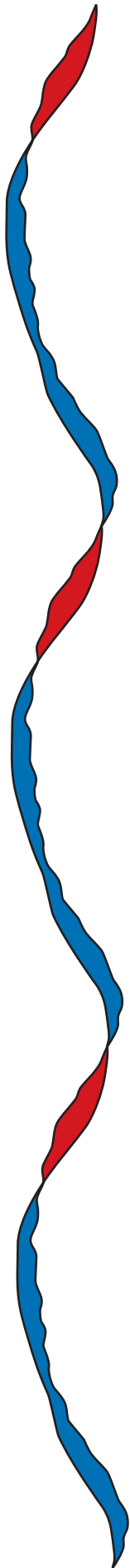


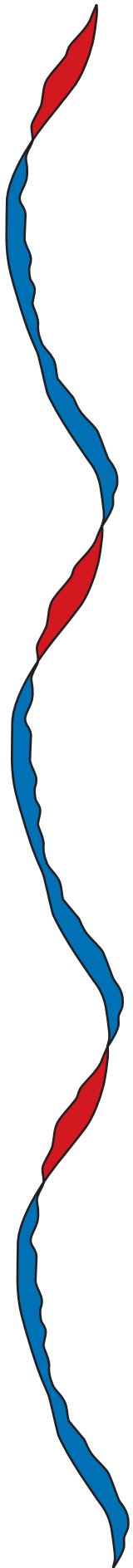
# Fodrings- effektivitet



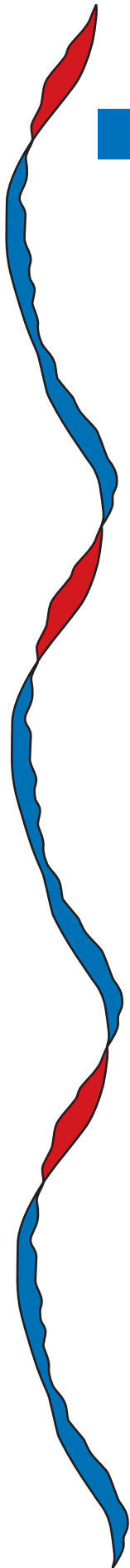
Projekt	Fodringseffektivitet
Startdato:	Juni 2002
Slutdato:	December 2005

Projektgruppe:	
Projektansvarlig (PA):	Per Sørensen
Projektleder (PL):	Søren Bjerre Knudsen
Projektmedarbejdere (PM):	Holger Toxvig Madsen Irene Andersen

Timeregistrering	11520
Kontering	11520
Godkendt af	<i>Per Sørensen</i>
Nøgleord	Fodringseffektivitet, A/E - forholdet, Korrektion af målinger, Unscrambler
Distribution	Internt, Transport- og Energiministeriet, <a href="http://www.kyst.dk">www.kyst.dk</a> , Det Kongelige bibliotek



## Fodringseffektivitet



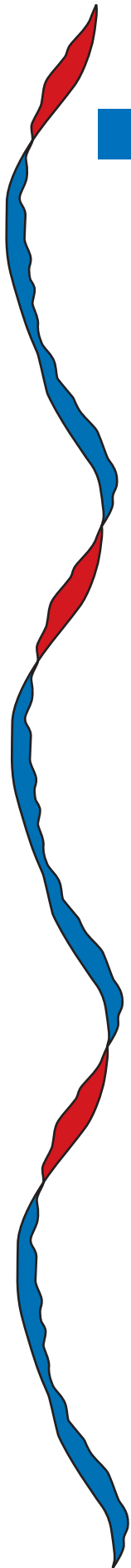
# INDHOLD

## Tegninger

## Referencer

<b>1 Indledning</b>	<b>3</b>
<b>2 Resumé og konklusion</b>	<b>4</b>
<b>3 Kortfattet gennemgang af programmet »Unscrambler«</b>	<b>8</b>
3.1 Indledning	8
3.2 Strukturering af data	8
3.3 Hovedkomponentanalyse PCA	9
3.4 Forklaret varians, scores og loadings	10
3.5 Opstilling af model for Y-variablen	11
<b>4 Tidligere analyser af fodringseffektiviteten</b>	<b>13</b>
4.1 Indledning	13
4.2 Analysen af fodringseffektiviteten i 1998	13
4.3 Analysen af fodringseffektiviteten i 2001	15
4.4 Supplerende analyser på grundlag af det gamle datagrundlag	16
<b>5 Fodringsstrækninger</b>	<b>19</b>
5.1 Indledning	19
5.2 Samlet fodring 1986-2002 på ni strækninger	19
<b>6 Fællesaftalestrækningen</b>	<b>23</b>
6.1 Indledning	23
6.2 De 9 hovedstrækninger	24
6.3 Lodbjerg-Nymindegab	25

<b>7 Husby-strækningen (Naturligt referenceområde) . . . . .</b>	<b>28</b>
7.1 Indledning . . . . .	28
7.2 Analyser før juni 2005 . . . . .	29
7.3 Udvikling af en løsning . . . . .	30
7.4 Korrektion af bathymetrierne på grundlag af A/E-forholdet . . . . .	32
7.5 De anvendte variable i analysen med korrigerede bathymetrier . . . . .	34
7.6 2D scatter plot. . . . .	34
7.7 Unscrambler-analyse. . . . .	36
7.8 Anvendelse af A/E-metoden på enkeltlinier. . . . .	37
7.9 Konklusion. . . . .	38
<b>8 Bovbjerg Klint og Ndr. Holmsland Tange. . . . .</b>	<b>40</b>
8.1 Indledning . . . . .	40
8.2 Korrektion af vestkystmålingerne . . . . .	40
8.3 De anvendte variable . . . . .	42
8.4 Unscrambler-analyse. . . . .	42



## TEGNINGER

Nr. 5.1 – 5.4

Nr. 6.1 – 6.8

Nr. 7.1 – 7.10

Nr. 8.1 – 8.7



## REFERENCER

Camo (1998). The Unscrambler – User Manual.

Danish Coastal Authority (1997). Nourtec – Thorsminde Tange. Synthesis Report 96.

Hassan W.N. and Ribberink J.S. (2005). Transport processes of uniform and mixed sands in oscillatory sheet flow. Coastal Engineering 52 (2005) p. 745-770.

James William R. (1975). Techniques in Evaluating Suitability of Borrow Material for Beach Nourishment. Technical Memorandum no. 60. U.S. Army Corps of Engineers.

Kystinspektoratet (1991). Vestkysten 90.

Kystinspektoratet (1998). Vestkysten 98.

Kystinspektoratet (1999). Sedimentanalyse – Vestkysten 1999.

Kystdirektoratet (2001a). Sedimentomsætning offshore.

Kystdirektoratet (2001b). Naturligt referenceområde.

Kystdirektoratet (2001c). Sedimentbudget Vestkysten.

Kystdirektoratet (2003). Vestkysten '02.

Kystdirektoratet (2005). Variationer i kystprofilen.

Lastrup C. and Madsen H. T. (1998). Evaluation of the Effect of 20 Years of Nourishment. ICCE 1998, pp. 3074 – 3085.

Rijkswaterstaat – RIKZ (1997). NOURTEC – Final Report.

Smith A.W. and Jackson L.A. (1993). Review of Gold Coast Beach Nourishment 1972-1992.

### Indledning

Størstedelen af den kystbeskyttelse, der er blevet udført på den centrale del af Vestkysten de sidste 25 år, har bestået af kystfodring. Der har derfor gennem årene været stor fokus på tilrettelæggelsen af fodringerne, så der opnås størst virkning for pengene. Nogle af de centrale spørgsmål har været, hvor i profilet sandet skal placeres, samt betydningen af fodringsandets kornstørrelse.

Der er gennemført flere analyser af fodringseffektiviteten. En vigtig bestanddel af disse analyser har været fastlæggelsen af, hvordan den fodrede strækning ville have udviklet sig uden fodring. Uden kendskab til denne såkaldte autonome udvikling kan man ikke beregne virkningen af en fodring.

Fastlæggelsen af fodringsstrækningernes autonome udvikling har været det svageste led i de gennemførte effektivitetsanalyser. En strækningens naturlige udvikling i en kort periode på f.eks. to år er nemlig i høj grad styret af naturlige svingninger, som man ikke nødvendigvis rammer ved at overføre udviklingen fra en tidligere periode eller fra en nabostrækning.

De fremkomne sammenhænge i de forskellige effektivitetsanalyser har været baseret på data fra de enkelte fodringer, der har udvist stor spredning, og derfor er de fundne sammenhænge forholdsvis usikre.

Tidligere effektivitetsanalyser har været baseret på en enkelt variabel. I dette projekt er der anvendt multivariatanalyse. I multivariatanalyse kan alle mere eller mindre relevante variable holdes op mod hinanden i jagten på gode fysiske sammenhænge. Da der stort set aldrig i Kystdirektoratets tidligere analyser er fundet en overbevisende sammenhæng mellem påvirkningerne på kysten og erosionen, har en stor del af projektet været helliget løsningen af dette mysterium.

Projektet er gennemført i perioden 2002-05, og det indgår i Kystdirektoratets udviklingsprogram KUP for perioden 2002-06.



## Resumé og konklusion

Rapporten indledes med en introduktion af programmet »Unscrambler«, der anvendes til multivariatanalyse. Programmet er udviklet med henblik på anvendelse inden for den kemiske industri. En af de store fordele ved programmet er, at de anvendte variable ikke behøver at være uafhængige, for at man får korrekte resultater. Programmet er derfor velegnet til at undersøge korrelationer på kryds og tværs mellem variable, uden at man i første omgang behøver at have afklaret afhængighedsforholdene. Mange af de variable knyttet til kystzonen er nemlig afhængige. Det gælder både dem, der vedrører påvirkningerne på kysten og dem, der beskriver kystprofillets ændringer. Professor Kim H. Esbensen, ACABS Research Group, Aalborg Universitet i Esbjerg har fungeret som konsulent i forbindelse med multivariatanalysen.

Herefter resumeres i afsnit 4 resultaterne af Kystdirektoratets tidligere analyser af fodringseffektiviteten. Fodringseffektiviteten angiver, hvor meget erosionen i  $m^3$  nedsættes pr.  $m^3$  tilført fodringssand, og den første analyse blev udført i 1998. Fodringseffektiviteten blev beregnet til ca. 1, og effektiviteten stiger med fodringssandets kornstørrelse. Der er imidlertid stor standardafvigelse på den fundne sammenhæng. En ny analyse blev udført i 2001 med flere fodringer. Fodringseffektiviteten blev beregnet til 1,1, men der kunne nu ikke påvises nogen sammenhæng mellem fodringseffektiviteten og kornstørrelsen.

I afsnit 5 behandles Unscrambler-analysen af de samme intensivt fodrede strækninger, som blev anvendt i de gamle effektivitetsanalyser. Som dengang behandles fodringerne på hver strækning samlet, og denne gang har det drejet sig om alle fodringer i perioden 1986-2002. Det mest bemærkelsesværdige er, at hverken kornstørrelsen for strækningen eller for fodringssandet har afgørende betydning for forudsigelsen af erosionen på en fodret strækning. Resultatet er imidlertid i overensstemmelse med nyere laboratorieforsøg. Derimod har fodringen opstrøms stor betydning for forudsigelsen.

Målet er at komme frem til en egentlig design guideline for kystfodring. Hvis det mål skal nås, skal man være i stand til at forudsige, hvordan kysten vil se ud f.eks. et år efter fodringen. Derfor er samtlige

fodringer mellem 1999 og 2002 behandlet i en Unscrambler-analyse. Der er ikke fundet en god sammenhæng mellem fodring og strækningens udvikling, idet den aktuelle fodring på strækningen næsten er uden betydning. Det kan selvfølgelig ikke være rigtigt. Forklaringen er, at standardafvigelsen er meget større på en etårs periode end på en 16 års periode.

Fra projektstart var planen at organisere data sådan, at de enten var knyttet til den enkelte vestkystlinje eller var placeret i forhold til en tidsakse. Hvis data var organiseret sådan, ville der være perfekte muligheder for at kombinere variable på kryds og tværs for vilkårlige strækninger og tidsperioder. Det måtte dog opgives på grund af, at antallet af variable hele tiden blev forøget i forsøget på at finde gode fysiske sammenhænge.

Derfor er der arbejdet med relativt få strækninger og tidsperioder. I afsnit 6 behandles de såkaldte hovedstrækninger samt hele fællesafalestrækningen. Selvom der blev gennemført et stort antal Unscrambler-analyser, lykkedes det ikke at finde gode sammenhænge mellem påvirkninger og erosion hverken for hovedstrækningerne eller for fællesafalestrækningen som helhed.

I afsnit 7 er Husby-strækningen behandlet. Det er den strækning, der også betegnes Naturligt referenceområde, idet der aldrig er udført nogen form for kystbeskyttelse på strækningen. For den ca. 3 km lange strækning foreligger der 19 bathymetrier fra perioden 1999-2005. Med dette datamateriale burde der være særdeles gode muligheder for at finde en sammenhæng mellem de fysiske påvirkninger på strækningen og nettoerosionen. Alligevel måtte konklusionen efter utallige Unscrambler-kørsler blive, at det ikke var lykkedes at finde en signifikant sammenhæng. Denne konklusion er naturligvis blevet diskuteret med projektets konsulent professor Kim H. Esbensen.

Ud fra den opfattelse at der må være en sammenhæng, blev forskellige forklaringer og muligheder overvejet. Det er sådan, at det under Nourtec-projektet i 1993-96 blev konstateret, at bølgeenergien var langt bedre korreleret med E+A end med E-A, hvor E og A er henholdsvis erosion og aflejring inden for området. E-A er nettoerosionen, medens E+A's sammenhæng med nettoerosionen er mindre direkte. En afgørende forskel på de to størrelser er imidlertid, at E-A er meget følsom over for ensidige målefejl, medens E+A ikke er påvirket. Det kunne altså tyde på, at ensidige målefejl kunne være en del af forklaringen på den manglende sammenhæng.

Under analyse af sandbølger opstod den idé, at  $A/E$  er en karakteristisk størrelse for et område, og at forholdet afspejler både sammensætningen af den uforstyrrede bund og tværtransportens størrelse. Hvis man i første omgang ser bort fra mængdetabet fra området, vil  $A/E = 0$ , hvis der er lerbund, og  $A/E = 1$ , hvis den uforstyrrede bund består af sand eller grus, jfr. fig. 2.1. Hvis der indgår både sand og ler i den uforstyrrede bund, vil  $A/E$  have en værdi mellem 0 og 1, som kan beregnes ud fra kendskab til sandbølgerne i området. Når mængdetabet indgår i profilet indregnes, vil  $A/E$  få en mindre værdi, men forholdet vil stadig være en konstant for det pågældende område.  $A/E$  er altså baseret på en simpel fysisk sammenhæng og er endvidere uafhængig af påvirkningerne på strækningen.

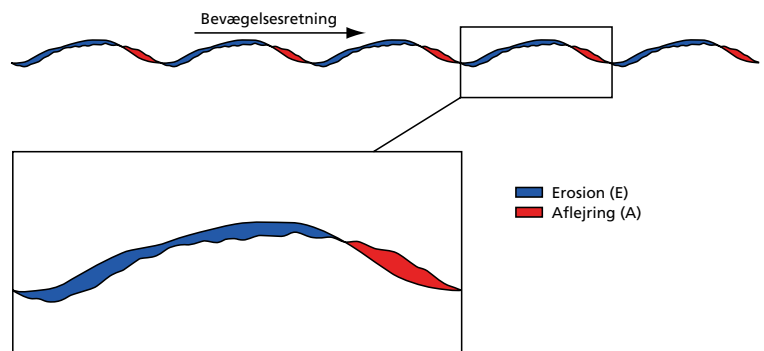


Fig. 2.1 Definition af A/E-forholdet

A/E-forholdet kan anvendes til at fastlægge forholdet mellem sand og ler i den uforstyrrede bund på grundlag af f.eks. to bathymetriske opmålinger, forudsat at disse er uden ensidige målefejl. En endnu mere interessant anvendelse er til fastlæggelse af størrelsen af den ensidige fejl på den enkelte opmåling i et område. Fejlen på opmålingen beregnes som den forskydning, der skal til, for at A/E i forhold til forudgående opmåling er identisk med området A/E.

Denne metode er anvendt på de 19 bathymetrier fra Husby-strækningen. Der er foretaget korrektioner på de målte dybder fra +3 cm til -5,4 cm med et gennemsnit på 1,8 cm. Herefter er Unscrambler-analysen gentaget på grundlag af erosionsmængder beregnet ud fra de korrigerede bathymetrier. De nye analyser giver meget bedre korrelationer mellem påvirkningerne og nettoerosionen, og der er opstillet flere modeller for sammenhængen. Således giver en simpel model for nettoerosionen ud fra  $H^2$  en korrelationskoefficient på 0,94, medens en model på grundlag af tre variable har en korrelationskoefficient på 0,99.

Da ideen om A/E-forholdets betydning og anvendelsesmuligheder først opstod i juni 2005, har det med projektets tidsrammer kun været muligt at bruge metoden på yderligere to strækninger. Det blev hovedstrækningerne Bovbjerg Klint og Ndr. Holmsland Tange, hvor der ikke er fodret. Igen var der tale om en kraftig forbedring af de opstillede modeller i forhold til modellerne opstillet på grundlag af de oprindelige vestkystprofiler.

Det er altså lykkedes at finde signifikante sammenhænge mellem påvirkningerne og erosionen på de tre undersøgte strækninger, når profilopmålingerne er korrigeret ved anvendelse af metoden baseret på A/E-forholdet. Det er en stærk understregning af, at de korrigerede profiler giver en bedre beskrivelse af den virkelige udvikling end de oprindelige profiler.

## Sammenfatning

Projektets vigtigste resultater er:

- Det har ikke kunnet eftervises, at fodringssandets kornstørrelse har afgørende betydning for fodringseffektiviteten. Resultatet er imidlertid i overensstemmelse med nyere laboratorieforsøg. Da usikkerheden på de anvendte kornstørrelsesdata er forholdsvis stor, er det dog for tidligt at konkludere endeligt, at fodringssandets kornstørrelse ikke betyder noget for fodringseffektiviteten.

- Det er eftervist, at fodringsomfanget opstrøms har stor betydning for en strækningens udvikling.
- Der er fundet gode sammenhænge mellem fodringsomfanget og kystudviklingen, når der ses på en lang periode – her 16 år. En tilsvarende god sammenhæng er der ikke, hvis man ser på etårsperioder.
- For en strækning uden fodring var det ikke muligt at opstille en signifikant sammenhæng mellem påvirkningerne på strækningen (bølger, vandstand og strøm) og nettoerosionen. Nettoerosionen er forskellen på erosionen  $E$  og aflejringen  $A$  inden for området, dvs.  $E-A$ .
- Derimod var der en langt bedre sammenhæng mellem påvirkningerne og  $E+A$ , der kun har en indirekte sammenhæng med nettoerosionen. Da  $E-A$  er meget følsom over for ensidige fejl, medens  $E+A$  ikke er påvirket, er der opstillet den hypotese, at ensidige målefejl kan være en del af forklaringen på den manglende sammenhæng.
- Der er endvidere opstillet den hypotese, at  $A/E$  er en karakteristisk konstant for strækningen. Med baggrund heri kan fejlen på den enkelte måling beregnes. Når bathymetrierne herefter korrigeres for den beregnede ensidige målefejl, er det muligt at opstille en meget fin sammenhæng mellem påvirkningerne og nettoerosionen.
- Korrektion af opmålingerne på grundlag af et konstant  $A/E$ -forhold har givet så fine sammenhænge mellem påvirkningerne på kysten og kystudviklingen, at det anbefales, at der arbejdes videre med hypotesen.
- Det anbefales, at metoden forsøges anvendt på strækninger, hvor der er sandfodret for at kunne vurdere fodringseffektiviteten ud fra hypotesen om  $A/E$ -forholdet.

# Kortfattet gennemgang af programmet »Unscrambler«

## 3.1 Indledning

På trods af en stor indsats og flere forsøg er det aldrig lykkedes Kystdirektoratet at finde en statistisk stærkt funderet og dermed overbevisende sammenhæng mellem fodringssandets kornstørrelse og fodringens effektivitet. Det er endvidere stort set heller aldrig lykkedes at finde overbevisende sammenhænge mellem påvirkningerne på kysten og erosionen, når det har drejet sig om relativt korte tidsrum.

Der er altså tilsyneladende ikke en simpel sammenhæng mellem påvirkningerne på kysten og den tilhørende kystudvikling. Ud fra den opfattelse, at der i hvert fald må være en sammenhæng, er det i dette projekt valgt at anvende multivariatanalyse for at finde den.

Analyserne er gennemført med programmet Unscrambler, der er udviklet med henblik på anvendelse inden for den kemiske industri. En af de helt afgørende fordele ved programmet er, at de anvendte variable ikke behøver at være uafhængige. Hvis der er afhængighed, oplyser programmet det. Det giver mulighed for større kreativitet og langt hurtigere analyser.

Som konsulent vedrørende korrelationsanalyserne er benyttet professor Kim H. Esbensen, ACABS Research Group, Aalborg Universitet i Esbjerg.

I det følgende gives en kortfattet introduktion til programmet. En detaljeret gennemgang kan læses i (Camo, 1998).

## 3.2 Strukturering af data

Det datasæt, der anvendes som eksempel, stammer fra (Camo, 1998). Eksemplet vedrører hindbærmarmelade. De anvendte hindbær er

dyrket fire forskellige steder C1 – C4 og plukkes på tre forskellige tidspunkter H1 – H3. Det giver 12 slags hindbær som udgangspunkt for marmeladefremstilling. De 12 slags hindbær betegnes objekter eller samples.

Den marmelade, der kommer ud af produktionen kan analyseres efter en række kriterier, f.eks. farve, sødme, bitterhed, viskositet. I eksemplet er der anvendt 12 kriterier, der er analysens X-variable, og hvert af objekterne har en talværdi for hver variabel.

Da meningen med marmeladefremstillingen er at komme frem til et produkt, som kunderne efterspørger, er de forskellige slags marmelade bedømt af et panel, der har tildelt hver slags marmelade en karakter. Ønsket er så at udvikle en model, der forklarer, hvad der betyder noget for kundernes bedømmelse. Dette er analysens Y-variabel.

I en tilsvarende analyse med kystrelaterede data kunne Y-variablen være profiltilbagekningen i løbet af det næste år. Objekterne kunne være et stort antal delstrækninger, hvoraf nogle er fodret og andre ikke. Man kan sagtens arbejde med flere forskellige år samtidig, idet objekterne så blot tilknyttes et årstal. Som variable kunne anvendes fodringsmængde, kornstørrelse, bølgeenergi i løbet af året, strøm, antal højvandsstande m.fl.

### 3.3 Hovedkomponentanalyse PCA

Datasættet hørende til marmeladeeksemplet svarer til 12 punkter i det 12-dimensionale rum udspændt af akserne hørende til de 12 variable. Opgaven er så at få struktur på denne punktmængde. Det sker ved hjælp af en hovedkomponentanalyse PCA (Principal Component Analysis).

Inden den gennemføres, anbefales det at gennemføre en hurtig statistisk analyse af de enkelte variables fordeling og af sammenhængen mellem variablene to og to. Det er analyser, man også ville kunne udføre uden avancerede hjælpemidler. Disse analyser giver en indledende forståelse af de mest oplagte sammenhænge. Endvidere kan huller i datamængden opdages. Det er nemlig bedst, hvis de forskellige variable er nogenlunde normalfordelte.

I hovedkomponentanalysen fastlægges de akser, der bedst beskriver den sky, som punktmængden udgør i det 12-dimensionale rum. Hvis man forestiller sig skyen i det tredimensionale rum, vil første hovedkomponent være den akse, der bedst beskriver skyens største udstrækning. Man kan også sige, at første hovedkomponent beskriver den største del af punktmængdens varians. Herefter kan anden hovedkomponent fastlægges som den retning vinkelret på den første, hvor der er næstmest varians. På den måde kan man fortsætte, indtil man har 12 hovedkomponenter svarende til de 12 variable. De 12 hovedkomponenter udgør et nyt koordinatsystem med 12 akser.

For at kunne se de sammenhænge, der er skjult i punktmængden, er det imidlertid nødvendigt at få oplysningerne vist i planen. Derfor anvendes forskellige former for projektion på planer bestemt af to hovedkomponenter.

### 3.4 Forklaret varians, scores og loadings

Første hovedkomponent forklarer som nævnt den største del af variansen. Hvor meget det konkret er, beregnes som forskellen mellem den totale varians beregnet i forhold til det nye koordinatsystems origo og variansen i forhold til akse hørende til første hovedkomponent. Restvariansen fordeles efter samme beregningsprincip på de øvrige hovedkomponenter. Resultatet af disse beregninger vises almindeligvis som søjler.

Variansen beskriver punktmængden som helhed. Herefter ses der på de enkelte objekter og variable. Som omtalt svarer hvert punkt i det 12-dimensionale rum til et objekt, der i eksemplet er en marmeladetype. Hvis man f.eks. tager den plan, der bestemmes af hovedkomponent 1 og 2, og projicerer punkterne ned på den, får man beliggenheden i forhold til de to hovedkomponenter. Punktets koordinater på de to akser angiver objektets score. På fig. 3.1 er vist et eksempel på et score plot. Hvis punkter ligger tæt ved hinanden, ligner de tilhørende objekter hinanden. Man ser også, at punkterne ikke ligger tilfældigt. Hvis man går fra venstre til højre på figuren, begynder man med objekter, der er høstet på tidspunkt H1, passerer objekter høstet på tidspunkt H2, og slutter ved objekter høstet på tidspunkt H3. Går man igennem punktmængden ovenfra og nedad varierer dyrkningsstedet i rækkefølgen C4-C3-C2-C1.

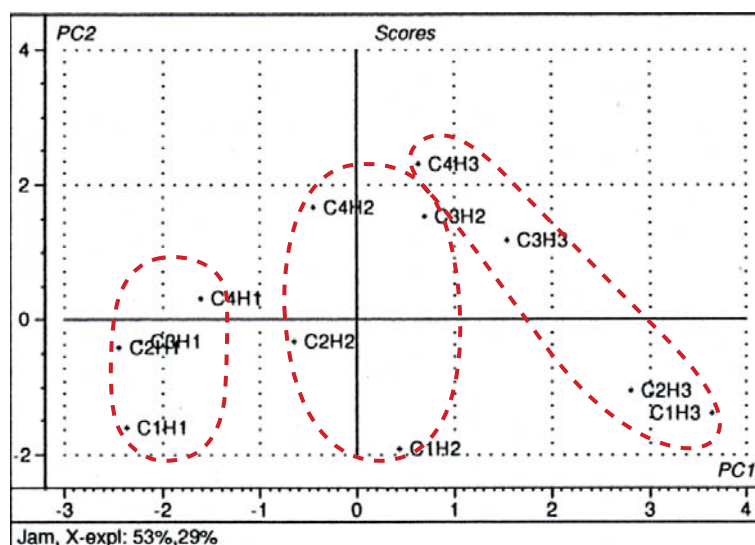


Fig. 3.1 Eksempel på score plot

På et såkaldt loading plot er det variabelen, der er i fokus. Projektionen af punkterne sker som ved fastlæggelsen af score plottet. Hvert af de projicerede punkter svarer til et objekt, der har en værdi for hver af de 12 variable. Ser man f.eks. på variabelen surhed kan man ved vektoraddition finde den vektor, der i det pågældende koordinatsystem repræsenterer den gennemsnitlige surhed. Når man har gjort det tilsvarende for alle variable, kan resultatet præsenteres som et loading plot, se fig. 3.2. Her er det de variable, der ligger langt fra origo, der er interessante, idet de er velegnede til at beskrive Y-variablen.

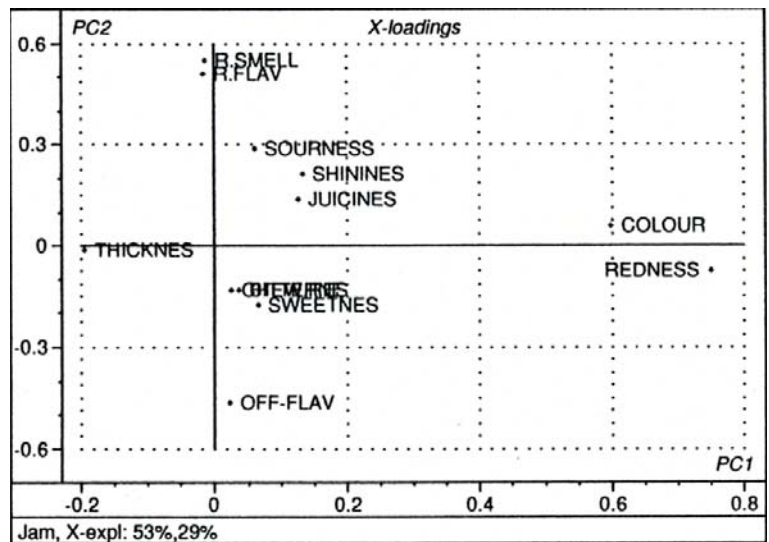


Fig. 3.2 Eksempel på loading plot

Ved at tolke de to plots enkeltvis og sammen kan man begynde at se nogle sammenhænge. Som nævnt er punkterne på score plottet grupperet efter dyrkningssted C og plukningstidspunkt H. På loading plottet har de to variable REDNESS og COLOUR en ekstrem beliggenhed helt til højre. De ligger tæt ved hinanden og er derfor positivt korrelerede, og objekter til højre på score plottet vil have høje værdier for disse to variable.

Hvis man ser på beliggenheden langs den vertikale akse på loading plottet, kan man se, at R.SMELL og R.FLAV er positivt korrelerede, og begge er negativt korrelerede med OFF-FLAV. Objekter, der på score plottet er placeret i retning af disse variable, har de tilsvarende egenskaber.

### 3.5 Opstilling af model for Y-variablen

Y-variablen i eksemplet er jo smagspanelets bedømmelse af de forskellige marmeladetyper. Hver marmeladetype eller objekt har fået en gennemsnitskarakter. For at kunne vurdere, hvilke variable der er vigtige for panelets bedømmelse, skal denne Y-variabel sættes i forhold til de forskellige variables loadings.

Udgangspunktet er loading plottet på fig 3.2. De enkelte punkter er jo fremkommet på grundlag af addition af vektorerne rettet mod de enkelte objekter og med længder svarende til objektets værdi for den pågældende variabel. En tilsvarende vektoraddition foretages derefter, idet længden af vektorerne nu svarer til panelets karakterer til de forskellige objekter. Efter normering har man så et plot for loading weights, hvor Y-variablen er betegnet PREFEREN, se fig. 3.3.

Man ser, at PREFEREN ligger til højre på figuren lidt oven for den første hovedkomponent PC1. Derfor er den primært relateret til de X-variable, der enten ligger langt til højre eller langt til venstre. Det drejer sig om REDNESS, COLOUR og THICKNESS. For sidstnævnte er korrelationen imidlertid negativ.



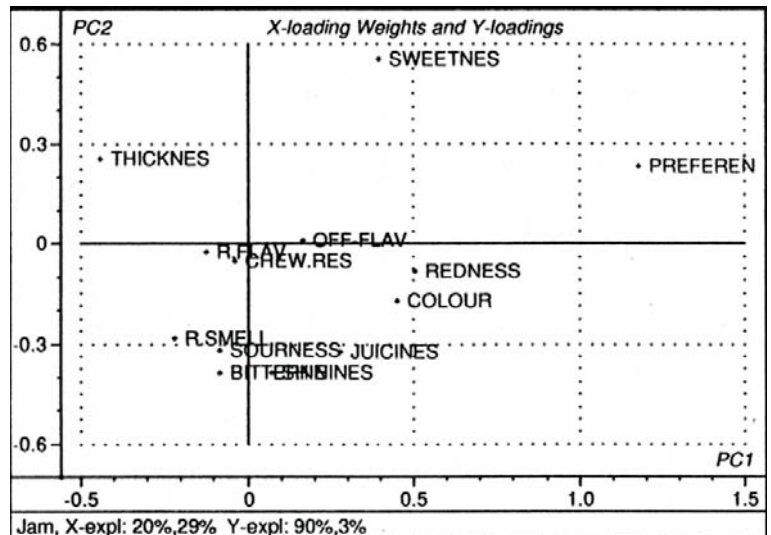


Fig. 3.3 Plot af loading weights inkl. Y-variablen

I forhold til anden hovedkomponent PC2 er det SWEETNESS, SOURNESS, SHININES og BITTERNES, der kan være af interesse. Disse variable har imidlertid ikke ret stor relation til PREFEREN, idet den kun har en lille loading på PC2-aksen.

Nu er det så, at der kan opstilles en model for Y-variablen PREFEREN. Der skal imidlertid først tages stilling til, hvor mange hovedkomponenter modellen skal være baseret på. Der skal kun tages en ekstra hovedkomponent med, hvis der derved forklares en større del af variansen, dvs. at restvariansen derved bliver mindre. Der skal også tages hensyn til, at modellen bliver mere kompliceret, når der medtages flere hovedkomponenter.

I eksemplet er en model med to hovedkomponentakser PC1 og PC2 optimal, og derfor kan modellen konstrueres på grundlag af fig. 3.3. Det sker ved at addere vektorerne ud til de mest betydende variable, idet vektorerne multipliceres med en passende faktor.

Kvaliteten af den fremkomne model testes ved at lade modellen forudsige de forskellige marmeladetyper karakter og derefter sammenholde de forudsagte karakterer med de faktiske. Denne sammenligning er vist på fig. 3.4. Jo højere korrelationskoefficienten er, jo bedre er modellen.

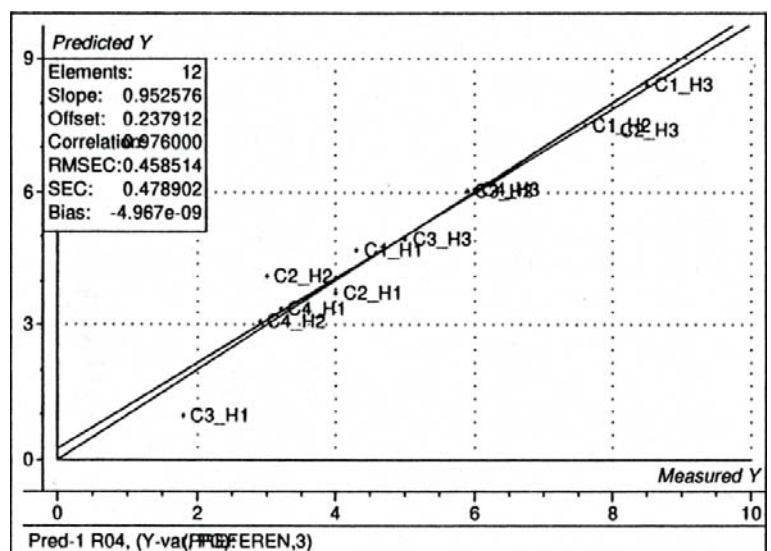


Fig. 3.4 Test af modellen

## Tidligere analyser af fodringseffektiviteten

### 4.1 Indledning

Kystdirektoratet har i flere omgange analyseret fodringseffektivitetens afhængighed af fodringssandets kornstørrelse. Ved fodringseffektiviteten forstås, hvor meget erosionen formindskes i m<sup>3</sup> ved udlægning af 1 m<sup>3</sup> fodringssand.

I det følgende revurderes og kommenteres de tidligere analyseresultater med baggrund i den nuværende viden samt ved anvendelse af multivariatanalyseprogrammet Unscrambler.

### 4.2 Analysen af fodringseffektiviteten i 1998

Den første egentlige analyse af fodringseffektiviteten blev udført i forbindelse med udarbejdelsen af rapporten »Vestkysten 98« (Kystdirektoratet, 1998). Resultatet af analysen blev også præsenteret på ICCE 98 (Lastrup et al., 1998).

Grundlaget for analysen var 9 strækninger, hvor der var fodret intensivt i perioden 1986-96. For at kunne beregne fodringseffektiviteten er man nødt til at have et estimat for den erosion, der ville have været på strækningen uden fodring. Det er denne såkaldte autonome erosion, som fodringen kompenserer for.

I analysen tog man udgangspunkt i de foregående 20 års kysttilbagerykningshastighed på de fodrede strækninger. Tilbagerykningen i perioden 1967-86 blev korrigeret for at tage hensyn til eventuelle overordnede forskelle i påvirkningerne på kysten i de to perioder. Man anvendte tre forskellige korrektionsmetoder. De to byggede på en sammenligning af udviklingen i de to perioder på referencetrækninger uden fodring, og man korrigerede både svarende til den absolutte

forskel og den relative forskel. Den tredje korrektion var baseret på den relative forskel i langstransporten beregnet ved hjælp af CERC-formlen.

Resultatet af analysen med de tre forskellige korrektionsmetoder er præsenteret på fig. 4.1. Det fremgår, at de tre metoder giver forskellige resultater, men i alle tre tilfælde er effektiviteten positivt korreleret med fodringssandets kornstørrelse. Effektiviteten varierer mellem 0,3 og 1,5, men den er langt mindre end den teoretiske effektivitet ifølge (James, 1975). Det kan i øvrigt oplyses, at de anvendte korrektioner udgør under 30%.

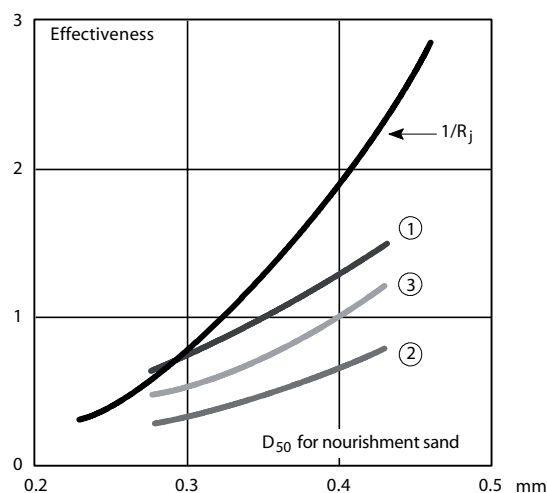


Fig. 4.1 Fodringens effektivitet som funktion af kornstørrelsen (Lastrup et al., 1998)

Både af rapport og paper fremgår det, at der er meget stor spredning på de punkter, der ligger til grund for de præsenterede effektivitetskurver. Det er således relativt svagt funderede sammenhænge, der er fundet. Det gøres der også opmærksom på, og det anføres, at de svageste led i analysen er data for fodringssandets kornstørrelse samt selve beregningen af den autonome erosion.

Som kommentar til analysen kan anføres, at der er større usikkerhed på vestkystmålingerne fra perioden 1967-76 end på målingerne fra de efterfølgende år. Man kunne derfor have valgt at basere den autonome erosion på udviklingen i perioden 1957-1986, hvor man så havde set bort fra data fra førnævnte periode. Det ville have reduceret fodringseffektiviteten med ca. 17%.

Anvendelse af referencetrækninger til korrektion for eventuelle forskelle i påvirkningerne på kysten i de to perioder er i orden, idet referencetrækningerne er lange, og tidsperioden er lang. Hvis det ikke er tilfældet, skal man være opmærksom på tilstedeværelsen af kystlinjebugtninger.

Ved denne lejlighed er det naturligt at knytte et par kommentarer til den viste teoretiske kurve. Hvis kurven er rigtig, skulle det være ca. 2,5 gange så effektivt at fodre med 0,4 mm sand i forhold til 0,3 mm sand. På grundlag af Kystdirektoratets praktiske erfaringer med fodring gennem 25 år virker det usandsynligt, og derfor er indtrykket, at kurven overvurderer effekten af groft fodringssand.

Det har derfor været undersøgt, om kurven overhovedet er rigtig ud fra dagens viden om kornstørrelser m.v. på den centrale del af Vestkysten. I fastlæggelsen af kurven for en given strækning indgår en karakteristisk kornstørrelse for strækningen. Ved beregningen i sin tid blev der anvendt en kornstørrelse på 0,3 mm for det naturlige sand. I (Kystdirektoratet, 2005) er kornstørrelsen for alle prøver inden for 6 m dybde bestemt til 1,95 mm, når også fraktionen over 2 mm medtages. Hvis denne del ikke tages med, er kornstørrelsen 0,33 mm.

Ved nærlæsning af James' artikel fremgår det, at strækningens kornstørrelse skal bestemmes som gennemsnittet for den uforstyrrede lagfølge. På grundlag af de lagfølgeboringer på stranden, der er gennemført i forbindelse med den geologiske kortlægning, vurderes de anvendte 0,3 mm for sandet i lagfølgen at være i underkanten. En lidt større kornstørrelse ville sænke James' kurve.

### 4.3 Analysen af fodringseffektiviteten i 2001

I rapporten »Vestkysten '02« (Kystdirektoratet, 2003) er der medtaget en ny analyse af fodringseffektiviteten. Udover at fodringerne til og med 1999 nu indgår, er der bortset fra nogle detaljer anvendt den samme analysemetode. Analysens hovedresultat fremgår af fig. 4.2.

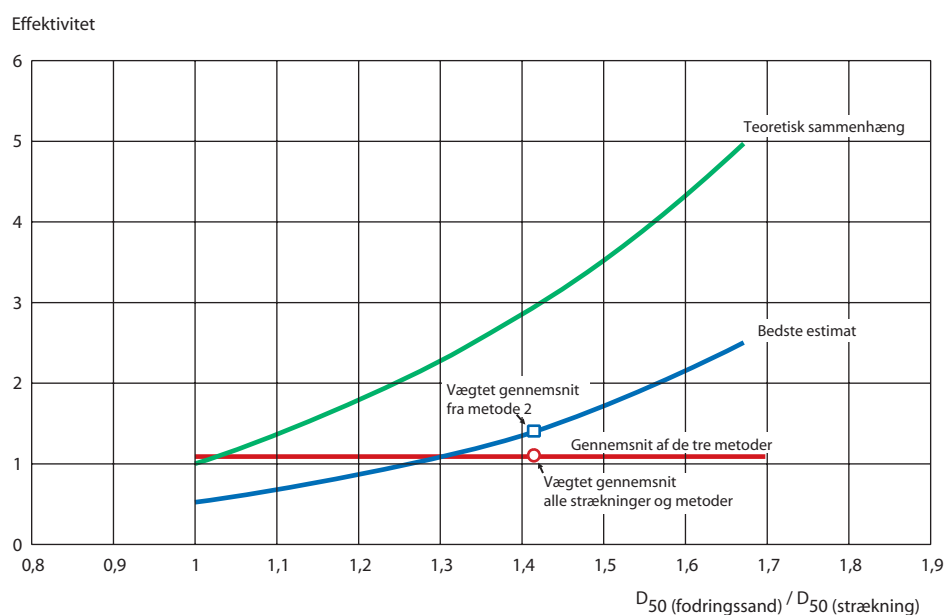


Fig. 4.2 Fodringens effektivitet som funktion af  $D_{50}(\text{fodring})/D_{50}(\text{strækning})$  (Kystdirektoratet, 2003)

De tre beregningsresultater er samlet i et gennemsnit, der er uafhængigt af forholdet mellem kornstørrelserne, og som ligger på 1,1. Som det fremgår, er den fundne sammenhæng meget forskellig fra den teoretiske sammenhæng. De to kurver er så forenet i et bedste estimat for sammenhængen.

Selve analysen viser altså ingen korrelation mellem fodringseffektiviteten og fodringssandets kornstørrelse. Den første analyses sammenhæng holdt altså ikke, da datagrundlaget blev udvidet.

## 4.4 Supplerende analyser på grundlag af det gamle datagrundlag

Data anvendt i den første effektivitetsanalyse er blevet behandlet med Unscrambler. Der er ikke fundet en statistisk signifikant sammenhæng, hvilket ikke er så overraskende. Der var jo som omtalt meget stor spredning på grundlaget for de beregnede effektivitetskurver, og endvidere blev den fundne sammenhæng ikke bekræftet, da analyseperioden blev udvidet.

Ved gennemgangen af de tidligere effektivitetsanalyser er opmærksomheden faldet på et par figurer vedrørende fodrings virkning, der i de pågældende rapporter er tolket ud fra den opfattelse, at perioden 1977-86 var en såkaldt hårdtvejrperiode. Da der har været rejst tvivl om dokumentationen for hårdtvejrperioden, er der set på sagen igen.

Hårdtvejrperioden blev først omtalt i »Vestkysten 90« (Kystinspektoret, 1991). Her blev det vist, at vandstandsstatistikkerne for Thyborøn, Thorsminde og Hvide Sande for perioden 1974-90 lå højere end statistikkerne for tidligere perioder. I »Vestkysten 98« (Kystinspektoret, 1998) er udviklingen i den årlige vindenergi ved Thyborøn vist for perioden 1947-96. Figuren støtter, at perioden 1977-86 er hårdere vindmæssigt end årene både før og efter. Det er bl.a. beregnet, at den årlige vindenergi i perioden er 29% højere end i den efterfølgende periode 1987-96.

På fig. 4.3 er den årlige vindenergi ved Thyborøn på grundlag af Kystdirektoratets database vist for perioden 1974-2005. På grundlag af disse data er der kun fundet en forskel på 18%.

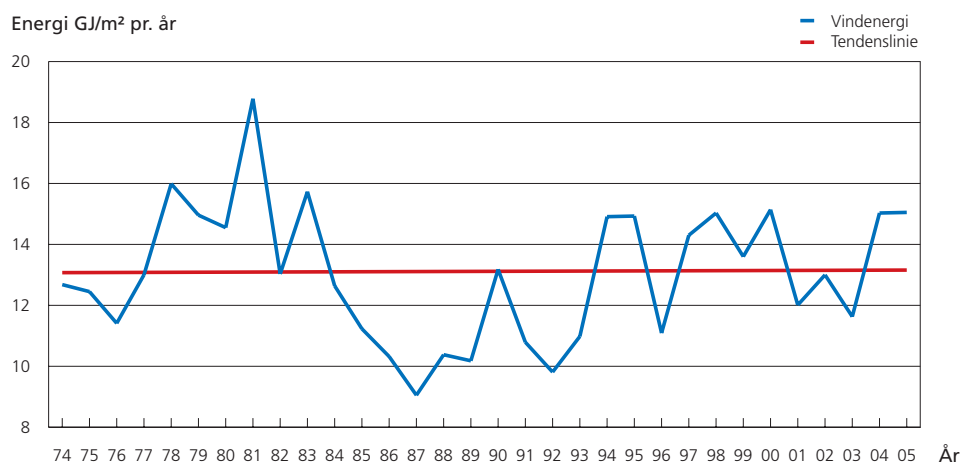


Fig. 4.3 Årlig vindenergi ved Thyborøn på grundlag af Kystdirektoratets målinger

På fig. 4.4, 4.5 og 4.6 er antal højvande for Thyborøn, Hvide Sande og Esbjerg vist, medens antal dage/år med vindhastigheder over 10 og 14 m/s er vist på henholdsvis fig. 4.7 og 4.8. Heraf fremgår det, at i 4 af 5 tilfælde er perioden 1977-86 mildere end den efterfølgende periode 1987-96. Et yderligere argument er, at erosionen i hårdtvejrperioden kun er 15 m<sup>3</sup>/m/år, medens den er 24 m<sup>3</sup>/m/år fra 1986 til 2002.

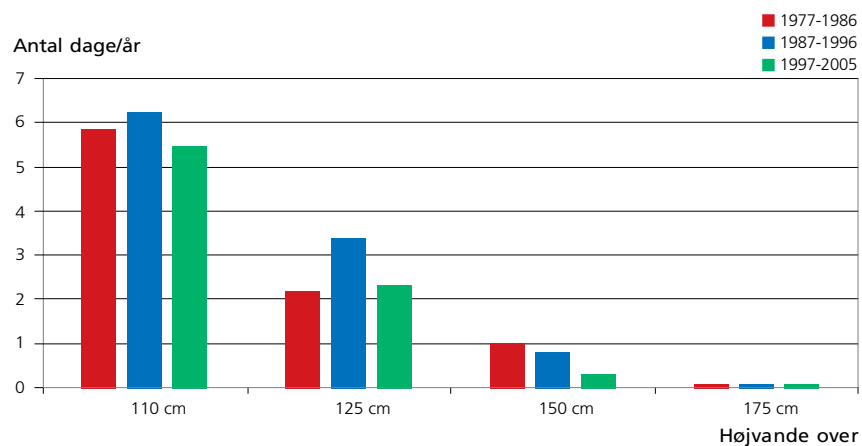


Fig. 4.4 Antal dage/år med højvande, Thyborøn

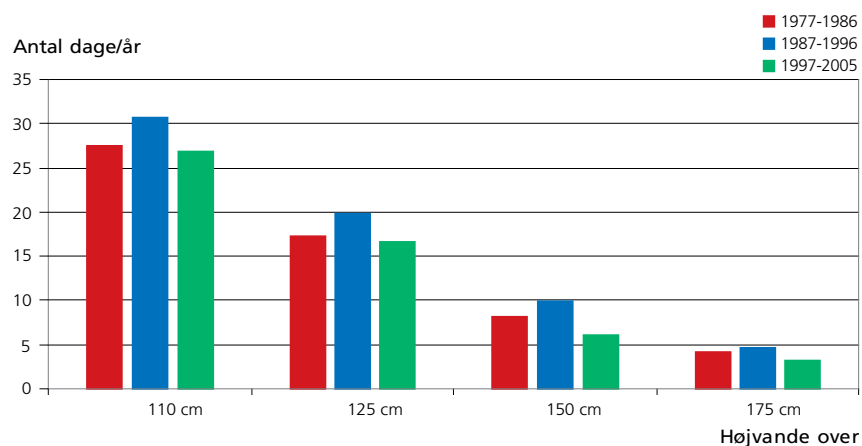


Fig. 4.5 Antal dage/år med højvande, Hvide Sande

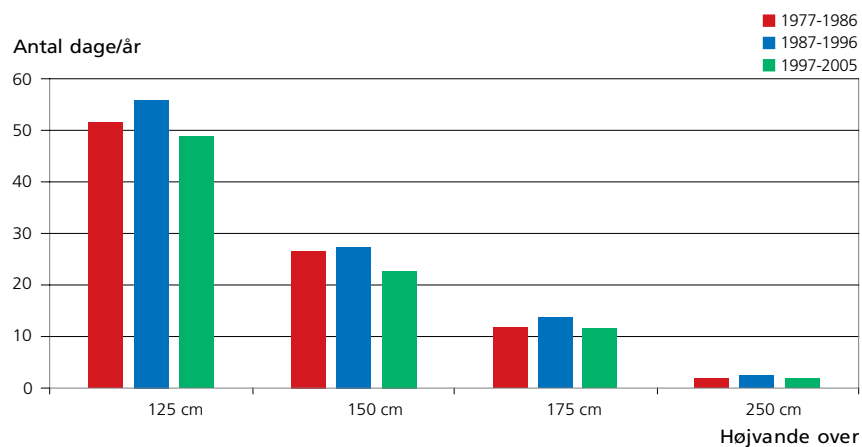


Fig. 4.6 Antal dage/år med højvande, Esbjerg

Hvis man accepterer, at perioden 1977-86 kun er en hårdtvejrperiode i forhold til perioden forud, men en mindre blæsende periode i forhold til den efterfølgende periode 1986-96, kan fig. 4.9, der er fra »Vestkysten 98« tolkes på en anden måde, end man gjorde i rapporten. Af de 25 fodringsstrækninger, der er medtaget på figuren, er der 22, der har klaret sig bedre med fodring end i den foregående periode uden fodring. Det er ikke så overraskende. Derimod er det måske overraskende, at 6 ud af de 9 strækninger uden fodring også har

klaret sig bedre i den samme periode. Det kan forklares med, at fodring gavner nabostrækningerne. Det er beregnet, at de ikke-fodrede strækninger har fået nedsat tilbagerykningen med 0,2 m/år. I (Smith A.W. et al., 1993) er det omtalt, at i Australien er det almindeligt anerkendt, at fodring også gavner alle strækninger nedstrøms for fodringstrækningen. Det er en afvigelse fra den almindelige opfattelse.

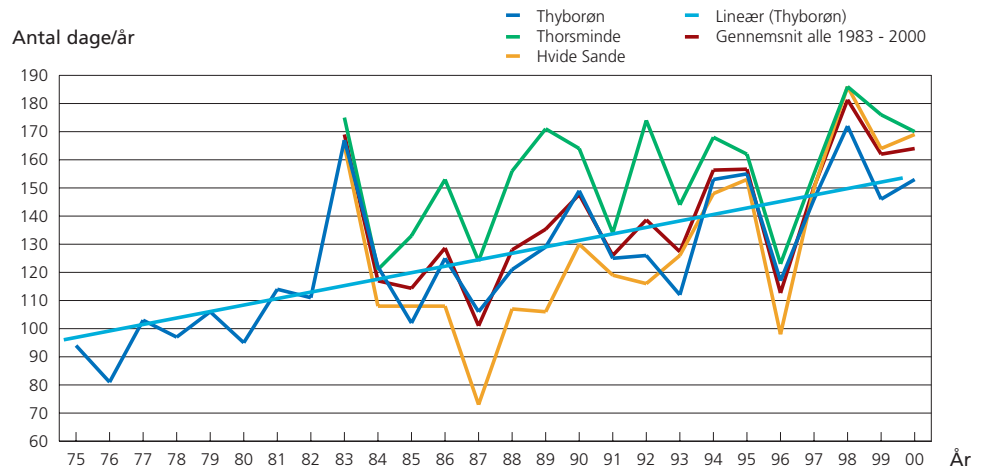


Fig. 4.7 Vindhastighed over 10 m/s og retning 190°-350°

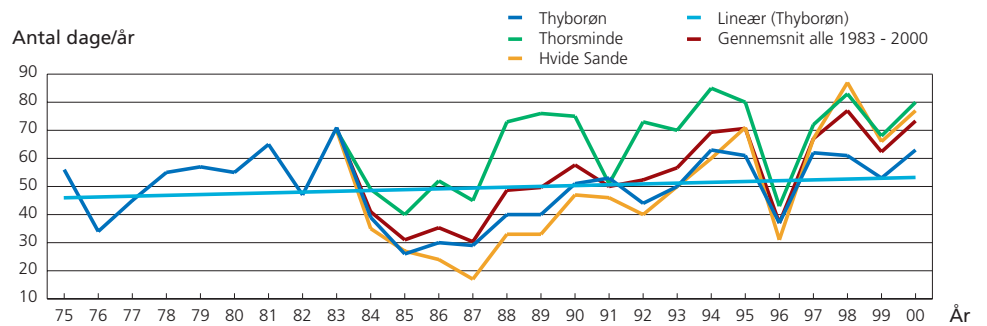


Fig. 4.8 Vindhastighed over 14 m/s og retning 190°-350°

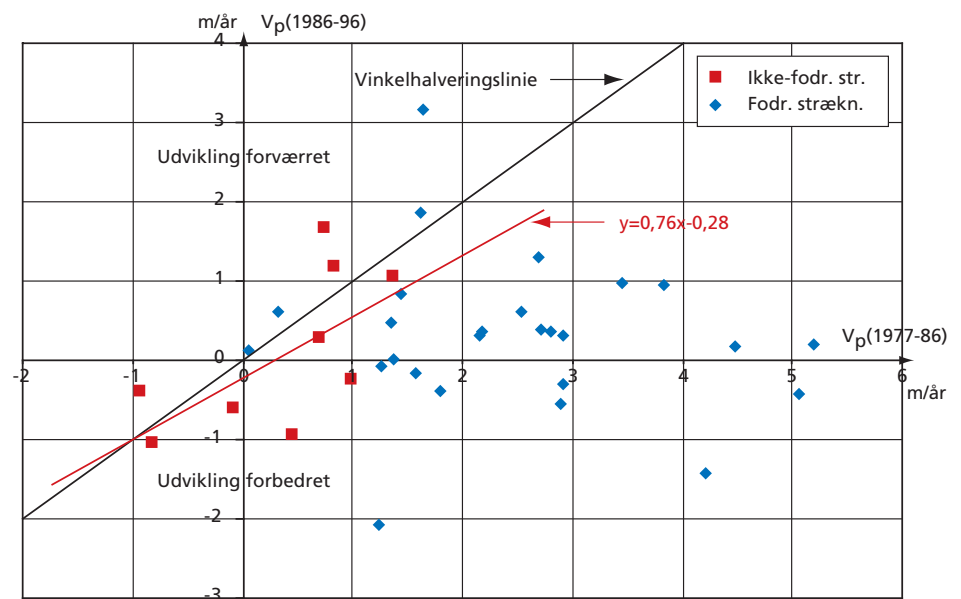
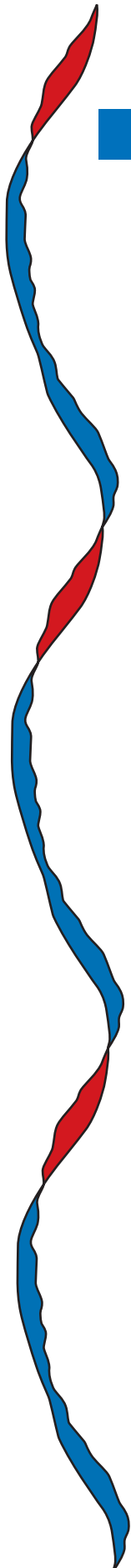


Fig. 4.9 Fodringseffekt (Kystinspektoratet, 1998)

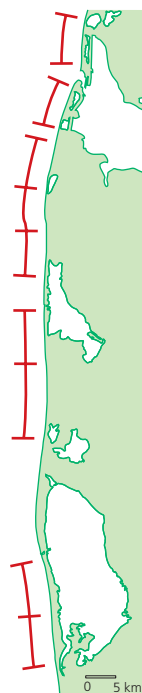


## Fodringsstrækninger

### 5.1 Indledning

I dette afsnit behandles Unscrambler-analyserne af historiske fodringer. I første omgang er det den samlede fodring i en periode, der er knyttet til strækningen, medens det i anden omgang er det enkelte års fodring, der anvendes.

### 5.2 Samlet fodring 1986-2002 på ni strækninger



Hovedformålet med undersøgelsen er at fastslå betydningen af fodringssandets kornstørrelse  $D_{50}$  for fodringseffektiviteten, idet kornstørrelsen anses for at være den vigtigste parameter til karakterisering af fodringssand. Det gøres ved at forsøge at udvikle en model, der kan forudsige erosionen i perioden, hvor der er fodret. Hvis forudsigelsen er meget afhængig af fodringssandets kornstørrelse, kan man konkludere, at fodringens virkning er stærkt afhængig af kornstørrelsen.

Grundlaget er fodringsmængderne i perioden 1986-2002 på de ni strækninger, hvor der er fodret intensivt. Hvis den fodrede strækning er meget kort, er den udvidet til 4-5 km for at få mere stabilitet i de variable, der bygger på opmålte vestkystprofiler. De behandlede strækninger fremgår af fig. 5.1.

Fig. 5.1 Beliggenhedsplan



Der er i analysen set bort fra vestkystprofilerne fra perioden 1965-75, idet opmålingsnøjagtigheden ikke er så god som for de øvrige årgange. De variable, der er anvendt i analysen, er:

Variabelnr.	Variabelbeskrivelse
1	Profilstejlhed 0-300 m fra kystlinjen
2	Profilstejlhed 0-800 m fra kystlinjen
3	Revehøjde, gennemsnit af den højeste revle i hvert profil
4	Strækningslængde
5	Fodringsmængde 1986-2002
6	Høfder – ja eller nej
7	Fodringsmængde 0-10 km opstrøms 1986-2002
8	Fodringsmængde 1977-86
9	Erosion 1957-86 kote 0 - -8
10	Erosion 1977-86 kote 4 - -8
11	D <sub>50</sub> for strækningen
12	D <sub>50</sub> for fodringssandet
13	Sandprocenten i det geologiske profil mellem +4 og -8
14	Sandprocenten i det geologiske profil mellem -8 og -12
15	Sandbølger på skala fra 0 til 1
16	Langtransporten ifølge »Sedimentbudget Vestkysten«
17	Årlig erosion ekskl. fodring 1957-86
18	Årlig erosion inkl. fodring 1977-86

Tabel 5.1 Anvendte variable

Analysens Y-variabel er Ero\_Ny/GI, der angiver forholdet mellem den nye og den gamle erosion. Den bedste Unscrambler-model er vist på tegn. nr. 5.1 samt 5.2. Tegn. nr. 5.1 består af fire figurer, der i det følgende gennemgås detaljeret.

### Loading plot – tegn. nr. 5.1 øverst til højre samt tegn. nr. 5.2

Y-variablen er vist med rødt. De X-variable, der er bedst til at beskrive Y-variablen, er dem, der ligger længst fra PC2-aksen. Det fremgår, at der er 6 variable, der er næsten lige gode. Det er med den vigtigste først:

- Nr. 18 Årlig erosion inkl. fodring 1977-86
- Nr. 10 Erosion 1977-86 kote 4 - -8
- Nr. 8 Fodringsmængde 1977-86
- Nr. 17 Årlig erosion ekskl. fodring 1957-86
- Nr. 9 Erosion 1957-86 kote 0 - -8
- Nr. 5 Fodringsmængden 1986-2002

Det er eftervist, at fodringen opstrøms for den aktuelle fodring  $Fod_{i\_op\_86\_02}$  (variabel nr. 7) er af signifikant betydning for beskrivelsen af Y-variablen og dermed for den aktuelle stræknings udvikling.

Variablen sand +4-8 angiver sandprocenten i det geologiske profil mellem kote +4 m og -8 m. Beliggenheden af variabelen til venstre på

PC 1-aksen viser, at sandprocenten er negativt korreleret med erosionen af sand på strækningen. Da erosionen altså er korrigeret, så det kun er andelen af sand, der indgår, ville man forvente, at variabelen var uden betydning. Der er imidlertid ikke arbejdet videre med dette overraskende resultat, da variabelen ikke opfylder kriteriet for signifikans.

### **Score plot – tegn. nr. 5.1 øverst til venstre**

Da de variable, der er bedst til at forudsige Y-variabelen, er knyttet til fodringmængden eller erosionen, er det naturligt, at strækningen Fjalting - Mærsk, hvor den naturlige erosion er størst, ligger længst til højre på PC 1-aksen. Det er endvidere naturligt, at Husby, hvor der er stor aflejring i perioden, ligger helt til venstre.

Det ses endvidere, at strækningen Nymindegab ligger længst oppe på PC2-aksen, medens strækningerne Vrist og Ferring – Trans ligger længst nede på samme akse. Forklaringen er, at Nymindegab er udsat for størst fodring i opstrøms retning, medens Ferring – Trans og især Vrist kun er udsat for en meget begrænset fodring opstrøms.

### **Residual varians – tegn. nr. 5.1 nederst til venstre**

Søjlerne angiver, hvor stor en del af variansen, der ikke bliver forklaret, når der anvendes et stigende antal hovedkomponenter i modellen. Man ser, at restvariansen falder drastisk, når der anvendes en endimensional model. Der er også en klar forbedring, når man gør modellen todimensional, medens der kun er tale om en ubetydelig forbedring, når modellen bliver tredimensional. I dette tilfælde bør der vælges en tredimensional model, medmindre man foretrækker den mindre komplicerede todimensionale model.

### **Test af modellen – tegn. nr. 5.1 nederst til højre**

Her er kvaliteten af den opstillede model vist. Modelforudsigelserne er vist med blå farve, medens de målte værdier er angivet med rødt. Det fremgår, at uoverensstemmelsen mellem de to værdier er størst for Harbøre Tange.

-----

Det mest bemærkelsesværdige er, at  $D_{50}$  både for strækningen og fodringssandet falder ud. Grunden til, at  $D_{50}$  for fodringssandet ikke har nogen betydning, kan være, at den er bestemt for dårligt, eller at der ikke er forskel på  $D_{50}$  for strækningen og for fodringssandet. En anden mulighed er selvfølgelig, at  $D_{50}$  for fodringssandet ikke betyder noget, når den er mellem 0,2 og 1 mm som anført i (Hassan W.N. et al., 2005).

Det er også bemærkelsesværdigt, at fodringen i opstrøms retning forklarer så stor en del af variationen.

## 5.3 Behandling af fodringerne enkeltvis

Målet er at komme frem til en egentlig design guideline for kystfodring. Hvis det mål skal nås, skal man være i stand til at forudsige, hvordan kysten vil se ud f.eks. et år efter fodringen.

For at samle erfaringer er samtlige fodringer mellem 1999 og 2002 analyseret. Inden for Fællesaftalen er målsætningen for kystudviklingen knyttet til den del af profilet, der ligger inden for 6 m dybde. På grund af revlen er der imidlertid mere variation i profilet på 6 m dybde end på 8 m dybde. Derfor er der i analysen anvendt erosion ud til 8 m dybde.

Der er behandlet 35 fodrede strækninger. Endvidere er medtaget 10 strækninger, der ikke er fodret. De i alt 45 strækninger er behandlet sammen med 34 X-variable, der dækker påvirkninger på kysten og strækningens udvikling og øvrige karakteristika. Y-variablen er det næste års kystudvikling.

Der er ikke fundet nogen god sammenhæng mellem fodring og strækningens udvikling. Unscrambler viser, at der ikke er nogen variable, der har en signifikant sammenhæng med tilbagerykningen. Der er derfor foretaget en beregning med det, der betegnes "leverage correction". Denne metode tager udgangspunkt i, at det kan være de objekter, der ligger langt fra de mere centralt beliggende objekter, der forstyrrer modellen. Derfor korrigeres disse objekter inden beregningen. Denne metode må betragtes som en grov metode, der giver lidt for optimistiske sammenhænge. Den fundne sammenhæng fremgår af tegn. nr. 5.3 samt 5.4, men sammenhængen er ikke overbevisende.

Af tegningen fremgår det, at de 3 vigtigste variable er:

- de sidste 10 års tilbagerykning på strækningen
- profilstejlheden
- fodringen umiddelbart nord for strækningen.

Det er ikke et overraskende resultat, men det er overraskende, at den aktuelle fodring på strækningen er næsten uden betydning. Det kan selvfølgelig ikke være rigtigt. Forklaringen er, at standardafvigelsen på tilbagerykningshastigheden på grundlag af 2 opmålinger med et års mellemrum er 7,07 m/år, idet standardafvigelsen på dybden er 0,05 m. Det er ca. 29 gange mere, end hvis tilbagerykningshastigheden bestemmes ved lineær regression på grundlag af 17 opmålinger på 16 år. I dette tilfælde er standardafvigelsen kun 0,25 m/år.

På grund af de forholdsvis dårlige korrelationer mellem fodringsmængden og profiludviklingen er der ikke arbejdet videre med effekten af fodringen på denne måde. De dårlige korrelationer antages at skyldes, at fodringsstrækningerne er forholdsvis korte. Beregningerne foretages med så få vestkystlinier, at de velkendte tilfældige målefejl bliver til systematiske fejl. En anden mulig årsag til problemerne er, at fodringen ofte vil foregå i starten eller i slutningen af måleperioden.

## Fællesaftalestrækningen

### 6.1 Indledning

Forudsætningen for at man kan udarbejde korrelationsanalyser, er naturligvis, at der er data til rådighed for de variable, man vil analysere. De data, der anvendes i det foreliggende projekt, kan opdeles i tre grupper. Der er de data, der er direkte knyttet til det enkelte opmålte vestkystprofil. Det kan dreje sig om mængdeændringen i forhold til foregående opmåling i forskellige koteintervaller, revlernes antal og højde, profilstejlheden i forskellige dele af profilet m.v. Den anden type af data vedrører påvirkningerne på kysten og omfatter vind, vandstand, bølger og strøm. Den tredje gruppe omfatter fodringsdata samt oplysninger om geologi, sandbølger, konstruktioner m.v.

Det ideelle ville være, hvis data i første og tredje gruppe var samlet og knyttet til det enkelte vestkystprofil, og den anden gruppes påvirkninger lå knyttet til tiden. Hvis data var organiseret sådan, ville der være perfekte muligheder for at korrelere på kryds og tværs for vilkårlige strækninger og tidsperioder.

Fra projektets begyndelse var målet at opbygge et sådant datagrundlag for hele strækningen fra Skagen til grænsen. Det viste sig imidlertid praktisk umuligt på grund af den manglende korrelation mellem de oplagte variable. Det betød, at det var nødvendigt at fortsætte med at udvide antallet af variable med nye i håb om at finde sammenhænge. De mange variable gjorde, at det var uoverkommeligt at opbygge det ideelle datagrundlag.

Det har derfor været nødvendigt at vælge relativt få strækninger og tidsperioder, for at datahåndteringen var mulig. I dette afsnit ses der på de såkaldte hovedstrækninger samt hele fællesaftalestrækningen jfr. fig. 6.1.

Det er valgt i rapporten at anvende skrivemåden  $x^*p$  for  $x^p$ , idet programmet Unscrambler anvender denne form.

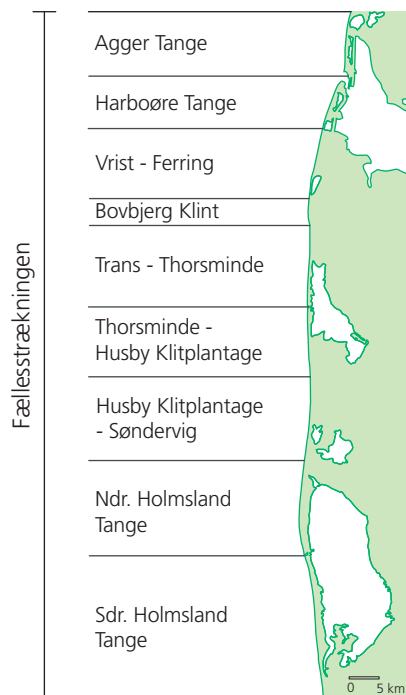


Fig. 6.1 Beliggenhedsplan

## 6.2 De 9 hovedstrækninger

I analysen er der anvendt følgende variable, der fremgår af tabel 6.1.  $H_m0$  er bølgehøjden bestemt ud fra energispektret, medens  $a$  er bølgenes retning i forhold til kystnormalen.

Variabelnr.	Beskrivelse
1	Strækningens længde
2	Periodens længde
3	$H_m0 * H_m0 * \sin 2a$ (strøm og bølger mod syd)
4	$H_m0 * H_m0 * \sin 2a$ (strøm og bølger mod nord)
5	$H_m0 * H_m0 * \sin 2a$ (strøm og bølger modsat hinanden)
6	$H_m0 * H_m0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger mod syd)
7	$H_m0 * H_m0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger mod nord)
8	$H_m0 * H_m0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger modsat hinanden)
9	Antal bølger
10	$H_m0 * H_m0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger mod syd) i kuling eller storm
11	$H_m0 * H_m0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger mod nord) i kuling eller storm
12	$H_m0 * H_m0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger modsat hinanden) i kuling eller storm

Tabel 6.1 Anvendte variable

Den grundlæggende tanke bag ved ovenstående variable er, at der både skal være påvirkninger, der fører sand ind på kysten og påvirkninger, der fører sand væk, idet der både er perioder med erosion og perioder med aflejring. Derfor skelnes der mellem, om bølger og kyststrøm går i samme retning og derfor medfører indadrettet transport, eller om de er modsatrettede og derfor medfører udadrettet

transport, jfr. (Kystdirektoratet, 2005). Endvidere er der skelnet mellem nord- og sydgående langstransport. Endelig tager de tre sidste variable hensyn til, at kuling og storm ofte giver meget synlige skader på klitten og forårsager ændringer på dybt vand, selvom bølgeenergien i disse situationer kun udgør en lille del af årets bølgeenergi.

Alle påvirkninger og erosioner/aflejringer er beregnet for hver årgang og for hver strækning. Dette giver 166 målinger med 30 variable. Da erosion og aflejring består af en række delvariable, ender det med tolv X-variable og en Y-variabel. En Unscrambler-analyse kan kun forklare 10% af variansen, og korrelationen er kun 0,32, jfr. tegn. nr. 6.1 og 6.2, medens en anden analyse, der kan være lidt for optimistisk, kan forklare 16% af variansen og giver en korrelation på 0,44 jfr. tegn. nr. 6.3 og 6.4. Da selv linienummeret har betydning, er det indlysende, at der mangler en række variable, der kan beskrive ændringer fra nord mod syd. Det kunne f.eks. være profilhældningen, der i store træk aftager fra nord mod syd.

Af score plottet tegn. nr. 6.5 fremgår det desuden, at de enkelte årgange har tendens til at ligge tæt ved hinanden. De 4 målinger længst til højre er fra forskellige strækninger, men er alle fra årgang 1980. Længst til venstre er der 6 målinger fra 1985. På tidspunktet for disse undersøgelser blev det tolket som udtryk for, at det måtte være forskel mellem påvirkningerne i 1980 og 1985, som ikke beskrives med de valgte variable. Med det formål at finde bedre udtryk for påvirkningerne blev det besluttet at samle alle hovedstrækningerne i én strækning Lodbjerg-Nymindegab.

### 6.3 Lodbjerg-Nymindegab

Når alle hovedstrækninger skal samles i én strækning, er der nogle perioder, der falder ud, da de kun kan beregnes for en del af strækningen. Resultatet er, at der bliver 15 perioder fra 1977 til 2003, hvor hele strækningen er målt. For de 15 perioder er der beregnet 96 udtryk for de fysiske påvirkninger. De 96 udtryk er beregnet over lang tid og med mange mellemliggende kørsler med Unscrambler for at finde forklaringen på de store erosioner og aflejringer, der sker på Vestkysten.

Hvis analysen var endt med en god korrelation mellem påvirkninger og erosioner/aflejringer, ville det have været relevant at dokumentere tankerne bag alle de anvendte variable. Da den samlede nettoerosion på strækningen Lodbjerg-Nymindegab i de enkelte perioder er kraftig påvirket af systematiske målefejl, jfr. afsnit 7, vil kun de variable, der har en forholdsvis god korrelation med en af følgende 3 Y-variable blive omtalt.

Den første Y-variabel er  $E\_A\_st\_ind \sim |Aflejring| + |Erosion|$  i den indre del af profilet uden hensyn til fodring. Dette udtryk er med typiske bundformer meget lidt påvirket af systematiske målefejl og derfor et godt udtryk for de ændringer, der sker i en periode. Den bedste variabel til at beskrive summen af ændringerne er

$Hm0^{**2,5} \cdot \cos(2 \cdot (\text{retning} - 280))$ , der har en korrelation med  $E\_A\_st\_ind$  på 0,932. Denne variabel er oprindelig udviklet ud fra den idé, at erosionen er afhængig af  $Hm0^{**2,5} \cdot \sin(2 \cdot (\text{retning} - 280))$ , da kyststrømmen og dermed sandtransporten med god tilnærmelse er nul, når bølgerne kommer fra retningen  $280^\circ$ .  $Hm0^{**2,5}$  er i princippet en vektor, og Unscrambler kan ikke håndtere vektorer.  $Hm0^{**2,5} \cdot \sin$  er projektionen på en akse, og  $Hm0^{**2,5} \cdot \cos$  er medtaget for at undersøge, om projektionen på den anden akse har nogen betydning.

De næstbedste variable er  $Hm0^{**2,5} \cdot \cos(2 \cdot (\text{retning} - 280))$  for vintermåneder,  $Hm0^{**2} \cdot \text{strøm}$  for vind over 16 m/s,  $Hm0^{**2,5}$  og  $Hm0^{**2} \cdot \text{strøm}$ , der har korrelationer på henholdsvis 0,909, 0,901, 0,901 og 0,899.

Den næste Y-variabel  $N_{findr}$  er nettoerosionen i den indre del af profilet, idet bidraget fra fodringsmængderne medtages.  $N_{findr}$  er den variabel, som ønskes forudsagt i projektet, da  $N_{findr}$  svarer til Kystdirektoratets målsætning. Denne variabel beskrives bedst ved hjælp af  $Hm0^{**2} \cdot \text{strøm}$ , idet strømmen skal løbe mod syd. De næstbedste variable er  $Hm0^{**2} \sin(2 \cdot \text{retning} - xxx)$ ,  $Hm0^{**2} \sin(2 \cdot (\text{retning} - xxx))$ ,  $Hm0^{**2} \cdot \text{strøm}$  for vind over 16 m/s,  $(\text{vind} \cdot \sin 2a)^{**2}$  for vind over 14 m/s med korrelationer på henholdsvis 0,638, 0,636, 0,63 og 0,63.  $xxx$  angiver retningen vinkelret på en hovedstrækning.

Den sidste Y-variabel  $N\_f\_ind\_ydr$  er nettoerosionen i den indre og ydre del af profilet, idet bidraget fra fodringsmængderne medtages. De bedste X-variable er  $Hm0^{**2} \sin(2 \cdot (\text{retning} - xxx))$ ,  $Hm0^{**2,5}$  fra vintermåneder,  $Hm0^{**3} \cos(2 \cdot (\text{retning} - 270))$ ,  $Hm0^{**2,5} \cos(2 \cdot (\text{retning} - 280))$ ,  $Hm0^{**2,5} \cos(2 \cdot (\text{retning} - 270))$  med korrelationer på henholdsvis 0,666, 0,659, 0,658, 0,652 og 0,644.

Med de 96 X-variable er den bedste model med et begrænset antal variable vist på tegn. nr. 6.6. Korrelationen er på 0,92, og de fire X-variable er  $Hm0 \cdot Hm0 \cdot \text{strøm}$  for vind over 16 m/s,  $Hm0 \cdot Hm0 \cdot \sin(2 \cdot (\text{retning} - 270))$  for vind over 20 m/s om sommeren,  $\text{vinter\_sommmer}$  (et forsøg på at tage hensyn til at måletidspunktet bliver flyttet fra vinter til sommer) og »gammel«, der angiver erosionen året før. At erosionen året før har betydning, er mærkeligt og kan næsten kun skyldes målefejl. Det er klart, at der kan være en forsinkelse fra påvirkningen, til man ser resultatet. Det er f.eks. velkendt, at der efter en stærk storm kan ske en unormal kraftig opbygning af stranden i over et år efter stormen. Hvis det var et sådant fænomen, den gamle erosion forklarede, skulle det være påvirkninger fra året før, der var korrelerede med udviklingen det næste år, og ikke den målte erosion.

I forsøget på at få bedre korrelationer er det også forsøgt at fjerne nogle årgange (outliers). De to første perioder fra 1977 til 1983 er forsøgt fjernet, og resultatet er vist på tegn. nr. 6.7 og 6.8. At korrelationen på 0,892 med 13 perioder ikke er bedre end den korrelation på 0,921, der er fundet med 15 perioder, antages at skyldes, at der er brugt lang tid på at finde korrelationen på 0,921, medens korrelationen med 13 perioder er fundet på forholdsvis kort tid under et møde med Kim Esbensen.

Grunden til, at der ikke er arbejdet videre med de 13 perioder, er, at de perioder, der udelades, sandsynligvis både er outliers og ekstreme perioder. En ekstrem begivenhed påvirker modellen og korrelationen meget og må ikke udelades. Hvis der samtidig med den ekstreme begivenhed også er systematiske målefejl, er der ingen regler for, om perioden skal medtages eller udelades. Dette er grunden til, at der både er dannet en model med 13 perioder og en med 15 perioder.



## Husby-strækningen (Naturligt referenceområde)

### 7.1 Indledning

Området, der behandles, er en ca. 3 km lang strækning ud for Vedersø Klit, hvor der ikke udføres eller tidligere er udført nogen form for kystbeskyttelse, jfr. fig. 7.1. Det er altså en strækning, der udvikler sig naturligt, og det har været baggrunden for at følge udviklingen i området.

Siden 1999 er området opmålt 2-4 gange om året i et linjesystem bestående af linjer vinkelret på kysten med en indbyrdes afstand på 200 m samt tre langsgående linjer. På nuværende tidspunkt foreligger der 19 bathymetrier, der udgør en enestående dokumentation for kystudviklingen i området.

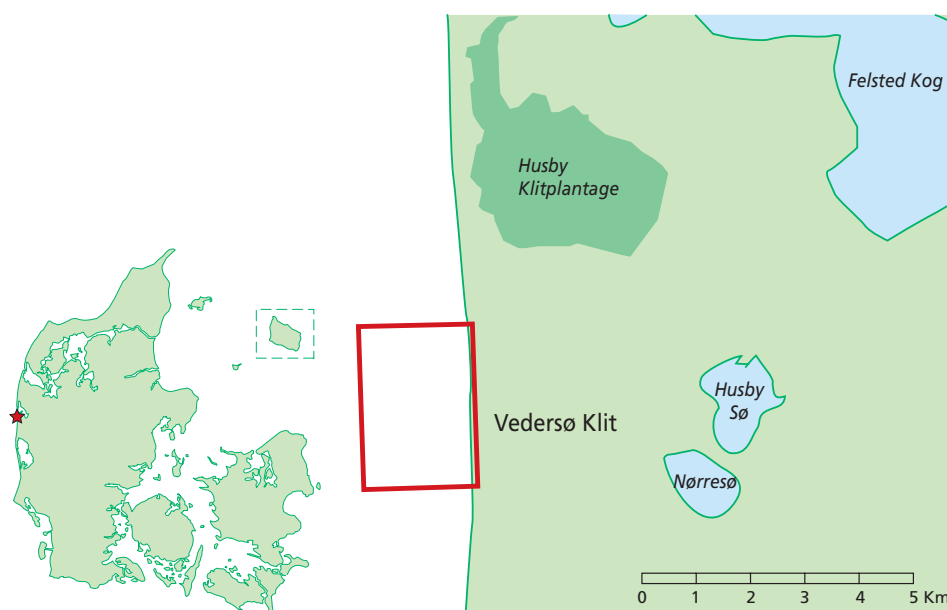


Fig. 7.1 Beliggenhedsplan

Med 19 opmålinger og dermed 18 perioder til rådighed for den samme strækning kan en række variable, der kan forklare forskellen i udviklingen på delstrækninger, derfor udelades. Dette burde give særdeles gode muligheder for at finde en sammenhæng mellem nettoerosionen og de fysiske påvirkninger.

Udviklingen i området er rapporteret i (Kystdirektoratet, 2001b). Selvom der bruges ca. 8 sider på mængdeberegninger i rapporten, er der ingen opgørelser over de totale mængdeændringer for området, og der er ikke gjort forsøg på at finde korrelationer mellem mængdeændringer og påvirkninger. Årsagen til dette er sandsynligvis, at det ligesom mange gange tidligere ikke er lykkedes at finde gode sammenhænge mellem erosionen i et større område og påvirkningerne.

## 7.2 Analyser før juni 2005

På grundlag af de tidligere analyser for hovedstrækningerne og fællesaftalestrækningen blev de bedste variable udvalgt. Disse variable sammen med en række nye er anvendt i de utallige Unscrambler-kørsler, der er gennemført i forsøget på at finde en fysisk sammenhæng mellem påvirkningerne og erosionen.

Konklusionen på grundlag af analysen måtte desværre blive, at det ikke var lykkedes at finde en signifikant sammenhæng mellem påvirkninger og erosion. Der er fundet en sammenhæng jfr. tegn. nr. 7.7, men der er altid en risiko for, at den er udtryk for en matematisk sammenhæng og ikke en fysisk, når der anvendes en optimistisk model.

Derfor har der været holdt møder med professor Kim Esbensen for at sikre, at der ikke er sket en overfortolkning, eller at der er overset nogle fysiske sammenhænge. På et af møderne er modellen, der fremgår af tegn. nr. 7.6, opstillet. Selvom denne model ligesom førnævnte forklarer en del af erosionen, vækker det bekymring, at det ikke er de samme variable som i de tidligere kørsler for vestkyststrækningen, der har den største betydning.

Med det store antal bathymetriske opmålinger af strækningen inden for en periode på 6 år samt kvalitetsdata uden systematiske fejl for påvirkningerne må grundlaget betegnes som ideelt for at kunne finde en signifikant sammenhæng mellem påvirkninger og erosion. Da det altså ikke var muligt, kunne der kun vælges en af følgende konklusioner:

- Der er ingen sammenhæng mellem de fysiske påvirkninger og erosionen
- Der er systematiske fejl i de bathymetriske opmålinger.

Den første mulighed må betragtes som meget usandsynlig. Der er så kun den anden mulighed tilbage. At denne mulighed kan være den rigtige, understreges af, at små ensidige fejl har stor betydning for mængderne. En ensidig fejl på en bathymetri på f.eks. 1 cm betyder en fejl på mængden i hele området på ca. 60.000 m<sup>3</sup>. Erosionen i hele perioden fra 1999 til 2005 er ca. 500.000 m<sup>3</sup>. Det giver en gennemsnitlig erosion i hver af de 18 perioder på ca. 30.000 m<sup>3</sup>. En fejl på

1 cm kan altså vende en virkelig erosion i en periode til en tilsyneladende aflejring. Det er klart, at især dette skifte fra erosion til aflejring gør det meget vanskeligt at finde en signifikant sammenhæng mellem påvirkninger og erosion.

### 7.3 Udvikling af en løsning

Det har altid i Kystdirektoratets tidligere undersøgelser været meget vanskeligt at konstatere en direkte sammenhæng mellem bølgepåvirkningerne på en strækning og erosionen. Det var også tilfældet under Nourtec-projektet i perioden 1993-96 (Danish Coastal Authority, 1997 og Rijkswaterstaat – RIKZ, 1997). Opmålingsgrundlaget for dette projekt var fremragende i form af 17 bathymetrier med en linjeafstand på kun 100 m. Alligevel kunne det ikke generelt vises, at stor bølgeenergi medfører stor erosion. Det var gældende for nogle områder, medens det var modsat for andre.

Nettoerosionen i et område fra én bathymetri til den næste er jo forskellen mellem erosionen E og aflejringen A, dvs. E-A. Der var altså generelt meget dårlig korrelation mellem bølgeenergien og E-A. Derimod blev der konstateret en meget bedre korrelation mellem bølgeenergien og E+A. E+A afspejler omflytningerne inden for området og må som E-A have en fysisk sammenhæng med bølgeenergien, men sammenhængen er mindre direkte og mere kompliceret. En afgørende forskel på de to størrelser er imidlertid, at E-A er meget følsom over for ensidige målefejl, medens E+A ikke er påvirket. Under Nourtec-projektet måtte man med undren konstatere, at sådan var sammenhængen, men man kom så ikke længere ad dette spor.

Under arbejdet med at analysere sandbølger opstod den idé, at forholdet  $A/E$  må være en karakteristisk størrelse for et område.  $A/E$ -forholdets betydning forklares i det følgende med henvisning til fig. 7.2. For at forenkle forklaringen ses der i første omgang bort fra tværtransportens gradient. Langtransportens gradient er sammenlignet hermed negliger og dermed næsten uden betydning for mængde-regnskabet.

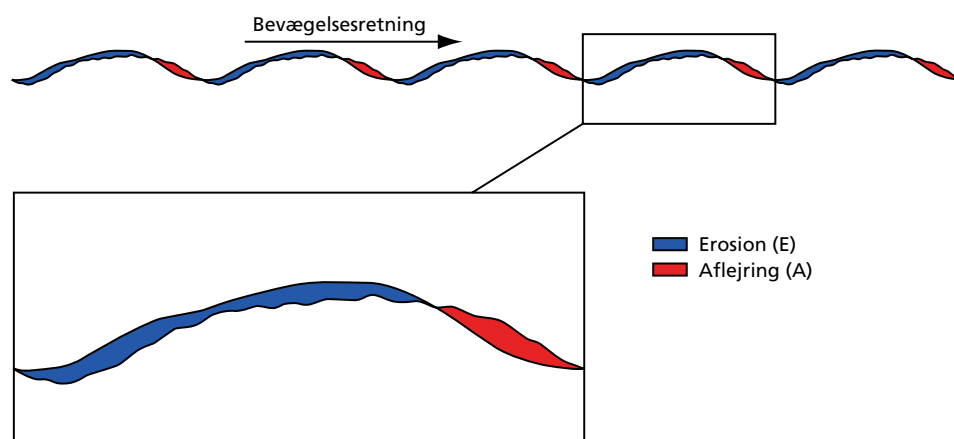


Fig. 7.2 Principskitse af A/E-forholdet

### **Hvis bunden består af 100% lersedimenter**

I så fald sker erosionen i ler, der ikke aflejres igen inden for området. Aflejningsmængden  $A$  vil derfor være 0, og  $A/E$  derfor også 0. Det er i øvrigt sådan, at selvom bunden består af rent ler, er den ofte bølget, som var der tale om en bund med sandbølger. Erosionen i en sådan bølget lerbund vil normalt også ske på opstrøms side af forhøjningerne, men der vil altså ikke være nogen aflejring på nedstrøms side.

### **Hvis den uforstyrrede bund består af sand eller grus**

I dette tilfælde vil den eroderede mængde aflejres igen. Aflejringen sker normalt ikke på samme sandbølges nedstrøms side, men 6-7 bølgelængder længere nedstrøms. Det vigtigste er, at den eroderede mængde aflejres igen inden for området. Derfor vil erosion og aflejring være lige store, og  $A/E$  derfor 1.

### **Hvis den uforstyrrede bund består af både ler og sand/grus**

I denne situation vil de eroderede lersedimenter forsvinde, medens sandet aflejres igen. Hvis den uforstyrrede bund i et område består af 20% ler og 80% sand, vil  $A/E$  være lidt mindre end 1. Med kendskab til sandbølgenes højde, længde og vandringshastighed vil det nøjagtige  $A/E$ -forhold kunne fastlægges.

### **Hvis tværtransporten inddrages**

Man kan selvfølgelig ikke se bort fra tværtransporten. Det er gradienten på tværtransporten, der er hovedansvarlig for nettoerosionen uden for 10 m dybde, og dermed for at denne del af profilet i hvert fald ud til mindst 25 m dybde rykker tilbage med samme hastighed som den indre del af profilet, og dermed er en del af ligevægtsprofilen.

Tabet fra et område indad i profilet vil betyde, at en mindre del af den eroderede mængde aflejres igen, end tilfældet var, da der blev set bort fra tværtransporten. Da det må være en rimelig antagelse, at tværtransporten er proportional med  $E$ , vil  $A/E$  stadig være en karakteristisk konstant for et område. Værdien vil imidlertid være mindre end værdien uden tværtransport.

### **Sammenfatning vedrørende $A/E$ -forholdet for et område**

På grundlag af ovenstående ræsonnement må  $A/E$ -forholdet være konstant for et givet område. Den absolutte størrelse afspejler både sammensætningen af den uforstyrrede bund og tværtransporten og dermed profiltilbagerykningshastigheden på strækningen.

Selvom udviklingen af  $A/E$ -forholdet er knyttet til området med sandbølger uden for 8-10 m dybde, må ræsonnementerne holde hele vejen ind gennem profilet, idet det grundliggende for  $A/E$ -forholdet er, at erosionen sker i et ligevægtsprofil, og så er det ikke afgørende, om sandet flyttes på langs eller på tværs af kysten. Der er tale om periodiske fænomener hele vejen ind gennem profilet. Ifølge litteraturen skyldes over 80% af aflejring og erosion periodiske fænomener, der vandrer langs kysten.

Ensidige målefejl vil påvirke A/E. Ligger den sidst målte bathymetri f.eks. 1 cm for højt, vil den beregnede E blive for lille og den beregnede A for stor, og A/E dermed noget større end områdets karakteristiske A/E-forhold. Man kan derfor anvende den beskrevne metode til at fastlægge størrelsen af den ensidige fejl ved at kræve konstant A/E-forhold. Herefter kan bathymetriene korrigeres for denne fejl, og der fremkommer et bedre bathymetrisk datagrundlag til brug for de forskellige kysttekniske analyser.

Ideen er blevet udviklet i juni 2005 og derefter anvendt på bathymetriene i Naturligt referenceområde. Endvidere er metoden anvendt på vestkystprofilerne på hovedstrækningerne Bovbjerg Klint og Ndr. Holmsland Tange. Det har ikke inden for projektets tidsramme været muligt at anvende metoden på andre strækninger.

## 7.4 Korrektion af bathymetriene på grundlag af A/E-forholdet

På fig. 7.3 er den akkumulerede nettoerosion for hele det naturlige referenceområde vist. Det fremgår, at udviklingen er meget ujævn. Man kan se, at ændringen i de enkelte perioder går fra en erosion på 400.000 m<sup>3</sup> til en aflejring på 300.000 m<sup>3</sup>.

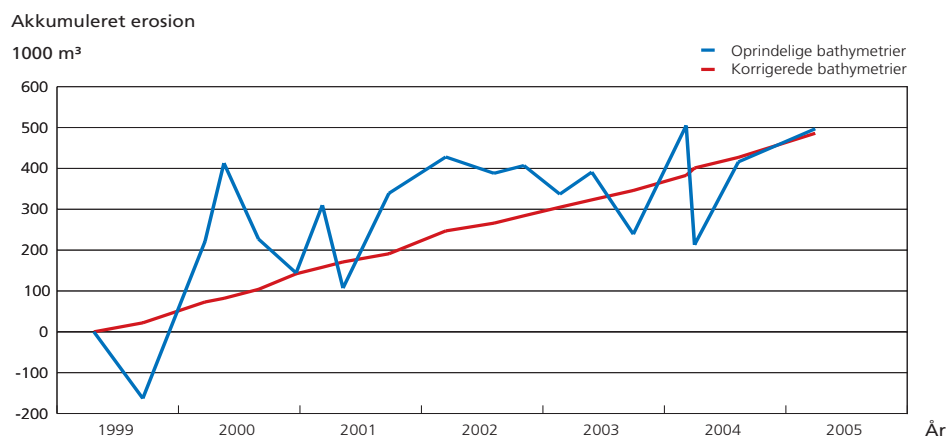


Fig. 7.3 Akkumuleret erosion

Områdets karakteristiske A/E-forhold er beregnet på følgende måde:

$$A/E = \Sigma A_j / \Sigma E_j = 0,94$$

Herefter er bathymetriene korrigeret én efter én, så A/E-forholdet i den forudgående periode bliver 0,94. Det har medført korrektioner fra +3 cm til -5,4 cm med et gennemsnit på 1,8 cm. Korrektionerne svarer til de ensidige eller systematiske målefejl.

De systematiske fejl kan have mange kilder som skift af hardware, skift af software, fejl i software, skift af behandlingsmetoder, drift af lydshastighedsmåler, bølger, vind, sandribber, skift af geoidemodell, skift af opmålingsbåd, begroning på ekkolod, fejl i ekkolod, GPS-fejl, menneskelige fejl, sætninger af referencestationer, indmåling af sensorer og ny kalibrering m.fl.

Kystdirektoratet har i flere omgange foretaget omfattende analyser af gentagelsesmålenøjagtigheden, og opmålingsproceduren er løbende blevet justeret med henblik på at forbedre målenøjagtigheden. På trods heraf må man erkende, at der naturligvis optræder systematiske fejl, men den almindelige antagelse er, at de højst er på nogle mm. At systematiske fejl kan være større, understreges af følgende eksempler:

Farvandsvæsenet har opdaget 2 systematiske fejl i den periode, de har anvendt DGPS. Den ene fejl var på 6 cm og skyldtes skift af geoide-model, medens den anden fejl var på 3 cm og skyldtes, at et ekkolod ikke var monteret korrekt i en periode.

Selvom både Kystdirektoratets gamle enkeltstråleekkolod og det ny flerstråleekkolod var kontrolleret særdeles grundigt, måtte det ved overgangen fra det ene system til det andet erkendes, at de to ekkolod målte med en systematisk forskel på 12 cm. Det lykkedes ikke i 1998 at finde forklaringen på forskellen. En del af forskellen skal tillægges åbningsvinklen. Meget forenklet måler enkeltstråleekkolodet til toppen af sandribberne, medens flerstråleekkolodet måler en gennemsnitsdybde.

Efter den gennemførte korrektion af bathymetrierne får den akkumulerede erosion et mere roligt forløb, som det fremgår af fig. 7.3 og 7.4. I alle perioder er der nu erosion, og variationen ligger mellem 8.000 m<sup>3</sup> og 60.000 m<sup>3</sup>. I forhold til gennemsnitserosionen i en periode på ca. 30.000 m<sup>3</sup> betyder det en variation mellem en tredjedel og det dobbelte. Det virker rimeligt, idet påvirkningerne varierer inden for samme interval.

Med de oprindelige bathymetrier havde man i en enkelt periode variationer fra en erosion på 400.000 m<sup>3</sup> til en aflejring på 300.000 m<sup>3</sup>. Det har ikke været muligt at finde kombinationer af bølger, vandstande og strøm, der støtter så store variationer. På dette grundlag konkluderes, at det er overvejende sandsynligt, at resultaterne af opmålingen ud over tilfældige fejl med en standardafvigelse på ca. 5 cm har systematiske fejl med en standardafvigelse på 1,3 cm.

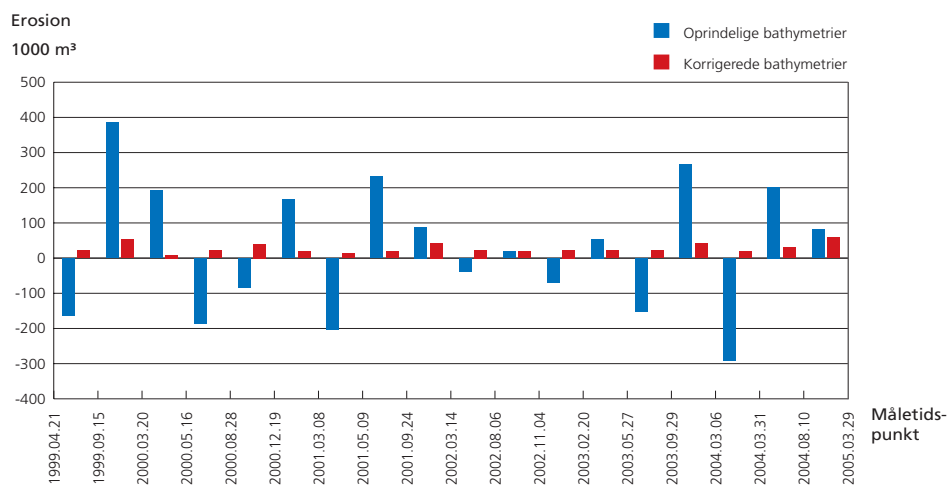


Fig. 7.4 Erosionen mellem opmålingerne

## 7.5 De anvendte variable i analysen med korrigerede bathymetrier

Analysen er gennemført med de variable, der er vist i tabel 7.1

Nr.	Variabel	Forklaring
1	$H_{m0}^2$	
2	$H_{m0}^2 \sin 2a$	a er vinklen mellem 270° og bølgeretningen
3	$H_{m0}^2 K$	bølgehøjde > 2 m
4	$H_{m0}^2 \sin 2a K$	bølgehøjde > 2 m
5	$Va H^2 +$	for vandstand > 0
6	$Va H^2 \sin 2a +$	for vandstand > 0
7	$Va H^2 -$	for vandstand < 0
8	$Va H^2 \sin 2a -$	for vandstand < 0
9	$Va H^2 \sin 2a$	sum af variabel 6 og 8
10	$(Va H_{m0})^3$	
11	$(Va H_{m0})^3 \sin 2a$	
12	$Va^3$	
13	$H_{m0}^2,5 \sin 2a$	bølgehøjde > 2 m, a er nu vinklen mellem 280° og bølgeretn
14	$H_{m0}^2,5 \cos 2a$	bølgehøjde > 2 m, a er nu vinklen mellem 280° og bølgeretn
15	$H_{m0\_2\_str\_N}$	strøm og bølger mod nord
16	$H_{m0\_2\_str\_S}$	strøm og bølger mod syd
17	$H_{m0\_str\_OFF}$	strøm og bølger modsatte

Tabel 7.1 Anvendte variable

Variabel 1 og 2 er almindelige udtryk for bølgeenergien. Det samme gælder variabel 3 og 4, men det er kun bølgeenergien for bølgehøjder over 2 m, der medtages. Variabel 5 - 12 er dannet ud fra den antagelse, at høje vandstande medfører transport søværts, medens lave vandstande medfører transport landværts. Variabel 13 er dannet ud fra den antagelse, at det kan være  $H_{m0}$  i en anden potens end 2, der styrer udviklingen, fordi  $H_{m0}$  er kraftigt korreleret med strømmen. De 280 grader er valgt, fordi de specielle forhold i Nordsøen gør, at gennemsnitsstrømmen tæt på kysten på den centrale del af Vestkysten er nul, når bølgerne har retningen 10° nord for vest. Variabel 14 er dannet for at medtage den energi, der ifølge teorien ikke forårsager nogen transport. Variabel 15 - 17 er dannet ud fra den tankegang, at det er bølgeenergien, der sætter sandet i bevægelse, men det er strømmen, der transporterer sandet bort.

## 7.6 2D scatter plot

Inden opstilling af modeller for sammenhængen mellem erosionen og de 17 variable er sammenhængen mellem erosionen og de enkelte variable undersøgt.

	Netto Kl_vol		Netto Scc_vol		Netto Scc_vol	Ny_Netto Scc
	16 perioder		16 perioder		18 perioder	18 perioder
	Corr	Slope	Corr	Slope	Corr	Corr
Dage						0,78
H_m0					0,42	0,93
H_m0**1.5					0,43	0,94
H_m0**2.5					0,46	0,94
H_m0**3					0,47	0,93
H_m0**2	0,09	1,0	0,52	3,5	0,45	0,94
H_m0**2sin2a	0,03	0,1	0,41	1,1	0,33	0,46
H_m0**2K	0,19	1,6	0,52	2,7	0,46	0,92
H_m0**2sin2ak	-0,04	-0,1	0,46	0,8	0,33	0,60
Va*H**2+	0,31	160,9	0,52	169,3	0,45	0,92
Va*H**2sin+	0,34	59,7	0,54	59,5	0,47	0,45
Va*H**2-	0,04	1,4	-0,40	-8,8	-0,24	-0,60
Va*H**2sin-	-0,12	-2,9	-0,40	-5,4	-0,23	-0,52
Va*H**2sin	0,35	56,9	0,54	54,0	0,48	0,29
(Va*h_m0)**3	0,56	24,8	0,44	12,1	0,43	0,76
vah**3sin	0,67	14,5	0,56	7,5	0,54	0,39
va**3	0,21	115,5	0,39	129,7	0,40	0,73
H_m0**2.5sin2a280	-0,08	-0,4	0,16	0,4	0,00	-0,33
H_m0**2.5cos2a280	0,30	2,5	0,61	3,2	0,47	0,90
H_M0_2_str_N	0,35	60,2	0,38	40,0	0,29	0,90
H_M0_2_str_S	-0,35	-20,0	-0,52	-18,6	-0,48	-0,82
H_M0_2_str_OFF	0,16	6,9	0,35	9,5	0,29	0,92
H_m0_2* str					0,34	0,94
Middel af numeriske	0,25		0,45		0,38	0,72

Tabel 7.2 2D scatter plot

Kl\_vol er beregnet med Kl-menuen og er mængdeændringer mellem kote +2,95 m og kote -18 m mellem afstandene 880 m og 1985 m. Scc\_vol er mængdeændringer i hele området og dækker afstande mellem ca. 880 m og ca. 3.200 m. På tidspunktet for beregningerne var der kun målt 17 bathymetrier og derfor 16 perioder til rådighed.

Af tabel 7.2 fremgår det, at korrelationen mellem Kl\_vol og de enkelte variable er dårligere end mellem Scc\_vol og de enkelte variable. Grunden til at middellokrelationen stiger fra 0,25 til 0,45 antages at være, at summen af de tilfældige fejl er mindre, når området er større.

Efter at opmålingerne er korrigeret som beskrevet i afsnit 7.4 stiger korrelationen voldsomt for de fleste variable. Middellokrelationen stiger fra 0,38 til 0,72. Da antallet af perioder er vokset til 18, er de gamle korrelationer genberegnet for at få en korrekt sammenligning mellem korrelationer til Netto Scc\_vol og Ny\_Netto Scc\_vol. Umiddelbart virker det overraskende, at den genberegnete Scc\_vol for 18 perioder har en mindre middellokrelation end den tilsvarende for 16 perioder. Årsagen er den 18. periode, der har den største bølgeenergi af samtlige perioder, men en beskedent erosion.



Det er bemærkelsesværdigt, at der er 11 variable, der har en korrelation med  $Ny\_netto\_Scc$  på 0,90 eller højere, medens det traditionelle udtryk for nettolangstransporten kun har en korrelation på 0,46. Grunden til, at den teoretisk korrekte variabel  $H\_m0^{**2}\sin2a$  har en meget dårlig korrelation sammenlignet med den primitive  $H\_m0^{**2}$ , kan være, at  $H\_m0^{**2}$  siger meget om den energi, der påvirker området, medens forudsætningen for, at  $H\_m0^{**2}\sin2a$  kan forudsige erosionen, ikke er opfyldt. Det er indlysende, at  $H\_m0^{**2}\sin2a$  ikke kan medtage de lokale forhold, der gør, at materialtransporten i den indre del af profilet normalt er sydgående, medens materialtransporten i den ydre del af profilet er nordgående.

## 7.7 Unscrambler-analyse

Allerede i 2003 medens der var 15 målinger eller 14 perioder til rådighed, er der fundet gode sammenhænge mellem  $|Erosion| + |Aflejring|$  og de fysiske påvirkninger. På tegn. nr. 7.1, 7.2 og 7.3 kan man se, at der er opnået korrelationer på 0,968, 0,96 og 0,93 med henholdsvis 3, 2 og 1 variable. De benyttede variable er  $Va*H^{**2}\sin$ ,  $H\_m0^{**2}K$  og  $Va*H^{**2}\sin+$  på nr. 7.1. På nr. 7.2 er  $Va*H^{**2}\sin$  og  $H\_m0^{**2}K$  benyttet, og på nr. 7.3 er det  $Va*H^{**2}\sin$ .

Da bølgehøjde, vandstand og strøm er korreleret i en vis udstrækning, er det muligt at finde en lige så god korrelation med variable, der er lettere at forstå. På tegn. nr. 7.4 er korrelationen på 0,968 med de tre variable  $H\_m0\_2\_str\_N$ ,  $H\_m0\_2\_str\_S$  og  $H\_m0\_2\_str\_OFF$ . Tegn. nr. 7.4 er fra 2004, og antallet af perioder er øget til 15. Den bedste korrelation mellem  $|Erosion| + |Aflejring|$  og påvirkningerne er på 0,975. I denne korrelation, der er vist på tegn. nr. 7.5 benyttes 6 variable og 3 akser.

På trods af de gode korrelationer mellem  $|Erosion| + |Aflejring|$  og de fysiske påvirkninger har der kun været arbejdet forholdsvis lidt med disse korrelationer, da det er nettoerosionen, der er interessant rent kystteknisk.

Der har været arbejdet meget og længe med at finde en god korrelation mellem nettoerosionen og påvirkningerne. Arbejdet har forløbet sideløbende på vestkystdata og på data fra naturligt referenceområde. På et af møderne med professor Kim H. Esbensen er der nået en korrelation på 0,772 med to variable  $Vah^{**3}\sin$  og  $H\_m0^{**2.5}\sin2a$  ( $280^\circ$ ), jfr. tegn. nr. 7.6. Der er udeladt en periode, der er vurderet som en outlier, for at få dette resultat. Efterfølgende har det været forsøgt at udelade en måling i stedet for en periode, men disse kørsler har ikke opnået en bedre korrelation.

Efter korrektion af bathymetrierne bliver korrelationen mellem ny nettoerosion og påvirkninger væsentligt bedre. For det første har følgende 11 variable ifølge Unscrambler en signifikant sammenhæng med den nye nettoerosion: Dage,  $H\_m0^{**1.5}$ ,  $H\_m0^{**2}$ ,  $H\_m0^{**2.5}$ ,  $H\_m0^{**3}$ ,  $H\_m0^{**2}k$ ,  $Va*H^{**2}$ ,  $(Va*H\_m0)^{**3}$ ,  $H\_m0^{**2.5}\cos2a$ ,  $H\_m0^{**2}\_str\_N$  og  $Sum\_H\_m0^{**2}\_str$ .

For det andet er det let at finde modeller med en god korrelation. Der er fundet følgende modeller med meget høje korrelationskoefficienter:

Med 1 PC og 1 variabel $H_{m0}^{**2}$ er korrelationen på	0,939
Med 2 PC og 2 variable $H_{m0}^{**1.5}$ og $H_{m0\_2\_str\_off}$ er korrelationen på	0,976
Med 2 PC og 3 variable $H_{m0}^{**2}$ , $H_{m0}^{**1,5}$ og $Vah^{**2}\sin$ er korrelationen på	0,987
Med 2 PC og 17 variable er korrelationen på	0,990

Modellen med 3 variable er vist på tegn. nr. 7.8 og modellen med 17 variable på tegn. nr. 7.9.

## 7.8 Anvendelse af A/E-metoden på enkeltlinier

Et interessant spørgsmål er, om A/E-metoden kan bruges til korrektion af enkeltlinier vinkelret på kystlinien for ensidige fejl. Dette spørgsmål var aktuelt i foråret 2005, da Kystdirektoratet ønskede at vurdere effekten af orkanen den 8. januar 2005 på Fællesaftalestrækningen på grundlag af en opmåling i kun 9 tilfældigt udvalgte linjer.

Inden der går i detaljer med dette spørgsmål, er der tre kendsgerninger fra tidligere undersøgelser, der bør nævnes. Det er velkendt, at tilfældige GPS-fejl er næsten konstante i den tid, det tager at pejle en enkelt linie. Det betyder, at de velkendte GPS-fejl, der normalt betragtes som tilfældige fejl, bliver systematiske fejl, og standardafvigelsen på de systematiske fejl bliver derfor ca. 6 cm, når vi ser på en enkelt linie. For det andet er det som tidligere nævnt kendt fra Nourtec, at både erosion og aflejring i et mindre område kan være positivt korreleret med påvirkningerne. For det tredje er det i Nourtec påvist, at udviklingen i den enkelte linie på trods af standardafvigelsen er fastlagt med meget stor sikkerhed, når der foreligger 19 målinger.

For at undersøge om metoden kan benyttes på enkeltlinier, er erosionen over de 6 år i hver af de 16 linier vinkelret på kystlinien i naturligt referenceområde beregnet. Som forventet er der aflejring i nogle af linierne, fordi perioden er så kort. Det betyder, at hvis man ønsker at forudsige udviklingen i den enkelte linie, skal forholdet mellem  $\text{sum}(\text{aflejring})/\text{sum}(\text{erosion})$  for hver enkelt linie naturligvis beregnes for perioden, idet nogle linier har et forhold, der er større end 1,0 (aflejring), og andre linier har et forhold, der er mindre end 1,0 (erosion). Hvis man derimod på grundlag af måling af en enkelt linie ønsker at beregne den totale erosion i området, skal det tidligere beregnede forhold mellem  $\text{sum}(\text{aflejring})/\text{sum}(\text{erosion})$  på 0,94 benyttes.

Først er det valgt at undersøge sammenhængen mellem den gamle nettoerosion i de enkelte linier og de beregnede påvirkninger. Denne sammenhæng er dårlig og tilsyneladende tilfældig. Den variabel, der de fleste gange har størst korrelation med nettoerosionen, er  $Vah^{**3}\sin$ .  $Vah^{**3}\sin$  er den mest betydende variabel i 6 ud af 16 linier. Efterfølgende er der set på den nye nettoerosion beregnet ud fra den antagelse, at forholdet mellem aflejring og erosion er 0,94.

I denne undersøgelse er  $Va^{**3}$  den mest betydende variabel i 9 ud af 16 linier, og  $(Va^*H\_m0)^{**3}$  er den næstmest betydende variabel i disse 9 linier. I yderligere 4 linier er  $(Va^*h\_m0)^{**3}$  den mest betydende og  $Va^{**3}$  den næstmest betydende variabel. Dette betyder, at en væsentlig del af udviklingen kan beskrives ved hjælp af  $Va^{**3}$  og  $(Va^*H\_m0)^{**3}$  i 13 linier ud af 16.

Hvis alle linier og alle perioder dvs.  $16 \cdot 18 = 288$  samples skal beskrives med en model, fås en korrelation på 0,84, se tegn. nr. 7.10. Af tegningen fremgår det, at næsten alle variable har en signifikant sammenhæng med nettoerosionen i de enkelte linier. Det er bemærkelsesværdigt, at netop  $Vah^{**3}sin$ , der er mest korreleret med den gamle nettoerosion, ikke har en signifikant sammenhæng med den nye erosion.

Beregning af erosionen på den gamle måde og ved hjælp af en linie kan variere fra en aflejring på  $1.530.000 \text{ m}^3$  til en erosion på  $2.332.000 \text{ m}^3$ . På den nye måde og ved hjælp af en enkelt linie kan erosionen variere fra  $458.000 \text{ m}^3$  til  $779.000 \text{ m}^3$ . Da erosionen i området er ca.  $500.000 \text{ m}^3$  ses, at den nye metode giver et væsentligt bedre bud på den totale erosion end den gamle metode.

Dette betyder, at vurderingen af den totale erosion på den centrale del af vestkysten på grundlag af opmåling af få linjer kan forbedres væsentligt, hvis forholdet mellem aflejring/erosion beregnes for de enkelte hovedstrækninger, og dette forhold efterfølgende benyttes for de enkelte linier.

## 7.9 Konklusion

Den gennemførte analyse er den første på grundlag af mængder, der er beregnet ud fra bathymetrier, der er korrigeret ved hjælp af A/E-metoden. Resultaterne er meget lovende, og med den gode sammenhæng mellem påvirkninger og nettoerosion burde det være muligt at finde effekten af f.eks. fodringer. Formålet med at undersøge naturligt referenceområde var netop at finde gode sammenhænge mellem påvirkningerne og nettoerosionen.

Antagelsen om, at forholdet mellem aflejring og erosion er konstant for et område, er naturligvis en forudsætning, der har nogle begrænsninger. Hvis der kun er transport parallelt med kystlinien, anses forudsætningen for at være korrekt. Hvis transporten parallelt med kystlinien har et næsten konstant forhold til transporten vinkelret på kystlinien, anses forudsætningen også for korrekt. Er derimod transporten vinkelret på kysten uafhængig af transporten på langs, og der flyttes store mængder fra et sted i profilet til et andet sted i profilet, er forudsætningen ikke opfyldt. Det kunne konkret undersøges, hvordan langs- og tværtransporten varierer fra periode til periode.

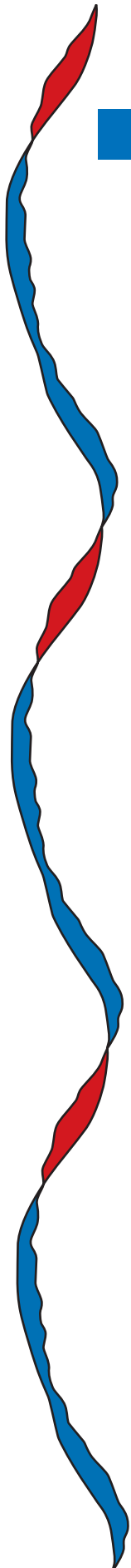
Bortset fra forholdene under og efter storme, hvor der sker en generel erosion og derefter en genopbygning af stranden, er der ikke noget, der tyder på, at der flyttes store mængder fra et sted i profilet til et andet sted i profilet. Den almindelige antagelse er, at sandet flyttes

søværts under storm og landværts under de mere rolige forhold efter stormen. Hypotesen er, at sandet, der eroderes under storm, forsvinder i materialvandringsretningen, og at opbygningen efter stormen skyldes, at der på dette tidspunkt findes sand overalt i den ydre del af profilet.

Det er ikke lykkedes at finde udtryk, der giver en god beskrivelse af de meget store mængdeændringer, som målingerne viser. Derfor antages det, at det med den nuværende målenøjagtighed er bedre at korrigere målingerne ud fra antagelsen om, at forholdet mellem aflejring og erosion er konstant, end at benytte målingerne direkte uden korrektion.

Såfremt der kan opnås tilsvarende resultater for vestkystprofiler, vil den nye metode til beregning af nettoerosionen få meget stor betydning for vurderingen af forskellige former for kystbeskyttelse.

Selvom det altså formentlig bliver muligt at korrigere målingerne for ensidige målefejl, skal man naturligvis fortsat arbejde med at forbedre opmålingsprocedurerne, så fejlene bliver så små som muligt.



## Bovbjerg Klint og Ndr. Holmsland Tange

### 8.1 Indledning

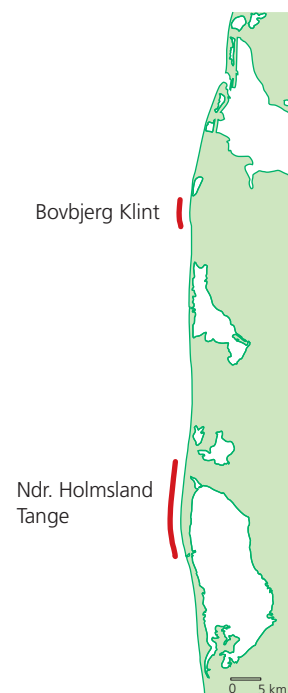


Fig. 8.1 Beliggenhedsplan

Den udviklede metode til korrektion af bathymetriske målinger er blevet anvendt på Husby-strækningen, og den efterfølgende korrelationsanalyse har vist en fin sammenhæng mellem påvirkninger og nettoerosion. For at få bekræftet at de lovende resultater ikke er en tilfældighed, er det valgt at anvende metoden på de to hovedstrækninger Bovbjerg Klint og Ndr. Holmsland Tange, se fig. 8.1. For begge strækninger gælder, at der næsten ikke er blevet udført fodring. I denne henseende ligner de Husby-strækningen.

### 8.2 Korrektion af vestkystmålingerne

Korrektionen er gennemført for hver af de to strækninger som helhed. En årgangs vestkystprofiler er altså blevet behandlet, som var det en lokalpejling på den pågældende strækning. Det er klart, at der findes andre måder at korrigere vestkystmålingerne på. Der kunne deles op efter opmålingsdato eller efter, hvilke referencestationer/vandstandsstationer der var benyttet. En mulighed ville også være at dele op efter, hvilken pejlebåd der havde målt en strækning. Her er det altså valgt at dele Vestkysten svarende til de traditionelle hovedstrækninger, men det anbefales i kommende projekter at teste, hvilken opdeling

der giver de bedste resultater. En test af forskellige opdelinger vil samtidig være en test af, hvad der bidrager mest til de systematiske fejl.

De beregnede A/E-forhold er 0,71 og 0,88 for henholdsvis Bovbjerg Klint og Ndr. Holmsland Tange. Hvis man ser på den ydre del af profilet, er der flere sandbølger ved Bovbjerg Klint end på Ndr. Holmsland Tange jfr. »Variationer i kystprofilen« (Kystdirektoratet, 2005). Man skulle derfor forvente, at A/E-forholdet var større ved Bovbjerg end ved Ndr. Holmsland Tange. Det er imidlertid sådan, at ca. 50% af det område, der måles med de vinkelrette vestkystlinier, ligger landværts sandbølgeområdet. Ifølge rapporten »Sedimentbudget Vestkysten« (Kystinspektoratet, 2001c) består den indre del af profilet ved Bovbjerg af moræneler med 80% sand, medens den indre del af profilet på Ndr. Holmsland Tange består af 100% sand. Heraf ses, at der ikke er modstrid mellem de beregnede A/E-forhold og de geologiske forhold.

Efter korrektionen er mængdeudviklingen på de to strækninger genberegnet. På fig. 8.2 er de nye og gamle mængder vist for de to strækninger. For Bovbjerg Klint er den maksimale forskel mellem største og mindste erosion 1,9 mio. m<sup>3</sup> inden korrektionen, og efter korrektionen er forskellen ændret til 0,4 mio. m<sup>3</sup>. For Ndr. Holmsland Tange er de tilsvarende tal 7,1 mio. m<sup>3</sup> og 0,7 mio. m<sup>3</sup>.

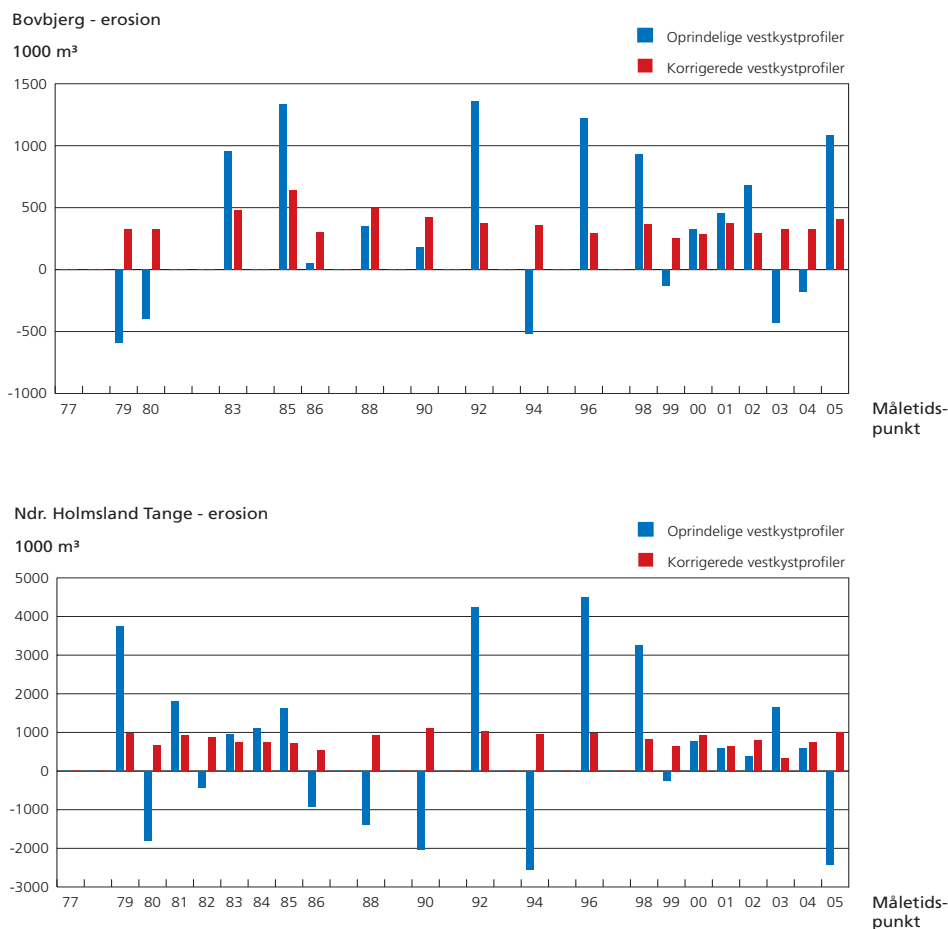


Fig. 8.2 Mængdeudviklingen med originale og korrigerede vestkystprofiler

## 8.3 De anvendte variable

De anvendte variable i analysen fremgår af tabel 8.1.

Variabelnr.	Beskrivelse
1	Strækningens længde
2	Antal bølger
3	Antal dage
4	$Hm0 * Hm0 * \sin 2a$ (strøm og bølger mod syd)
5	$Hm0 * Hm0 * \sin 2a$ (strøm og bølger mod nord)
6	$Hm0 * Hm0 * \sin 2a$ (strøm og bølger modsat hinanden)
7	$Hm0 * Hm0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger mod syd)
8	$Hm0 * Hm0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger mod nord)
9	$Hm0 * Hm0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger modsat hinanden)
10	$Hm0 * Hm0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger mod syd) i kuling eller storm
11	$Hm0 * Hm0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger mod nord) i kuling eller storm
12	$Hm0 * Hm0 * \text{strøm}$ (strøm og bølger modsat hinanden) i kuling eller storm
13	$Hm0 * Hm0$
14	Fodring

Tabel 8.1 De anvendte variable

Det ses, at der med variabel 4-12 kan skelnes mellem nord- og sydgående langstransport samt indad- og udadrettet tværtransport.  $Hm0 * Hm0$  er medtaget, da den gav gode resultater på Husby-strækningen.

## 8.4 Unscrambler-analyse

En kørsel med Unscrambler viser, at strækningens længde har størst betydning for erosionen, jfr. tegn. nr. 8.1. Det er indlysende, at strækningens længde bør have stor betydning, men det er nyt i forhold til kørslerne med de originale bathymetriske data, at kørslen viser, at strækningens længde har en signifikant indflydelse på erosionen, jfr. tegn. nr. 8.2. Den næstmest betydende variabel er  $Hm0 * Hm0 * \text{strøm}$  for vind over 14 m/s mellem vest og nord. Den tredje mest betydende variabel er  $Hm0 * Hm0 * \text{strøm}$  for vind mellem vest og nord, medens den fjerde mest betydende er  $Hm0 * Hm0$ . Af score plottet tegn. nr. 8.3 ses, at alle samples fra Ndr. Holmsland Tange har en positiv PC2-værdi, mens alle samples fra Bovbjerg Klint har negative værdier. Det betyder, at der enten skal medtages parametre, der kan adskille Bovbjerg Klint og Ndr. Holmsland Tange, eller der skal laves en model for hver strækning.

Det er valgt at opstille en model for hver strækning, og det undersøges, om det er de samme variable, der har stor betydning for udviklingen i de to områder.

Når Bovbjerg Klint-kørslerne undersøges for variable, der har en signifikant indflydelse på udviklingen, ses, at antallet af bølger, der principielt også angiver tiden, har størst betydning for udviklingen.

$H_{m0} * H_{m0}$  kommer som den tredje mest betydende variabel, tegn. nr. 8.4 og 8.5. At tiden har stor betydning, antages at skyldes, at moræneler er meget hårdt og ikke bliver fjernet under selve stormen, men langsomt bliver blødgjort i overfladen af dyr og mekanisk påvirkning af vand og sand.

For Ndr. Holmsland Tange ses ifølge tegn. nr. 8.6 og 8.7, at følgende 6 variable har en signifikant sammenhæng med erosionen:

$H_{m0} * H_{m0} * \sin 2a$  (strøm og bølger mod syd)  
 $H_{m0} * H_{m0} * \text{strøm}$  (strøm og bølger mod syd) i kuling eller storm  
 $H_{m0} * H_{m0}$   
 $H_{m0} * H_{m0} * \sin 2a$  (strøm og bølger modsat hinanden)  
Antal bølger  
Tiden

At  $H^2$  har en signifikant indflydelse på udviklingen på tre forskellige strækninger, er meget lovende, og det er også et vægtigt argument for, at korrektionen af bathymetrierne ud fra antagelsen om et konstant A/E-forhold er korrekt.

Det er klart, at det sandsynligvis er muligt at korrigere vestkystmålingerne bedre, end det er gjort her. Det vil formentlig også være muligt at skabe bedre modeller end de modeller, der er vist i dette afsnit. Med opdagelsen af A/E-forholdets betydning og anvendelsesmuligheder så sent som i juni 2005 har det imidlertid ikke været muligt at nå videre inden for projektets tidsrammer.

En af grundene til, at det må være muligt at udvikle bedre udtryk for påvirkningerne, er, at alle de benyttede udtryk er udviklet ud fra den opfattelse, at ethvert område både er udsat for store erosioner og store aflejringer. Med de nye korrektioner af bathymetrierne vil der altid være erosion i et større område. Man kunne muligvis forbedre bathymetrierne yderligere ved at undersøge, om de erosioner, der passer dårligst henholdsvis bedst, adskiller sig f.eks. med hensyn til, hvor mange forskellige dage der er anvendt til opmålingen.

De nye modeller repræsenterer en kraftig forbedring i forhold til de første på grundlag af ukorrigerede bathymetrier. Tidligere kunne erosionen i en periode ved Bovbjerg Klint svinge fra -0,5 mio.  $m^3$  til 1,4 mio.  $m^3$ . Efter korrektion varierer erosionen kun inden for 0,3 mio.  $m^3$  og 0,7 mio.  $m^3$ . Da modellen kan forklare 30% af variationen, er usikkerheden reduceret til  $(0,7 - 0,3) * 0,7 = 0,28$  mio.  $m^3$  eller  $\pm 0,14$  mio.  $m^3$ . Det anses for sandsynligt, at usikkerheden kan reduceres yderligere, hvis der bruges mere tid på at forbedre modellen.