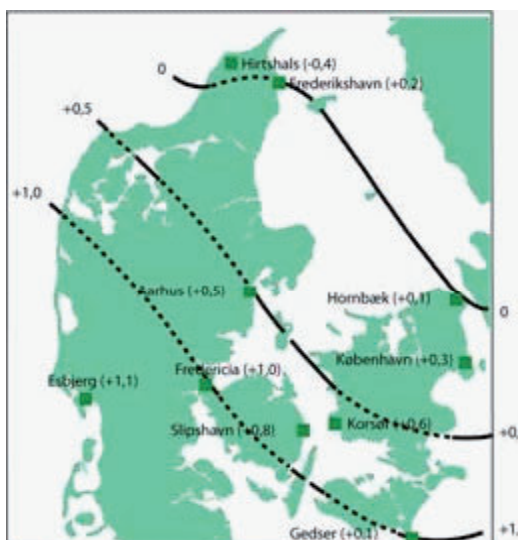
Fremskrivning for den globale havspejlsstigning er tidligere kvantificeret i afsnit 3.7. I tabel 5.2 er værdierne for de to scenarier A2 og B2 gengivet. Stigningen er angivet med starttidspunkt i år 1990. Med udgangspunkt år 2005 i nærværende undersøgelse bliver stigningen reduceret.

Tabel 5.2 Global havspejlsstigning i cm

Global havspejlsstigning i cm	Scenarier	
	A2	B2
Perioden 1990-2100	+ 42	+ 36
Perioden 1990-2050	+ 16	+ 16
Perioden 1990-2025	+ 7	+ 7
Perioden 2005-2100	+ 39	+ 33
Perioden 2005-2050	+ 13	+ 13
Perioden 2005-2025	+ 4	+ 4

I de lokale 100 års vandstandsprognoser er de lokale isostatiske forhold taget i regning, se figur 5.2 med angivelse af den relative havspejlsstigning i Danmark. Det forudsættes herved, at det sidste hundrede års

isostatisk bevægelse fortsætter med samme størrelse de kommende hundrede år.



Figur 5.2 Relativ havspejlsstigning 1890-1989 (mm/år). Isolinjer forsøgsvis indlagt (ref. 8).

Figuren er endvidere aflæst i tabel 5.3. Den lokale havspejlsstigning ved Thorsminde, som ligger midt på Vestkyststrækningen og derfor valgt som repræsentativ for hele Vestkysten, er den isostatisk bevægelse taget forholdsommæssigt i regning for prognoserne frem til 2025 og 2050.

Tabel 5.3 Lokal havspejlsstigning

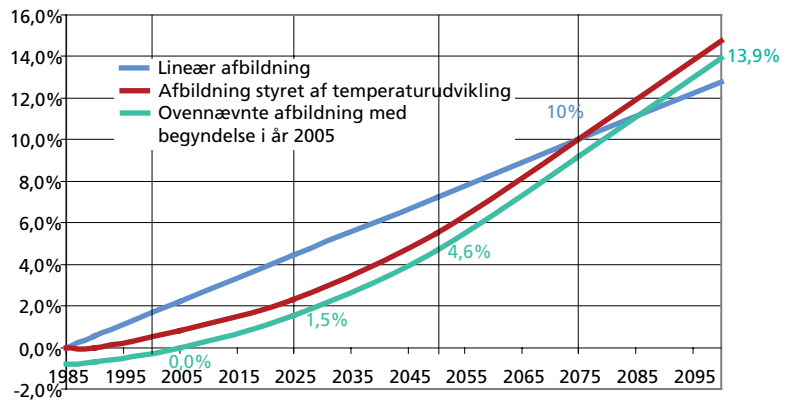
Havspejlsstigning angivet i cm		Scenarier	
Det lokale bidrag til den globale vandspejlsstigning angivet i parentes		A2	B2
Hirtshals, 2005-2100	(÷15÷4)	+ 20	+ 14
Thorsminde, 2005-2100	(÷15+9)	+ 33	+ 27
Esbjerg, 2005-2100	(÷15+11)	+ 35	+ 29
Højer, 2005-2100	(÷15+11)	+ 35	+ 29
Thorsminde, 2005-2050	0,5•(÷15+9)	+ 10	+ 10
Thorsminde, 2005-2025	0,25•(÷15+9)	+ 3	+ 3

Ifølge IPCC (1990) er middelvandstanden i de sidste 100 år steget ca. 15 cm globalt (ref. 8)

Aflæsning af figur 3.3 giver ikke nogen forskel i de to scenarier for perioderne frem til henholdsvis 2025 og 2050. Der arbejdes derfor kun videre med det ene scenarie A2.

Ifølge STOWASUS vurderes forøgelsen på højvandsstanden på den jyske vestkyst lokalt at være tæt på 10 %, se afsnit 3.6. Det skyldes en regional øgning i ekstremvinde fra vestlige og sydvestlige retninger. Stigningen sker ifølge undersøgelsen fra perioden 1970-99 til perioden 2060-89. Med en antagelse om, at udviklingen over tiden sker på samme måde som for temperaturstigningen, se figur 3.2, er udviklingen på forøgelsen af højvande vist på figur 5.3. Grafen er parallelforskudt, således, at udgangspunktet er år 2005. Højvandsstatistikkerne er opdateret til 2005.

**Forøgelse af 50 års MT-højvande**



Figur 5.3 Forøgelse af højvandstande

Følgende værdier aflæses i tabel 5.4.

Tabel 5.4 Forøgelse af højvande (50 års MT) i forhold til 2005

	Scenarie A2
År 2100	+ 13,9 %
År 2050	+ 4,6 %
År 2025	+ 1,5 %

Ifølge STOWASUS forventes middel signifikant bølgehøjde i Nordsøen at vokse med ca. 5 %, se afsnit 3.6. Dette skyldes kraftigere vindpåvirkning og hyppigere storme. Det forudsættes, at bølgeperioden ligeledes øges med et tillæg på 5 % i år 2100.

Den betragtede periode afviger i forhold til 100 års perioden i nærværende undersøgelse. I betragtning af usikkerheden på resultatet anses dette forhold dog for uvæsentligt. Udviklingen henover århundredet antages at foregå med samme stigningstakt som for de øvrige klimaparametre.

Tabel 5.5. Større bølgehøjde og -periode i forhold til 2005

	Scenarie A2
År 2100	+ 5 %
År 2050	+ 2 %
År 2025	+ 1 %

Større bølgeindfald på kysten medfører større gradienter af den langsgående transport. Under forudsætning om at bølgeenergien virker på den samme del af kystprofilen betyder det, at tilbagerykningen er ligefrem proportional med størrelsen af den langsgående transport. Ved anvendelse af formlen  $Q = k_1 \cdot H_s^{5/2}$ , hvor  $Q$  er den langsgående transport,  $k_1$  er en konstant og  $H_s$  er signifikant bølgehøjde, kan  $\Delta Q$  og dermed ændringen i kysttilbagerykning  $\Delta v_{\text{bølge}}$  udledes, se tabel 5.6.

Bruuns regel betyder, at det aktive kystprofil hæves i takt med havspejlsstigningen. Dette medfører en mindre ændring af kystprofilens hældning, som ligeledes har betydning for størrelsen af den langsgående transport. Med samme betragtning som før udledes ændringen i kysttilbagerykning  $\Delta v_{\text{hældning}}$ , se tabel 5.6. Formlen lyder  $Q = k_2 \cdot \tan\beta^{0.5}$ , hvor  $k_2$  er en konstant og  $\beta$  er kystens middelhældning langs Vestkysten i profilafsnittet mellem

kote 0 og kote  $\pm 10$ . Den langsgående transport foregår for det meste i denne del af profilet.

Hældningen i udgangssituationen, år 2004, er beregnet til 10/1053. Ændringen i hældningen de følgende år afhænger af havspejlsstigningen.

Tabel 5.6 Scenarie A2. Tillæg til kysttilbagerykning grundet klimaændringer

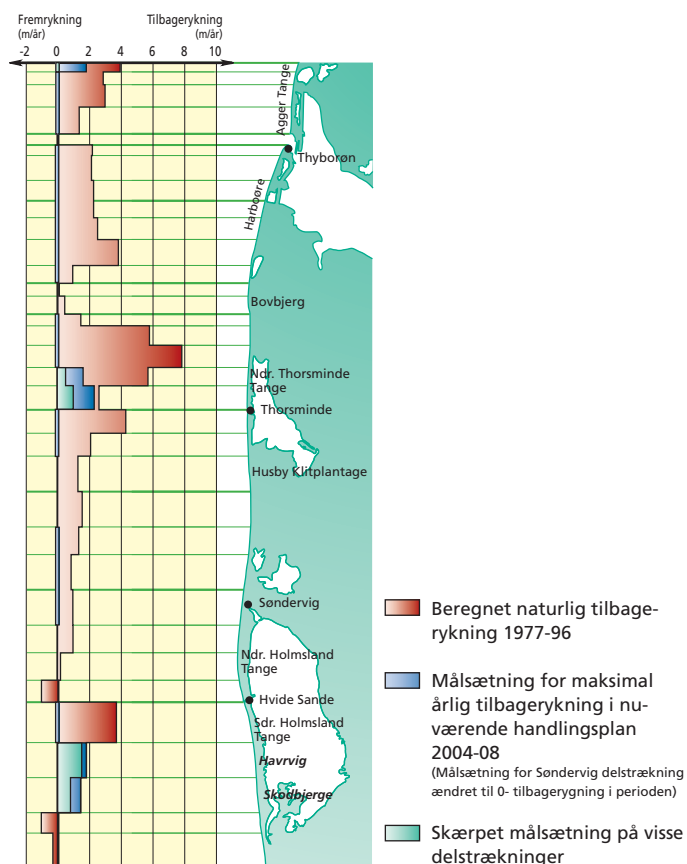
	Ændring af			
	bølgeklime		profilhældning	
	$\Delta H_s$	$\Delta Q = \Delta v_{\text{bølge}}$	$\tan\beta$	$\Delta Q = \Delta v_{\text{hældning}}$
År 2100	+ 5%	+ 13,0 %	10,33/1053	+ 1,6 %
År 2050	+ 2%	+ 5,1 %	10,10/1053	+ 0,5 %
År 2025	+ 1%	+ 2,5 %	10,03/1053	+ 0,2 %

### 5.3.2 Kystudvikling

Med hensyn til naturlig tilbagerykning på de enkelte delstrækninger tages udgangspunkt i den beregnede kystudvikling set over årene 1977-96 (ref.15), se figur 5.4.

I scenarierne S 1.. (forkortelse for S 1.1 og S 1.2) arbejdes med naturlig kystudvikling langs hele kysten. Der vil her være meget store forskelle på kystudviklingen på de enkelte delstrækninger. Tages dette forhold bogstaveligt vil det over en årrække på næsten 25 eller næsten 50 år beregningsmæssigt medføre diskontinuitet på kystlinjen ved overgang mellem delstrækninger med forskelle i den beregnede naturlige kystudvikling. Da Vestkysten er en såkaldt udligningskyst vil disse udviklingstendenser udjævne sig selv. I stedet anvendes derfor et fælles gennemsnit af den naturlige tilbagerykning på Vestkysten. Det vægtede gennemsnit for den naturlige kysttilbagerykning på Vestkysten er 1,99 m/år.

Målsætningerne S 2.. med indsats til bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau tolkes således, at sikkerhedsniveauet ikke må blive mindre end det, der gælder i dag. På figur 5.4 er målsætningen i den nuværende handlingsplan skærpet således, at sikkerhedskravet beregningsmæssigt også vil være opfyldt i 2050.



Figur 5.4 Beregnet naturlig kystudvikling samt justeret målsætning for kystudviklingen

### 5.3.3 Oversvømmelsesrisiko

Oversvømmelsesbeskyttelsen af lavtliggende bagland på Vestkysten består fra naturens side af klitter. Hvor disse er nederoderet er de erstattet af sanddiger, som eventuelt yderligere kan være beskyttet mod højvandserosion af en skråningsbeskyttelse.

Bortset fra Thyborøn By er sikkerhedskravet, at oversvømmelsesbeskyttelsen skal kunne modstå en 100 års MT vandstandssituation. Det anvendte kriterium, som bygger på analyse af en række klitmålinger før og efter ekstreme højvandssituationer, se ref.16, er, at klitbredden minimum skal være 40 m bred over kote +5. Heri medgår en 10 m bred ekstra bufferzone til imødegåelse af den situation, at to ekstreme højvandssituationer indtræffer med kort tids mellemrum.

Sikkerheden af en kombineret løsning med dige og skråningsbeskyttelse skal kunne modstå en 100 års MT vandstandssituation. For at modvirke erosion bag dæksten/betonblokke skal skråningsbeskyttelsen være høj nok til at modvirke direkte bølgeslag oven over kronekanten. For at modvirke erosion af bagskråningen skal digevolumen (kronebredde og -højde) være tilstrækkelig stor til at forhindre, at mere end 2 % af bølgerne løber tværs henover digets krone.

Til vurdering af sikkerheden mod oversvømmelse er der produceret en række kort med højdekurver større end kote +5 eksemplificeret ved tegn. nr. 5.3. Data er udtrukket fra højdemodel udført ved bearbejdning af flyscannede data. Flyscanningen er foretaget sommeren 2005. På mindre

strækninger er disse højdeinformationer mangelfulde. Her er der suppleret med ældre data, hvor klitskrænten er opdateret ved hjælp af KDI's 2004-vestkystmåling.

## 5.4 Konsekvenser på kysten

I nedenstående afsnit gennemgås konsekvenserne for de enkelte elementer af kystbeskyttelsen for de scenarier, der medfører tilbagerykning af kysten. Det drejer sig om scenarierne S 1.. med målsætning om naturlig tilbagerykning og scenarierne S 2.. med målsætning om bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau. Scenarierne S 3., hvor målsætningen er 0-tilbagerykning er uinteressante i denne sammenhæng, idet de ikke medfører fremtidig svækkelse af den overordnede sikkerhed mod gennembrud og oversvømmelse af baglandet. Følgerne af scenarierne er beskrevet parvis, idet kystudviklingen parvis er identisk.

Tilbagerykningen i S 1.. vil gradvist øges henover tiden på grund af de øgede påvirkninger, som skyldes klimaændringerne. Derimod vil påvirkningen fra klimaændringerne i S 2.. blive imødegået gennem en større fodringsindsats. Der vil derfor være tale om en konstant tilbagerykning over perioderne på de enkelte delstrækninger.

### 5.4.1 Klitter uden skråningsbeskyttelse

Det bør indledningsvis nævnes, at strækningerne Bovbjerg Klint og Husby Klit ikke er truet af oversvømmelse, idet begge områder har et højtliggende bagland.

Klitstyrken i L5470 og L5490 på Krogen og Søndervig-delstrækningerne er i dag formelt set ikke til stede. Den reelle sikkerhed er dog til stede, da tærsklerne til baglandet alle ligger over kote +4 og derfor noget over niveauet for en 100 års MT vandstand. Dette er vist for L5470 på tegn. nr. 5.3.

Nedenfor er givet en summarisk gengivelse af konsekvenserne i de enkelte scenarier. For større detaljering henvises til bilag 2.

#### *S 1.. Målsætning om naturlig udvikling*

Digestyrken vil i år 2025 de fleste steder på den nordlige strækning ned til Fjand være nået under sikkerhedskriteriet. På den sydlige strækning er billedet mere broget. På delstrækningerne Husby Klit, Nord, Nr. Lyngvig, Sdr. Lyngvig, Havrvig og Gl. Bjerregård er sikkerheden dog overalt i orden. Set frem til 2050 bliver antallet af linjer med utilstrækkelig sikkerhed forøget. Dog forbliver sikkerheden i orden på Nr. Lyngvig og Sdr. Lyngvig-delstrækningerne.

I enkelte linjer er klitten helt borteroderet i 2025. I 2050 er klitten borteroderet stort set i alle linjer på delstrækningen nord for Fjand. På den sydlige strækning er den borteroderet i mange linjer og næsten fuldstændigt borteroderet på Krogen-delstrækningen.



### *S 2.. Målsætning om bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau*

Den primære klit vil to steder ikke opfylde sikkerhedskriteriet i år 2025. Det er L5170 og L5180 på Ndr. Thorsmindetange og L5550 på Klegoddelstrækningen. I de to første linjer ligger et tilbagetrukket dige som ekstra sikkerhed, således at den overordnede sikkerhed er til stede. I den sidste linje findes en klitlomme, som er truet, medens den overordnede sikkerhed af klitten er til stede. Set frem til år 2050 gør de samme forhold sig gældende for L5190 på Ndr. Thorsmindetange og L5370 på Husbydelstrækningen.

### *S 3.. Målsætning om standsning af tilbagerykning*

Den generelle sikkerhed er overholdt. Klitstyrken opfylder sikkerhedskriteriet.

## **5.4.2 Klitter/diger med skråningsbeskyttelse**

På store dele af Vestkysten er der anlagt skråningsbeskyttelse til beskyttelse af diger og klitter mod højvandserosion. Det drejer sig om en samlet strækning på ca. 25,5 km.

Der findes en række fejlmekanismer, som kan føre til konstruktionernes delvise eller fuldkomne ødelæggelse. En alvorlig fejlmekanisme udgøres af underskæring, hvorved der er stor risiko for, at hele konstruktionen kollapser. Andre væsentlige fejlmekanismer er overskyl af skråningsbeskyttelsens krone, hvorved der kan ske erosion og bagskæring af konstruktionen, og overløb af diget eller klitten, der kan medføre erosion i bagskråningen. Endelig kan blokkene i skråningsbeskyttelsen være underdimensioneret.

Tidspunktet for eventuel underskæring af konstruktionerne afhænger af den pågældende kysttilbageryknings hastighed, skråningsbeskyttelsens placering i det aktuelle kystprofil samt den lokale hældning af profilet. Maksimalt registreret nedskæring i strandprofilet under ekstreme højvande er tidligere målt til 1 m. Der vil derfor være risiko for underskæring, når det normale strandprofil ligger mindre end 1 m over skråningsbeskyttelsens fod. Skråningsbeskyttelsen på de forskellige strækninger af Vestkysten er typisk bygget med fod i kote ÷1,0. Asfaltediget foran Thyborøn ligger dog med fod i kote +0,5.

Kriteriet for at der ikke sker overskyl er, at den brydende bølge ikke direkte rammer skråningsbeskyttelsens krone. Kriteriet for overløb er, at der maksimalt sker 2 % overløb af digekronen. Beregning af fremtidig overskyl og overløb følger i øvrigt traditionelle beregningsmetoder (se ref. 17).

Blokkene er dimensioneret ved fysiske modelforsøg og er optimeret, således at de er afpasset til de dimensionsgivende forhold. Dog blev der i dimensioneringen ikke taget hensyn til den i praksis forekommende anseelige friktion mellem blokkene indbyrdes. Det vurderes, at den øgede bølgepåvirkning som følge af klimaændringerne ikke matcher den indbyggede ekstra sikkerhed i konstruktionen, hvorfor skråningsbeskyttelsen

næppe vil være underdimensioneret. Ændringer af dybdeforholdene foran konstruktionen på grund af profiltilbagerykning holdes ligeledes på et beskedent niveau, hvorfor samme argument her gør sig gældende. Ved større ændringer flyttes skråningsbeskyttelsen til en mere landværts placering.

Der er i vurderingen ikke taget hensyn til effekten af bølgerefleksion på skråningsbeskyttelsen. Øget bølgerefleksion vil medføre større erosion af kystprofilet foran skråningsbeskyttelsen. Dette forhold bliver delvist opvejet af, at kriteriet for den pågældende fejlmekanisme regnes for overtrådt langs hele den pågældende strækning med skråningsbeskyttelse, såfremt den blot er overtrådt i én af de aktuelle linjer.

Resultatet af undersøgelsen er refereret nedenfor. Såfremt der beregningsmæssigt sker overskridelse af en fejlmekanisme i blot ét af de undersøgte linjer, vil hele den pågældende strækning med skråningsbeskyttelse her beregningsmæssigt være truet. I bilag 3 er der redegjort for beregningerne.

### ***S 1.. Målsætning om naturlig udvikling***

I år 2025 vil der være uacceptabel risiko for underskæring af skråningsbeskyttelsen på strækningerne Nord for hofde 96 og ud for Ferring Sø. Der vil ligeledes være risiko for overskyl og/eller overløb på højvandsbeskyttelsen på følgende strækninger: Nord for hofde 96, Ferring Sø, Sdr. Thorsmindetange og Fjand. På de øvrige strækninger vil risikoen ligge på et acceptabelt og beskedent niveau.

I år 2050 være risiko for underskæring af skråningsbeskyttelsen på alle strækninger bortset fra Strandgården. Der vil endvidere være risiko for overskyl og/eller overløb på alle strækninger med skråningsbeskyttelse.

Når skråningsbeskyttelsen bliver underskåret kolliderer konstruktionen. Kystprofilet vil herefter forholdsvis hurtigt indstille sig i et nyt ligevægtsprofil. Under denne proces ædes der af klitten/diget. På langt hovedparten af de aktuelle strækninger med underskæring af skråningsbeskyttelsen vil selve klit- eller digebeskyttelsen herefter enten helt mangle eller i bedste fald have et volumen, som ikke opfylder sikkerhedskriteriet.

### ***S 2.. Målsætning om bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau***

Risikoen for underskæring af skråningsbeskyttelsen på Vestkysten vil være beskeden både set frem til 2025 og 2050.

Risikoen for overskyl eller for et for stort overløb af skråningsbeskyttelsen vil ligge på et beskedent, men acceptabelt niveau.

### ***S 3.. Målsætning om standsning af tilbagerykning***

Risikoen for underskæring af skråningsbeskyttelsen på Vestkysten vil være beskeden både set frem til 2025 og 2050.

Risikoen for overskyl eller for et for stort overløb af skråningsbeskyttelsen vil ligge på et beskedent, men acceptabelt niveau.

### 5.4.3 Bølgebrydere

Navnlig i tiåret efter 1981-stormen blev der bygget et stort antal bølgebrydere til beskyttelse mod erosion langs kysten. De blev anvendt til nedsettelse af fodringsbehovet, idet kombinationen af bølgebrydere og fodring økonomisk var rentabelt i disse år. Der ligger i dag 87 bølgebrydere på Vestkysten og de er alle bygget kystnært placeret tæt på kystlinjen.

To af de væsentligste fejlmekanismer for kollaps af bølgebrydere er underskæring af konstruktionens fod og bund samt nedsat stabilitet af dæksten, herunder både sten i kroppen og i foden.

Øget vind og vandstande øger påvirkningen på kysten. Bølgehøjden afhænger af vanddybden og dermed af vandstanden. Større vandstande vil ikke medføre øget bølgebelastning på konstruktionen, idet de højere vandstande ligger i den ende af skalaen, hvor bølgebryderne er dykkede.

Bølgebryderdesignet er i det væsentlige det samme langs hele Vestkysten, dog kan enkelte bølgebrydere være anlagt med bund lavere end kote  $\pm 1,0$ . I nærværende undersøgelse benyttes et generelt design for bølgebryderne med bund i kote  $\pm 1,0$ .

Tidspunktet for eventuel underskæring af konstruktionerne afhænger af kysttilbagevandringshastigheden, afstanden fra aktuelle profil til bølgebryderen målt over kote  $\pm 1$  samt hældningen af profilet lokalt omkring kote  $\pm 1$ .

Resultatet af undersøgelsen er refereret nedenfor. Såfremt der beregningsmæssigt sker underskæring af bølgebrydere i blot ét profil af de undersøgte profillinjer, vil hele den pågældende bølgebrydergruppe være nævnt. I bilag 4 er der redegjort detaljeret for resultatet af undersøgelsen.

#### *S 1.. Målsætning om naturlig udvikling*

Alle bølgebrydere vil være underskåret inden 2025.

#### *S 2.. Målsætning om bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau*

Der vil ikke indtræffe underskæring hverken frem til 2025 eller 2050.

#### *S 3.. Målsætning om standsning af tilbagevækst*

Der vil ikke indtræffe underskæring hverken frem til 2025 eller 2050.

### 5.4.4 Høfder

Høfderne på Vestkysten er karakteriseret ved, at de når langt ud i kystprofilen. Af samme grund betegnes de ofte som havhøfder. De er anlagt i løbet de første knap 100 år af den historiske kystbeskyttelsesindsats på Vestkysten, som påbegyndtes i slutningen af 1800-tallet.

Der eksisterer tre store høfdesystemer på Vestkysten opdelt efter langstransportens retning. Det er Agger Tange, Harbøre Tange og det høfdesystem, som her benævnes Bovbjerg.

Høfdernes flanker og hoveder udgøres af sten- eller betonblokkastning. Gennem tiderne er der udlagt mange blokke i forbindelse med reparation og forstærkning. Der ligger således en anseelig buffer af sten og blokke, hvoraf mange er sandgæede. Det betyder, at der skal ske nogen nedskæring af kystprofilen før konstruktionerne bliver undskåret.

Når kysten rykker tilbage vil diget eller skrænten også rykke tilbage. For at høfderne ikke skal blive bagskåret skal de derfor forlænges bagud til indbygning med diget eller skrænten. I samme ombæring vil det være hensigtsmæssigt at afkorte høfderne i den søværts ende med samme størrelse, således at høfdelængderne bevares.

Større vandstande vil overordnet set ikke medføre øget bølgebelastning på konstruktionen, idet de højere vandstande ligger i den ende af skalaen, hvor høfderne er dykkede.

Resultatet af undersøgelsen er refereret nedenfor. På grund af utilstrækkeligt kendskab til stenvolumenerne i de enkelte høfder generaliseres undersøgelsen. Såfremt der beregningsmæssigt sker undskæring i blot ét profil af de undersøgte profiler langs et høfdesystem vil hele den pågældende strækning med høfder være nævnt. I bilag 5 er beregningerne i undersøgelsen kvantificeret.

### ***S 1.. Målsætning om naturlig udvikling***

Der vil ske nogen nedskæring omkring høfdeenderne frem til år 2025. Nedskæringen langs skafterne vil være betydelig. Tilbagerykningen af digerne eller på Bovbjerg-strækningen skrænten vil ligge på omkring 45 m.

Nedskæringen vil naturligvis være endnu større frem til år 2050 og navnlig nedskæringen omkring høfdeskafterne vil være alvorlig. Tilbagerykningen af digerne eller skrænten på Bovbjerg-strækningen vil ligge på ca. 100 m.

Det skal bemærkes, at hovedparten af nedskæringen/tilbagerykningen ikke skyldes effekten af klimaændringerne men den almindelige tilbagerykning.

### ***S 2.. Målsætning om bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau***

Nedskæringen i de profiler, hvor tilbagerykning accepteres, er så små, at det med tanke på bufferen af sandgæede sten og blokke næppe vil medføre undskæring af høfderne.

På Bovbjerg II-strækningen skal man påregne en landværts forlængelse af høfdeskaftet på henholdsvis 6 og 13 m frem til år 2025 og 2050.

### ***S 3.. Målsætning om standsning af tilbagerykning***

Da der er målsætning om fastholdelse af kysten sker der ingen nedskæring af den del af kystprofilen, høfderne gennemskærer.

# Vestkysten. Fremtidig indsats

## 6.1 Vedligeholdelse af kysten samt kystbeskyttelsen

I nærværende afsnit gennemgås den indsats, der skal mobiliseres for at opfylde målene i de enkelte scenarier nævnt i afsnit 5.2.

Alene i kraft af definitionen omtales scenarie S 1.1 ikke i dette afsnit. Scenarierne S 2.2 og S 3.2 omtales i afsnit 6.2, medens de øvrige scenarier S 1.2, S 2.1 og S 3.1 behandles i afsnit 6.3.

Tiltag i scenarie 1.2 består alene i løbende forstærkning/forhøjelse af kystkonstruktioner i takt med den naturlige kystudvikling. Dette tolkes som sikring af konstruktionernes effekt samt fastholdelse af sikkerhedsniveauet ved forstærkning/forhøjelse af de eksisterende konstruktioner inden for rimelighedens grænser. Såfremt ressourceforbruget til vedligeholdelse af konstruktionerne overstiger visse grænseværdier, som er specificeret for de enkelte konstruktionstyper, opgives konstruktionen og flyttes til en position længere landværts, tilpasset de ændrede dybdeforhold.

## 6.2 Scenarier med større grad af miljøvenlige tiltag

I scenarierne S 2.2 og S 3.2 lægges der i forhold til de respektive scenarier S 2.1 og S 3.1 op til en indsats med større grad af miljøvenlige tiltag.

Dette tolkes derhen, at konstruktioner så vidt muligt udskiftes med mere bløde tiltag, som i højere grad imødekommer æstetiske krav om naturligt samspil med omgivelserne. Dette fører til overvejelser om forskellige forhold, dels om det fysisk set vil være realistisk, dels om det inden for rimelige grænser vil være økonomisk forsvarligt. Selve fodringsindsatsen vil være identisk for S 2.1 og S 2.2 og deslige for S 3.1 og S 3.2, se afsnit 6.3.1.

Nedenfor gennemgås nødvendigt ressourceforbrug for de to scenarier S 2.2 og S 3.2 opdelt på hvert enkelt delelement af kystbeskyttelsesindsatsen. Ressourceforbruget på de aktuelle delstrækninger med konstruktioner vil i øvrigt være identisk for de to scenarier på grund af, at målsætningen på alle delstrækninger med konstruktioner er den samme i begge scenarier – ingen tilbagerykning.

### 6.2.1 Skråningsbeskyttelse

Skråningsbeskyttelse kan erstattes af klitter/diger i det omfang klitten/diget har den fornødne sikkerhed mod gennembrud. Skråningsbeskyttelsen skal i modsat fald erstattes af en forstærkning af klitten eller diget. Det skal i parentes bemærkes, at på alle strækninger med skråningsbeskyttelse er målsætningen nul tilbagerykning. Forstærkning af klitten/diget er kun et alternativ, såfremt der fysisk set er plads bag ved til udvidelsen.

Såfremt skråningsbeskyttelsen fjernes kræves en klit-/digebredde på 40 m målt over kote +5, se afsnit 5.3.3. Dette er opfyldt for de fleste strækninger med skråningsbeskyttelse, se bilag 3. Ved Strandgården skal diget forstærkes med godt 10 m bredde over en strækning på 850 m. Den nærmeste gård ligger ca. 40 m fra klitskrænten.

For følgende strækninger vil det ikke være muligt at erstatte skråningsbeskyttelsen på grund af for smal klit-/digebredde bag skråningsbeskyttelsen og manglende muligheder for landværts forstærkning af klitten eller diget:

- Thyborøn By – byen ligger umiddelbart op til diget
- Ndr. Thorsmindetange – landevejen ligger bag ved diget
- Thorsminde Havn – indsejlingen ligger bag ved skråningsbeskyttelsen
- Sdr. Thorsmindetange – landevejen ligger bag ved diget
- Fjand – sommerhusområde ligger umiddelbart bag ved diget
- Søndervig – sommerhus ligger forholdsvis tæt på skrænt.

### 6.2.2 Bølgebrydere

Bølgebrydere reducerer den naturlige erosion i profilet bag bølgebryderne. Derimod vil erosionen foran bølgebryderne fortsætte uændret. Det betyder, at en fjernelse af bølgebryderne vil øge behovet for kystfodring på den pågældende strækning. Overordnet set vil det dog ikke medføre øget fodringsbehov på Vestkysten, idet erosionen i givet fald vil blive tilsvarende mindre på den nedstrøms strækning, som ikke er beskyttet af bølgebrydere. Et sådant tiltag vil derfor være udgiftsneutralt.

En anden mulighed vil være at sænke bølgebryderne ved at fjerne det øverste dækstenslag. Dette er forsøgsvist udført på Ndr. Thorsmindetange. Forsøget er dog endnu ikke evalueret. Et argument for at bibeholde de eksisterende bølgebrydere er, at i tilfælde af fremtidige besparelser på kystbeskyttelsesindsatsen vil de ligge som et værn og reducere den naturlige erosion på den pågældende strækning.

### 6.2.3 Høfder

Ligesom bølgebrydere reducerer høfder den naturlige erosion i den del af profilet den afskærer. De lange havhøfder afskærer en stor del af den langsgående transport, som lægger sig på stranden og i kystprofilet mellem høfderne. De har dog samtidigt en skadelig effekt på den nedstrøms strækning, fordi de reducerer størrelsen af den normale kystnære del af sedimenttransporten.

Høfderne på Harboøre Tange og Agger Tange har stabiliseret tangernes udvikling. Det specielle ved disse høfdesystemer er imidlertid, at de forhindrer/sinker sedimenttilførslen til Thyborøn Kanal, hvorfra sedimentet føres videre til Nissum Bredning. Sediment, der transporteres gennem kanalen vil være tabt for kysten. Det specielle ved høfderne i de to systemer er derfor, at de på samme tid besidder høfdernes positive virkning og ikke skader de nedstrøms strækninger. Det vil derfor være uhensigtsmæssigt at fjerne høfderne på disse to strækninger.

En fjernelse af høfderne vil lede til større sedimenttab til kanalen og fjordgrundene og medføre øget fodringsindsats. For at opretholde målsætningen er fodringsindsatsen beregnet til at skulle øges med henholdsvis 200 % på Agger Tange og 130 % på Harboøre Tange, se bilag 5.

Høfderne ved Trans, Bovbjerg og ud for Ferring Sø har stabiliseret de respektive kyststrækninger. Udviklingen har siden høfdebyggeriet været stabil.

Ud for Ferring Sø bygger sikkerheden mod gennembrud kun på det minimale krav til sikkerhed. Landværts forstærkning af diget vil kun kunne foregå ved begyndende opfyldning af Ferring Sø. Det skønnes derfor ikke, at være anbefalelsesværdigt at fjerne høfderne på denne strækning.

Høfderne ud for Bovbjerg og Trans vil kunne erstattes af en større fodringsindsats på strækningen. Ud for Bovbjerg vil der være tale om påbegyndelse af fodring, medmindre man vil acceptere en større kysttilbagevækning.

Overordnet set vil det ikke medføre øget behov for kystfodring på Vestkysten, men det vil medføre omfordeling af fodringsindsatsen.

## 6.3 Øvrige scenarier

I afsnit 6.3 gennemgås nødvendigt ressourceforbrug for de enkelte scenarier S 1.2, S 2.1 og S 3.1 opdelt på hver enkelt delelement af kystbeskyttelsesindsatsen.

### 6.3.1 Fodring

Til en given målsætning om tilbagerykning på Vestkysten kan fodringsbehovet beregnes. Fodringsbehovet benævnes her  $N_0$ .

For et givet scenarie om klimaændring øges erosionen. For at opretholde samme målsætning skal effekten af klimaændringen derfor kompenseres med en tillægsmængde til fodringsindsatsen.

Forøgelsen af fodringsbehovet på grund af almindelig havspejlsstigning,  $\Delta v_{\text{generel}}$ , foregår efter en gradvist stigende kurve svarende til figur 3.3 hen over den pågældende periode. Denne forøgelse anvendes til fortsat opbygning (hævning) af kystprofilen. Beregningsmæssigt gøres den tilnærmelse, at havspejlsstigningen foregår efter en jævnt stigende kurve hen over hver af de to betragtede delperioder. Perioderne er 2005-2025 og 2025-2050. Beregningsforskriften er vist i bilag 1.

Fodringsbehovet forårsaget af øget vindpåvirkning og forøget stejthed medfører ligeledes en gradvis forøgelse af fodringsbehovet  $N_0$ . Forøgelsen af fodringsbehovet er beregnet for hvert af årene 2025 og 2050, se bilag 1.

I tabel 6.1 er de tre tillæg til fodringsbehovet angivet. Disse er uafhængige af den valgte målsætning for kysttilbagevirkningen. Mængder er angivet i fast mål (F).

Tabel 6.1 Tillæg til fodringsbehov

Årsag	År 2025	År 2050
Hævning af kystprofilen	191.000 m <sup>3</sup> (F)/år	356.000 m <sup>3</sup> (F)/år
Forøget bølgepåvirkning	+ 2,5 %	+ 5,1 %
Forøget profilhældning	+ 0,15 %	+ 0,5 %

Under forudsætning af, at bidragene fra forøget vindpåvirkning og profilhældning ligeledes forløber efter en jævnt stigende kurve indenfor hver af de to delperioder, kan den gennemsnitlige forøgelse af fodringsbehovet beregnes. Bidragene adderes til  $N_0$  med følgende resultat:

Tabel 6.2 Fodringsbehov

Scenarier	Nuv. aftaleperiode mio. m <sup>3</sup> (F)/år	2005-2025		2025-2050	
		mio. m <sup>3</sup> (F)/år	%	mio. m <sup>3</sup> (F)/år	%
Nuværende målsætning*	2,29	2,51	+ 9,7	2,74	+ 19,7
Målsætning S 2..	2,50	2,72	+ 9,0	2,96	+ 18,4
Målsætning S 3..	3,21	3,44	+ 7,3	3,70	+ 15,2

\* Målsætning for tilbagevirkning for Søndervig-delstrækning ændret fra 0,7 ml/år til 0 ml/år i 2005.

Forøgelsen i fodringsbehovet grundet klimaændringen er angivet.

Det følger af definitionen, at der ikke udføres fodring i scenariet S 1.2.

### 6.3.2 Klitter uden skråningsbeskyttelse

#### S 1.2 Målsætning om naturlig udvikling

Frem til 2025 skal der ske landværts forstærkning af klitter og diger på stort set hele den nordlige del af Vestkysten ned til Thorsminde By. På den sydlige del af Vestkysten er billedet mere broget.

Frem til 2050 forstærkes ovennævnte tendens med nødvendig forstærkning af klitter og diger. Nu vil også størstedelen af den sydlige del af Vestkysten skulle forstærkes.

Specielt vil sommerhuse i de sommerhusområder, som ligger nær yderste klitrække, skulle opgives for at give plads til forstærkningen.



### 5.2.1 Målsætning om bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau

Frem til 2025 bør der ske landværts forstærkning af klitter og diger i nogle delområder, her Ndr. Thorsmindetange (L5170), ved Krogen (L5470), ved Søndervig (L5490) og ved Klegod (L5550). Yderligere frem til 2050 skal der ske forstærkning af klitter og diger ved Ndr. Thorsmindetange (L5180 og L5190) samt Husby Klit (L5370).

Tabel 6.3 Klit-/digebredde

Strækning	Linje nr.	Længde	Klitbredde i 2005	Manglende klitbredde i 2025	Manglende klitbredde i 2050
		m	m	m	m
Ndr. Thorsm. tange	5170	621	49	11	36
	5180	700	60	0	25
	5190	681	61	-	24
Husby Klit	5370	1.000	98	-	11
Krogen	5470	970	39	1	1
Søndervig	5490	1.031	25	15	15
Klegod	5550	973	41	18	42

Den overordnede sikkerhed er dog tilstede i alle linjer, idet der enten ligger en tilbagetrukket klit eller et dige bagved. Ud fra det synspunkt vil det ikke være nødvendigt at udføre forstærkningen.

### 5.3.1 Målsætning om standsning af tilbagerykning

Klitten i L5470 og 5490 bør forstærkes. Som før nævnt er den overordnede sikkerhed dog tilstede. Ud fra det synspunkt vil det ikke være nødvendigt at udføre forstærkningen.

Bortset herfra vil det ikke være nødvendigt med forstærkning af klitter eller diger hverken frem til 2025 eller 2050.

### 6.3.3 Klit/diger med skråningsbeskyttelse

Skråningsbeskyttelsen på visse strækninger skal forstærkes for at forhindre underskæring og for at leve op til kravene om intet overskyl og kun acceptabelt overløb. Underskæring foran foden er beregnet ved hjælp af tilbagerykningshastighed og profilhældning fra det tidspunkt kystprofilen umiddelbart foran konstruktionen ligger i kote ÷ 1,0 (skråningsbeskyttelsen ved Thyborøn By dog kote +0,5). Overskyls- og overløbsberegninger er foretaget med ændringer af højden på skråningsbeskyttelsen ved at hæve kronen med en eller flere rækker blokke.

Såfremt den beregnede underskæring er større end ½ m skønnes det ikke længere formålstjenligt at fortsætte med forstærkning af foden. Større dybder foran konstruktionen vil medføre fornyede krav om forhøjelse af skråningsbeskyttelsen og tilsvarende forstærkning af diget. I stedet er angivet, at skråningsbeskyttelsen opgives. Sidstnævnte alternativ medfører, at skråningsbeskyttelsen flyttes ind i en mere landværts placering, som tilpasses de ændrede dybdeforhold. Dette skal eventuelt følges op med en opfyldning/forstærkning af det bagvedliggende terræn afhængigt af de givne naturforhold.

Nedenfor redegøres for indsatsen i de forskellige scenarier. Beregningerne er specificerede i bilag 3.

### S 1.2 Målsætning om naturlig udvikling

I tabel 6.4 er anført hvorvidt skråningsbeskyttelse og dige forstærkes eller flyttes landværts til ny position.

Det ligger ikke i undersøgelsens opdrag at forholde sig til de fysiske og økonomiske konsekvenser en landværts flytning af højvandsbeskyttelsen vil betyde for omgivelserne.

Tabel 6.4 Forstærkning og flytning af skråningsbeskyttelse og dige

Lokalitet	Længde m	Forhøjelse af skråningsbeskyttelse og dige		Forstærkning af fodsikring		Landværts flytning af skråningsbeskyttelse og dige	
		inden år 2025	inden år 2050	inden år 2025	inden år 2050	inden år 2025	inden år 2050
Nord f. hfd 96	510					ja	
Flade Sø	1890						ja
Agger By	750	-	ja		ja		
Thyborøn	2070						ja
Vrist	4040	-	ja	-	ja		
Ferring Sø (1)	1680						ja
Ferring Sø (2)	750					ja	
Fjaltring	1200						ja
Mærsk	1280	-	ja		ja		
Ndr. Thorsm.tange	3680	-	ja	-	ja		
Thorsm. By	860						
Sdr. Thorsm.tange	4010						ja
Fjand	710						ja
Strandgården	1450	-	ja				
Søndervig (1)	230						ja
Søndervig (2)	410						ja

Inden år 2025 flyttes skråningsbeskyttelse og dige nord for hfd. 96 og ved Ferring Sø (1).

Inden år 2050 forhøjes skråningsbeskyttelse og bagvedliggende dige ud for Agger By, ved Vrist, ved Mærsk, på Ndr. Thorsmindetange og ved Strandgården forhøjes. Endvidere forstærkes skråningsbeskyttelsens fodsikring på de fleste af de samme strækninger. På de øvrige strækninger med skråningsbeskyttelse flyttes denne og diget ind i en mere landværts position.

### S 2.1 Målsætning om bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau

Det vil ikke være nødvendigt med forstærkning af skråningsbeskyttelsen hverken frem til 2025 eller 2050.

### S 3.1 Målsætning om standsning af tilbagerykning

Det vil ikke være nødvendigt med forstærkning af skråningsbeskyttelsen hverken frem til 2025 eller 2050.

## 6.3.4 Bølgebrydere

I takt med indrykningen af det indre kystprofil bliver bølgebrydere undterskåret. Der kompenseres for erosionen ved udlægning af sten i foden af konstruktionerne.

Smertetærsklen for fortsat vedligeholdelse af bølgebryderne skønnes at ligge på et niveau, hvor det vil være billigere, at flytte konstruktionen til en mere landværts position. Under forudsætning af, at 50 % af brudstenene i en eksisterende bølgebrydere kan indvindes og genanvendes i en ny bølgebryder er anlægsprisen for flytning af en bølgebryder beregnet til 310.000 kr. Forstærkning af fodsikringen er beregnet til 490 kr/m<sup>3</sup>. Smertetærsklen ligger derfor ved forstærkning af fodsikringen med 630 m<sup>3</sup> brudsten.

Nedenfor redegøres for indsatsen i de forskellige scenarier. Beregningerne er specificerede i bilag 4.

## S 1.2 Målsætning om naturlig udvikling

Tabel 6.5 Nødvendig forstærkning/flytning

Bølgebrydergruppe	Antal	Inden 2025			Inden 2050	
		Underskæring	Forstærkning	Flytning	Underskæring	Flytning
	stk	m			m	
Vrist	11	2,2	-	ja	7,4	ja
Fjaltring	7	2,8	-	ja	6,8	ja
Mærsk	7	0,7	ja	-	4,2	ja
Ndr. Thorsmindetange	16	÷0,4	-	-	2,2	ja
Thorsminde By	8	3,2	-	ja	6,1	ja
Fjand	6	0,7	ja	-	1,8	ja
Strandgården	15	1,3	ja	-	6,0	ja
Årgab	17	0,7	ja	-	3,5	ja

Inden 2025 forstærkes foden i bølgebrydergrupperne ved Mærsk, Fjand, Strandgården og Årgab. Bølgebryderne ved Vrist, Fjaltring og Thorsminde By opgives og flyttes til en mere landværts placering.

Inden 2050 opgives alle bølgebrydergrupperne og flyttes til en mere landværts placering.

Det bør overvejes, om det vil være hensigtsmæssigt at flytte bølgebrydergrupperne efterhånden som underskæringen udgør en trussel for konstruktionernes stabilitet i stedet for indledningsvis at forstærke fodsikringen inden flytningen i løbet af en årrække alligevel nødvendigvis må finde sted.

De fysiske og økonomiske konsekvenser for baglandet af en landværts flytning betragtes ikke som en del af opdraget i nærværende undersøgelse.

### S 2.1 Målsætning om bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau

Det vil ikke være nødvendigt med forstærkning af eller flytning af bølgebrydere hverken frem til 2025 eller 2050.

### S 3.1 Målsætning om standsning af tilbagerykning

Det vil ikke være nødvendigt med forstærkning af eller flytning af bølgebrydere hverken frem til 2025 eller 2050.

### 6.3.5 Høfder

I takt med indrykningen af kystprofilen bliver høfderne dels underskåret og dels bagskåret. Landenderne forlænges bagud til kontakt med dige eller skrænt. Der kompenseres for erosionen ved udlægning af sten langs høfdeskafterne. Sødelen afkortes i takt med forlængelsen af landenden, således at høfderne bevarer deres længde. Det bliver derfor ikke nødvendigt med forstærkning af høfdeenderne.

Nedenfor redegøres for indsatsen i de forskellige scenarier. Beregningerne er specificerede i bilag 5.

#### S 1.2 Målsætning om naturlig udvikling

Der fyldes op med sten og blokke som kompensation for nedskæring langs høfderne og ligeledes forlænges høfderne bagud på stranden ind til diget eller skrænten for at hindre bagskæring.

Tabel 6.6 Opfyldning langs høfdeskafter

Strækning	Høfdeantal	Gns. længde	Nedskæring inden 2025	Nedskæring inden 2050
	stk	m	m	m
Agger Tange	33	200	1,5	3,4
Harboøre Tange	33	200	1,2	2,8
Bovbjerg I	9	60	2,9	6,5
Bovbjerg II	12	120	2,9	6,5
Bovbjerg III	6	150	2,9	6,5

Det forudsættes, at det eksisterende dæklag ikke skal forstærkes på grund af de øgede dybder, som nedskæringen forårsager.

Den landværts forlængelse af høfder svarer til størrelsen af bagskæring, se tabel 6.7.

Tabel 6.7 Landværts forlængelse af landende

Strækning	Høfdeantal	Bagskæring inden 2025	Bagskæring inden 2050
	stk	m	m
Agger Tange	33	45	103
Harboøre Tange	33	45	105
Bovbjerg	27	44	100

#### S 2.1 Målsætning om bevarelse af nuværende sikkerhedsniveau

Det vil ikke være nødvendigt med forstærkning af høfdeskafterne mod underskæring hverken frem til 2025 eller 2050. Den beskedne nedskæring i nogle høfder opfanges formentlig af bufferlaget i bunden af høfderne

På Bovbjerg II-strækningen påregnes en landværts forlængelse af høfdeskaftet til forhindring af bagskæring på 6 og 13 m frem til henholdsvis år 2025 og år 2050.

#### S3.1 Målsætning om standsning af tilbagerykning

Det vil ikke være nødvendigt med forstærkning eller forlængelse af høfderne hverken frem til 2025 eller 2050.

## De vestjyske fjorde

### 7.1 Generelt

De to store vestjyske fjorde – Nissum fjord og Ringkøbing Fjord – er recipienter for afvandingen af oplandsarealer vest for istidens hovedtilstandslinje. Afvandingsområderne er vist på figur 7.1. De udgør henholdsvis 1.600 og 3.500 km<sup>2</sup>.



Figur 7.1 Afvandingsområder

Vandstandsvariationen i fjordene er bestemt dels af tilstrømningen fra de forskellige å-udløb og dels af kapaciteten af afvandingssluser i henholdsvis Thorsminde og Hvide Sande. Der er nedsat sluseudvalg med kompetence til at fastlægge retningslinjer for sluseoperationerne. I sluseudvalgene fastlægges slusepraksis ud fra de forskellige miljømæssige og økonomiske interesser. Slusepraksis er en instruks for slusebetjeningen, således at de fysiske forhold i fjordene så vidt muligt overholder fastsatte grænser med henblik på saltholdighed og vandstands niveau. Længerevarende højvande i havet kan dog forhindre udstrømning af fjordvandet.

Nuværende slusepraksis for vandstands niveauet i fjordene er gengivet i bilag 6.

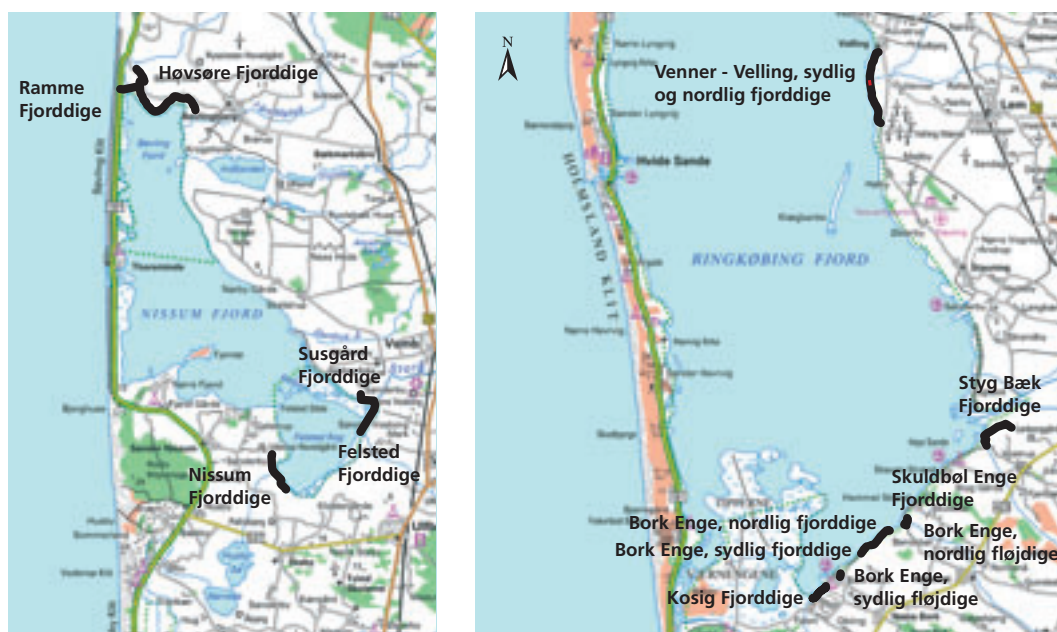
## 7.2 Problematik

De forventede klimaændringer rejser problematikken dels omkring det fremtidige vandstands niveau i fjordene og dels omkring sikkerheden af digerne rundt om fjordene.

En højere vandstand i havet vil medføre færre og kortere perioder, hvor fjordvandet kan ledes ud i havet. Problematikken forstærkes af, at der i perioder forventes mere intensiv nedbør, hvilket medfører større tilstrømning fra oplandet.

Digesikkerheden forringes såfremt vandstanden i fjordene stiger. Øget vindpåvirkning vil deslige medføre øget vindstuvning ved pålandskysterne.

De aktuelle fjorddiger er vist på figur 7.2.



Figur 7.2 Fjorddiger ved Nissum og Ringkøbing fjorde (efter ref. 18 og 19)

## 7.3 Prognoser

Den fremtidige vandstand i fjordene vil være afhængig af følgende påvirkninger afledt af klimaændringerne:

- Havspejlsstigning
- Større afstrømning fra vandløb
- Flere og hyppigere storme

De to sidstnævnte punkter vil kun periodevis have betydning for vandstanden i fjordene.

I dette afsnit belyses 100 års scenariet frem til 2100. Værdierne er givet i tabel 7.1.

Tabel 7.1 Klimaændringer A2-scenarie

	År 2100
Havspejlsstigning	33 cm
Større afstrømning	10 %
Større vindstyrke	5 %

## 7.4 Ny slusepraksis

Nærværende undersøges to forskellige principper for fremtidig slusepraksis i år 2100.

I det første scenarie lades vandstanden i fjordene stige i samme takt som niveauet i havet. Det betyder, at middelvandstanden i fjordene vil være 33 cm højere i år 2100 end i dag. Alt andet lige medfører dette, at perioderne med mulig åbning af sluserne vil være de samme som før, hvilket f.eks. betyder, at det nuværende niveau for saltholdighed kan bevares. Til gengæld stiger vandstanden i fjordene med de ulemper, dette måtte have for de erhverv, som drives i tilknytning til fjordene. Derudover sker en forringelse af digernes sikkerhed.

I det andet scenarie forsøges det, at holde vandstanden i fjordene så tæt på det nuværende niveau som muligt. I perioder med stor ferskvandstilstrømning til fjordene og manglende mulighed for afvanding af disse vil dette naturligvis ikke kunne lade sig gøre.

## 7.5 Øget påvirkning

### 7.5.1 Datagrundlag

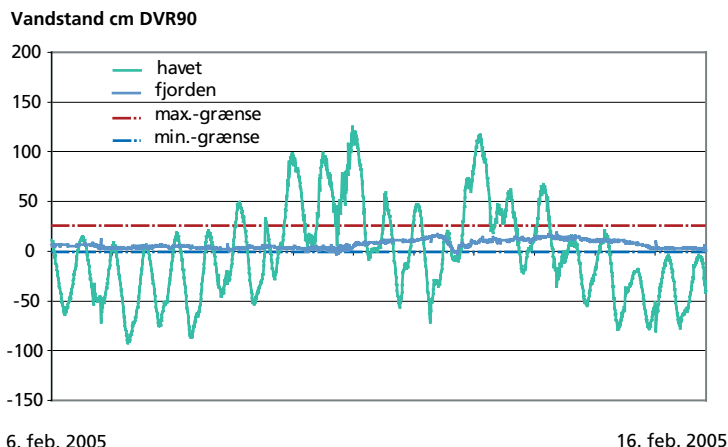
Grundlaget for beregning af forøgelsen af påvirkningerne er data over de historiske vandstandsforhold i fjordene.

Begge fjorde er repræsenteret ved hver tre vandstandsstationer, som er placeret jævnt fordelt langs fjordenes periferi, se figur 7.3.



Figur 7.3 Vandstandsstationer i fjordene

Instruksen for betjening af sluserne betyder, at fjordvandet skal lukkes ud, såfremt det overstiger max.-grænsen og dette i øvrigt er muligt af hensyn til den øjeblikkelige vandstand i havet og øvrige hensyn som f.eks. besejling af havnen. På figur 7.4 er en tidsserie over vandstandene i Ringkøbing fjord samt vandstanden i havet illustreret.



Figur 7.4 Vandstandsvariationer samt angivelse af min. og max.-grænser for vandstanden i Ringkøbing Fjord

Såfremt slusen i en periode er lukket vil vandstanden i fjorden stige. Dette er udtryk for den tilførte mængde fra afvandingen af oplandet.

Forskellen mellem det øjeblikkelige vandstands niveau mellem de tre stationer i fjordene er udtryk for hældning af vandspejlet. I tilfælde af ekstrem situationer, hvor vindpåvirkningen er kraftig, kan differensen mellem vandstande ved den aktuelle vandstandsstation og den øjeblikkelige udjævnede vandstand i fjorden udtrykt som middel af de tre vandstandsstationer tages som udtryk for vindens stuvning af vandspejlet.

### 7.5.2 Højvandsstatistikker

Til belysning af påvirkningerne tages udgangspunkt i vandstandsstatistikkerne. De historiske vandstandsdata, som danner grundlag for højvandsstatistikkerne, er i høj grad afhængig af den førte betjeningspraksis af sluserne og af vandstandsforholdene i havet. Såfremt det ikke har været muligt at lukke vand ud, har vandstanden i fjorden måske været ekstraordinær høj inden en given ekstrem vindsituation er indtruffet.

Det er her valgt, at definere uafhængige højvandssituationer som situationer adskilt af en periode, hvor vandstanden har ligget inden for det vandstandsinterval, instruksen påbyder. Det er gjort for at undgå, at to nabo-peaks på en given vandstandstidsserie ikke blot er udtryk for at vandstanden generelt har været høj i fjorden.

Med denne tilgang til højvandsstatistikkerne og i øvrigt for at inkludere januar 2005-orkanen i statistikken er der udarbejdet nye højvandsstatistikker for de seks fjordvandstandsstationer. De er udarbejdet med grundlag i ekstremdata fra perioden siden 1980. Det har ikke været muligt at indhente oplysninger om slusepraksis før dette årstal.



I datagrundlaget for de nye, højvandsstatistikker gældende for året 2100 er der inkluderet beregnede, fremtidige tillæg for de tre bidrag fra klimaændringer anført i afsnit 7.3. I tabel 7.2 er 40 års MT-vandstanden for fire af stationerne angivet.

Tabel 7.2 40 års MT-vandstande i fjordene (angivet i m)

	Vandstandsstation	År 2005	Fremskrivning af statistik til år 2100	
			Almindelig vandspejlsstigning i fjordene	
			+ 0 cm	+ 33 cm
Nissum Fjord	Skovlund	1,18	1,31	1,64
	Kloster	1,33	1,45	1,78
Ringkøbing Fjord	Ringkøbing	1,09	1,19	1,52
	Bork	1,29	1,41	1,74

I den nordlige ende af Nissum Fjord – også kaldet Bøvling Fjord – benyttes statistikken i Skovlund. I Feldsted Kog benyttes statistikken for Kloster.

I den nordlige del af Ringkøbing Fjord benyttes statistikken for Ringkøbing, medens der i den sydlige del af fjorden benyttes et vægtet gennemsnit af Ringkøbing og Bork-statistikkerne. Årsagen til sidstnævnte procedure er, at stationen i Kloster ligger i bunden af en vig og derfor i sig selv næppe er repræsentativ for de åbne kyststrækninger.

### 7.5.3 Bølgepåvirkning

Da der ikke findes bølgeregistreringer for fjordene er bølgepåvirkningen beregnet ved forecasting ud fra forudsætninger om vindstyrke, frit stræk og vanddybder, se bilag 6. Frit stræk og vanddybder er fundet ud fra bathymetriske kort over fjorden.

### 7.5.4 Scenarier for fremtidigt vandspejlsniveau i fjordene

Vandspejlsniveauet i fjordene er bestemt af afstrømning fra oplandet og af sluseoperationerne. Kapaciteten af sluserne er samtidigt afhængig af differensvandstandsforholdene mellem fjordene og havet.

Den relative ændring af vandspejlsniveauet i fjordene sammenholdt med ændringen af havspejlsniveauet har betydning for sluseoperationerne og dermed for saltholdigheden i fjordene.

Omvendt har det absolutte vandspejlsniveau i fjordene betydning for digesikkerheden og ligeledes for nedbrydningen af kysten langs fjordene.

For at fremstille spændvidden i tilstræbt målsætning om fremtidigt vandspejl i fjordene, er det valgt at arbejde videre med to scenarier for vandspejlstigningen i fjordene frem til år 2100.

- Samme vandstandsstigning i fjordene som i havet, altså 33 cm vandspejlsstigning
- Bibeholdelse af nuværende vandspejl i fjordene bestemt af vandstandsgrænser i slusepraksis

Den første er identisk med forudsigelsen på ændringen i havspejlets niveau. Herved kan slusepraksis bibeholdes med hævede vandstandsgrænser. Fordelen er, at betingelserne for vandudskiftning med henblik på saltholdigheden i fjordene kan bibeholdes. Til gengæld kommer digerne under større pres.

Det andet scenarie er fastholdelse af nuværende vandstandsgrænser i fjordene.

Til vurdering af muligheden for opretholdelse af givet vandstands niveau i fjorden sammenholdes middel vinterafstrømning fra oplandet og den teoretisk beregnede slusekapacitet i forhold til forudsætninger om vandstands niveauet i havet og i fjorden, se bilag 6.

### *Nissum Fjord*

Det vurderes, at være urealistisk, at fastholde en mindre vandspejlsstigning i fjorden end prognosen for havspejlsstigningen. Allerede i dag med de nuværende forhold findes flere perioder, hvor det på grund af højere vandstand i havet ikke er muligt at lede vand ud fra fjorden.

Den eneste realistiske mulighed med den nuværende sluse anses at være samme vandstandsstigning i fjorden som i havet, altså 33 cm frem til år 2100.

### *Ringkøbing Fjord*

Det vurderes, at slusen i Hvide Sande har kapacitet til at opretholde det nuværende vandspejl i fjorden uanset, at havet stiger 33 cm.

Vurderingerne bygger alene på teoretiske beregninger af udløbskapaciteten af sluserne under de givne vandstandsforskelle mellem havet og fjordene. Der er her ikke taget stilling til praktiske hensyn som eventuel lukning af sluserne i forbindelse med besejling eller øvrige operationer i yderhavnen eller til stabiliteten af sluseværkerne ved større gennemstrømning, hvilket kunne være en mulighed i Hvide Sande.

Beregningerne, der fører til disse konklusioner, er vist i bilag 6.

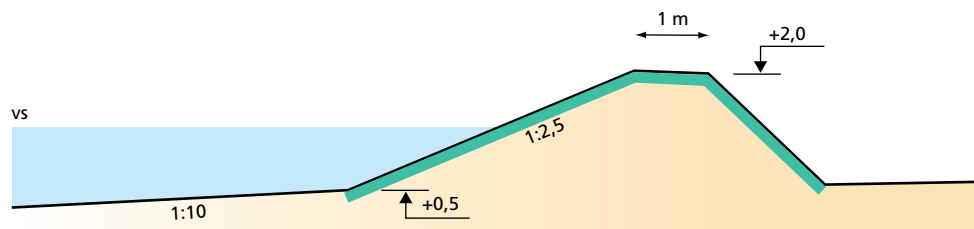
Årsagen til forskellen i forudsigelserne for de to fjordområder er den, at kapaciteten af sluserne i Thorsminde og Hvide Sande er vidt forskellige i forhold til de oplande, de afvander. Forholdet mellem slusekapacitet og oplandsareal er 2,5 gange større for Hvide Sande som for Thorsminde.

## **7.6 Forstærkning af diger**

Digerne omkring Nissum Fjord skal forhøjes til modvirkning af almindelig vandspejlsstigning og forøget vindpåvirkning. Digerne omkring Ringkøbing Fjord skal også forhøjes men kun på grund af sidstnævnte årsag.

Den beregnede digeforhøjelse sker med det formål at bevare det aktuelle sikkerhedsniveau af det pågældende dige – uanset hvad den aktuelle sikkerhed måtte være.

De bestemmende gennemsnitsparametre for digerne omkring Nissum og Ringkøbing fjorde er rimeligt ensartede. Som repræsentativt digetværsnit benyttes derfor et standardtværsnit, se figur 7.5.



Figur 7.5 Standard digetværsnit

Beregningsforskriften er gengivet i afsnit 8.7.2. Grundet forskelle i de hydrauliske belastninger udføres der særskilt beregninger for Bøvling Fjord med Ramme og Høvsøre fjorddiger, for Fjeldsted Kog med Susgård, Felsted samt Nissum fjorddiger. Endvidere for Venner-Velling dige i nordlig del af Ringkøbing Fjord samt øvrige fjorddiger i sydlig del af fjorden.

De beregnede, nødvendige digeforhøjelser for fastholdelse af nuværende sikkerhed af digerne er anført i tabel 7.3. Desuden er angivet digeforhøjelse for 33 cm vandspejlstigning i Ringkøbing Fjord, såfremt andre hensyn måtte tilsige dette.

Tabel 7.3 Digeforhøjelse grundet klimaændringer frem til år 2100

Fjord	Fjordområde	Vandspejlsstigning	
		0 cm	33 cm
Nissum Fjord	Bøvling Fjord	-	66
	Fjeldsted Kog	-	64
Ringkøbing Fjord	Nordlig del	32	64
	Sydlig del	42	75

Det vurderes, at det ikke vil være nødvendigt med yderligere tiltag i form af forstærkning af for- og bagskråning.

# Indre Kyster

## 8.1 Generelt

Problematikken omkring den fremtidige kystudvikling på indre kyster og de konsekvenser, det medfører for kystbeskyttelsen, belyses, og der opstilles et overordnet økonomisk budget for tilpasning til den forventede udvikling.

Modsat Vestkysten gælder det for de øvrige danske kyster, at initiativet til etablering og vedligeholdelse af kystbeskyttelse er de enkelte grundejeres eller kystbeskyttelseslags ansvar. Beslutning om eventuel tilpasning af kystbeskyttelsen på de indre kyster som følge af mulige klimaændringer er derfor også de enkelte grundejeres eller lags ansvar.

Indre Kyster er defineret som de danske kyster indenfor Grenen. Det drejer sig i sammenlagt ifølge ref.20 om 6.500 km kyststrækning.

Gennemgangen holdes på et overordnet niveau, hvor gennemsnitsbetragtninger vil blive lagt til grund for vurderingerne. Det skyldes, at der dels er tale et meget stort område med forskelle i morfologisk opbygning og hydraulisk påvirkning og dels manglende information om de enkelte konstruktioners opbygning og kvalitet.

De fremtidige forhold i 2025, 2050 og 2100 vurderes.

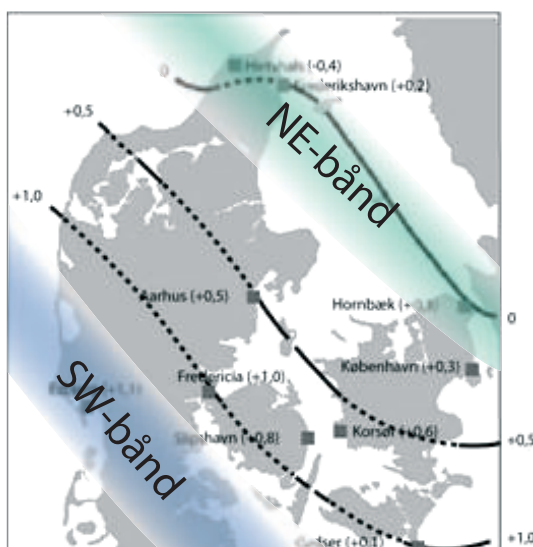
## 8.2 Prognoser

Prognoser for den globale vandspejlsstigning er tidligere gengivet i afsnit 3.7.

### 8.2.1 Generel havspejlsstigning

For de lokale 100 års vandstandsprognoser er de lokale isostatiske forhold taget i regning ved hjælp af angivelser for den historiske relative havspejlsstigning gennem det seneste hundrede år, figur 8.1. Den isostatiske

bevægelse er taget forholdsmæssig i regning for prognoserne frem til 2025 og 2050.



Figur 8.1 Relativ havspejlsstigning 1890-1989 (mm/år). Isolinjer forsøgsvis indlagt (ref.8). Der er indlagt to geografiske bånd, som hver for sig afspejler ekstremerne mht. vandstandsudviklingen i danske farvande.

I forhold til den historiske relative havspejlsstigning tipper landet omkring en NV-SE akse. Lokaliteten har derfor betydning for havspejlsstigningen. For at belyse dette forhold er vandstandsprognoserne i tabel 8.1 angivet dels for et SW-bånd, hvor den største havspejlsstigning kan forventes og for et NE-bånd, hvor tilsvarende den mindste havspejlsstigning kan ventes.

Tabel 8.1 Lokal havspejlsstigning i forhold til 2005

Havspejlsstigning angivet i cm Det lokale bidrag til den globale vandspejlsstigning angivet i parentes	Scenarier	
	A2	B2
Havspejl 2100, SW-bånd (±15+11)	+ 35	+ 29
Havspejl 2100, NE-bånd (±15+0)	+ 24	+ 18
Havspejl 2050, SW-bånd 0,5•(±15+11)	+ 11	+ 11
Havspejl 2050, NE-bånd 0,5•(±15+0)	+ 6	+ 6
Havspejl 2025, SW-bånd 0,25•(±15+11)	+ 3	+ 3
Havspejl 2025, NE-bånd 0,25•(±15+0)	0	0

De angivne størrelser er beregnet som den samlede havspejlsstigning

Specielt i år 2100 vil forskellen være mærkbar.

Som i afsnit 5 og 6 med vestkystforhold arbejdes der kun videre med scenarie A2. For en gennemsnitsbetragtning vælges værdier, som ligger i den centrale del af landet i forhold til de to bånd, der afspejler hver sit udgangspunkt til den forventede udvikling grundet klimaændringer.

Tabel 8.2 Lokal havspejlsstigning i forhold til 2005

Havspejlsstigning angivet i cm	Scenarie
	A2
Havspejl i 2100, gns. (±15+5)	+ 29
Havspejl i 2050, gns. 0,5•(±15+5)	+ 8
Havspejl i 2025, gns. 0,25•(±15+5)	+ 2

## 8.2.2 Øvrige klimaeffekter

Udover havspejlsstigningen forventes kraftigere vindpåvirkning og hyppigere storme. Dette vil resultere i mere vindstuvning (surge) og større bølger.

Prognosen for indre kyster beregnet i STOWASUS-projektet vurderes at være for lavt sat, se afsnit 3.6. I stedet tages udgangspunkt i en antagelse om 10 cm forøgelse af 50 års MT-højvande i år 2100.

Tabel 8.3 Forøgelse af 50 års MT-højvande i forhold til 2005

Stuvning angivet i cm	Scenarie A2
År 2100	+ 10
År 2050	+ 4
År 2025	+ 1

Ifølge STOWASUS (ref. 10) forventes middel signifikant bølgehøjde i Nord-søen at vokse med ca. 5 %. Da det danske område i relation til en vind-meteorologisk målestok er forholdsvis lille antages det, at ændringen i indre farvande følger samme tendens. Det forudsættes, at bølgeperioden ligeledes øges med et tillæg på 5 % i år 2100.

Tabel 8.4 Større bølgehøjde og -periode i forhold til 2005

	Scenarie A2
År 2100	+ 5 %
År 2050	+ 2 %
År 2025	+ 1 %

## 8.3 Kysten

### 8.3.1 Kysttyper

I sagens natur er påvirkningen på de forskellige kyststrækninger i indre farvande vidt forskellig. De geologiske forudsætninger er også uensartede, hvorfor kystens respons – her i form af kystens udvikling, vil være forskellig. Da tilbagerykningen på de enkelte strækninger ikke er kendte størrelser arbejdes der i stedet med en typeopdeling af de indre kyster. I navngivningen af typerne er der lagt vægt på påvirkningerne udefra, men hvor den geologiske modstandsdygtighed også spiller en væsentlig rolle.

De åbne kyststrækninger – her inkluderet Limfjorden og Isefjorden – inddeles i tre typer:

- Eksponeret kyst
- Moderat eksponeret kyst
- Beskyttet kyst

Der ligger ingen præcise, objektive kriterier til grund for vurderingen. Vurderingen bygger på en kombination af kystlinjens og de nære dybdekurvers regelmæssighed, dybdeforholdene i den nære kystzone bl.a. med hensyntagen til eventuelt foranliggende lavvandede grunde, frit stræk, kystlinjens orientering eventuelt suppleret med kendskab til de pågældende kyststrækninger. Typeinddelingen er vist på tegn.nr. 8.1-8.4.

Derudover er der en type kyst, som ligger ved mindre farvande, som kan bestå af smalle vige, fjorde og laguner. Af håndteringsmæssige årsager behandles denne type sammen med kategorien "Beskyttet kyst".

Længderne af "Eksponeret kyst" og "Moderat eksponeret kyst" måles i MapInfo. Den samlede længde af de øvrige kyststrækninger bestemmes som differensen mellem den totale længde på indre kyster og summen af de to første typer. Den totale længde af indre kyster, dog excl. havneområder og ubeboede øer er i ref.20 opgivet til 5.883 km.

Tabel 8.5 Samlet længde af tre kysttyper

Kysttype	Samlet længde km
Eksponeret kyst	627
Moderat eksponeret kyst	1.035
Beskyttet kyst	4.221

### 8.3.2 Profilhældning

Der findes ikke mange profilmålinger af kysten i indre farvande. Derfor anvendes dybdekurver fra KMS's kort. Dybdekurvers beliggenhed i forhold til kystlinjen er ideelt set bestemt af den indkommende bølgeenergi, men også af de geologiske forhold. Derfor skal "støjen" fra de geologiske forhold elimineres.

Det forudsættes, at større bølgeenergi betyder fladere ligevægtsprofil og omvendt.

Der findes typiske hældninger i kystprofilet mellem kote +2 og ÷4, hvor hældningen af selve den tørre del af stranden sættes til 1:10.

Tabel 8.6 Profilhældning  $\tan\beta$  mellem kote +2 og ÷4

Kysttype	Profilhældning $\tan\beta$
Eksponeret kyst	1:40
Moderat eksponeret kyst	1:25
Beskyttet kyst	1:15

## 8.4 Kysttilbagerykning

Bidraget til kysttilbagerykningen forårsaget af klimaeffekten skyldes almindelig havspejlsstigning og større bølgepåvirkning. Det sidste grundet flere og kraftigere vindsituationer. Tilbagerykningen på grund af forøget profilhældning udgør kun et forsvindende lille bidrag i forhold til de øvrige bidrag – se i øvrigt vestkystforhold i afsnit 5.3.1. Derfor udelades sidstnævnte bidrag.

Bidraget fra den almindelige havspejlsstigning afhænger af profilhældningen. Den beregnes som  $\Delta v_s / \tan\beta$ , hvor  $\Delta v_s$  er vandspejlsstigningen og  $\tan\beta$  er hældningen.

Tabel 8.7 Tilbagerykning grundet almindelig havspejlsstigning

Periode	Kysttype		
	Eksponeret m	Moderat m	Beskyttet m
2005-2025	0,60	0,38	0,23
2025-2050	2,80	1,75	1,05
2050-2100	8,40	5,25	3,15
<b>2005-2100</b>	<b>11,80</b>	<b>7,38</b>	<b>4,43</b>

Bidraget fra større bølgepåvirkning er et tillæg til den gennemsnitlige naturlige tilbagerykning på kysten. Den langsgående transport stiger med større signifikant bølgehøjde. Tilbagerykningen er ligefrem proportional med langstransporten.

$Q = k \cdot H_s^{5/2} \Rightarrow \Delta Q = (1 + \Delta H_s)^{2,5} \div 1$ , hvor  $Q$  er langstransporten,  $H_s$  er signifikant bølgehøjde og  $k$  er en konstant.

Med forudsætning om nuværende gennemsnitlig årlig tilbagerykning beregnes tillægget i de kommende perioder, se tabel 8.8.

Tabel 8.8 Forøget tilbagerykningshastighed grundet større bølger

Årstal	$\Delta Q$	Kysttype		
		Eksponeret m/år	Moderat m/år	Beskyttet m/år
År 2025	2,5%	0,01	0,01	0,00
År 2050	5,1%	0,02	0,01	0,01
År 2100	13,0%	0,05	0,03	0,01

Den gennemsnitlige naturlige kysttilbagerykningshastighed på de tre kysttyper er skønnet til at være 0,40 m/år på Eksponeret kyst, 0,25 m/år på Moderat eksponeret kyst og 0,10 m/år på Beskyttet kyst.

I beregningsværdierne i tabel 8.9 forudsættes det, at havspejlsstigningen forløber lineært inden for hver delperiode.

Tabel 8.9 Forøget tilbagerykning grundet større bølger

Periode	Kysttype		
	Eksponeret m	Moderat m	Beskyttet m
2005-2025	0,10	0,06	0,03
2025-2050	0,38	0,24	0,09
2050-2100	1,80	1,13	0,45
<b>2005-2100</b>	<b>2,29</b>	<b>1,43</b>	<b>0,57</b>

Det er værd at holde sig for øje, at ovennævnte værdier naturligvis kun er gennemsnitsværdier. Som i den nuværende situation dækker dette over store variationer, hvor der findes erosion på visse kyststrækninger og aflejring på nabostrækninger afhængig af de fysiske forhold.

De to bidrag til tilbagerykning fra henholdsvis almindelig vandstandsstigning og større bølger adderes.



Tabel 8.10 Tilbagerykning grundet klimaændringer

Periode	Kysttype		
	Eksponeret m	Moderat m	Beskyttet m
2005-2025	0,7	0,4	0,3
2025-2050	3,2	2,0	1,1
2050-2100	10,2	6,4	3,6
<b>2005-2100</b>	<b>14,1</b>	<b>8,8</b>	<b>5,0</b>

## 8.5 Arealtab

Den beregnede tilbagerykning i afsnit 8.4 vil bevirke et tilsvarende tab af land. Størrelsen afhænger af tilbagerykningen for de tre kysttyper og de tilsvarende akkumulerede strækningsslængder.

Der kan argumenteres for, at kyststrækninger med dige og/eller skråningsbeskyttelse skulle udelades, da det under forudsætning af konstruktionernes vedligeholdelse, ikke vil kunne forekomme tilbagerykning. Da Kystdirektoratet ikke har opdateret information om kystens relative position i forhold til konstruktionerne, vides det ikke, om der eventuelt vil være tilstrækkelig strandbuffer, således at delvis tilbagerykning vil være acceptabelt set i forhold til konstruktionernes stabilitet.

Med udgangspunkt i Bruuns regel, se afsnit 4.2, som ligger til grund for beregningen af tilbagerykningen holder argumentet imidlertid ikke. Ifølge Bruuns regel vil en given vandstandsstigning medføre en tilsvarende hævnning af kystprofilen. Materialet tilføres ifølge teorien fra strand og skrænt. Såfremt diverse konstruktioner forhindrer dette, vil materialet i stedet blive tilført fra ubeskyttede nabostrækninger. Det medfører, at den erosion, der normalt ville forekomme på en given kyststrækning blot vil erstattes af en erosion af samme størrelse fra nabostrækningerne.

I tabel 8.11, 8.13 og 8.14 er erosionsbidragene fra almindelig vandspejlsstigning og større bølger samt det samlede bidrag fra klimaændringer beregnet ved multiplikation af strækningsslængder for de enkelte kysttyper og den modsvarende beregnede tilbagerykning.

I tabel 8.12 er erosionsbidraget fra almindelig havspejlsstigning angivet for hver gang vandstanden stiger 1 cm.

Tabel 8.11 Erosion grundet almindelig havspejlsstigning

Periode	Kysttype			Sum km <sup>2</sup>
	Eksponeret km <sup>2</sup>	Moderat km <sup>2</sup>	Beskyttet km <sup>2</sup>	
2005-2025	0,38	0,39	0,95	1,71
2025-2050	1,76	1,81	4,43	8,00
2050-2100	5,27	5,43	13,30	24,00
<b>2005-2100</b>	<b>7,40</b>	<b>7,63</b>	<b>18,68</b>	<b>33,71</b>

Tabel 8.12 Erosion grundet almindelig havspejlsstigning

	Kysttype			Sum km <sup>2</sup>
	Eksponeret km <sup>2</sup>	Moderat km <sup>2</sup>	Beskyttet km <sup>2</sup>	
Arealtab pr. 1 cm vs-stigning	0,25	0,26	0,63	1,14

Tabel 8.13 Forøget erosion grundet større bølger

Periode	Kysttype			Sum km <sup>2</sup>
	Eksponeret km <sup>2</sup>	Moderat km <sup>2</sup>	Beskyttet km <sup>2</sup>	
2005-2025	0,06	0,07	0,11	0,23
2025-2050	0,24	0,25	0,40	0,88
2050-2100	1,13	1,17	1,90	4,20
<b>2005-2100</b>	<b>1,43</b>	<b>1,48</b>	<b>2,41</b>	<b>5,32</b>

Tabel 8.14 Erosion grundet klimaændringer

Periode	Kysttype			Sum km <sup>2</sup>
	Eksponeret km <sup>2</sup>	Moderat km <sup>2</sup>	Beskyttet km <sup>2</sup>	
2005-2025	0,4	0,5	1,1	2,0
2025-2050	2,0	2,1	4,8	8,9
2050-2100	6,4	6,6	15,2	28,2
<b>2005-2100</b>	<b>8,8</b>	<b>9,1</b>	<b>21,1</b>	<b>39,0</b>

Af tabellerne kan aflæses, at landtabet på grund af almindelig vandstandsstigning er 34 km<sup>2</sup> i år 2100. For hver 1 cm vandstandsstigning øges landtabet med godt 1 km<sup>2</sup>.

Det samlede landtab i år 2100 på grund af klimaændringerne, hvor bidraget fra større bølger også er medregnet, er 39 km<sup>2</sup>. Som det tydeligt fremgår af tabellerne – selv når, der korrigeres for forskellig længde af tidsintervallerne – øges landtabet hen over hundredeårsperioden. Forklaringen er naturligvis en tilsvarende udvikling af havspejlets niveau, se afsnit 3.5.

## 8.6 Konstruktioner

Kystbeskyttelsesværkerne er i sin tid anlagt ud fra de stedlige forhold på kysten. Disse ændres i takt med tilbagerykning af kysten og voldsommere påvirkning, se afsnit 4. Efterhånden mister konstruktionerne sin tiltænkte effekt og risikoen for underminering eller anden ødelæggelse med kollaps til følge stiger.

I projekt "Indre Kyster", 1996-99, blev der fra luften foretaget en registrering af kystbeskyttelsen langs landets indre kyster. Registreringen blev suppleret med stikprøvevis kontrol fra landjorden. Registreringen inddeler kystbeskyttelsen i en række typer, hvoraf de væsentlige i denne sammenhæng er dige, skråningsbeskyttelse (eller skræntfodsbeskyttelse), hofde, T-hofde og bølgebrydere. Alle registreringer er geokodede. Informationerne rummer dog ingen oplysning om konstruktionernes tværsnit, opbygning eller tilstand.

Antal eller længder af disse konstruktioner er opsummeret, se tabel 8.15.

Tabel 8.15 Opgørelse over kystbeskyttelse

Kysttype	Diger km	Sbs km	Heraf sbs med dige km	Bagvedliggende dige eller sbs			Ikke bagvedl. dige eller sbs		
				Hofder stk	T-hofder stk	bb stk	Hofder stk	T-hofder stk	bb stk
Eksponeret	107	93	35	944	42	211	723	21	59
Moderat	70	102	15	1.125	43	65	1.854	49	99
Beskyttet	757	479	71	2.823	38	19	4.584	63	32
<b>I alt</b>	<b>934</b>	<b>674</b>	<b>121</b>	<b>4.892</b>	<b>123</b>	<b>295</b>	<b>7.161</b>	<b>133</b>	<b>190</b>

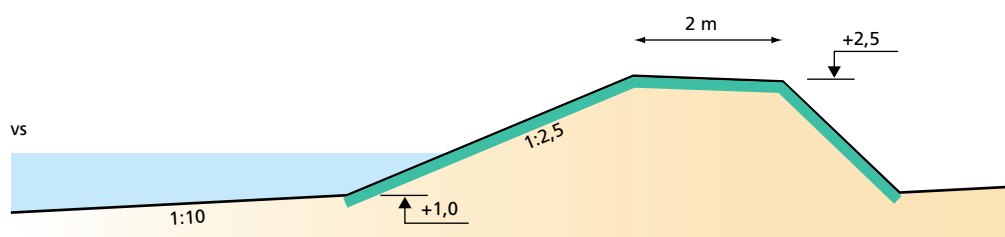
Der er foretaget en differentiering af høfder og T-høfder efter, om der findes et bagvedliggende dige og/eller en skråningsbeskyttelse. Det er sket ud fra den betragtning, at såfremt diger eller skråningsbeskyttelse vedligeholdes vil det ikke være nødvendigt at forlænge høfderne landværts på grund af klimaeffekten.

Der er ligeledes foretaget en differentiering af bølgebrydere. Det skyldes dog udelukkende, at der som før nævnt i forvejen er foretaget en differentiering af T-høfder. T-høfder er funktionsmæssigt en mellemting mellem høfder og bølgebrydere. Da der hverken findes oplysning om dimensioner eller tilstand af henholdsvis hoved og skaft i T-høfderne, er det ikke muligt at vurdere hvilken effekt – høfdeeffekten eller bølgebrydereffekten, der er den dominerende.

Til brug for de videre beregninger fastlægges en række standardtværsnit for digerne afhængig af kysttype. Dette foretages med udgangspunkt i iagttagelser fra en landsdækkende digeregistrering foretaget af Kystdirektoratet (ref.21). De anvendte standardtværsnit er angivet i figur 8.2 og tabel 8.16.

Tabel 8.16 Geometriske parametre

Kysttype	Hældning forland	Digefod	Hældning forskråning	Kronekote	Kronebredde m
Eksponeret	1:10	+2,0	1:3,0	+3,5	3,0
Moderat	1:10	+1,0	1:2,5	+2,5	2,0
Beskyttet	1:10	+0,5	1:2,0	+2,0	1,0



Figur 8.2 Standardtværsnit for diger, her eksemplificeret for kysttypen Moderat

### 8.6.1 Forstærkning af diger

Til modvirkning af almindelig havspejlsstigning og forøget stuvning, herunder højere og længere bølger, skal digerne forhøjes. Den beregnede digeforhøjelse sker med det formål at bevare det aktuelle sikkerhedsniveau af det pågældende dige – uanset hvad den aktuelle sikkerhed måtte være. Som repræsentativ digetværsnit benyttes tværsnittet for kysttypen Moderat.

Som en implicit følge af Bruuns regel hæves kystprofilet svarende til den almindelige havspejlsstigning. Da højden af den dimensionsgivende bølge er dybdeafhængig vil det ekstra bidrag fra højere bølger kun være afhængig af den større dybde, som den ekstra stuvning medfører. Bidraget fra ekstra bølgepåvirkning spiller kun ind med hensyn til bølgeperioden.

Ifølge STOWASUS (ref.10) forventes middel signifikant bølgehøjde i Nordsøen at vokse med ca. 5 %. Da det danske område i en vindmeteorologisk målestok er forholdsvis lille antages det, at ændringen i indre farvande følger samme tendens.

Diget skal hæves med en størrelse bestemt som summen af den generelle havspejlsstigning ( $\Delta v_{s_{gen.}}$ ), ekstra vindstuvning ( $\Delta v_{s_{surge}}$ ) og større bølgeopløb ( $\Delta R$ ).  $\Delta v_{s_{gen.}}$  og  $\Delta v_{s_{surge}}$  er i forvejen givet for de forskellige fremskrivningstidspunkter, se afsnit 8.2.1 og 8.2.2.

Opløbsberegningen følger proceduren i ref. 17. Den generelle opløbsformel lyder:

$$R_{2\%} = C_n(\epsilon) \cdot T_p \sqrt{(g \cdot H_0')} \cdot \tan \alpha \cdot r;$$

Græsdiger kan tåle større overløb, her regnes med overløb svarende til 10 % opløb:

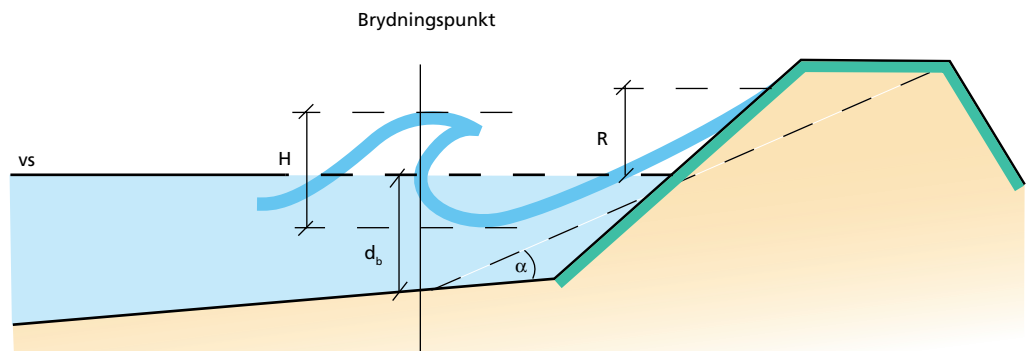
$$R_n/R_{2\%} = 0,77 \cdot \sqrt{(2 \div {}^{10}\log n)}, \text{ for } n = 10\% \Rightarrow R_{10\%}/R_{2\%} = 0,77$$

Da profilet hæves i takt med den almindelige vandstandsstigning beregnes opløbet for dybden  $d_{2005} + \Delta v_{s_{surge}}$ . Bølgehøjden stiger derfor med et bidrag  $\Delta H_0'$ .

Bølgeperioden stiger med en faktor afhængig af kraftigere vindforhold.

$\Delta R_{10\%}$  findes ved differensberegning mellem det beregnede opløb i dag – 2005 – og det beregnede opløb til de fremtidige tidspunkter i henholdsvis år 2025, år 2050 og år 2100.

Nedenfor udledes formel til beregning af  $\Delta R_{10\%}$  i år 2100. 2% opløb beregnes ud fra de hydrauliske og fysisk geometriske forudsætninger, se figur 8.3.



Figur 8.3 Digetværsnit med beregningsparametre

$$R_{2\%,2005} = C_n \cdot T_p \sqrt{(g \cdot H_0')} \cdot \tan \alpha \cdot r;$$

$$R_{2\%,2100} = C_n \cdot 1,05 \cdot T_p \sqrt{(g \cdot (H_0' + \Delta H_0'))} \cdot \tan \alpha \cdot r \text{ eller}$$

$$R_{2\%,2005} = k \cdot T_p \sqrt{H_0'}; \quad R_{2\%,2100} = k \cdot 1,05 \cdot T_p \sqrt{(H_0' + \Delta H_0')}$$

$$R_{2\%,2100}/R_{2\%,2005} = 1,05 \cdot \sqrt{(1 + \Delta H_0'/H_0')} \Rightarrow$$

$$R_{2\%,2100} = 1,05 \cdot \sqrt{(1 + \Delta H_0'/H_0')} \cdot R_{2\%,2005}$$

$$R_{10\%,2005} = 0,77 \cdot R_{2\%,2005};$$

$$R_{10\%,2100} = 0,77 \cdot R_{2\%,2100} = 0,77 \cdot 1,05 \cdot \sqrt{(1 + \Delta H_0'/H_0')} \cdot R_{2\%,2005} \Rightarrow$$

$$\Delta R_{10\%} = R_{10\%,2100} \div R_{10\%,2005} = 0,77 \cdot R_{2\%,2005} \cdot (1,05 \cdot \sqrt{(1 + \Delta H_0'/H_0')} \div 1)$$

Den udledte formel for beregning af  $R_{2\%,2100}$  er en tilnærmet formel og gælder kun såfremt  $\tan\alpha$  forudsættes konstant. Det er den imidlertid ikke helt, hvorfor  $R_{2\%,2100}$  og dermed  $R_{10\%,2100}$  findes ved iteration.

Den største forskel på  $\Delta R_{10\%}$  beregnet efter henholdsvis den tilnærmede formel og den iterative proces er 11 cm i år 2100.

Der er foretaget beregninger for forholdene i et SW-bånd, et NW-bånd og et middelbånd, der repræsenterer de gennemsnitlige forhold. Forskellen i påvirkning beror på differentiering af den almindelige havspejlsstigning i landet. Beregningerne for middelbåndet er vist i bilag 7.1.

I tabel 8.17 er resultatet med iterativ beregninger vist for middelbåndet.

Tabel 8.17 Forhøjelse af diger grundet klimaeffekter

År	Bidrag			I alt
	$\Delta v_{s, \text{gen.}}$ cm	$\Delta v_{s, \text{surge}}$ cm	$\Delta R_{10\%}$ cm	$\Delta h$ cm
2025	1,5	1	3,6	6
2050	8,5	4	12,5	25
2100	29,5	10	32,2	72

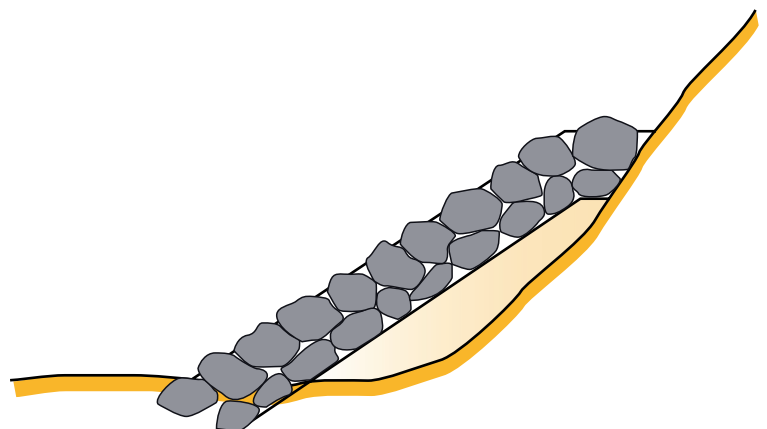
Det vurderes, at det ikke vil være nødvendigt med yderligere tiltag i form af forstærkning af for- og bagskråning.

### 8.6.2 Forhøjelse af skråningsbeskyttelse

Med samme formål som beskrevet for digerne i 8.6.1 skal skråningsbeskyttelsen forhøjes.

Nødvendig forhøjelse af skråningsbeskyttelsen foran digerne er implicit bestemt i afsnit 8.6.1. De bestemmende bidrag til forhøjelsen er identiske med digernes. Principperne og formelapparatet er også de samme. Og skråningsbeskyttelsen skal naturligvis have samme forhøjelse som diget.

Skråningsbeskyttelse uden bagvedliggende dige er typisk en ren højvandsbeskyttelse og beskytter ofte en skrænt. Som standardprofil vælges en skråningsbeskyttelse med dæklag af sten, se figur 8.4. Skrænterne på indre kyster består oftest af moræneaflejringer. De har større modstandskraft end sand. Derfor foretages dimensioneringen for 10 % opløb. Oftest har konstruktionen ingen krone af betydning.



Figur 8.4 Skråningsbeskyttelse foran skrænt.

Som alternativ beregning anvendes Van der Meers formel til beregning af opløb, se ref.22. Den lyder:

$$\text{Generel formel: } R_{2\%} / H_{m0} = 1,75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_0$$

$$\text{For } \gamma_b \cdot \xi_0 > 1,8: R_{2\%} / H_{m0} = \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot (4,3 \div 1,6 / \sqrt{\xi_0}), \text{ hvor}$$

$$\xi_0 = \tan \alpha / \sqrt{s_0} \text{ og } s_0 = 2 \cdot \pi \cdot H_{m0} / (g \cdot T_{m-1,0}^2)$$

Bølgetransmissionen gennem surfzonen beregnes ved hjælp af Goda's formelapparat.

Beregningerne er vist i bilag 7.2.

Tabel 8.18 Forhøjelse af skråningsbeskyttelse pga. klimaeffekter

År	Bidrag			I alt
	$\Delta vs_{gen.}$ cm	$\Delta vs_{surge}$ cm	$\Delta R_{10\%}$ cm	$\Delta h$ cm
2025	1,5	1	3,3	6
2050	8,5	4	8,0	21
2100	29,5	10	20,2	60

Sammenlignes resultaterne i tabel 8.17 og 8.18 ses en maksimal forskel på 12 cm i år 2100 og mere beskedne forskelle i 2025 og 2050. Sidstnævnte beregning synes derfor at bekræfte den tidligere beregning i afsnit 8.6.1.

Afhængig af afstanden fra kystlinjen til skråningsbeskyttelsen er der risiko for underskæring af konstruktionen. Da terrænforholdene foran skråningsbeskyttelserne ikke er kendte, kan der ikke udledes noget kvantitativt om dette emne.

Nødvendig vægtforøgelse på stenstørrelse i eksempelvis år 2100 er  $(H_{s,2100} / H_{s,2005})^3$ . Med en forøgelse af vanddybden på 10 cm vil dette betyde en nødvendig vægtforøgelse af stenene på ca. 25%.

### 8.6.3 Forlængelse af hølfer

For at undgå bagskæring af hølferne, herunder også T-hølferne, skal disse forlænges landværts i takt med tilbagerykningen af skrænten.

Nedenfor er forlængelsen af hølferne angivet som den samlede tilbagerykning grundet klimaændringer. Der er således ikke taget stilling til om hølferne i deres nuværende tilstand opfylder kravet mod bagskæring.

Tabel 8.19 Hølferforlængelse

Periode	Kysttype		
	Eksponeret m/hølfer	Moderat m/hølfer	Beskyttet m/hølfer
2005-2025	0,7	0,4	0,3
2025-2050	3,2	2,0	1,1
2050-2100	10,2	6,4	3,6
2005-2100	14,1	8,8	5,0

Under forudsætning af bibeholdelse og vedligeholdelse af eksisterende diger og skråningsbeskyttelse er det kun de fritliggende hølfer, der forlænges. Den samlede hølferforlængelse er beregnet i tabel 8.20.

Tabel 8.20 Samlet høfdeforlængelse

Periode	Kysttype		
	Eksponeret m	Moderat m	Beskyttet m
2005-2025	521	837	1.162
2025-2050	2.366	3.787	5.298
2050-2100	7.589	12.141	16.729
<b>2005-2100</b>	<b>10.476</b>	<b>16.765</b>	<b>23.189</b>

Høfdeforlængelserne kan med fordel foretages etapevis hen over århundredet.

### 8.6.4 Forhøjelse af høfder og bølgebrydere

Såfremt bølgebryderne, herunder også hovederne i T-høfderne, forbliver i deres nuværende position, skal kronen forhøjes for fortsat at ligge i samme niveau relativt til middelvandstanden. Nødvendig forstærkning beregnes som tilbagerykning multipliceret med kystprofillets hældning.

Tabel 8.21 Forhøjelse af kroner i bølgebrydere og i T-høfdeender

Periode	Kysttype		
	Eksponeret m	Moderat m	Beskyttet m
2005-2025	0,02	0,02	0,02
2025-2050	0,08	0,08	0,08
2050-2100	0,26	0,26	0,24
<b>2005-2100</b>	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>	<b>0,33</b>

Tilbagerykningen på grund af klimaeffekten vurderes at være forholdsvis beskeden for kysttyperne "moderat eksponeret kyst" og "beskyttet kyst" frem til år 2100. Det samme gælder for "eksponeret kyst" frem til år 2050, hvorefter tilbagerykningen bliver noget større i sidste halvdel af århundredet.

Det er derfor en overvejelse værd, om bølgebryderne skal forblive i deres nuværende position i de tilfælde, hvor tilbagerykningen er beskeden. I så fald bør de teoretisk set hæves. Det samme er tilfældet, såfremt tilbagerykningen standses i forbindelse med vedligeholdelse af et bagvedliggende dige eller skråningsbeskyttelse. Den nødvendige forøgelse af kronen er dog yderst beskeden og vil i praksis være vanskelig at udføre med mindre kronen forhøjes mere end foreskrevet.

Såfremt det vælges at flytte konstruktionerne landværts kan dette i praksis vente til sidste halvdel af århundredet. Konstruktionerne ændrer i så fald ikke volumen og stenene vil kunne genanvendes i det omfang de kan indvindes.

Med en forøgelse af afstanden mellem kystlinjen og bølgebryderen vokser den indflydelse bølgebryderne har på kysten. Aflejringen bagved bølgebryderne bliver større. Til gengæld bliver læsideerosionen tilsvarende større.