



Miljø- og
Fødevareministeriet
Kystdirektoratet

Kystdynamik og kystbeskyttelse

Naturlige erosions- og
oversvømmelsesprocesser
– beskyttelsesmetoders
virkning
og økonomi

DHI, Hasløv & Kjærsgaard

April 2015

Redaktion: DHI, Hasløv & Kjærsgaard

Tekst: DHI, Hasløv & Kjærsgaard

Grafiker/bureau: DHI, Hasløv & Kjærsgaard

Fotos: DHI, Hasløv & Kjærsgaard

ISBN: 978-87-92124-04-3

Kystdynamik og kystbeskyttelse

Naturlige erosions- og oversvømmelsesprocesser -
beskyttelsesmetoders virkning og økonomi



Kystdirektoratet

Rapport

April 2015

Denne rapport er udarbejdet under DHI's ledelsessystem, som er certificeret af DNV-GL
for overensstemmelse med ISO 9001 for kvalitetsledelse



Kystdynamik og kystbeskyttelse

Naturlige erosions- og oversvømmelsesprocesser
samt beskyttelsesmetoders virkning og økonomi

Udarbejdet for

Kystdirektoratet

Repræsenteret ved

Per Sørensen, Kystteknisk chef



*Oversvømmelse i Frederikssund
under stormen Bodil 6.12.2013.*

Projektleder	Nils Drønen
Kvalitetsansvarlig	Ida Brøker
Projektnummer	11817774
Godkendelsesdato	4/24/2015
Revision	Endelig version
Klassifikation	Åben

INDHOLDSFORTEGNELSE

1	Introduktion	3
2	Kystdynamik.....	4
2.1	Eksposering af kysterne	4
2.1.1	Bølger.....	5
2.1.2	Tidevand	16
2.1.3	Stormflod.....	19
2.1.4	Klimapåvirkninger.....	21
2.1.5	Levetider og bølgeforhold for kystkonstruktioner i De Danske Farvande.....	23
2.2	Sedimentdynamik.....	25
2.2.1	De kystdynamiske processer	25
2.2.2	En iagttagelse på kysten	42
2.2.3	Erosionskystens sedimentbudget – det samlede billede	43
2.3	Oversvømmelsesdynamik.....	45
2.4	Ændringer af eksponeringsniveauer	49
2.4.1	Virkning af stigning i middelvandstanden	50
3	Erosions- og oversvømmelsesbeskyttelse – virkemåder og negative effekter	56
3.1	Eksposeringsgrader	56
3.1.1	Typiske bølge-, erosions- og litoraltransportforhold.....	56
3.2	Erosionsbeskyttelse	57
3.2.1	Hårde beskyttelsesstrategier	57
3.2.2	Beskyttelse der udnytter naturens kræfter	67
3.2.3	Videreudviklinger af beskyttelsesdesign med basis i hårde konstruktioner	80
3.2.4	Infrastruktur med andre formål.....	83
3.2.5	Karakteristik af forskellige løsninger til erosionsbeskyttelse	85
3.2.6	Projekter der forener kystrehabilitering og evt. sikring imod erosion og oversvømmelse	87
3.3	Strategier til at beskytte imod oversvømmelse	89
3.3.1	Løsninger placeret i baglandet.....	89
3.3.2	Lokale løsninger (byer og havne)	93
3.3.3	Forbehold for regionale variationer	96
4	Estimer for anlægs- og driftsudgifter for forskellige beskyttelsesstrategier	97
4.1	Erosionsbeskyttelse	98
4.2	Oversvømmelsesbeskyttende foranstaltninger.....	103
4.3	Forbehold for socioøkonomiske synergieffekter	107
5	Referencer	108

TABELLER

Tabel 2.1	Klassifikation af tidevandets størrelse	17
Tabel 2.2	Størrelser og klassifikation af 50 års middeltidshændelser for stormflodsvandstande	20
Tabel 2.3	Forventede stigninger i den årlige middelvandstand for Danmark i forhold til år 2000.	21
Tabel 2.4	Sandsynlighed for at dimensionsgivende hændelse overskrides , S [i %], indenfor levetiden, L [år], og returperioden T_d , [år]. Fra Mangor 2004.	23
Tabel 2.5	Omtrentlige dimensionsgivende bølgehøjder $H_{S,50}$ og stormflodsvandstand $V_{st,50}$ med en returperiode på 50 år for inklusiv en stigning i middelvandstanden på 0,25 m. Alle værdier i m.	24
Tabel 2.6	Bredde af den aktive zone b_{az} og den aktive dybde d_l for kyster med forskellige eksponeringsgrader.	29
Tabel 2.7	Oversigt over krav til topkote for eksponerede højvandsbeskyttelseskonstruktioner.	48
Tabel 2.8	Returperioder for vandstande som under nuværende forhold har en returperiode på 50 år og 100 år.	54
Tabel 3.1	Oversigt over høfdeparametre som funktion af eksponeringsgraden (farvandsområder).....	59

1 Introduktion

Kystdirektoratet har igangsat en kystanalyse med det formål at afdække en lang række forhold, der har betydning for kysternes tilstand samt planlægning for kystlandskabet herunder udførelse af beskyttelse imod erosion og oversvømmelse. Kysterne udgør overgangen mellem hav og land og kysterne er derfor påvirket af "havets kræfter" hvoraf de vigtigste er tidevand, stormflod og bølgepåvirkninger, samt af klimabetingede stigninger i middelvandstanden.

Projektets formål er at udforme et illustrativt materiale, som vil kunne sætte enhver med interesse i kystens forhold i stand til at sætte begreber på de danske kysters grundlæggende dynamik, de forskellige kystbeskyttelsesmetoders virkning på dynamikken - positive som negative - og endelig at give et overslag over størrelsesordner af etablerings- og vedligeholdelsesudgifter ved sådanne metoder.

Påvirkningerne på kysten giver anledning til forskellige processer, herunder sedimenttransport, kystmorfologiske ændringer og oversvømmelse af lavtliggende området. Disse forhold betegnes under et som *kystdynamik*, jævnfør titlen på dette arbejde og titlen på kapitel 2. De kystdynamiske forhold kan inddeles i forskellige grupper med forskellige karakteristika i form af en kystklassifikation. Kystklassifikationen siger derfor noget om kystdynamikken, men den udgør samtidig en vigtig vejledning til, hvordan man evt. kan beskytte en kyst og hvilke virkninger beskyttelsen vil have på kysten og kystlandskabet.

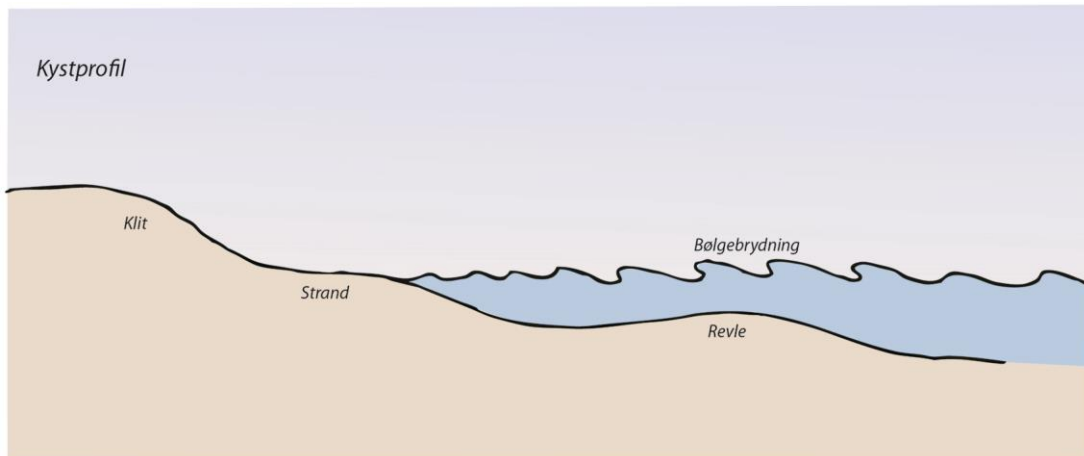
Kystdynamikken, herunder kysterosion og oversvømmelse, medfører ofte et behov for beskyttelse af stranden, kysten og/eller baglandet. Beskrivelsen af virkemåder af beskyttelse imod oversvømmelse og imod erosion - herunder de forskellige tilsigtede virkninger samt negative virkninger af kystbeskyttelsen - vil blive beskrevet under kapitel 3: *Erosions- og oversvømmelsesbeskyttelse – virkemåder og negative effekter*. Der vil blive givet vejledning til hvornår det vil være relevant at opføre kystbeskyttelse, eksempelvis som funktion af risikoen for kysterosion og oversvømmelse og som funktion af hvad der ønskes beskyttet på kysten og i baglandet. Herudover vil typen og omfanget af eventuel kystbeskyttelse blive beskrevet afhængig af kystklassifikationen.

Sluttelig vil kapitel 4 omhandle *Estimer for anlægs- og driftsudgifter* for de forskellige kystklassifikationer.

De tekniske aspekter af ovennævnte er allerede godt kendt af Kystdirektoratet og af diverse rådgivende firmaer, mens der mangler en mere populær beskrivelse og illustration af ovennævnte forhold.

Nærværende rapport søger at dække dette behov for en populær videnskabelig beskrivelse.

Vi håber, at det indenfor disse rammer er lykkedes at lave et materiale, der er i stand til at give læseren et grundigt indblik i de processer, der bestemmer kystens udvikling, for derved bedre at forstå de muligheder og begrænsninger som naturen og de eksisterende tekniske og økonomiske rammer sætter for kystbeskyttelse og beskyttelse mod oversvømmelse.



Figur 1.1 Et kystprofil består af en øvre del over vandet, klit og strand, og en ydre eller nedre del under vand, nogle gange med revler omkring hvor bølgerne bryder – andre gange uden revler.

2 Kystdynamik

Kysterne udgør overgangen mellem hav og land, og er i sagens natur eksponeret af havets kræfter, i form af brydende bølger, strømme, stormflod og tidevand.

Disse påvirkninger giver anledning til forskellige processer, herunder ophvirvling og flytning af havbundens sand på langs og på tværs af kysten (**sedimenttransport**), ændringer i kystens former (f.eks. gennem **erosion**) og eventuelt oversvømmelse af lavtliggende området ved ekstremt højvande. Da der er tale om processer og kræfter, der forandrer og virker på kysten over tid, vil vi bruge betegnelsen **kystdynamik** som samlebetegnelse for alle disse forhold. De kystdynamiske forhold kan inddeles i forskellige grupper hver deres karakteristika. Da de kystdynamiske forhold giver baggrunden for dannelse af kysten som landskab udgør disse grupperinger også et objektivi værktøj til at klassificere, hvilken slags kyst der er tale om i det ene eller det andet tilfælde (**kystklassifikation**). I det følgende er præsenteret en grundlæggende og – i så høj grad som det er muligt - letforståelig udredning af, hvordan kystens formende, omfordelende og nedbrydende kræfter virker langs de danske kyster. Der vil i udredningen blive fokuseret på forklaringer af de processer, der er centrale for de tekniske udfordringer Kystdirektoratet, borgere og samfund står overfor, når risici for erosion og oversvømmelser skal imødegås.

Erosion

Da der ikke skal være tvivl om, hvad der skal forstås ved det centrale begreb **erosion** vil vi med det samme - for klarheds skyld - indføre en definition:

Erosion er når strømme og bølger fjerner mere sand fra et givent område end der tilføres

2.1 Eksponering af kysterne

En introduktion til de underliggende mekanismer i de ovenfor omtalte påvirkninger på kysten er nødvendig, fordi det er disse påvirkninger og deres virkemåder, som sætter præmissen for, hvordan vi som samfund og borgere skal forholde os til kysten og dens foranderlige natur.

Den indføring sætter os derefter i stand til at forstå, hvordan bølgebrydere eller sandfodringer virker som kystbeskyttende foranstaltninger. Da størrelsen af påvirkningerne har betydning for dimensioneringen af relevante beskyttelsesforanstaltninger, vil der ligeledes blive introduceret en klassifikation af kysterne i forhold til påvirkningerne.

Påvirkningerne

De "påvirkninger" som har størst virkning på en kyst bliver beskrevet i de efterfølgende afsnit. Der vil blive skelnet mellem effekter af henholdsvis:

- Bølger
- Strøm

Vandniveauet

Ud over de direkte påvirkninger fra bølger og strømme er vandstanden vigtig at forholde sig til, fordi vandstanden er bestemmende for hvor i kystprofilen påvirkningerne foregår. F.eks. vil bølger ikke påvirke klitterne når vandstanden er lav, men hvis vandstanden er høj vil både klitter og diger være i kontakt med bølgerne. Vandets niveau er bestemt af to forhold

- Stormflod
- Tidevand.

Klimaforandringerne

Endelig er der effekten af *klimaforandringerne* at forholde sig til. Klimaforandringer skaber ændringer i både påvirkningerne og vandniveauet – fordi ændringer i stormmønstre skaber ændrede forhold for bølgedannelsen og fordi vi forventer at havets niveau over tid vil stige.

Havets bølger og strømme medfører påvirkninger på kysten

Havvandets niveau har betydning for hvor højt på kysten påvirkningerne foregår

Klimaforandringer forventes at ændre både påvirkningerne og havniveauet

2.1.1 Bølger

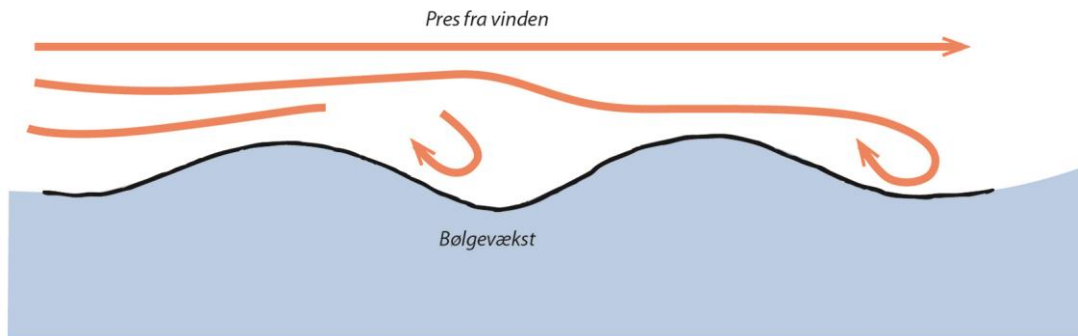
Vi vil gerne gøre læseren opmærksom på, at man med en vis indsigt i fysikken for vandbevægelser ved kysten kan danne sig et mere objektive grundlag for at tage stilling til kystens naturlige dynamik end det er muligt uden. Derigennem er man også bedre udrustet til at forstå mulighederne for på mest hensigtsmæssig måde at kunne beskytte kysten mod eventuel erosion mv..

Af denne grund har vi valgt i det følgende at give en oversigt over bølgenes dannelse, vandring, deres betydning for kysten, mv..

Bølger dannes af vind

Bølger dannes af vind, der blæser henover havoverfladen. Jo stærkere vinden er, jo større bliver bølgerne (højde og længde). Bølgehøjde og bølgelængde vokser ligeledes med længden af det havområde hvorover vinden blæser (dette betegnes med en fagterm for *det frie stræk*).

Bølgerne genereres i vindens retning og består af såvel korte som lange bølger.



Figur 2.1 Bølger genereres af vinden kræfter, der påvirker vandets overflade

Under en storm dannes bølger både tæt ved land og i dybere vandområder langt fra kysten (generelt der hvor vinden blæser). Efter stormen har lagt sig vil de store og lange bølger vinden har "produceret" i dybere områder stadig være der. Disse bølger vil forplante sig videre i den retning som vinden havde før den lagde sig. De kortere bølger vil hurtigt uddø uden vindens påvirkning.

De lange bølger - der betegnes *dønninger* - kan vandre meget langt uden at tabe deres energi, og kan derfor lang tid efter stormen har lagt sig dukke op ved kysten. Bølgerne fra dybere vand, der møder kysten vil begynde at dreje ind mod kysten, og samtidig vil de pga. den formindskede vanddybde vokse i højde. På et tidspunkt tæt på land vil bølgerne have vokset sig så høje, at de bryder - kendetegnet ved dannelse af hvirvelstrømninger og skum på toppene. Dette sker ved en dybde som ca. svarer til bølgens højde.

Bølger dannes når vinden blæser over havoverfladen

Jo stærkere vind jo større bølger

Jo længere frit stræk jo større bølger

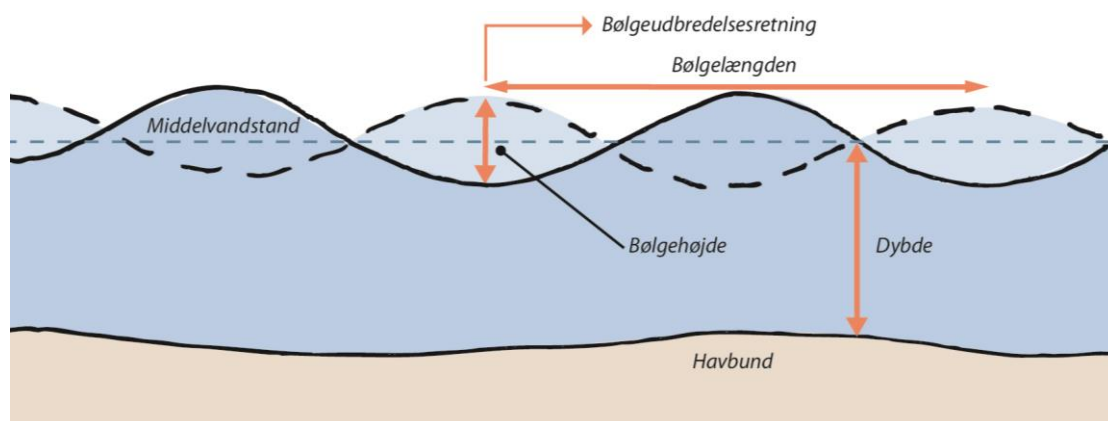
Bølgens udbredelsesretning følger vinden retning

Når vinden aftager vil de lange bølger stadig være der – disse bølger kaldes dønninger

Bølger drejer på aftagende vanddybde ind mod kysten hvor de bryder

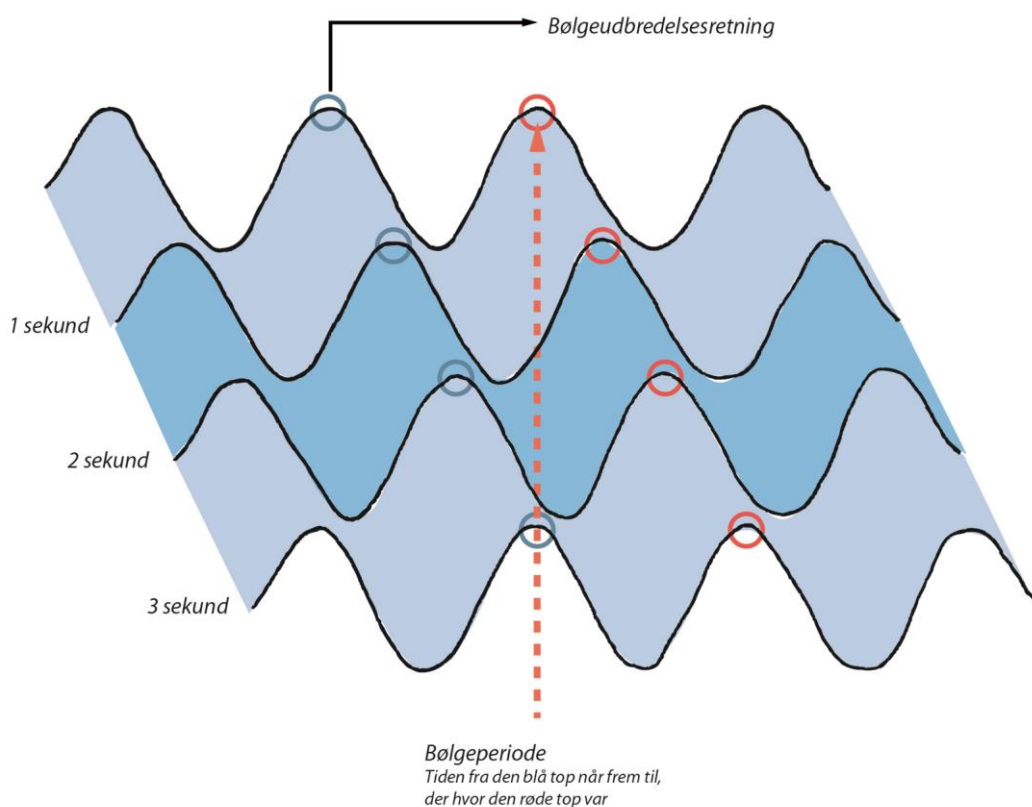
Tal på bølgerne

Ved kysten ser man ofte bølger af varierende størrelse komme i grupper, med forskellig højde mv.. Dette nogle gang lidt komplicerede billede vil man ofte forsimple og "oversætte" til et mere overskueligt billede af en enkelt gennemsnitlig eller typisk bølge. Hvis man gør det, bliver det nemmere at sætte nogle tal på, hvor store bølgerne ved kysten er på et givent tidspunkt. I figuren nedenfor er bølgens udstrækning vandret og lodret påført de betegnelser vi senere vil bruge, især bølgehøjden og dybden er vigtige. På denne måde kan vi knytte nogle tal på, hvor høje eller lange bølgerne er og derved kunne lave forskellige beregninger, f.eks. statistikker af bølgehøjden over et år mv..



Figur 2.2 Bølgehøjden, bølgelængden, dybden, middelvandsspejl, og vandring

Da bølgerne bevæger sig skal vi også sætte tal på hvor hurtigt dette sker. Det kan gøres ved at knytte bølgen til en tid, nemlig den tid det tager for bølgen af bevæge sig en bølgelængde. Dette kalder vi herfra for bølgeperioden. Bølgeperioden er illustreret nedenfor for et eksempel, hvor den pågældende bølges periode er 3 sekunder.



Figur 2.3 En illustration af begrebet bølgeperiode. Eksempel viser en bølge med en bølgeperiode på 3 sekunder.

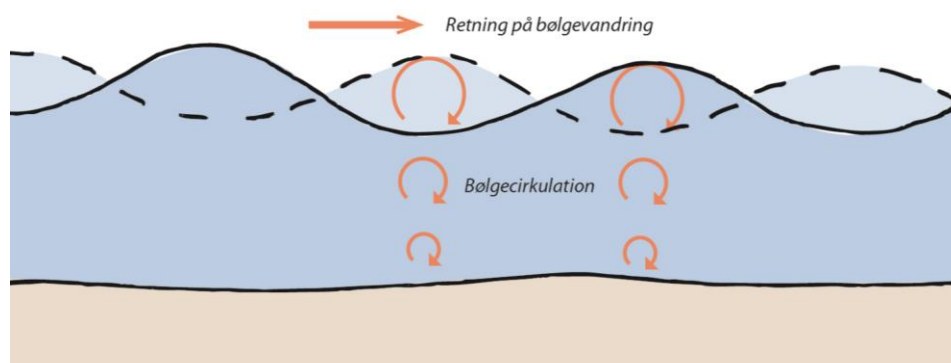
Der vil ofte være en forbindelse mellem hvor høje bølgerne er og hvor lang en periode de har. En højere bølge vil ofte have en større bølgeperiode.

Ud over selve bølgens størrelse vil bølgen udbrede sig i en eller anden retning, som der også kan sættes til tal på (så og så mange grader i forhold til kysten, mv.).

Bølger karakteriseres ved deres bølgehøjde, bølgelængde og bølgeperiode
Bølgen udbreder sig i en retning

Mere om bølgerne

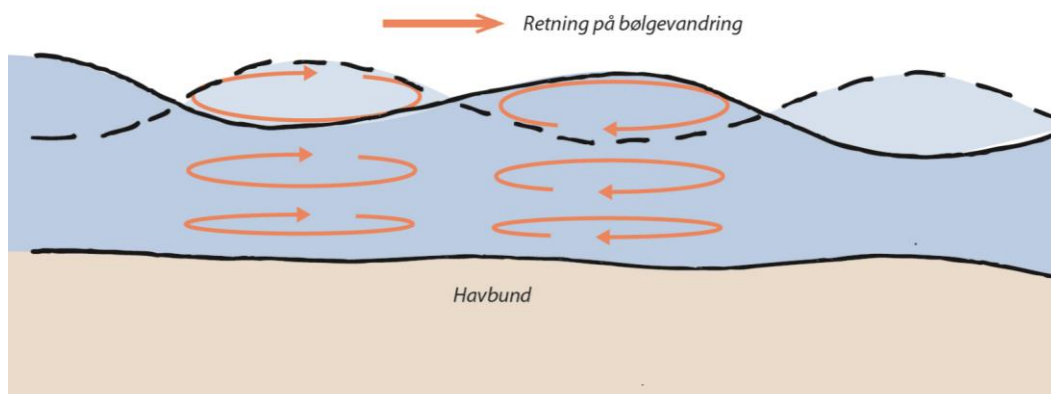
Vi har alle en ide om hvad en bølge er. Bølger har en højde og en længde og bevæger sig fremad i en retning (ved kysten ind mod land). Når bølgerne ser ud som om de skrider fremad, er det egentlig ikke vandet under dem der bevæger sig fremad. I virkeligheden er bølgens fremadrettede bevægelse i høj grad et resultat af cirkulære bevægelser af vandet under bølgen.



Figur 2.4 Bølgers fremadrettede bevægelse er i virkeligheden et resultat af vandets cirkulære bevægelser. Tegning svarer til en bølge på dybt vand.

Den tid det tager for en vandpartikel på denne måde at lave en cirkelbevægelse svarer til bølgens periode, hvilket som nævnt også svarer til den tid det tager for bølgen at bevæge sig en bølgelængde fremad (se forrige afsnit).

Når bølgen bevæger sig ind på lavt vand vil vandbevægelser blive mere "fladtrykte" sådan at de i den øvre del af bølgen mere ligner ellipser end cirkler og ganske tæt på bunden nærmest blot er bevægelser frem og tilbage.



Figur 2.5 Vandets bevægelse i bølgen bliver "fladere" på lavt vand

Vigtigst for at vi senere kan forstå erosionsforholdene er nu det faktum at: Jo højere bølgen er jo kraftigere er bevægelserne i bølgen. Er bølgen stor nok og vanddybden lille nok vil sedimentet ved bunden blive hvirvlet op, pga. strømmingen frem og tilbage henover bunden.

Hvis der ingen anden bevægelse er, vil det ophvirvlede sand lægge sig på bunden det samme sted som det er hvirvlet op når bølgerne ophører med at passere stedet. Derfor er bølger i sig selv ikke nødvendigvis ensbetydende med at bunden eroderer.

Bølger hvirvler sand op fra havbunden

Ophvirvling af sand er ikke i sig selv det samme som erosion

Når bølgenes styrke tager af efter en storm falder det ophvirvlede sand hurtigt til ro på bunden igen

Store bølger hvirvler mere sand op end små bølger

Langsgående strøm

En strøm er en generel bevægelse af vandet i en given retning, en bevægelse, der ikke varierer særlig meget over tid. En strøm har udover en retning også en 'størrelse', dvs. en fart eller hastighed, som man kunne måle i meter pr. sekund eller lignende.

Ved kysten er der i virkeligheden mange typer af vandstrømninger og strømme alt efter vind og vejr. Nogle strømme skyldes kræfter, der opstår fra bølgenes brydning og energitab - mens andre skyldes vind og tidevand.

Den vigtigste type af strømning at forstå i vores sammenhæng, er det man kalder "**den langsgående bølgestrøm**", senere blot den "langsgående strøm". Denne strøm kan kun dannes når bølgerne bryder. Bølgebrydning er et fænomen, der tager energien ud af bølgen, dvs. dæmper bølgen – hvilket man måske fornemmer, hvis man står på en kyst og ser bølgenes skum i brændingszonen, se figur 2.6. Hvis bølgens retning står skævt på kysten vil en del af bølgens energi blive omdannet til en langsgående strøm.



figur 2.6 Bølgebrydning langs kysten syd for Hanstholm.

Det sediment der måtte være ophvirvlet bliver ført i strømmens retning, dvs. langs kysten. Denne flytning af sand ophvirvlet fra bunden kaldes **sedimenttransport**.

Hvis kysten er lang og bølgerne ikke har forskellige højder eller retninger når de rammer kysten vil både ophvirvling og langsgående strøm have samme styrke og retning langs kysten. I det tilfælde vil der for en given strækning blive tilført lige så meget sand opstrøms fra (opstrøms = i modsat retning af strømmen), som der transporteres sand væk fra området af den langsgående strøm. Selvom bunden hvirvles op og sandet bevæger sig nedstrøms (nedstrøms = i strømmens retning), tilføres der ligeså meget sand som der hvirvles op og transporteres væk. Der er på den måde balance i sedimentmængden i området og der kan ikke siges at foregå erosion.

Vi har nu baggrunden for følgende meget vigtige princip for, hvordan vandets bevægelser (bølger og strøm) påvirker det sand der ligger på bunden:

Langsgående strømme flytter det ophvirvlede sand langs kysten

En langsgående strøm dannes når bølger rammer skråt ind på kysten

Flytning af sand pga. af bølger og langsgående strøm vil ikke forårsage erosion hvis forholdene er ens langs kysten

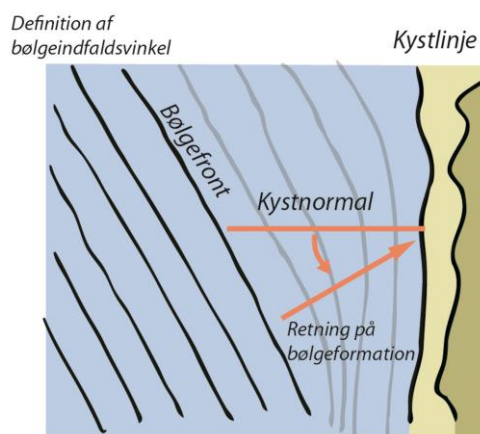
Vi vil vende stærkt tilbage til dette fænomen under afsnittet Sedimentdynamik.

Kystens klassifikation

Som beskrevet påvirker bølgerne sandet på havbunden og på stranden og har derved stor betydning for, hvordan kystens udseende ændrer sig, f.eks. pga. erosion.

Der er i tre forhold der er vigtige at forholde sig til:

- Udstrækningen af bølger i kystprofillet
- Størrelsen af bølger
- Retningen af bølger



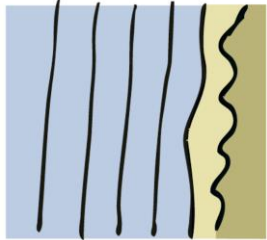
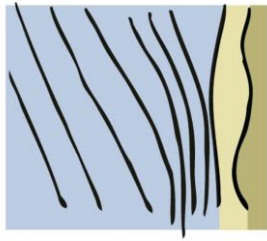
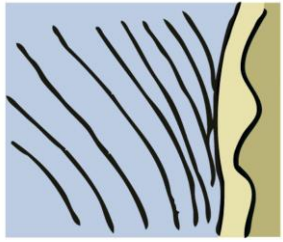
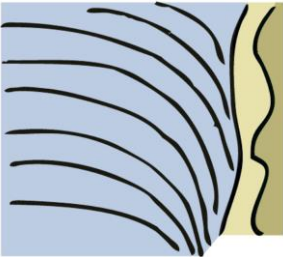
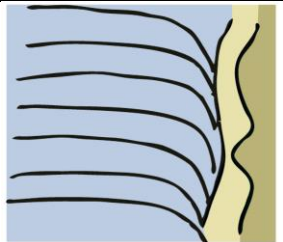
Figur 2.7 Definition af bølgeforhold, indfaldsvinkel og transportforhold, samt kyst klassifikation.



Figur 2.8 Et tydeligt eksempel på bølger der med en vinkel til kysten drejer ind mod stranden.

En kyst kan derfor klassificeres på basis størrelsen af den typiske bølgepåvirkning og retning af bølgerne (set i forhold til kystens orientering). Den foreslåede klassifikation er diskuteret i det følgende, se også Figur 2.7.

Kysterne inddeles i forhold til bølgeindfaldsvinkler for de fremherskende bølger og i relation til bølgeeksponering som følger. **Bølgeindfaldsklassifikationen** er som følger:

Klasse	Beskrivelse	Bølgerne rammer ind mod kysten (set fra oven)
1	Bølgerne rammer direkte ind på kysten	
2	Bølgerne rammer ind med en lille vinkel til kysten (mindre end 10°)	
3	Bølger rammer kysten med større vinkel (mellem 10° og 50°)	
4	Bølger rammer kysten med stor vinkel (mellem 50° og 85°)	
5	Bølger bevæger sig næsten parallel med kysten	

Med ordet "**eksponeringsgrad**", eller vendingen 'kysten er meget eksponeret', mv., refererer vi til størrelsen af bølgerne. Små bølger betyder at kysten er lidt eksponeret, mens store bølger betyder at kysten er meget eksponeret. Da disse forhold hænger sammen med kystens sedimentdynamik vil vi vente med at gå videre ind i dette, til afsnittet om sedimenters erosion og

vandring, men i stedet blot nævne at de forskellige eksponeringsgrader, kan ses som en inddeling af de danske kyster fra vest mod øst og fra kysten og ind i fjordene. Den vestjyske kyst er således en meget eksponeret kyst, kyster ud til Kattegat og Østersøen er eksponerede, kyster langs de indre danske farvande er mindre eksponerede og kyster inde i fjordene er meget lidt eksponerede.

En kyst kan naturligt klassificeres ud fra de typiske bølgeforhold ved kysten

En kyst kan klassificeres ved kystens kombination af typisk bølgehøjde (eksponeringsgrad) og bølgeindfaldsvinkel

I nærværende analyse vil vi koncentrere os om de typiske bølgehøjder

Hvilken bølgehøjde? - middelbølgehøjde og returperiode

Når vi taler om bølgehøjder er vi nødt til at definere lidt nærmere, hvad vi egentlig mener, da bølgeforholdene ved kysterne ændrer sig fra time til time, fra dag til dag, fra sæson til sæson, mellem det ene år og det andet år, osv..

Der skelnes mellem 1) statistiske gennemsnit af bølgehøjder og 2) sandsynligheden for at en bølgehøjde får den ene eller anden værdi ved en ekstrem hændelse (f.eks. stærke storme) *samt* hvor tit det sker.

Middelværdi

Den gennemsnitlige bølgehøjde siger noget om, hvilken bølgehøjde, der typisk vil være ved den givne kyststrækning.

Returperiode

For ekstremhændelser er det nødvendigt at indføre et begreb om, hvor sandsynligt det er, at der vil forekomme en given bølgehøjde ved den givne kyststrækning. Dette gør man på en måske lidt omvendt måde, idet begrebet returperiode indføres. Hvis man for eksempel siger "en bølgehøjde på 5.0 m med en returperiode på 100 år", mener man at det er en sandsynlighed på 1/100, dvs. 1%, for at denne bølgehøjde forekommer på et år. Alternativt kan det fortolkes sådan, at returperioden er den *karakteristiske* eller *gennemsnitlige tid* man forventer der går mellem en given hændelse er sket og den gentager sig igen. Hvis vi f.eks. *i gennemsnit* ser en bølgehøjde ved en kyst på 5.0 m hvert 100. år siger man, at bølgehøjden på 5.0m svarer til en 100 årshændelse. Dette betyder på den anden side ikke, at det er fuldkomment usandsynligt at en bølgehøjde på 5.0 m dukker op flere (eller færre) gange over 100 år.

Middelbølgehøjden siger altså noget om, hvordan kysten set over længere perioder er eksponeret af bølger. Returperioden siger noget om hvor store bølger, der forventes ved ekstremhændelser og hvor tit de sker.

Læg mærke til at både middelværdi og returperiode kunne indføres for andet end bølgehøjder. F.eks. bølgeperioder eller vandstande, osv. Senere vil vi netop bruge de samme termer blot for vandstande.

Middelbølgehøjden er den gennemsnitlige bølgehøjde over en given periode (f.eks. et år)

Returperioden angiver det antal år der sandsynligvis vil være mellem en ekstremhændelse

De danske kysters bølgeforhold

Fra Kystdirektoratets bølgeatlas for danske farvande, jævnfør Ref. /4/, er udtrukket bølgeforhold med 50 års returperiode, jævnfør Figur 2.9.



Figur 2.9 Størrelsesordner af typiske bølgehøjder i meter og bølgeperiode i sekunder over udvalgte strækninger for de danske farvande – svarende til en *returperiode* på 50 år. Fortolkning af Kystdirektoratets bølgeatlas.

2.1.2 Tidevand

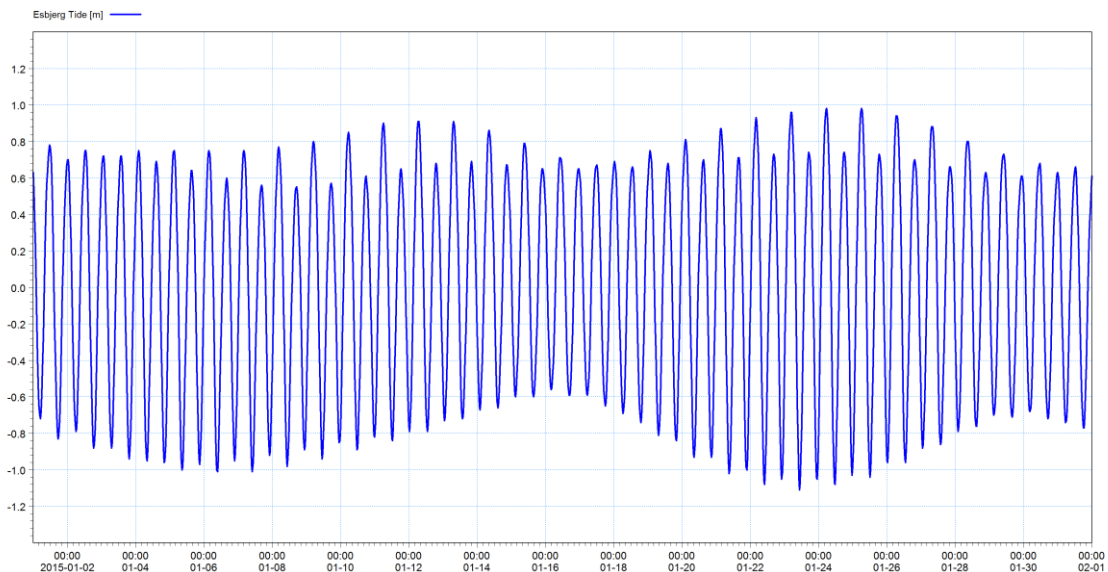
Tidevand er periodiske vandstandsændringer som forekommer på grund af solens og månens massetiltrækning på vandet i verdenshavene kombineret med jordens rotation, månens rotation omkring jorden og jordens/månens rotation omkring solen. Tidevandet dannes hovedsagelig på dybt vand og forplanter sig derefter som en lang bølge ind over alle havvandsområdet på jorden. Tidevandets størrelse varierer afhængigt af tidevandsbølgens forplantning fra oceanerne ind i vandområdet med begrænset vanddybde og udstrækning, derved kan tidevandet ændre størrelse indenfor relativt små afstande.

Tidevandet består af forskellige såkaldte *komponenter*, hvoraf de vigtigste er:

- de halvdaglige komponenter som giver anledning til to højvander og to lavvander per dag:
- de daglige komponenter som giver anledning til et højvande og et lavvande per dag

Kombinationen af alle disse komponenter giver anledning til en overordnet variation af størrelsen af højvander og lavvander med en periode på ca. 14,8 dage resulterende i springtid, hvor man har maksimale højvander og lavvander og niptid, hvor man har et svagere tidevand. Herudover kan der være forskel på om det er daglig eller halvdaglig tidevand der forekommer. Springtid forekommer ved fuldmåne og nymåne.

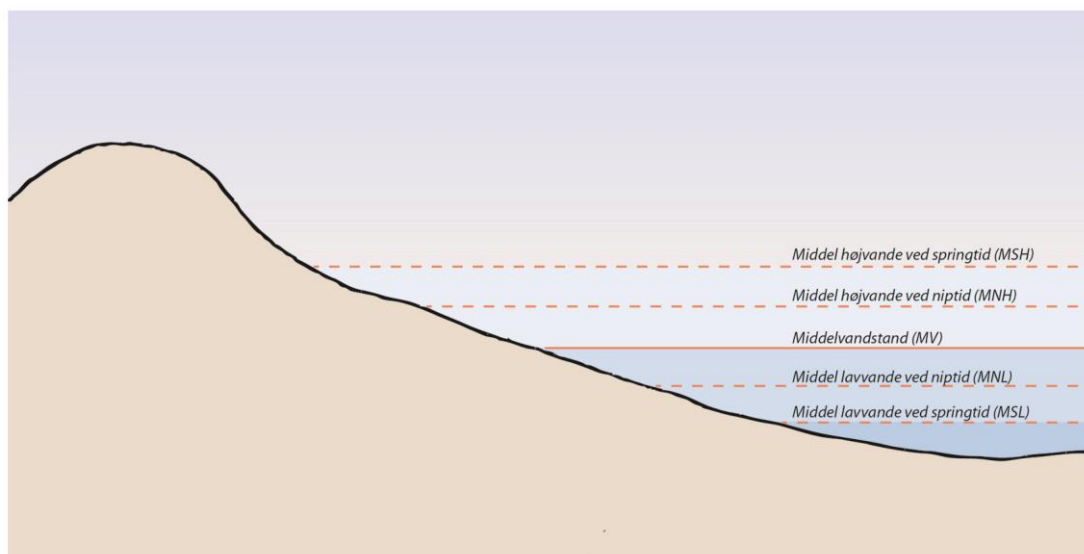
Et eksempel på hvordan vandstanden varierer med tiden grundet tidevandet er præsenteret i Figur 2.10, som viser tidevandets variation i Esbjerg over en måned.



Figur 2.10 Tidsserier af tidevandet i Esbjerg for januar, 2015.

I Esbjerg dominerer det halvdaglige tidevand, men der er dog et mindre bidrag fra daglige komponenter. Det fremgår tydeligt at tidevandets størrelse giver to højvander og to lavvander per dag, forskellen i størrelse af disse indenfor det samme døgn skyldes overlappningen af de daglige og de halvdaglige komponenter. 15-dages variationen som giver anledning til nip- og springtid ses ligeledes tydeligt.

Tidevandet karakteriseres ved følgende tidevandsstørrelser:



Figur 2.11 Illustration af de 2 forskellige daglige højvande og lavvande

MSH: Middel højvande ved springtid

MNH: Middel højvande ved niptid

MV: Middelvandstand

MNL: Middel lavvande ved niptid

MSL: Middel lavvande ved springtid

Forskellen mellem MSH og MSL – der kaldes tidevandets størrelse - inddeles i følgende kategorier:

Makro tidevandsområde:	Tidevand større end 4 m
Moderat tidevandsområde:	Tidevand på mellem 3 m og 4 m
Mikro tidevandsområde:	Tidevand på mindre end 2 m

Tidevandet i Danmark er domineret af halvdagligt tidevand. Tidevandets størrelse for forskellige udvalgte havnebyer er angivet i følgende tabel:

Tabel 2.1 Klassifikation af tidevandets størrelse

By/område	Tidevandets størrelse	Regime
Esbjerg (Vadehavet)	1,8 m	Mikro
Thorsminde (Vestkysten)	0,6 m	Mikro
Thyborøn (Vestkysten)	0,4 m	Mikro
Frederikshavn	0,5 m	Mikro
Kattegat (Århus)	0,4 m	Mikro
Indre Danske Farvande	0,2 m	Mikro

Af ovenstående tabel kan ses at tidevandets størrelse overalt i Danmark er karakteriseret som "mikro", og tidevandet i Danmark kun er af nævneværdig betydning langs den sydlige del af Vestkysten (Vadehavet) mens det i alle andre områder er mindre end ca. 0,5 m og specielt er det næsten helt fraværende i de indre dele af de danske farvande.

Det skal noteres at disse forhold er karaktertræk der gælder for Danmark, og at der globalt findes kyster med meget større tidevandsforskelle.

Tidevand dannes som følge af tiltrækningskræfter fra månen og solen

Tidevandet kan forudsiges med stor præcision

Tidevandets størrelse er afhængig af lokaliteten

2.1.3 Stormflod

Stormflod er den resulterende vandstand, som forekommer under storm. Stormflod er den samlede virkning af tidevandet og vindstuvninger af vand forårsaget af storm og farvandenens fysiske struktur, orientering og dermed indvirkning på stuvningsprocesserne. Stormflod forekommer således ikke regelmæssigt ligesom tidevandet, men under kraftige storme som omfatter større havområder. Stormflod er derfor ud over vindstyrken, ligeledes afhængig af vindens retning og varighed under en given storm.

Stormflodsvandstande og tidevandet måles ved ca. 50 stationer på kysterne i de danske farvande og stormflodernes størrelse er analyseret statistisk.

Kystdirektoratet udgiver hvert femte år opdaterede højvandsstatistikker og beskriver på det grundlag de høje vandstande i forhold til en **returperiode** (ordet **middeltidshændelse** bruges nogle gange for det samme). En returperiode for højvande er den tid der gennemsnitligt forløber mellem højvander. F.eks. bruger man typisk returperioder på 20 år, 50 år og 100 år. En vandstand med en returperiode på 50 år kaldes også for "en 50 års hændelse".

Fordelingen af 50 års hændelser ved de danske målestationer fremgår af Figur 2.12.



Figur 2.12 Størrelsen af 50 års vandstandshændelser i Danmark (røde tal), jævnfør Ref. /1/.

Vandstande med 50 års returperiode forskellige steder i Danmark er angivet i nedenstående Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Størrelser og klassifikation af 50 års returperiode for stormflodsvandstande

By/område	50 års returperiode for stormflodsvandstande
Esbjerg og Vadehave	> ca. 4,0 m
Hvide Sande til Thyborøn	2,5 – 3,0 m
Vestlige del af Limfjorden	Ca. 1,9 m
Alle øvrige Danske stationer	1,3 – 1,8 m
Bornholm	Ca. 1,2 m

Stormflod i Nordsøen forekommer hovedsagelig ved kraftige vinde mellem vest og nord. De indre danske farvande nord for Lillebælt, Storebælt og Drogden i Øresund inkl. Københavns Havn hænger på grund af vandets strømning sammen med vandstanden i Nordsøen, og højvande i disse farvandsområder forekommer derfor også ved kraftige vinde mellem vest og nord.

De indre danske farvande syd for Lillebælt, Storebælt og Drogden tærsklen hænger sammen med den sydlige del af Østersøen. Højvande i disse områder forekommer derfor oftest i forbindelse med kraftige vinde mellem nord og øst.

Stormflod betegner den hævnning af vandstanden som finder sted under en ekstrem stormhændelse

Stormflod skyldes vindstuvning og trykfald i luften ved passage af lavtryk

*Stormfloder karakteriseres ofte ved deres **returperiode***

Sammenfald af stormflod og store bølger

Som vi har diskuteret er der en sammenhæng mellem vind og bølger. Samtidig har vi præsenteret at stormflod er højvande genereret af vind og tryk under særligt kraftige storme (lavtrykspassager). Derfor er det ikke overraskende, at der ofte er en sammenhæng mellem højvande pga. stormflod og store bølger genereret af kraftig vind. Dette er vigtigt fordi det netop er sammenfaldet af disse to effekter, der giver særlig store påvirkninger af klitterne og digerne.

Hertil skal så lægges om tidevandet ved den givne storm er på sit højeste og dermed forøger risikoen for overskyl, erosion og brud af klitter og diger endnu mere. Vi vil senere komme mere ind på disse forhold under 'akut erosion' og oversvømmelse.

Den generelle havniveaustigning vil ydermere have betydning for disse forhold. Også det vil vi komme mere ind på senere.

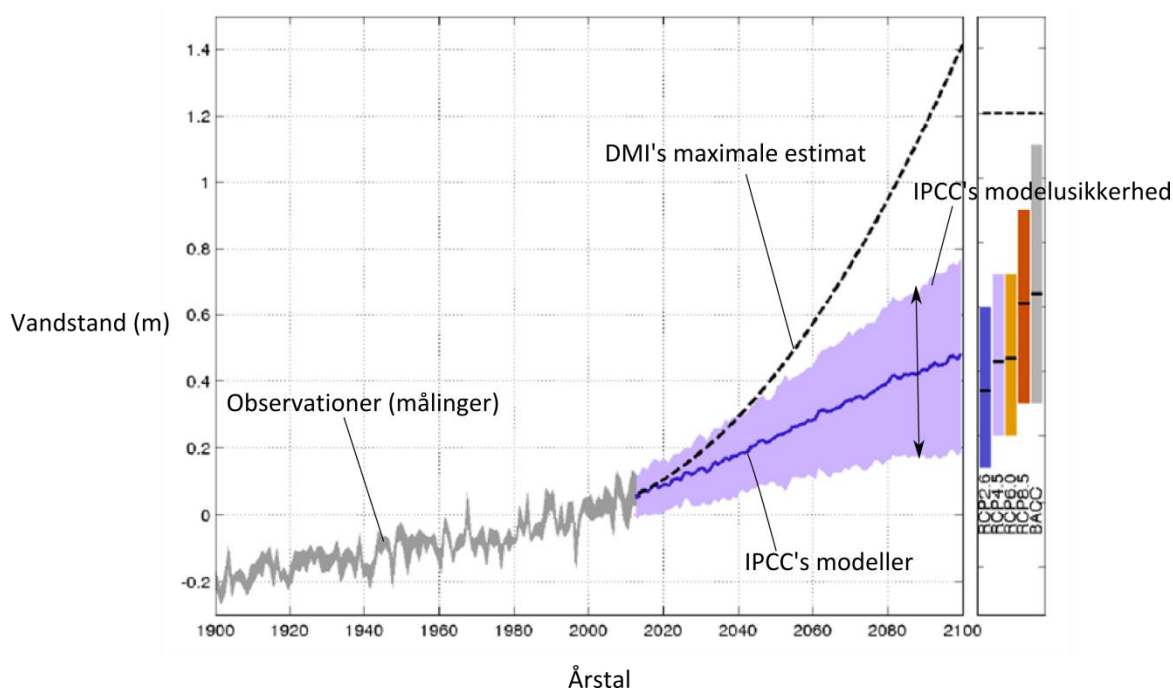
2.1.4 Klimapåvirkninger

Klimapåvirkningerne vil bl.a. medføre ændrede vindforhold og stigende middelvandstand.

De ændrede vindforhold vil medføre ændringer i bølge- og stormflodsforholdene, men disse ændringer skønnes i nærværende sammenhæng at være af underordnet betydning i forhold til virkningen af stigningen i havspejlsniveauet.

Den internationale klimakommission IPCC udgav i 2013 sin femte rapport om vurderinger af effekten af klimaforandringer, jævnfør Ref. /2/.

På grundlag af denne og andre kilder udgav Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) i 2014 rapporten: Fremtidige klimaforandringer i Danmark, Ref. /3/. I denne rapport er angivet illustrationen over forventede havspejlsstigninger i Danmark. I Figur 2.13 ses en tilpasset version af denne graf



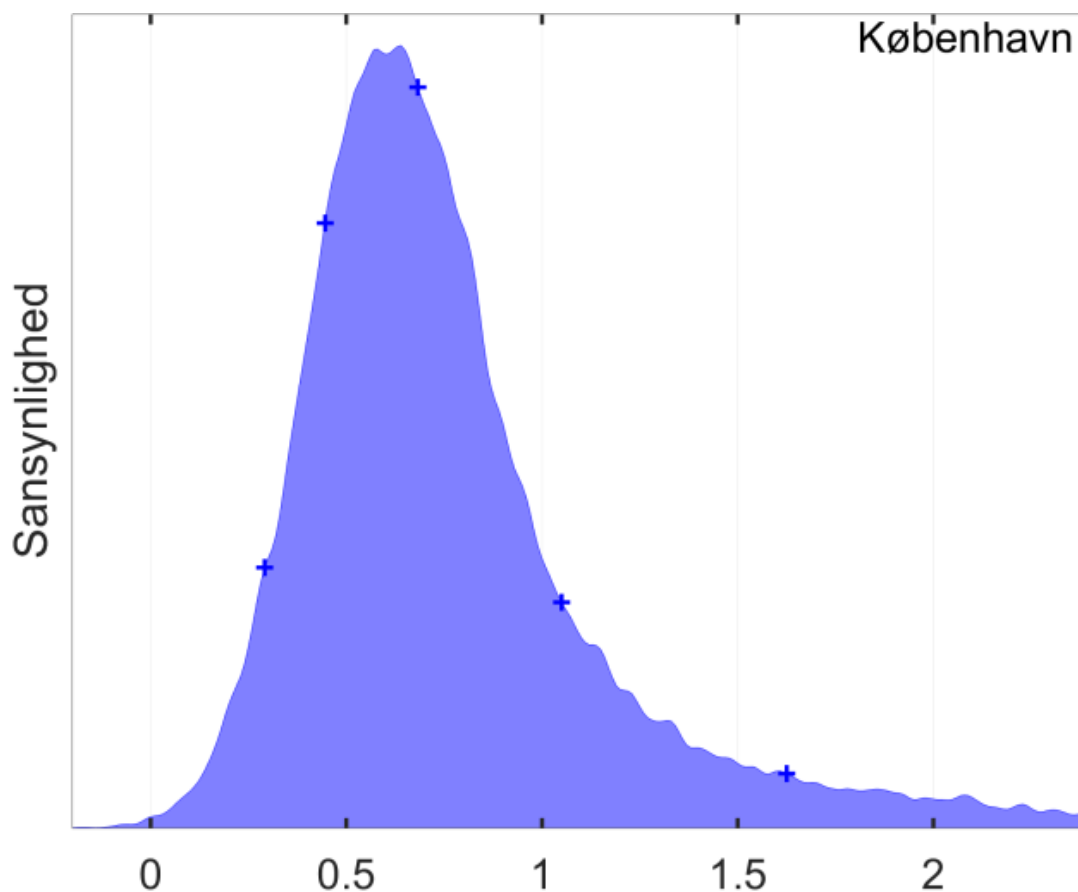
Figur 2.13 Estimerede havspejlsstigninger for Danmark, tilpasset fra Ref. /3/. Den grå kurve svarer til observationer fra danske målestationer i årene op til 2013. Den blå kurve er gennemsnittet af forudsigelser fra forskellige klimamodeller. Den lilla "sky" illustrerer variationen af resultaterne fra fem modeller. Den stiplede kurve viser DMI's mest ekstreme fremskrivning, "worst case".

I Tabel 2.3 ses de forventede stigninger i den årlige middelvandstand som præsenteret af DMI.

Tabel 2.3 Forventede stigninger i den årlige middelvandstand for Danmark i forhold til år 2000 for et scenarie med stor udledning af drivhusgas.

Stigning i årlige middelvandstand i forhold til år 2000	År 2045 (om 30 år)	År 2081 - 2100
Estimat for middelværdi	0,25 m	0,6 m
DMI's øvre estimat	0,35 m	1,2 m

Det skal bemærkes at der er stor usikkerhed vedrørende disse fremskrivninger. Dette er illustreret ved fordelingen af den sandsynlige havniveaustigning for København i år 2100 som vist i Figur 2.14. Det fremgår, at sandsynligheden vurderes størst omkring de 0,7 m, men værdier på 2 m eller højere kan ikke udelukkes, ligesom mindre stigninger heller ikke kan udelukkes. Denne figur er baseret på typiske scenarier kombineret med usikkerheden i afsmeltningen fra de store iskapper ved polerne, fra Ref. /8/.



Figur 2.14 Sandsynlige havniveaustigning for København i år 2100, fra Ref. /8/.

Havniveauet forventes af DMI at være steget mellem 0,3 m og 1,2 m i år 2100

2.1.5 Levetider og bølgeforhold for kystkonstruktioner i de danske farvande

I de foregående afsnit er dimensioneringsgrundlaget for bølger, tidevand, stormflod og klimaændringer beskrevet for de danske farvande. Disse vil indgå som vejledende dimensioneringsforudsætninger for de forskellige kystsikringskonstruktioner, som vil blive beskrevet senere i denne rapport.

Når man skal dimensionere et kystsikringsprojekt skal man tage hensyn til følgende parametre:

- Levetiden for projektet
- Den acceptable sandsynlighed for at den dimensionerende hændelse optræder indenfor levetiden
- Disse to parameter fører til en anbefalet returperiode for de dimensionsgivende hændelser

Sammenhængen mellem levetid, acceptabe sandsynlighed for hændelse og for returperioden fremgår af Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Sandsynlighed for at dimensionsgivende hændelse overskrides, S [%], indenfor levetiden, L [år], og returperioden T_d , [år]. Fra Mangor 2004.

Levetid (L) i år	Returperiode i år								
	5	10	30	50	100	500	1000	10,000	100,000
1	20%	10%	3%	2%	1%	0.2%	0.1%	0.01%	0.001%
5	67%	41%	16%	10%	5%	1%	0.5%	0.05%	0.005%
10	89%	65%	29%	18%	10%	2%	1%	0.10%	0.01%
20	99%	88%	49%	33%	18%	3%	2%	0.2%	0.02%
30	100%	96%	64%	45%	26%	6%	3%	0.3%	0.03%
50	100%	99%	82%	64%	39%	10%	5%	0.5%	0.05%
100	100%	100%	97%	87%	63%	18%	10%	1%	0.1%
200	100%	100%	100%	98%	87%	33%	18%	2%	0.2%
500	100%	100%	100%	100%	99%	63%	39%	5%	0.5%

For en kystsikringskonstruktion vil det typisk være relevant at dimensionere for en levetid $L = 30$ idet et kystsikringsprojekt (hård beskyttelse) typisk vil skulle vedligeholdes eller tilpasses klimaændringerne efter ca. 30 år. Accepteres en sandsynlighed på ca. 50% for at den dimensionsgivende hændelse overskrides inden for levetiden ses dette at svare til en returperiode $T_d \sim 50$ år. I oversigten over dimensionsgivende hændelse benyttes derfor bølgehøjder og stormflodshøjder med en returperiode på $T_d = 50$ år. Med en levetid for kystsikringsprojekterne på 30 år anvendes en stigning i den årlige middelvandstand på 0,25 m.

Diger der beskytter større byer mod store oversvømmelser kan dimensioneres mod hændelser med en længere returperiode. Hollands diger dimensioneres således mod hændelser med returperioder på flere tusinde år.

Under disse antagelser får følgende dimensionsgivende størrelser for bølgehøjder og vandstande for 6 forskellige typer af de danske farvande som præsenteret i tabel 2.5.

Det ses at begrebet returperiode knytter sig til en sandsynlighed for at en hændelse overskrides i et bestemt tidsrum. Sandsynligheden for at en 100 års hændelse overskrides et givet år er således 1%. Det, der sker i et år, er uafhængigt af det foregående. Selv om 100 års hændelsen er indtruffet i år, er sandsynligheden for, at den overskrides i det næste år stadig 1%.

Tabel 2.5 Omtrentlige dimensionsgivende bølgehøjder og stormflodsvandstand med en returperiode på 50 år inklusiv en stigning i middelvandstanden på 0,25 m. Alle værdier i m.

	Bølgehøjde	Vandstand stormflod	Stigning i havniveau	Total vandstand
Farvandsområde	(m)	(m)	(m)	(m)
Fjorde og beskyttede områder	1,0	1.7	0,25	2,0
Vadehavet	2,0	4,4		4,7
Sunde og bæltter	2,5	1.6		1,9
Kattegat og Østersøen	3,5	1.6		1,9
Bornholm	4,0	1.2		1,5
Nordsøen	7,0	3,0		3,3

Ved begyndelsen af et givent kystprojekt bestemmer man sig først for levetiden af projektet (konstruktionen, mv.)

Ud fra den valgte levetid findes en tilsvarende returperiode og sandsynligheden for overskridelse (tabel).

Bølgehøjder og vandstande der svarer til returperioden for den pågældende lokalitet bestemmes derefter (statistikken for området)

Den vandstand og bølgehøjde der hermed er bestemt bruges til at fastlægge dimensionerne på den pågældende konstruktion (eller lignende)

2.2 Sedimentdynamik

De danske kyster består - som det meste af den danske undergrund - hovedsagligt af aflejrede sedimenter (ler, sand, sten, osv.). Bølgers og strømmes kræfter kan derfor forholdsvis let flytte kystens materiale og forårsage erosion.

I visse områder er der herudover lag af mere eller mindre svært nedbrydelige kalk- og moræneaflejringer, som fungerer som geologisk mere stabile formationer. Under erosion og transport af sedimenterne vil det fine ler blive vasket ud og ført til roligere områder på dybere vand eller i meget rolige områder i en fjord eller lagune. Derfor ses næsten kun sand og grus og sten på strandene, som er udsat for bølgepåvirkning.

For at udtale sig om kysterosion og mulige metoder til beskyttelse mod erosionen er man derfor nødt til at forstå samspillet mellem bølge- og strømkræfter og sedimenternes flytning.

Eksposeringerne som omtalt i afsnit 2.1 giver anledning til forskellige processer langs kysterne, herunder sedimenttransport og kystmorfologiske ændringer i form af aflejring og kysterosion. Disse forhold betegnes under et *sedimentdynamik*, og de væsentligste træk ved disse forhold beskrives i det efterfølgende.

De sedimentdynamiske forhold kan inddeles i forskellige grupper med forskellige karakteristika i form af en kystklassifikation. Kystklassifikationen siger derfor noget om kystdynamikken men den udgør samtidig en vigtig vejledning til hvordan men evt. kan beskytte en kyst og hvilke virkninger beskyttelsen vil have på kysten og kystlandskabet.

De såkaldte sedimentdynamiske eller litorale processer, kan opdeles i transportprocesser og resulterende morfologiske processer som beskrevet i det følgende.

2.2.1 De kystdynamiske processer

Når man beskriver de forhold der kendetegner kysten, om det er bølger, sedimenter eller flora og fauna, vil man ofte bruge begrebet "litoral". Litoral henviser i vores sammenhæng til det kystnære område hvor sedimenter mobiliseres og flyttes af bølger og strøm. Med formuleringen "litorale processer" mener man således bølge, strøm og sedimentbevægelser i den kystnære zone. Vi vil i det følgende ofte bruge ordet litoral i denne betydning.

Typer af litorale processer

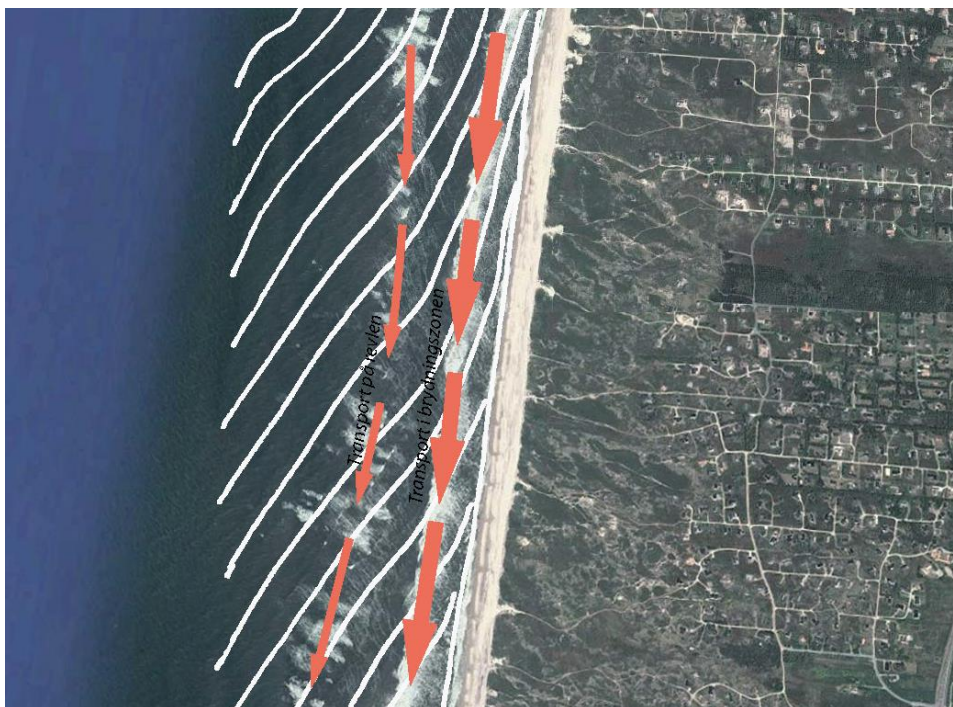
De litorale processer (transport af sediment foran kysten), foregår hele tiden, men varierer i størrelse og udstrækning afhængigt af de aktuelle påvirkninger. I nærværende sammenhæng beskæftiger vi os udelukkende med *de gennemsnitlige årlige forhold*, som beregnes som summen af alle transportkomponenter over et gennemsnitligt år.

De litorale processer kan inddeles i to typer:

- Langtransport
- Tværtransport

Langtransport

Transport af sand på langs af kysten, den såkaldte **langtransport** - eller med en ældre betegnelse materialvandring. Langtransporten afhænger af bølge- og vandstandsforhold og er fordelt over kystprofilen ud fra strandlinjen, og varierer afhængigt af bundformerne, for eksempel revler. I beskrivelsen af transportforholdene vil vi forudsætte at bunden er fuldt dækket af almindeligt strandsand med mindre andet er nævnt. Man vil ofte tale om langtransporten som et gennemsnit af sedimenttransporten langs kysten over året. Den øjeblikkelige langtransport kan således godt svinge i både styrke og retning, mens det årlige gennemsnit vil have en værdi der typisk for det pågældende område. Langtransporten er særdeles vigtig for det vi senere vil kalde 'kronisk erosion'.



Figur 2.15 Bølger, som falder ind på en strand og driver en langsgående transport. Hvide linjer viser bølgetoppe. Orange pile indikerer langstransportens retning og størrelse.

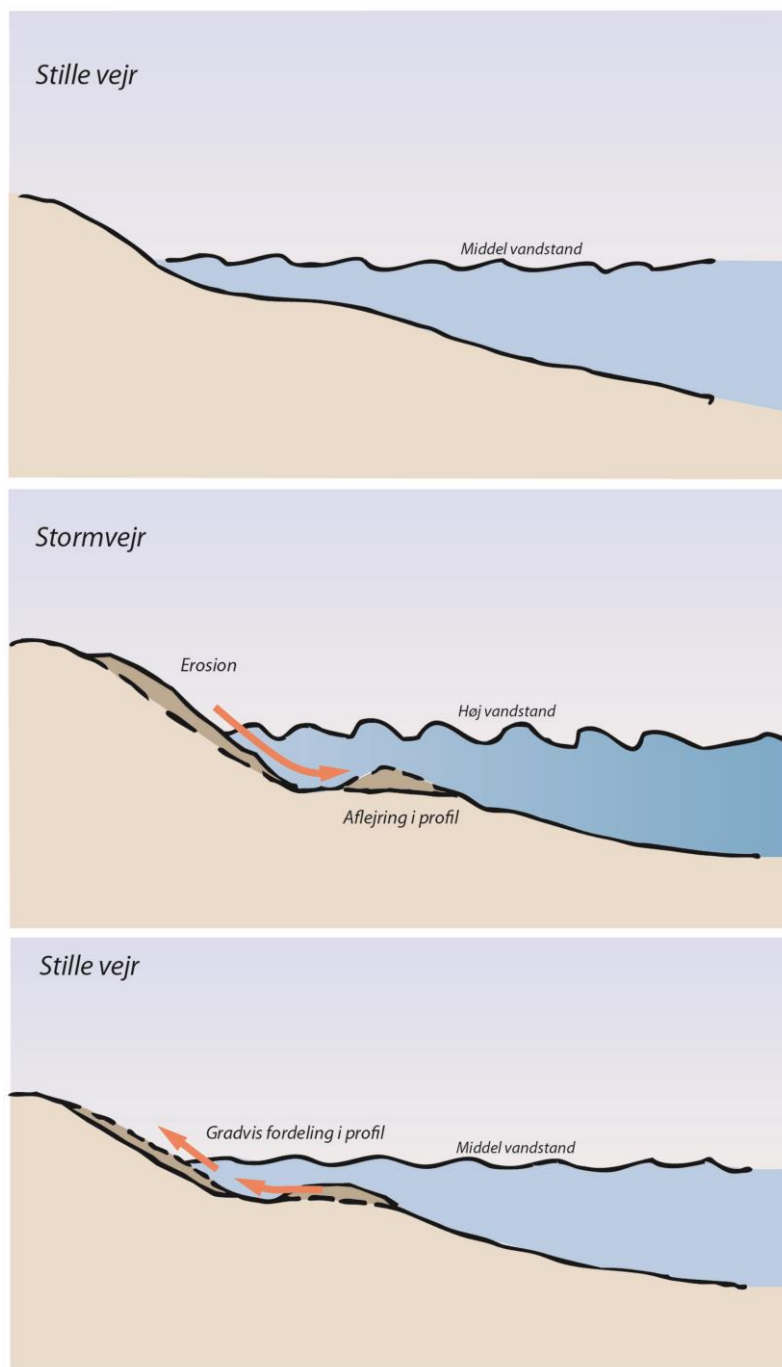
Langtransporten betegner den transport eller bevægelse af sedimenter der sker langs kysten

Langtransporten forårsages af en langsgående strøm der dannes når 1) bølger danner en vinkel på bundkonturerne og 2) de bryder

Langtransport kaldes også "litoraltransport"

Tværtransport

Transport af sand på tværs af kystprofilen kaldes **tværtransport**. Denne type transport inddeles i to typer, dels søværts transport (udadgående), som vil medføre erosion af strand og kliffod og udrykning af eventuelle revler og dels landværts transport (indadgående), som vil medføre aflejring på stranden og indrykning af eventuelle revler. Man regner normalt med at tværtransport processerne over et år er nogenlunde lige store udadrettet som indadrettet, dvs. at den søværts transport i gennemsnit udlignes af den landværts transport.



Figur 2.16 Tværtransport giver erosion under storm og opbygning under roligt vejr

Tværtransport er betegnelse for bevægelse af bundmaterialet på tværs af kysten, "i kystprofilet"

Under stormvejr tages sandet ud i profilet

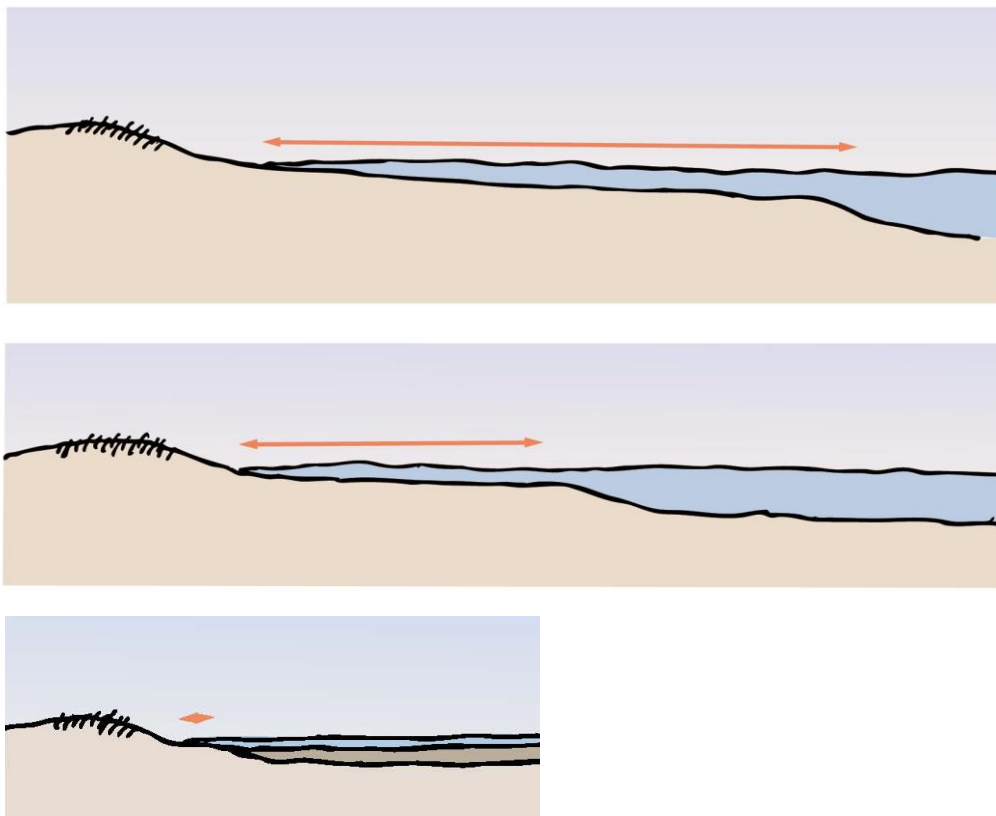
Under rolige vejrforhold skubbes sand langsomt tilbage

Ligevægtsprofil og aktiv dybde

Tværtransportprocesserne giver anledning til at kystprofilet midlet over et længere tidsrum indstiller sig i et såkaldt **ligevægtsprofil**, som er udtryk for kystens gennemsnitlige profil over året (eller flere år).

Ligevægtsprofilet går ud til den såkaldte "aktive dybde". Længere ude vil bunden i væsentlig grad ikke ændre form. Den aktive dybde er forskellig fra kyst til kyst og er i særdeleshed bestemt af den karakteristiske eller typiske bølgehøjde ved kysten. Jo større bølger, jo større aktiv dybde.

Formen af ligevægtsprofilet og den aktive dybde for karakteristiske bølgehøjder ved Vestkysten, i Kattegat/Østersøen og i de indre sunde, bælter og fjorde er illustreret i nedenstående figur.



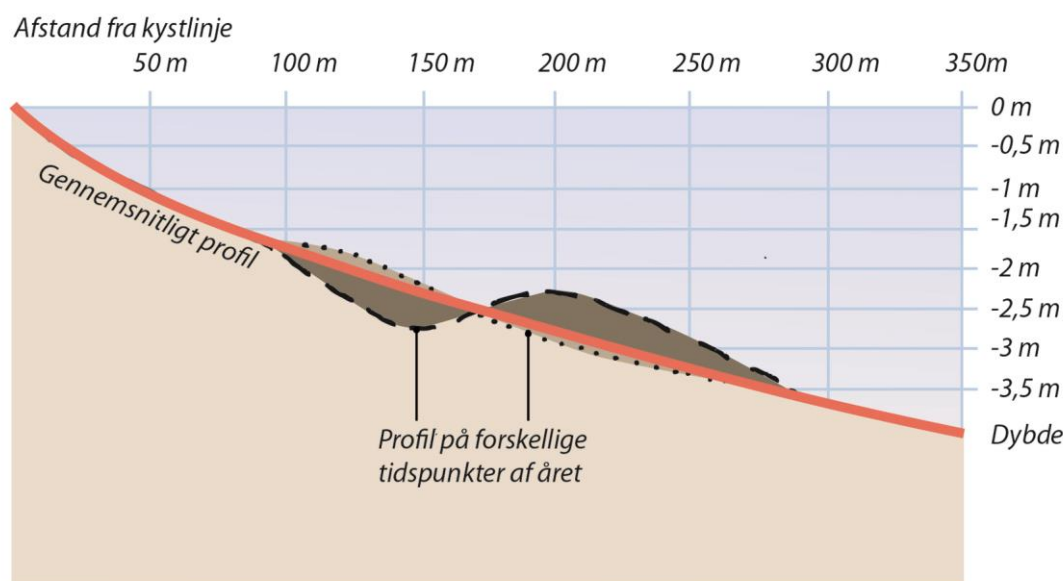
Figur 2.17 Bredden af den aktive zone for tre forskellige eksponeringsgrader. Øverst: Vestkysten. Midterst: Kattegat/Østersøen. Nederst: Indre farvande.

Ud over bredden af det aktive profil der er dækket af vand, vil man som regel se at bredden af stranden på samme måde følger eksponeringsgraden: Jo større bølger, jo bredere strand.

I nedenstående tabel er anført typiske værdier for bredden af den aktive zone og for den aktive dybde for kysten med forskellige eksponeringsgrader. Det bemærkes at bredden af den aktive zone også varierer med de sedimentets typiske størrelse. Jo finere sediment jo fladere profil og jo bredere aktiv zone. Tallene nedenfor repræsenterer typiske sedimenttyper.

Tabel 2.6 Bredde af den aktive zone og den aktive dybde for kyster med forskellige eksponeringsgrader.

Farvandsområde	Eksponeringsgrad Typisk bølgehøjde	Aktive dybde	Bredde af aktive zone
	(m)	(m)	(m)
Fjorde og beskyttede områder	0,7	1,3	65
Bælter	1,8	3,0	230
Kattegat og Østersøen	2,5	4,0	350
Bornholm	2,8	4,3	400
Nordsøen	5,0	6,5	730



Figur 2.18 Ligevægtsprofilet er det gennemsnitlige profile over et eller flere år.

Ligevægtsprofilet er en betegnelse for den gennemsnitlige form – uden revler - som kystprofilet typisk antager over et eller flere år

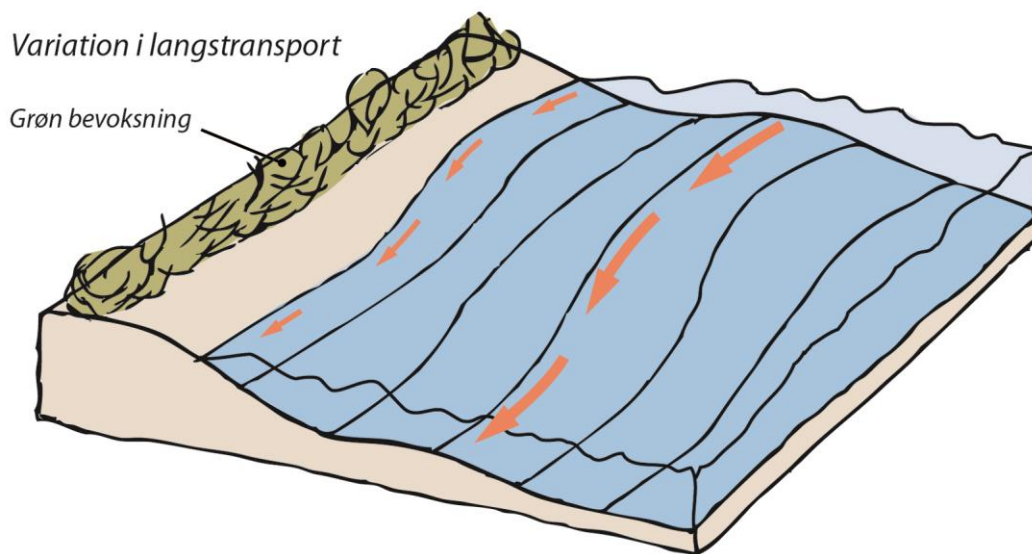
Mere om langtransporten

Lad os for fuldkommenheds skyld opsummere mekanismerne for langtransporten.

Langtransporten forårsages som nævnt hovedsageligt af bølger, som rammer kysten med en skrå vinkel. Når bølgerne bryder langs kysten driver de en strøm som løber langs med kysten, den såkaldte bølgestrøm. Samtidig bevirker bølgebrydningen og strømmen at sediment hvirvles op i vandsøjlen således at det kan transporteres med bølgestrømmen. Kombinationen af disse to processer gør at brydende bølger kan transportere store mængder af sediment. Størrelsen af langtransporten afhænger af mange forskellige faktorer hvoraf de vigtigste er bølgehøjde, bølgeretning, sedimentets kornstørrelse samt kystprofillets form. Jo større bølgerne er og jo finere sedimentet er, jo mere sediment transporteres der.

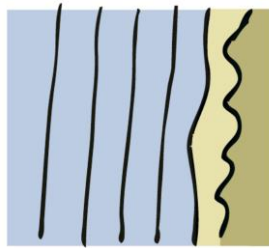
Da langtransporten er knyttet til bølgebrydningen som finder transporten i områder, hvor bølgerne bryder mest, dvs. på revler og tæt på land. I Figur 2.19 er illustreret hvordan den samlede langtransport i kystprofillet kan være fordel over kystprofillet for et eksempel med en revle. Det skal nævnes at der nogle steder kan være flere revler og dermed flere zoner med langtransport eller tilfælde nærmest uden revler, hvor transport kun sker i et enkelt "bånd".

Som omtalt under beskrivelsen af den tværgående transport og ligevægtsprofillet vil profilerne herudover ændre sig henover året.

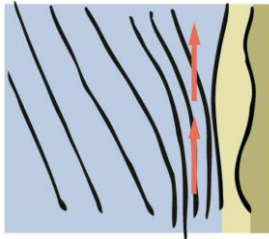


Figur 2.19 Langtransporten fordeler sig over kystprofillet. Her et eksempel med en kyst med en enkelt revle.

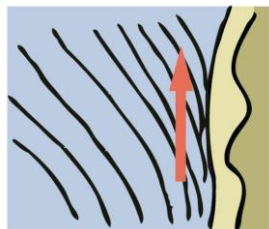
Udover at have en vis fordeling afhængig af profilets form, vil langtransportens størrelse afhænge af bølgens indfaldsvinkel som illustreret i nedenstående figur. Heraf ses at sedimenttransporten er størst når bølgerne nærmer sig kysten med en vinkel på omkring 50 grader. Det faktum at sedimenttransporten aftager, når vinklen mellem bølgeretningen og kystens orientering bliver større end 50 grader gør at kystlinjen under sådanne forhold bliver ustabil. Hvis den dominerende bølgeretning er vinkelret på kysten (0 grader indfaldsvinkel) er den gennemsnitlige langtransport over tid nul. Denne orientering af kysten kaldes kystens ligevægtsorientering.



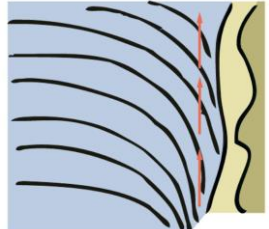
Ingen transport



Lille til middelstor transport



Stor til maksimal transport



Lille eller ingen transport

Figur 2.20 Langtransporten er afhængig af bølgeindfaldsvinklen

Den meget opmærksomme læser vil indse at dette er den virkelige grund til at vi oprindeligt indførte kystklassifikationssystemet som vi gjorde. Klassifikationen er i virkeligheden en klassifikation af **langtransportforholdene**.

Kronisk erosion

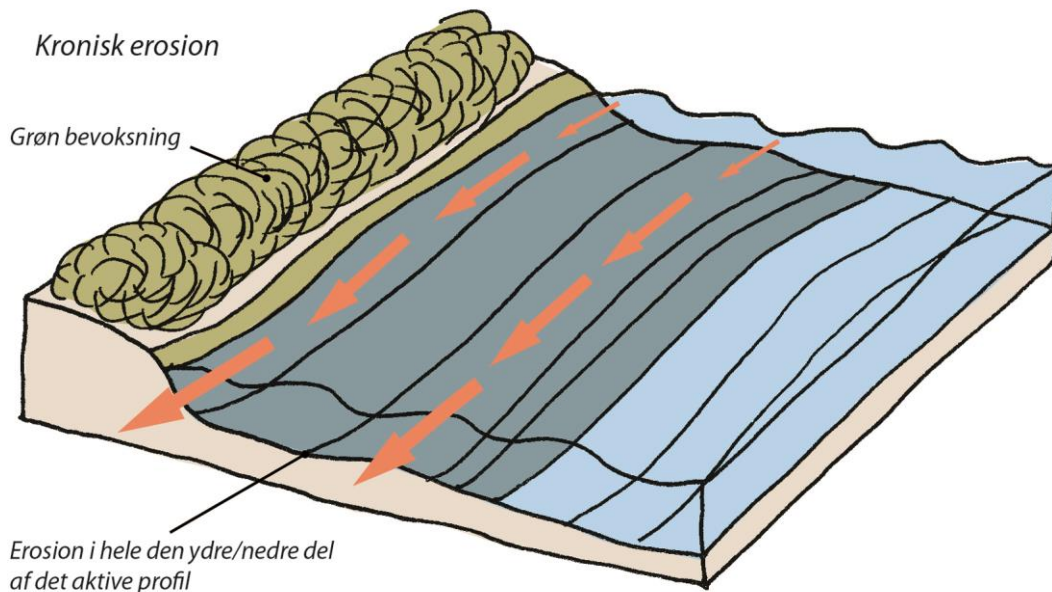
Hvis langstransporten varierer langs kysten vil der blive eroderet eller aflejret sand i det pågældende område.

Erosion sker når transporten vokser i transportretningen, idet der på en sådan strækning føres mere sand ud af denne end der tilføres. Selv om der er variationer fra år til år vil langstransporten gå i den samme retning, og tendensen til erosion på en given strækning er permanent, derfor kaldes erosion, der skyldes variation in langstransporten, for **Kronisk erosion**.

For en given strækning kan man opstille et budget for sediment, der siger:

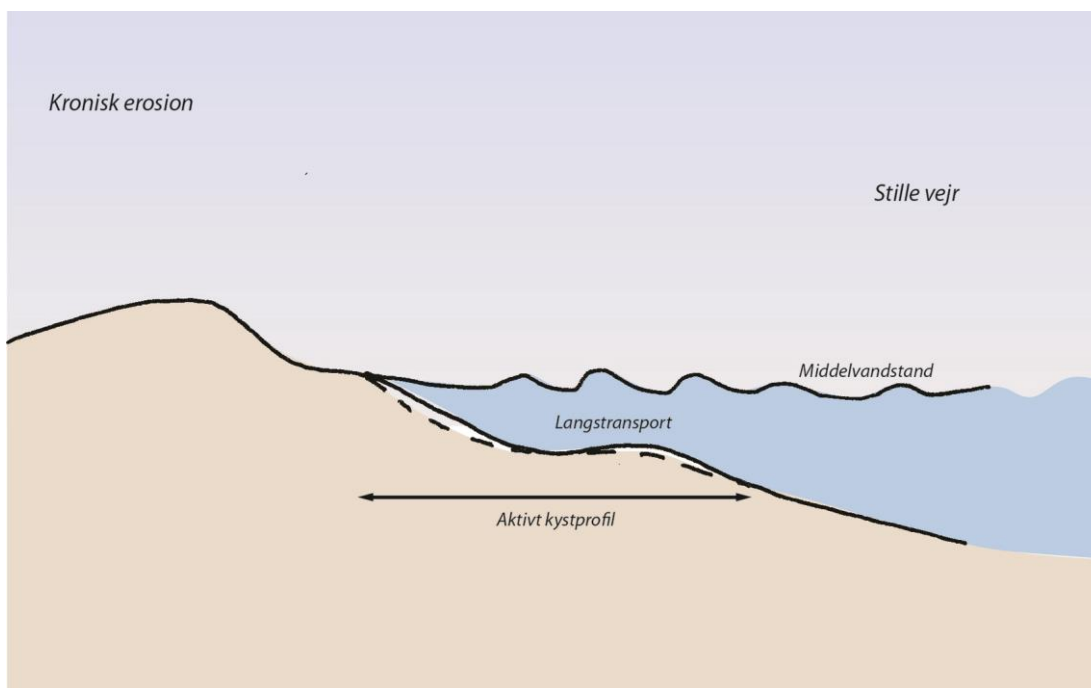
Mængden af sediment ud af området fratrukket mængden af sediment, som vandrer ind i området = Erosion

En anden måde at sige dette på er: Hvis der transporteres mere sediment væk fra et område end der transporteres sediment ind i området, betyder det at området er under erosion.



Figur 2.21 Kronisk erosion sker når langstransporten stiger i transportretningen. Der transporteres mere sediment ud af området end ind, hvilket betyder at området er under erosion. Mørk blå viser de aktive dele af profilet. Lysere blå forbliver upåvirket.

Fordi transporten forgår fordelt over profilet vil erosion ligeledes være fordelt over profilet. Set over et år kan man antage at fordelingen af erosionen er nogen ligeligt fordelt (jf. beskrivelsen af ligevægtsprofilet), også selvom der nogle gange er revler.



Figur 2.22 Kronisk erosion under en typisk bølgesituation. Pga. den stigende langstransport (mindre sediment ind end ud) eroderes profilets ydre/dybere dele.

Såfremt langtransporten aftager i transportretningen vil der omvendt blive aflejret sand, hvilket tydeligst ses, hvor transporten er bremset af en havn eller en anden stor konstruktion. En sådan akkumulation kaldes luvside tilsanding, et eksempel er vist på Figur 2.23.



Figur 2.23 Luvside tilsanding nordvest for Rødbyhavn, hvor der er en netto langstransport på ca. 30.000 m³/år imod sydøst grundet fremherskende bølger fra vestlige retninger.

På grund af den konstante udvikling kan kronisk erosion (og akkumulation) beskrives gennem sedimentbudgetter, hvor der opstilles regnskab for en given strækning: Hvor meget tilføres der fra den ene side, og hvor meget føres der ud på den anden, og resultatet giver så den kroniske erosion eller akkumulation på strækningen. Budgettet kan opstilles ud fra transportmængder, der beregnes med computermødelier for transporten, eller en målt erosion/akkumulation kan bruges til at beregne variationen af transporten. Hvor transporten er totalt blokeret, som ved en stor havn, kan den aktuelle transport beregnes ud fra den målte erosion/akkumulation, da denne må svare til den totale transporterede sandmængde.

Kronisk erosion er erosion som foregår over en længere periode

Kronisk erosion er en form for erosion af mere permanent karakter

*Kronisk erosion skyldes at **langtransporten vokser i transportens retning***

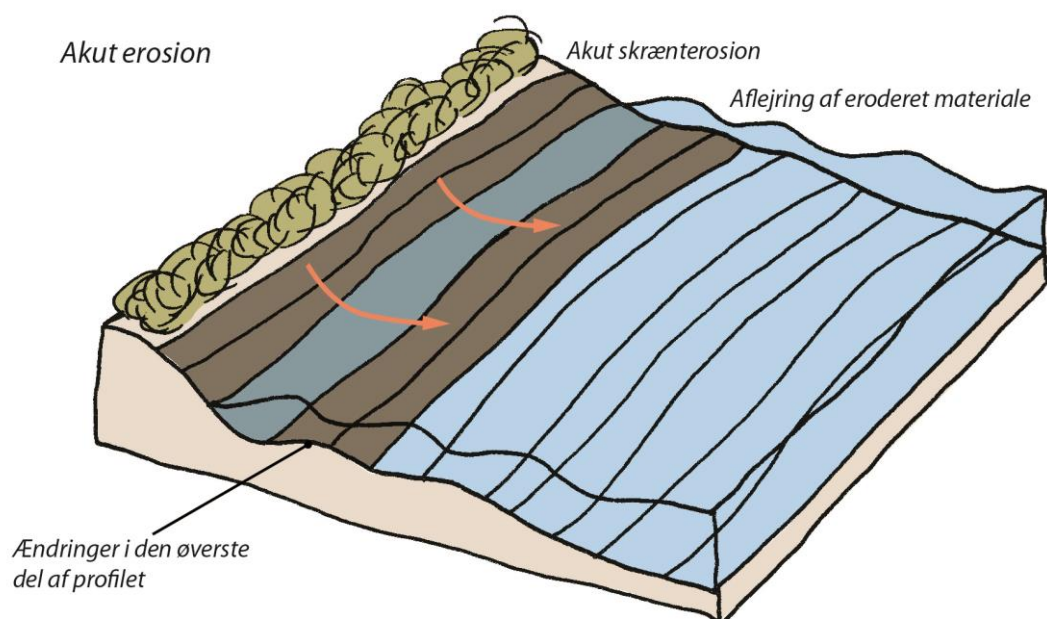
Kronisk erosionen foregår mest ude i profilet, dvs. "udhuler" profilet

Kronisk erosion vil typisk gøre de øvre dele af stranden mere eksponerede for akut erosion (se næstkommende afsnit)

*En kyst der lider under kronisk erosion vil vi kalde en **erosionskyst***

Akut erosion

Bølgebevægelsen medfører en transport på tværs af kysten. Kraftigst er transporten under brydende stormbølger, som fører sand væk fra kysten. Under mildere vejr er transporten svagere og fører sand ind mod land. Disse to forskellige typer af transport vil opleves som henholdsvis erosion af stranden og kysten (klitfoden eller foden af en eventuel klint) og aflejring på stranden. Særligt transport og tilhørende erosion i kystprofilen forekommer som nævnt specielt under storm i forbindelse med kombineret højvande og kraftig bølgepåvirkning og benævnes **Akut Erosion**.



Figur 2.24 Under akut erosion eroderes den øvre del af profilet under højvande (storm). Det eroderede materiale lægger sig ud i de dybere dele af profilet. Mørk brun og blå svarer til, hvor profilet er aktivt under akut erosion. Lysere blå er ikke aktivt. Se også figur 2.25.

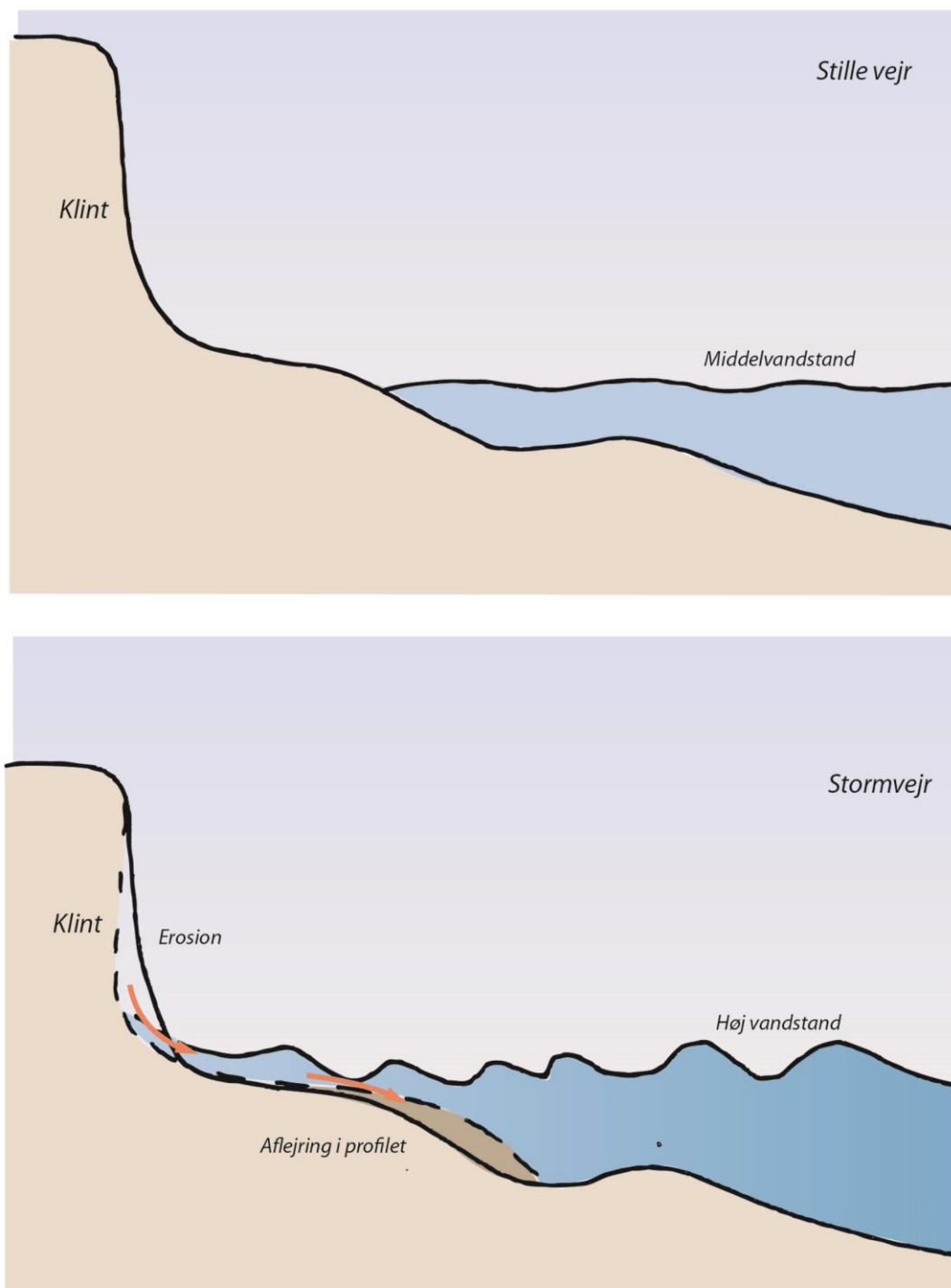
Tværrtransporten opfattes jf. ovenstående normalt som transport, der over en længere periode ikke giver anledning til tab af materiale fra området. Men i tilfælde af ekstremt højvande under en kraftig storm vil erosionen af de øvre dele – dvs. klitten, f.eks. - ikke umiddelbart blive bygget op igen i perioden efter stormen har lagt sig. Materialet har lagt sig længere ude i profilet, men er ikke nødvendigvis let tilgængelig for en naturlig genopbygning af klitten. Man kan sige at processen er *delvist irreversibel*.

Set over hele profilet er sandet dog ikke tabt og den øgede sandmængde foran klitten vil sandsynligvis virke beskyttende på klitten ved næste stormhændelse.

Dette gælder dog ikke, hvis der samtidig er tale om en kyst med kronisk erosion. I det tilfælde vil det sand, der er aflejret i profilet under akut erosion blive fjernet af langstransporten, der tager det overskydende sand med sig ned langs kysten uden at erstatte det med nyt opstrøms fra.

Det er derfor sandsynligt at en kyst, der er under kronisk erosion også er mere udsat for akut erosion under stormhændelser. Dette vender vi tilbage til i et senere afsnit om erosionskystens sedimentbudget.

En anden undtagelse hvor tabet af eroderet materiale er uigenkaldelig er, hvor der forekommer akut erosion i en morænekystskrænt og leret skylles ud af skrænten og væk fra området. Her efterlades dog sten og ral, der beskytter foden af skrænten.



Figur 2.25 Akut erosion under storm og højvande.



Figur 2.26 Fotos efter Stormen Bodil d. 6.12.2013, som medførte ekstremt højvande på 1,9 m langs Sjællands Nordkyst. Øverst: Jævnt fordelt akut erosion langs klitrækken NØ for Liseleje. Nederst: Skrænterosion langs Villingebækstien, bemærk at hølften ikke har haft nogen virkning.

Akut erosion foregår under storme og højvande

Akut erosion sker ved de højest beliggende dele af stranden (bagstrand og klitter/klinter, mv)

Akut erosion er den mest synlige form for erosion ved en kyst fordi den foregår hurtigt under en enkelt storm

Sand der er bragt ud i profilet under akut erosion transporteres langs kysten ved langstransport i de tilfælde hvor kysten samtidig er under kronisk erosion

Sedimenttilgængelighed

Langs nogle kyster består alt materiale af løse sedimenter, typisk sand med en gennemsnitlig korndiameter på ca. 0,2 mm. Dette er typisk for områder som er dannet under sidste istid som smeltevandssletter (store dele af Vestkysten) eller områder hvor de litorale processer har aflejret store mængder sand, som eksempelvis på Grenen nord for Skagen. Langs sådanne kyster er der typisk klitter i baglandet.

Andre kyster er formet ved erosion af eksempelvis moræneaflejringer. Her vil stranden typisk bestå af en blanding af de grovere fraktioner som bliver tilbage når moræneklinten eroderer. De grovere fraktioner består af sand, grus, ral og sten. Sand og grus vil tilføres sedimentbudgettet og transporteres langs kysten mens sten vil forblive på strand og strandplan, hvor de er frigivet fra den borteroderede moræne. Ral vil typisk skylles op i stejle ralstrandvolde på bagstranden.

Kilden til det sand, som transporteres som langtransport langs de danske kyster, består helt overvejende af sand som er eroderet fra kystprofilet grundet gradienter i langtransporten. Langs andre kyster kan en flod ofte levere store mængder sand til sedimentbudgettet, men det er ikke tilfældet i Danmark. Det er således en forudsætning for at opretholde en uændret langtransport på en strækning at man ikke hindre tilgangen af materiale til kysten ved at beskytte denne imod erosion. Derfor vil faste kystsikringskonstruktioner (skræntfodsbeskyttelse), som hindrer frigivelse af sand medføre reduktioner i sandtilførslen og derfor medføre øget erosion. Endnu større virkning fås ved anvendelse af kystkonstruktioner, så som høfder eller bølgebrydere, som dels reducerer erosionen på den beskyttede strækning, men som også fanger noget af det sand som transporteres langs kysten. Hård kystbeskyttelse med konstruktioner vil derfor altid medføre øget erosion nedstrøms for den beskyttede strækning, man kan sige at man ved anvendelse af disse metoder blot flyttet erosionen langs kysten.



Figur 2.27 Eksempel på virkning af skræntfodsbeskyttelse, stranden er forsvundet. Liseleje før det "nye" bølgebryderprojekt.

Hård sikring af kysten fjerner ikke årsagen til den pågående erosion, hvorfor erosionen vil fortsætte i den ubeskyttede søværts del af kystprofilet. Sikring af kysten med skråningsbeskyttelse imod kronisk erosion vil derfor typisk medføre at stranden bliver smallere

og smallere for til sidst at forsvinde helt, hvilket vil medføre øget påvirkning på skråningsbeskyttelsen, hvorfor denne skal forstærkes med jævne mellem for at bevare sikringen af kystlinjen imod tilbagerykning.

Man kan beregne langstransporten ved hjælp af formler eller computermodeller. Her er det nødvendigt at tage højde for at en del af profilet kan bestå af materiale, som ikke transporteres så let som strandsand. Den aktuelle transport, som jo er dæmpet grundet mangel på løst sand, som kan transporteres af bølgerne, vil være mindre end transportkapaciteten for en kyst, hvor hele kystprofilet er dækket af sand.

Hvis man vælger at beskytte en sådan strækning med sandfodring for at kompensere for erosionen, skal man være opmærksom på at transporten vil stige fra den aktuelle transport til den fulde transportkapacitet. Dette er vigtigt at medtage ved vurdering af holdbarheden af en sandfodring.

Den danske kyst tilføres sedimenter ved erosion af klitter og klinger

Nogle kyster har naturligt overskud af sand andre har underskud

Konstruktioner såsom havnemoler, høfder og bølgebrydere kan tilbageholde den naturlige fordeling af sandet fra "sandkilden" langs kysten, så kysten nedstrøms konstruktionerne kommer i underskud for sand

Ved kyster med sandunderskud vil en hårdere geologisk formation være fremherskende i landskabet (moræneklinter, hårde kalklag, mv.)

Kystens sæsoner

Bølge- og stormflodsforhold varierer hen over året idet disse fænomener varierer med vindforholdene. I Danmark er de voldsomme vindforhold, som giver store bølger og stormflod, domineret af lavtryksbanerne og lavtrykkenes intensitet. Disse forhold medfører typisk størst hyppighed af storme og størst intensitet i efterårs og vintermånederne. Derfor varierer transportforholdene og erosionspresset også over sæsonerne langs De Danske Kyster.

Hyppe storme med forhøjet vandstand vil typisk medføre større langtransport og større kronisk erosion i efterårs og vintermånederne og ligeledes vil den akutte erosion under stormene medføre midlertidig, men i nogle tilfælde også permanent, akut erosion. Stranden vil således typisk være relativ smal i disse sæsoner og revlerne vil være rykket udad. I de rolige perioder vil langtransporten være relativ lille og tilsvarende vil den kroniske erosion. Den akutte erosion vil i de rolige forårs og sommer måneder typisk blive delvis restitueret idet sand under de normale vandstandsforhold og milde bølgeforhold vil blive transporteret landværts i kystprofilet.

Stormvejr forekommer oftest i efterårs- og vinterperioden – sand tages ud profilet pga. udadgående tværtransport

Perioder med mildere vejr forekommer mest om sommeren – her skubbes sandet typisk langsomt op i profilet igen

I gennemsnit ændrer profilet sig ikke væsentligt, hvis ikke der f.eks. er kronisk erosion på strækningen

En iagttager på kysten

For den der iagttager kysten enten dagligt eller en gang imellem under ophold ved kysten, og/eller gennem en tilbagevendende år for år, ville der være en lang række variationer i kystens udseende.

For havets vedkommende sker der ændringer pga. tidevandet, storme, bølger og strømme.

For landskabets vedkommende vil stranden måske have aftryk af akut erosion efter en kraftig storm, sand eller sten har måske hobet sig op på stranden på et tidspunkt eller er forsvundet midlertidigt ud i vandet på et andet tidspunkt. Der kan i perioder være variationer af strandens bredde eller i sedimentsammensætning.

For den skarpe iagttager vil disse variationer gøre sig gældende over forskellige tidintervaller

- Timer: Storme, tidevand
- Dage: Akut erosion, tidevand, storme
- Måneder: Langsomme ændringer i vejr og vind, sandprofillets langsomme ændringer
- Sæsoner: Veksling mellem milde perioder og stormperioder
- År: Resultatet af årets variationer, kronisk erosion
- Årtier: Kronisk erosion og summen af en lang række hændelser med akut erosion

De forskellige fænomener, der gør sig gældende ved kysten - som er beskrevet i de foregående afsnit – vil hele tiden ændre strandens udseende og det man observerer på stranden er dermed et øjebliksbillede af en lang række mekanismer, der har virket på stranden i kortere eller længere tid, nogle forekommer mere tilfældigt end andre og nogle virker på kysten langsomt men sikkert.

En iagttager ved stranden vil kunne observere mange variationer på kysten, der hver især er dele af et større billede

Det er først når alle brikker samles, at man kan se, hvad dette større billede er

Det samlede billede kræver som regel observationer og/eller analyse af kystens dynamik over mange år.

2.2.2 Erosionskystens sedimentbudget – det samlede billede

Vi kan nu samle billedet af, hvad der bestemmer erosionen på kysten, og samtidig opsummere hvordan budgettet for en sådan kyst i princippet ser ud.

Set over en længere tidsperiode, vil der på en erosionskyst på forskellige tidspunkter som nævnt ske akut erosion, hvor de øvre dele af stranden eroderes, hvorefter det eroderede materiale lægger sig ude i profilet. Samtidig - og igen over en længere periode - vil den kroniske erosion tendere til at transportere sandet i profilet væk fra området. Således er der set over længere perioder en sammenhæng mellem de to fænomener akut og kronisk erosion.

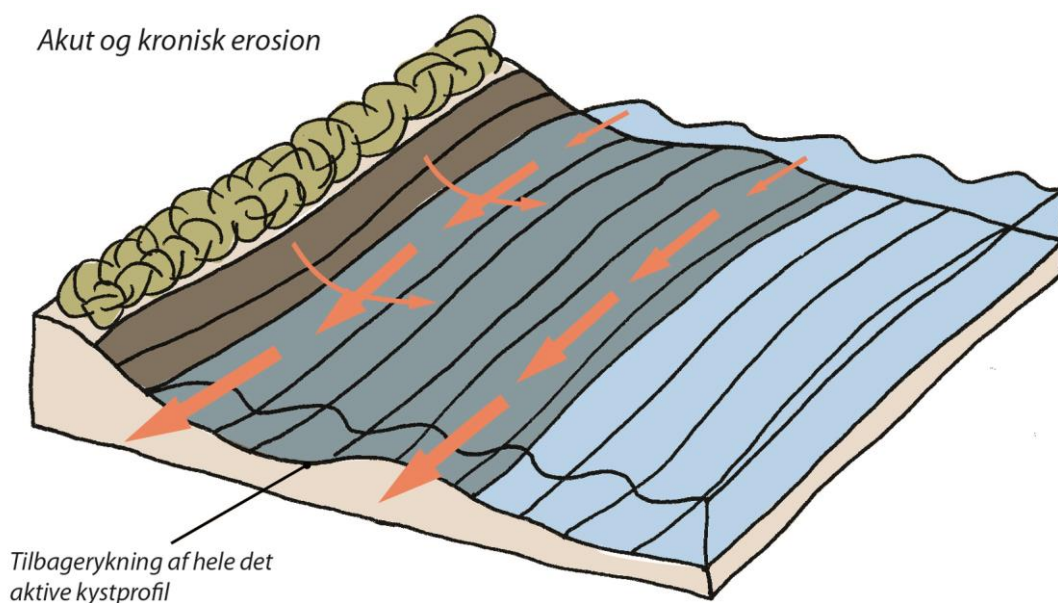
I Figur 2.28 ses den samlede virkning af akut og kronisk erosion som en balance. Man kan argumentere for der her er tale om en "hønen-eller-ægget" logik:

På den ene side:

- Det materiale der løsrives fra klitterne havner i profilet og transporteres væk fra området idet langstransporten stiger i transportretningen.

På den anden side:

- Det materiale langstransporten eroderer i profilet eksponerer klitten, som giver højere grad af akut erosion, der supplerer med materiale i profilet, svarende til det i profilet eroderede materiale

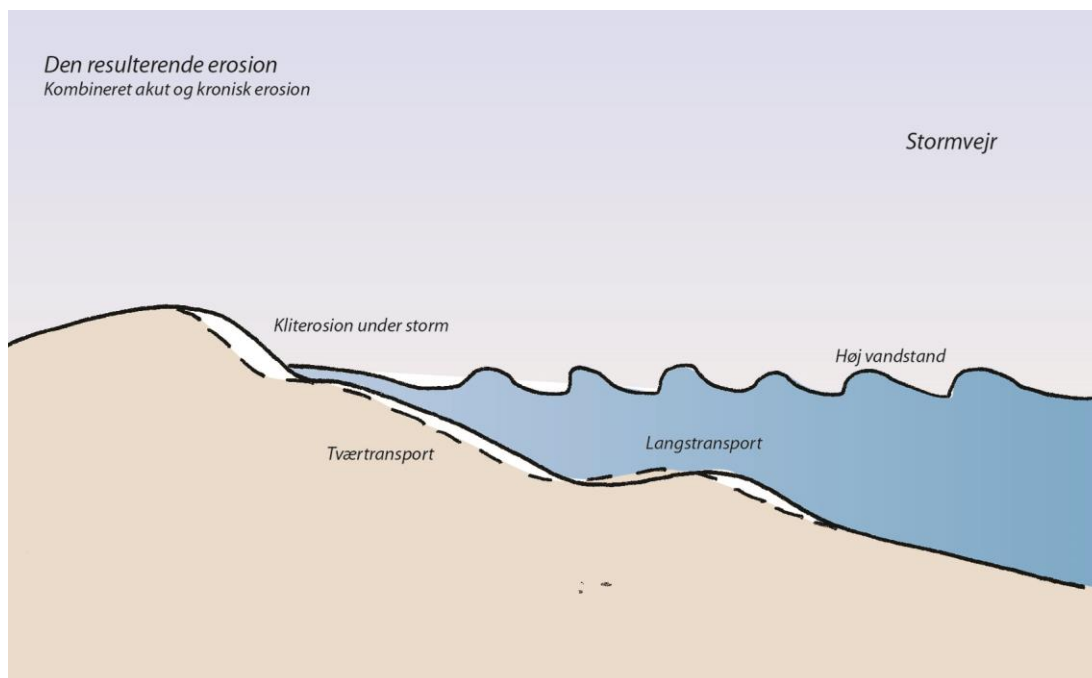


Figur 2.28 Sedimentbudget for den samlede virkning af akut og kronisk erosion. Mørk blå og brun viser de aktive dele af profilet. Lysere blå forbliver upåvirket.

Ser vi på hvordan profilet udvikler sig på længere sigt, vil vi opdage at den samlede virkning af de tre mekanismer

- Akut erosion
- Kronisk erosion
- Tværtransport

ofte give en tendens til at hele profilet fra klit ud til den aktive dybde på forskydes i takt med at kystlinjen trækker sig tilbage.



Figur 2.29 Resultatet af akut og kronisk erosion over en længere periode

Erosionen af kysten er det samlede resultat af akut og kronisk erosion

Over længere perioder (mange år) er den akutte erosion og den kroniske erosion i grove træk lige store

Det samlede resultat er en generel tilbagerykning af hele kystens aktive profil fra klitten og ud til den kritiske dybde i vandet.

Da akut og kronisk erosion virker på forskellige tidsskalaer (dage hhv. år) vil denne sammenhæng ikke altid være tydelig for den der observerer stranden

2.3 Oversvømmelsesdynamik



Figur 2.30 Illustration af konsekvenserne ved oversvømmelseshændelsen i 1872, der især ramte Lolland og Falster (kilde: Kulturarvsstyrelsen)

Oversvømmelse af lavtliggende områder langs kysterne kan ske på forskellige måder afhængig dels af vandstands- og bølgeforhold og dels af baglandets opbygning.

Når den nødvendige højde af en konstruktion, der skal beskytte mod oversvømmelse, skal bestemmes skal der tages højde for vandstanden såvel som effekten af bølgerne.



Figur 2.31 Historisk kort over udbredelse af oversvømmede områder ved Rødby Havn i forbindelse med stormfloden i 1872

Vandstand

Vandstanden bestemmes ud fra det dimensionsgivende stormflodsniveau på stedet, for eksempel vandstanden med en returperiode på 50 år som angivet i tabel 2.5.

Hertil lægges den forventede stigning i middelvandstanden i designperioden, for eksempel 30 år som angivet i Tabel 2.3.

Påvirkningen af bølger

Bølger, der kommer ind mod konstruktionen, giver anledning til forskellige bidrag:

Bølgestuvning er den lokale hævnning af vandspejlet op mod konstruktionen. Ved en meget svagt skrånende forside, som ved en strand, kan denne estimeres til 30% af bølgehøjden. På en mere stejl forside kan opstuvningen være forsvindende lille.

Bølgeopløb - eller bølgeopskyl - er bølgenes opløb på stranden/konstruktionen. Dette bidrag er af mindre betydning på den svagt skrånende forside, men kan på en stejlere konstruktion udgøre op til 40% af bølgehøjden.

Bølgeoverskyl er betegnelsen for det vand, der skyller over konstruktionen, hvis en del af bølgen når over toppen før den glider ned ad konstruktionen igen. Bølgerne kan medføre, at der skyller en vis mængde vand over konstruktionen. Dette kan være farligt på grund af erosion på konstruktionens bagside, og højden af konstruktionen skal være tilstrækkelig til at overskylllet er acceptabelt lille.

Man opererer således med flere niveauer når man skal vurdere, hvor langt vandet når op på en strand eller en konstruktion. For at vurdere risikoen for oversvømmelse af et lavtliggende område grænsende ud til et marint område kan man lade sig inspirere af følgende situationer:

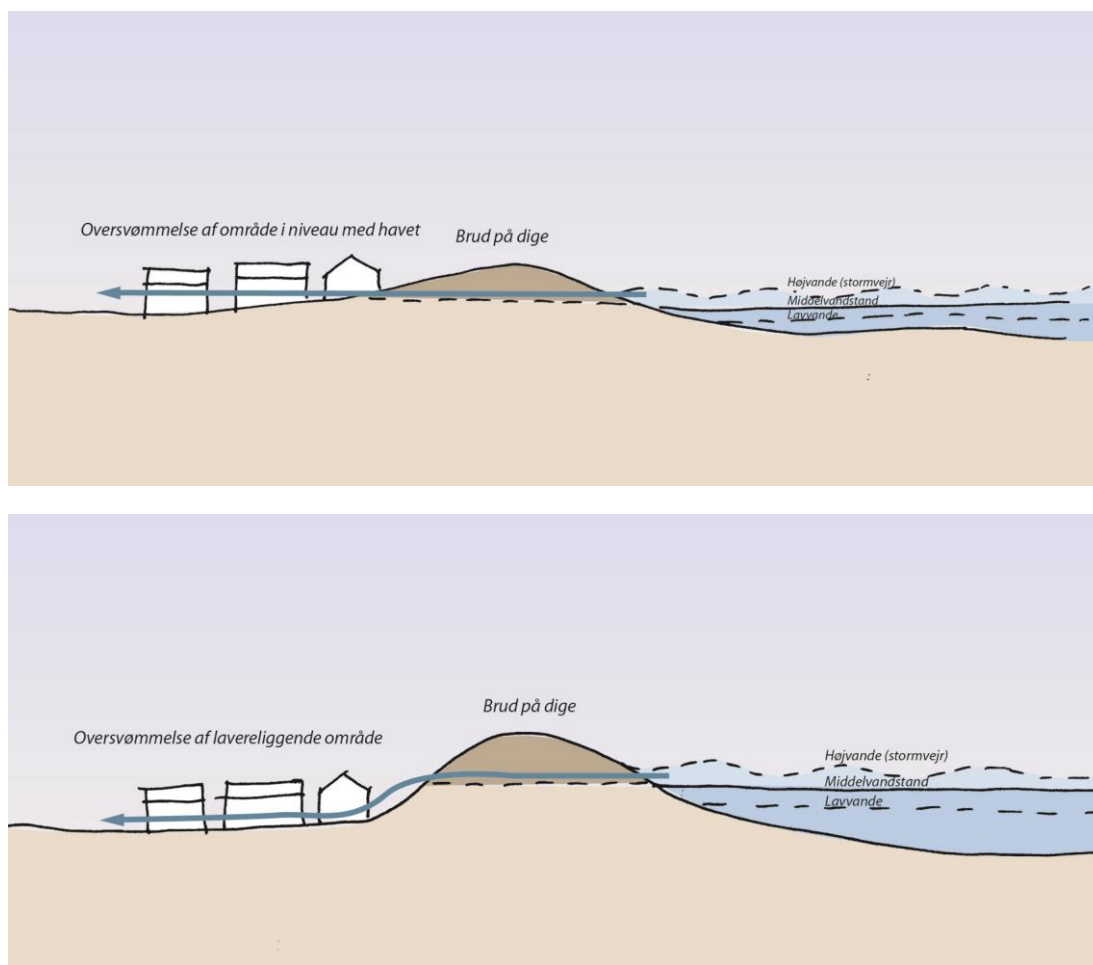
Naturlige områder

1. En jævnt skrånende kyst, her anvendes bølgeopløbsniveauet med opløb beregnet for et strandprofil
2. Et lavtliggende bagland, der normalt ligger højere end havniveau, men under forhøjet vandstand under stormflod ligger under, og som er beskyttet imod oversvømmelse af en naturlig klitrække eller af et dige. Her skal man i vurderingen medtage højden af klitterne/diget og risikoen for at der sker brud i disse. Omfanget af en eventuel oversvømmelse er ud over at være et resultat af de brud, der måtte ske af klitter, mv. afhængig af, hvor lang tid stormen varer før vandets niveau er faldet tilbage til normal igen.

Inddæmmet land

3. Et lavtliggende bagland beliggende under havniveau og som er beskyttet imod oversvømmelse af en dæmning. Eksempler på sådanne er f. eks Lammefjorden eller det sydøstlige Lolland. Brud i et sådant dige vil medføre alvorlige oversvømmelser idet landniveauet er lavere end middelvandspejlet og vandet dræner således ikke bort igen efter stormen efter et dæmningsbrud

Disse situationer er illustreret i nedenstående Figur 2.32



Figur 2.32 Illustration af oversvømmelsessituationer – naturligt lavtliggende og inddæmet bagland, dvs. tilfælde 2. og 3..

Den nødvendige højde er i det efterfølgende vurderet for to forskellige højvandsbeskyttelseskonstruktioner, dels i form af eksponerede diger beskyttet med skråningsbeskyttelse og dels højvandsbeskyttelse beliggende lidt længere inde i landet med et bredt forland eller en strand foran.

Eksponeret beskyttelse: Med en forholdsvis stejl skråningsbeskyttelse på 1:4 eller 1:2 vil bølgeopstuvningen være ubetydelig, og en acceptabel overskyismængde kan opnås med en topkote, der er en højde svarende til 1 bølgehøjde H over vandstanden V . Topkoten af konstruktionen, TKK , bliver således:

$$TKK = H + V$$

Tilbagetrukket beskyttelse: Trækkes højvandsbeskyttelsen tilbage, således, at der er en strand eller et bredt forland foran konstruktionen ved daglig vande, og konstruktionen herved kan udføres som et traditionelt græsklædt dige, kan topkoten reduceres noget. Da den krævede topkote er afhængig af forlandets/strandens bredde er det umuligt at anføre et generelt krav til topkoten, men et konservativt skøn kunne være

$$TKD \text{ ca.} = 0,8H + V$$

Igen er H bølgehøjden, V vandstand under stormflod og TKD betegnelsen for topkoten af diget.

De resulterende værdier er angivet i Tabel 2.7

Tabel 2.7 Oversigt over krav til topkote for højvandsbeskyttelseskonstruktioner.

	Bølgehøjde, H	Total dimensionsgivende vandstand, V	Topkote af bølgeeksponeret konstruktion, TKK	Topkote af dige, TKD
Farvandsområde	(m)	(m)	(m)	(m)
Fjorde og beskyttede områder	1,0	2,0	3,0	2,8
<i>Vadehavet</i>	3,0	4,7*	7,7	7,1
Bælter	2,5	1,9	4,4	3,9
Kattegat og Østersøen	3,5	1,9	5,4	4,7
<i>Bornholm</i>	4,0	1,5	5,5	4,7
Nordsøen	7,0	3,3	10,4	8,9

*Digerne i Vadehavet er typisk dimensioneret med en større returperiode end benyttet i denne tabel grundet det store bagland.

Beskyttelse mod oversvømmelse kan udføres som permanente konstruktioner tæt på havet eller som lettere tilbagetrukne diger

Topkoten for beskyttelseskonstruktionen bestemmes ud fra stormflodsvandstand og bølgehøjde under stormflod

2.4 Ændringer af eksponeringsniveauer

Der er gjort rede for hvordan klimaændringerne medfører ændringer i vandstanden. Herudover er det nævnt at klimaforandringerne ligeledes vil medføre ændringer i vindforholdene og dermed også i bølgeforholdene.

Virkningerne af vandstandsstigninger vil hovedsagelig være at risikoen for oversvømmelse af lavtliggende områder øges og at kysterrosionen ligeledes øges, vi vil således komme til at opleve flere af de situationer, som er illustreret i Figur 2.33.



Figur 2.33 Illustration af virkning af stigende vandstand: Top: Større risiko for oversvømmelse, som i Jyllinge Nordmark under Bodil 6.12.2013. Bund: Større risiko for akut kysterrosion, som ved Nørlev i Thy efter Egon d. 10.01.2015.

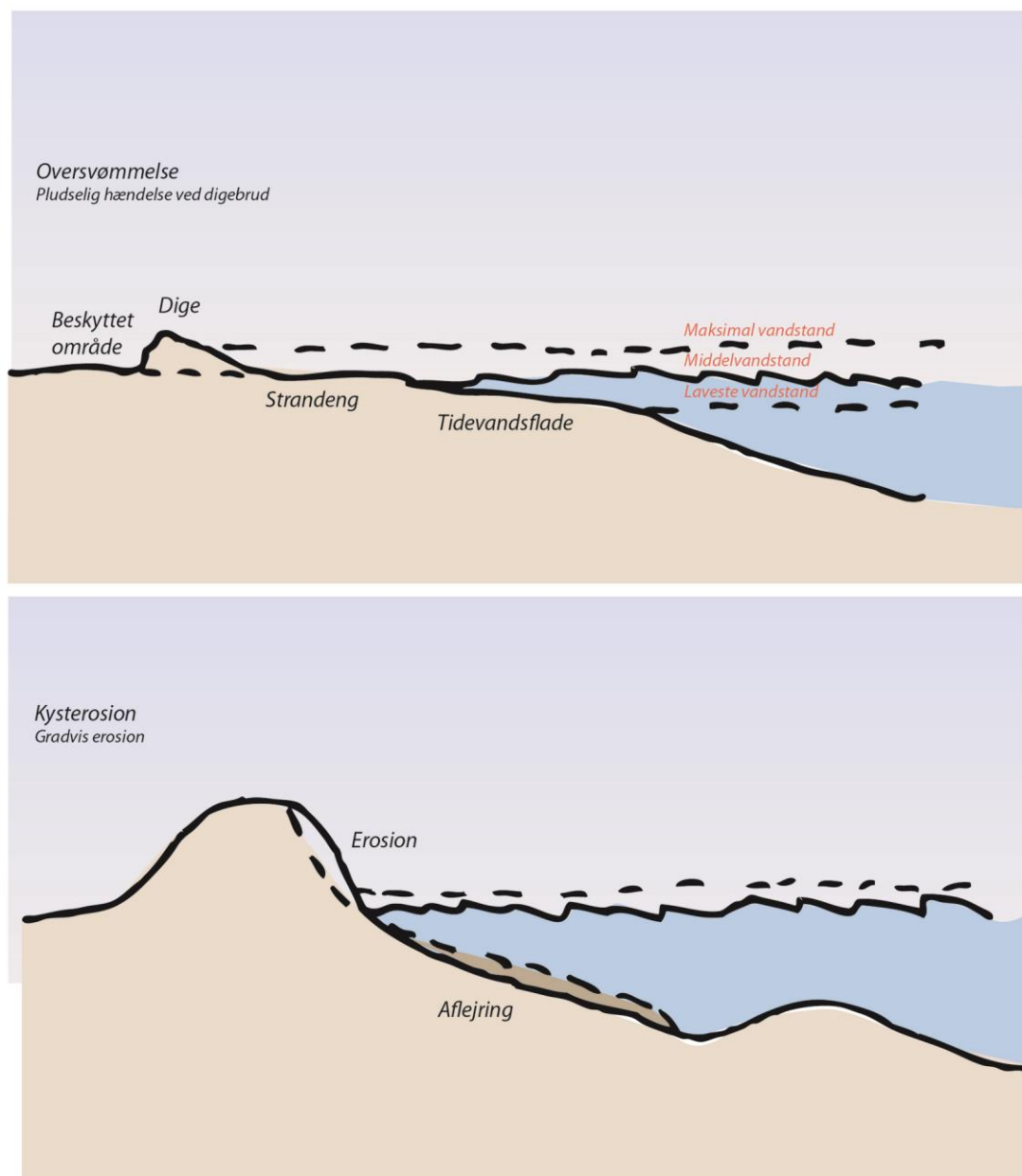
Virkningerne af vandstandsstigningerne på de kystdynamiske forhold diskuteres i det følgende.

2.4.1 Virkning af stigning i middelvandstanden

Stigningen i middelvandstanden vil have to principielt forskellige virkninger:

- Øget risiko for oversvømmelse eksempelvis ved digebrud
- Gradvis kysterosion, langsom tilpasning af ligevægtsprofilen ved stigende havniveau

Se også nedenstående illustrationer.



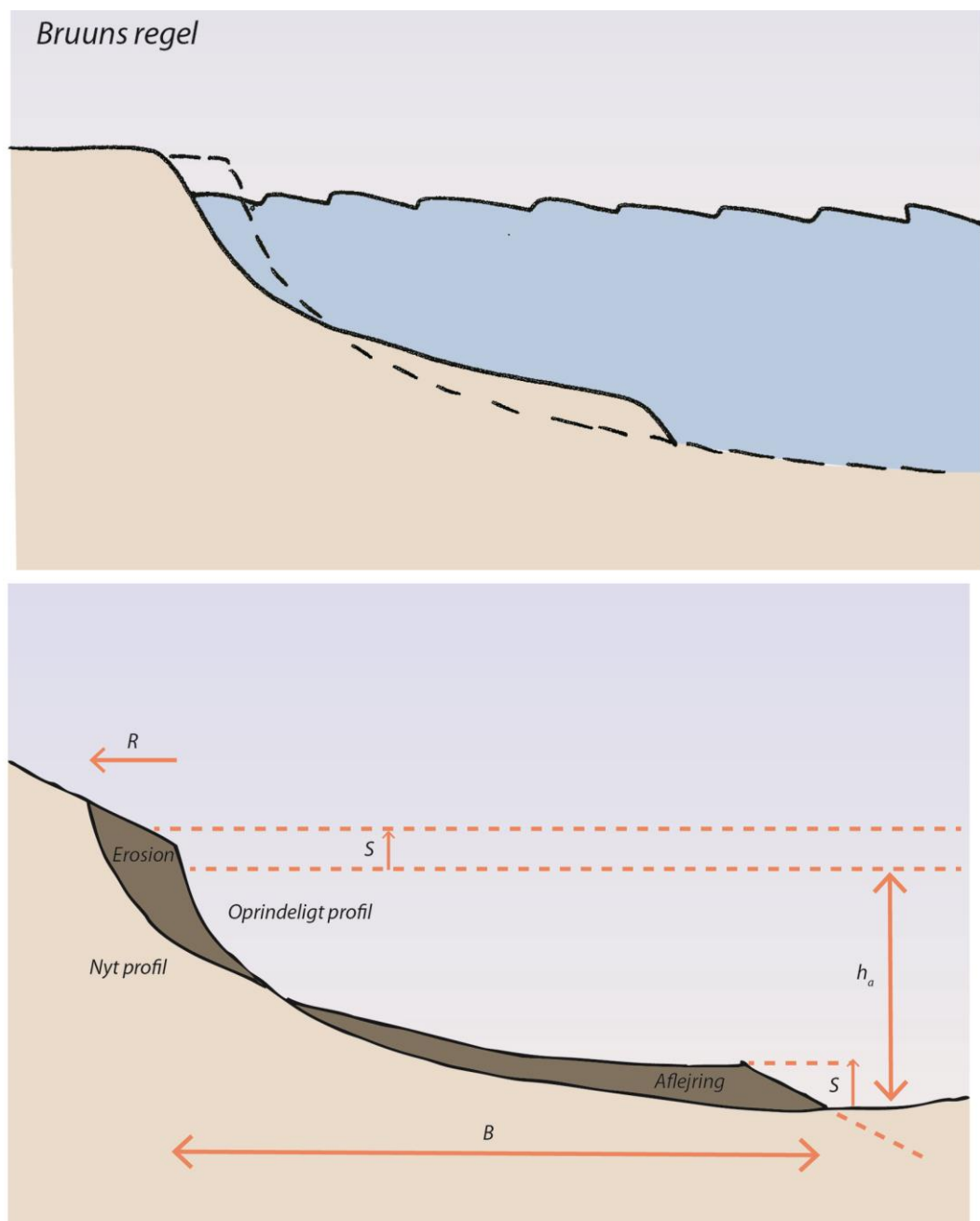
Figur 2.34 Virkning af havspejlsstigninger. Øverst: Oversvømmelse, for eksempel ved digebrud. Nederst: Erosion af kysten.

Virkning på erosionsforholdene på en åben kyst

En vandstandsstigning vil medføre en forøget tilbagemykning af kysten. Ifølge en simpel model der kaldes Bruuns regel (efter den dansk-amerikanske kystingeniør Per Bruun) kan man beregne denne tilbagemykning for en given stigning af havniveauet. Bruuns regel er baseret på at kysten vil bevare sit ligevægtsprofil i forhold til den forøgede vandstand, hvorved tilbagemykningen kan fastsættes med en formel:

$$R = S/a$$

hvor R er tilbagemykningen af kysten, S er stigningen i middelvandspejlet og a er profilets gennemsnitshældning – der kan beregnes som B/h_a , hvor B er bredden af det aktive profil og h_a den aktive dybde (se under afsnitte om kystens dynamik). Se også illustrationen i Figur 2.35.



Figur 2.35 Bruuns regel for kysttilbagekning. Øverst: Bundmaterialet omfordeles når vandet stiger. Nederst: Definitioner af betegnelser for flytninger, R: Tilbagekning af kystlinje, S: Vandspejlsstigning, B: Bredde af aktivt profil, h_a : Aktiv dybde

Typiske hældninger af kystprofilen vil være ca. $1:150 = 0,007$ for vestkysten og ca. $1:100 = 0,01$ for indre eksponerede kyster. Hvis vi antager en forventet stigning i vandniveau over f.eks. 45 år på omkring 25 cm medfører det, at man kan forvente følgende kysttilbagerykninger:

- Vestkysten: $R = 0,25\text{m}/0,007 = 38\text{ m}$ over 45 år siden år 2000, hvilket svarer til en kysttilbagerykning på $0,8\text{ m/år}$
- Indre farvande: $R = 0,25\text{m}/0,01 = 25\text{ m}$ over 45 år siden år 2000, hvilket svarer til en kysttilbagerykning på $0,6\text{ m/år}$

Den naturlige erosionsrate langs Vestkysten er af størrelsesordenen $3,0\text{ m/år}$, hvilket vil sige at havspejlsstigningen medfører en øgning af den naturlige erosion på ca. 25%. Den naturlige erosionsrate langs de indre kyster er af størrelsesordenen $1,0\text{ m/år}$, hvilket vil sige at havspejlsstigningen medfører en øgning af den naturlige erosion på ca. 60%. Den relative virkning af havspejlsstigningen på kyststabiliteten er således større i de indre farvande end på Vestkysten.

Evt. ændrede bølgeforskeligheder vil ligeledes påvirke litoraltransporten og kyststabiliteten både gennem evt. øgede bølgehøjder og gennem ændrede retningsfordeling. Hvorledes disse forhold vil ændres i fremtiden grundet klimaændringerne kendes ikke tilstrækkeligt detaljeret til at vurdere virkningerne på kystforholdene. Derfor er virkningen af disse forhold ikke medtaget i disse vurderinger.

Havspejlsstigninger vil medføre en gradvis tilbagerykning af kystlinjen i takt med at havet stiger

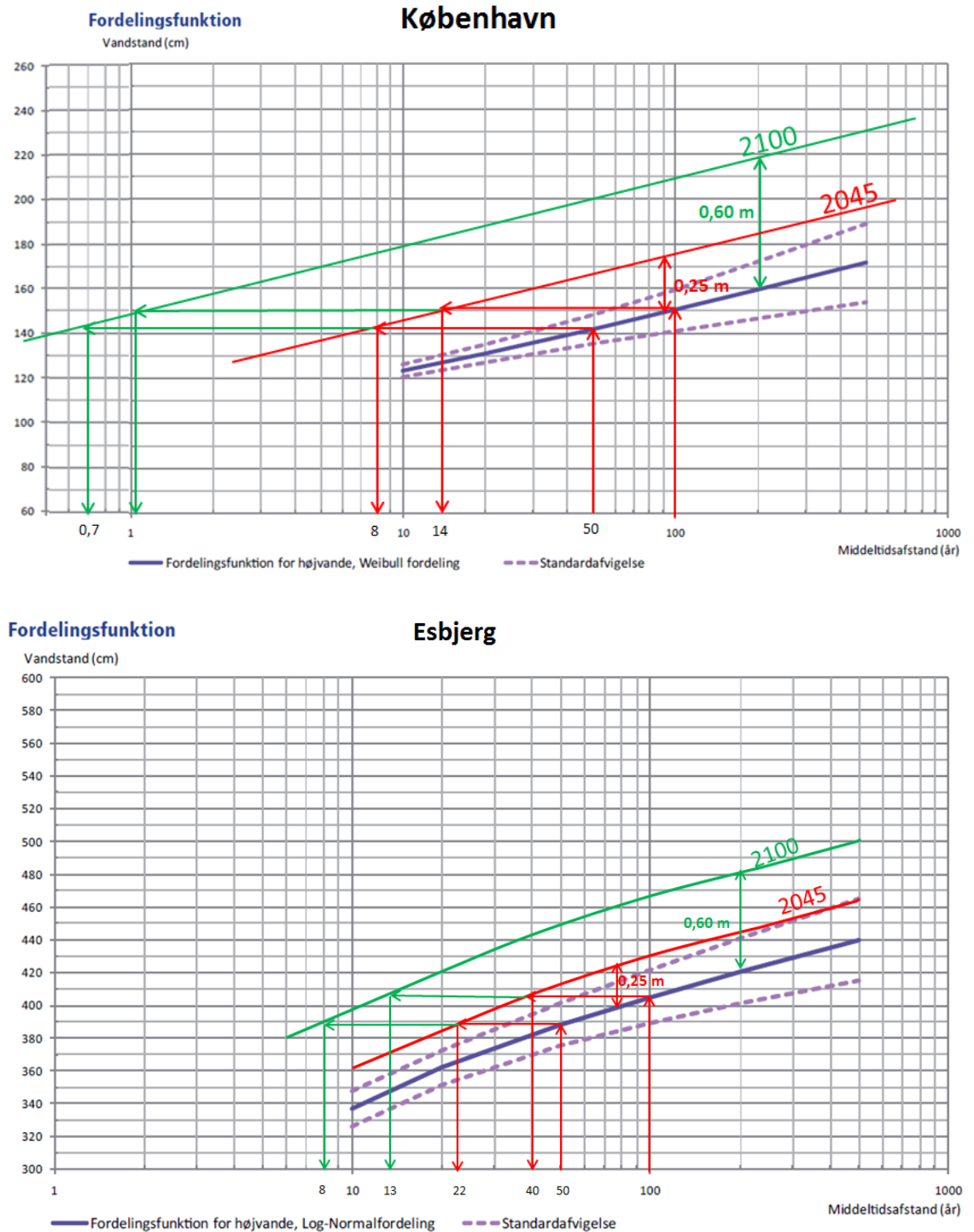
Ifølge den såkaldte "Bruuns regel" kan denne erosion bestemmes (beregnes) ved at antage at formen af kystprofilen (ligevægtsprofilen) nu og i fremtiden vil være det samme - blot beliggende ved to forskellige havvandsniveauer.

Jo større havniveaustigninger jo større tilbagerykning af kystlinjen

Jo fladere kyst jo større tilbagerykning af kystlinjen

Virkning på risikoen for oversvømmelse

Kystdirektoratet udgiver hvert femte år højvandsstatistikker (returperioder) for alle danske målestationer, jævnfør Ref. /1/. Når middelvandstanden stiger vil det påvirke det stormflodsniveau som en given storm vil medføre og returperioden for stormflodsniveauet vil dermed ændres. En første tilnærmelse til dette vil være at addere stigningen i middelvandstanden til kurven for stormflodsniveauet som funktion af returperioden. Med de forventede stigninger i middelvandstanden i år 2045 og 2100 for København og for Esbjerg "løfter" kurverne sig for disse år som præsenteret i Figur 2.36.



Figur 2.36 Virkning af stigning i middelvandstanden grundet klimaændringer København (øverst) og Esbjerg (nederst).

Den blå kurve er den nuværende statistik, den røde svarer til en havspejlsstigning på 25 cm i 2045 og den grønne svarer til en havspejlsstigning på 60 cm i år 2100.

Det fremgår at vandstandsstigningen medfører drastiske ændringer af returperioderne for vandstande i henholdsvis år 2045 og 2100 - returperioder der under de *nuværende* forhold forekommer svarer til 50 og 100 år, se Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Ændrede returperioder af havniveaustigninger i år 2045 og 2100 for vandstande som under nuværende forhold har en returperiode på 50 år og 100 år.

Sted	År 2015		År 2045	År 2100
	Returperiode	Vandstand	Returperiode for havniveaustigning	
			+0,25 m	+0,6 m
København	50 år	1,42 m	22 år	8 år
	100 år	1,51 m	40 år	13 år
Esbjerg	50 år	3,88 m	8 år	Mindre en 1 år
	100 år	4,05 m	14 år	1 år

Det fremgår eksempelvis at den vandstand i **København** (1,42 m) som i 2015 forekommer med en returperiode på 50 år i 2045 grundet vandstandsstigningen på 0,25 m vil forekomme med en returperiode på 8 år, altså med en hyppighed som er 6 gange så stor. For **Esbjerg** fremgår det at den vandstand (3,88 m) som i 2015 forekommer med en returperiode på 50 år i 2045 grundet den samme vandstandsstigning vil forekomme med en returperiode på 22 år, altså ca. dobbelt så hyppigt. Det ses således at den samme klimabetingede vandstandsstigning i år 2045 medfører større relativ øgning (3 gange så stor) af risikoen for oversvømmelse i København end i Esbjerg.

Tilsvarende ses det at den vandstand i **København** som i 2015 forekommer med en returperiode på 50 år i 2100 grundet vandstandsstigningen på 0,60 m vil forekomme med en returperiode på 0,7 år, altså med en hyppighed som er ca. 70 gange så stor. For **Esbjerg** fremgår det at den vandstand som i 2015 forekommer med en returperiode på 50 år i 2100 grundet den samme vandstandsstigning vil forekomme med en returperiode på 8 år, altså med en hyppighed som er ca. 6 gange så stor. Det ses således at den samme klimabetingede vandstandsstigning i år 2100 medfører en meget større relativ øgning (12 gange så stor) af risikoen for oversvømmelse i København end i Esbjerg.

De samme klimabetingede vandstandsstigninger i Vadehavet (Esbjerg) og i De Indre Danske Farvande (København) medfører således en større øget risiko for oversvømmelse i De Indre Farvande end i Vadehavet i forhold til de nutidige forhold.

Havspejlsstigninger giver anledning til at havet og dets kræfter virker på et højere landniveau af kysten

Betydningen af havspejlstigninger vil slå forskelligt igennem i forskellige dele af landet

Hvor stor betydningen kan tænkes at blive kan analyseres ved at lægge en havniveaustigning til den eksisterende statistik for stormfloder

3 Erosions- og oversvømmelsesbeskyttelse – virkemåder og negative effekter

I det følgende gennemgås forskellige muligheder for at beskytte en given kyststrækning mod erosion henholdsvis oversvømmelse. Forskellige tiltags udformning og virkemåde beskrives sammen med de eventuelle negative effekter der måtte være. Formålet er at give en overordnet beskrivelse således at de generelle kendetegn ved tiltagene står klart, og at skitsere de enkelte tiltags økonomi i grove træk for de fire eksponeringsgrader valgt som repræsentative for de danske kyster. Først bestemmer vi dog hvilke kvantitative karaktertræk de fire eksponeringer i grove træk tænkes at være kendetegnet ved.

3.1 Eksponeringsgrader

3.1.1 Typiske bølge-, erosions- og litoraltransportforhold

Baseret på kombinationen af KDI's erosionsatlas og atlas for bølgeforhold langs de danske kyster vil vi for de fire eksponeringsgrader forudsætte følgende

	Repræsentative områder	Erosionsrate	Erosionsrate i volumen	Litoraltransport	Bølgehøjde
Eksponeringsgrad		(m/år)	(m ³ /m/år)	(m ³ /år)	(m)
Lille	Fjorde	0,1	0,2	1.000	1,0
Moderat	Sunde og bæltter	0,2	0,5	10.000	2,5
Stor	Kattegat og Østersøen	0,4	2,0	50.000	3,5
Meget stor	Vesterhavet	3,0	30	1.000.000	7,0

Disse tal er centrale estimater for typiske forhold som er fundet ud DHI's erfaringspulje og ved at analysere strækninger langs de danske kyster som er fundet repræsentative for de fire eksponeringsgrader.

De fire eksponeringsgrader kan tænkes repræsenteret af fire typiske områder i Danmark.

Lille – Fjorde

Moderat – Sunde og bæltter

Stor - Kattegat og Østersøen

Meget stor - Vesterhavet

3.2 Erosionsbeskyttelse

I det følgende vil erosionsbeskyttende foranstaltninger blive beskrevet i form af type, placering /orientering på kysten og deres erosionsdæmpende virkemåder, samt de eventuelle negative effekter, der måtte være på den tilstødende kyststrækning mv.

3.2.1 Hårde beskyttelsesstrategier

Traditionelle erosionsmodvirkende metoder indeholder både metoder, der virker på kræfterne ude i brydningszonen, og metoder der helt lokalt beskytter mod erosionen:

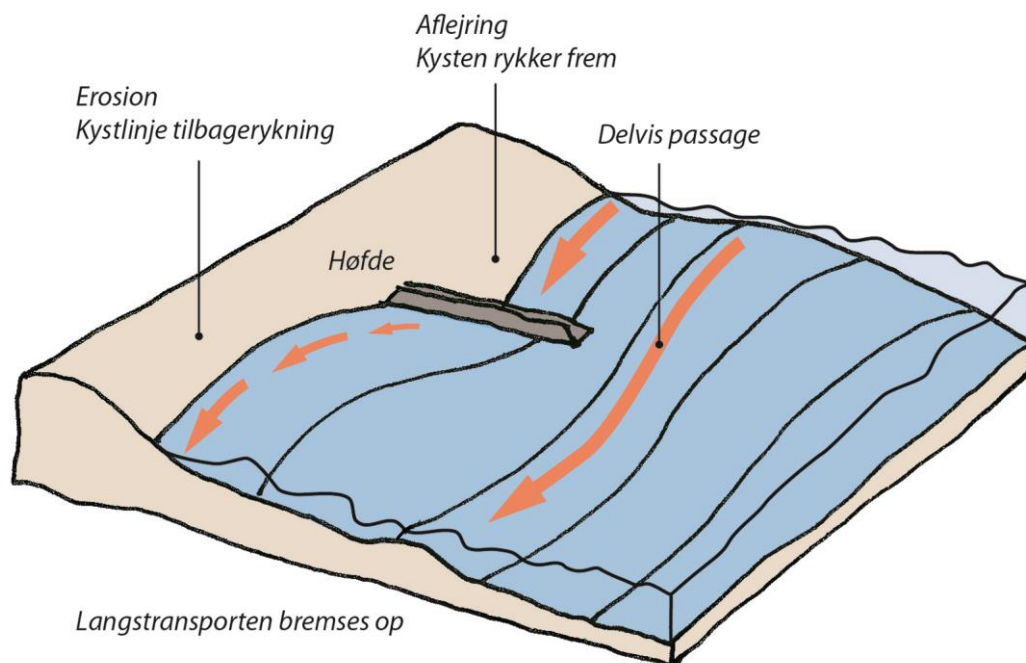
- Høfder
- Bølgebrydere
- Skråningsbeskyttelse

Høfder

Høfder er en konstruktion, typisk en stenkastningskonstruktion, som er opført fra bagstranden og vinkelret på kystlinjen ud til en vis afstand fra kysten.

Virkemåde

Høfdens virkemåde er at den blokerer for den del af langtransporten som foregår mellem strandlinjen og udstrækningen af høfden. Derved fanges en del af langtransporten og sandet aflejres opstrøms for høfden i forhold til transportretningen. Virkemåden er således at der fanges sand som kompensation for eksempelvis kronisk erosion. Det sand der fanges stabiliserer således kysten på en strækning opstrøms for konstruktionen, men dette er på bekostning af at det samme sand mangler på den nedstrøms side. En høfde flytter således erosionen nedstrøms, dette kaldes **læsiderosion**.

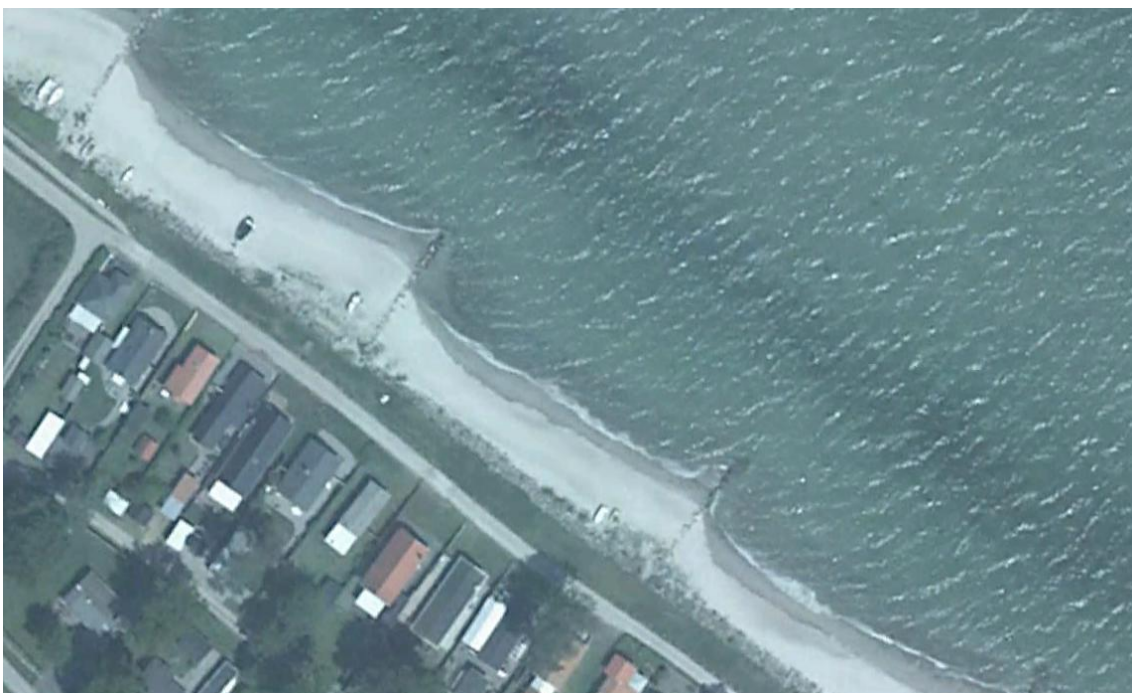


Figur 3.1 Langtransporten blokeres helt eller delvist af høfden. Sand akkumuleres og kysten vokser ud tæt på høfdens opstrøms side. Langtransport skal bygges op igen til samme niveau som før høfden, hvilket giver erosion og kysttilbagerykning tæt på høfdens nedstrøms side

En forudsætning for at en hølde virker er således, at der er en vis netto langtransport.

Formen af tilsandingen er afhængig af hovedindfaldsvinkelen mellem bølgerne og kystnormalen. Ved bølger med en lille indfaldsvinkel dannes en lang tilsanding og ved bølger med en stor indfaldsvinkel dannes en meget kort tilsanding. Ved bølger med en stor indfaldsvinkel kan hølften desuden medføre at sandet føres bort fra kysten hvorved kysten destabiliseres. Derfor har hølfter bedst virkning ved kyster med klassifikationen moderat og eksponeret med retningsklassifikationen 2 og 3.

Hølfter udføres ofte over længere stræk som flere hølfter placeret i en række med en vis afstand. Denne formation kaldes en høldegruppe eller et høldefelt.



Figur 3.2 Hølfter, fra Google Earth.

Hølfternes længde udgør oftest kun en fraktion af bredden af den aktive zone - typisk vil de nå ud til ca. $\frac{1}{2}$ af den aktive dybde.

Hølfterne udføres oftest så de overskylles voldsomt under de dimensionsgivende forhold, topkoten er typisk ca. 80% af den dimensionsgivende vandstand.

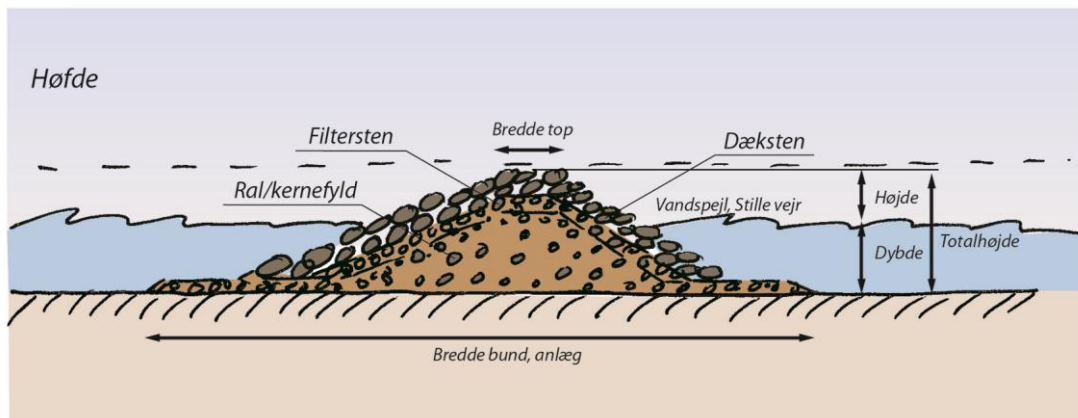
Afstanden mellem hølfterne vil afhænge af længden af hølften og af indfaldsvinklen for de fremherskende bølger. Afstanden kan typisk sættes til 2,5 gange længden af hølften.

En hølde vil typisk reducere erosionsraten med 50% idet erosionen jo fortsætter i kystprofillet søværts for hølftendeerne og læsideerosionen bliver derfor ca. 50% af erosionsraten.

Hølfter virker ikke imod akut erosion, og da erosionen ikke stoppes 100% vil kystprofillet efter et stykke tid begynde at rykke tilbage, som forklaret i kapitlet "Erosionskystens sedimentbudget – det samlede billede".

Konstruktion

Høfderne bygges typisk med en kerne/filter af blandede stenfraktioner (ral/håndsten) med et dæklag bestående af 2 lag armeringssten. Hældningen af høfdesiderne er typisk 1:2. Bredden af den vandrette top af en høfde sættes lig med topkoten for alle farvande bortset fra for Vesterhavet, hvor bredden sættes til 2 gange topkoten, fordi der skal kunne køres på disse store høfder for at kunne udføre vedligeholdelse.



Figur 3.3 Principielt snit gennem høfde. Se tekst og tabel for dimensionering under forskellige forhold.

Stenvoluminet er overslagsmæssigt beregnet ud fra disse dimensioner.

Tabel 3.1 Oversigt over høfdeparametre som funktion af eksponeringsgraden (farvandsområder)

	Dybde	Topkote	Længde	Afstand	Sandfyld	Læsideerosion	Totalvolumen	Dæksten
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ³ /m)	(m ³ /m/år)*	(m ³ /høfde)	(m ³ /høfde)
Lille	0,7	1,5	25	60	3	0,1	270	110
Moderat	1,5	1,5	80	200	20	0,3	1300	410
Stor	2,0	1,5	125	300	40	1	2565	675
Meget stor	3,5	2,6	250	600	150	15	19000	2300

*Denne mængde er regnet i forhold til længden af den beskyttede strækning.

Sandtilførslen i tabellen er estimeret ud fra følgende forudsætninger

1. Der fordres med sand mellem høfderne i forbindelse med byggeprojektet. Dermed reduceres læsideerosionen i indkøringsfasen efter etableringen er udført. Det tager nemlig noget tid for sandet at finde sit naturlige leje, hvilket i denne periode kan medføre yderligere læsideerosion, hvis der ikke er et overskud af sand.
2. Der kompenseres samtidig for læsideerosionen ved at fodre langs strækningen på læsiden af høfdegruppen med den mængde som svarer til den erosion som høfderne forhindrer. Dette er den erosion som høfderne "eksporterer" til læsideområder.

Førstnævnte forudsætning vil oftest være et krav fra myndighederne. Sidstnævnte forudsætning vil indgå som et krav for fremtidige høfdeprojekter, men har ikke historisk været praktiseret. Dette er en af årsagerne til at mange af landets sandstrande er stærkt underforsynede med sand. Kravet til at kompensere for læsideerosionen ved en høfdegruppe kan muligvis gøre det vanskeligt for eksempelvis for en grundejerforening at administrere, da sandfodringer skal ske jævnlige. Dette taler for helheds løsninger for længere strækninger.

Høfder er konstruktioner mest bestående af store sten

Høfder er konstruktioner, der bygges vinkelret på kysten

*Høfder **nedsetter** erosionen i konstruktionens levetiden*

Høfden forhindrer ikke erosion 100%

Høfder blokerer langtransporten ud til den dybde, hvor høfden ender, hvorfor det sand der ellers ville have passeret akkumuleres opstrøms (på luvsiden).

Høfder skaber nedstrøms (læside-) erosion svarende til det sand, der er blevet holdt tilbage

En procentdel af den langsgående transport vil i mange tilfælde passere forbi høfderne

Over tid vil den del af den totale erosion, der ikke er bremset nå ind mellem høfderne, hvorved kystprofilen begynder at rykke tilbage

Bølgebrydere

En kystbeskyttelse kan udføres som en række af bølgebrydere, der ligger i en afstand fra stranden og er parallelle med kysten.

Virkemåde

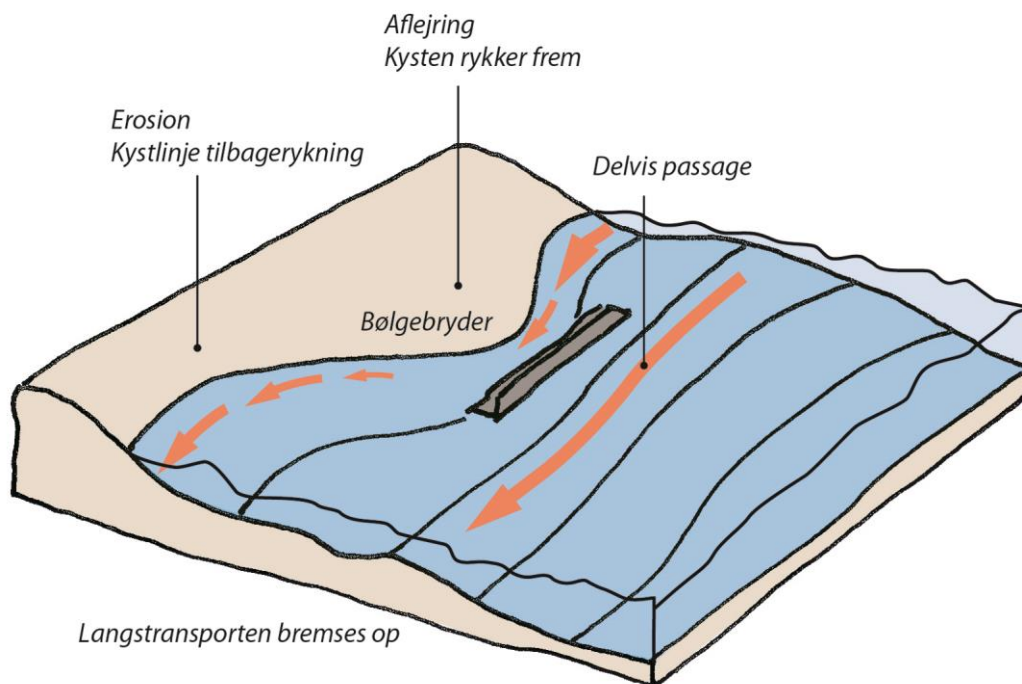
Bølgebryderne virker dels ved at de direkte mindsker den bølgeenergi, der når ind på kysten, men i højere grad ved at der samler sig sand bag hver bølgebryder, hvilket bremser strømmen og sandtransporten langs kysten.

I nogle tilfælde kan der samle sig så meget sand, at stranden bag bølgebryderen når helt ud til denne og blokerer fuldstændigt for transport bag bølgebryderne.



Figur 3.4 Kyst med bølgebrydere, Google Earth.

I en typisk udformning vil bølgebryderne blive bygget i den indre del af den aktive zone i en afstand på svarende til ca. 30% af dens bredde. Længden af bølgebryderne er lidt mindre end deres afstand fra kysten, og mellemrummet mellem dem svarer til omkring $1\frac{1}{2}$ gange længden. Højden er typiske omkring 80% af den dimensionsgivende vandstand, hvilket vil give voldsom overskyning under kraftige storme.



Figur 3.5 Sandet samler sig bag en bølgebryder og skaber læside nedstrøms erosion

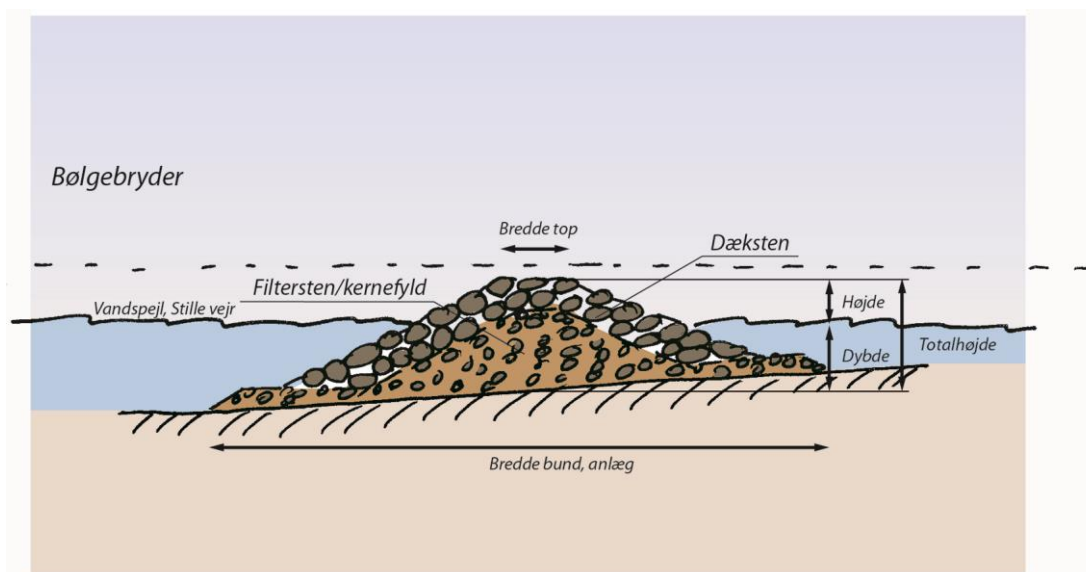
Bølgebryderne vil således reducere langstransporten inde bag sig og eventuelt helt blokere den. Transportraten reduceres typisk med 50% procent. Ligesom for høfder vil en række bølgebrydere skabe læsideerosion på kyststrækningen, som nu får reduceret sin tilførsel af sand, og der må påregnes, at skulle kompenseres med sandfodring på den nedstrøms strækning.

På strækninger med bølger, der kommer ind med en lille vinkel kan det være en fordel at udføre færre men større bølgebrydere, som er placeret med større afstand. Ved små indfaldsvinkler er langstransporten af mindre betydning, alligevel vil der også i det tilfælde samle sig sand bag konstruktionen. Grunden til dette er, at de brydende bølger virker med en kraft ind mod stranden, som forårsager bølgestuvning. Bag bølgebryderen er bølgerne meget svagere og vandet vil derfor strømme ind bag denne, hvor der ikke er nogen opstuvning. Resultatet er en cirkulationsstrøm, som trækker sandet ind bag bølgebryderen.

Da bølgebryderne mindsker bølgeenergien lokalt har de en vis virkning mod akut erosion bag den enkelte bølgebryder. Mellem dem er den akutte erosion ikke mindsket væsentligt og på grund af cirkulationsstrømmen vil det eroderede sand føres ind bag bølgebryderne, hvilket kan sinke den efterfølgende naturlige retablering af stranden.

Konstruktion

Dimensioneringen af bølgebrydere følger i stor grad dimensioneringen af høfder.



Figur 3.6 Principskitse af bølgebryder. Se tekst og tabel for dimensionering under forskellige forhold.

Ud fra de beskrevne forudsætninger (se under hofdér) er følgende overslag på dimensioner givet.

Tabel 3.2 Oversigt over bølgebrydere som funktion af eksponeringsgraden (farvandsområder)

	Dybde	Topkote	Længde	Afstand	Sandfyld	Læside-erosion	Totalvolumen	Dæksten
Eksponering	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ³ /m)	(m ³ /m/år)*	(m ³ /høfde)	(m ³ /høfde)
Lille	0,7	1,5	20	25	3	0,1	260	160
Moderat	1,5	1,5	64	80	20	0,3	1440	740
Stor	2,0	1,5	100	125	40	1	3000	1380
Meget stor	3,5	2,6	200	250	150	15	18000	9000

*Denne mængde er regnet i forhold til længden af den beskyttede strækning.

Det er i tabellen forudsat, at der som en del af byggeprojektet fyldes sand ind bag bølgebryderne. Såfremt dette ikke gøres vil den umiddelbare virkning af bølgebryderne være erosion mellem dem. Sandindfyldningen vil ligeledes reducere læsideerosionen i den tid efter etableringsfasen, hvor sandet endnu ikke har lejret sig ordentligt. Dette vil derfor oftest være et krav fra myndighederne.

Herudover er det forudsat at der over årene kompenseres for læsideerosionen ved at fodre langs strækningen på læsiden af gruppen af bølgebrydere. Den mængde der skal fordres med for at kompensere for høfdernes læsideerosion svarer til det sand som høfdegruppen tilbageholder, hvilket her - jf. forklaringen af virkemåden - anslås til at være ca. 50% af den erosion, der ville have været foregået, hvor bølgebryderne er placeret. En sådan kompensationsfodring vil indgå som et krav for fremtidige projekter, men har ikke historisk været praktiseret. Dette er en af årsagerne til at mange af landets sandstrande er stærkt underforsynede med sand. Kravet til at kompensere for læsideerosionen ved en bølgebryder vil gøre det vanskeligt for eksempelvis en grundejerforening at administrere fordi de skal administrere jævnlige sandfodringer. Dette taler for helhedsløsninger for længere strækninger.

Bølgebrydere er konstruktioner mest bestående af store sten

Bølgebrydere er konstruktioner der bygges parallelt med kysten

Bølgerne skygges væk bag bølgebryderen

*Bølgebrydere **ned sætter** erosionen i konstruktionens levetiden*

Bølgebrydere forhindrer sjældent erosionen 100%

Langtransporten dæmpes/stoppes helt ud til den dybde, hvor bølgebryderen befinder sig

Sandet der ville have passeret akkumuleres bag bølgebryderen.

En del af den langsgående transport vil i mange tilfælde kunne passere udenfor bølgebryderen

Bølgebrydere skaber nedstrøms erosion svarende til det sand, der er blevet holdt tilbage

Skråningsbeskyttelse

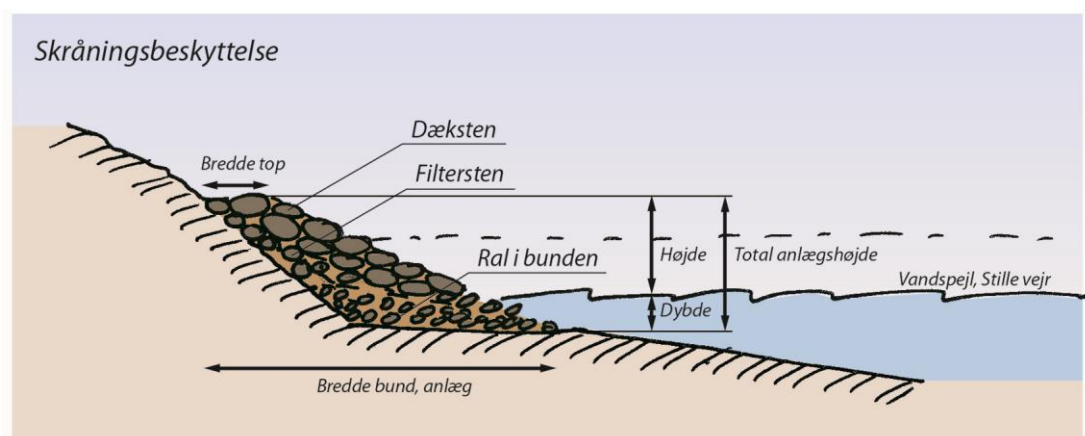
Virkemåde

En skråningsbeskyttelse er et anlæg direkte på den eroderende kyst, som skal fastholde denne. Beskyttelsen kan anlægges neden for klinter eller på forsiden af klitter og kan også etableres til beskyttelse af eksponerede diger.

Skråningsbeskyttelse virker direkte ved at hindre erosion på det sted den er placeret. Den forhindrer frigivelse af sand fra strandplanet og modvirker derfor akut erosion.

Skråningsbeskyttelsen griber ikke ind i transporten i den ubeskyttede del af profilet og har derfor ikke nogen umiddelbar virkning på den langsgående sandtransport. Såfremt kysten er udsat for kronisk erosion, vil denne derfor fortsætte, og stranden vil blive smallere og smallere, og til sidst vil der blive eroderet foran beskyttelsen, som må forstærkes med jævne mellemrum for at holde funderingen intakt. Skråningsbeskyttelse alene er derfor ikke velegnet som beskyttelse mod kronisk erosion.

Såfremt beskyttelsen udformes som en tæt, stejl murkonstruktion vil indfaldende bølger i høj grad blive reflekteret. Refleksionen giver forøget bølgeaktivitet foran konstruktionen, som vil medføre kraftigere sandtransport og øge erosionspresset. Skråningsbeskyttelsen vil derfor oftest blive udført som stenkastning, som skråner og har et stort porevolumen og hvor bølgerefleksionen er mindre betydende.



Figur 3.7 Snittegning af skråningsbeskyttelse. Se tekst og tabel for dimensionering under forskellige forhold.

Konstruktion

På basis af ovenstående foreslås følgende parametre til den videre vurdering

Tabel 3.3 Oversigt over skråningsbeskyttelse parametre som funktion af eksponeringsgraden (farvandsområder)

	Funderingskote	Topkote	Sandopfyldning	Læsideerosion ^{*)}	Stenvolumen per m længde beskyttelse	
					Armeringssten	Filtersten
Eksposering	(m)	(m)	(m ³ /m)	(m ³ /m/år)	m ³ /m	m ³ /m
Lille	0,0	3,0	3	0,2	5,5	5
Moderat	-0,5	4,4	20	0,5	10	7
Stor	-1,0	5,4	40	2,0	15	22
Meget stor	-1,0	10,4	150	30	50	13

^{*)} Det antages at der sandfodres foran eller nedstrøms beskyttelse, da den kroniske erosion ikke stopper.

I tabellen er det forudsat, at skråningsbeskyttelsen er udført med en topkote for bølgeeksponerede konstruktioner, se Tabel 2.7. Da profilet må forventes at have været udsat for erosion ved opførelsen tilføres der sand. Som kompensation mod kronisk erosion må der påregnes at skulle fodres jævnlige med sand. Det kan gøres som læside sandfodring, hvis konstruktionen forudsættes jævnlige vedligeholdt. Ofte vil det være mere fordelagtigt at fodre foran skråningsbeskyttelsen, som da hovedsageligt vil fungere mod akut erosion under særligt voldsomme storme.

Skråningsbeskyttelse virker lokalt og mest mod akut erosion

Uden kompensation for kronisk erosion i profilet vil skråningsbeskyttelsen på sigt blive undermineret og skride ud i profilet

Skråningsbeskyttelse vil lokalt virke delvist mod kronisk erosion

Lokal læside erosion vil forekomme

Om hårde konstruktioners vedligeholdelse

Hvis hårde konstruktioner som bølgebrydere, hølde eller skræntbeskyttelse er udført korrekt vil vedligeholdelsesudgifterne til reparationer være marginale (udover udgifter til kompensationssandfodringer). For konstruktioner der derimod er udført forkert eller er fejldimensionerede, vil der skulle udføres opretningsarbejde, mv.. Langs de danske kyster eksisterer der er en lang række kystbeskyttelsesforanstaltninger der ikke er dimensionerede til klimaforandringerne. Hvordan disse konstruktioner kan opgraderes til nye de designbetingelser ligger ud over denne rapport's område.

3.2.2 Beskyttelse der udnytter naturens kræfter

Forskellige former for sandfodringsstrategier vil blive belyst i det følgende, inklusiv deres virkemåder, og deres fordele og ulemper.

- Traditionel sandfodring jævnt langs kysten og dækkende størstedelen af det aktive profil.
- Store depotfodringer, som omfatter tilførsel af den samme mængde sand i gennemsnit per længdeenhed af projektområdet men hele mængden af sand placeres som et depot på én lokalitet.
- Aktive kystdræn, som et aktivt dræn der lægges ned i strandprofilet i opskyls-zonen hvorved forstranden delvist stabiliseres

Sandfodring

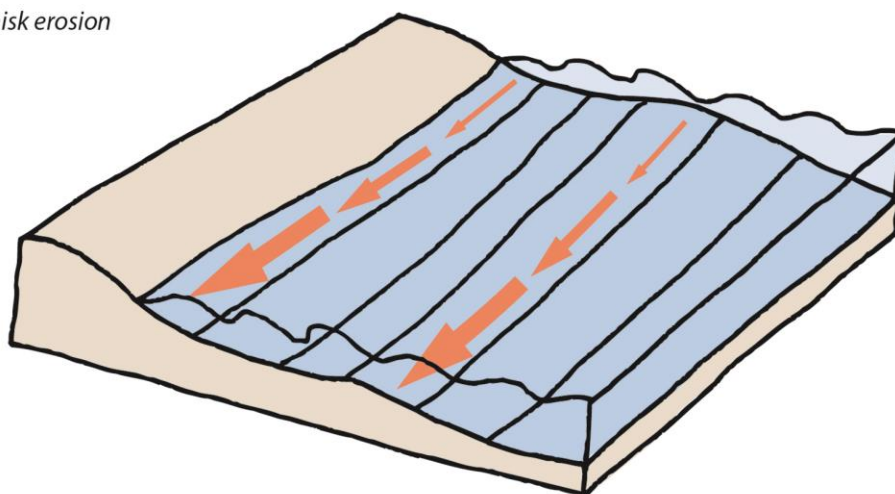
Virkning af sandfodring

Sandfodring kan anvendes som selvstændig kystbeskyttelse, hvor der med jævne mellemrum tilføres sand for at kompensere for erosionen og derved fastholde kysten. Som beskrevet ovenfor vil beskyttelse med konstruktioner ofte blive kombineret med en tilførsel af sand til at fylde op mellem eller foran konstruktionerne, ligesom regelmæssig sandfodring kan være nødvendig for at afbøde læsideerosion nedstrøms for en strækning beskyttet med konstruktioner.

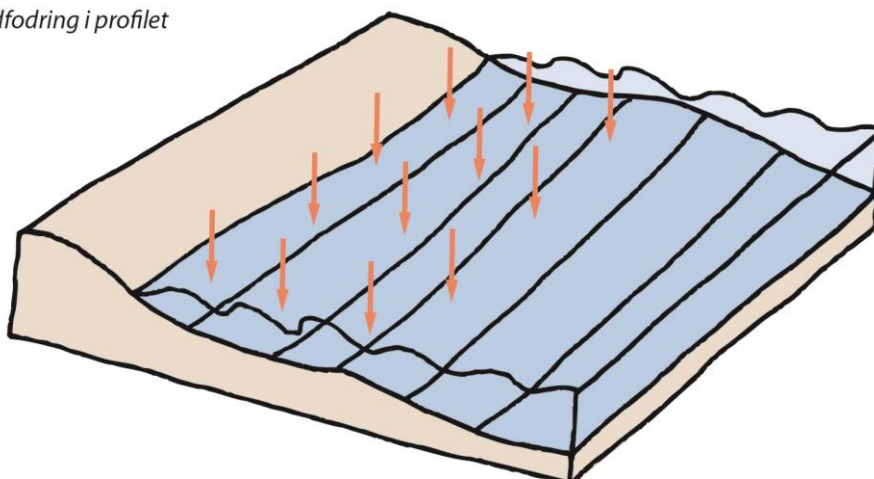
I overordnede træk virker sandfodring ved at tilføre kysten det sand som normalt eroderes over længere perioder. Det betyder at sandfodring virker ind på den kroniske erosion. Man kan forestille sig at sandfodring så at sige modsvarer den grad som den langsgående transport stiger per km.

Sandfodring kan i princippet også udføres så den virker mod akut erosion. Dette forudsætter dog at der tilføres tilstrækkeligt med sand der kan fungere som en buffer for den akutte erosion. Hvorvidt dette altid kan garanteres kan kun afgøres i den enkelte sag.

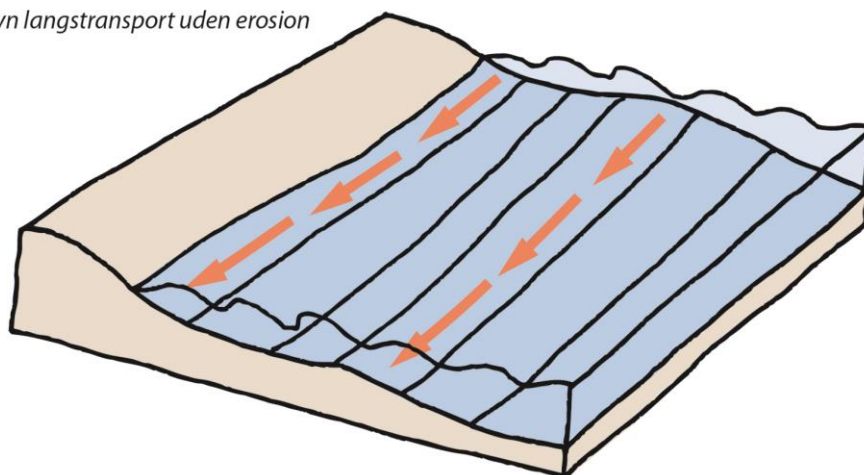
Kronisk erosion



Sandfodring i profilet



Jævn langstransport uden erosion



Figur 3.8 Ved at tilføre sand i profilet (tegning i midten) som den langsgående transport tager væk (tegning øverst) vil kysten komme til at "ligne" en kyst i ligevægt, dvs. en kyst med en langsgående transport, der ikke varierer langs kysten (tegning nederst). De to situationer (øverst og midterst i forhold til nederste situation) er *ækvivalente*

Etablering af sandfodring

Ved større sandfodringer vil sandet blive indvundet til søs med et sandsugningsfartøj og sejlet til den aktuelle kyststrækning. Sandet kan også stamme fra kyster, hvor der akkumuleres sand, for eksempel hvis en havn har blokeret for langstransporten kan det akkumulerede sand føres over til læsiden for at modvirke læsideerosion. Oprenset sand fra sejlløb kan også nyttiggøres til sandfodring. Mindre mængder kan indvindes på land og transporteres med entreprenørmateriel.

Fodringsmaterialet skal være sand uden væsentlige mængder fint sediment. Det skal helst være lidt grovere end det oprindelige strandsand, da finere sand lettere eroderes og er mere udsat for fygning.

Der findes forskellige former for sandfodring, som er beskrevet i det følgende.

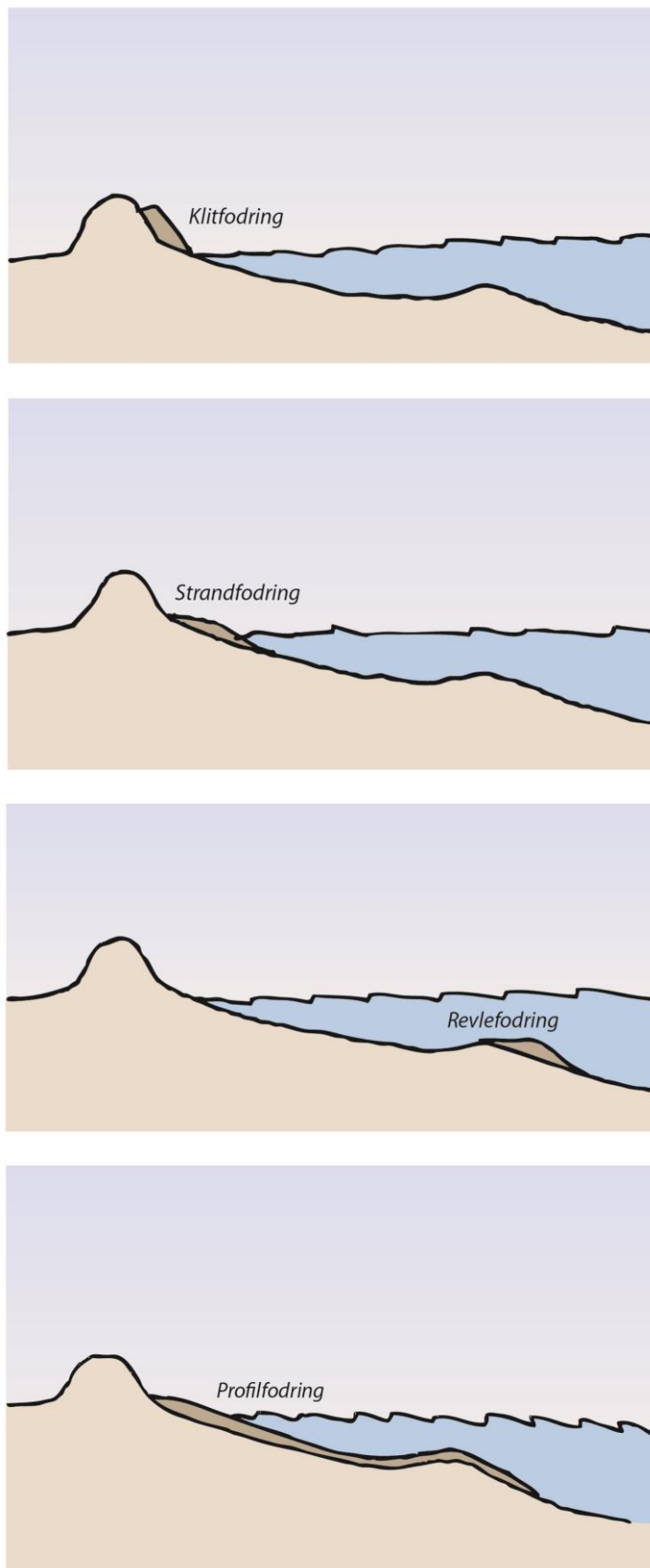
Fodring af bagstranden. En fodring på bagstranden forstærker den øvre del af stranden for eksempel langs kliffoden eller foran en skråningsbeskyttelse. Sandet udgør en buffer, som kan fjernes ved akut erosion under en ekstrem hændelse og forhindre erosion af en skræntfod eller gennembrud eller svigt af en beskyttelse mod oversvømmelse. Sandet udgør ikke en del af det naturlige strandprofil og der vil eroderes betydelige mængder med dannelse af en erosionsskrænt. Der vil normalt være tale om en midlertidig beskyttelse, som ikke er hensigtsmæssig som en form for langsigtet beskyttelse med fodring.

Fodring af bagstranden kan udføres ved at pumpe sandet ind fra en sandsuger gennem rør til foden af klitten eller skråningen, der skal beskyttes. Det vil ofte være nødvendigt at anvende en bulldozer eller gummiged til at få sandet op i det ønskede profil.

Strandfodring. Tilførsel af sand til strandprofilet modvirker erosion og vil også gøre stranden bredere. Profilet er tæt på det naturlige og erosionen vil forgå som på en naturlig strand. Sandet kan pumpes ind fra en sandsuger gennem rør, eller sandsugeren kan sejle helt op på kysten og pumpe sandet ind på stranden i en stråle. Mindre fodringer kan gennemføres med entreprenørmateriel.



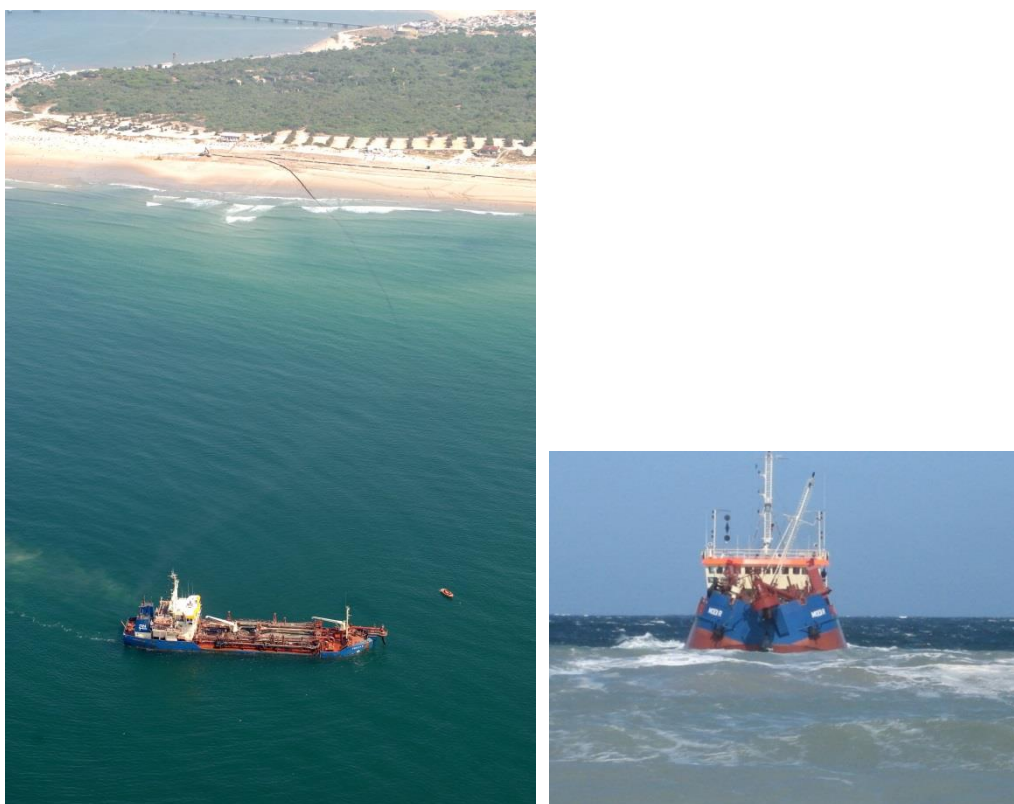
Figur 3.9 Strandfodring ved indpumpning af sand i en stråle ('Rainbow') fra sandsugeren. Rohde Nielsen.



Figur 3.10 Principper for sandfodring.

Revlefodring. Revlefodring er en metode, som har vundet øget udbredelse fordi den er billigere per tilført kubikmeter sand. Sandet lægges ude i kystprofilet enten på en eksisterende revle eller ved at der opbygges en ny kunstig revle. Sandet kan klappes direkte ved at sandsugeren åbner lemme i bunden eller splitter på langs.

Sandet tilføres det aktive profil og metoden er for hver kubikmeter lige så effektivt mod kronisk erosion som strandfodring. Revlefodring modvirker forstøjning af profilet på grund af erosion, som det sker ud for beskyttelse med høfder og bølgebrydere, men da strandens bredde ikke umiddelbart øges er den ikke direkte effektiv mod akut erosion. Revlefodring kan udføres i kombination med strandfodring for at styrke hele profilet.



Figur 3.11 Indpumpning af sand på stranden og revlefodring med sandsuger med split-skrog. Rohde Nielsen.

Mængderne der anvendes til sandfodring afspejler den aktuelle erosionsrate på den beskyttede strækning, og i hvor høj grad profilet i forvejen mangler sand på grund af mangelfuld beskyttelse og vedligeholdelse.

Sandfodring kan bruges enten som en selvstændig metode til at modvirke erosion eller som supplement til at modvirke de negative erosionseffekter som hårde konstruktioner påfører kysten på læsiden af konstruktionerne.

Dette understreger at kystfodring er et særdeles vigtigt redskab for god kystvedligeholdelse.

Sandmængder. I nedenstående tabel ses en oversigt over vurderede mængder af kystfodring for de fire eksponeringsgrader.

Tabel 3.4 Oversigt over sandfodring som funktion af eksponeringsgraden

Eksponeering	Dybde	Topkote	Projektområde	Initiel sandtilførsel*	Vedligeholdelse ***
	(m)	(m)	(m)	(m ³ /m)	(m ³ /m per år)
Lille	1,3	2,0	100	6*	0,2
Moderat	3,0	1,9	500	15*	0,5
Stor	4,0	1,9	1.000	60*	2,0
Meget stor	6,5	3,3	25.000	30**	30

*Forudsætter at strækning har været sikret med faste konstruktioner i lang periode ~ 30 år og at det aktive kystprofil skal genoprettes, eksempelvis Sjællands Nordkyst. Det er således fodring for at oprette 30 års underskud.

**Forudsætter at kysten har været vedligeholdt med fodringer årligt, eksempelvis Vestkysten. Det er således fodring for et års underskud.

***Vedligeholdelsesfodringmængden er taget til præcis at modsvare erosionsraten på kysten

Sandfodringer virker ved at tilføre den mængde sand der over en given strækning forsvinder pga. erosion.

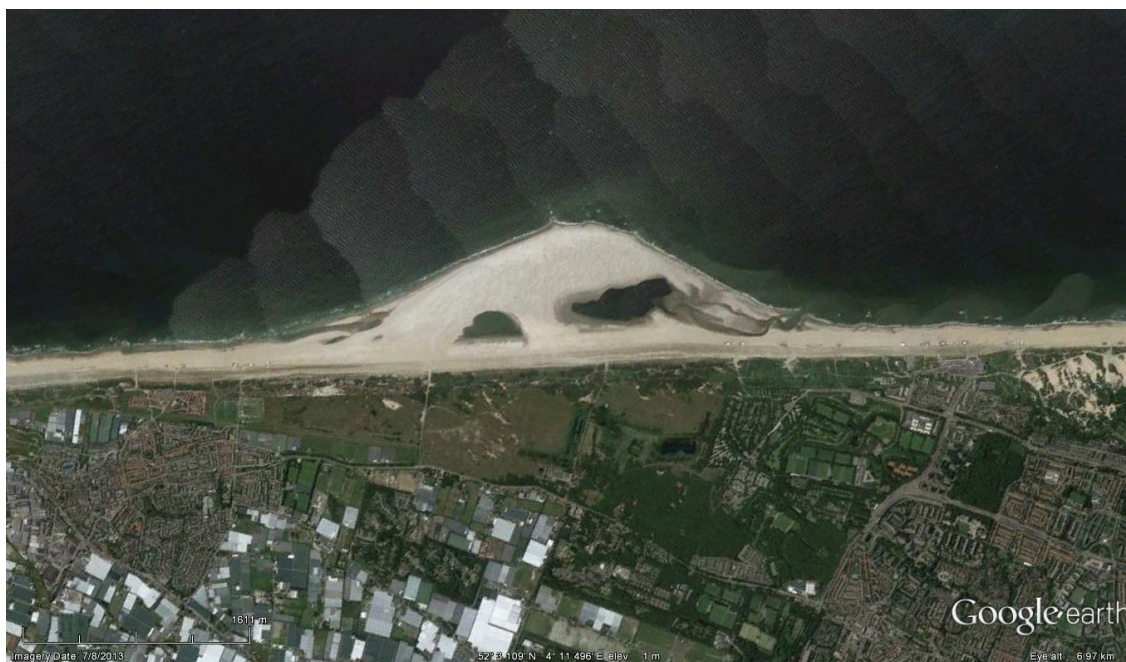
Sandfodring lader naturens kræfter fordele det tilførte sand.

Sandfodring bør kun anvendes på sandkyster

Depotfodringer

Ved en depotfodring placeres der en større mængde sand på kysten (sandfodring), svarende til adskillige års langtransport på en enkelt lokalitet. Sandet skal så fordeles langs kysten ved den naturlige transport, der gradvis vil udjævne den formation, der er dannet kunstigt, og føre sandet i transportretningen. Fordelen er at der det er de naturlige processer, der er aktive, og at miljøet i kystprofilen ikke forstyrres over længere strækninger som det er tilfældet ved jævn tilførsel af sand med korte tidsintervaller (årlig fodringer, f.eks.). Sandet kan forventes at forblive i det aktive profil og depotet vil efterhånden, som sandet er fordelt over strækningen, udgøre en effektiv erosionsbeskyttelse. Det vil dog tage mange år før sandet er jævnt fordelt over en længere strækning og metoden vil derfor først efter nogle år kunne erstatte mere konventionelle metoder til kystbeskyttelse på de tilstødende strækninger.

Metoden er udviklet i Holland, hvor omkring 20 millioner kubikmeter sand er anbragt i den såkaldte Sandmotor, der dækker et areal på mere end 1 kvadratkilometer. Metoden er ikke hidtil anvendt i Danmark, men der er intet til hinder for at man kan begynde at vurdere mulighederne for at afprøve en sådan metode. Da denne kystsikringstype er en særlig indgriben i kystens dynamik og æstetiske fremtoning kræver store depotfodringer et grundigt forstudie af virkningen på den givne lokale strækning.



Figur 3.12 Sandmotoren i Holland, to år efter fodringen, foto fra Google Earth.

Selvom depotfodring endnu ikke er blevet afprøvet som metode i Danmark kan man lave nogle overslag over de mængder, der er tale om for de fire eksponeringsgrader. Resultatet af en sådan vurdering er givet i nedenstående tabel.

Tabel 3.5 Oversigt over sandfodringsparametre som funktion af eksponeringsgraden (farvandsområder) for depotfodring.

Eksponering	Initiel sandtilførsel	Bredde	Topkote	Volumen	Længde	Afstand
	(m ³)	(m)	(m)	(m ³ /m)	(m)	(m)
Lille	6.000*	50	2,0	150	80	100
Moderat	150.000*	180	1,9	810	370	500
Stor	1.800.000*	280	1,9	1.500	2.400	1.000
Meget stor	3.000.000**	580	3,3	5.000	1.200	25.000

**Forudsætter at strækning har været sikret med faste konstruktioner i lang periode ~ 30 år og at det aktive kystprofil skal genoprettes, eksempelvis Sjællands Nordkyst. Det er således fodring for at oprette 30 års underskud.*

***Forudsætter at kysten har været vedligeholdt med fodringer årligt, eksempelvis Vestkysten. Det er således fodring for et års underskud.*

****Vedligeholdelsesfodringsmængden er taget til præcis at modsvare erosionsraten på kysten*

Depotfodringer virker ved at lade naturen sprede sand fra kunstigt etablerede sanddepoter på kysten ved hjælp af den langstransport formationen selv medvirker til at skabe

Der er ingen erfaring med depotfodring i Danmark og ganske få i udlandet

Depotfodringer giver sig udslag få intensive sandfodringsperiode og en udeblivelse af sandfodringer herimellem

Depotfodringer beror sig på naturens kræfter og kan ikke kontrolleres.

Ralfodring

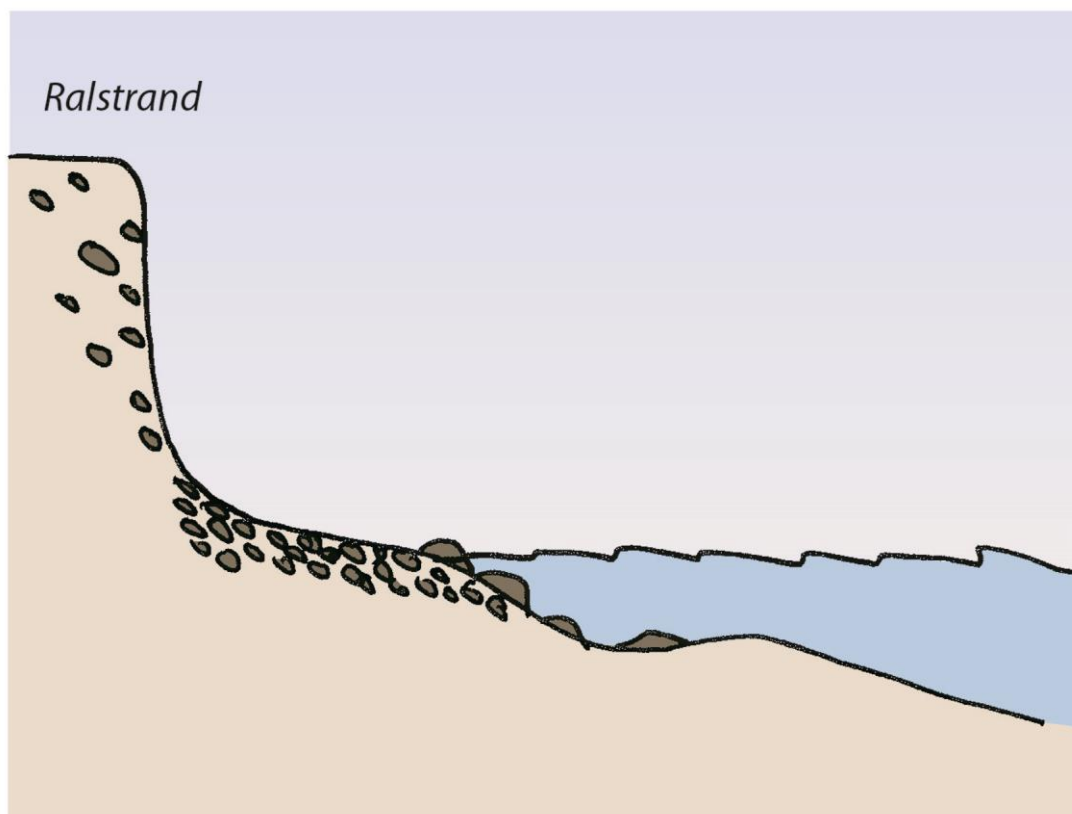
Ralfodring består i at tilføre ral til den øvre del af strandprofiler som beskyttelse imod erosion af en kystklint. Denne type kystbeskyttelse kan opfattes som en blød skråningsbeskyttelse som virker mere naturlig end en egentlig fast skråningsbeskyttelse. Sten og ral forekommer naturligt på erosionskyster hvor geologien består af moræne eller kridt. Ral transporteres kun i mindre grad langs kysten mens rallens rolle i tværtransporten typisk giver anledning til at ral transporteres landværts over stranden hvilket medfører dannelse af højtliggende ralstrandvolde. Dette forudsætter at der er tilstrækkelig med ral i nedbrydningsprodukterne fra moræneklinten. Sådanne ralstrandvolde udgør et naturlig beskyttelse især imod akut erosion, se foto Figur 3.13



Figur 3.13 Ralstrandvold ved Voderup Klint på vestkysten af Ærø, erosionskyst med moræneklinter.

På klintekyster hvor der ikke er tilstrækkelige mængder af ral til af der kan dannes ralstrandvolde kan man derfor beskytte imod akut erosion ved at tilføre ral langs klintfoden.

Der kan ligeledes dannes ralstrandvolde ved erosion af havbunden ud for lavtliggende arealer og efterfølgende opskylning af rallen i strandvolde. Denne type ralstrandvolde udgør en slags naturligt dige, se foto i Figur 3.14.



Figur 3.14 Ralstrandvold opskyllet ud for lavtliggende bagland, VSV vendte kyst yderst på Sjællands Odde.

Ralfodring kan således benyttes som en ”blød” beskyttelse imod akut erosion og imod oversvømmelse. Da en ralfodring virker som beskyttelse imod akut erosion, som typisk er af mindre omfang end kronisk erosion og som delvis er en reversibel proces, vil ralfodring kun medføre ubetydelig øget erosion på nabostrækninger og ralfodring kan således udføres uden kompenserende foranstaltninger. Ralfodring er ikke en offer fodring som eksempelvis sandfodring og ralfodring kræver derfor kun minimal vedligeholdelse.

Ralfodring skal have en topkote TKR som er den dimensionsgivende vandstand V plus bølgeopløbet, som i dette tilfælde kan sættes som 40% af bølgehøjden: $TKR \text{ ca.} = 0.4H + V$.

På basis af disse overvejelser foreslås følgende parametre til den videre vurdering, jævnfør Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Oversigt over ralfodringsparametre som funktion af eksponeringsgraden (farvandsområder).

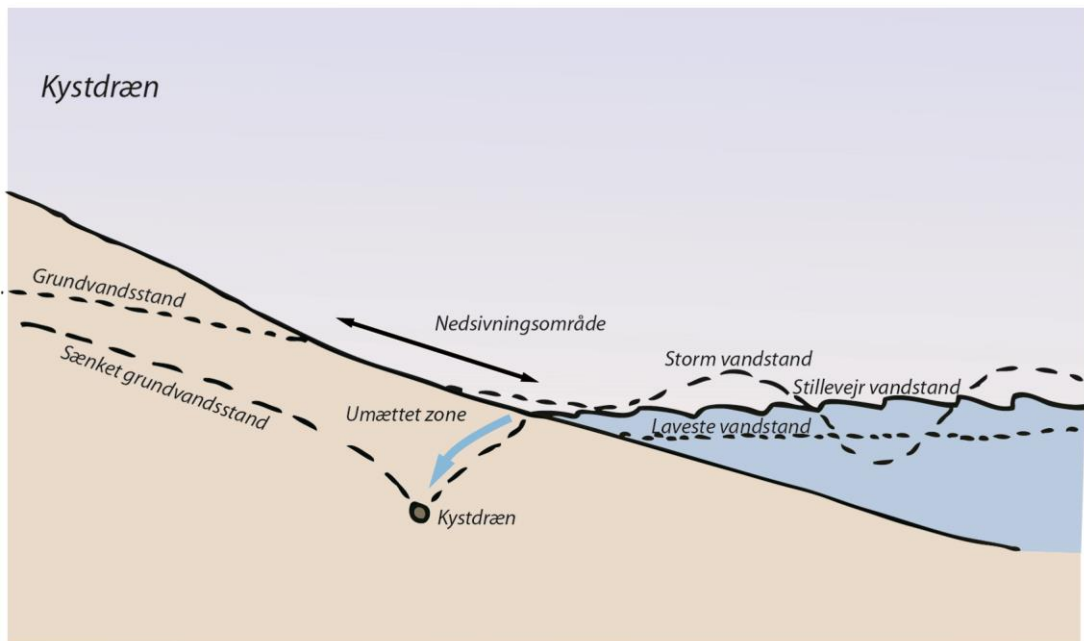
Eksposering	Funderingsdybde	Topkote	Bredde af ralfodring	Raltilførsel
	(m)	(m)	(m)	(m ³ /m)
Lille, fjorde	1,0	2,4	2	2,8
Moderat, bæltter	1,5	2,9	3	4,2
Stor, Kattegat og Østersøen	1,5	3,4	4	7,6
Meget stor, Vesterhavet	3,0	6,1	6	18,6

Ralfodring kan benyttes ved kyster, der i forvejen er karakteriseret ved at have ralstrande

Ralstrande kan i tilfælde af lavtliggende baglande forhøjes og dermed virke som kombineret erosions- og oversvømmelsesbeskyttelse

Aktive kystdræn

Et aktivt kystdræn er et patenteret system, der fungerer ved at sænke grundvandstrykket og bortdræne vand fra stranden. Der installeres et vandret drænrør i plastic langs strandlinjen i bølgerens opskylszone mellem en halv og to meter nede i sandet. Drænet forbindes til en pumpeump, hvor vandstanden holdes lav ved pumpning. Det eneste synlige element er således installationerne i forbindelse med pumpestationen. Det oppumpede vand er salt og ledes tilbage til havet eller, hvis muligt, til en bagvedliggende lagune. På en tidevandskyst placeres drænet nær højvandslinjen.



Figur 3.15 Skitse af kystdrænets virkemåde under forhøjet vandstand og bølgeopskyld.

Kystdrænet virker på to måder. Dels medfører bortpumpningen af vand fra opskylszone at bølgerens opskyl bliver en anelse kraftigere end tilbageskyllet, og dels medfører grundvandsstrømningen at der dannes et nedadrettet vandtryk, der virker stabiliserende på sandet. Kystdrænet vil derfor medføre, at der samles en sandpude omkring strandlinjen under mere milde bølgeforhold. Under en storm vil kræfterne være så voldsomme, at kystdrænet ikke spiller nogen særlig rolle, men det sand, der har samlet sig før stormen vil gøre stranden mere modstandsdygtig mod akut erosion. Stranddrænet virker på den måde som en mindre strandfordring, der gentages mellem stormene med sand, der tages længere ude i det aktive profil. Det kan således give en bredere og mere attraktiv strand.

Stranddrænet fungerer på sandstrande med kornstørrelse op til omkring 1 mm, grovere materiale har for stor permeabilitet og vil kræve pumpning af store vandmængder. Det kræver en vis bølgeaktivitet for at kunne samle sand, men metoden er mindre egnet på højt eksponerede kyster, fordi mængden af sand, der samles, vil være lille i forhold til, hvad der eroderes under en storm. En høj grundvandsstand i baglandet kan medføre udsivning af vand på stranden og være ugunstig for erosionsforholdene; stranddrænet kan her være en effektiv modforanstaltning.

Stranddrænet er kun effektivt omkring drænrøret og har ikke nogen effekt længere ude i profilet. Det er derfor ikke effektivt mod kronisk erosion. Installationen kan blive ødelagt, hvis den blotlægges på grund af erosion, og det må derfor sikres, at et stranddræn installeres på en strand, der i øvrigt er stabil, og hvor den akutte erosion ikke vil være så kraftig, at sandet over

drænrøret føres bort. Stranddrænet kan derfor også være et supplement til sandfordring på en kyst udsat for kronisk erosion.



Figur 3.16 Kystdræn på Enø i Karrebæksminde, øst for havneanlæg

På basis af ovenstående og indhentning af overslag foreslås følgende parametre til den videre vurdering

Tabel 3.7 Oversigt over parametre for aktivt kystdræn som funktion af eksponeringsgraden (farvandsområder).

Eksponering	Dybde	Projektområde¹⁾	Initiel sandtilførsel*	Vedligeholdelse**
	(m)	(m)	(m ³ /m)	(m ³ /m per år)
Lille	0,5	100	6*	0,2
Moderat	0,7	500	15*	0,5
Stor	0,9	1.000	60*	2,0
Meget stor	1,5	25.000	30**	30

1) Der forudsættes dræn over hele området

*Forudsætter at strækning har været sikret med faste konstruktioner i lang periode ~ 30 år og at det aktive kystprofil skal genoprettes, eksempelvis Sjællands Nordkyst. Det er således fodring for at oprette 30 års underskud.

**Forudsætter at kysten har været vedligeholdt med fodringer årligt, eksempelvis Vestkysten. Det er således fodring for et års underskud.

***Vedligeholdelsesfodringsmængden er taget til præcis at modsvare erosionsraten på kysten

Aktive kystdræn er en meget sjældent anvendt kystbeskyttelsesmetode

Aktive kystdræn dræner standsandet for vand

Sandet på stranden bliver mere kompakt

Sandet på stranden bliver til en vis grad mindre udsat for akut erosion

Aktivt kystdræn er ikke en effektiv metode mod moderate til store erosionsproblemer

3.2.3 Videreudviklinger af beskyttelsesdesign med basis i hårde konstruktioner

Forlande

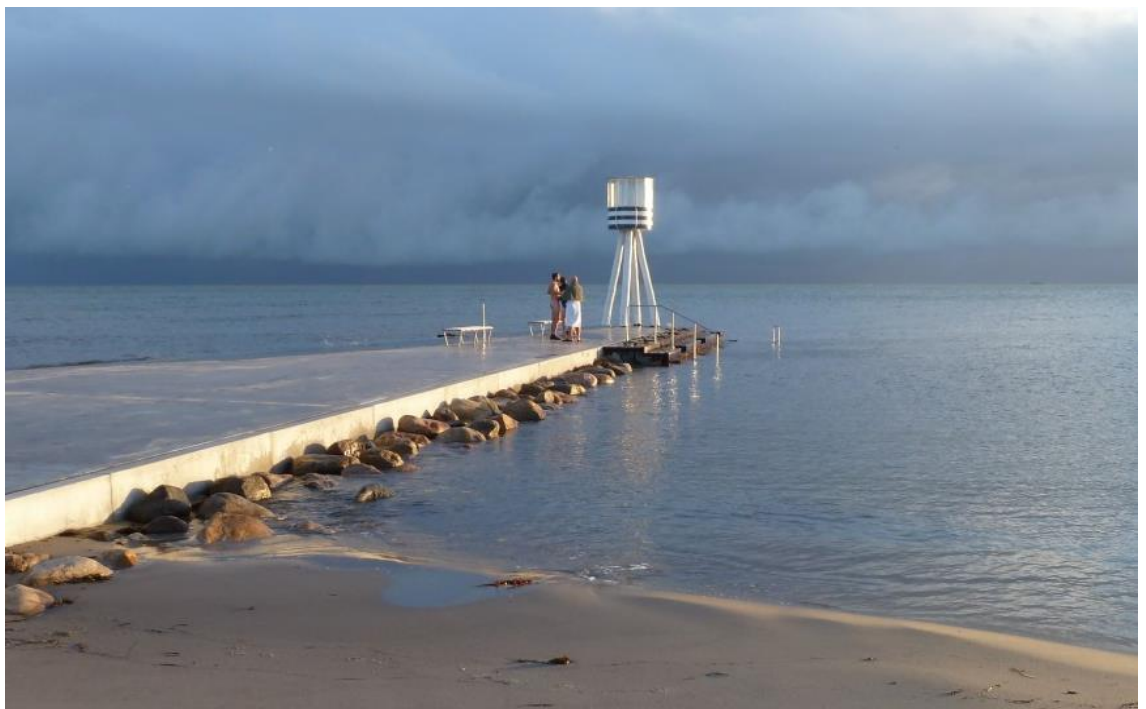
Anvendelse af kunstige forlande kan modvirke nogle af de negative effekter ved høfder og bølgebrydere. Forlande er mere afrundede konstruktioner, som har længde og indbyrdes afstand svarende til høfder, Figur 3.17. Forlandene reducerer langtransporten og ændrer kystens forløb som høfder, men den afrundede form giver en meget mere gradvis ændring i strømmen og transporten omkring konstruktionerne. Dette giver en bedre passage af sandet og mindsker de mængder, der tabes søværts med de eventuelle strømme der kan opstå mellem høfder eller bølgebrydere. I danske farvande er ophobning af ålegræs og tang omkring kystkonstruktioner ofte et stort problem og formen af de kunstige forlande er mere gunstig med hensyn til at lade tangen passere uden at lægge sig i de skarpe hjørner, der ofte dannes mellem stranden og høfderne eller i læzonen bag bølgebryderne.

Konstruktionens højde svarer til høfder, og der er samme krav til indfyldning af sand og kompensation for læsideerosion.

Typisk vil et forland bestå af en midterdel, som man kan gå ud på. Denne består af betoninddækning med støbt betondæk som eksempelvis benyttet på forlandene bygget på Bellevue Strand, se Figur 3.18.



Figur 3.17 Kystbeskyttelse med tre forlande fra Brasilien.



Figur 3.18 Forland på Bellevue Strand, 7.12.2013. Dette forland er i virkeligheden så smalt at det næsten kan gå under betegnelsen "høfde".

Kunstige forlande vil ikke blive behandlet økonomisk i det efterfølgende kapitel.

Kunstige forlande kan indgå som en helhedsorienteret løsning i kystlandskabet

Kunstige forlande kan udformes så læsidederosionen bliver mindre end det er tilfældet for høfder og bølgebrydere

Kunstige forlande er dyrere at etablere end bølgebrydere og høfder

Kort om påvirkningen af biologien

Både hårde konstruktioner og sandfodringer vil give en vis påvirkning af den biologi, der måtte være ved kysten. Omfanget og karakteren af denne påvirkning kan være svær at give et generelt billede af. F.eks. er det nødvendigt at sammenligne påvirkningerne fra kystbeskyttelsen med hvilke naturlige forhold biologien lever under det pågældende sted, og hvilke naturlige variationer i sedimentforhold, mv. der er på det pågældende sted. Vi vil dog nævne at alle indgreb i naturen i en eller anden grad principielt – eller som udgangspunkt - vil påvirke den biologiske natur. Dette gælder for hårde konstruktioner såvel som for sandfodringer. Det pågældende økosystem vil indenfor dets "muligheder" forsøge at adaptere til den påvirkning det er udsat for - som kan være enten momentan/kortvarig eller permanent/langvarig. Virkningerne af en given kystbeskyttelse kan således vise sig at være enten negativ, marginal eller endda positiv – nogle gange alt efter hvilket biologisk liv man finder værdifuld. Endelig kan biologien vise sig at have en vis robusthed overfor forstyrrelserne sådan at det biologiske system genetablerer sig efter at have været forstyrret kortvarigt eller langvarigt.

Ved hårde konstruktioner ændrer man dels ved sedimentbalancen, dels indfører man så at sige en "zone", hvor strømningerne og dermed levevilkår, er anderledes end de var oprindeligt. Dette kan både være negativt og positivt.

Ved jævn sandfodring ændrer man bundforholdene over et større område. I hvilket omfang dette giver en problematisk ændring af levevilkårene for kystprofilets biologi afhænger af de lokale (biologiske og fysiske) forhold. F.eks. kan det tænkes at de naturlige variationer, der er i bunden (f.eks. pga. en voldsom aktivitet i tværtransporten) er af en sådan størrelse, at biologiens naturlige tilpasning til denne dynamik giver den tilpas robusthed overfor sandfodringen, mv..

Ved depotfodring ændrer man på forholdene i afgrænsede områder. Her sker der ændringer der kan være både positive og negative. Dels ændrer man lokalt forholdene temmelig radikalt, men kan samtidig ligefrem være med til at danne nye habitater for forskelligt dyreliv.

Ved fodring med sedimenter, der er anderledes end den naturligt forekommende sedimenttype skaber man selvfølgelig yderligere og i nogle tilfælde drastiske ændringer i leveforholdene.

3.2.4 Infrastruktur med andre formål

Havne og moler kan strengt taget ikke siges at være erosionsmodvirkende foranstaltninger, idet formålet med dem er et andet. I forbindelse med et kystprojekt er det dog nødvendigt at tage eksisterende og planlagte større anlæg på kysten i betragtning, da disse vil kunne have en virkning, som er svarede eller endog større end det aktuelle kystbeskyttelsesprojekt, som det ses på Figur 2.23. Store havne anlagt på kysten kan blokere helt eller delvis for langstransporten og derfor forårsage en betydelig læsideerosion og akkumulation på hver side af havnen. Selv om en væsentlig del af langstransporten kan passere havnens moler vil der ofte være et krav om besejlingsdybde, som medfører at en betydelig del af det passerende sand fjernes ved løbende oprensninger og måske anbringes på så store vanddybder, at det er tabt for kysten. Landanlæg til broer og tunneller kan ligeledes være udført, så de blokerer for en stor del af transporten og derfor påvirker forholdene på kysten.

Veje, der løber tæt langs kysten kan også være en vigtig faktor. Hvis en vej er anlagt meget tæt på kystlinjen kan den allerede være beskyttet med skråningsbeskyttelse, og det må tages i betragtning om denne skal opretholdes, eller om vejens beskyttelse skal medtages i et nyt, ændret projekt. Veje, anlæg og bygninger tæt på kysten kan også have indflydelse på valg af beskyttelsesmetode, for eksempel ved at gøre det umuligt at forøge omfanget af et bælte af klitter på grund af faren for sandfygning.



Figur 3.19 Vandstrandvejen, Klampenborg, foto fra Google Earth.

Havne og moler virker blokerende på langtransporten på samme måde som høfder og bølgebrydere.

Veje langs kysten kan i visse tilfælde have en virkning, som både erosion- og oversvømmelsesdæmpende foranstaltninger.

3.2.5 Karakteristik af forskellige løsninger til erosionsbeskyttelses

Helhedsløsninger som tager hensyn til alle aktuelle forhold på en kyststrækning vil oftest være at foretrække i stedet for løsninger som kun benytter én af de ovennævnte løsningsmetoder, fordi alle de nævnte løsningsmetoder kun virker for specielle forhold, og fordi de forskellige løsninger har fordele såvel som ulemper. Herudover vil der oftest være flere typer problemer langs en strækning, som skal løses ved den foreslåede helhedsløsning. Derfor vil det oftest være en fordel at sammensætte løsninger, som er sammensat af komponenter fra de forskellige principper for løsninger. I det følgende diskuteres disse forhold i form af forskellige opsummeringer som følger:

Tabel 3.8 Oversigt over erosionsproblemer og mulige løsninger.

	Beskyttelsesmetode							
	Høfde	Bølgebryder	Forland	Skråning	Jævn fodring	Ral fodring	Depot fodring	Dræn
Kronisk erosion	Lokalt	Lokalt	Lokalt	Nej	Ja	Delvis ^{**)}	Lokalt	Nej
Akut erosion	Nej	Nej	Nej	Ja	Ja ^{*)}	Ja ^{**)}	Lokalt	Måske

^{*)} Her forudsættes at der er fordret tilstrækkeligt sådan at der hele tiden er en tilstrækkelig buffer af sand.

^{**)} Her forudsættes at stranden i forvejen er en ralstrand

Tabel 3.9 Oversigt over eventuelle problemer med forskellige typer af erosionsbeskyttelse for forskellige forhold. Forudsætningen for vurderingerne er det realistiske, at hårde konstruktioner nedsætter erosionen med 50% og sandfodring med 100%.

	Problemer ved forskellige beskyttelsesmetoder?						
	Læside-erosion	Tang	Vedlig.	Æstetik	Miljø ^{*)}	Rekreativ	Sikkerh.
Høfde	Større	Større	Moderat	Større	Moderat	Større	Større
Bølgebryder	Større	Større	Moderat	Større	Moderat	Mindre	Større
Forland	Større	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Mindre	Mindre
Skråningsbeskyt.	Større	Mindre	Moderat	Større	Moderat	Større	Mindre
Jævn fodring ^{**)}	Mindre	Mindre	Større	Mindre	Større	Mindre	Mindre
Depotfodring ^{**)}	Mindre	Mindre	Større	Mindre	Moderat	Mindre	Mindre
Ralfodring ^{**)}	Mindre	Mindre	Mindre	Moderat	Mindre	Mindre	Mindre
Kystdræn	Større	Mindre	Moderat	Mindre	Mindre	Mindre	Mindre

^{*)} Vurderingen er relativ. De lokale forhold skal tages i betragtning.

^{**)} Det forudsættes, at der fodres med en sedimenttype, der understøtter den naturlige sedimenttype: Der fodres med ral på ralstrande og sand på sandstrande. Se evt. kapitel 3.3.

Generelt fremgår det at de hårde beskyttelsesmetoder medfører flere problemer end de bløde tiltag (Sand- og ralfodring plus kystdræn). Det er dog i ovennævnte tabeller 3.1 til 3.8 påregnet at læsideerosionsproblemerne håndteres som en del af vedligeholdelsen af projektet.

Forskellige former for erosionsbeskyttelse virker forskelligt:

- *Nogle typer virker bedre i forhold til akut erosion end kronisk erosion*
- *Nogle type virker bedre i forhold til kronisk erosion end til akut erosion*

Sandfodring er den eneste effektive teknik, der virker på kronisk erosion, uden bivirkningen af læsideerosion

Hårde konstruktioner bør altid anlægges og drives med hensyntagen til læsideerosion

Akutte erosionsfænomener lader sig håndtere i den grad man sørger for at opretholde en konstant buffer af sand – ellers ikke

Fodringsmaterialet skal være i overensstemmelse med den natur der fodres i - "sand på sandstrande" og "ral på ralstrande"

3.2.6 Projekter der forener kystrehabilitering og evt. sikring imod erosion og oversvømmelse

Denne type projekter udføres typisk på lokaliteter hvor man mangler en god rekreativ strand, men hvor der måske ligeledes er problemer i relation til erosion og oversvømmelse.

Denne type projekter udføres typisk i form af kunstige strande eller egentlige strandparker typisk i tæt bebyggede områder, hvor der er brug for rekreative marine faciliteter som gode sandstrande og rekreative laguner.

En kunstig strand, som kan være et selvstændigt projekt eller den kan være et element i en strandpark, skal være stabil og af god kvalitet. Disse to overordnede krav medfører følgende mere specifikke krav:

- En kunstig strand skal være stabil, dvs. af den skal bygges med ligevægtsorienteringer, dvs. af den skal vende op imod de fremherskende bølger og den skal afgrænses med terminal-konstruktioner, som forhindrer at sand mistes ud af projektområdet
- Terminalkonstruktionerne vil typisk udføres som en teknisk konstruktion men ligeledes med en rekreativ funktion, dvs. som et forland. For at undgå tangansamlinger skal konstruktionen danne en vinkel der er større end 90° med den tilstødende strand
- En kunstig strandsektion skal være eksponeret for bølger da dette er et krav for at opretholde en attraktiv ren sandstrand
- Fyldsandet skal være rent marint velsorteret strandsand med minimalt indhold af fine såvel som grove fraktioner
- Der skal være en god vandkvalitet i området og vandskiftet i en eventuel kunstig lagune skal være godt, laguneåbningerne skal være stabile og med minimal tilsanding

Eksempler på kunstige strande og strandparker er opsummeret i

Tabel 3.10 Eksempler og karakteristik af kunstige strand og strandparker.

Projekter	Længde	Faciliteter	Beskytter imod
Bellevue Strand	600 m	Sandstrand, park og forlande	Erosion
Amager Strandpark	2 km	Sandstrande, park, laguner, forlande, anløbshavn, strandpromenade	Erosion
Køge Buge Strandpark	7 km	Sandstrande, park, strandsøer, laguner, 4 lystbådehaven, dige og høfder	Erosion og oversvømmelse

Til bygning af denne type projekter indgår typisk følgende marine og kysttekniske elementer:

- Udgravning til laguner og lystbådehavne
- Sandfyldning, ikke at forveksle med sandfodring. Sandfyldet til strandene er stabilt og kræver stort set ikke vedligeholdelse i form af genopfyldning
- Opfyldning af andre områder end strandene med jordfyld
- Bygning af høfder, forlande og lystbådehavne
- Bygning af diger og sluser

Kunstige strande og strandparker er så forskellige i natur og størrelse at det ikke giver nogen mening at forsøge at beregne karakteristiske længder og mængder.

Kunstige strande og barrierer kan have kombinerede rekreative og kysttekniske formål

3.3 Strategier til at beskytte imod oversvømmelse

Følgende former for beskyttelse imod oversvømmelse fra havet samt med deres virkning overfor oversvømmelse vil blive beskrevet i det efterfølgende

- Løsninger i terrænet
- Lokale løsninger i byområder

3.3.1 Løsninger placeret i baglandet

Klitter udgør en form for naturlig fleksibel beskyttelse af baglandet imod oversvømmelse i de tilfælde hvor baglandet er så lavt at det er truet af oversvømmelse. Mange klitområder langs vestkysten virker på denne måde. I visse tilfælde forstærkes klitterne for at yder ekstra beskyttelse imod oversvømmelse.

Diger bygges som beskyttelse imod oversvømmelse af kystnære byer og sommerhusområder, lavtliggende strandenge og landbrugsområder, som ligger ud til beskyttede vandområder, eksempelvis vadehavet, Limfjorden og andre lavtliggende områder i fjorde og vige etc. Et dige er typisk bygget på strandengen og er derfor hverken eksponeret for påvirkning af tidevand eller af bølger under normale forhold. Denne form for dige er således kun eksponeret for havvandet og for moderate bølger under stormflod.

Diger og klitforstærkning bliver behandlet som to separate typer oversvømmelsesforebyggende løsninger:

Klitter

Kunstige klitter, eller snarere forstærkning af naturlige klitter med sandfyld, således at den forstærkede klit vil kunne modstå gennembrud under stormflod, dimensioneres sådan at klitten ikke bliver gennembrudt ved erosion i klitfronten. Mekanismen er som beskrevet i afsnit 2.4.1, hvor virkningen af et forhøjet vandspejl på strandprofilet er beskrevet. Nylige undersøgelser tyder på, at det er bedst at forstærke klitten med et stort volumen i bredden snarere end i højden. Et eksempel på et klitforstærkningsprojekt er vist i Figur 3.20.



Figur 3.20 Klitforstærkning ved Krylen, Vestkysten. Udført af KDI.

Topkoten af klitten beregnes som summen af den totalt dimensionsgivende vandstand plus 40% af 50-års bølgehøjden: $TKKF = V + 0,4H$

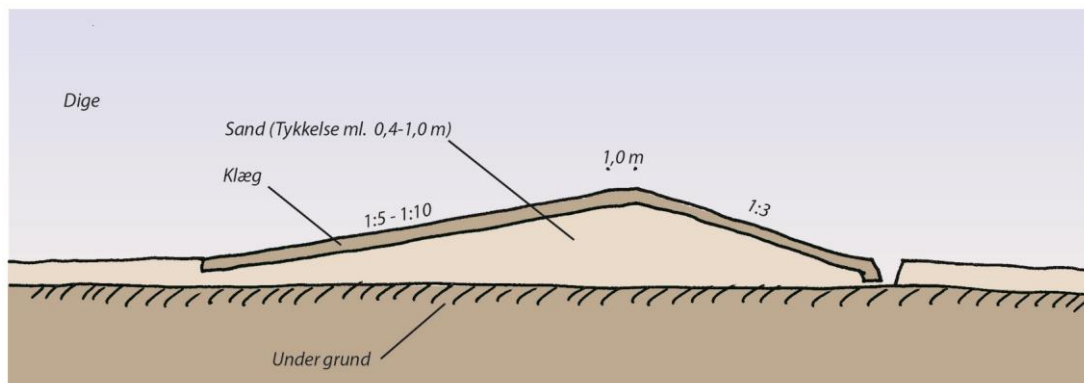
Tabel 3.11 Oversigt over parametre for klitforstærkning som funktion af eksponeringsgraden.

Eksponeringsgrad	Topkote af opfyldning	Kote af basis for opfyldning	Bredde	Sandtilførsel
	(m)	(m)	(m)	(m ³ /m)
Lille	2,4	0,5	5	10
Moderat	2,9	1,0	10	20
Stor	3,3	1,0	20	50
Meget stor	6,1	2,0	40	200

Klitforstærkninger benyttes som strategi mod klitbrud og efterfølgende oversvømmelse

Diger

Da diger ikke er påvirket af højvande og bølger under normale forhold bygges diger som sanddæmninger beklædt med græsbevokset klæg (klæg er fed, lerblandet marskjord). Græsbevoksningen er ved et korrekt udformet dige modstandsdygtigt nok til at modstå disse episodiske påvirkninger. Princippet for opbygning af en typisk havdige er præsenteret i Figur 3.21



Figur 3.21 Tværsnit i typisk havdige som viser geometri og opbygning, fra Ref. /7/.

Fronthældningen af et dige udføres typisk meget fladt, ca. 1:8 for at reducere overskyl og for at øge styrken af græsskråningen. Med en hældning på 1:8 kan topkoten af diget beregnes som den dimensionsgivende vandstand V plus 40% af 50 års-bølgehøjde, eller $TKD = V + 0.4 \cdot H$. Hældningen af bagskråningen vælges typisk til 1:3.



Figur 3.22 Det fremskudte dige i Sønderjylland ved Højer, havet imod venstre

Tabel 3.12 Størrelsesordner for digers dimensioner ved forskellige eksponeringsgrader

Eksponering	Topkote af dige	Kote af basis	Højde af dige	Bredde af bund af dige	Fyld Volumen sand	Belægning af klæg
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ³ /m)	(m)
Lille	2,4	0,5	1,9	21	12	0,4
Moderat	2,9	0,5	2,4	27	20	0,5
Moderat, Vadehavet*	7,1*	0,5	6,6	75	170	1,0
Stor	3,3	0,5	2,8	31	26	0,6
Meget stor	6,1	0,5	5,6	65	120	1,0

*Hævet idet der er anvendt en returperiode større end 500 år svarende til vandstanden 5,9 m for Fremskudte Dige i Sønderjylland.

Diger er forhøjninger i landskabet, der er skabt til at modstå oversvømmelse

Mindre diger kan beskytte områder, der normal ligger over havniveau

Større diger kan benyttes til inddæmning af land og bør sikres mod overskyl ved stormflod

3.3.2 Lokale løsninger (byer og havne)

Højvandsbeskyttelse af kystbyer er udfordrende fordi der ofte eksisterer en ældre bykerne placeret i tæt tilknytning til byens havn. Man kan ikke blot hæve kajkanten idet dette vil forhindre fornuftig benyttelse af havnen og udgøre en barriere mellem by og vand.

I sådanne tilfælde kan forskellige sikringsmetoder overvejes, eksempelvis:

- Højvandsmur
- Midlertidig mobil højvandsmur
- Dæmning/barriere med sluse

Fordele og ulemper ved sådanne løsninger vil blive beskrevet i det følgende.

Højvandsmur

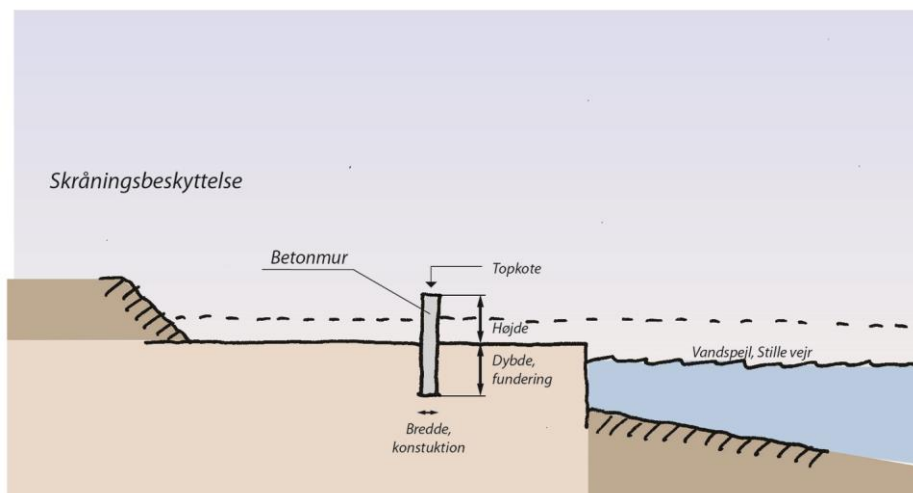
I kystbyer vil strategisk placeret højvandsmure som oversvømmelsesforebyggende foranstaltninger være en mulighed, men sådanne foranstaltninger skal integreres i den overordnede planløsningen det pågældende et område med henblik på at opnå hensigtsmæssig teknisk såvel som brugsmæssig og landskabelig funktionalitet. Et godt eksempel på en sådan løsning er højvandsmuren "Le Mur" i Lemvig, som er præsenteret i Figur 3.23



Figur 3.23 Højvandsmuren i Lemvig i funktion under Stormen Bodil.

Dimensioneringen af topkanten af sådanne højvandsmure, som er tilbagetrukket i forhold til vandlinjen/kajkanten, afhænger af vandstanden og af om muren er beskyttet imod bølgepåvirkning. I det følgende er det forudsat at sådanne mure typisk kun er udsat for lokalt generede bølger med en bølgehøjde på ca 0,5 m og af en del oversprøjt kan accepteres. Murene vil typisk blive opført på arealer som har et niveau lidt under nutidige højvandsændelser med en returperiode på 50 år. Grundniveauet er således estimeret til 90% af 50 års stormflodsvandstanden plus 0,2 m fra bølgerne.

Det antages at bredden af muren typisk kan sættes til 40 cm.



Figur 3.24 Skitse af tværsnit for en højvandsmur i et beskyttet område, f.eks. en by.

Typiske dimensioner for højvandsmure er præsenteret i Tabel 3.133.

Tabel 3.13 Dimensioner og mængder for højvandsmur.

Eksponeeringsgrad	Niveau af areal	Topkote af mur	Højde af mur incl. fundament	Volumen per m	Andre materialer
	(m)	(m)	(m)	(m ³ /m)	
Lille, fjorde	1,7	2,5	1,7	0,7	Mobile porte, rekreative faciliteter omlægning af arealer
Moderat, bæltter	1,6	2,4	1,7	0,7	
Stor, Kattegat og Østersøen	1,6	2,4	1,7	0,7	
Meget stor, Vesterhavet	2,9	3,8	1,8	0,7	

Da der typisk indgår rehabilitering af omkringliggende arealer i sådanne projekter kan de angivne volumener ikke umiddelbart benyttes til beregning af priser i helhedsorienterede projekter, kun som et led i at vurdere prisen for en teknisk mindsteløsning. Derudover kan der være andre topografiske forhold på den givne lokalitet, der skal tages hensyn til, hvilket vil give dimensioner, der afviger fra ovenstående centrale estimat.

I byområder kan højvandsmure på strategisk placerede strækninger forhindre havvand i at trænge ind i byen

Midlertidig (mobil) højvandsbeskyttelse

Mobil højvandsbeskyttelse kan benyttes i situationer, hvor stormflod kombineret med vandstandsstigninger truer lavtliggende by-arealer. Mobile højvandsbeskyttelsessystemer kræver ingen eller kun få faste installationer. Systemerne sættes op ved varsling af ekstraordinære høje vandstande, som kan føre til oversvømmelse, og kan tages ned igen umiddelbart efter varslingsophøret eller hændelsen.

Eksempler på mobile højvandsbeskyttelsessystemer er sandsække, sammensættelige moduler, skotter, store "slanger" som fyldes med vand, mv., se eksempel i Figur 3.25.



Figur 3.25 "Water tube" som mobil højvandsbeskyttelse, Ref. /6/.

Kravet til dimensionen (højden) af en mobil højvandsbeskyttelse vil typisk afhænge af de samme faktorer som nævnt under højvandsmure og får derved følgende krav til topkote og dimensioner, se Tabel 3.144.

Tabel 3.14 Topkote og dimension af mobile højvandsmur.

Eksponeringsgrad	Niveau af areal	Topkote af mobile konstruktion (slange)	Dimension (diameter) af slange
	(m)	(m)	(m)
Lille	1,7	2,5	0,8
Moderat	1,6	2,4	0,8
Stor	1,6	2,4	0,8
Meget stor	2,9	3,8	0,9

Forskellige alternative løsninger til at hindre vandindtrængning i byområder foreslås for tiden, f.eks. mobile løsninger som, slanger der fyldes med vand og udgør en midlertidig mur netop når højvandet viser sig.

Dæmning/barriere med sluse

I andre tilfælde vil ovennævnte lokale løsninger ikke være mulig, og man må da overveje at beskytte hele byen imod højvande med en form for dæmning/barriere. Sådanne løsninger findes allerede i mange større byer, eksempelvis: London, St. Petersborg og Venedig. En tilsvarende løsning er også – i skrivende stund - under overvejelse for København i form af en dæmning/barriere med skibssluse nord for Trekroner, som vil kunne beskytte store dele af det gamle København imod oversvømmelse forårsaget af stormflod i forbindelse med storme fra NV.

Det er vanskeligt at angive dimensioner for sådanne barrierer idet voluminet af en sådan konstruktion vil afhænge af vanddybden - karakteristiske vanddybder er således skønnet. Herudover afhænger den nødvendige længde af en sådan dæmning af de lokale forhold, hvorfor der udelukkende er angivet mængder per længdeenhed. Sådanne eksponerede dæmninger skal beskyttes på søsiden med passende armeringslag.

Tabel 3.15 Dimensioner og mængder for dæmninger/barrierer

Eksponeeringsgrad	Dybde-Kote	Topkote TK	Total volumen af dæmning	Heraf stenvolumen på søsiden	Andre elementer
Eksponeering	(m)	(m)	(m ³ /m)	(m ³ /m)	Sluseporte
Lille	-6,0	3,0	210	25	
Moderat	-8,0	4,4	370	35	
Stor	-8,0	5,4	430	42	
Vadehavet	-8,0	7,7	570	40	
Meget stor	Ikke relevant				

Større bygværker som dæmninger og sluser kan virke som beskyttende anlæg mod oversvømmelse

3.3.3 Forbehold for regionale variationer

Vurdering af størrelsesordner for de vurderede dimensioner beror på en vurdering og er blevet søgt gjort så repræsentativt som muligt. Men da særlige lokale og regionale forhold per definition vil give afvigelser fra de valgte parametre og dimensioner, og da andre hensyn end det rent kysttekniske også er på spil, i.e. lokalplan, udviklingsplaner, naturhensyn, mv., skal det understreges, at vurderingerne der er opnået i ovenstående kun bør læses under skyldig hensyntagen til netop dette forhold.

Lokale og regionale forhold skal altid undersøges og tænkes ind i ethvert konkret kystbeskyttelsesprojekt.

4 Estimer for anlægs- og driftsudgifter for forskellige beskyttelsesstrategier

I det følgende gives overslag over priser for de mest relevante beskyttelsesformer, både mod erosion og oversvømmelse. Der er tale om et katalog over priser, som de fremkommer i en meget overordnet analyse af forholdene ved de danske kyster og kan kun bruges med den præmis dette udgør for øje. Lokale forhold, og svingninger i prisniveauer, gør at der ikke nødvendigvis er en direkte linje mellem de her angivne priser og virkemåder og de priser og løsninger, der i sidste ende kan komme på tale.

Priserne er centrale estimer

Estimerne bør kun bruges til en vurdering af størrelsesorden

Estimerne vil aldrig kunne erstatte prissætning og dimensionering svarende til de lokale forhold.

Estimerne er baseret på vurderingerne i kapitel 3

4.1 Erosionsbeskyttelse

På basis af de kvantitative overvejelser angående erosionsbeskyttelse i de forrige sektioner og på basis af de priser og som er indhentet fra ved at bruge DHI's og Hasløv og Kærsgaard's egen projekt-portofolie og supplere med prisoverslag og diskussion med især Rohde Nielsen A/S og Ecoplage i samarbejde med GEO.

Høfder

Prisen på de dyreste elementer i konstruktionen, som er dæksten og filtersten, dvs. materialer, transport og indbygning af samme, er styrende for den endelige pris.

Driften er taget som kompensationsfodring som skyldes at den beskyttede strækning eksporterer erosion til nedstrøms områder, jf. forudsætningerne beskrevet i afsnittet om virkemåder og konstruktion.

Idet det antages at konstruktionerne korrekt udført i de enkelte konkrete tilfælde vurderes det at eventuelle reparationer af konstruktionen udgør en meget marginalt udgift sammenlignet med kompensationsfodringerne.

Sandfodringspriser er bestemt ud fra priser fra Rohde Nielsen A/S. Priser på sandfodring på de mere beskyttede strækninger beror på en vurdering baseret på fyldning fra land.

Type	Eksponering	Anlæg (kr/stk)	Drift (kr/stk/år)
Høfde	Lille	190.000	1.500
	Moderat	1.340.000	9.000
	Stor	2.340.000	21.000
	Meget stor	13.800.000	360.000

Priserne er centrale estimater

Estimaterne bør kun bruges til en vurdering af størrelsesordner

Estimaterne vil aldrig kunne erstatte prissætning og dimensionering svarende til de lokale forhold.

Estimaterne er baseret på vurderingerne i kapitel 3

Bølgebrydere

Prisen på de dyreste elementer i konstruktionen, som er dæksten og filtersten, dvs. materialer, transport og indbygning af samme, er styrende for den endelige pris.

Driften er taget som kompensationsfodring som skyldes at den beskyttede strækning eksporterer erosion til nedstrøms områder, jf. forudsætningerne beskrevet i afsnittet om virkemåder og konstruktion.

Idet det antages at konstruktionerne korrekt udført i de enkelte konkrete tilfælde vurderes det at eventuelle reparationer af konstruktionen udgør en meget marginalt udgift sammenlignet med kompensationsfodringerne.

Sandfodringspriser er bestemt ud fra priser fra Rohde Nielsen A/S. Priser på sandfodring på de mere beskyttede strækninger beror på en vurdering baseret på fyldning fra land.

Type	Eksponering	Anlæg (kr/stk)	Drift (kr/stk/år)
Bølgebryder	Lille	190.000	1.000
	Moderat	1.280.000	5.900
	Stor	2.400.000	14.000
	Meget stor	13.950.000	240.000

Priserne er centrale estimater

Estimaterne bør kun bruges til en vurdering af størrelsesordner

Estimaterne vil aldrig kunne erstatte prissætning og dimensionering svarende til de lokale forhold.

Estimaterne er baseret på vurderingerne i kapitel 3

Skråningsbeskyttelse

Prisen på de dyreste elementer i konstruktionen, som er dæksten og filtersten, dvs. materialer, transport og indbygning af samme, er styrende for den endelige pris.

Driften er taget som kompensationsfodring som skyldes at den beskyttede strækning eksporterer erosion til nedstrøms områder, jf. forudsætningerne beskrevet i afsnittet om virkemåder og konstruktion.

Idet det antages at konstruktionerne korrekt udført i de enkelte konkrete tilfælde vurderes det at eventuelle reparationer af konstruktionen udgør en meget marginalt udgift sammenlignet med kompensationsfodringerne.

Sandfodringspriser er bestemt ud fra priser fra Rohde Nielsen A/S. Priser på sandfodring på de mere beskyttede strækninger beror på en vurdering baseret på fyldning fra land.

Type	Eksponering	Anlæg (kr/m)	Drift (kr/m/år)
Skråningsbeskyttelse	Lille	6.800	50
	Moderat	13.500	75
	Stor	23.000	240
	Meget stor	51.000	1.650

Priserne er centrale estimater

Estimaterne bør kun bruges til en vurdering af størrelsesorden

Estimaterne vil aldrig kunne erstatte prissætning og dimensionering svarende til de lokale forhold.

Estimaterne er baseret på vurderingerne i kapitel 3

Sandfodring

Sandfodringspriser er bestemt ud fra priser fra Rohde Nielsen A/S. Priser på sandfodring på de mere beskyttede strækninger beror på en vurdering baseret på fyldning fra land.

Type	Eksponering	Anlæg (kr/m)	Drift (kr/m/år)
Sandfodring	Lille	1.500	50
	Moderat	2.250	75
	Stor	3.600	140
	Meget stor*	1.050	1.200

*Forskellig antagelse om initialfodring for eksponeringsgrad "Meget stor" i forhold til lavere eksponeringer

Priserne er centrale estimater

Estimaterne bør kun bruges til en vurdering af størrelsesorden

Estimaterne vil aldrig kunne erstatte prissætning og dimensionering svarende til de lokale forhold.

Estimaterne er baseret på vurderingerne i kapitel 3

Aktivt kystdræn

Priserne for kystdræn er modtaget fra GEO i samarbejde med Ecoplage.

Sandfodringspriser er bestemt ud fra dagens priser fra Rohde Nielsen A/S. Priser på sandfodring på de mere beskyttede strækninger beror på en vurdering baseret på fyldning fra land.

Type	Eksponering	Anlæg (kr/m)	Drift (kr/m/år)
Aktivt kystdræn	Lille	24.000	1.200
	Moderat	21.000	300
	Stor	18.600	250
	Meget stor	16.000	1.200

Priserne er centrale estimater

Estimaterne bør kun bruges til en vurdering af størrelsesordner

Estimaterne vil aldrig kunne erstatte prissætning og dimensionering svarende til de lokale forhold.

Estimaterne er baseret på vurderingerne i kapitel 3

4.2 Oversvømmelsesbeskyttende foranstaltninger

Nedenstående tabeller viser centrale estimater for nutidspriser for de forskellige metoder mod oversvømmelse som er beskrevet i afsnittene om samme.

Diger

Prisen på diger er bestemt som en indeks regulering af erfaringstal fra Danmark.

Driften som hovedsagelige består af inspektion og pasning af græsdække til at være 3% etableringsprisen.

Type	Eksponering	Anlæg (kr/m)	Drift (kr/m/år)
Diger	Lille	12.000	360
	Moderat	19.800	590
	Stor	26.400	790
	Meget stor	45.300	1.400

Af særlig betydning er det særlige område omkring vadehavet, hvor man er nødt til at indføre en selvstændig kategori, da betydningen af tidevandet er en anden, end for resten af landet.

Type	Eksponering	Anlæg (kr/m)	Drift (kr/m/år)
Dige	Vadehavet	49.200	1.400

Priserne er centrale estimater

Estimaterne bør kun bruges til en vurdering af størrelsesordner

Estimaterne vil aldrig kunne erstatte prissætning og dimensionering svarende til de lokale forhold.

Estimaterne er baseret på vurderingerne i kapitel 3

Klitforstærkning

Prisen på klitforstærkning er baseret på overslag over placering af sandet på stranden, hvorefter det løftes op i klitterne

Driften består af genopfyldning af tabt sand hvilket er taget til at være omkring 7% af den påfyldte mængde per år, idet det forventes at noget af sandet i klitten forsvinder i løbet af tiden.

Type	Eksponering	Anlæg (kr/m)	Drift (kr/m/år)
Klitforstærkning	Lille	2.500	175
	Moderat	3.600	252
	Stor	7.500	525
	Meget stor	17.000	1.190

Priserne er centrale estimater

Estimaterne bør kun bruges til en vurdering af størrelsesordner

Estimaterne vil aldrig kunne erstatte prissætning og dimensionering svarende til de lokale forhold.

Estimaterne er baseret på vurderingerne i kapitel 3

Mure i byerne (funderede betonmure)

Priserne er bestemt af erfaringstal for etablering af betonmure.

Driften er antaget at udgøre vedligeholdelse, såsom eventuelle afrensninger og småreparationer, svarende til 5% af værdien for etablering.

Type	Eksponering	Anlæg (kr/m)	Drift (kr/m/år)
Mure	Lille	2.700	135
	Moderat	2.700	135
	Stor	2.700	135
	Meget stor	3.050	150

Priserne er centrale estimater

Estimaterne bør kun bruges til en vurdering af størrelsesorden

Estimaterne vil aldrig kunne erstatte prissætning og dimensionering svarende til de lokale forhold.

Estimaterne er baseret på vurderingerne i kapitel 3

Mobile løsninger

Priserne er centrale estimater baseret på prisen på produktet "Water Tube".

Driften er antaget til at være 5% af etableringen. Dette er et højst usikkert estimat, da der fuldskala erfaringer med konceptet er meget lille.

Type	Eksponering	Anlæg (kr/m)	Drift (kr/m/år)
Mobile slanger	Lille	2.100	105
	Moderat	2.100	105
	Stor	2.100	105
	Meget stor	2.500	120

Priserne er centrale estimater

Estimaterne bør kun bruges til en vurdering af størrelsesordner

Estimaterne vil aldrig kunne erstatte prissætning og dimensionering svarende til de lokale forhold.

Estimaterne er baseret på vurderingerne i kapitel 3

4.3 Forbehold for socioøkonomiske synergieffekter

I denne udredning har vi i høj grad taget udgangspunkt i en isoleret teknisk-økonomisk synsvinkel. Som allerede indikeret - under strandparker, f.eks. – kan der være økonomiske sidegevinster ved at vælge former der for en umiddelbar vurdering er dyrere end andre. Denne udredning bør derfor suppleres med en socio-økonomisk analyse af hvad betydningen af forskellige kystforvaltningsstrategier har for de lokale samfunds natur og økonomi.

Snævre teknisk-økonomiske vurderinger som er gjort i denne rapport's sidste del tager kun hensyn til et enkelt forhold i et problem, der i virkeligheden består af mange forhold, f.eks.:

- Kysten som en helhed: Kysten er et stort system af mindre enheder, der påvirker hinanden
- Lokale forhold ved erosionsbeskyttelsen
- Æstetiske landskabsmæssige forhold
- Økonomiske langsigtede effekter
- Andre ikke-kvantificerbare forhold

Nærværende rapport kan anvendes som første inspiration til en større vurdering

Nærværende rapport giver ikke det fulgyldige holistiske svar, man kan bruge som en del i en større analyse

Nærværende rapport forsøger at højne forståelsen for de muligheder og grænser som naturen, teknikken og økonomien sætter for handling

5 Referencer

- Ref. /1/: 2012, HøJVandsstatistikker. Kystdirektoratet.
- Ref. /2/: IPCC (2013): AR5, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Ref. /3/: Fremtidige klimaforandringer i Danmark. DMI, Klima-, Energi og Bygningsministeriet, Danmarks Klimacenter rapport nr. 6 2014
- Ref./4/: DHI, Aug. 2012. Bølgeklima for 40 lokaliteter i danske farvande med vurdering af klimaeffekter for udvalgte lokaliteter. For Kystdirektoratet.
- Ref. /5/ CIRIA, CUR, CETMEF (2007). *The Rock Manual – The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA London
- Ref. /6/ Skitseprojekt for lokale løsninger til sikring af Jyllinge Nordmark mod oversvømmelse fra Værebros Å og Roskilde Fjord, Maj 2014. Grontmij for Roskilde Kommune.
- Ref. /7/ Digeoversigt, Syd- og Sønderjylland. Maj 2011, Kystdirektoratet.
- Ref. /8/: 2014. Analyse af IPCC delrapport 2 – Effekter, klimatilpasning og sårbarhed – med særlig fokus på Danmark. Miljøministeriet, Naturstyrelsen



Kystdirektoratet
Højbovej 1
7620 Lemvig

www.kyst.dk