

# Fremskrivning af fodringsindsatsen

## Fremskrivning af fodringsindsatsen på Vestkysten



# Fremskrivning af fodringsindsatsen



<b>Projekt</b>	<b>Fremskrivning af fodringsindsatsen på Vestkysten</b>
Startdato	Marts 2008
Slutdato	September 2008
Projektansvarlig (PA)	Carl-Christian Munk-Nielsen
Projektleder (PL)	Carlo Sørensen
Projektmedarbejdere (PM)	John Jensen Birgit Byskov Kloster
Timeregistrering	071.40
Kontering	071.40
Godkendt den 22.09.2008	

<b>Rapport</b>	<b>Fremskrivning af fodringsindsatsen på Vestkysten</b>
Forfattere	John Jensen, Carlo Sørensen
Nøgleord	Klimaændringer, fodring, Vestkysten
Distribution	www.kyst.dk, Transportministeriet, Det Kongelige Bibliotek
Refereres som	Jensen, J. og Sørensen, C., 2008. Fremskrivning af fodringsindsatsen på Vestkysten. Kystdirektoratet. 27 p.

## Resumé

Fremskrivning af fodringsindsatsen på Vestkysten.

Jensen, J. og Sørensen, C., 2008. Fremskrivning af fodringsindsatsen på Vestkysten. Kystdirektoratet, Danmark. 27 p.

Vestkysten vedligeholdes årligt ved fodring med 2-3 mio. m<sup>3</sup> sand. Indsatsen afhænger af målsætningen for kystudviklingen på de enkelte delstrækninger.

Klimaændringer vil angiveligt medføre en generel havspejlsstigning og større bølger i Nordsøen. Dette vil medføre forøget erosion på Vestkysten. For at opveje denne tendens skal fodringsindsatsen løbende forøges for at efterleve den vedtagne målsætning.

Med udgangspunkt i tre klimascenarier og opstilling af en model for de litorale processer på kysten er forholdene søgt belyst.

Resultatet kan aflæses på figurerne 4.7 og 4.8. Figur 4.7 viser den samlede forøgelse af fodringsmængden i løbet af resten af dette århundrede, medens figur 4.8 viser forøgelsen af fodringsmængden alene forårsaget af klimaændringer. Selv uden klimaændringer efter i dag vil fodringsbehovet stige. Der sker en forstejling af kystprofilet, som primært skyldes, at der ved fodringen kun kompenseres for den eroderede mængde mellem klittop og kote ÷6 m, medens kystprofilet uden for kote ÷6 m fortsat rykker tilbage. Resultatet kan også aflæses i nedenstående tabel.

	2015	2030	2050	2100
Samlet stigning (inkl. profilforstejling)	÷4-+2 %	2-9 %	13-26 %	34-74 %
Stigning pga. klimaændringer efter 2008	÷6-+1 %	÷1-+6 %	5-19 %	16-57 %

*Stigningsinterval i fodringspct. i forhold til grundmængden i 2008 for de tre scenarier.*

Intervallerne dækker naturligvis kun over de undersøgte tre scenarier. De to af scenarierne ligger i den øvre tredjedel af den klynge af scenarier, FN's klimapanel præsenterer i sin seneste rapport. Det tredje scenarie medfører større havspejlsstigning i de førstkomende år.

Det skal bemærkes, at en del af forudsætningerne på de anvendte parametre hviler på antagelser og skøn, og beregningerne er baseret på simple formeludtryk. Usikkerheden på forudsigelserne forøges naturligvis i takt med længden af tidshorizonten. Resultatet skal derfor også mere opfattes som vejledende.

Ændringer i den dominerende retning af de indkommende bølger vil ligeledes have betydning for fodringsindsatsen. Her er kun givet en kvalitativ vurdering af denne parameters indflydelse, da der ikke foreligger kvantitative forudsigelser herfor.

## English Summary

Projections of sand nourishment on the Danish West Coast

Jensen, J. og Sørensen, C., 2008. Fremskrivning af fodringsindsatsen på Vestkysten. Kystdirektoratet, Danmark. 27 p.

The West Coast of Denmark is nourished by 2-3 mio.m<sup>3</sup> sand annually to keep up with the natural erosion. The hinterland is a flood prone area where, in parts of the reach, the surge barrier has come to a minimum acceptable safety level. Effects of climate change are supposed to introduce sea level rise and exposure to higher waves. Accordingly larger erosion is expected. To meet this challenge the nourishment effort has to be enhanced. Based on three different climate scenarios an analysis of the rate of increase in requisite nourishment volumes for the rest of this century has been established.

The results may be seen in figures 4.7 and 4.8. Figure 4.7 shows the total rise in the nourishment volumes during the rest of this century. Figure 4.8 shows the raise in volumes caused by climate change after 2008 only. Because of profile steepening the volumes will become larger even if climate effects stop. Profile steepening is primarily a result of nourishment in the inner profile, which is maintained, and continued recession of the outer profile. The result may also be read in the table.

	2015	2030	2050	2100
Total increase (inclusive profile steepening)	÷4-+2 %	2-9 %	13-26 %	34-74 %
Increase caused by climate change after 2008	÷6-+1 %	+1-+6 %	5-19 %	16-57 %

*Increase in nourishment volumes in relation to basis in 2008 for three scenarios.*

The intervals shown cover only the analysed scenarios. Two of the scenarios, A2<sub>mean</sub> and A1FI<sub>max</sub>, are situated in the upper end of the cluster of scenarios presented in the latest IPCC assessment report from 2007. The third scenario represents a constant sea level rise of 4 mm/year and is based on recorded local sea level change since 1972. It introduces a higher rate of sea level rise than the other two scenarios in the forthcoming decades.

Parameters with influence on coastal erosion have been included in the analysis. The effect of profile steepening is calculated by the formula  $Q = k_1 \cdot \tan\beta^{0.5}$ , where  $Q$  is the longshore transport,  $k_1$  is a constant and  $\tan\beta$  is the profile slope. The effect of sea level rise is handled in accordance with Bruun's Rule, which implies that an actual sea level rise will be succeeded by a raise in the coastal profile of a similar size. The significance in change of wave height is dealt with by the SPM-formula for longshore transport  $Q = k_2 \cdot H_s^{5/2}$ , where  $k_2$  is a constant and  $H_s$  is the significant wave height. Finally, a change in onshore transport contribution from the outer profile into the inner profile due to sea level rise has been included.

It should be noticed that parts of the applied parameters rest on assumptions and estimates and that computations are based on simple mathematical formulas. Uncertainties are raised in conjunction with time horizon. The intention is that the results primarily may act as a guideline in planning. Changes in the dominating wave angle are significant to the results. In the absence of quantitative predictions on this parameter a qualitative estimation of the influence has been presented.

# Indholdsfortegnelse

<b>Resumé</b> .....	<b>3</b>
<b>English Summary</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Indledning</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Klimaændringer</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Fodringsindsats på Vestkysten</b> .....	<b>10</b>
<b>4 Fremskrivning af fodringsindsatsen</b> .....	<b>12</b>
4.4.1 Parametre .....	15
4.4.2 Surfzonen .....	16
Havspejlsstigning .....	16
Større bølger .....	17
Profilforstejling efter 2008 .....	17
4.4.3 Profilet uden for surfzonen .....	18
Havspejlsstigning .....	18
Større bølger .....	19
<b>Referencer</b> .....	<b>27</b>

## 1 Indledning

Nærværende undersøgelse er led i Kystdirektoratets udviklingsprogram. Programmet er beskrevet i notatet "Kystdirektoratets udviklingsstrategi på kystområdet 2006-2009", ref.1. Formålet med programmet er at forbedre grundlaget for planlægning og projektering af kystbeskyttelsen på Vestkysten og i Vadehavet og derudover at kunne rådgive transportministeren i kystbeskyttelsessager på landets øvrige kyster.

Et af de seks temaer i programmet har titlen Klimaændringer. Nærværende undersøgelse er en delundersøgelse under dette tema. De øvrige delundersøgelser er

- Højvandsstatistikker 2007
- Analyse af middelvandstande i Vadehavet (udgivet i 2008)
- Morfologisk udvikling i Vadehavet, Knudedybs tidevandsområde (udgivet i 2008)
- Vadehavets morfologiske udvikling 1970-2008 (udgives primo 2009)
- Digeoversigten 2008 (udkommer ultimo 2008)
- Digestyrkevurdering af de syd- og sønderjyske diger (planlagt færdig i 2009).

Kystdirektoratet (KDI) beskæftiger sig endvidere med klimaændringer under flere af de andre temaer og deltager i både danske og internationale udviklingsprojekter om samme emne.

Udover at vurdere den hidtidige udvikling, sigter temaet Klimaændringer mod at udvikle og implementere redskaber og metoder til at vurdere konsekvenserne på de danske kyster som følge af formodede fremtidige klimaændringer. "Fremskrivning af fodringsindsatsen på Vestkysten" skal ses som et bidrag hertil. Rapporten er tilgængelig på Kystdirektoratets hjemmeside, [www.kyst.dk](http://www.kyst.dk).

## 2 Klimaændringer

### 2.1 Generelt

FN's klimapanel, IPCC, udgiver jævnligt rapporter, der på baggrund af en række internationalt anerkendte forskeres arbejder, giver et bud på klimaudviklingen. Da det menneskeskabte bidrag til udviklingen i høj grad afhænger af udledningen af forskellige drivhusgasser, og da denne ikke kendes, afhænger den angivne udvikling af de emissionsscenarioer eller klimascenarioer, man vælger at arbejde med.

Scenarierne afhænger af den demografiske, økonomiske og teknologiske udvikling samt udvekslingen af grøn teknologi mellem i- og ulande. Der kan ikke knyttes en sandsynlighed til de forskellige scenarier, da udviklingen af de grundlæggende forudsætninger er uforudsigelig.

Den seneste udgivelse fra IPCC er fra 2007, ref.2.

### 2.2 Scenarier

For at afspejle variabiliteten i forventninger til klimaudviklingen har Kystdirektoratet valgt at behandle to af IPCC's scenarier, nemlig  $A2_{\text{middel}}$  og  $A1FI_{\text{max}}$ , samt et tredje scenarie, der her kaldes 4mm/år.

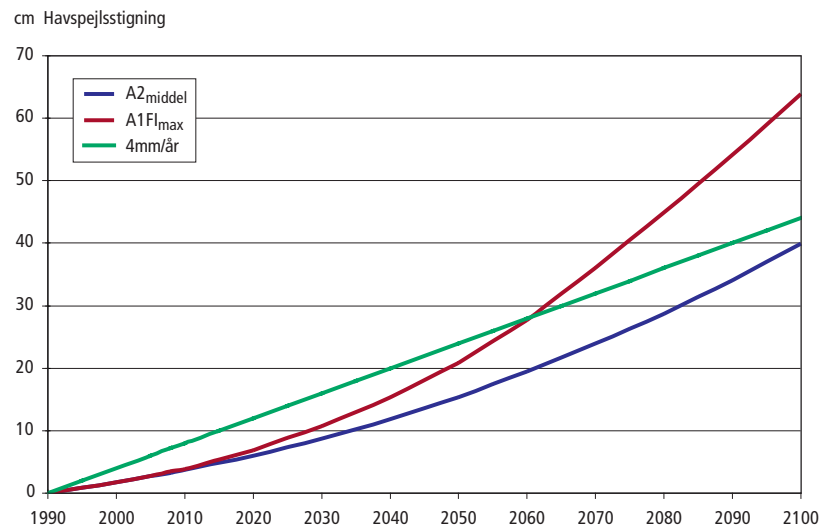
$A2$ -scenariet afspejler et scenarie, der ligger lidt over middel målt på temperaturudviklingen i den klynge af scenarier IPCC har valgt at præsentere, medens  $A1FI$  ligger som scenariet med den største ændring.  $A2_{\text{middel}}$ -scenariet giver middelværdierne af de forskellige parametre for simuleringer med  $A2$ -scenariet, medens  $A1FI_{\text{max}}$  reflekterer de værdier, der ligger én gange spredningen over de tilsvarende middelværdier for dette scenarie. De to scenarier repræsenterer den øverste tredjedel af IPCC's klynge af scenarier målt på temperaturudviklingen.

Scenariet 4mm/år er valgt, idet havspejlsstigningen i Esbjerg i perioden 1972-2007 ud fra vandstandsobservationer er beregnet til 4 mm/år, ref.3. Den samlede havspejlsstigning efter 2008 er større end den for scenariet  $A1FI_{\text{max}}$  frem til omkring år 2045.

### 2.3 Bestemmende parametre

Fremskrivningerne af havspejlsstigningen i den seneste rapport fra IPCC opererer med et lidt andet tidsinterval end i den forrige rapport, ref.4. Der angives rater for havspejlsstigningen i starten af perioden (1980-1999) og i slutningen af perioden (2090-2099). I den forrige rapport var havspejlsstigningerne afbildet som kurver, hvorimod de i den nyeste rapport er angivet som intervaller for hvert scenarie. Endvidere nævnes det, at medens forskellen for middel af intervallerne i fremskrivningerne kun er 2 cm i år 2050, øges denne til 15 cm i perioden 2090-2099. I Kystdirektoratets omsætning af IPCC's angivelser er der derfor lavet tilnærmede kurveforløb, hvor stigningsraten øges henover perioden.

Den globale havspejlsstigning for de tre scenarier er vist på figur 2.1. Havspejlsstigningen er omsat så den afbildes i forhold til år 2008, som er udgangspunkt for nærværende undersøgelse.



Figur 2.1 Global havspejlsstigning for de tre scenarier.

IPCC gør opmærksom på, at prognoserne er globale midler. Der har været og vil i fremtiden være regionale forskelle i stigningerne i størrelsesordenen  $\pm 15$  cm. Endvidere indgår potentielt øget afsmeltning i arktiske områder ikke i prognoserne, hvorfor stigningerne anvendt lokalt kan være for lave.

Ifølge ref.3 synes den isostatisk hævn af landet at være tæt på nul ved Esbjerg. Forskellen mellem den relative havspejlsstigning ved Esbjerg og ved Thorsminde, som ligger centralt på Vestkysten (strækningen defineret i afsnit 3.1), er tidligere beregnet til at være minimal, 2 cm over 100 års perioden 1890-1989, ref.5. Det er derfor valgt ikke at foretage en omsætning til lokale forhold på Vestkysten.

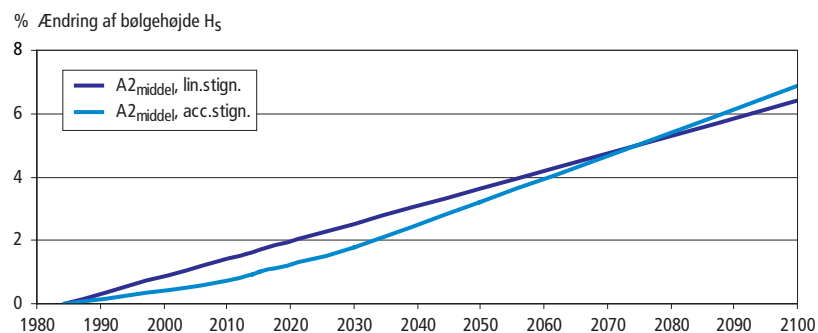
I STOWASUS-projektet (ref.6) er ændringer af bølgeklimate i Nordsøen simuleret grundet ændringer i vindforholdene. Det nævnes, at ændring i bølgeklimate følger vindkraften nøje. Middel signifikant bølgehøjde vokser med ca. 5 % i Nordsøen for GHG i forhold til PRD. GHG og PRD er to 30-årige scenarieperioder. PRD (present day period) går fra 1970 til 1999 og GHG (greenhouse gas period) er perioden 2060-2089. Simuleringerne er påvirket af drivhusgasser ifølge emissionsscenarioet IS92a. Det nævnes, at påvirkningen i GHG-perioden i forhold til PRD-perioden er meget lig påvirkningen i SRES A2-scenariet, når den estimerede direkte og indirekte aerosolpåvirkning inkluderes.

Der er ikke fundet anden litteratur, der beskriver ændringer af bølgeforholdene i Nordsøen – heller ikke for andre scenarier.

I figur 2.2 er ændringen af bølgehøjden skitseret. Udviklingen er vist som både et lineært forløb og som et accelereret forløb. Det lineære forløb er



bestemt af de to punkter repræsenteret ved middeltallet i hver af perioderne PRD og GHG, se ovenfor. Det accelererede forløb skærer i de samme to punkter, men er givet samme kurvede forløb som temperaturkurven for scenariet A2, ref.2.



Figur 2.2 Procentvis ændring i bølgehøjde for scenarie A2.

Derudover spiller ændring af bølgeperiode og bølgeretning en rolle for erosionen. Der foreligger imidlertid ingen undersøgelser om ændringer i disse parametre.

## 3 Fodringsindsats på Vestkysten

### 3.1 Vestkystaftale

Fællesaftalen er et økonomisk samarbejde mellem Staten og de tre kystkommuner Lemvig, Holstebro og Ringkøbing-Skjern om kystbeskyttelsen på strækningen mellem Lodbjerg og Nymindegab, her kaldet Vestkysten.

Hovedindsatsen består i kystfodring. For den nuværende aftale, der løber i perioden 2004-08, er budgettet på gennemsnitligt 86 mio. kr./år (prisniveau 2008). For den i efteråret 2008 indgåede aftale for perioden 2009-13 lyder budgettet på 94 mio. kr./år

### 3.2 Fodringsbehov

I den i efteråret 2008 nye aftale for perioden 2009-13 forudsættes kysttilbagegerykningen standset på alle strækninger med risiko for oversvømmelse med undtagelse af nogle delstrækninger på Søndre Holmslandtange, hvor kontroleret tilbagegerykning tillades. Dette modsvarer af et forventet fodringsbehov på 2,5 mio. m<sup>3</sup>/år (ref.7).

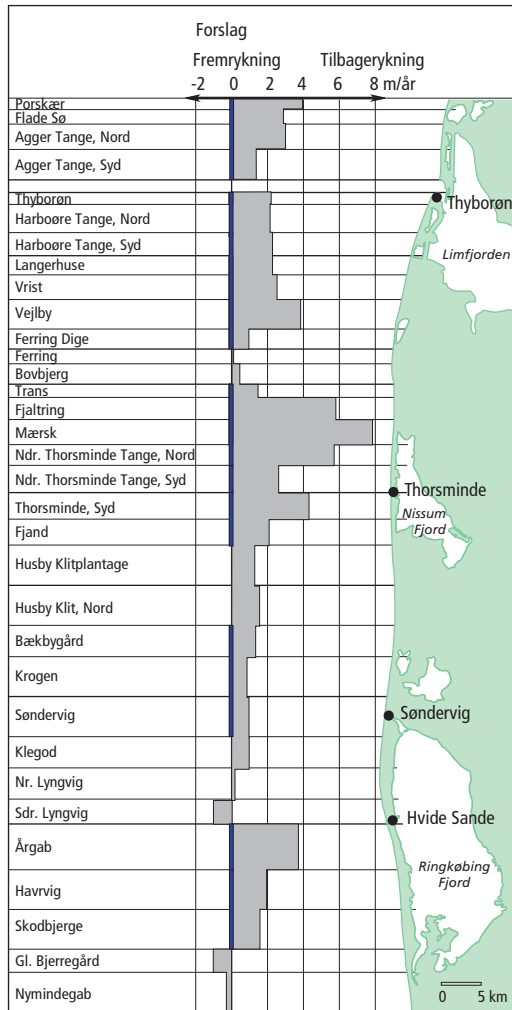
Tidshorizonten i nærværende undersøgelse ligger helt frem til år 2100. For at sikre kysten i dette tidsperspektiv er det nødvendigt at holde en målsætning om ingen tilbagegerykning langs hele kysten på alle delstrækninger med risiko for oversvømmelse, se figur 3.1.

Målsætningen modsvarer af en fodringsmængde i 2008 på 2,7 mio.m<sup>3</sup>/år. Denne mængde erstatter den sandmængde, der ellers ville være eroderet. Mængden er fastlagt på grundlag af kystudviklingen i perioden 1977-99 i profilet fra kote ±6 til klittop.

Derudover er der givet tillæg for to erosionsbidrag, som beregningen ikke tager højde for. En del af den udlagte fodring føres af bølger og strøm ud i profilet lige udenfor kote ±6 og reducerer tilbagegerykningen i kystprofilet her. Dette gives der et tillæg for. Dybderne uden for 6-8 m vanddybde er dog stadig under naturlig erosion og rykker tilbage, medens den fodrede del af profilet bevares. Dette fører til øget profilstejlhed, hvilket medfører en forøgelse af de indkommende bølgers højde og dermed større bølgeerosion. Dette kompenseres med et tillæg, der tager højde for effekten af profilforstejlingen i perioden fra 1999 frem til 2008.

Mængden er fastsat under forudsætning af gennemsnitsvejr i aftaleperioden. Det betyder, at der vil være en 50 % risiko for hårdere vejr, hvilket medfører at målsætningen ikke fuldt kan opfyldes. Omvendt vil der også være den samme sandsynlighed for mildere vejr i perioden.

Mængden defineres her som en grundmængde for de følgende beregninger.



- Beregnet årlig kysttilbagerykning uden fodring
- Målsætning for maksimal årlig tilbagerykning

Figur 3.1 Målsætning for kysttilbagerykning.

## 4 Fremskrivning af fodringsindsatsen

### 4.1 Generelt

Fodringsindsatsen kompenserer helt eller delvist for den erosion, som ellers ville forekomme på Vestkysten. Den valgte målsætning for kystudviklingen bestemmer størrelsen af fodringsbehovet. For at fastholde målsætningen forventes det, at fodringsbehovet vil stige i fremtiden. Det skyldes dels den forstejling af kystprofilet, som allerede foregår og dels de effekter, som fremtidige klimaeffekter forventes at medføre. Fodringsbehovet i 2008 – kaldet grundmængden, se afsnit 3.2 – udgør basis for beregninger af den fremtidige fodringsindsats.

I afsnit 4.2 beskrives modellen for de litorale processer, som styrer kystens udvikling, og som udgør grundlaget for beregning af de fremtidige ændringer til fodringsbehovet.

I afsnit 4.3 behandles den forstejling, som allerede pågår uafhængigt af fremtidige klimaændringer og som i sig selv vil medføre stigende fodringsbehov.

I afsnit 4.4 omtales og beregnes fremtidige klimaeffekter. Disse afhænger i udpræget grad af de valgte klimascenarier. Afsnittet behandler de forskellige parametre, som har betydning for fodringsbehovet. Afsnittet er opdelt i to underafsnit, som behandler bidrag henholdsvis i surfzonen og i profilet uden for surfzonen.

Inddata er omtalt i afsnit 4.5 og resultaterne for de tre scenarier samles og præsenteres i afsnit 4.6. Der er udført følsomhedsanalyser i afsnit 4.7.

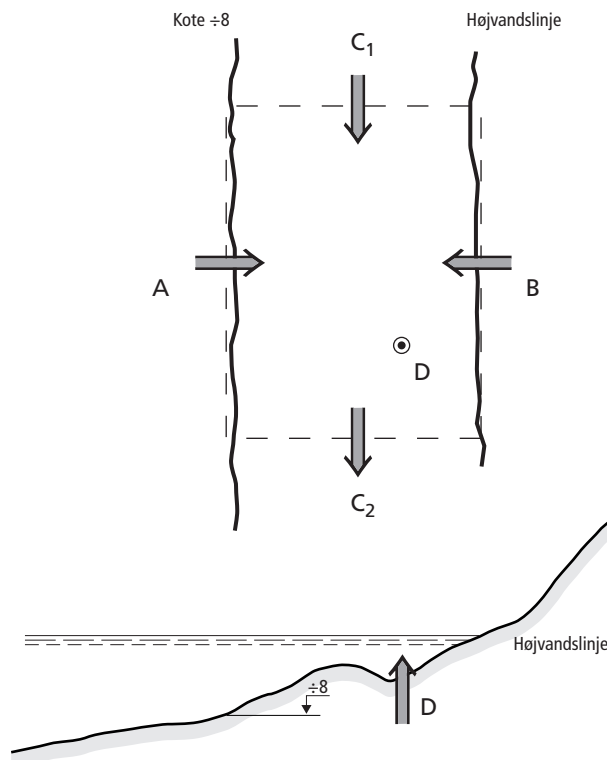
### 4.2 Litorale processer

Erosion i kystprofilet og dermed fodringsbehovet er styret af de litorale processer på kysten.

Surfzonen er karakteriseret som den del af kystprofilet, hvor bølgebrydning foregår på grund af bølgenes friktion mod bunden. På kyster bestående af friktionsmateriale som f.eks. sand, er profilet karakteriseret som den del, der udgøres af revlezone ind til højeste opskylslinje. Langstransporten i profilet skyldes en kombineret effekt af bølgeturbulens og en langsgående bølgeinduceret strøm. Langstransportens gradient er bestemmende for, om der foregår tilsanding eller erosion i kystprofilet.

På nogle strækninger af Vestkysten er det påvist, at der findes sandbølger uden for surfzonen, se ref.8. Disse bevæger sig mod nord på langs af kysten med en svag indadrettet komponent. Transporten er styret af kyststrømmen og de indkommende bølger. Det medfører bl.a. en indadrettet tværtransport, som udgør et tilskud til langstransporten i surfzonen.

På figur 4.1 er princippet for beregning af sedimentbudgettet i surfzonen opstillet.



Figur 4.1 Princip for beregning af sedimentbudget i surfzonen. Pilene angiver mængdebevægelser.

Den morfologiske udvikling i kystprofilet bestemmes af summen af vektorer. Er resultanten udadgående, er der erosion, og der er aflejring, såfremt det forholder sig omvendt.

Såfremt resultatet er erosion i surfzonen, kan erosionen kompenseres ved tilførsel af en tilsvarende mængde fodring.

Surfzonen regnes her at udgøres af profilafsnittet ud til kote  $\pm 8$ .

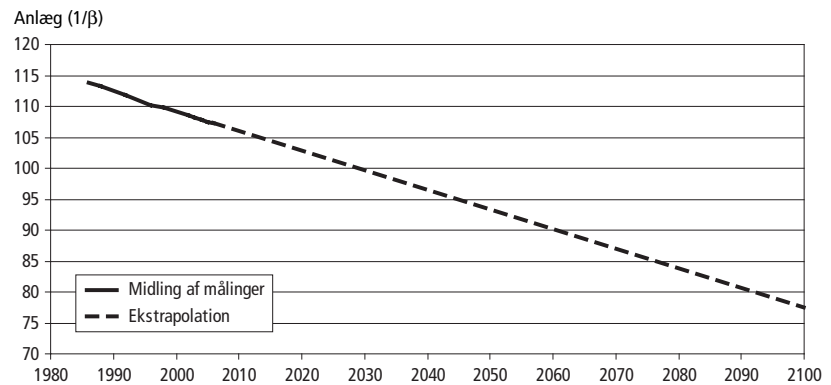
### 4.3 Forstejling af profilet

Ved forstejling forstås, at den ydre del af profilet rykker tilbage med større hastighed end den indre del af profilet, her repræsenteret ved surfzonen. Det medfører, at større bølger vil afgive sin energi i den indre del af profilet og dermed initiere en større langtransport.

Det er konstateret, at kystprofilet på Vestkysten er under fortsat forstejling, se bl.a. ref.9. Det skyldes, at den indre del af kystprofilet – det aktive del af profilet ud til kote  $\pm 6$  – vedligeholdes specielt ved hjælp af kystfodring. Det ydre profil fortsætter imidlertid sin indrykning. Det er vigtigt at gøre sig klart, at uanset om de ydre påvirkninger fra 2008 holdes konstante – ingen klimaændringer efter 2008 – vil denne udvikling fortsætte. Grunden til dette er, at Vestkysten ikke udgør en lukket sedimentcelle. Der er netto langtransport ud af systemet med materialedræn mod Horns Rev, ind gennem Thyborøn Kanal og transport mod nord ved Lodbjerg. Følgen af dette er, at grund-

mængden – uanset fremtidige klimaændringer – under alle omstændigheder vil vokse hen over årene med fastholdt målsætning om tilladt kysttilbagerykning.

I afsnit 3.2 blev forstejlingen af profilet i perioden 1999-2008 nævnt. Denne forstejling vil fortsætte. Forstejlingen beskrives her ved den gennemsnitlige hældning af vestkystprofilerne i højdeintervallet kote 0 - ±10. På figur 4.2 er profilforstejlingen vist. Det antages, at udviklingen fortsætter lineært, hvorfor den findes ved ekstrapolation af den historiske udvikling.



Figur 4.2 Profilforstejling. Ændring af middel profilhældning i intervallet fra kote 0 til kote ±10.

Der findes en sammenhæng mellem den langsgående sedimenttransport  $Q$  og profilhældningen udtrykt ved  $\tan\beta$ :

$$Q = k_1 \cdot \tan\beta^{0,5},$$

hvor  $Q$  er langstransporten,  $k_1$  er en konstant og  $\tan\beta$  er profilhældningen.

Effekten på fodringsmængden af denne ændring af profilhældningen bestemmes ved ligningerne:

$$Q_2/Q_1 = \frac{k_1 \cdot \tan\beta_2^{0,5}}{k_1 \cdot \tan\beta_1^{0,5}} = (\tan\beta_2/\tan\beta_1)^{0,5}$$

$$\Delta Q/Q_1 = Q_2/Q_1 - 1 = (\tan\beta_2/\tan\beta_1)^{0,5} - 1$$

Fodringsmængden er beregnet i nedenstående tabel 4.1.

	2008	2015	2030	2050	2100
$1/\tan\beta$	106,5	104,3	99,6	93,2	77,4
$\Delta Q/Q_{2008}$	0,0 %	1,1 %	3,4 %	6,9 %	17,3 %
$Q_t = Q_{2008} + \Delta Q$ (m <sup>3</sup> /år)	2.700.000	2.729.000	2.793.000	2.886.000	3.168.000

Tabel 4.1 Udvikling i langstransporten grundet profilforstejling.

Den nævnte profilforstejling og dermed den beregnede fodringsmængde hen over årene er uafhængig af en forøgelse af klimaparametrene efter 2008, men indeholder bl.a. effekten af den ændring af klimaparametrene, der er foregået indtil 2008. Fodringsbidraget fra f.eks. en konstant stigning af havspejlet før 2008, som fortsætter i perioden efter 2008, vil derfor være indeholdt i grundmængden på de 2,7 mio.m<sup>3</sup>/år anført i afsnit 3.2.

## 4.4 Klimaændringers betydning

### 4.4.1 Parametre

Den forventede kystudvikling efter 2008 bygger på scenarierne, som beskrevet i afsnit 2.2.

Effekten af klimaændringerne skyldes primært ændring i to påvirkninger:

- a) Havspejlsstigning
- b) Større bølger grundet ændrede vindforhold.

Profilforstjeling grundet klimaændringer kan også have indflydelse på størrelsen af de indkommende bølger.

- ad a) Havspejlsstigning medfører ifølge Bruun's Regel, se afsnit 4.4.2, hævnning af det indre kystprofil med samme størrelse som selve havspejlsstigningen. Det indre profil regnes her ud til kote  $\pm 8$ , altså surfzonen. Dette medfører erosion i stranden/skrænten med en mængde svarende til opfyldningen af profilet. Mængden kan alternativt erstattes ved fodring med en tilsvarende mængde. Fodringen er en engangsfodring forstået på den måde, at fodringen anvendes til opfyldning af profilet svarende til havspejlsstigningen.

I ref. 10 er det beskrevet, hvorledes der sker tilskud til langtransporten fra det ydre profil. Det sker ved tværtransport fra ydre til indre profil. Såfremt havspejlet stiger, bliver dybderne i ydre profil større. Dette medfører, at turbulensen ved bunden reduceres og tværtransporten mindskes. Da påvirkningen i surfzonen forudsættes konstant over tiden, vil den langsgående transport også være konstant. Det reducerede bidrag fra det ydre profil vil opvejes af en større erosion fra stranden og skrænten. Mængden kan alternativt erstattes ved fodring med en tilsvarende mængde. Underskuddet stiger i takt med havspejlsstigningen og vil udgøre et løbende bidrag.

Havspejlsstigningen giver ikke umiddelbart anledning til forstjeling af profilet, se dog også omtalen i afsnit 4.4.2. af betydningen af havspejlsstigningen efter 2008. Den giver derimod anledning til øget erosion i den strandnære del af kystprofilet.

- ad b) Bølgeforholdene afhænger bl.a. af den ydre påvirkning, som vinden påfører vandets overflade. Der forudses ifølge ref. 11 ændrede lavtryksbaner, som vil føre til en generel forøgelse af vinde fra vestlige retninger. I afsnit 2.3 er størrelsen på ændringen i Nordsøen angivet. Der er ingen resultater for ændringen af vindretningen og dermed bølgeindfaldsretningen.

Større bølger vil betyde større tværtransport fra ydre profil til surfzonen. Der findes dog ingen simpel måde, at beregne denne ændring på. Det vil i realiteten medføre en mindre reduktion i fodringsbehovet.

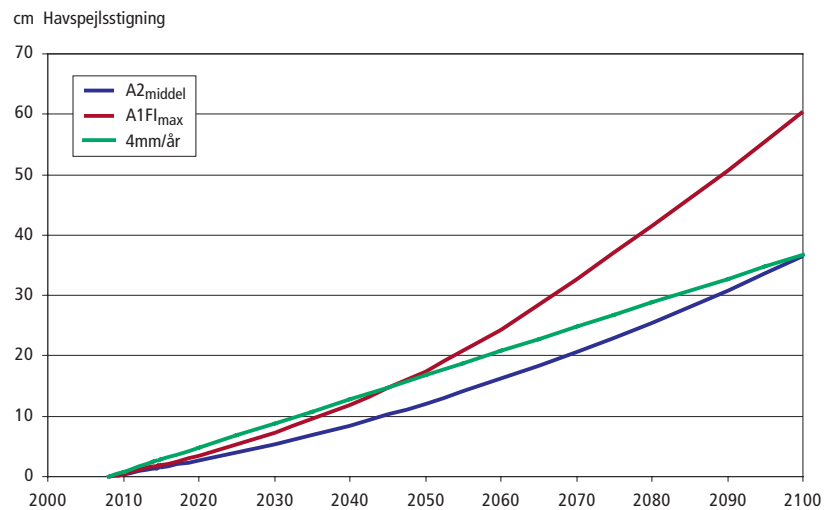
Større indkommende bølger giver anledning til større erosion i surfzonen.

Såfremt profilet ud til kote  $\pm 6$  vedligeholdes, medfører dette forstejling af profilet. Profilforstejlingen giver anledning til større bølger og yderligere erosion.

#### 4.4.2 Surfzonen

##### Havspejlsstigning

Forøgelsen i havspejlsstigning er vist på figur 4.3 for de tre aktuelle scenarier. Havspejlsstigningerne er præsenteret i forhold til udgangsåret 2008.



Figur 4.3 Scenarier for stigning af havspejlet med udgangspunkt i 2008.

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 Bruun's regel. Den siger, at en given vandstandsforøgelse medfører en tilsvarende hævning af kystprofilen. Tilførslen af materialer til denne opfyldning af kystprofilen stammer naturligt fra erosion af strand og af skrænt. Dette medfører tilbagerykning af kysten.

Hvis erosionsbidraget i stedet erstattes af en ekstra fodringsmængde, skal fodringsmængden svare til den mængde, der indgår i en hævning af den aktive del af profilet med samme størrelse som selve vandstandsstigningen.

Mængden  $\Delta N$  findes ved hjælp af formlen:

$$\Delta N = L \cdot \Delta v_{s_{gen}} \cdot B = L \cdot \Delta v_{s_{gen}} \cdot 14 / \tan \beta_{\pm 8+4} \text{ (m}^3\text{/år)},$$

hvor  $L$  er den samlede længde af vestkyststrækningen,  $\Delta v_{s_{gen}}$  er den generelle havspejlsstigning og  $14 / \tan \beta_{\pm 8+4}$  udtrykker bredden af profilet mellem kote  $\pm 8$  og kote  $+4$ .

Som det ses, afhænger mængden af størrelsen af havspejlsstigningen det pågældende år. Denne findes som hældningskoefficienten af kurverne for havspejlsstigningen det pågældende år. Mængdeforøgelsen beregnes dog i



forhold til den beregnede grundmængde af fodringsbehovet, se afsnit 3.2. Denne mængde tager implicit højde for den observerede havspejlsstigning på 4 mm/år, se afsnit 2.2. Effekten af den fremtidige havspejlsstigning set i forhold til grundmængden beregnes derfor ved hjælp af differencen mellem den fremtidige havspejlsstigning det pågældende år og den observerede havspejlsstigning på 4 mm/år, se tabel 4.2.

Scenarie	2008	2015	2030	2050	2100
A2 <sub>middel</sub>	-199.000	-171.000	-111.000	-31.000	168.000
A1F <sub>max</sub>	-174.000	-113.000	18.000	193.000	631.000
4mm/år	0	0	0	0	0

Tabel 4.2 Ekstra fodringsmængde (m<sup>3</sup>/år) pga. generel havspejlsstigning.

Ændringen i fodringsmængden vil være den samme ved konstant havspejlsstigning og – som det ses – specielt 0 for scenariet 4mm/år. Havspejlsstigningen for scenarierne A2<sub>middel</sub> og A1F<sub>max</sub> er mindre end 4 mm/år i første del af perioden. Derfor bliver bidraget negativt.

### Større bølger

Ændringer i bølgehøjde er angivet på figur 2.2.

Sedimenttransportmodellen,  $Q = k_2 \cdot H_s^{5/2}$ , giver sammenhængen mellem den langsgående sedimenttransport og bølgehøjden. Forskellen i den langsgående sedimenttransport til to tidspunkter giver ændringer af transporten og dermed ændringen i erosionen og følgelig ændringen i fodringsbehovet:

$$Q_2/Q_1 = \frac{k_2 (H_s + \Delta H_s)^{5/2}}{k_2 \cdot H_s^{5/2}} = \left(1 + \frac{\Delta H_s}{H_s}\right)^{5/2}$$

$$\Delta Q/Q_1 = Q_2/Q_1 - 1 = \left(1 + \frac{\Delta H_s}{H_s}\right)^{5/2} - 1$$

hvor Q er den langsgående sedimenttransport,  $k_2$  er en konstant og  $H_s$  er den signifikante bølgehøjde.

Ændringen i fodringsbehovet er angivet i tabel 4.3.

Scenarie	2008	2015	2030	2050	2100
Lineært forløb	0,0 %	1,0 %	3,1 %	5,9 %	13,3 %
Kurvet forløb	0,0 %	0,8 %	2,8 %	6,4 %	16,2 %

Tabel 4.3 Ekstra fodringsmængde i forhold til 2008 pga. ændring af bølgehøjde. Scenarie A2<sub>middel</sub>.

### Profilforstjeling efter 2008

Bidraget fra den profilforstjeling, som isoleret set udspringer af den teoretiske tærskel, som dannes mellem den fodrede del af profilet, som hæves svarende til havspejlsstigningen, jf. Bruun's regel, og det konstante ydre profil, er insignifikant, se ref.5. Det beregnes derfor ikke.

### 4.4.3 Profilet uden for surfzonen

#### Havspejlsstigning

Der findes ingen enkel sammenhæng, der siger noget om ændring af den tværgående transport imellem surfzonen og kystprofilet uden for denne. I forbindelse med projektet "Variationer i kystprofilet" ref.8 har DHI ved numerisk simulering beregnet den tværgående transport for en forsøgsstrækning på Nordre Thorsmindetange, se ref.12. Størrelsen for den indadrettede tværrtransport beregnes til  $25 \text{ m}^3/\text{år}/\text{m} \pm 12 \text{ m}^3/\text{år}/\text{m}$ . Der er her taget hensyn til sandprocenten i kystprofilet.

Under forudsætning af at samme mængde mobilt sand som ved Ndr. Thorsmindetange er til stede, er beregningen suppleret i nogle linjer mod syd, og resultatet i figur 4.4 er fremkommet.

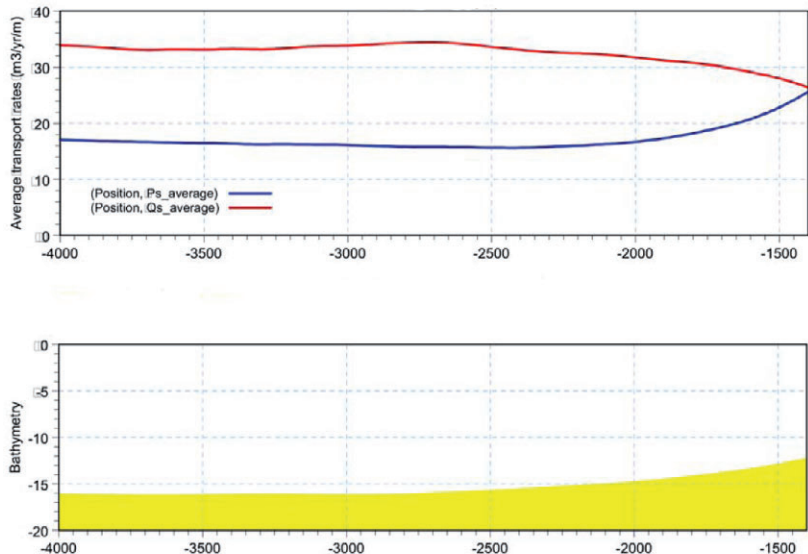


Figur 4.4 Størrelse af tværrtransporten ind over 11 m vanddybde (ref.12).

Der er ikke foretaget tilsvarende beregninger for området nord for Nissum Fjord. Som et groft skøn forudsættes det, at påvirkningen er den samme her som for strækningen ud for Ndr. Thorsmindetange.

De målte sandprocenter i området fra kote  $\pm 12$  til ca. 4 km ud fra kystlinjen, se ref.13, er benyttet til at finde fordelingen af tværrtransporten langs Vestkysten. Den er herefter beregnet til  $676.000 \text{ m}^3/\text{år}$  for hele kysten. Det er her forudsat, at de fundne sandprocenter også er repræsentative for profilet mellem kote  $\pm 11$  og  $\pm 12$ .

På figur 4.5 er tværtransportens fordeling ind over kystprofillet, der ligger udenfor surfzonen, vist.



Figur 4.5 Beregnet gennemsnitlig langsgående og tværgående transport i kystprofil ud for Ndr. Thorsmindetange (ref. 12). x-akse viser afstand i meter fra kystlinje.

Hældningen på kystprofillet i afstanden 1400 m fra kystlinjen er aflæst til 1/166 pr. 1 m dybdeændring i profilet. En aflæsning på kurven for tværtransporten i samme kystafsnit viser en reduktion i tværtransporten på  $(25-21,3)/25 = 14,8\%$  for 1 m dybdeændring. Det vil betyde, at tværtransporten bliver reduceret med  $0,148 \cdot 676.000 \text{ m}^3/\text{år}$  pr. 1 m stigning af havspejlet.

Reduktionen i tværtransporten medfører en reduktion i tilskuddet til den langsgående transport. Da transportkapaciteten i den langsgående transport ikke falder, vil dette bidrag skulle kompenseres ved tilsvarende større erosion i surfzonen – eller alternativt i tilsvarende større fodringsindsats.

Kompenseres reduktionen ved fodring er den nødvendige fodringsmængde vist i tabel 4.4.

Scenarie	2008	2015	2030	2050	2100
A2middeld	0	1.600	5.400	12.100	36.600
A1F <sub>max</sub>	0	1.900	7.200	17.400	60.400
4mm/år	0	2.800	8.800	16.800	36.800

Tabel 4.4 Ekstra fodring ( $\text{m}^3/\text{år}$ ) grundet mindre tværtransport fra ydre kystprofil pga. generel global havspejlstigning.

### Større bølger

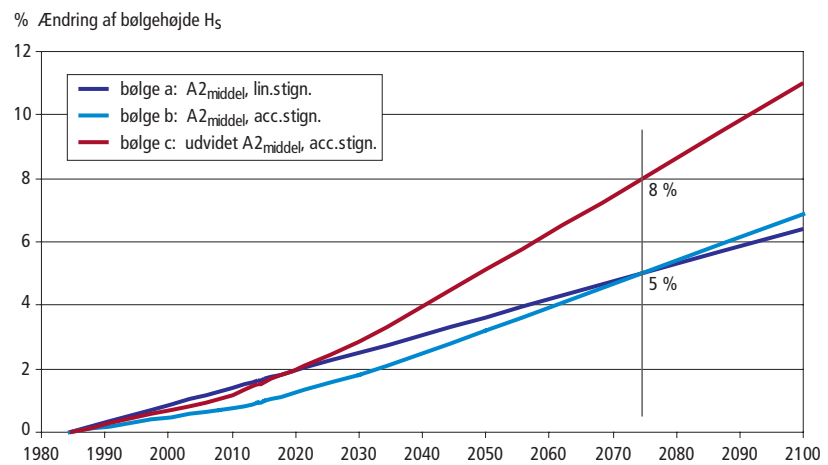
Med stigende havspejl og større dybder vil der kunne genereres større bølger. Tværtransporten til det indre profil vil alt andet lige derfor stige. Det vurderes, at det ekstra bidrag vil være mindre væsentlig i denne sammenhæng og udelades af beregningerne.

## 4.5 Inddata

Forudsigelsen på bølgehøjder er kun givet for scenariet  $A2_{\text{middel}}$ , se afsnit 2.3. Og kun for stigningen frem til år 2075. Der regnes her med to forskellige stigningstendenser, én, der er lineær og én accelereret, som følger temperaturkurven for scenarie  $A2_{\text{middel}}$ . Kurverne skærer 0 % i år 1985 og 5 % i år 2075.

Klimaeffekten er større i scenarie  $A1FI_{\text{max}}$ . Derfor antages stigningen af bølgehøjden at være større end i scenarie  $A2_{\text{middel}}$ . Her er supplerende valgt 8 % stigning frem til år 2075 benævnt udvidet scenarie  $A2_{\text{middel}}$ .

De benyttede fremskrivninger er vist på figur 4.6.



Figur 4.6 Fremskrivning af bølgehøjden på Vestkysten.

Der er foretaget to beregninger for hvert af de tre scenarier. Forskellen ligger i fremskrivningen af bølgehøjden. For scenarie  $A2_{\text{middel}}$  og scenarie 4mm/år er beregningerne foretaget med fremskrivning som for scenarie  $A2_{\text{middel}}$ , henholdsvis med lineær og accelereret stigning. For scenarie  $A1FI_{\text{max}}$  er begge stigningstakter accelereret med fremskrivning som henholdsvis for scenarie  $A2_{\text{middel}}$  og for udvidet scenarie  $A2_{\text{middel}}$ .

## 4.6 Resultater

I tabellerne 4.5-4.16 er resultatet af beregningerne for de forskellige scenarier anført. Forøgelsen er angivet dels som mængder og dels som procentvise andele af grundmængden for 2008. Andelene er splittet op i to dele, dels den forventede forøgelse af fodringsindsatsen i forhold til 2008-grundmængden med fastholdt målsætning og dels den forøgelse, som udelukkende skyldes klimaændringer efter 2008. Grundmængden indeholder implicit kompensation for den hidtidige havspejlsstigning på 4 mm/år.

Scenarie A2 <sub>middel</sub>	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	2.700	2.729	2.793	2.886	3.168
Havspejlsstigning	-199	-171	-111	-31	168
Forøget bølgepåvirkning*	0	27	86	171	420
Mindre tværtransport	0	2	5	12	37
I alt	2.501	2.585	2.773	3.038	3.793

\* bølge a: scenarie A2, lineær stigning.

Tabel 4.5 Nødvendig fodringsmængde (1.000 m<sup>3</sup>/år).

Scenarie A2 <sub>middel</sub>	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	0 %	1,1 %	3,4 %	6,9 %	17,3 %
Havspejlsstigning	-7,4 %	-6,3 %	-4,1 %	-1,2 %	6,2 %
Forøget bølgepåvirkning*	0 %	1,0 %	3,2 %	6,3 %	15,6 %
Mindre tværtransport	0 %	0,1 %	0,2 %	0,4 %	1,4 %
Samlet stigning (incl. profilforstøjning)	-7 %	-4 %	3 %	13 %	41 %
Stigning pga. klima- ændringer efter 2008	-7 %	-5 %	-1 %	5 %	22 %

\* bølge a: scenarie A2, lineær stigning.

Tabel 4.6 Stigning i fodringspct. i forhold til grundmængden i 2008.

Scenarie A2 <sub>middel</sub>	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	2.700	2.729	2.793	2.886	3.168
Havspejlsstigning	-199	-171	-111	-31	168
Forøget bølgepåvirkning*	0	22	79	185	514
Mindre tværtransport	0	2	5	12	37
I alt	2.501	2.581	2.766	3.052	3.887

\* bølge b: scenarie A2, accelereret stigning.

Tabel 4.7 Nødvendig fodringsmængde (1.000 m<sup>3</sup>/år).

Scenarie A2 <sub>middel</sub>	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	0 %	1,1 %	3,4 %	6,9 %	17,3 %
Havspejlsstigning	-7,4 %	-6,3 %	-4,1 %	-1,2 %	6,2 %
Forøget bølgepåvirkning*	0 %	0,8 %	2,9 %	6,9 %	19,0 %
Mindre tværtransport	0 %	0,1 %	0,2 %	0,4 %	1,4 %
Samlet stigning (incl. profilforstøjning)	-7 %	-4 %	2 %	13 %	44 %
Stigning pga. klima- ændringer efter 2008	-7 %	-6 %	-1 %	6 %	27 %

\* bølge b: scenarie A2, accelereret stigning.

Tabel 4.8 Stigning i fodringspct. i forhold til grundmængden i 2008.

Scenarie A1F <sub>max</sub>	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	2.700	2.729	2.793	2.886	3.168
Havspejlsstigning	-174	-113	18	193	631
Forøget bølgepåvirkning*	0	22	79	185	514
Mindre tværtransport	0	2	7	17	60

\* bølge b: scenarie A2, accelereret stigning.

Tabel 4.9 Nødvendig fodringsmængde (1.000 m<sup>3</sup>/år).

Scenarie A1FI <sub>max</sub>	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	0 %	1,1 %	3,4 %	6,9 %	17,3 %
Havspejlsstigning	-6,4 %	-4,2 %	0,7 %	7,2 %	23,4 %
Forøget bølgepåvirkning*	0 %	0,8 %	2,9 %	6,9 %	19,0 %
Mindre tværtransport	0 %	0,1 %	0,3 %	0,6 %	2,2 %
Samlet stigning (incl. profilforstøjning)	-6 %	-2 %	7 %	22 %	62 %
Stigning pga. klima- ændringer efter 2008	-6 %	-3 %	4 %	15 %	45 %

\* bølge b: scenarie A2, accelereret stigning.

Tabel 4.10 Stigning i fodringspct. i forhold til grundmængden i 2008.

Scenarie A1FI <sub>max</sub>	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	2.700	2.729	2.793	2.886	3.168
Havspejlsstigning	-174	-113	18	193	631
Forøget bølgepåvirkning*	0	36	127	300	845
Mindre tværtransport	0	2	7	17	60
I alt	2.526	2.654	2.945	3.397	4.704

\* bølge c: udvidet scenarie A2, accelereret stigning.

Tabel 4.11 Nødvendig fodringsmængde (1.000 m<sup>3</sup>/år).

Scenarie A1FI <sub>max</sub>	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	0 %	1,1 %	3,4 %	6,9 %	17,3 %
Havspejlsstigning	-6,4 %	-4,2 %	0,7 %	7,2 %	23,4 %
Forøget bølgepåvirkning*	0 %	1,3 %	4,7 %	11,1 %	31,3 %
Mindre tværtransport	0 %	0,1 %	0,3 %	0,6 %	2,2 %
Samlet stigning (incl. profilforstøjning)	-6 %	-2 %	9 %	26 %	74 %
Stigning pga. klima- ændringer efter 2008	-6 %	-3 %	6 %	19 %	57 %

\* bølge c: udvidet scenarie A2, accelereret stigning.

Tabel 4.12 Stigning i fodringspct. i forhold til grundmængden i 2008.

Scenarie 4mm/år	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	2.700	2.729	2.793	2.886	3.168
Havspejlsstigning	0	0	0	0	0
Forøget bølgepåvirkning*	0	27	86	171	420
Mindre tværtransport	0	3	9	17	37
I alt	2.700	2.758	2.888	3.074	3.625

\* bølge a: scenarie A2, lineær stigning.

Tabel 4.13 Nødvendig fodringsmængde (1.000 m<sup>3</sup>/år).

Scenarie 4mm/år	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	0 %	1,1 %	3,4 %	6,9 %	17,3 %
Havspejlsstigning	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Forøget bølgepåvirkning*	0 %	1,0 %	3,2 %	6,3 %	15,6 %
Mindre tværtransport	0 %	0,1 %	0,3 %	0,6 %	1,4 %
Samlet stigning (incl. profilforstøjning)	0 %	2 %	7 %	14 %	34 %
Stigning pga. klima- ændringer efter 2008	0 %	1 %	3 %	6 %	16 %

\* bølge a: scenarie A2, lineær stigning.

Tabel 4.14 Stigning i fodringspct. i forhold til grundmængden i 2008.

Scenarie 4mm/år	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	2.700	2.729	2.793	2.886	3.168
Havspejlsstigning	0	0	0	0	0
Forøget bølgepåvirkning*	0	22	79	185	514
Mindre tværtransport	0	3	9	17	37
I alt	2.700	2.754	2.880	3.088	3.719

\* bølge b: scenarie A2, accelereret stigning.

Tabel 4.15 Nødvendig fodringsmængde (1.000 m<sup>3</sup>/år).

Scenarie 4mm/år	2008	2015	2030	2050	2100
Grundmængde (incl. forstøjning)	0 %	1,1 %	3,4 %	6,9 %	17,3 %
Havspejlsstigning	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Forøget bølgepåvirkning*	0 %	0,8 %	2,9 %	6,9 %	19,0 %
Mindre tværtransport	0 %	0,1 %	0,3 %	0,6 %	1,4 %
Samlet stigning (incl. profilforstøjning)	0 %	2 %	7 %	14 %	38 %
Stigning pga. klima- ændringer efter 2008	0 %	1 %	3 %	8 %	20 %

\* bølge b: scenarie A2, accelereret stigning.

Tabel 4.16 Stigning i fodringspct. i forhold til grundmængden i 2008.

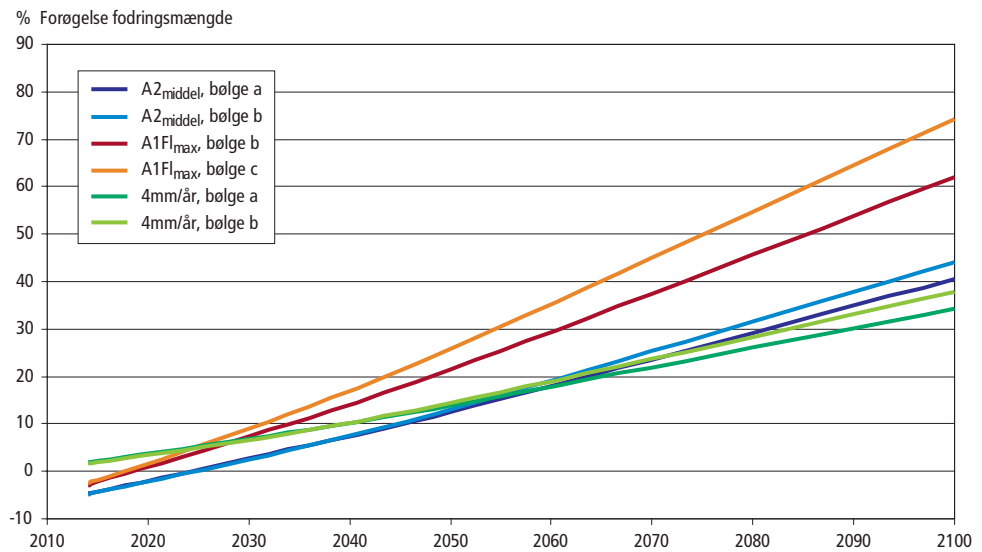
Sammenfattende kan det konstateres, at de to dominerende bidrag til stigningen i fodringsbehovet er profilforstøjningen og den forøgede bølgepåvirkning. De to bidrag er af samme størrelse, bortset fra scenariet A1FI<sub>max</sub>, hvor bølgehøjden fremskrives som udvidet scenarie A2. Her forøges bidraget fra bølgerne gradvist efter 2050. Bidraget fra profilforstøjningen er uafhængigt af klimaændringerne efter 2008. I anden halvdel af perioden er bidraget fra havspejlsstigningen i scenarie A1FI<sub>max</sub> dog af samme størrelsesorden grundet accelerationen i havspejlsstigningen.

Grunden til at havspejlsstigningens betydning i to af scenarierne ikke er større er, at grundmængden, som før nævnt, implicit indeholder et bidrag for den hidtidige havspejlsstigning på 4 mm/år. Dette er også grunden til at stigningstakten er negativ i første delperiode for scenarierne A2<sub>middel</sub> og A1FI<sub>max</sub>. Tværtransporten udgør kun et beskedent bidrag til stigningen.

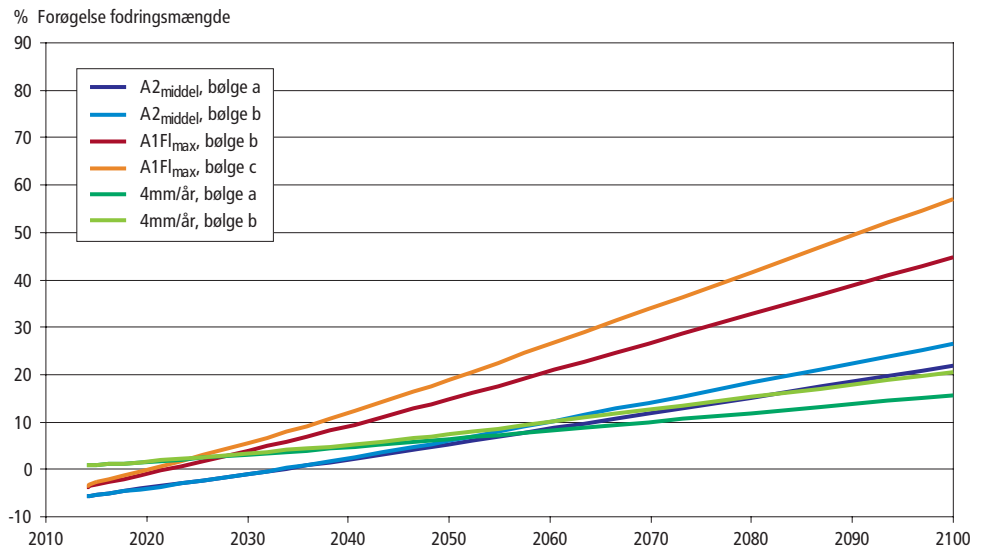
På figur 4.7 og figur 4.8 er resultaterne for de forskellige scenarier samlet for henholdsvis den forventede samlede stigning af fodringsbehovet og den del,

der kun viser forøgelsen af fodringsbehovet grundet klimaændringer efter 2008.

Da fodringsbehovet for den kommende fællesaftale, som forventet løber frem til 2013, er afbildningerne af fodringsbehovet vist for perioden fra 2014 frem til år 2100.



Figur 4.7 Forøgelse af fodringsmængde på Vestkysten i forhold til grundmængde i 2008.



Figur 4.8 Forøgelse af fodringsmængde på Vestkysten alene grundet klimaændringer efter 2008.

Som tidligere bemærket er stigningstakten negativ i den første delperiode. Det kan i øvrigt konstateres, at scenarie 4mm/år kun giver størst stigning i fodringsbehovet i perioden frem til omkring år 2025. Det skyldes, at størrelsen af havspejlsstigningen i scenarie A1F<sub>max</sub> herefter overskrider de 4 mm/år. For scenarie A2<sub>middel</sub> og scenarie 4mm/år er resultatet ret ensartet, både hvad



angår størrelse og forløbet hen over tiden. Scenariet A1FI<sub>max</sub> adskiller sig markant fra de øvrige, hvilket primært skyldes den større havspejlsstigning.

Hensigten med beregning for en skare af scenarier er, at vise resultatet ikke udgøres af en specifik værdi, men med det manglende kendskab til klimaets udvikling, repræsenteres af intervaller. I tabel 4.17 er det samlede stigningsinterval for de valgte scenarier A2<sub>middel</sub>, A1FI<sub>max</sub> og 4mm/år præsenteret for udvalgte tidspunkter frem til år 2100.

	2015	2030	2050	2100
Samlet stigning (incl. profilforstejling)	÷4-+2 %	2-9 %	13-26 %	34-74 %
Stigning pga. klimaændringer efter 2008	÷6-+1 %	÷1-+6 %	5-19 %	16-57 %

Tabel 4.17 Stigningsinterval i fodringspct. i forhold til grundmængden i 2008 for de tre scenarier.

Som omtalt i afsnit 2.2 repræsenterer scenarie A2<sub>middel</sub> og scenarie A1FI<sub>max</sub> den øvre tredjedel af IPCC's klynge af scenarier. Ovennævnte intervalværdier vil derfor kunne forventes at repræsentere stigningstakter, som ligger i den øvre del af de forventninger, som kan udledes af IPCC's scenarier.

Scenarie 4mm/år, som ikke er et IPCC-scenarie, medfører det største fodringsbehov frem til omkring år 2025. Den samlede stigning i fodringsbehovet i 2015 er 2 % og tilsvarende 1 % for stigningen alene på grund af klimaændringer efter 2008.

Det skal bemærkes, at usikkerheden på forudsigelserne forøges i takt med længden af tidshorisonten. En tidshorisont for morfologisk udvikling alene frem til 2050 er lang og denne anskuelse forstærkes naturligvis med en valgt tidshorisont frem til 2100. Resultatet skal derfor også mere opfattes som vejledende. Efterhånden som de faktiske klimaændringer observeres samt indgår i beregningerne, og desto kortere perioden for forudsigelsen er, desto mindre usikker vil denne være. Det skal også bemærkes, at en del af forudsætningerne på de anvendte parametre hviler på antagelser og skøn og beregningerne er baseret på simple formeludtryk. Eksempelvis kan der stilles spørgsmål til antagelsen om lineær udvikling af profilhældningen på Vestkysten frem til år 2100.

## 4.7 Følsomhed

En væsentlig parameter til bestemmelse af langstransporten er den dominerende bølgeindfaldsretning. Som nævnt i afsnit 4.4.1 er der ikke fundet undersøgelsesresultater, som fremskriver en ændring af denne.

I stedet foretages en følsomhedsanalyse af hvilken betydning en ændring af bølgeindfaldsretningen vil have.

Ændring af bølgeretning vil ikke have betydning for effekten af havspejlsstigningen. Den vil derimod have indflydelse på størrelsen af langstransporten i surfzonen og dermed betydning for den fodring, der skal til for at kompensere for ændringen.

Formlen for langtransporten i surfzonen lyder  $Q = k_3 \cdot H_{s0}^{5/2} \cdot (\cos \alpha_0)^{1/4} \cdot \sin 2\alpha_0$ , hvor Q er langtransporten,  $k_3$  er en konstant,  $H_s$  er signifikant bølgehøjde,  $\alpha$  er vinklen mellem bølgefronten og kystlinjen og 0 er et præfix for dybt vand.

Ved vægtning med  $H_{s0}^{5/2}$  er den dominerende bølgeretning for Fjaltring bølgeomåleren for femårsperioden 2003-07 beregnet til 292°. Bølgerne er målt på 17,5 m vand, så det er en tilnærmelse, at der er tale om dybtvandsbølger.

Ændres bølgeindfaldsretningen på "dybt" vand ændres transportkapaciteten ligeledes. Med en antagelse om, at kystlinjen på Vestkysten groft taget har en retning med kystnormal 270° er ændringerne anført i tabel 4.18.

Ændring i f.t. bølgeindfaldsretning 292° grader (°)	Bølgeindfaldsretning grader (°)	Vinkel mellem bølgefront og kystlinje grader (°)	Procentvis ændring i langstransport i f. t. retning 292° %
-10	282	12	-40,7
-5	287	17	-18,9
-2	290	20	-7,2
0	292	22	0,0
+2	294	24	6,6
+5	297	27	15,3
+10	302	32	26,5

Tabel 4.18 Ændring i langstransport grundet ændring af dominerende bølgeretning.

Ændringerne skal ses i forhold til langtransporten. Det betyder, at ændringerne ikke har betydning for den del af fodringen, der bruges til opfyldning på grund af havspejlsstigningen.

Som det ses, er ændringerne betydelige selv for mindre ændringer i bølgeindfaldsretningen.

Ændringen i bølgeindfaldsretningen vil også have betydning for størrelsen af tværtransporten fra profilet uden for surfzonen og ind i surfzonen. Det må forudses, at jo mere bølgeindfaldsretningen ændrer sig i forhold til en retning vinkelret på kystlinjen, desto mindre vil bidraget til langtransporten i surfzonen være, og desto større vil erosionen i surfzonen blive.

Beskrevet på anden vis vil bidragene til langtransporten fra henholdsvis surfzonen og fra profilet uden for surfzonen – og dermed ændringen af fodringsbehovet – trække i samme retning i ét bølgeindfaldsvinkelrum, men trække i modsat retning for et andet, som anført i tabel 4.19.

Vinkel mellem bølgefront og kystlinje	Bølgeindfaldsretning	Surfzone	Kystprofil uden for surfzone	
		Bidrag til langstransport samt erosion i surfzonen	Bidrag til langstransport	Erosion i surfzonen
0° → ± 41,8°	270° → 311,8° 270° → 228,2°	Voksende	Aftagende	Voksende
±41,8° → ± 90°	311,8° → 360° 228,2° → 180°	Aftagende	Aftagende	Voksende

Tabel 4.19 Ændring af erosion i surfzonen ved kystlinjeorientering nord-syd.

Der er ikke regnet på størrelsen af ændringen i tværtransporten grundet ændring i bølgeindfaldsretningen.

## Referencer

- Ref. 1 <http://www.kyst.dk/sw11164.asp>
- Ref. 2 International Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Feb. 2007.
- Ref. 3 Kystdirektoratet. Analyse af middelvandstande i Vadehavet. April 2008
- 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 Kystdirektoratet. Klimaændringers effekt på kysten. Marts 2008
- Ref. 6 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. 7 Flerårig aftale om kystbeskyttelse på strækningen Lodbjerg til Nymindegab (Fællesaftalestrækningen) for perioden 2009-2013. September 2008.
- Ref. 8 Kystdirektoratet. Variationer i kystprofilen. December 2005.
- Ref. 9 Kystdirektoratet. Vestkysten '02. December 2003.
- Ref. 10 S. Bjerre Knudsen et al. Sediment Transport in the outer Part of the Coastal Profile. Coastal Engineering Conference 2002.
- Ref. 11 Danish Environmental Protection Agency. Denmark's Third National Communication on Climate Change. 2003.
- Ref. 12 Sediment Transport and Sand Waves North of Torsminde, Denmark. Phase 2. November 2001.
- Ref. 13 Kystdirektoratet. Sedimentbudget Vestkysten. December 2003.