

# Erosionsatlas

Metodeudvikling

og

Pilotprojekt for Sjællands nordkyst





This project was delivered under the DHI Business Management System certified by DNV to be in compliance with ISO 9001: Quality Management System



# Erosionsatlas

Sjællands nordkyst, fra Hundested til Gilleleje

Udarbejdet for                      Kystdirektoratet  
Repræsenteret ved              Per Sørensen, Kystteknisk chef



*Bølgebrydere ved Tinkerup*

Projektleder	Asger Bendix Hansen
Projektnummer	11813256
Godkendelsesdato	30. januar 2013
Revision	0
Klassifikation	Tilhører Klienten

## INDHOLDSFORTEGNELSE

<b>1</b>	<b>Indledning .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Generel beskrivelse .....</b>	<b>2</b>
2.1	Betydningen af erosionspresset .....	2
<b>3</b>	<b>Dataindsamling .....</b>	<b>3</b>
3.1	Geomorfologiske data .....	3
3.2	Meteomarine data .....	3
<b>4</b>	<b>Baggrund for metoden .....</b>	<b>5</b>
4.1	Vurdering af kronisk erosionspres .....	5
4.1.1	Observeret erosion .....	5
4.1.2	Forventet erosion baseret på bølgeforhold .....	8
4.2	Akut erosion .....	10
4.3	Oversvømmelse .....	11
<b>5</b>	<b>Fremgangsmåde .....</b>	<b>13</b>
5.1	Udvælgelse og udtrækning af kystlinje .....	13
5.1.1	Kyster med væsentlig bølgeaktivitet .....	13
5.1.2	For kyster med meget lidt bølgeaktivitet .....	15
5.2	Beregninger .....	15
5.2.1	Transportberegninger baseret på bølgeforhold .....	15
5.2.2	Sedimentbudget .....	16
5.2.3	Sammenhæng mellem bølger og vandstand .....	17
5.3	Vurdering .....	17
5.3.1	Kronisk erosion .....	17
5.3.1.1	Analyse af transportforholdene .....	17
5.3.1.2	Kategorisering af erosionspotentialer .....	19
5.3.2	Akut erosion .....	20
5.3.3	Oversvømmelse .....	23
<b>6</b>	<b>Eksempel: Sjællands nordkyst fra Hundested til Gilleleje .....</b>	<b>25</b>
6.1	Overordnet beskrivelse af kysten .....	25
6.2	Kronisk erosion .....	28
6.3	Akut erosion .....	34
6.4	Oversvømmelse .....	36
<b>7</b>	<b>Referencer .....</b>	<b>37</b>

## Appendix A Beskrivelse af programmer

## FIGURER

Figur 4-1	Skitse over ideen bag såkaldte ét-linje modeller til beregning af kystlinjers udvikling. A: Skitse over kystprofilet, som viser volumenændringen, når kysten rykker frem eller tilbage. B: Skitse over kystens planform, som angiver sammenhængen mellem kystens frem- eller tilbagerykning og variationen i langstransporten. ....	6
Figur 4-2	Eksempel på sedimentbudget beregnet ud fra den historiske kystudvikling af kysten mellem Hundested og Gilleleje. Øverst: Beregnet transport. Bemærk at positiv transport angiver transport i østlig retning. Nederst: Gennemsnitlig udvikling i kystens position fra 1893 til 2003. ....	7
Figur 4-3	$q^*/\alpha$ -kurver for to bølgeklimaer udtrykt ved Stevns. ....	9
Figur 4-4	Skitse der viser hvordan akut erosions opstår under situationer med forhøjet vandstand og høje bølger. ....	10
Figur 4-5	Diagram, som viser typiske strøm- og vandstandsforhold i Øresund i situationer med kraftig vind fra en given retning. ....	11
Figur 5-1	Forslag til inddeling af kysterne omkring Nordsjælland samt valg af bølgepunkter. Gule linjer angiver kyststrækninger, og hvide prikker angiver bølgepunkter. I snævre farvande som Roskilde fjord og Holbæk fjord kan hele kysten analyseres under ét, da bølgepåvirkning vil være ubetydelig. ....	14
Figur 5-2	Eksempel på hvordan kysten mellem Gilleleje og Hornbæk kan markeres som en sti i Google Earth. ....	15
Figur 5-3	Eksempel på korrelation mellem bølgehøjde og vandstand for et punkt ca. 3 km ud for Rungsted. Over hvert plot er angivet gennemsnitlig bølgeretning (MWD), hyppigheden for at bølgeretningen ligger i det pågældende vinkeludsnit samt hældningen for den røde linje. ....	22
Figur 6-1	Udsnit af Per Smed's landskabskort over Danmark. ....	25
Figur 6-2	Satellit billede fra Google Earth som viser den betragtede kystlinje med overlagte kystkonstruktioner. Blå, røde og grønne markeringer angiver henholdsvis høfder/bølgebrydere, skråningsbeskyttelse og diger. ....	26
Figur 6-3	Skærbillede som viser optegningen af den digitaliserede kystlinje i Google Earth. ....	27
Figur 6-4	Bølgeroser som angiver bølgeforholdene ud for Hundested (venstre) og Gilleleje (højre). Bølgedata er udtrykt i de to punkter som er angivet i Figur 6.3. ....	27
Figur 6-5	Venstre: $q^*/\alpha$ -kurve for Hundested (bølgepunkt 1) og Gilleleje (bølgepunkt 2). Højre: Scatterplot som viser bølgeperiode som funktion af bølgehøjde. ....	28
Figur 6-6	Resultater fra transportberegningen ud fra bølgeforhold. Øverst: Orientering af den tilnærmede kystlinje vist sammen med ligevægtsorienteringen. Midt: Transportindeks. Nederst: Erosionspotentiale. ....	30
Figur 6-7	Resultater fra sedimentbudget. Øverst: Transport. Nederst: Ændring i kystens position mellem 1893 og 2003. ....	31
Figur 6-8	Resultater fra de to beregninger af langstransport og erosion. Øverst: Potentiel transport. Midt: Potentiel kystfremrykning ud fra transportindeks. Nederst: Kystfremrykning fra kystlinjeanalyse. ....	32
Figur 6-9	Korrelation mellem bølgehøjde og vandstand for Gilleleje. ....	35
Figur 6-10	Kort der viser de lavtliggende områder lige umiddelbart øst for Kikhavn. Venstre: Luffoto hvor diger er angivet med grønt (kilde: Google Earth og Kystdirektoratets kystplanlægningsværktøj). Højre: Kort hvor områder der ligger lavere end kote 1,7 m er angivet med gult (kilde: klimatilpasning.dk). ....	36

## TABELLER

Tabel 5.1	Kategorier for kronisk erosion. Bemærk at for sedimentunderskud, bølgepåvirkningsindeks og transportkapacitet repræsenterer den angivne værdi størrelsesordenen. ....	20
Tabel 5.2	Kategorier for akut erosion under forudsætning af positiv korrelation mellem bølgehøjde og vandstand. ....	23
Tabel 5.3	Kategorier for oversvømmelsesrisiko. ....	24
Tabel 6.1	Beskrivelse af kystens delstrækninger. Forkortelser er brugt til at betegne forskellige typer kystbeskyttelse: Bølgebrydere: BB, Høfder: HØ og Skråningsbeskyttelse: SB. ....	33
Tabel 6.2	Vandstande og tilhørende returperioder for Hornbæk havn (Ref. 1). ....	36

## 1 Indledning

Kystdirektoratet (KDI) ønsker udarbejdet et overordnet erosionsatlas for hele Danmark, som viser den naturlige erosion i m/år af den aktive del af profilet. Erosionsatlasset skal anvendes til at give et overordnet billede af, hvilke kyster som er erosionskyster, og hvilke som er aflejringskyster. I erosionsatlasset beskrives erosionspresset ved at inddele kysterne i klasser som eksempelvis lille, middel eller stort erosionspres. DHI er blevet bedt om at assistere med at udvikle en metode til udarbejdelse af et sådant overordnet erosionsatlas for Danmark. DHI's forslag til denne assistance er beskrevet i tilbud dateret 1.11.2012.

Kystdirektoratets oprindelige ide var at udarbejde et erosionsatlas over de danske kyster baseret på historiske kystlinjeanalyser udført af Institut for Geografi og Geologi (IGG) ved Københavns Universitet under COADAPT projektet. Derudover har DHI for nyligt udarbejdet et bølgeatlas for de danske farvande, som er baseret på hindcast af bølgeforholdene for de seneste 18 år. Disse to informationskilder danner tilsammen et godt udgangspunkt for at lave en screening af erosionspresset på de danske kyster.

Denne rapport præsenterer en metode, som kan benyttes til at vurdere erosionspresset på de danske kyster samt risikoen for oversvømmelse forårsaget af stormfloder. Metoden er valgt ud fra hvilke data, som kan forventes at være tilgængelige for alle de danske kyster. Desuden er der i valget af metoden taget højde for, at den skal være relativt hurtig at anvende, således at det vil være en overkommelig opgave for Kystdirektoratet at anvende den på alle Danmarks eksponerede kyster. Af denne årsag benytter metoden sig ikke af detaljerede numeriske beregninger men i stedet af enkle overslagsberegninger. Til sidst i rapporten er den udviklede metode anvendt i et pilotprojekt dækkende Sjællands Nordkyst på strækningen mellem Hundested og Gilleleje.



## 2 Generel beskrivelse

Erosionsatlasset har til formål at beskrive, hvor udsatte de danske kyster er for erosion og oversvømmelse. Ideen er at give en grov vurdering af erosions- og oversvømmelsesforholdene ved en given kyststrækning, som kan bruges i forbindelse med planlægning i kystområdet herunder behov for kystbeskyttelse, dog specielt kystfodring.

Det samlede pres på kysten skyldes i grove træk tre forskellige processer:

- **Kronisk erosion**  
Med kronisk erosion menes den erosion, som skyldes, at langtransporten varierer langs kysten. Hvis langtransporten stiger i transportretningen, vil en given del af kysten få tilført mindre sediment opstrøms fra, end den mister nedstrøms. Dette underskud i kystens sedimentbudget gør, at materiale fjernes fra kysten og dermed, at den eroderes.
- **Akut erosion**  
I situationer hvor stormflodshøjvande ledsages af store bølger, kan bølgerne slå direkte ind på bagstranden og på denne måde æde af kysten, idet kysten vil forsøge at indstille sig i et ligevægtsprofil passende til den forhøjede vandstand. Denne type erosion, hvor materiale flyttes fra den indre til den ydre del af kystprofilen, betegnes akut erosion.
- **Oversvømmelse forårsaget af stormflod**  
Ved kyster, hvor baglandet ligger lavere end forekommende stormflodsvandstande, kan der ske oversvømmelser af de kystnære områder, såfremt disse ikke er sikret med diger, eller såfremt diget overskylles eller brydes.

Disse tre processer er forskellige i natur, og en given kyststrækning kan derfor være meget udsat for én proces uden at være udsat for de to andre. Det er derfor nødvendigt at kategorisere kysterne med hensyn til hver enkelt proces for at give en korrekt beskrivelse af kysten, som kan danne grundlag for fremtidig planlægning og udvikling.

### 2.1 Betydningen af erosionspresset

For kronisk og akut erosion er formålet med erosionsatlasset at vurdere erosionspresset på de enkelte kyststrækninger. I den forbindelse er det vigtigt at gøre det klart hvad der menes med erosionspresset. På kyster, hvor der hverken er opført kystbeskyttelse eller udføres sandfodring, får erosionspresset lov til at virke på kysten, og den observerede erosion svarer direkte til erosionspresset.

På kyster som er udsat for erosionspres, men hvor der er opført kystbeskyttelse, vil der typisk kun være en lille eller ingen kysttilbagerykning, selvom erosionspresset stadig er til stede. Dette betyder, at stranden foran kystsikringen i sådanne tilfælde gradvist vil blive borteoderet. Tilsvarende kan kysttilbagerykning standses med sandfodring. I sådanne tilfælde kræver det jævnlig fodring for at opretholde kystlinjens position. I det følgende defineres erosionspresset derfor som den erosion, som forventes at finde sted, såfremt der ikke fandtes kystbeskyttelse på kysten og ikke blev udført sandfodring. Havne og andre større kystkonstruktioner har også en stor indflydelse på transport- og erosionsforholdene, men denne effekt indregnes så vidt muligt i erosionspresset, da havne betragtes som mere permanente konstruktioner end kystbeskyttelse.

Erosionspresset er således en lidt hypotetisk størrelse, men det tjener et vigtigt formål i og med, at det beskriver, hvor stort pres der er på de beskyttede strækninger. Denne information kan være nyttig i situationer, hvor det overvejes at ændre kystsikringsstrategien og for eksempel erstatte hård kystsikring med sandfodring.

## 3 Dataindsamling

Som grundlag for klassificeringen indsamles følgende data:

### 3.1 Geomorfologiske data

- **Digitaliseret kystlinje**  
En digitaliseret kystlinje kan udtrækkes fra Google Earth. Fremgangsmåde er beskrevet i afsnit 5.1
- **Kystlinjeanalyse fra IGG**  
IGG har udarbejdet en kystlinjeanalyse ved at sammenligne kystlinjerne fra 1897 og 2003. Resultaterne fra denne analyse samt et program, som kan bruges til at plote dem, leveres sammen med denne rapport.
- **Højdemodel for kystens bagland**  
Geodatastyrelsen har på deres hjemmeside [gst.dk](http://gst.dk) offentliggjort en højdemodel for hele Danmark. Desuden er værktøjet "havvand på land", som findes på [klimatilpasning.dk](http://klimatilpasning.dk), et nyttigt værktøj til at se på oversvømmelse forårsaget af forhøjet vandstand.
- **Søkort**  
Søkort kan give information om havbundens udformning langs kysten. Denne information kan benyttes til at vurdere kystprofilens hældning samt indikere variationer i bølgeforskelene, som skyldes forskelle i bølgetransformationen langs kysten.
- **Geologisk kort**  
Et geologisk kort er nødvendigt for at kunne se, hvilken type landskab baglandet består af og dermed, hvor sårbar kysten er for erosion. Et brugbart kort, der dækker hele Danmark, er Per Smeds "Landskabskort over Danmark", som dog desværre ikke findes i en elektronisk udgave.
- **Opgørelser over strandfodring**  
Sandfodringer har en væsentlig indflydelse på en kysts sedimentbudget, og det er derfor vigtigt at tage højde for disse, når erosionspresset på kysten vurderes.
- **Optegnelser over kystsikringskonstruktioner**  
Optegnelser over hølfer, bølgebrydere, skråningsbeskyttelse og diger findes på Kystdirektoratets egen hjemmeside og kan hentes som kml-fil (til brug i Google Earth).
- **Historiske luftfotos**  
Værktøjer som Google Earth ([earth.google.com](http://earth.google.com)) og COWI's [kortal.dk](http://kortal.dk) viser historiske satellit billeder og luftfotos, som er meget nyttige, når kystens historiske udvikling og variabilitet skal vurderes. I Google Earth findes desuden almindelige fotos, som kan benyttes til at se, hvordan landskabet ser ud.
- **Kysttekniske rapporter**  
Kysttekniske rapporter (som for eksempel Ref. 3) kan benyttes til at få en mere detaljeret beskrivelse og analyse af kysten, end hvad der er muligt baseret på de ovennævnte informationskilder.

### 3.2 Meteomarine data

- **Bølgeforskel**

Information om bølgeforholdene langs kysten er nødvendige for at kunne vurdere presset fra kronisk såvel som akut erosion, og til dette formål benytter den foreslåede metode tidsserier for bølgehøjde, bølgeperiode og bølgeretning. DHI råder over modelleret bølgedata for alle de danske farvande for perioden 1994 til 2011 (inkl.).

- **Vandstand**  
For kyster med væsentlig bølgepåvirkning behøves en tidsserie for vandstand, som falder sammen med tidsserierne for bølgeforhold. Dette er nødvendigt for at kunne bestemme korrelationen mellem bølger og vandstand. DHI råder over modelleret vandstandsdata for samme periode som for bølgeforhold.
- **Astronomiske tidevandsforhold**  
Information om det astronomiske tidevand er nyttig til at forstå variationer i vandstanden og kan findes i den Danske Havnelods ([danskehavnelods.dk](http://danskehavnelods.dk)) samt i tidevandstabeller og elektroniske søkort.
- **Stormflodsforhold**  
Højvandsstatistikker baseret på målte data findes i Ref.1.

## 4 Baggrund for metoden

I dette afsnit præsenteres den teoretiske baggrund for den udviklede metode. Den konkrete fremgangsmåde præsenteres i afsnit 5.

### 4.1 Vurdering af kronisk erosionspres

Kronisk erosion skyldes som nævnt, at langtransporten varierer hen langs kysten. For at kunne vurdere den kroniske erosion foretages derfor overslagsberegninger af langtransporten. De forhåndenværende data gør det muligt at beregne transporten på to forskellige måder. Den ene metode benytter de modellerede bølgeforhold samt kystens orientering til at beregne et mål for den potentielle transport langs kysten (transportkapaciteten) under forudsætning af, at kysten består af "almindeligt strandsand". Den anden metode består i at benytte observerede ændringer i kystlinjens position til at opstille et sedimentbudget og derudfra beregne langtransporten.

Resultaterne fra disse to beregninger kan sammenlignes indbyrdes og desuden sammenlignes med de andre informationer, der er til rådighed. Disse resultater giver et godt grundlag for en overslagsmæssig vurdering af langtransporten og det resulterende erosionspotentiale. Det skal dog bemærkes at de to metoder oftest giver forholdsvist forskellige resultater, hvilket skyldes de forskellige forudsætninger og begrænsninger ved de to metoder. Det er dog oftest muligt at forklare forskellene i resultaterne fra de to metoder og dermed udlede de ønskede resultater.

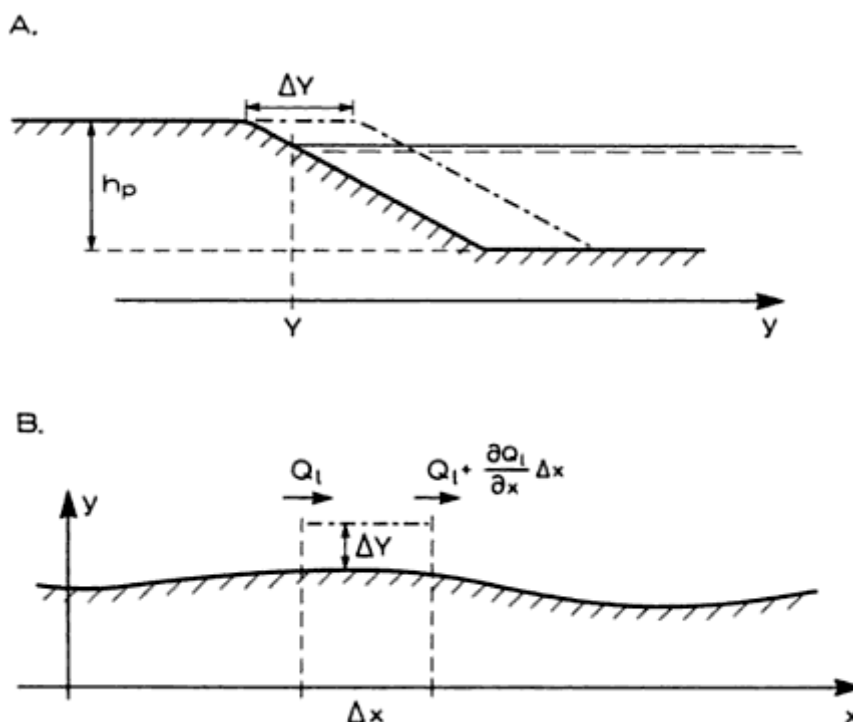
I de to følgende underafsnit beskrives den teoretiske baggrund for de to forskellige metoder til transportberegninger.

#### 4.1.1 Observeret erosion

Kystlinjeanalyser giver et billede af den faktiske erosion af kysten og dermed et indirekte billede af den faktiske sedimenttransport langs kysten for den analyserede tidsperiode fra 1897 og 2003. Grundet den lange periode er der dog oftest udført forskellige former for kystsikring langs forskellige delstrækninger, hvilket naturligvis vanskeliggør en rationel benyttelse af disse data. Kystens frem- eller tilbagerykning indikerer et overskud hhv. underskud af sediment på et givent stykke kyst. Ved at summere disse over/underskud langs en kyst, kan størrelsen af sedimenttransporten estimeres.

Som illustreret i Figur 4-1 er det muligt at beregne volumen af aflejret/eroderet sediment ud fra kystens frem- eller tilbagerykning (Delfigur A). Dette kræver, at man antager, at højde af det aktive profil ( $h_p$ ) er en kendt (fast) størrelse. Samtidig kan volumen af aflejret/eroderet sediment beregnes ud fra variationen i langtransporten (Delfigur B). I så fald er sammenhængen mellem kystens position ( $y$ ) og langtransporten ( $Q$ ) beskrevet ved

$$h_p \frac{\partial y}{\partial t} = - \frac{\partial Q}{\partial l}$$



Figur 4-1 Skitse over ideen bag såkaldte ét-linje modeller til beregning af kystlinjers udvikling. A: Skitse over kystprofilen, som viser volumenændringen, når kysten rykker frem eller tilbage. B: Skitse over kystens planform, som angiver sammenhængen mellem kystens frem- eller tilbagerykning og variationen i langstransporten.

Den aktive del af profilet dækker den del af kystprofilen, som strækker sig fra et stykke over vandlinjen ud til et punkt, der ligger uden for brydningszonen under kraftige storme. Dybden ved den ydre ende af det aktive profil kaldes erosionsdybden eller aktiv dybde ( $h$ ) og er beskrevet som den største dybde, hvor der forekommer ændringer i kystprofilen over kortere tidsskalaer. Den afhænger først og fremmest af bølgeklimate, idet store bølger vil give anledning til bundændringer på større dybder og dermed en større aktiv dybde. Desuden kan tidevand også have betydning for den aktive dybde, da bølgerne ved lavvande vil kunne forårsage bundændringer længere ude i profilet, end de ville ved middelvandstand. Den aktive dybde kan estimeres ud fra udtrykket

$$h_* = 2.28 H_{s12} - 68.5 \left( \frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right)$$

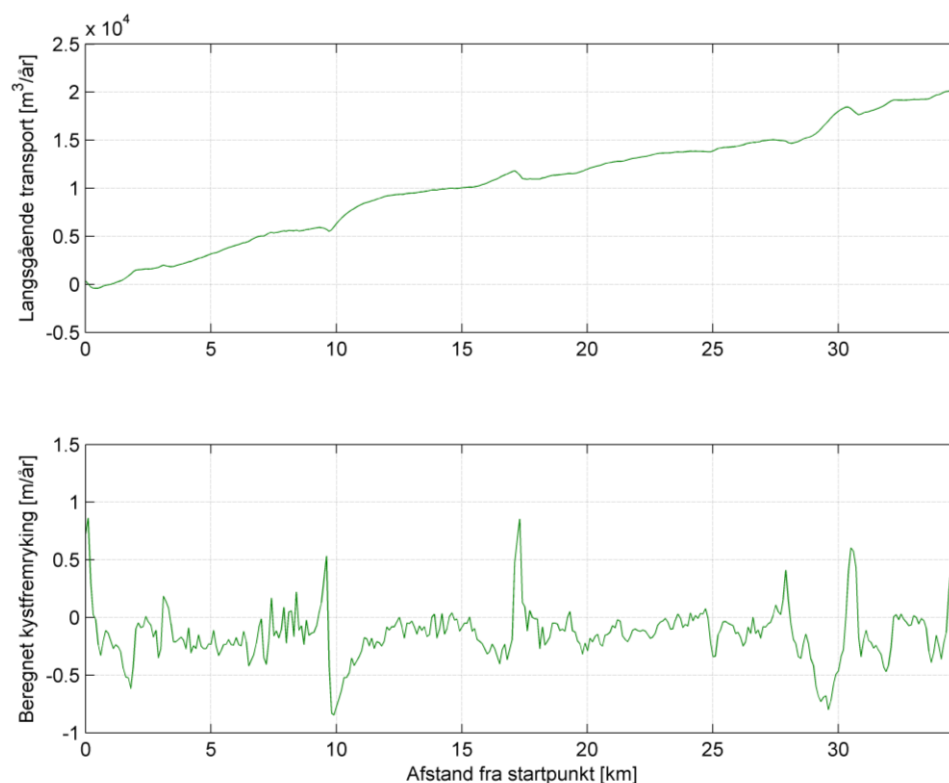
(Hallemeyer, 1981. Gengivet i Ref. 4).

Højden af den øverste del af det aktive profil afhænger af baglandet. Et relativt fladt klitlandskab vil således give anledning til en lille aktiv højde, hvorimod en klint vil give anledning til en større aktiv højde. For at simplificere modellen antages det, at den aktive højde er 3 m. I afsnit 5 gives en diskussion af effekten af klinter/skrænter på den beregnede transport.

For at kunne benytte denne metode behøves ud over kystlinjeudviklingen kendskab til sedimenttransportens faktiske størrelse i mindst ét punkt langs kysten. Med mindre detaljerede studier af den betragtede kystlinje er tilgængelige, er der typisk to tilfælde, hvor sedimenttransporten kan bestemmes i ét punkt, og transporten er i begge tilfælde nul.

Det ene tilfælde er, hvis der et sted på kysten findes en større havn eller anden større kystkonstruktion, som blokerer fuldstændigt for sedimenttransporten. Det andet tilfælde er, hvis der på kysten forekommer et sted, hvor den naturlige nettotransport er nul. Dette sker, hvis kysten på dette sted har en orientering, som svarer til ligevægtsorienteringen. Et eksempel på et

sedimentbudget beregnet ud fra den historiske kystudvikling af kysten er præsenteret i Figur 4-2, som omhandler strækningen mellem Hundested og Gilleleje.



Figur 4-2 Eksempel på sedimentbudget beregnet ud fra den historiske kystudvikling af kysten mellem Hundested og Gilleleje. Øverst: Beregnet transport. Bemærk at positiv transport angiver transport i østlig retning. Nederst: Gennemsnitlig udvikling i kystens position fra 1893 til 2003.

Selvom denne metode ser på de faktiske ændringer langs kysten, giver den ikke nødvendigvis et retvisende billede af transporten nøjagtige størrelse langs kysten. Antagelsen om et kystprofil, der har en konstant form og højde og som blot forskydes frem eller tilbage, er en meget grov simplificering af virkeligheden. For at kunne fortolke resultaterne fra denne beregning af transporten er det derfor vigtigt at være opmærksom på de ting der ikke tages højde for i denne simple beregning.

En stor usikkerhedsfaktor i metoden er den aktive højde af kystprofilet, som ud over bølgeforholdene afhænger af landskabets udformning og type. Langs selv korte kyststrækninger kan der forekomme stykker, hvor baglandet består af lavtliggende områder, som giver anledning til en lille aktiv højde, og høje klinter som giver anledning til en meget stor aktiv højde. Da det antages, at den aktive højde er konstant langs den betragtede kystlinje, tages der ikke højde for sådanne variationer i landskabet. Langs kyster med høje skrænter vil metoden altså typisk undervurdere mængden af materiale, som frigives ved en given kysttilbagerykning.

I metoden antages desuden, at alt det eroderede materiale indgår i langstransporten. Af de eroderede sedimenter er det dog kun visse fraktioner, som bliver del af langstransporten. Typisk vil langstransporten bestå af fraktioner, som ligger mellem fint sand og ral, dog overvejende "normalt" strandsand. Finere sediment som silt vil vaskes ud og ikke aflejres på kysten igen. Omvendt vil bølgeforholdene sjældent være i stand til at flytte materiale, som er grovere end ral. Moræneler, som findes i baglandet langs mange af de danske kyster, består af en blanding af alle disse sedimenter, og det er derfor kun en del af det eroderede volumen, som bliver del af

langtransporten. I sådanne tilfælde vil denne simplificerede metode således medføre en vis usikkerhed, når den omregnes til nettotransport langs kysten.

Et andet problem i at beregne langtransporten ud fra ændringer i kystlinjen er kystbeskyttelse. Mange steder langs de danske kyster er der bygget kystbeskyttelse i form af for eksempel skråningsbeskyttelse, hofder eller kystparallelle bølgebrydere. Disse konstruktioner reducerer langtransporten og bremser erosionen. I visse tilfælde kan de endda give en lokal fremrykning af strandlinjen. Ved at analysere historiske kystlinjer over en periode hvori der er opført kystbeskyttelse, vil man derfor få konstant eller svagt aftagende transport.

Desuden er det vigtigt at være opmærksom på, at de historiske erosionsrater er baseret på en periode på mere end 100 år (1897-2003). I denne periode er transport- og erosionsforholdene i mange tilfælde ændret, typisk som resultat af opførelsen af kystbeskyttelse og andre konstruktioner. Virkningen af kystbeskyttelse er ofte at bremse kysttilbagerykningen langs de beskyttede strækninger, mens eventuelle ubeskyttede strækninger længere nedstrøms vil opleve en hurtigere kysttilbagerykning. Da de angivne erosionsrater er beregnet som et gennemsnit over 100 år, må det forventes, at nuværende erosionsrater vil være væsentligt lavere langs beskyttede strækninger og noget højere langs ubeskyttede strækninger.

#### 4.1.2 Forventet erosion baseret på bølgeforhold

Generelt er det vanskeligt at lave præcise beregninger af langtransporten idet denne er følsom overfor mange parametre, herunder bl.a. af kystprofilets form og beskaffenhed. Information om kystprofilets form samt mængden og typen af sediment i profilet er generelt ikke tilgængeligt, og det vil derfor normalt ikke være muligt at udføre egentlige beregninger af langtransporten, med mindre man har en stor mængde informationer for kyststrækningen.

Det er dog muligt at foretage en grov beregning, som på basis af bølgeforholdene samt kystens orientering giver variationen i nettotransportpotentialet langs kysten. Denne beregning kan bestemme transportens retning og transportpotentialets variation langs kysten, og desuden hvor nettotransporten er nul. Dermed er det muligt at vurdere, hvor på kysten bølgeforholdene giver anledning til erosion eller aflejring. Om denne erosion eller aflejring rent faktisk finder sted afhænger meget af, hvad der findes af kystbeskyttelse eller andre faktorer, som kan påvirke transporten langs kysten.

I Ref. 5 er givet en række empiriske formler, som beskriver, hvordan langtransporten afhænger af blandt andet bølgenes højde, periode og indfaldsvinkel. Disse empiriske formler er bestemt ud fra modelresultater fra modellen Litdrift (som er en del af DHI's modelkompleks LITPACK). Ved kun at tage højde for afhængigheden af bølgehøjde, -periode og -retning kan disse empiriske formler sammenfattes i udtrykket:

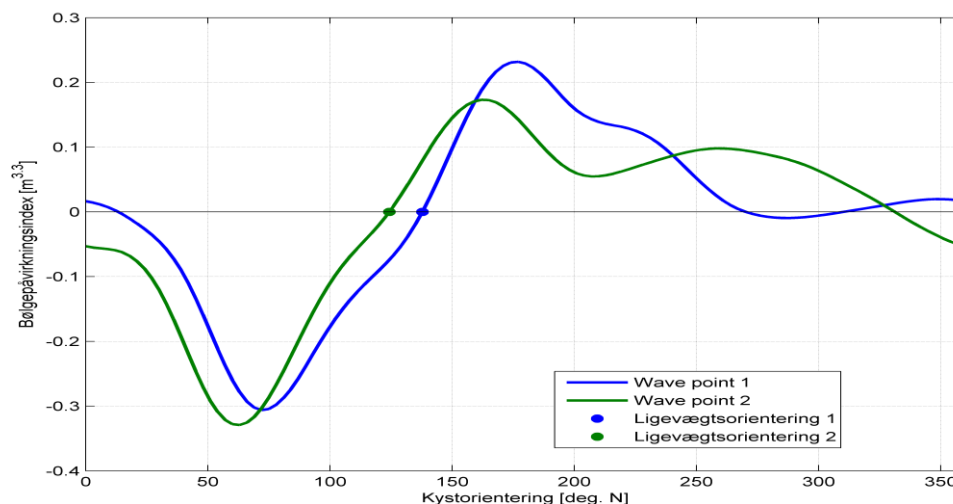
$$q_s = \frac{H_s^{3.8}}{T_p} \sin \left( 2\alpha \left[ 1 - 0.4 \frac{\alpha}{90} \left( 1 - \frac{\alpha}{90} \right) \right] \right)$$

Hvor  $H_s$  er den signifikante bølgehøjde,  $T_p$  er peak bølgeperiode, og  $\alpha$  er bølgenes indfaldsvinkel, dvs. forskellen mellem bølgeretningen og kystnormalen. Stregen over højre siden angiver, at der tages et gennemsnit over tid.  $q_s$  kaldes transportindekset for at understrege, at der ikke er tale om en egentlig transport men derimod en indikator, som kan benyttes til at vurdere visse egenskaber for langtransporten. Størrelsen  $\overline{H_s^{3.8}}/T_p$  betegnes bølgepåvirkningsindekset og er et mål for den bølgeaktivitet, som er til rådighed til at flytte sediment. På grund af retningsfordelingen af bølgerne vil bølgepåvirkningsindekset altid være væsentligt større end transportindekset.

For at give nogle tal som man kan forholde sig til skaleres transportindekset med en faktor  $K$  således at man får et tal som har samme størrelsesorden som den faktiske transport. Størrelsen af  $K$  kan eventuelt bestemmes hvis transporten kendes et sted på kysten, ud fra resultatet af kystlinjeanalysen eller simpelthen ud fra forventning til hvad transporten lang kysten er.



Ud over at beregne variationen i transporten langs en kystlinje kan bølgepåvirkningsindekset benyttes til at beregne den såkaldte  $q_*/\alpha$ -kurve for bølgeklimate (se Figur 4-3).  $q_*/\alpha$ -kurven viser, hvordan transporten varierer afhængig af kystens orientering. Ud fra  $q_*/\alpha$ -kurven er det muligt at aflæse kystens ligevægtsorientering, som er den orientering, som giver nul nettotransport.



Figur 4-3  $q_*/\alpha$  -kurver for to bølgeklimate udtrukket ved Stevns.

Som det ses af  $q_*/\alpha$ -kurven, er langstransporten størst, når kystens orientering afviger fra ligevægtsorienteringen med omkring 50 grader. Det faktum, at transporten falder, når afvigelsen bliver større end 50 grader, gør, at kysten bliver ustabil, og kystlinjen vil have tendens til at danne undulationer. Generelt giver beregningen af transporten meget usikre resultater, når bølgerne kommer meget skråt ind på kysten.

Som for beregningen af transporten ud fra kystlinjeanalysen er det vigtigt at være opmærksom på begrænsningerne ved at vurdere transporten ud fra transportindekset. I og med at der ikke tages højde for effekten af kystprofillets form, sedimentets størrelse og sortering samt mængden af mobil sediment i profilet, antages det implicit, at alle disse faktorer er konstante langs den betragtede kystlinje. Dette er i reglen ikke tilfældet, hvilket gør, at der vil være væsentlige variationer i langstransporten (og deraf følgende erosion), som ikke er beskrevet ved hjælp af transportindekset. Derudover tages der ikke højde for kystbeskyttelse, som vil medføre, at en del af den beregnede transportkapacitet, som er beskrevet af transportindekset, ikke realiseres.

Metoden benytter desuden en simplificeret beskrivelse af bølgeforholdene (se afsnit 5.1), som ikke tager højde for eventuelle forskelle i bølgeforholdene langs kystlinjen. Dette er ikke et stort problem ved lange ensartede kyster som den jyske vestkyst, men det kan det være ved andre kyster, hvor der er store variationer i bundforholdene langs kysten. Et lavvandet område lidt ude fra kysten vil enten reducere eller fokusere bølgeenergien på kysten afhængig af forholdene, og derved transporten langs kysten.

Der er således tale om en meget overordnet beregning af den langsgående transport som beskriver den overordnede variation i langstransporten som skyldes variationer i bølgeforholdene samt kystens generelle orientering. Da lokale variationer i bølgeforholdene ikke er beskrevet i beregningen kan det ikke forventes at denne vil give gode resultater i små bugte med mindre der er udtaget bølgepunkter i disse.

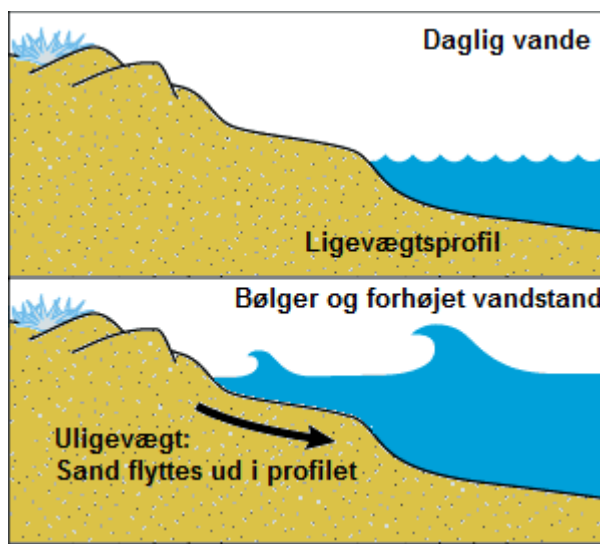


## 4.2 Akut erosion

Akut erosion opstår under højvandssituationer, hvor bølger slår ind på bagstranden eller baglandet og flytter sediment udad i kystprofilen. Akut erosion opstår derfor som et resultat af, at kystprofilen i højvandssituationer ikke er i ligevægt med de aktuelle bølge- og vandstandsforhold.

Ud over den ovennævnte langstransport forårsager bølger, der bryder langs kysten, også en transport af sediment på tværs af kysten. Denne tværtransport kan give omløjninger af sediment, som ændrer kystprofilens form. Et kystprofil, som udelukkende består af mobilt sediment, vil under konstante bølgeforhold etablere et såkaldt ligevægtsprofil, som er i balance med bølgeforholdene. Stor bølgeaktivitet vil generelt give anledning til et relativt fladt kystprofil, hvorimod lav bølgeaktivitet vil give anledning til et stejlere kystprofil.

I situationer, hvor forhøjet vandstand falder sammen med store bølger, vil den del af kystprofilen, som er påvirket af bølgerne, strække sig et stykke op ad bagstranden og til tider op på selve baglandet. Under disse forhold vil bølgerne forsøge at etablere et fladere kystprofil op til den forhøjede vandlinje plus bølgeopskyllet, hvilket ses ved, at bølgerne æder af bagstranden og eventuelt baglandet.

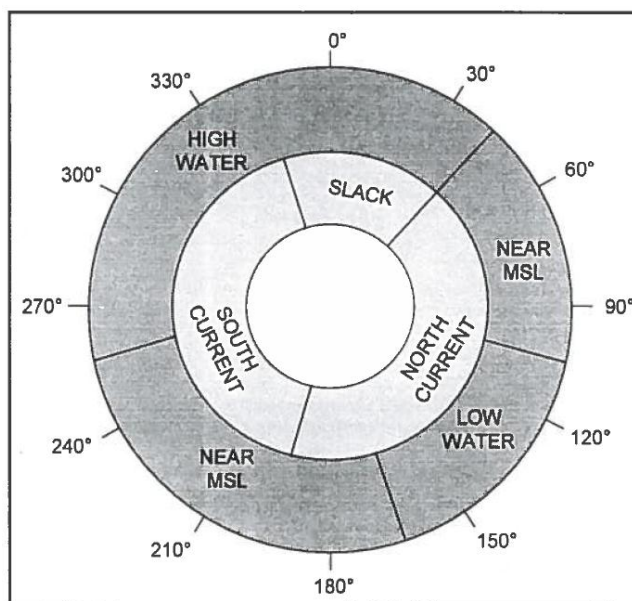


Figur 4-4 Skitse der viser hvordan akut erosions opstår under situationer med forhøjet vandstand og høje bølger.

De processer, der styrer transporten af sediment på tværs af kystprofilen, er meget komplicerede, og selv med avancerede numeriske modeller er det svært at beregne tværtransporten og den resulterende omløjring. Det er dog muligt at give en grov vurdering af risikoen for akut erosion ved at se på, om store bølger typisk forekommer samtidig med højvande samt på, hvor voldsomt bølgeklimaet er ved kysten.

I de indre danske farvande er bølgeforholdene hovedsageligt styret af vinden. På grund af de relativt korte frie stræk er bølger i de fleste tilfælde dannet af de lokale vindforhold, og bølgeretningen er derfor næsten den samme som vindretningen.

Vandstanden er ligeledes styret af vindforholdene om end på regional skala. I de indre danske farvande er vandstanden eksempelvis styret af vindstuvning i Kattegat og i Østersøen. Dette gør, at forhøjet vandstand ikke altid forekommer under kraftig pålandsvind, som det normalt er tilfældet ved åbne kyster som den jyske vestkyst. Figur 4-5 viser, hvordan vandstanden i Øresund typisk afhænger af vindretningen. Det faktum, at vandstanden i Øresund typisk er lav ved kraftig sydøstenvind gør, at kraftig pålandsvind på kyststrækninger der vender imod SØ typisk giver lavvande (og dermed ingen risiko for akut erosion). Langs disse kyster forekommer højvande typisk ved kraftige vinde fra NV-lige retninger, dvs. ved fralandsvind.



Figur 4-5 Diagram, som viser typiske strøm- og vandstandsforhold i Øresund i situationer med kraftig vind fra en given retning.

På grund af denne sammenhæng mellem bølger, vind og vandstand er der forskellige korrelationer mellem bølgehøjde, bølgeretning og vandstand på forskellige lokaliteter langs de danske kyster. Nogle eksempler på dette er givet i afsnit 5.3.2.

### 4.3 Oversvømmelse

Ved kyster, hvor baglandet ligger meget lavt, risikerer baglandet at blive oversvømmet under stormflodssituationer.

Vandstanden ved kysten er styret af en række forskellige fænomener. De vigtigste af disse er:

1. Det astronomiske tidevand, som forårsager en periodisk variation af vandstanden, og i de danske farvande har en periode på ca. 12,5 timer. Ved langt de fleste af Danmarks kyster er det astronomiske tidevand imidlertid meget lille, og det er kun i nærheden af Vadehavet, at det har væsentlig betydning for vandstanden.
2. Stormflod (eller meteorologisk tidevand) er primært styret af vinden, som giver en opstuvning af vandspejlet i vindens retning samt af farvandets form og sammenhæng med større vandarealer. Som beskrevet ovenfor er det meteorologiske tidevand langt den vigtigste årsag til større variationer i vandstanden i de indre danske farvande.
3. Når bølger bryder mod en kyst, trykker de vand ind mod kysten og forårsager en hævnning af vandstanden inde ved vandlinjen, som kaldes bølgestuvning.

Summen af bidragene fra disse tre fænomener giver vandstanden ved kysten og dermed det niveau, som bestemmer, om baglandet oversvømmes. Dette niveau kaldes oversvømmelsesniveauet.

I tilfælde af, at der er bølger som slår ind på kysten, vil disse give opskyl, som vil nå længere op end oversvømmelsesniveauet. Da dette ikke er en konstant hævnning af vandstanden, vil det ikke give anledning til en stor indstrømning af vand til baglandet, og derfor er opskyl fra bølger ikke direkte relevant for risikoen for oversvømmelse.

Bølger kan dog beskadige et dige, som skal beskytte baglandet mod oversvømmelse, såfremt det ikke er tilstrækkeligt beskyttet af skråningsbeskyttelse på forsiden eller ved erosion af bagsiden. I værste fald kan bølger forårsage et brud på diget, således at vand trænger ind i baglandet, selvom vandstanden er lavere end digets topkote. Risikoen for brud på diger tages ikke med i denne vurdering.

Bølgestuvning vokser tilnærmelsesvis proportionalt med bølgehøjden og kan i visse tilfælde give et betydeligt bidrag til vandstanden. Dette er dog først og fremmest tilfældet for indelukkede strande, hvor bølgerne rammer direkte ind mod kysten og ikke driver en langsgående strøm. Da de fleste af de danske kyster består af lange åbne strande, hvor bølgerne som oftest har et skråt indfald på kysten, vurderes det, at bølgestuvning kun har sekundær betydning for vandstanden.

Til vurdering af risikoen for oversvømmelse benyttes derfor højvandsstatistikker (for eksempel fra Ref. 1) baseret på målte data. Disse data beskriver de vandstandsvariationer, som skyldes astronomisk og meteorologisk tidevand og er derfor tilstrækkelige til at beskrive risikoen for oversvømmelse ved de danske kyster.

Risikoen for oversvømmelse vurderes ved at sammenligne vandstande fra højvandsstatistikken med niveauer for kystens bagland eller med højden af eventuelle diger.

Havniveaustigninger i forbindelse med klimaændringer er ikke inkluderet i nærværende klassifikation.

## 5 Fremgangsmåde

I dette afsnit beskrives de arbejdsopgaver, som metoden til udarbejdelse af et erosionsatlas består af.

En del af disse aktiviteter er ikke relevante for kyster, hvor bølgepåvirkningen er meget lille. Ved sådanne kyster er både den langsgående og tværgående transport så små, at presset fra både kronisk og akut erosion vil være ubetydelige, og det er derfor kun nødvendigt at vurdere risikoen for oversvømmelse.

Hvorvidt en given kyst er udsat for væsentlig bølgeaktivitet afhænger af, om der i farvandet ud for kysten er et frit stræk, som bølgerne kan dannes over. I snævre farvande som for eksempel Roskilde Fjord er der i størstedelen af fjorden ikke et stort nok stræk til, at der kan dannes bølger af betydning, selv ikke under kraftige storme. Som tommelfingerregel kan det antages, at kyster, hvor det længste frie stræk er mindre en ca. 5 km, ikke er udsat for væsentlig bølgeaktivitet.

### 5.1 Udvalgelse og udtrækning af kystlinje

Under udarbejdelsen af erosionsatlasset inddeles kysten i enkelte kyststrækninger, som analyseres individuelt. Da måden, hvorpå kysten inddeles på, er afhængig af bølgeforholdene, bør man først vurdere, hvilke kyster der er udsat for væsentlig bølgeaktivitet, og hvilke der ikke er det.

#### 5.1.1 Kyster med væsentlig bølgeaktivitet

For kyster med væsentlig bølgeaktivitet beregnes presset fra både kronisk og akut erosion separat.

Akut erosion vurderes ud fra beregninger foretaget på bølgeforholdene i ét punkt ad gangen. De fundne resultater kan benyttes på de nærliggende kyster (se mere detaljeret beskrivelse i afsnit 5.3.2).

For kronisk erosion benyttes bølgedata for to punkter til at beregne den langsgående transport langs den mellemliggende kystlinje. En bølgetidsserie for hvert punkt på kysten beregnes således ved at lave en lineær interpolation mellem tidsserierne i de to bølgepunkter. Det er derfor vigtigt at inddele kysten således, at man ved denne interpolation kan forvente at få en rimelig beskrivelse af bølgeforholdene langs hele kyststrækningen. En god repræsentation af bølgerne er afgørende for, hvor godt transportindekset vil afspejle den egentlige transport langs kysten,

Da beregningen af transportindekset antager en ensartet kyst, vil det desuden være at foretrække, at kysten inddeles således, at der er på en enkelt kyststrækning ikke forekommer meget forskellige kysttyper (for eksempel stejle klinte sammen med meget fladt land som for eksempel nede ved Rødvig ved Stevns).

Gode steder at dele kysten op inkluderer:

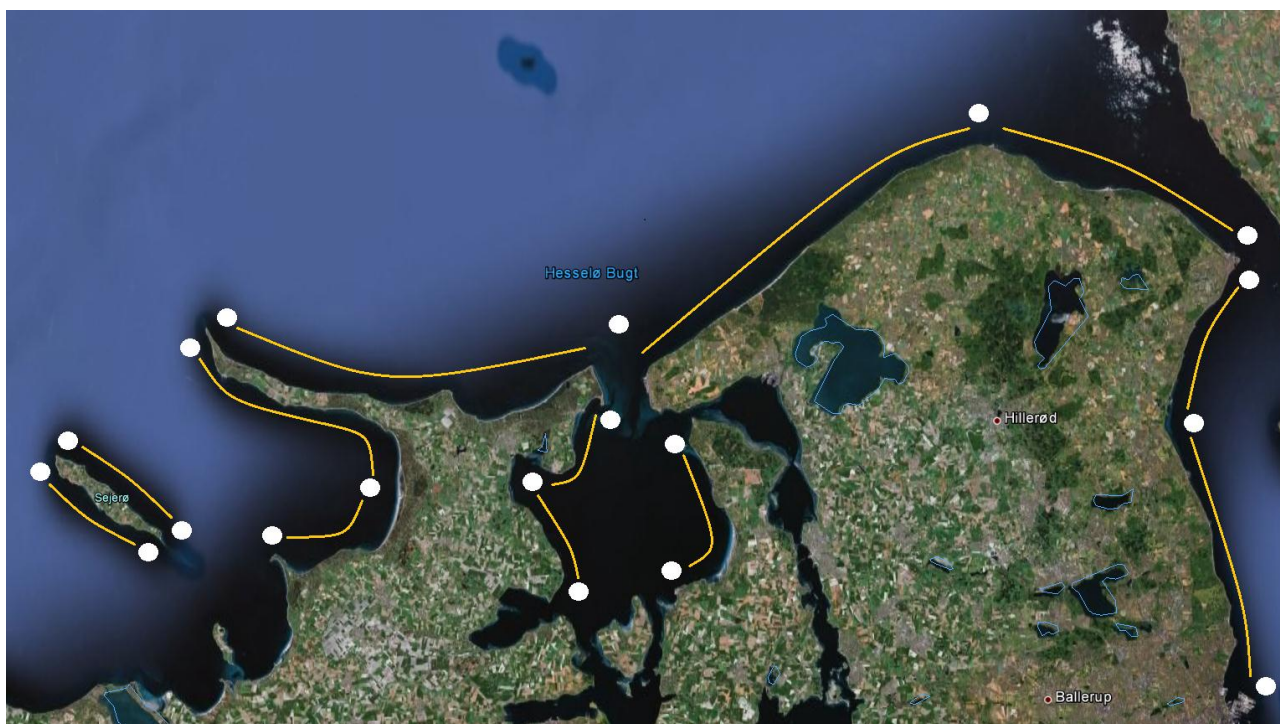
- Meget fremtrædende pynter eller odder som f.eks. Hanstholm eller Sjællands Odde.
- Fjordmundinger.
- Store havne som kan forventes at blokere fuldstændigt for langstransporten.

Disse strukturer har stor indflydelse på langtransporten, og desuden kan det forventes, at bølgeklimaet er forskelligt på hver side af dem.

I åbne fjorde eller dybe bugter kan det være en god idé at tage hver side af bugten/fjorden for sig. På den måde får man lagt et bølgepunkt i bunden af bugten og får således beskrevet variationen i bølgeklimaet bedst muligt. Dette kræver imidlertid at opløsningen af den bølgemodel hvorfra bølgedata fås er tilstrækkeligt godt opløst til at give en brugbar beskrivelse af bølgeforholdene i bunden af bugten.

I tilfælde af at der ikke er bølgedata til rådighed i begge ender af en given kystlinje er det muligt at påføre et konstant bølgeklima langs den betragtede kyst ved simpelthen at benytte samme bølgedata i begge ender af kyststrækningen. Dette vil naturligvis give en noget forringet beskrivelse af den langsgående transport og i sidste ende gøre det sværere at fortolke resultaterne.

Et eksempel på hvordan Nordsjællands kyster kunne inddeles er givet i Figur 5-1.



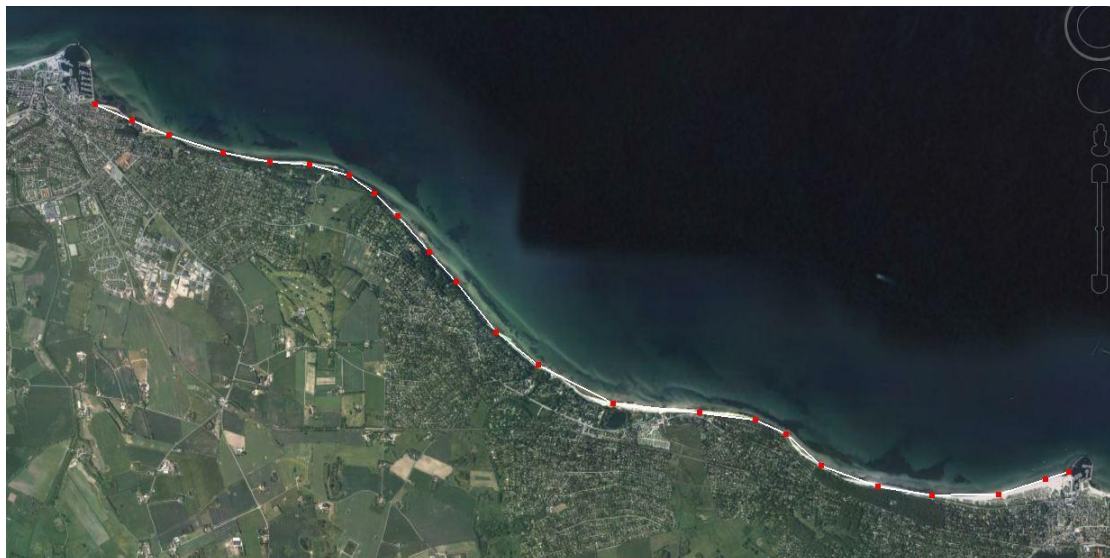
**Figur 5-1** Forslag til inddeling af kysterne omkring Nordsjælland samt valg af bølgepunkter. Gule linjer angiver kyststrækninger, og hvide prikker angiver bølgepunkter. I snævre farvande som Roskilde fjord og Holbæk fjord kan hele kysten analyseres under ét, da bølgepåvirkning vil være ubetydelig.

Når en kyststrækning er udvalgt, benyttes Google Earth til at udtrække en digitaliseret kystlinje for strækningen. Der oprettes et linjestykke (i Google Earth kaldet en "sti") som følger kysten langs den betragtede strækning (se Figur 5-2). Dette giver mulighed for selv at bestemme hvor detaljeret kysten skal repræsenteres. Når stien er oprettet kan dens koordinater eksporteres i form af en .kml fil som benyttes i de senere beregninger. Dette gøres ved at højre-klikke på stien i sidepanelet til venstre og dernæst vælge "Gem sted som". Det er vigtigt at være opmærksom på, hvilket punkt der er begyndelsespunkt, og hvilket der er slutpunkt for kysten, da dette har betydning for fortegnet i beregningerne. Start- og slutpunkt skal angives således, at hvis man følger kysten fra startpunkt til slutpunkt, har man land på højre hånd og hav på venstre hånd.

Grunden til at der benyttes en simplificeret repræsentation af kystlinjen i stedet for den faktiske kystlinje er at kystlinjen i mange tilfælde er meget ujævn med mange små pynter og forskellige typer kystbeskyttelse. Da den beregnede langtransport er meget følsom over for sådanne



variationer i kystens orientering fås meget store lokale udsving i tranporten og det kan være svært at identificere de overordnede tendenser.



Figur 5-2 Eksempel på hvordan kysten mellem Gilleleje og Hornbæk kan markeres som en sti i Google Earth.

### 5.1.2 For kyster med meget lidt bølgeaktivitet

I de tilfælde, hvor bølgeberegninger ikke er nødvendige, er der ikke de samme krav til inddeling af kysten som for kyster, der er udsat for bølger. Således kan en hel fjord såsom Roskilde Fjord betragtes som én strækning.

Det eneste man bør være opmærksom på er, at den anvendte vandstandsstatistik skal være gyldig for hele den betragtede kyst. I visse snævre farvande kan der være betydelige gradienter i vandspejlet, og der kan derfor forventes at være forskelle i højvandsstatistikken for forskellige dele af farvandet. Særligt i farvande med gennemstrømning og kraftige indsnævninger eller tærskler som Guldborgsund, Øresund nord og syd for Drogden og Limfjorden kan der være relativt store gradienter i vandspejlet.

## 5.2 Beregninger

For kyster, der er udsat for bølgepåvirkning, udføres en række beregninger ud fra de indhentede bølge- og vandstandsdata samt den udtrukne digitale kystlinje. Disse udregninger udføres ved hjælp af programmerne "KroniskErosion.exe" og "Akut Erosion.exe" (se detaljeret beskrivelse i Appendix A). Den teoretiske baggrund for disse beregninger er givet i afsnit 4. I dette afsnit beskrives nogle beregningstekniske detaljer, som er relevante for anvendelsen af metoden.

### 5.2.1 Transportberegninger baseret på bølgeforhold

Transporten langs kysten beregnes ud fra de lokale bølgeforhold samt kystens lokale orientering. For at kunne gøre det, behøves tidsserier for bølgehøjde, -periode og -retning samt vandstand i to punkter, ét ud for hver ende af kysten. Disse punkter bør naturligvis vælges, så de ligger nogenlunde tæt på kysten men omvendt ikke tættere på, end at der ved at interpolere mellem dem kan opnås en rimelig beskrivelse af bølgeforholdene langs den mellemliggende

kyststrækning. Desuden bør man være opmærksom på, at hele kystlinjen ligger mellem de to bølgepunkter, således at der ikke ekstrapoleres ud over de to punkter.

Ud fra de udtrukne tidsserier laves bølgeroser (evt. i MIKE zero). Dette giver et billede af bølgeforholdene ved den undersøgte kyst samt af, hvor meget bølgeforholdene varierer langs kysten. I tilfælde af at der er stor forskel på størrelsen af bølgerne i de to punkter, bør det overvejes, om kysten skulle være inddelt anderledes.

Programmet "KroniskErosion.exe" benyttes til at udføre beregningerne, både af den potentielle transport og den aktuelle transport bestemt ud fra kystlinjeanalysen. Dette program beregner en række størrelser for hvert af de to bølgepunkter, heriblandt  $H_{s,12}$ ,  $q/\alpha$ -kurver, bølgepåvirkningsresultant samt erosionsdybde. Desuden producerer programmet en lang række plot og figurer, som visualiserer de beregnede resultater.

For at beregne transportindekset langs kysten beregnes en bølgetidsserie for hvert enkelt punkt på kysten ved lineær interpolation mellem de to udtrukne bølgetidsserier. Som kystens orientering benyttes orienteringen af den tilnærmede kystlinje. Ud fra disse to størrelser beregnes transportindekset for hver 100 m af kyststrækningen.

Det er en god idé at kontrollere, at den beregnede transportretning stemmer overens, dels med hvad man ville forvente ud fra bølgeroserne, og dels med hvad man kan observere på luftfotos. Retningen for nettotransporten kan ses blandt andet af ansamlinger af sediment rundt om konstruktioner eller på åers udløb, som har tendens til at pege i samme retning som transporten.

## 5.2.2 Sedimentbudget

På basis af data for kystændringer opstilles et sedimentbudget, og transporten langs kysten beregnes.

For at kunne opstille et sedimentbudget behøves ét punkt på kystlinjen, hvor transportens absolutte værdi er kendt. Det vil ikke altid være muligt at finde et sådant punkt, og programmet er derfor sat op således, at hvis ikke et punkt angives, vil programmet antage, at transporten er nul ved kystlinjens begyndelse.

I nogle tilfælde vil det dog være muligt at bestemme transporten i ét eller flere punkter langs kysten, oftest steder hvor transporten er nul.

Sådanne steder kan for eksempel være store kystkonstruktioner som havne eller landfæstninger til broer, eller på Borholm kan det være store klippefremspring, som blokerer fuldstændigt for langstransporten. På luftfotos er det typisk muligt at se, om en struktur blokerer fuldstændigt for transporten. Hvis der er transport af sand forbi strukturen, vil man typisk kunne se en tange af sand, som breder sig langs strukturen.

Ved nogle havne foretages en kunstig flytning af sand fra luvsiden til læsiden. Hvis al naturlig transport er blokeret, udgør denne flytning den eneste tilførsel af transport til læsiden. Ref. 3 giver en meget nyttig oversigt over luvsideakkumulationer og oprensninger, som kan bruges til at bestemme langstransporten forbi et antal kystkonstruktioner i Danmark.

Der kan desuden være steder på kysten, hvor nettotransporten er nul, fordi kystens orientering svarer til ligevægtsorienteringen. Sådanne punkter kan findes ud fra transportindekset, som er nul på sådanne lokaliteter. I nogle tilfælde er det muligt ud fra luftfotos at verificere, at et givent sted er et nulpunkt for transporten, da ansamling af sediment rundt om konstruktioner vil være symmetrisk.

### 5.2.3 Sammenhæng mellem bølger og vandstand

Til brug i vurderingen af potentialet for akut erosion beregnes korrelation mellem bølgehøjde og vandstand ved hjælp af programmet "AkutErosion.exe". I modsætning til den kroniske erosion laves beregningen for den akutte erosion for et bølgepunkt ad gangen. Resultatet kan derefter benyttes på de nærliggende kyster.

I beregningen inddeles bølgetidsserien efter bølgeretning således at vinkeludsnit på 45 grader analyseres separat. Der laves scatterplots af vandstand og bølgehøjde og i disse indtegnes en ret linje som tilnærmer data bedst muligt. Hældningen på den fundne linje er angivet over hvert enkelt plot. Sandsynligheden for at bølgerne kommer fra en retning inde for det pågældende vinkeludsnit beregnes også og står ligeledes angivet oven over plottet. Disse sandsynligheder gør det muligt at vægte betydningen af de forskellige vinkeludsnit for det samlede erosionspres.

Da bølgedata er udtrukket i en vis afstand fra kysten, kan der forekomme bølger i de vinkeludsnit som peger ind mod kysten. Disse vinkeludsnit er naturligvis irrelevante for erosionen og bør ignoreres.

## 5.3 Vurdering

Ud fra de indsamlede data samt resultaterne fra de ovennævnte beregninger foretages en vurdering af, hvor udsat kysten er for henholdsvis kronisk og akut erosion samt oversvømmelse. For hver proces beskrives kysten ved hjælp af en kategorisering som for eksempel "Ingen risiko", "Lille risiko", "Moderat risiko" etc.

I dette afsnit beskrives hvordan denne kategorisering udføres og herunder hvilke overvejelser der ligger til grund for kategoriseringen.

### 5.3.1 Kronisk erosion

#### 5.3.1.1 Analyse af transportforholdene

For at kunne vurdere det kroniske erosionspres på kysten er det nødvendigt at opnå en forståelse af transporten langs den betragtede kystlinje. Dette gøres ved grundigt at analysere resultaterne for transportindekset og for kystlinjeanalysen. De to forskellige måder at beregne langstransporten har som nævnt forskellige styrker og svagheder, og ofte stemmer resultaterne fra de to beregninger ikke overens langs hele den betragtede kystlinje. De steder, hvor de to resultater afviger fra hinanden, kan dog give meget information om, hvad der har betydning for transporten.

Det foreslås først at analysere resultaterne af de to transportberegninger separat. Således kan man kontrollere at resultaterne hver især ser korrekte ud og man kan opbygge en forståelse for hovedtrækkene i transportforholdene. Derefter foretages en sammenligning af de to sæt resultater, som kan afsløre, hvor resultaterne stemmer overens, og hvor de afviger. I denne forbindelse er det nødvendigt også at se på de andre tilgængelige informationskilder såsom luffotos, oversigter over kystbeskyttelse og sandfodringer samt geologiske kort og højdekort.

Som nævnt kan det være en kompliceret opgave at vurdere langstransporten og deraf følgende erosionspres. Der gives derfor ikke en direkte lineær opskrift på en sådan kystanalyse men i stedet en række spørgsmål, som kan stilles, når man forsøger at forstå transporten og erosionsmønstrene.

Når resultaterne for transportindekset betragtes, er det vigtigt at stille følgende spørgsmål:



- Er der nogen steder, hvor transporten er nul, og hvor kystens orientering dermed svarer til ligevægtsorienteringen? Bevæger transporten sig på de nærliggende strækninger mod nulpunktet (aflejringspunkt) eller væk fra det (erosion)?
- Hvilken retning har transporten på de forskellige delstrækninger? Stemmer dette overens med, hvad man ville forvente ud fra bølgeroserne?
- Hvor forekommer de største gradienter i transportindekset, og hvor forventes derfor størst erosion? På sådanne strækninger vil der oftest være opført kystbeskyttelse og erosionen vil derfor være standset men erosionspotentialet består og vil typisk give sig udslag i at strandene forsvinder/er forsvundet.
- Er der steder, hvor kysten forventes at være ustabil, fordi der er meget stor forskel på ligevægtsorienteringen og kystens faktiske orientering?

Tilsvarende når resultaterne fra kystlinjeanalysen betragtes, er det vigtigt at stille spørgsmålene:

- Er der noget sted på kysten, hvor den faktiske transport er kendt, såsom steder hvor transporten er blokeret, eller hvor nettotransporten naturligt er nul?
- Er der konstruktioner på kysten, som giver anledning til luvsideakkumulation og læside erosion og dermed angiver transportretningen? Stemmer dette overens med den beregnede transportretning?
- Langs hvilke strækninger ses de største ændringer i kystens position? Er der en fornuftig forklaring på disse ændringer, som stemmer overens med andre observationer?
- Er der opført kystbeskyttelse eller foretaget strandfodring, som kan have haft indflydelse på kystens frem- eller tilbagerykning?

I sammenligningen af de to resultater bør følgende spørgsmål stilles:

- Er der steder, hvor resultaterne stemmer overens, og hvor begge metoder derfor lader til at fungere godt?
- Er der steder, hvor de to sæt resultater ikke stemmer overens, og hvor en eller begge metoder derfor ikke giver en god beskrivelse af forholdene?
- Findes der kystbeskyttelse eller hård bund, som kan reducere transporten i forhold til det, som forventes ud fra transportindekset?
- Er der uregelmæssigheder i bundkonturerne langs kysten, som kan være vigtige for bølgenes bevægelse mod kysten og dermed give fejl i transportindekset?
- Findes der høje skrænter eller klinte, som gør, at højden af det aktive profil er meget stor, og dermed at transporten kan være højere end det, som er beregnet ud fra den simplificerede kystlinjeanalyse?

Kysten skal ses som en helhed, hvor kystbeskyttelse og andre faktorer, der påvirker transporten, kan have effekter, som kan ses langt nedstrøms. Som led i kystanalysen kan det derfor være nyttigt at følge transporten for at se, hvor den er begrænset af kystbeskyttelse eller hård bund, samt hvor kysten tillader, at den fulde transportkapacitet realiseres. Dette kan være en meget nyttig fremgangsmåde til at forstå forskelle og ligheder mellem de to resultater for langtransporten.

Da de udførte beregninger er overslagsmæssige og behæftet med stor usikkerhed, vil det være utroligt nyttigt at indhente informationer om transportens faktiske størrelse fra andre kilder som for eksempel kysttekniske rapporter. Disse kan muligvis give en mere præcis vurdering at

transporten i enkelte punkter på den undersøgte kyststrækning. Disse transporter kan bruges til at fastsætte størrelsesordenen for transporten og eventuelt for underskuddet (eller overskuddet) af sediment på kysten.

### 5.3.1.2 Kategorisering af erosionspotentialet

Til at beskrive hvor stort presset fra kronisk erosion er på en given kyst, benyttes en kategorisering baseret på den forventede erosionsrate. Kategoriseringen består af fem kategorier som er angivet i Tabel 5.1 sammen med et interval for erosionsraten. Som en hjælp til inddelingen er desuden givet typiske værdier for bølgepåvirkningsindekset samt eksempler på kyststrækninger i Danmark, som falder ind under de forskellige kategorier.

Det er vigtigt at understrege, at selvom en kyst er udsat for kraftig bølgepåvirkning, behøver den ikke være udsat for et stort erosionspres. Der findes flere eksempler på dette langs den jyske vestkyst, eksempelvis i den østlige ende af Vigsø bugt, hvor kysten rykker frem, selvom bølgeklimaet er meget voldsomt.

Kategorisering af erosionspres	Ændring i kystlinje	Sedimentunderskud	Bølgepåvirkningsindeks	Transportkapacitet	Eksempel
Aflejring	> 0	-	-	-	Bunden af Sejerø bugt
Stabil	≈ 0	-	-	-	Kysterne i det sydfynske øhav
Lille	> -0.5m/år	0.1 m <sup>3</sup> /m/år	0.01 m <sup>3.8</sup> /s	10.000 m <sup>3</sup> /år	Sjællands østkyst ud til Øresund.
Moderat	-0.5 til -1.5m/år	1 m <sup>3</sup> /m/år	0.1 m <sup>3.8</sup> /s	100.000 m <sup>3</sup> /år	Sjællands nordkyst
Stort	> -1.5 m/år	10 m <sup>3</sup> /m/år	1 m <sup>3.8</sup> /s	1.000.000 m <sup>3</sup> /år	Jyllands vestkyst

**Table 5.1 Kategorier for kronisk erosion. Bemærk at for sedimentunderskud, bølgepåvirkningsindeks og transportkapacitet repræsenterer den angivne værdi størrelsesordenen.**

Som nævnt er målet for denne analyse at beskrive det potentielle erosionspres på kysten. For kyster, hvor der hverken findes kystbeskyttelse eller udføres sandfodring, svarer det potentielle erosionspres til den reelle erosion, som opleves på kysten. I sådanne tilfælde er den historiske erosionsrate en pålidelig indikator for erosionspresset. Dog er det vigtigt at være opmærksom på, om der findes en havn eller anden stor konstruktion i nærheden, som kan have ændret transportforholdene inden for en delperiode af den analyserede 100 års periode. I så fald må den aktuelle erosionsrate forventes at være større end den, som er beregnet ud fra kystlinjeanalysen.

Langs kyster, hvor der findes kystbeskyttelse, vil der typisk kun være observeret en svag tilbagerykning af kysten, dér hvor den er beskyttet, men til gengæld kraftig tilbagerykning på de strækninger der ikke er beskyttet. Dette skyldes, at kystbeskyttelsen i en vis forstand koncentrerer erosionspresset på de ubeskyttede strækninger idet disse kun får tilført beskedne mængder sand fordi frigivelsen af sand (dvs. langtransporten) langs de beskyttede strækninger er reduceret.

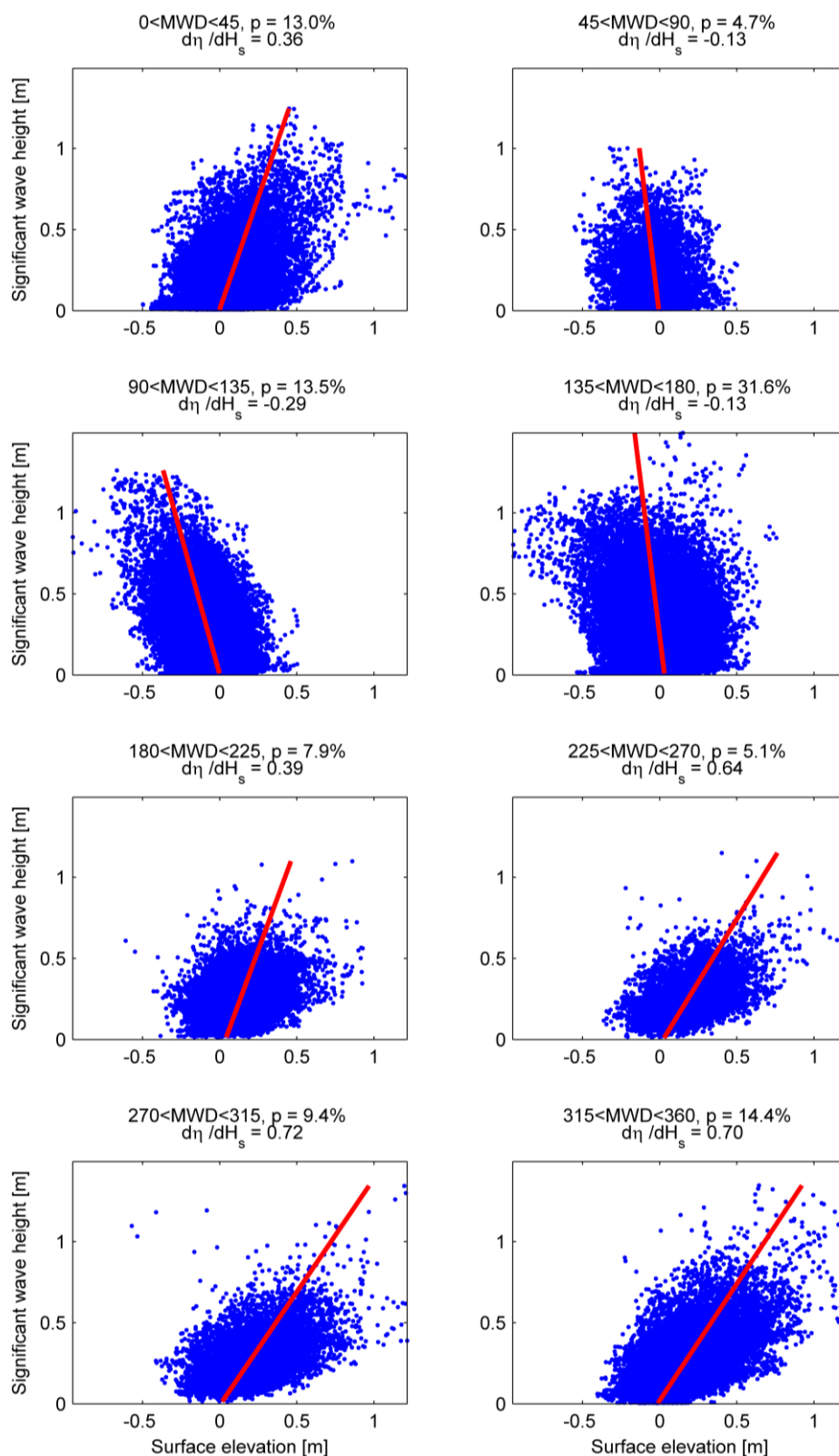
I vurderingen af det potentielle erosionspres er det derfor nødvendigt at fordele erosionspresset, så det også dækker de beskyttede strækninger. I denne forbindelse kan transportindekset være en god indikator for, hvordan erosionspotentialer er fordelt, når der ses bort fra kystbeskyttelsen.

### 5.3.2 Akut erosion

Akut erosion sker som nævnt i situationer, hvor store bølger forekommer samtidig med forhøjet vandstand. Presset fra akut erosion vurderes derfor ved at se dels på bølgeklimate og dels på korrelationen mellem vandstand og bølger for de bølgeretninger som svarer til bølger der bevæger sig mod kysten. Risikoen for akut erosion vurderes til at være høj, når der både er positiv korrelation mellem bølger og vandstand, og bølgeklimate er relativt hårdt. Et hårdt bølgeklimate giver således ikke kraftig akut erosion, hvis der ikke er positiv korrelation, ligesom positiv korrelation ikke giver anledning til nævneværdig akut erosion, hvis bølgeklimate er meget mildt.

Mange kyster udsættes for bølger kommende fra forskellige retninger, og korrelationen mellem bølgehøjde og vandstand varierer ofte med bølgeretningen. For at tage højde for denne variation inddeles bølgetidsserien efter bølgeretningen, som inddeles i 45 graders intervaller.

Hvert vinkeludsnit analyseres for sig ved at plote data i et scatterplot som vist i eksemplet fra Rungsted (**Error! Reference source not found.**). Hvis der blandt de retninger, som svarer til at ølgerne bevæger sig mod kysten, er nogle som viser positiv korrelation mellem bølgehøjde og vandstand, kan der forekomme akut erosion. Hvor stort presset fra akut erosion er, afhænger af hvor store og hvor hyppige bølger fra de pågældende retninger er. Dette kan vurderes ved at se på bølgerosen samt på  $H_{S_{12}}$ .



Figur 5-3 Eksempel på korrelation mellem bølgehøjde og vandstand for et punkt ca. 3 km ud for Rungsted. Over hvert plot er angivet gennemsnitlig bølgeretning (MWD), hyppigheden for at bølgeretningen ligger i det pågældende vinkeludsnit samt hældningen for den røde linje.

Tabel 5.2 viser den foreslåede kategorisering med hensyn til kronisk erosion. Bemærk at der for kronisk erosion ikke er angivet en erosionsrate til hver kategori, da denne afhænger meget af bagstranden og baglandets beskaffenhed samt stormsituationernes varighed. De tre eksempler som er givet på lille, moderat og stor risiko har alle positiv korrelation mellem bølger og vandstand og risikoen for akut erosion er derfor kun begrænset af bølgeklimaet.

I tilfælde, hvor der ikke er korrelation mellem bølger og vandstand men blot stor spredning på vandstanden, bør risikovurderingen sættes én kategori ned i forhold til det som er angivet i Tabel 5.2.

Risiko for akut erosion	$H_{S_{12}}$	Eksempel
Ingen	<1,0 m	Roskilde Fjord
Lille	$1,0 < H_{S_{12}} < 2,0$	Sjællands vestkyst ud til Storebælt, $H_{S_{12}} = 1,5$ m Øresundskysten, $H_{S_{12}} = 1,2$ m
Moderat	$2,0 < H_{S_{12}} < 3,0$	Sjællands nordkyst, $H_{S_{12}} = 2,3$ m
Stort	$H_{S_{12}} > 3,0$ m	Jyllands vestkyst, $H_{S_{12}} = 5,4$ m

Tabel 5.2 Kategorier for akut erosion under forudsætning af positiv korrelation mellem bølgehøjde og vandstand.

I Rungsted, som ligger på Øresundskysten, er presset fra akut erosion sat til "lille" på grund af det relativt milde bølgeklima. Desuden vil akut erosion kun kunne ske, når bølgeretningen er mellem 0 og 45 grader, hvilket kun sker omkring 13 % af tiden.

Ved Sjællands nordkyst er der positiv korrelation mellem bølger og vandstand, når bølgerne kommer fra vestlige til nordlige retninger. Da dette sker mere end 50 % af tiden, og bølgeklimaet desuden er noget mere voldsomt, vurderes presset fra akut erosion til at være moderat.

### 5.3.3 Oversvømmelse

Risiko for oversvømmelse vurderes ved hjælp af værktøjet: "havvandpaaland" (<http://www.klimatilpasning.dk/vaerktoejer/havvandpaaland.aspx>). Her er det muligt at indtaste en vandstand og se hvilke områder, som potentielt kan blive oversvømmet ved den givne vandstand. Det er desuden muligt at klikke på en bestemt lokalitet og få at vide, hvilken vandstand som er nødvendig for, at det pågældende sted skal blive oversvømmet. Ved at klikke på et punkt umiddelbart bagved et dige er det derved muligt at få at vide, hvor højt diget er.

Ref. 1 indeholder vandstandsstatistikker baseret på historiske måledata og giver middeltidsvandstande for 1, 20, 50 og 100 år.

Det vil i de fleste tilfælde være nyttigt at se på statistikken for flere lokaliteter i nærheden af den betragtede kystlinje. Dette giver mulighed for at vurdere hvor store gradienter, der kan være i vandstanden i området. I tilfælde, hvor den betragtede kystlinje ligger mellem to lokaliteter med væsentligt forskellige vandstande, kan det enten være en idé at lave en interpolation mellem de to lokaliteter eller eventuelt vælge den statistik, der giver de højeste vandstande.

Da statistikkerne er baseret på målte data, er der stor forskel på hvor lang en periode, der findes data for. For visse lokaliteter haves data for mere end 100 år, hvorimod der for andre "kun" findes data for mindre end 20 år. Dette kan have en væsentlig nogen for kvaliteten af statistikken. I nogle tilfælde kan det være bedst at bruge data fra en lokalitet med en lang dataperiode, som ligger et stykke fra den betragtede kystlinje i stedet for at benytte en nærmere lokalitet, hvor statistikken kun er baseret på en kortere periode. Et godt eksempel på dette er

Sjællands Nordkyst (se afsnit 6), hvor der findes data fra Hundested for ca. 21 år, medens der for Hornbæk findes data for 116 år. Statistikken for Hornbæk er af denne årsag mere pålidelig og bør benyttes i stedet for den fra Hundested.

Når en repræsentativ statistik er fundet, indtastes vandstande i værktøjet havvand på land for at se, om den pågældende vandstand forårsager oversvømmelser. De forskellige dele af kysten kategoriseres ud fra returperioden for den vandstand, som forårsager oversvømmelse ved den pågældende kyststrækning. Et forslag til inddeling af kategorier for oversvømmelsesrisiko er givet i Tabel 5.3.

Risiko for oversvømmelse	Returperiode for oversvømmelse	Eksempel	Erstatning
Ingen	> 200 år	Højtliggende bagland	Stormflodsvandstand højere end hvad der svarer til returperiode på 20 år kan udløse erstatning fra Stormrådet
Lille	> 50 år		
Moderat	20 – 50 år		
Stort	5 – 20 år		
Meget stor	< 5 år		

Tabel 5.3 Kategorier for oversvømmelsesrisiko.

Det kan bemærkes at Stormrådet kan give erstatning for skader forårsaget af oversvømmelser i forbindelse med "stormflod". Der er forskellige krav der skal opfyldes for at der kan udbetales erstatning, herunder at vandstanden under stormfloden skal være højere end hvad der svarer til en returhændelse 20 år.



## 6 Eksempel: Sjællands nordkyst fra Hundested til Gilleleje

I dette afsnit præsenteres et eksempel på, hvordan den foreslåede metode kan anvendes på en konkret kyststrækning. Som eksempel er valgt Sjællands nordkyst mellem Hundested og Gilleleje. For at give en god illustration af hvordan metoden anvendes, er der gennemført en relativt detaljeret analyse af kysten. Hvis alle Danmarks kyster skal analyseres, vil det i almindelighed nok være nødvendigt at gå lidt grovere til værks.

### 6.1 Overordnet beskrivelse af kysten

Kyststrækningen mellem Hundested og Gilleleje ligger ud til Kattegat med relativt lange frie stræk mod vest og mod nord. Der er derfor en betydelig bølgeaktivitet ved kysten med bølger som hovedsageligt kommer fra vest, men store bølger fra nord kan også forekomme (se bølgeroser i Figur 6-4).

Langs hele kyststrækningen består stranden af sand med varierende indhold af sten, ral og grus; der er dog partier med hård bund på strandplanet. Kyststrækningen er en udligningskyst i sent stadie, og baglandet består af enten moræneler eller marine sedimenter overlejret med flyvesand, se udsnit af Per Smed's landskabskort i Figur 6-1.

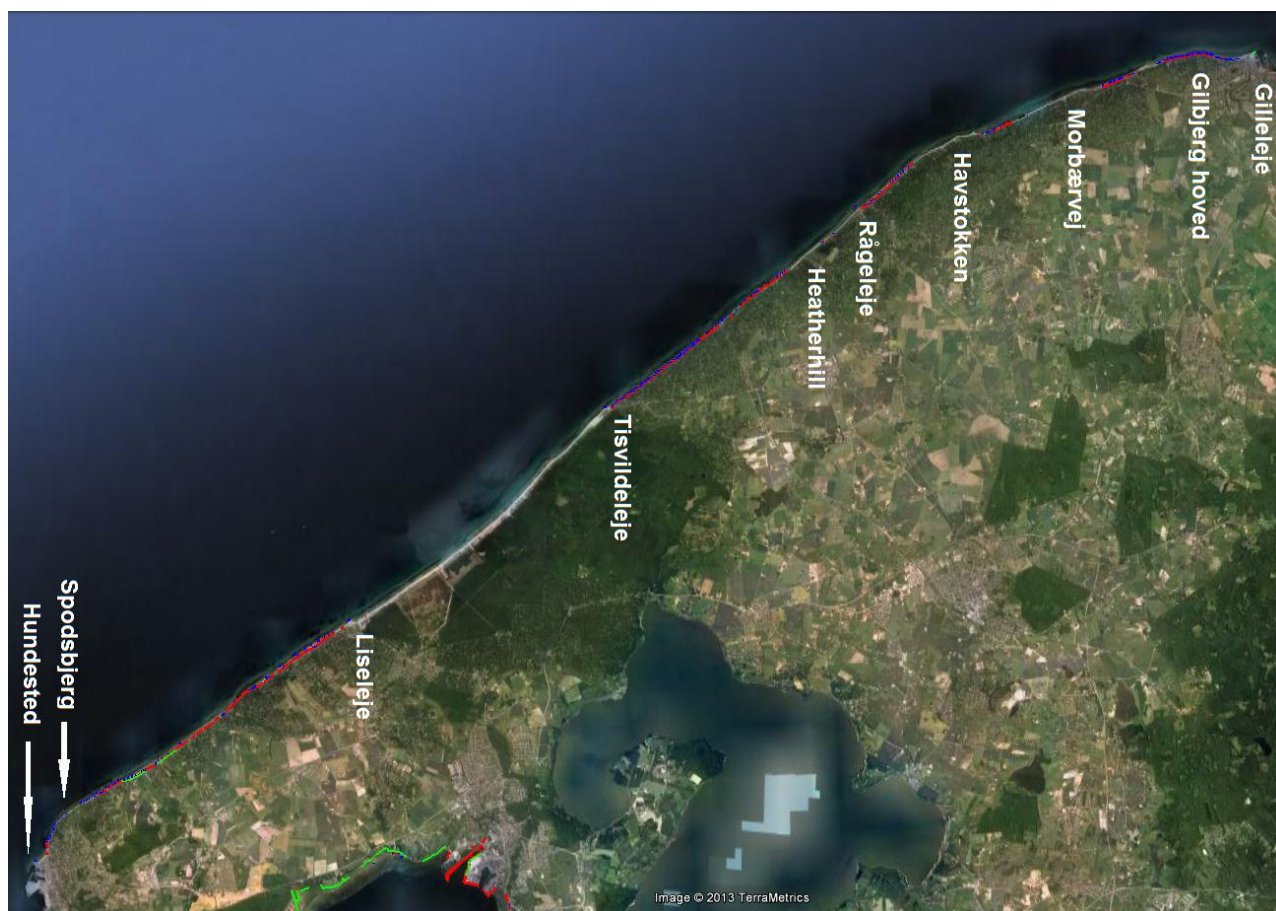


Figur 6-1 Udsnit af Per Smed's landskabskort over Danmark.

På satellit billedet, se Figur 6-2, fremgår det, at der er en til to revler i kystprofilen. På nogle strækninger er kysten således en klintekyst med stenet strand og relativt hårdt bagland, som typisk fremstår som lidt fremskudte strækninger med høje klinter. Dette sammen med antallet af kystbeskyttelseskonstruktioner indikerer, at kysten er udsat for et betydeligt erosionspres.

Langs andre strækninger er der sandstrande, og baglandet består af marine aflejringer overlejret med klitter, dette gælder eksempelvis strækningen mellem Liseleje og Tisvildeleje.

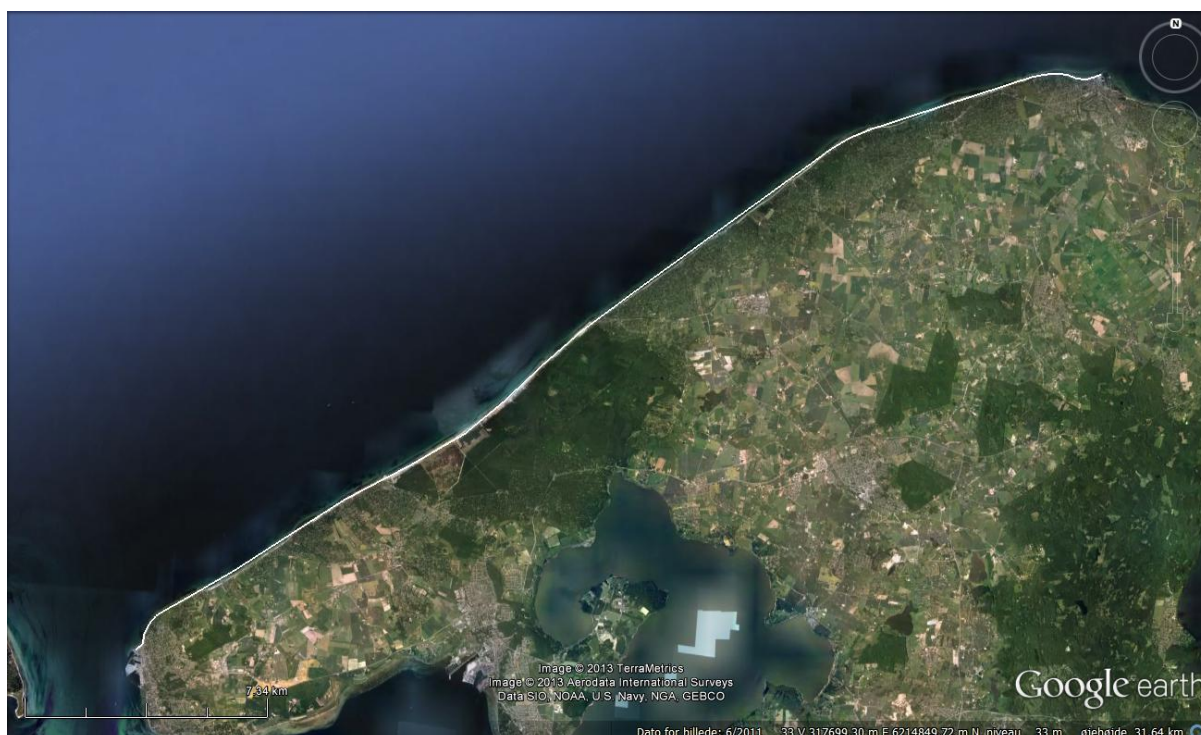




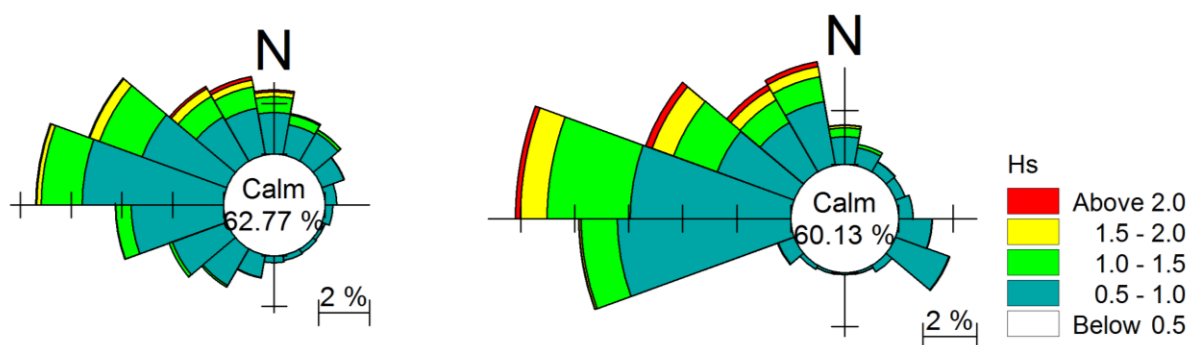
Figur 6-2 Satellit billede fra Google Earth som viser den betragtede kystlinje med overlagte kystkonstruktioner. Blå, røde og grønne markeringer angiver henholdsvis høfder/bølgebrydere, skråningsbeskyttelse og diger.

Den digitaliserede kystlinje er vist i Figur 6-3. Bølgeroser fra de to endepunkter er præsenteret i Figur 6-4.

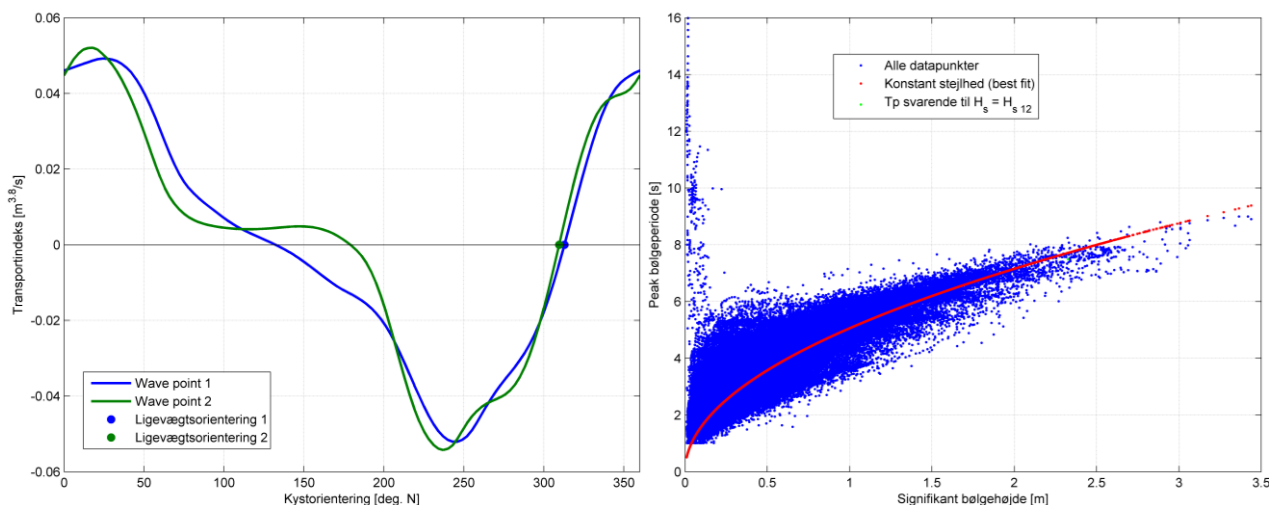
I Figur 6-5 er vist  $q/\alpha$ -kurve for Hundested og Gilleleje samt scatterplot af bølgeperiode som funktion af bølgehøjde. Det ses af bølgerne har en nogenlunde konstant hældning hvilket indikerer at de hovedsageligt er dannet af lokal vind.



Figur 6-3 Skærmbillede som viser optegningen af den digitaliserede kystlinje i Google Earth.



Figur 6-4 Bølgeroser som angiver bølgeførholdene ud for Hundested (venstre) og Gilleleje (højre). Bølgedata er udtrukket i de to punkter som er angivet i Figur 6-3.



Figur 6-5 Venstre:  $q/\alpha$ -kurve for Hundested (bølgepunkt 1) og Gilleleje (bølgepunkt 2). Højre: Scatterplot som viser bølgeperiode som funktion af bølgehøjde.

## 6.2 Kronisk erosion

De beregnede ligevægtsorienteringer for bølgepunkterne ud for Hundested og Gilleleje er henholdsvis 313 grader og 303 grader, hvilket skyldes, at Gilleleje får lidt større bølger fra vest. Der findes derfor et nulpunkt for transportindekset ved Spodsbjerg omtrent 1,5 km nordøst for Hundested, hvor kystens orientering er ca. 313 grader, se Figur 6-3 nederst. Dette stemmer overens med tidligere undersøgelser (Ref. 2).

Resultater fra transportberegningen ud fra bølgeforhold er præsenteret i Figur 6-6. Følgende resultater er vist:

- Orientering af den tilnærmede kystlinje vist sammen med ligevægtsorienteringen
- Beregnet transport (en transport faktor på 1.000.000 er brugt til skalering)
- Potentiel kystændring

Følgende forhold fremgår af Figur 6-6. Fra nulpunktet ned mod Hundested vokser transportindekset stødt. Mod Gilleleje vokser transportindekset hastigt over de første to kilometer men flader derefter ud. Mellem km 25 og km 30 (ved Udsholt Strand) drejer kysten, hvilket giver en stigning i transporten.

Baseret på den observerede erosion i perioden 1893 – 2003 er der opstillet et sedimentbudget for langtransporten, som er regnet ud fra nulpunktet ved Spodsbjerg, se Figur 6-7. Figur 6-6 og Figur 6-7 er placeret over hinanden for at lette sammenligningen mellem transportindekset og langtransporten beregnet på grundlag af kystlinjeændringerne.

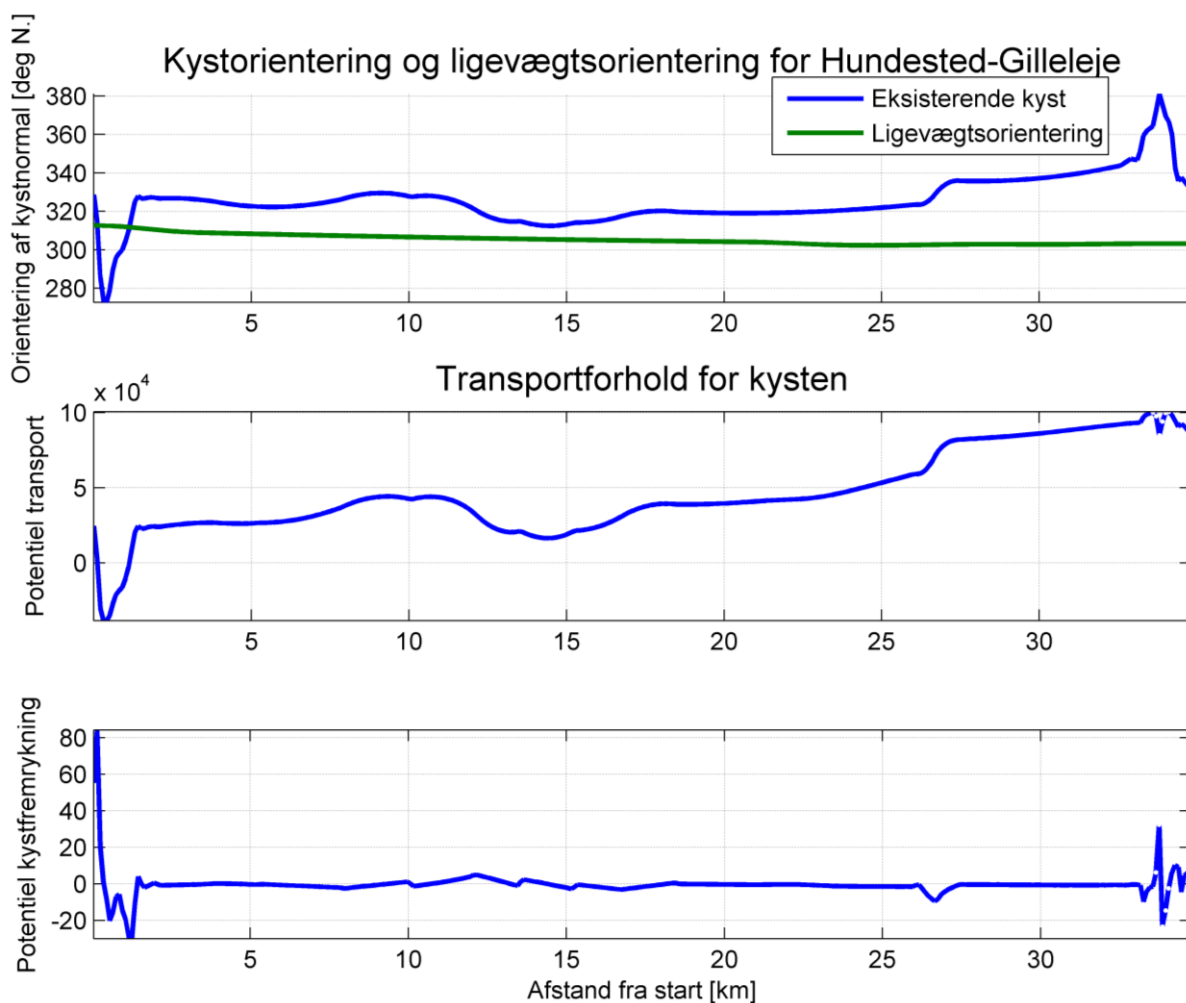
Resultaterne fra de to beregninger af langtransport og erosion er præsenteret med forskellige farveskalaer Figur 6-8.

Overordnet set er det forskellen i transportindekset ved Spodsbjerg og ved Gilleleje, som giver anledning til et erosionspres langs kyststrækningen. I Ref. 2 er transporten umiddelbart vest for Gilleleje vurderet til at være ca. 70.000 m<sup>3</sup>/år (bemærk, at dette er 3 gange så meget, som det der er fundet ud fra den simplificerede kystlinjeanalyse). På den ca. 35 km lange strækning mellem Spodsbjerg og Gilleleje er der derfor et gennemsnitligt underskud på ca. 2 m<sup>3</sup>/m/år, hvilket

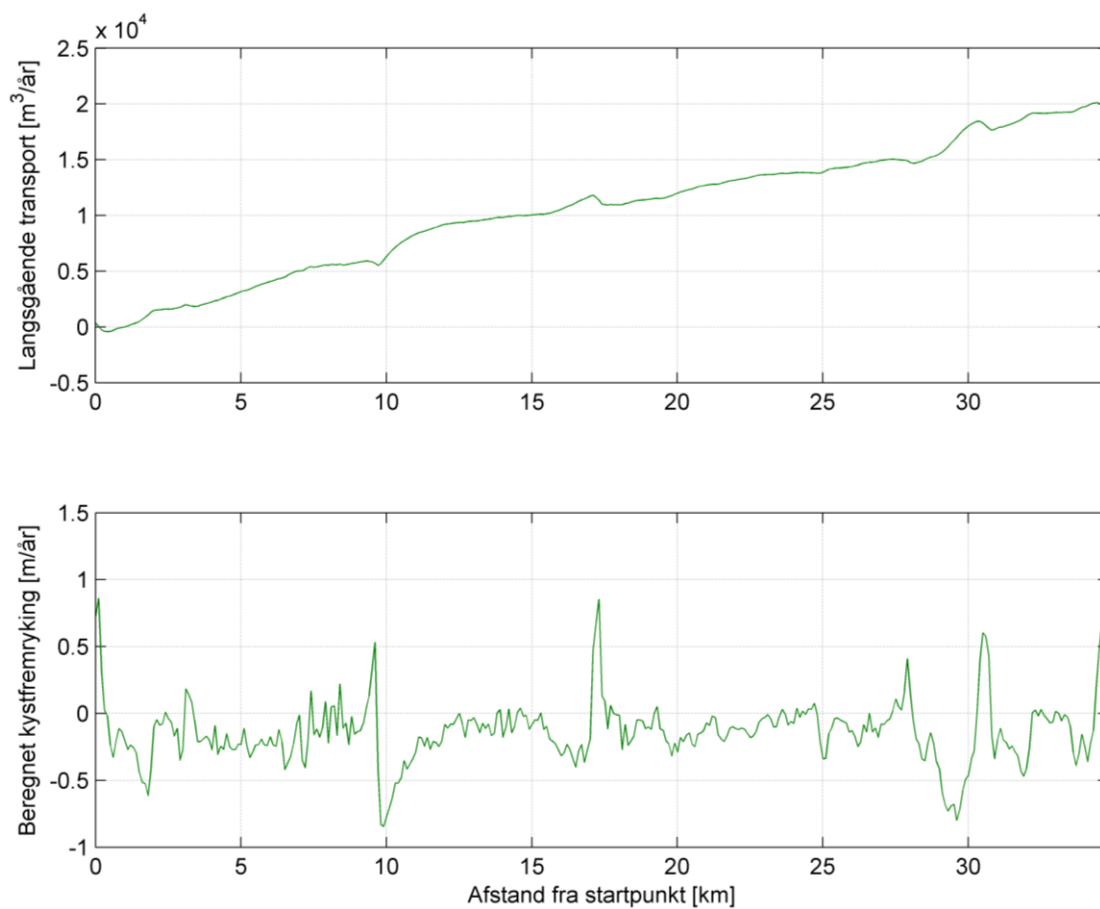
svarer til et moderat erosionspres. Da størstedelen af kysten er beskyttet af konstruktioner, realiseres dette erosionspres på de få ubeskyttede strækninger, også selvom disse ikke fra naturens side er de mest udsatte.

Når man ser på luftfotos af Hundested havn, er det tydeligt, at der vandrer sand ud langs havnens nordmole. Ifølge Ref. 2 oprenses 4.000 - 5.000 m<sup>3</sup> om året fra indsejlingen til havnen, og det antages, at dette sand kommer østfra. Fordelt på den meget korte strækning mellem Hundested og Spodsbjerg svarer det til et underskud på ca. 3 m<sup>3</sup>/m/år. Den store gradient i transportindekset (se Figur 6-6 ) antyder, at hovedparten af erosionspresset er koncentreret omkring Spodsbjerg, og det vurderes derfor, at denne strækning er udsat for et stort erosionspres.

En mere detaljeret beskrivelse af kystens delstrækninger er givet i Tabel 6.1.

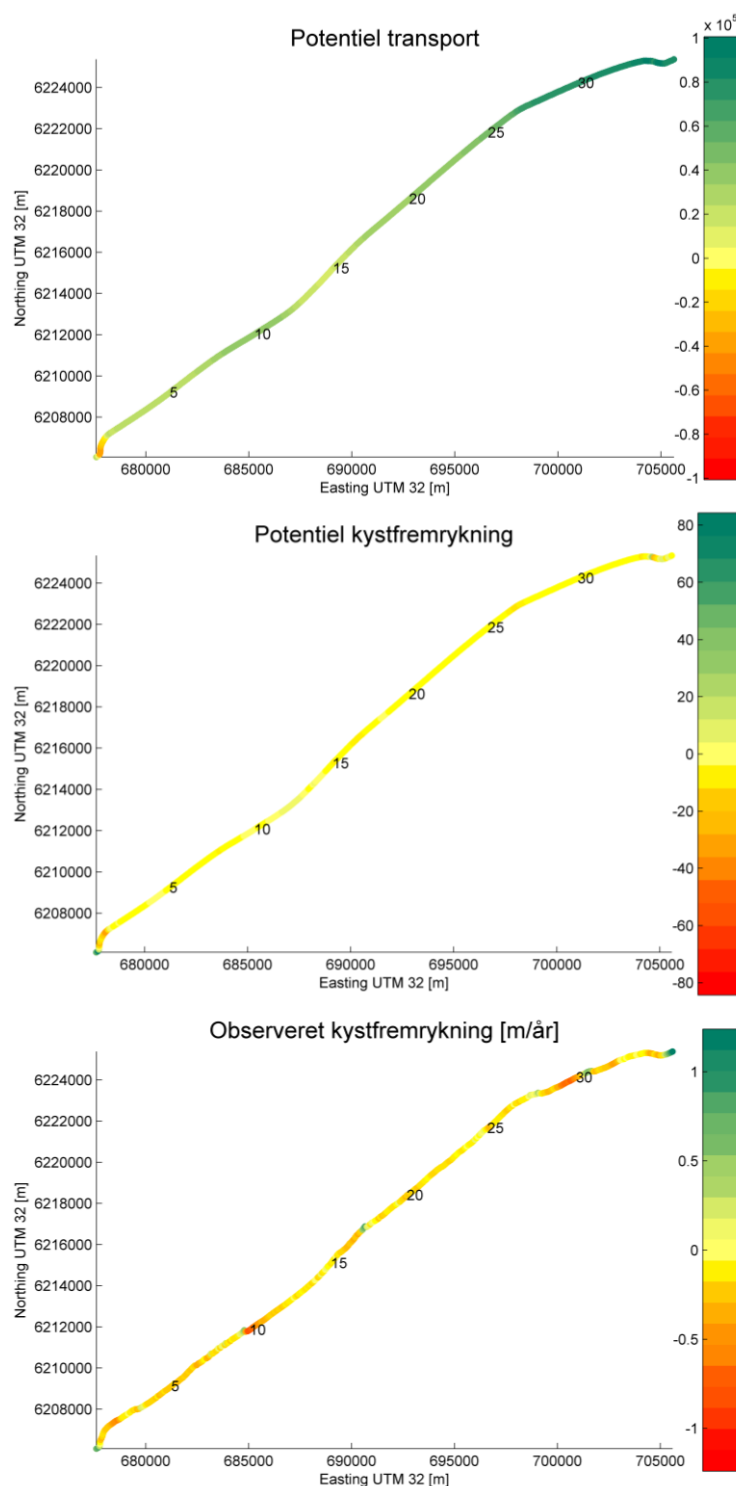


Figur 6-6 Resultater fra transportberegningen ud fra bølgeforhold. Øverst: Orientering af den tilnærmede kystlinje vist sammen med ligevægtsorienteringen. Midt: Transportindeks. Nederst: Erosionspotentiale.



Figur 6-7 Resultater fra sedimentbudget. Øverst: Transport. Nederst: Ændring i kystens position mellem 1893 og 2003.





Figur 6-8 Resultater fra de to beregninger af langtransport og erosion. Øverst: Potentiel transport. Midt: Potentiel kystfremrykning ud fra transportindeks. Nederst: Kystfremrykning fra kystlinjeanalyse.

Navn	Kilometertal	Erosionspres	Beskrivelse
Stranden øst for Hundested	0 – 0,5	Stabil	Igennem tiden er denne strand rykket frem på grund af, at Hundested havn har blokeret delvist for transporten. Nu vandrer

			transporten dog rundt om havnen, og det vurderes, at stranden har nået en stabil form.
Spodsbjerg	0,5 - 2	Stort	Langs denne del buer kysten meget, hvilket gør, at transporten går fra at være rettet mod sydvest til at være mod nordøst. Drejningen af kysten giver en stor gradient i transportindekset, som indikerer et stort erosionspres. Kysten er gennem tiden rykket lidt tilbage og er nu massivt beskyttet af BB, HØ og SB. Erosionen, og langstransporten er dermed kraftigt reduceret.
Spodsbjerg - Liseleje	2 – 10	Moderat	Transportindekset er nogenlunde konstant over dette stykke, men fordi kysten ved Spodsbjerg er så massivt beskyttet, er den reelle transport meget begrænset. Sedimentbudgettet viser en meget svag stigning i transporten op til Liseleje, hvilket skyldes, at kysten her også er massivt beskyttet.
Liseleje - Tisvildeleje	10 – 17	Moderat / Stabil	Transportindekset langs dette stykke er svagt aftagende, men på grund af kystbeskyttelse opstrøms tilføres stykket dog kun meget lidt sediment. Dette giver anledning til kraftig erosion på den første del af stykket, mens resten frem til ca. km 16 er stabil. Erosionsområdet må dog forventes at forplante sig nedstrøms (dvs. østpå) med tiden. Ved km 16 ligger et rev, som beskytter kysten. Nedstrøms fra revet frem til Tisvildeleje ses nogen erosion pga. den reducerede transport forbi revet.
Tisvildeleje - Rågeleje - Udsholt	17 – 27	Moderat / Stort	Over det meste af stykket er transportindekset svagt stigende, men erosionen er bremset, da strækningen er næsten fuldstændigt beskyttet af BB, HØ og SB. Den eneste del af stykket, hvor kysten ikke er beskyttet, er fra Heatherhill til Rågeleje. Lige øst for dér hvor kystbeskyttelsen stopper, viser luftfotos erosion (Vincentstien), men kystlinjeanalysen viser, at det meste af kysten langs Heatherhill er stabil.
Udsholt - Gilbjerg hoved	27 – 34	Stabil ved frespring, moderat erosion ellers	Dette stykke består af to kystfrespring (Havstokken – km 29, Morbærvej – km 32). Disse to frespring er stabile til trods for manglende beskyttelse. Dette skyldes sandsynligvis de meget skråt indfaldne bølger, som kan have tendens til at forme ondulationer i kystlinjen. Umiddelbart nedstrøms for de to frespring eroderer kysten, og der er opført kystbeskyttelse for at bremse denne erosion.
Gilbjerg hoved	35	Stort	Erosionspresset på dette stykke er svært at vurdere, da kystens orientering er i det ustabile område af $q^*/\alpha$ -kurven. Da Gilbjerg hoved er et markant kystfrespring, og da der er massiv kystbeskyttelse, vurderes det, at der er et kraftigt erosionspres.
Gilleleje	36	Stabil	Gilleleje havn har oplevet en kraftig luvside akkumulation i årene efter dennes opførelse. Nu er kysten imidlertid stabil, og af de ca. 70.000 m <sup>3</sup> sand der årligt når havnen, passerer ca. 55.000 m <sup>3</sup> , noget naturligt og noget flyttes manuelt efter oprensning.

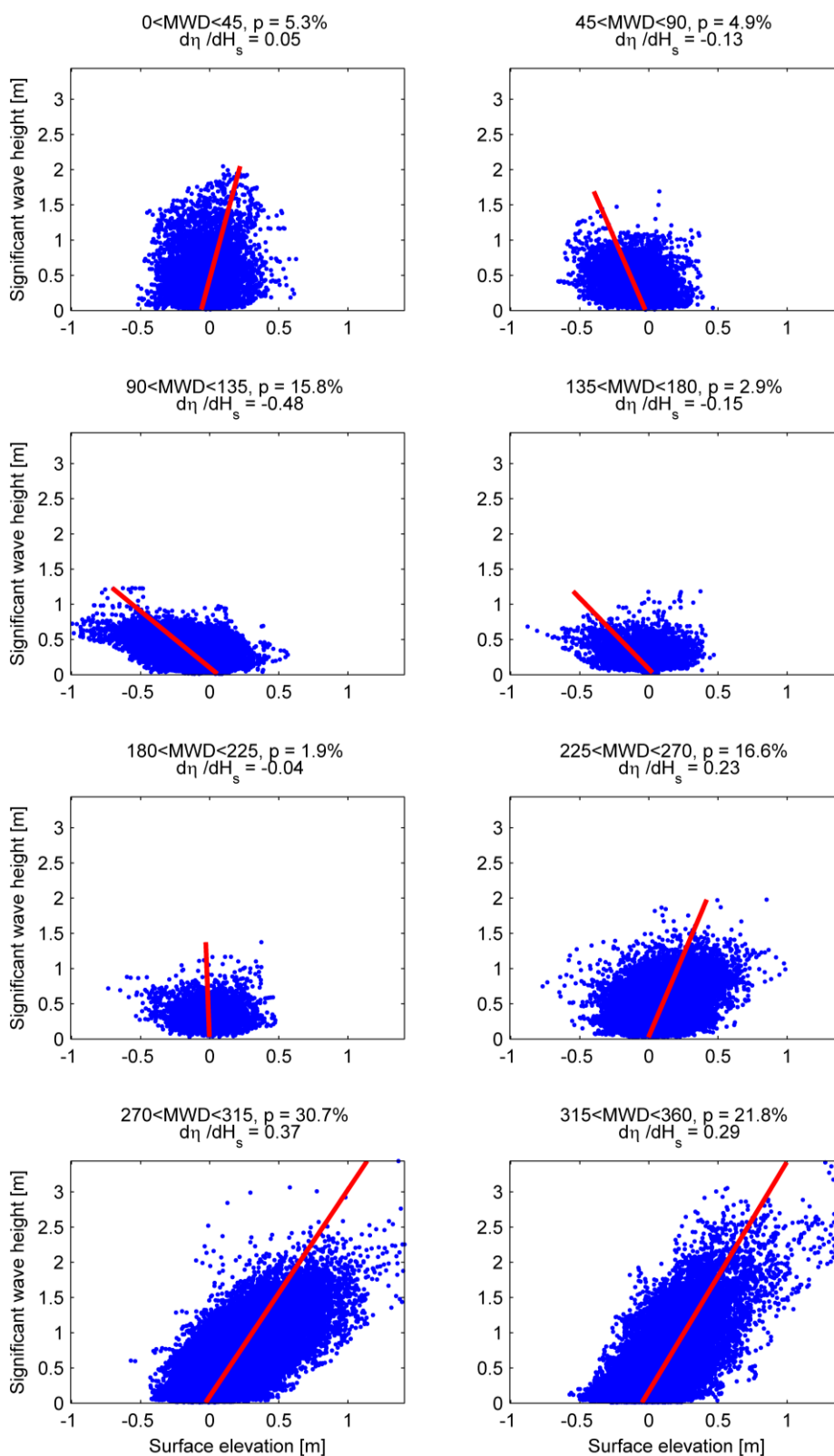
**Tabel 6.1** Beskrivelse af kystens delstrækninger. Forkortelser er brugt til at betegne forskellige typer kystbeskyttelse: Bølgebrydere: BB, Høfder: HØ og Skråningsbeskyttelse: SB.



## 6.3 Akut erosion

Sjællands nordkyst er udsat for bølger fra vestlige og nordlige retninger. Som vist i Figur 6-9 er der for disse bølgeretninger tydelig positiv korrelation mellem bølger og vandstand. Samtidig er disse bølgeretninger relativt hyppige, og bølgeretninger mellem 270 og 360 grader forekommer således i mere end 50 % af tiden.

Dette kombineret med et relativt hårdt bølgeklime, hvor  $H_{s, 12 \text{ timer}} = 2,3 \text{ m}$ , betyder, at kysten er udsat for et moderat erosionspres fra akut erosion. Dette er hovedårsagen til, at der langs store dele af kysten er bygget skråningsbeskyttelse.



Figur 6-9 Korrelation mellem bølgehøjde og vandstand for Gilleleje.

## 6.4 Oversvømmelse

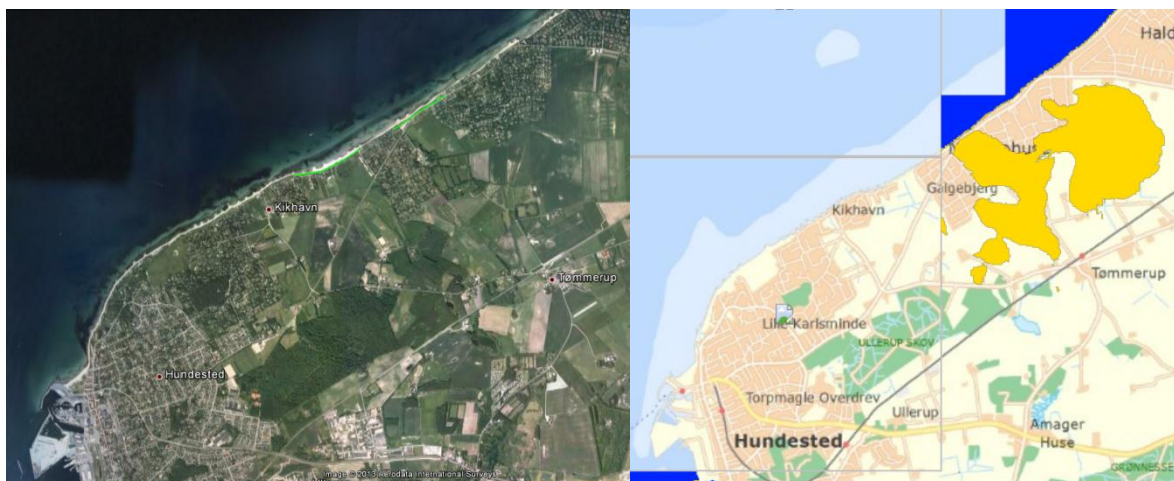
Til at vurdere risikoen for oversvømmelse benyttes højvandsstatistikken fra Hornbæk, hvor statistikken er baseret på 116 års data. Der findes også data fra Hundested, men disse dækker en meget kortere periode på ca. 20 år, og de statistiske parametre er derfor mindre pålidelige. Vandstande for Hornbæk med tilhørende returperioder er givet i Tabel 6.2.

Returperiode	Vandstand over middel
1 år	108 cm
20 år	148 cm
50 år	157 cm
100 år	164 cm

Tabel 6.2 Vandstande og tilhørende returperioder for Hornbæk havn (Ref. 1).

Kystens bagland er generelt højtliggende og består i mange tilfælde af klinter, hvilket betyder, at der langs det meste af kysten ikke er nogen risiko for oversvømmelse. Ved Kikhavn er der et område, som er lavtliggende, og som er beskyttet af to diger som angivet i Figur 6-10. Ifølge klimatilpasning.dk er disse to diger henholdsvis 2,7 og 3 m høje, og selv i en 100 års hændelse vil vandstanden derfor ikke overstige digekronen. Hvis bølgenes indflydelse tages i betragtning, er det muligt at der vil ske overskyl af diget, men med mindre diget brydes, vil dette ikke give anledning til oversvømmelse.

Det vurderes derfor, at der ikke er risiko for oversvømmelse noget sted langs kysten.



Figur 6-10 Kort der viser de lavtliggende områder lige umiddelbart øst for Kikhavn. Venstre: Luftfoto hvor diger er angivet med grønt (kilde: Google Earth og Kystdirektoratets kystplanlægningsværktøj). Højre: Kort hvor områder der ligger lavere end kote 1,7 m er angivet med gult (kilde: klimatilpasning.dk).

## 7 Referencer

- /1/ Højvandsstatistikker 2007, Kystdirektoratet.
- /2/ Nordkysten – Kystpleje og kystsikring. Rapport udarbejdet af DHI for nordkystens kommuner. 1978.
- /3/ Oversigt over luvsidetilsanding og oprensninger omkring havne- og kystkonstruktioner. Rapport udarbejdet af DHI for Kystinspektoret, 1999.
- /4/ Shoreline Management Guidelines. Karsten Mangor, DHI 2004.
- /5/ Mechanics of coastal sediment transport. Jørgen Fredsøe og Rolf Deigaard. World Scientific, 1992.
- /6/ Bølgeklima for 40 lokaliteter i danske farvande med vurdering af klimaeffekter for udvalgte lokaliteter. Rapport udarbejdet af DHI for Kystdirektoratet, August 2012.

## APPENDIX A – Beskrivelse af programmer

## A Eksekvering af programmer

Sammen med denne rapport leveres to programmer "KroniskErosion.exe" og "AkutErosion.exe" som benyttes til at udføre de nødvendige beregninger. Programmerne er lavet ved hjælp af MATLAB og for at kunne køre dem, er det nødvendigt at downloade et runtime bibliotek. Biblioteket er gratis og kan hentes fra mathworks' hjemmeside på:

<http://www.mathworks.se/products/compiler/mcr/index.html>

### A.1 KroniskErosion.exe

Med dette program udføres de to beregninger af den langsgående transport som benyttes i vurderingen af presset fra kronisk erosion.

#### A.1.1 Input

For at kunne køre programmet er det nødvendigt at lave en inputfil som indeholder informationer om den betragtede kystlinje samt henvisning til bølgedata. Når programmet startes, bliver man bedt om at vælge en inputfil, som programmet kan læse fra. Strukturen på inputfilen er vist herunder i form af den inputfil, som blev brugt til Sjællands nordkyst:

```
%-----  
  
% Setupfil til KroniskErosion.exe  
  
% I denne fil angives specifikationerne til alle beregninger til brug for  
vurderingen af akut erosion  
  
%-----  
  
% Sti til datafil med bølgetidsserier  
  
wavefile      = C:\Data\Erosionsatlas-Nordkysten\Til  
KDI\Data\BølgerogVandstand\GilogHunde94-11.txt  
  
% Angiv sti hvor mappen med output skal placeres  
  
outdir = C:\Data\Erosionsatlas-Nordkysten\Til KDI  
  
% ..samt navnet på punktet  
  
pointname = Gilleleje  
  
% Navne på items for datapunkt  
  
% Signifikant bølgehøjde:  
  
ItemNumberHs = 2  
  
% Peak bølgeperiode:  
  
ItemNumberTp = 4  
  
% Middel bølgeretning:  
  
ItemNumberMWD= 6
```

```
% Vandstand  
ItemNumberSurfel= 10
```

I det følgende forklares de forskellige stykker input, som specificeres i filen

#### *Kystfil, bølgefil og erosionsfil*

Dette er filerne, som indeholder henholdsvis den digitaliserede kystlinje (.kml fil fra Google Earth), bølgetidsserier (.txt) og data for den historiske erosion (.xyz fra IGG's kystlinjeanalyse). Kystfilen og erosionsfilen indeholder data for hele Danmark. Dog er der visse steder huller i data for den historiske erosion som vist i Figur A.1. Begge disse filer leveres sammen med denne rapport.

#### *Outdir og coastname*

Her angives stien til den mappe, hvor output fra programmet skal placeres. Der oprettes en mappe med navnet "coastname", hvori output filerne placeres

#### *Position for bølgeklima*

Her angives positionerne af de to punkter i hvilke bølgedata er udtrukket. Koordinaterne angives i UTM 32 og punkterne nummereres således at punkt 1 ligger ved begyndelsen af kyststrækningen og punkt 2 ligger ved slutningen (se konvention for kystens start- og slutpunkter i afsnit 5.1.1)

#### *Numre på items*

For at programmet læser de rigtige items, er det nødvendigt at angive nummeret på den kolonne som indeholder tidsserien for det pågældende item.

#### *Transportfaktor*

Transportfaktoren benyttes til at omregne transportindekset til et tal som svarer til transporten i  $m^3/år$ . Dens værdi kan eventuelt sættes så resultatet af de to transportberegninger bliver af samme størrelsesorden. En værdi på 1000000 blev brugt for Nordsjælland, hvilket gav ca. den transport som er beskrevet i tidligere studier.

#### *Specificering af transporten i ét punkt*

For at kunne opstille et sedimentbudget på basis af erosionsraterne er det nødvendigt at kende transporten i ét punkt. Hvis "transportflag" er sat til 0, sætter programmet transporten i kyststrækningens startpunkt til nul.

Alternativt kan man sætte "transportflag" til 1 for at angive transporten i et punkt. I så fald angives punktets position i UTM 32 koordinater og transporten i punktet. Hvis man indsætter en værdi, som er forskellig fra nul, er det vigtigt at være opmærksom på, at fortegnet er korrekt i forhold til konventionen om kystens orientering.

Det kan være en god idé at køre programmet en gang uden at specificere transporten. Hvis det beregnede transportindeks har et nulpunkt, kan dette benyttes til at beregne sedimentbudgettet. På denne måde opnås bedst mulig overensstemmelse mellem de to beregninger. Det er dog vigtigt så vidt muligt at verificere, at det fundne nulpunkt faktisk eksisterer ved at kigge på luftfotos (for eksempel i Google Earth).





Figur A.1 Optegnelse over de kyststrækninger der er dækket af kystlinjeanalysen.

## A.1.2 Output

Programmet producerer en række billedfiler som illustrerer resultaterne af beregningen. Desuden produceres to tekstfiler med data fra beregningen. Den ene af disse ("WaveClimateCoastname.txt") indeholder en række værdier som er karakteristiske for bølgeførholdene i de to bølgepunkter. Filen "DataCoastname.txt" giver resultaterne af transportberegningen for hver 100 m langs kysten. De listede værdier er (i rækkefølge): afstand fra startpunkt ( $l$ ), x koordinat ( $x$ ), y koordinat ( $y$ ), transport fra kystlinjeanalyse ( $q_{obs}$ ), observeret kystfremrykning ( $dr_{obs}$ ), potentiel transport ( $q_{pot}$ ), potentiel kystfremrykning ( $dr_{pot}$ ) og ligevægtsorientering ( $\alpha_{eq}$ ).

Desuden produceres en log fil, som giver en liste over de indlæste variable samt de producerede filer.

## A.2 AkutErosion.exe

Med dette program udføres de beregninger, som bruges i vurderingen af akut erosion.

### A.1.3 Input

Som det også var tilfældet med "KroniskErosion.exe", specificeres input i en tekstfil, som læses af programmet. Bemærk at denne beregning ikke er eksplicit forbundet med en bestemt kyststrækning og udføres for et enkelt bølgepunkt ad gangen. Strukturen på inputfilen er vist herunder i form af den inputfil, som blev brugt til bølgepunktet ud for Gilleleje:

```

%-----
% Setupfil til KroniskErosion.exe

% I denne fil angives specifikationer til alle beregninger til bestemmelse af
kronisk erosion

%-----

% Angiv sti til kystfil:

coastlinefile = C:\Data\Erosionsatlas-Nordkysten\Til KDI\Data\Kystlinje\Hundested-
Gilleleje.kml

% Sti til datafil med bølgetidsserier

wavefile      = C:\Data\Erosionsatlas-Nordkysten\Til
KDI\Data\BølgerogVandstand\GilogHunde94-11.txt

% Angiv sti til erosionsfil

erosionsfil = C:\Data\Erosionsatlas-Nordkysten\Til
KDI\Data\ErosionsRater\ErosionDanmark.xyz

% Angiv sti hvor mappen med output skal placeres

outdir = C:\Data\Erosionsatlas-Nordkysten\Til KDI

% ..samt navnet på kyststrækningen:

```

```
coastname = Hundested-Gilleleje

% Position for bølgeklime
wavepoint1 = [677235 6206382]
wavepoint2 = [705053 6226010]

% Navne på items for datapunkt 1
% Signifikant bølgehøjde:
ItemNumberHs1 = 1

% Peak bølgeperiode:
ItemNumberTp1 = 3

% Middel bølgeretning:
ItemNumberMWD1= 5

% Navne på items for datapunkt 2
% Signifikant bølgehøjde:
ItemNumberHs2 = 2

% Peak bølgeperiode:
ItemNumberTp2 = 4

% Middel bølgeretning:
ItemNumberMWD2= 6

% Resultatet af transportpotentialet skaleres til at give et resultat i kubikmeter
per år
transportfaktor = 1000000

% Kendes den faktiske transport i et punkt sættes transportflag = 1
transportflag = 1

% ... og position (i UTM 32) samt transportens størrelse (husk korrekt fortegn)
% angives her
x_qpoint = 678000
y_qpoint = 6207025
transport = 0
```

I det følgende forklares de forskellige stykker input som specificeres i filen.

### *Bølgefil*

Her angives stien til filen (.txt) med bølge- og vandstandsdata. Filen skal være en ren tekstfil som indeholder tidsserier for de nødvendige parametre som tab adskilte kolonner.

### *Outdir og pointname*

Her angives stien til den mappe, hvor output fra programmet skal placeres. Der oprettes en mappe med navnet "pointname", hvori output filerne placeres

#### *Numre på items*

For at programmet læser de rigtige items, er det nødvendigt at angive nummeret på den kolonne som indeholder tidsserien for det pågældende item.

### A.1.4 Output

AkutErosion.exe producerer to outputfiler: En Tekstfil ("WaveClimatePointname.txt") som indeholder en række beregnede parametre som beskriver bølgeklimaet i det betragtede punkt samt en billedfil med scatterplots der viser korrelationen mellem bølgehøjde og vandstand.

Desuden produceres en log fil som indeholder navne på de læste items så det er muligt at checke om de rigtige items er blevet læst.

