

2016

geoviden

GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 02



**Geologi på
tværs af kysten**

Geologi på tværs af kysten

Landskabsformerne og de geologiske jordarter, altså den geologi, som vi ser på landjorden, er i princippet den samme, som den vi finder på havbunden. Hvis man skruede tiden tilbage til Fastlandstiden, der sluttede for små 9000 år siden, ville man have set ét sammenhængende landskab, kun gennemskåret af enkelte, større floder, som afvandede landet og den baltiske issø. Men siden da er ismasserne smeltet helt og havet er steget så meget, at det er trængt ind i det danske område og har oversvømmet meget store dele af det tidligere land, som dermed er blevet skjult for det blotte øje og samtidig blevet vanskeliggjort tilgængeligt for en geologisk kortlægning.

I mange år har det været ønskeligt at få en geologisk kortlægning, som hang sammen på tværs af kysten. På denne måde kan vi opnå en bedre og mere sammenhængende indsigt i landskabets dannelse og vi kan få et væ-

sentligt bedre værktøj i ressourceforvaltning, naturbeskyttelse osv. Denne sammenhæng har været vanskelig at etablere, fordi det er sværere og dyrere at kortlægge til havs, hvorfor detaljeringsgraden dér også har været mindre end på landjorden. Uligheden mindskes dog i takt med at nye kortlægningsmetoder tages i brug.

I dette temanummer om geologisk kortlægning på tværs af kysten kan du læse om de kræfter, der styrer kystens beliggenhed; om den 'traditionelle' kortlægning til lands og til vands; om moderne kortlægningsmetoder, der muliggør en kortlægning på tværs og binder den oversøiske og undersøiske verden sammen; om marin kortlægning, der har været med til at afsløre, hvor kysten lå i stenalderen, samt om, hvordan man nu til dags praktiserer kystbeskyttelse ved at flytte rundt på sandet i kystzonen.



Naturlige årsager til kystens forskydning

Jens Morten Hansen
Statsgeolog, GEUS
jmh@geus.dk

Ikke kun havspejlet bevæger sig op og ned på grund af store, langvarige klimasvingninger. Det gør undergrunden også, men med en betydelig træghed i forhold til havspejlets bevægelse. Den aktuelle mængde af vand i oceanerne er bestemt af, hvor meget ferskvand, der er bundet i iskalotter, gletsjere, søer og i kontinenternes grundvand. Samtidig er undergrundens lodrette bevægelser påvirket af ændringer i is- og ferskvandsmassernes vægt. Når mængden af is- og vandmasser på landområderne falder, vil kontinenterne hæve sig – og omvendt. Og når vægten af oceanernes vandmængde samtidig stiger, vil oceanbunden synke – og omvendt.

De overordnede mekanismer

Jordens form reagerer som en bold, se figur 1. Når man trykker ét sted, buler den ud et andet sted. Men kontinenternes og oceanbundenes stenmaterialer reagerer langt mere trægt end vandmasserne på ændringer af is- og vandbelastningen. Vand er som bekendt flydende, mens undergrundens varme stenmasser kun 'flyder' umådelig sejt. Landhævningen og hav-

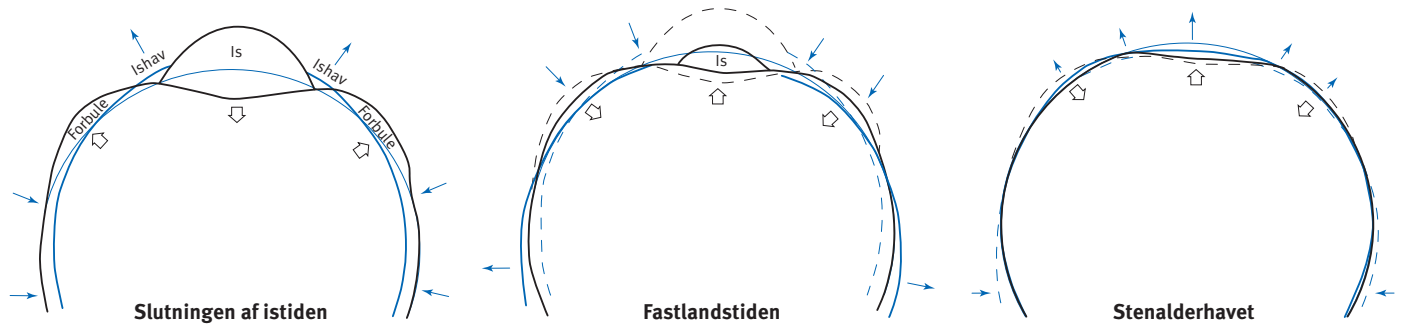
bundsindsynkningen efter sidste istid er således langt fra tilendebragt efter de 15.000 år der er gået, siden de skandinaviske, sibiriske og nordamerikanske iskalotter begyndte at smelte og fylde vand på oceanerne.

På grund af oceanernes og den faste undergrunds forskellige reaktionstider på store klimaforandringer har beliggenheden af den danske kystlinje ændret sig radikalt flere gange si-

den sidste istid. Timingen af disse forskydninger viser, at der ikke er en umiddelbar, men en forsinket eller stærkt usymmetrisk sammenhæng mellem klima og vandstand. Danmarks form og størrelse ændrer sig hele tiden, men nogle af årsagerne til vandstandsændringerne ligger årtusinder tilbage i tiden.

Kystens geografiske forskydning

Kystens geografiske (vandrette) forskydning er nogle gange meget langsom og i andre perioder hurtig. Omkring det Sydfynske Øhav og Smålandsfarvandet skrumper landet, mens der på østsiden af Skagens Odde, i Østvendssyssel og det østlige Himmerland sker tilvækst



Figur 1. Principskitse for jordskorpens og havets lodrette bevægelser under nedsmeltning af en stor iskappe, dvs. fra slutningen af istiden for 14.000 år siden over Fastlandstiden for omkring 10.000 år siden til stenalderhavets tid for 6.000 år siden. Fed sort linje viser beliggenheden af Jordens skorpe og store sorte pile jordskorpens forskydningsretning. Fed blå linje viser havoverfladens faktiske beliggenhed og blå pile viser havoverfladens forskydningsretning. Stiplede linjer viser havets højde i forudgående situation. Tynd blå linje viser, hvor havet ville stå, hvis hele Jorden var havdækket og der ikke havde været istider (geoiden).

Illustration: Annabeth Andersen, GEUS. Efter J.M. Hansen, GEUS.

af nyt land. På Læsø er landtilvæksten størst, ca. 2 meter om året gennem de sidste årtusinder. Her findes også Danmarks hurtigste landhævning, i nutiden 2,3 mm om året, mens havbunden i det Sydfynske Øhav og Smålandsfarvandet sænker sig med op til 1 mm om året. Også i Vadehavet sker der en indsynkning af undergrunden, men her kompenseres indsynkningen med aflejring af marsksedimenter.

Kystforskydningen skyldes således ikke kun vekselvirkningen mellem havets nedbrydende og opbyggende processer: erosion, omlejring og sedimentation. Det er lige så vigtigt, at spillet mellem ændringer af undergrundens og havets højde er i vedvarende forandring.

Summen af disse to aktører – undergrundens og havets lodrette bevægelser – afgør helt overordnet, hvor landet vil vokse eller skrump. Hvor undergrunden hæver sig, vokser landet, og hvor undergrunden synker, skrumper landet. Andre faktorer såsom de fremherskende vind- og stormretninger kan lokalt overdøve disse forhold, fx langs det meste af Jyllands og Sjællands nordvestkyster.

Havspejlets lodrette bevægelser

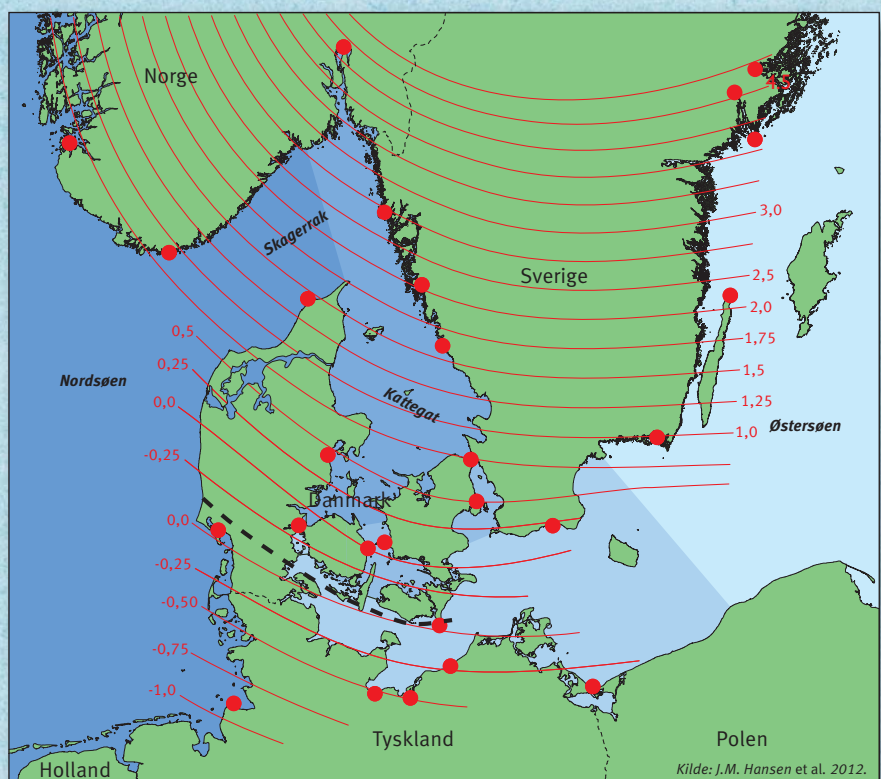
Havspejlets lodrette bevægelser har ikke altid været de samme overalt i oceanerne gennem de forskellige perioder efter sidste istid – dvs. gennem de sidste 14.000 år. Set over 'kun' 100 år er det mest afgørende, hvor meget vand, der findes i oceanerne, og hvor meget ferskvand, der er bundet i de arktiske egnes iskalotter, bjergenes gletsjere, kontinenternes søer og som kontinentalt grundvand. Det vil sige en fordeling, der i høj grad er styret af klimatiske ændringer. Men set over 1.000 år eller mere kan der være store forskelle fra sted til sted.

De ændringer, der sker pga. den globale, klimatiske omfordeling af is og ferskvand, styrer den mere 'kortsigtede' vandstand, mens undergrundens mere træge reaktion på disse omfordelinger styrer den 'langsigtede' udvik-

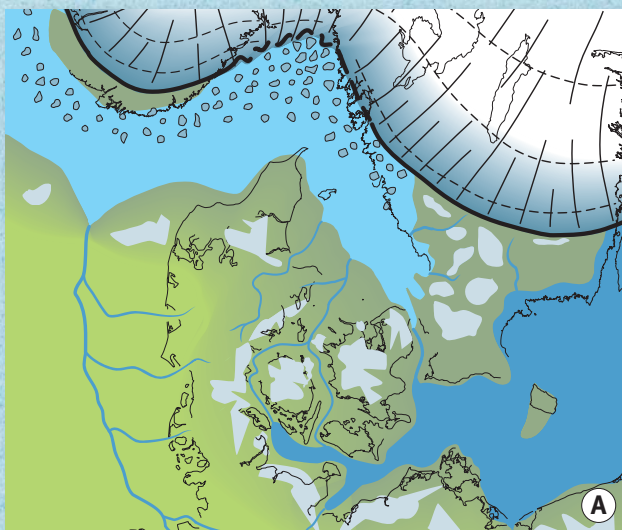
ling. Hvis fx isen på Grønland smelter og isen på Antarktis er konstant, vil Grønland og havbunden omkring Grønland hæve sig ganske langsomt og derved fortrænge havvandet. På langt sigt vil resultatet af en skrumpende indlandsis på Grønland være, at vandstanden paradoksalt nok falder omkring Grønland.

Samtidig vil afsmeltningen på Grønland medføre, at tyngdekraften på den nordlige halvkugle svækkes i forhold til tyngdekraften på den sydlige halvkugle. Resultatet vil være, at en del af den nordlige halvkugles vandmasser trækkes sydover, og at vandstanden derfor stiger omkring Antarktis, mens vandstanden falder på den nordlige halvkugle.

Disse forhold er først videnskabeligt erkendt i de seneste år. Forskerne fokuserer derfor nu på forskelle mellem fjern- og nærdistance-effekter og på forskelle mellem kort- og langtidseffekter af klimatiske forandringer. Paradoksalt nok viser fjerneffekterne sig relativt hurtigt. De er direkte virkninger af omfordelte is- og vandmængder og deraf afledt ændring af Jordens tyngdefelt. De største næreffekter derimod finder sted med en betydelig forsinkelse. De er virkninger af træge, lodrette forskydninger af kontinenterne og oceanbunden som følge af ændringer i is- og vandbelastningen. Forståelsen af nutidens vandstandsændringer omkring fx Danmark kan



Figur 2. Jordoverfladens bevægelseshastigheder (røde kurver). Tallene angiver højdeforskydningen i millimeter pr. år. Røde punkter viser beliggenheden af 26 målestationer for vandstand, hvor forskellen mellem jordskorpens og havets lodrette bevægelser har været målt i mere end 100 år. Fed stiplede linje angiver en grænse, hvor bevægelserne nord og syd for linjen ikke følger samme mønster. Bemærk der er to 0-linjer.



Kilde: Efter Houmark-Nielsen 2005.



Kilde: Efter Mathiassen 1997.

Figur 3. A: Havets (lyseblåt) og landets (grønt) udbredelse omkring Danmark, da isen (hvid) var smeltet tilbage til Norge og Sverige (Fastlandstid).

B: Havets og landets udbredelse under Litorinahavets (stenalderhavets) maksimale udbredelse for 6.000 år siden. Mørkeblåt er ferskvandssøer og floder.

derfor ikke kun bygge på simple betragtninger over afsmeltningen på Grønland og andre steder, men skal også inddrage processer, der foregik for årtusinder siden og måske på den modsatte side af Jorden.

Undergrundens lodrette bevægelser

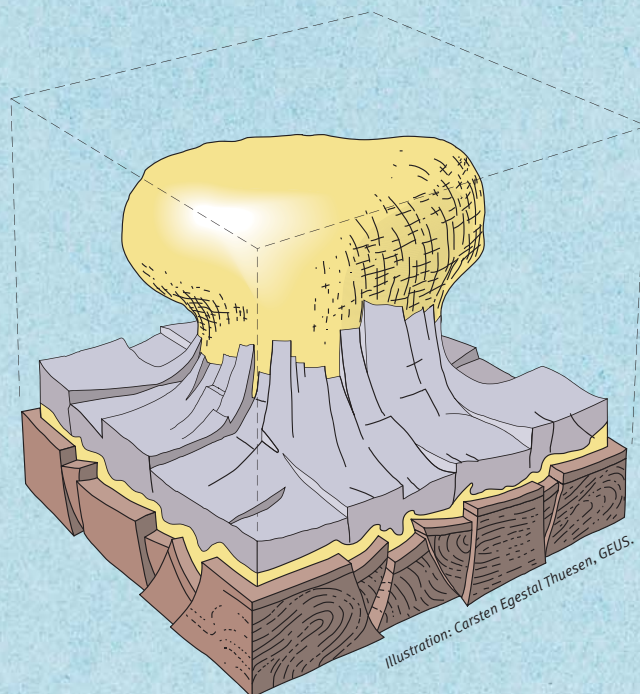
Undergrundens bevægelser styres af den langsomme flydning af delvist smeltede stenmasser dybt i Jordens skorpe og kappe. Undergrundens lodrette bevægelser er mere lokale end havspejlets bevægelser, men kan sted- og tidvist være meget større. I egne som Skandinavien, der under sidste istid var dækket af flere kilometer is, hæver landet sig, fordi vægten af al den is er forsvundet. I Danmark, der kun var delvist isdækket, betyder det, at det nordøstlige Danmark hæver sig, mens de sydvestlige egne sænker sig, se figur 2. Disse højdeændringer er med andre ord en forsinket effekt af de store klimaforandringer, som sidste istid og den nuværende varmetid er udtryk for.

Ved Frederikshavn betød forskellen mellem disse bevægelser, at ishavet for 12–14.000 år siden stod 70 meter højere end nu, og at stenalderhavet for 6.000 år siden stod 12 meter højere end nu. I den såkaldte Fastlandstid mellem disse to 'højvandsperioder' stod havet for 10.000 år siden mindst 23 meter lavere end nu i Storebælt, mens havet i det nordlige Kattegat i samme tidsrum kun stod 2–5 m under nuværende niveau. Landet hæver sig mest mod nordøst og tipper derfor mod sydvest samtidig med at havspejlet kører op og ned. Fra sted til sted og fra tid til anden er der derfor nogle meget betydelige forskelle i kystens beliggenhed, se figur 3A og B.

Lokale tektoniske processer

Dertil kommer tektoniske processer, der helt lokalt og regionalt kan give store lodrette terrænbewægelser. Det gælder bl.a. de pladetektoniske grænser som fx Nordamerikas vestkyst, hvor oceanbunden skubbes ind under kontinenterne. I Danmark ses de største lokale forskydninger, hvor der findes salthorste i undergrunden. Salthorste har form som 5–10 kilometer høje og 5–10 km brede propper af stensalt omgivet af andre og tungere bjergarter.

ter. På grund af denne forskel i massefylde hæver landet sig over selve salthorsten, mens områderne i horstens omegn synker, fordi stensaltet ganske langsomt flyder herfra ind i bunden af salthorsten. Der er særligt mange salthorste i de vestlige Limfjordsegne. Her kan man se, at den helt overordnede fordeling af hav og land er styret af salthorstenes beliggenhed (land) og beliggenheden af de områder dybt i undergrunden, hvorfra salt flyder ind i salthorsten (hav), se figur 4.



Figur 4. Principskitse af en salthorst, dvs. op til 10 km høje 'propper' af relativt let stensalt, der som en 'prop i vandet' bryder gennem de overliggende, tungere lag. Landet hæver sig over selve salthorsten, mens havbunden sænker sig i omgivelserne, hvor stensaltet flyder ind i selve salthorsten. Lagene omkring salthorstens øvre del er fjernet, så man kan se horstens form. De vestlige Limfjordsegnes fordeling af land og hav er i væsentlig grad styret af områdets mange salthorste.

Marin kortlægning

Sara Skar
Maringeolog, GEUS
sbo@geus.dk

Steen Lomholt
Seniorrådgiver, GEUS
slo@geus.dk

De geologiske forhold, som vi kender så godt fra det danske landskab, fortsætter ud på havbunden, hvor de forsvinder for øjet under vandoverfladen. Den marine kortlægning er nøglen til vores viden om, hvordan geologien fortsætter på den vandækkede del af Danmark. De sidste 40–50 år er kortlægningen af havbunden intensivet, især til brug for råstofindustrien, men også til vurdering af de biologiske livsbetingelser for planter og dyr. Nye instrumenter gør os i dag i stand til at se havbunden næsten på samme måde, som vi kan se på landskaberne.

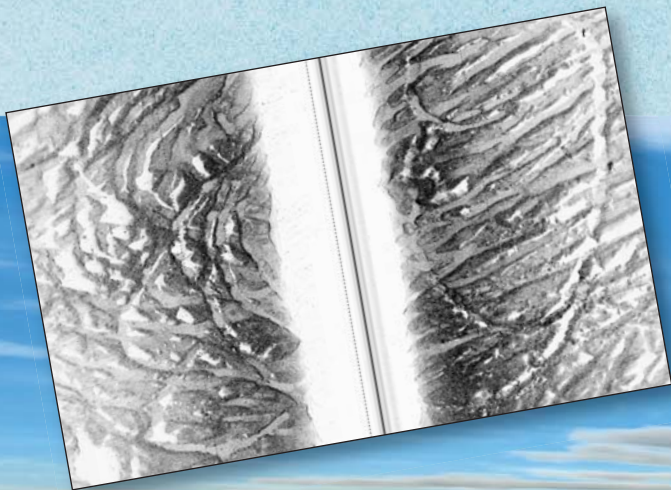
Behovet for viden om naturværdier, råstoffer og havbundssedimenter har været stigende i takt med, at der er kommet flere aktiviteter og mangeartede interesser på havområdet. Krav fra bl.a. EU om beskyttelse af den sårbare havbund, samtidig med at der foregår aktiviteter som fiskeri, råstofindvinding og opførelse af havmølleparker – kræver, at der er et højt vidensniveau om havbundens variation, opbygning og geologiske udvikling. Den marine kortlægning strækker sig langt tilbage i tid, hvor søopmåling er en af de ældste discipliner inden for marine undersøgelser. Tidligere bestod udforskningen af havene primært i at kortlægge kystlinjerne samt at bestemme dybderne i sejlrenderne. I løbet af 1920'erne blev ekkoloddet, som vi kender det i dag, taget i brug til søopmåling.

I dag sker kortlægning til søs vha. mange forskellige kortlægningsmetoder, fx seismiske. Et ekkolod sender korte lydbølger ned i havbunden, og det reflekterede signal opfanges igen på båden. I takt med den teknologiske udvikling findes der i dag en række avancerede sedimentekkolodder, hvor lydbølgerne trænger dybere ned i havbundens øvre lag, samt det såkaldte multistråleekkolod (multibeam), der giver informationer om både dybder og sediment i et bredt strøg på begge sider af skibet, mens det sejler. Dybden i lavvandede kystnære områder (ca. 0–5 m's vanddybde) kan nu også bestemmes vha. såkaldt 'grøn LiDAR' laseropmåling fra fly. Det kan du læse om på side 12–14.

Sidescan-sonar data giver et samlet billede af havbundens 'ruhed' og hårdhed. Lyden re-

flekteres forskelligt afhængigt af sedimentkarakteren. Derfor kan en sidescan-kortlægning fortælle, om havbunden består af dynd, sand, grus, sten, klippe, boblere osv., eller om den er begroet med muslinger eller ålegræs, se figur 1. Menneskeskabte strukturer som under søiske kabler, pipelines, vrage, sugehuller fra sandindvinding og spor efter fiskernes trawl kan også ses på disse data, se figur 2. På sandbund kan man ofte se sandbanker og ribbestrukturer, der vidner om retningen af sedimenttransporten. Mange af disse observationer er vigtige for at forstå den geologiske opbygning af havbunden, dens foranderlighed og fordelingen af bunddyr og planter. Sidescan-sonaren indgår som en vigtig del af den habitatkortlægning, EU-lovgivning forpligter Danmark til at udføre, som led i sikring af havenes gode miljøtilstand.

Havbundsoverfladen afspejler i mere eller mindre grad den underliggende geologiske dannelse. Strukturen og tykkelsesvariationen af de underliggende lag bliver kortlagt vha. seismiske metoder. Når man øger lydstyrken



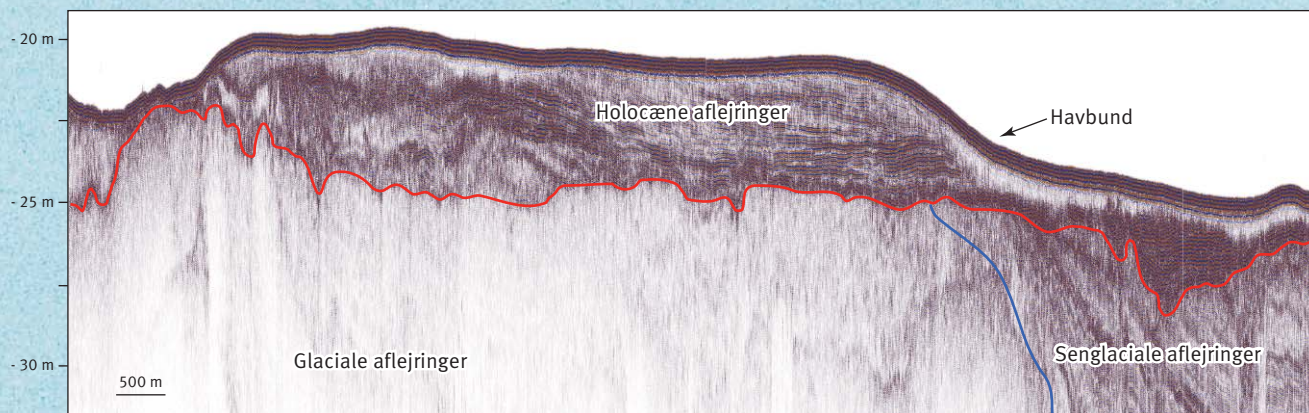
Figur 1. Et overblik over de akustiske og seismiske instrumenter, der anvendes ved marin kortlægning. Positionen bestemmes ud fra GPS signaler fra satellitter. Sidescan sonaren ses nedenfor (gul), mens de seismiske instrumenter trækkes tættere på skibet. Modificeret fra Geoviden nr. 2 2014.

Illustration: Carsten Egestal Thuesen, GEUS.

Figur 2. Sidescan sonar data, der viser spor på havbunden efter sandindvinding.



Multibeam



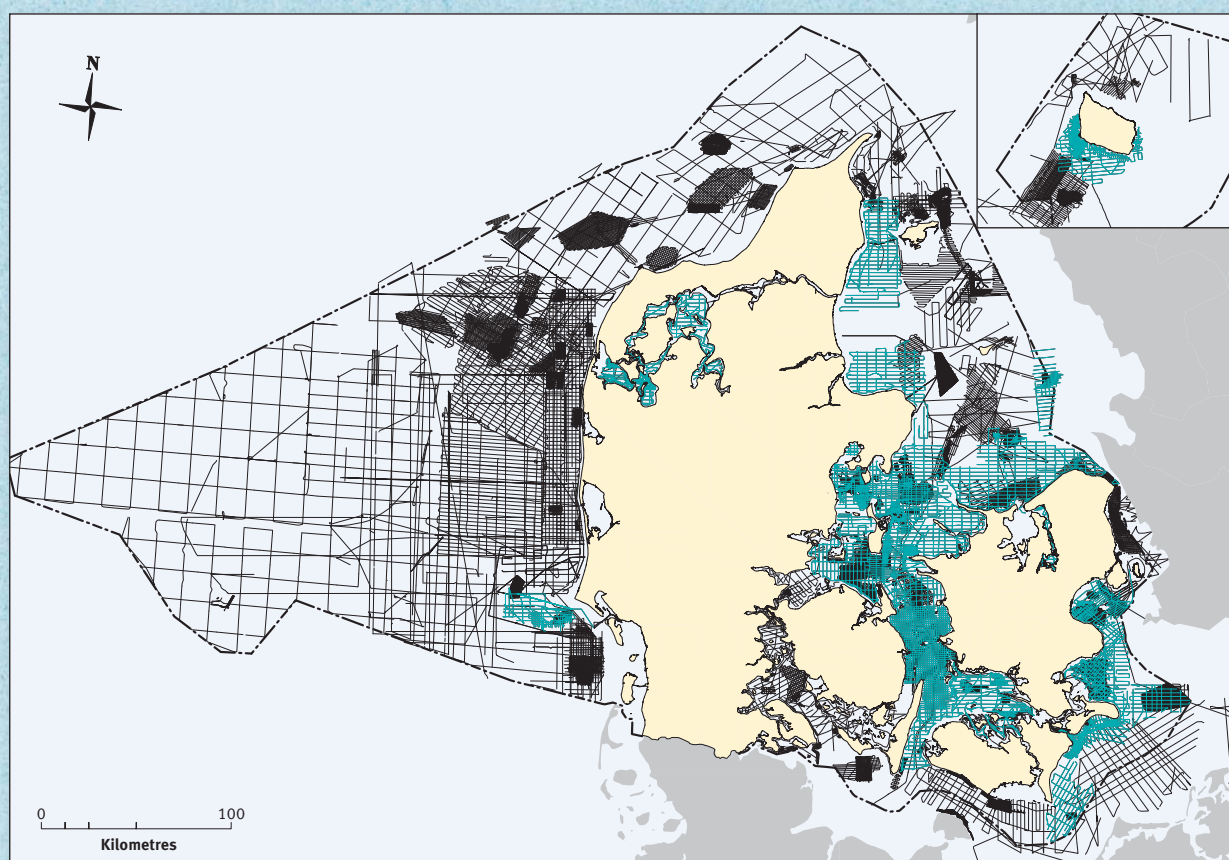
Figur 3. Seismisk profil, der viser et snit ned gennem havbunden og reflektorerne fra de underliggende lag. Nederst til venstre ses glaciale aflejringer, der til højre i profilet er afskåret af en kanal med senglaciale sedimenter. Øverst under havbunden ses Holocæne, yngre marine aflejringer.

og samtidig sænker frekvensen af signalet på lydkilden, trænger lydbølgerne dybere ned i havbunden og reflekteres fra underliggende lag. Denne form for akustik kaldes for den seismiske metode. Der findes en række forskellige seismiske instrumenter, derved hjælp af lydbølgernes refleksion fra laggrænserne i havbunden anvendes til geologisk kortlægning af alt fra få meters dybde (se figur 3) til olieselskabernes dybe seismik, der trænger flere kilometer ned i bunden.

For at validere den akustiske marine kortlægning og tolkningen af denne er det nødvendigt at indsamle bundprøver og lave borer. Ved habitatkortlægning optages desuden videoer af havbunden. Ved en kombination af seismiske profiler og dateringer fra borer kan man afgøre, om lagene i havbunden består af ældre sedimenter eller af sedimenter aflejret under de nuværende forhold. Man kan altså identificere områder med ældre aflejringer, og derved få informationer om tidligere tiders af-

lejringsforhold på stedet. Ligeledes vil ældre mere eller mindre udfyldte kanalstrukturer, flere tusind år gamle druknede kystdannelser eller flodmundinger kunne kortlægges vha. den seismiske metode.

Den marine kortlægning (se figur 4) giver således en bred vifte af viden om de undersøiske landskabers dannelse, nuværende miljøtilstand og mulige ressourcepotentiale.



Figur 4. Oversigtskort over de danske farvande der viser maringeologiske sejllinjer fra GEUS' MARTA-database. De blå sejllinjer er udført før 1990, mens de sorte sejllinjer er udført fra 1990 og frem til i dag.

Kilde: <http://data.geus.dk/geusmap/?mapname=marta#>

Geologisk kortlægning i et kystnært område – et eksempel fra Vadehavet

Flemming Jørgensen
Seniorforsker, GEUS
flj@geus.dk

Peter Sandersen
Seniorrådgiver, GEUS
psa@geus.dk

Anne-Sophie Høyer
Forsker, GEUS
ahc@geus.dk

Torben O. Sonnenborg
Seniorforsker, GEUS
tso@geus.dk

En omfattende kortlægning af Danmarks grundvandsressourcer har i de seneste par årtier gjort os meget klogere på den øvre undergrund. Kortlægningen af jordlagenes opbygning har været afgørende for forudsigelsen af grundvandets forekomst og strømning. Kortlægningen har vist os, at undergrunden er mere kompleks end hidtil antaget, men heldigvis har det kunnet lade sig gøre at kortlægge mange detaljer.

Naturgivne omstændigheder betyder, at geologisk kortlægning ikke kan foregå på samme måde til havs og til lands. Til havs benyttes forskellige former for akustiske metoder, som giver gode og præcise oplysninger om jordlagenes strukturelle opbygning. Normalt sker det kun langs målelinjer, der har en forholdsvis stor indbyrdes afstand, men i nogle tilfælde sejles linjerne så tæt, at der kan kortlægges

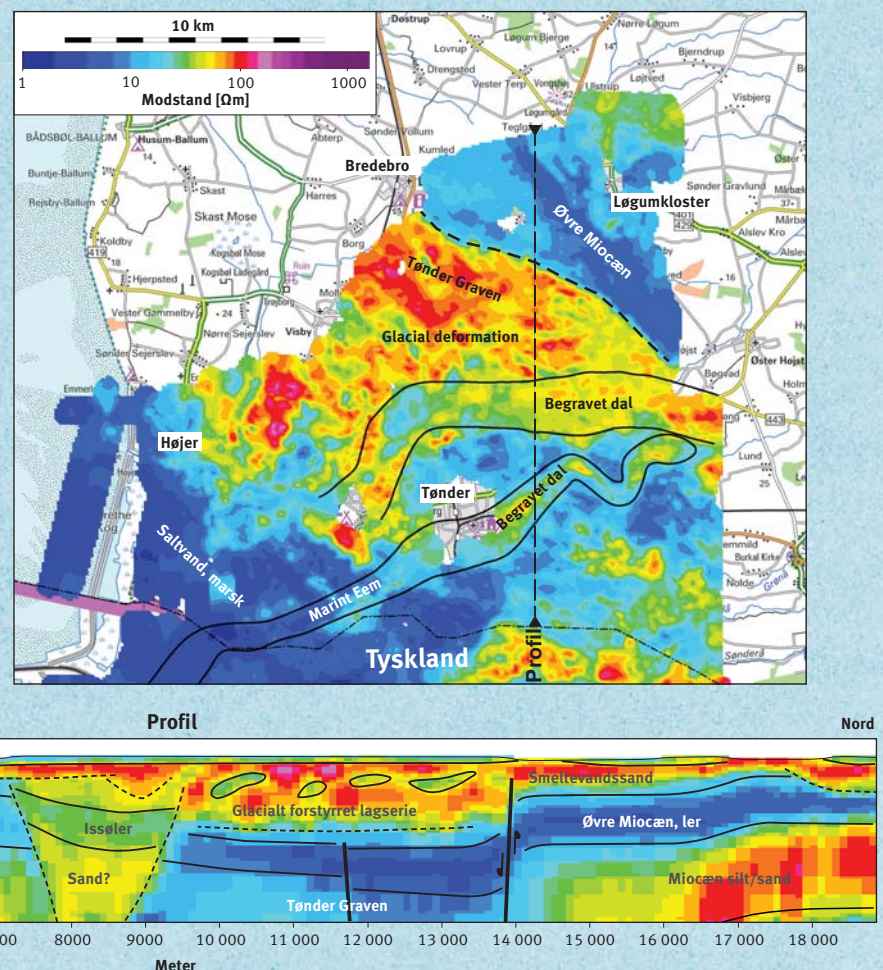
rumligt med 3D seismik. For at vide, hvad de enkelte lag består af, er det nødvendigt at bore i havbunden. Desværre er der forholdsvis langt mellem borer til havs, hvorfor tolkningen af de akustiske data kan være en stor udfordring.

På land er der derimod udført mange borer i tidens løb, og sammen med informationer fra klinger og udgravninger har man gen-

nem tiderne forsøgt at forstå og modellere undergrunden. Mod slutningen af 1990'erne blev der iværksat en omfattende, især geofysisk, kortlægning af landets grundvandsressourcer, og denne kortlægning har vist, at den geologiske opbygning mange steder i landet er mere kompleks, end boredata alene har kunnet afsløre. Kortlægningen har således øget forståelsen af landets undergrund.

I det følgende vises et eksempel på en kortlægning fra et område omkring Tønder (figur 1), hvor der bl.a. er blevet indsamlet fladedækkende SkyTEM-data og seismiske data

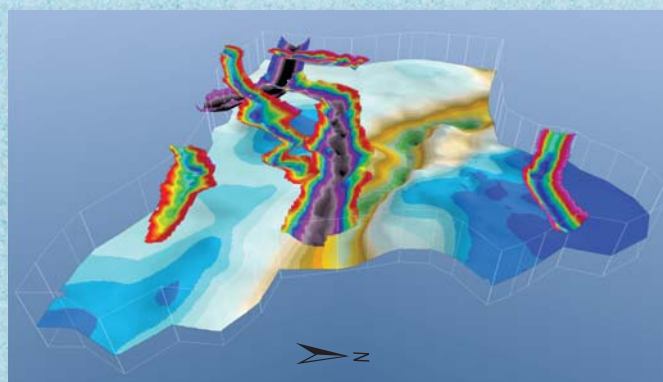
Figur 1. Til højre ses et horisontalt snit gennem SkyTEM-data 47,5 meter under havniveau. Nederst ses et vertikalt profilsnit gennem data. Beliggenheden af profilet er vist på kortet. Der er påført tolkninger af geologien.



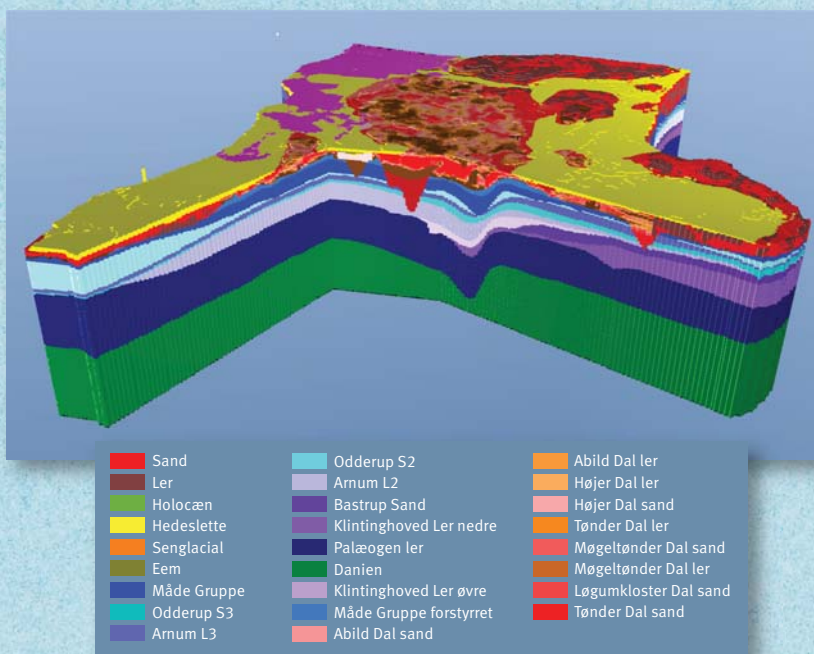
Seismik og SkyTEM

De mest anvendte geofysiske metoder til grundvandskortlægning er seismik og SkyTEM. Seismik foregår ved, at der fra en stor vibrator udsendes lydbølger i undergrunden. Disse lydbølger reflekteres fra jordlagene, og refleksionerne måles med udlagte mikrofoner på jordoverfladen. SkyTEM er en elektromagnetisk metode, der opmåles med en langsomt flyvende helikopter. Jordlagenes elektriske modstand måles og omsættes ved tolkning til geologi. SkyTEM metoden er beskrevet mere detaljeret i Geoviden nr. 3 fra 2013, s. 6–7. En 3D geologisk model er en computermodel, der rumligt beskriver de geologiske forhold. Grundvandsmodellen baserer sig på den geologiske model og giver mulighed for at udregne, hvordan og hvorfra grundvand eksempelvis strømmer frem til en indvindingsboring.

Figur 2. Uddrag fra den geologiske model, som viser et 3D overblik over nogle af de kortlagte begravede dale. Nederst ses kalkoverfladen i 400–600 m's dybde.



Figur 3. Indblik i den geologiske 3D model. De nederste dele er lagdelte, mens de øvre dele er mere komplekse.



langs med nogle af vejene, og hvor der efterfølgende er opstillet en 3D geologisk model og en grundvandsmodel (se boks ovenfor). Samtolkning af eksisterende geologiske data og nyindsamlende geofysiske data viser forekomster af flere hundrede meter dybe, begravede tunneldale samt et omfattende kompleks af glacialt forstyrrede lag (figur 1 og 2). Sidstnævnte findes i det indre af bakkeøerne men også under nogle af de store hedesletter. Dalene er nogle steder ældre end de glacialt forstyrrede lag og andre steder yngre. Det vurderes, at de glaciale forstyrrelser er sket under næstsidsite istid (Saale, ca. 390.000–130.000 år før nu), og dalene er således blevet dannet på flere tidspunkter – både før, tidligt og sent i Saale Istid. I én af dalene findes udbredte marine lag fra sidste mellemistid (Eem, ca. 130–115.000 år før nu), se figur 1. I områder, hvor der ikke er sket væsentlige glacial forstyrrelser af lagføl-

gen, viser de geofysiske data tykke, udbredte lag fra den yngste del af den miocæne periode (Miocæn: for ca. 23 til 5,3 mio. år siden), og der ses store forkastninger, som omkranser den tektonisk skabte Tøndergrav (figur 1). Foruden disse strukturer har det været muligt at kortlægge de dækkende sand- og gruslag, der udgør sidste og næstsidsite istids hedesletter, samt detaljerede strukturer og lag i de begravede dale. Alle disse geologiske strukturer er indarbejdet i en 3D geologisk model for området (figur 3).

Nogle af de kortlagte strukturer er også blevet kortlagt til havs. Begravede tunneldale kendes fra Nordsøen, men de enkelte dale kan dog ikke følges på tværs af kystlinjen på grund af begrænset seismisk datagrundlag i Vadehavet. Til gengæld kan komplekserne af de glacialt forstyrrede lag følges i en zone på tværs af Vadehavet og ud til Fanø Bugt, hvor

disse er beskrevet i detaljer på baggrund af en omfattende seismisk kortlægning.

I SkyTEM-data, der viser den elektriske modstand af jordlagene, kan områder med salt grundvand kortlægges. Under marsken, sydvest for Tønder, ses således, at grundvandet er saltholdigt indtil meget tæt under terræn. Salt grundvand forekommer også i forbindelse med nogle af de begravede dale, hvilket tyder på at de geologiske strukturer styrer grundvandets strømning. Grundvandsmodelleringen viser, at indtrængningen af saltvand fra kysten til grundvandsmagasinerne er styret dels af de begravede dale og de miocæne sandlag, dels af forskellen mellem havniveau og grundvandsstanden i marskområdet. Øget dræning og/eller stigende havniveau vil derfor kunne give anledning til yderligere saltvandsindtrængning i området.



Geologisk overfladekortlægning på tværs af kystlinjen

Peter Roll Jakobsen
Seniorforsker, GEUS
prj@geus.dk

Jørgen Overgaard Leth
Seniorrådgiver, GEUS
jol@geus.dk

Geologisk kortlægning har traditionelt fundet sted enten på land eller til havs. Når man harmoniserer land- og havkortene og sætter dem sammen, bliver det tydeligt, at landskaberne og de geologiske jordarter overordnet set forsætter på tværs af kysten, hvor aktive kystprocesser dog modificerer istidslandskaberne.

Kystlinjen markerer overgangen fra landskabet, der er synligt for det blotte øje, til det druknede landskab, skjult på havbunden. Men på trods af forskellig tilgængelighed og synlighed er begge landskaber i høj grad et resultat af istidens påvirkning. Den geologiske udviklingshistorie på tværs af kysten er således den samme indtil afslutningen af Fastlandstiden for ca. 12.000 år siden, da havet begyndte at stige og druknede de lavtliggende dele af det nydannede landskab. Den vanddækkede del af landskabet er

med tiden blevet udsat for bølger og strømme med sedimenttransport, erosion og sedimentation til følge, hvorved de marine aflejringer modificerer istidslandskabet, mens landområderne er forblevet mere eller mindre uforandrede og kun delvist påvirket af vandløb og vind.

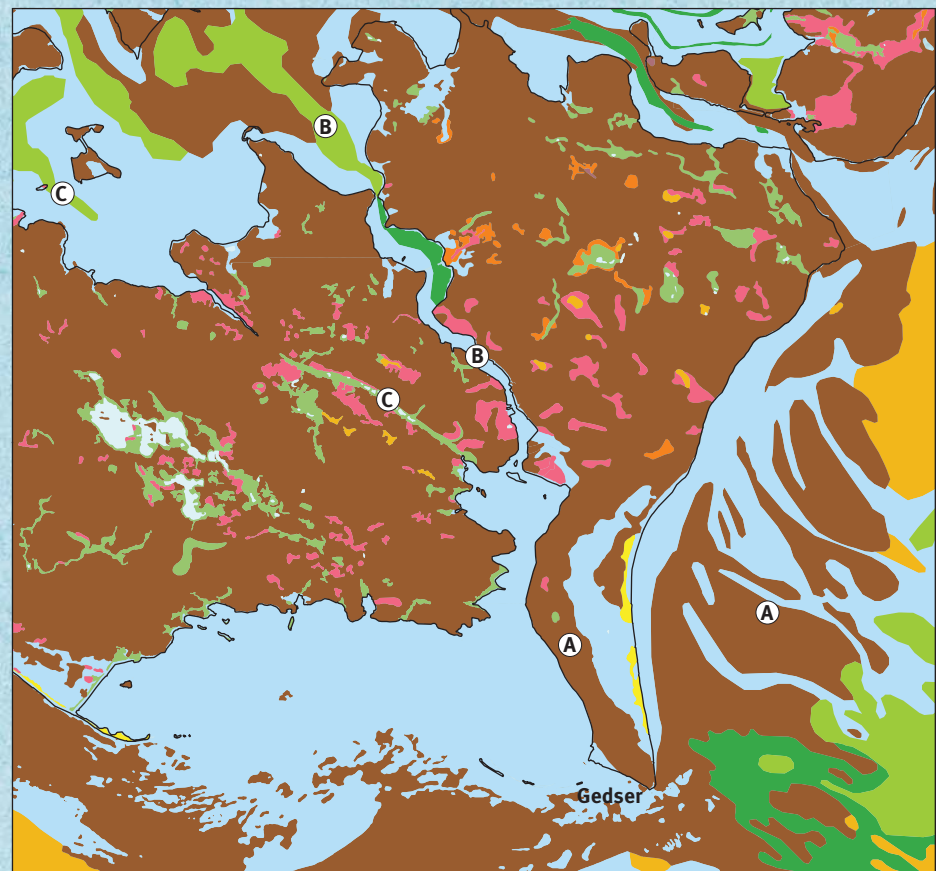
Udforskningen af de to forskellige landskabstyper er historisk set baseret på vidt forskellige opmålingsmetoder. På land har man i mere end 125 år foretaget en systematisk kortlægning af de øvre jordlag gennem prøvetag-

ninger med jordspyd, der kombineret med morfologiske analyser har ledt til en forståelse af landskabernes dannelse. Havbundens geologiske kortlægning startede derimod først for alvor med forundersøgelserne for sand- og grusressourcer i 1970'erne og -80'erne efterfulgt af et utal af miljøundersøgelser, anlægsopgaver mv. som var baseret på seismiske opmålinger og sedimentprøver. Resultaterne herfra har dannet grundlag for en klassificering af havbundens sedimenttyper, der kombineret med dybdekort giver et overordnet billede af det undersøiske landskabs dannelseshistorie.

Sedimentklasser

- Moræne/diamict
- Kvartært ler og silt
- Smeltevandssand og -grus
- Extramarginale aflejringer
- Marint sand og grus
- Ferskvandsdannelser
- Flyvesand
- Dyndet sand
- Dynd og sandet dynd

Figur 1. Generaliseret sedimentkort i et kortudsnit af Lolland, Falster og den vestlige del af Østersøen. For at fremhæve den geologiske udvikling på tværs af kysten er nogle af de oprindelige sedimentklasser fra land og hav slået sammen og vises med samme farve. Det gælder for moræne/diamict, marint sand og grus samt kvartært sand og ler. Eksempler på sammenhængende strukturer er markeret som A, B, og C (se teksten). Kystlinjen er angivet med en svag sorte linje.



Ses der bort fra den nuværende kystlinje og analyseres landskabets udformning ud fra en detaljeret højdemodel og bathymetriske (dybde-) data, finder man mange steder de oprindelige landskabsformer bevaret på tværs af kysten. Ligeledes ser man, at jordbundstyperne på land overordnet betragtet kan korreleres på tværs af kysten til havbundens tilsvarende sedimenttyper.

Jordarter eller havbunds-sedimenter

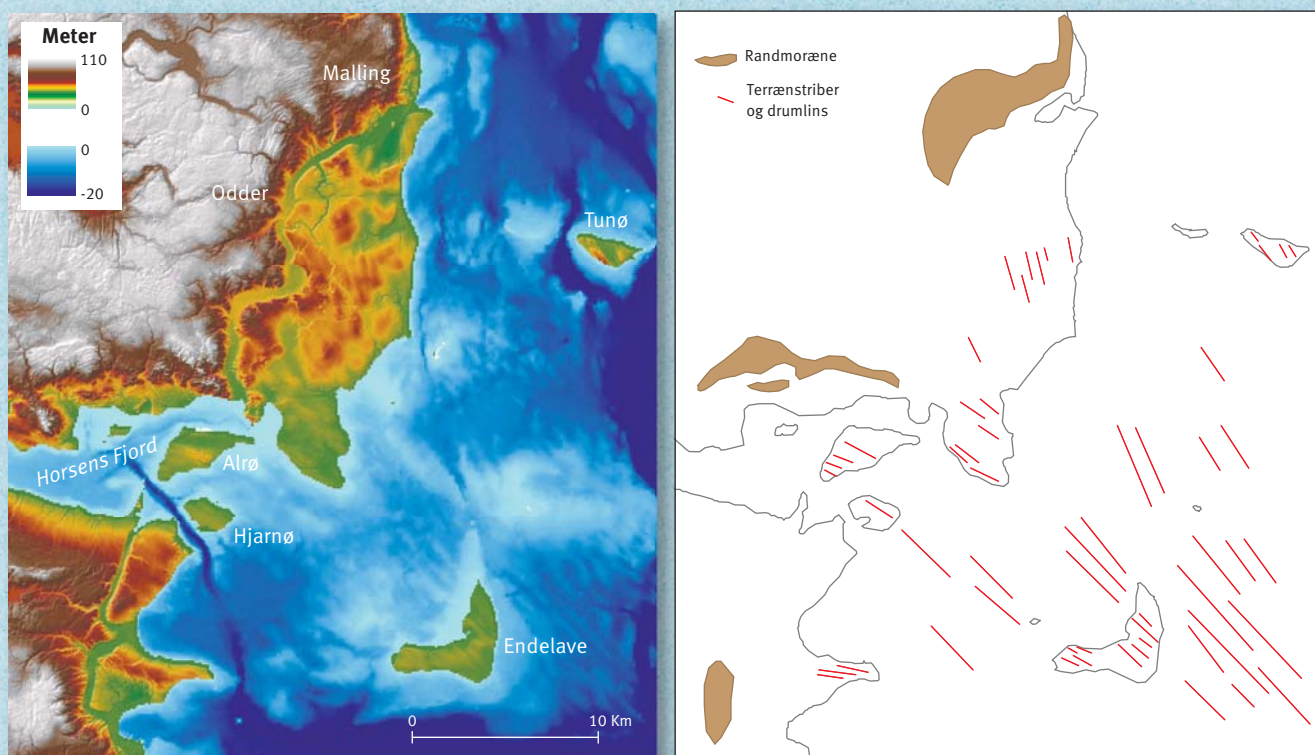
På land er det øverste jordlag kortlagt minutløst gennem tusindvis af prøver udtaget med jordspyd. Prøverne er klassificeret efter deres kornstørrelse, dannelsesmiljø og alder. Det resulterende jordartskort viser med stor nøjagtighed fordelingen af de forskellige jordartstyper og giver samtidig et billede af den geologiske udviklingshistorie, eksempelvis moræneflader, smeltevandssletter og dalstrøg med ferskvandsedimenter. En tilsvarende kortlægning er foretaget af det øverste lag af havbunden, dog er tolkningerne her primært baseret på data indsamlet ved brug af akustiske og seismiske metoder suppleret med sedimentprøver. Det resulterende kort over hav-

bundssedimenterne giver et tilsvarende indblik i udbredelsen af forskellige sedimenttyper og dermed også deres aflejringsmiljøer. På grund af forskelle i kortlægningsmetoder er detaljeringsgraden ikke så høj på havbunden som på land. Derudover findes der i sagens natur aflejringer på havbunden, som ikke findes på land fx dynd, der alene er relateret til det marine miljø. Sættes jordartskortet og havbundssedimentkortet sammen – samtidig med at klassifikationen af de respektive sedimentklasser generaliseres – fremkommer der et billede af den geologiske udvikling på tværs af kysten.

På figur 1 ses et udsnit af området omkring Lolland, Falster og den vestlige del af Østersøen. Den nuværende kystlinje er markeret som en svag sort linje. Sedimentklasserne fra de oprindelige kort er generaliseret som følger: Alle klasser omfattende moræneler, -sand og -grus er vist med en brun farve. De marine sand- og grusaflejringer er slået sammen og vist med en lyseblå farve. Kvartært ler og silt er slået sammen med smeltevandsler og angivet med okkergul/lysebrun farve.

På det generaliserede kort (figur 1), ses en del sammenhængende strukturer. Her skal

fremhæves: A) Udbredelsen af moræneler på Falster og i det tilstødende havområde øst/sydøst for Falster er udformet som en række konkave buer, hvoraf den vestligste kan følges fra Gedser mod nordvest langs vestkysten af Falster. En række mere eller mindre parallelle buer følger mod øst og nordøst. Disse tolkes som morænerygge dannet ved kortvarige isfremstød fra en baltisk isstrøm, der dækkede Østersøen og det sydlige Sverige i slutningen af sidste istid. Lavningerne imellem disse er udfyldt af sand, som det ses på havbunden og i den centrale del af Falster. B) Guldborgsund, der fremstår som et nordvest-sydstøstligt lineament, der adskiller Falster og Lolland, er formentlig betinget af tilstedeværelsen af en forkastning. Sundet, som har en fortsættelse i havbunden mod nordvest ud i Smålandsfarvandet, har en sandet havbund, der dog bliver mere og mere dyndet mod nordvest. C) En struktur af ferskvandsedimenter skærer sig gennem den østlige del af Lolland med en nordvest-sydstøstlig retning. Strukturen, som kaldes Ståldyb, er betinget af en underliggende forkastning. Kortet indikerer, at den har en fortsættelse mod nordvest ud i Smålandsfarvandet, hvor den tilhørende lavning er udfyldt af dynd.



Figur 2. Til venstre ses højdemodellen og den bathymetriske model for området omkring munden af Horsens Fjord. Til højre ses de tolkede landskabsformer for samme område, jf. teksten.

Kystoverskridende landskabsformer mellem Endelave og Odder

Området mellem Endelave og Odder har flere af de oprindelige landskabsformer bevaret på tværs af kysten. Her er det særligt terrænstriber og drumlins, der fremstår tydelige i den detaljerede højdemodel. Drumlins er aflange elipseformede bakker, der rager op over en moræneflade, hvilket har fået mange til at sammenligne dem med hvalrygge, der rager op over vandet. Terrænstriber er aflange og mere flade rygge, der er så lave, at de ikke kan erkendes, når man står i landskabet, men de fremstår meget tydeligt på højdemodellen. Begge landskabsformer er dannet under en gletsjer, og de viser i hvilken retning, gletsjeren har flydt. Disse landskabsformer kan ses på Endelave, Hjørnø og Alrø og i de kystnære landskaber mellem Juelsminde til lidt nord for Odder, se figur 2. Orienteringen af terrænstriberne er i dette område vifteformet. Således har terrænstriberne i den sydlige del en ca. øst-vestlig retning, mens retningen i den nordlige del er ca. nord-syd. Isen har således bredt sig ud i forskellige retninger. Man kan også se, at den er flydt ind i Horsens Fjord. Flere steder

kan man se, at disse landskabsformer peger mod – og stopper ved – randmorænebakker.

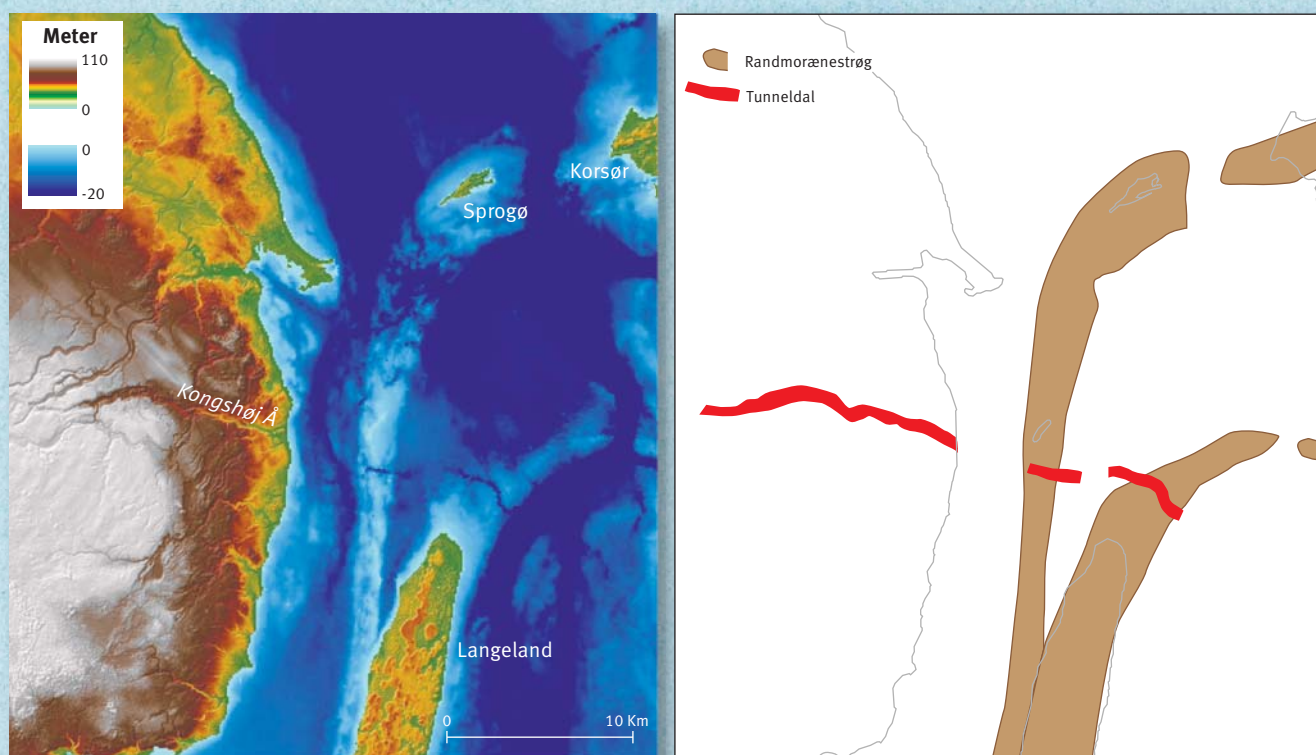
På den bathymetriske model ser man også disse landskabsformer på det relativt lave vand mellem Endelave og Jylland. Opløseligheden af dybde data er ikke så god som højdemodellen på landjorden, men aflange former kan ses, og de er på havbunden parallelle med dem, man ser på øerne og i de kystnære områder på land. Hele området er således dannet under isen, der er flydt ind i Horsens Fjord og op mod Malling. Der hvor isen er stoppet op eller blevet bremset, er der dannet randmorænebakker langs isranden, skubbet op foran den hurtigt fremrykkende is. Først senere, da havet steg til det nuværende niveau, er dele af denne flade druknet, og landskabet er blevet delvist sløret af marint sand, der ligger drape ret over den glaciæle flade.

Kystoverskridende landskabsformer nord for Langeland

I den centrale del af Storebælt er de mest markante landskabsformer de strøg af randmorænebakker, der kan følges fra Langeland op over Sprogø til Korsør, på Sjællandssiden af Storebælt, se figur 3. Et andet strøg kan føl-

ges fra den nordlige spids af Langeland i en bue tværs over Storebælt. Landskabsformerne i disse strøg er en kombination af død-islandskab, issøbakker og små randmorænebakker, og de markerer to israndsstadier under nedsmeltningen af Storebæltsgletsjeren hen mod slutningen af sidste istid.

Et andet meget interessant landskabselement, man kan erkende nord for Langeland, er en dalstruktur, der skærer tværs gennem de to randmorænestrøg og peger direkte ind i Kongshøj Å tunneldalen. Her er der antageligt tale om en fortsættelse af tunneldalen på tværs af Storebælt. Dalen fremstår stadigvæk tydelig, selv om den er delvist fyldt op af randmorænemateriale. Dele af tunneldalen og randmorænestrøgene er efterfølgende druknet, men de viser at Fyn, Storebælt og Sjælland er et sammenhængende glaciælt landskab, der efterfølgende er modificeret af marine processer. ○



Figur 3. Til venstre ses højdemodellen og den bathymetriske model for det østlige Fyn og Storebælt. Til højre ses de tolkede landskabsformer for samme område, jf. teksten.

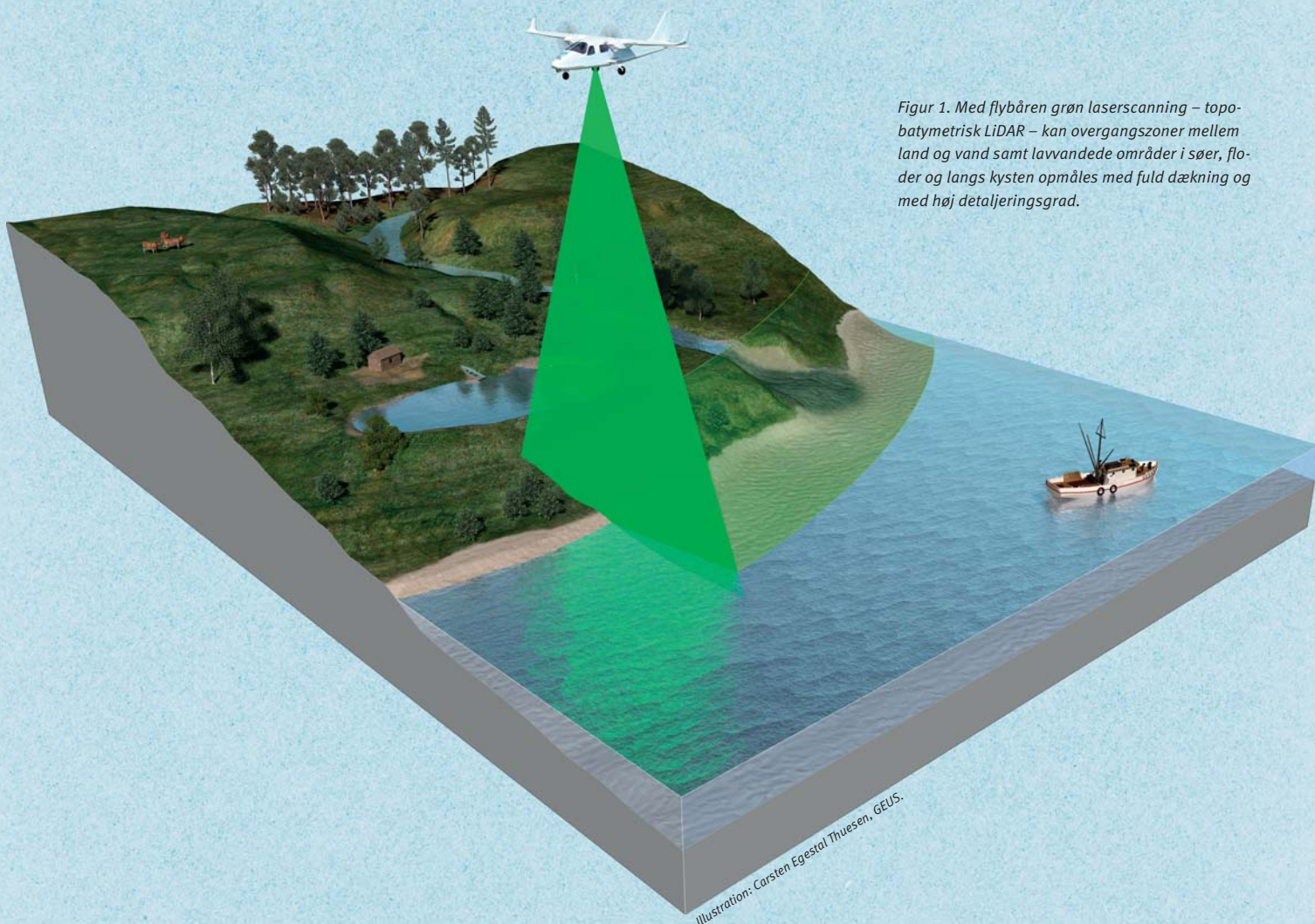
Grøn laser forbinder land og vand

Grøn laser kan gennemtrænge vandsøjlen og blive reflekteret fra havbunden. Ved hjælp af flybåren grøn laserscanning kan overgangszonen mellem land og vand samt lavvandede områder i kystzonen opmåles med fuld dækning og med høj detaljeringsgrad. Rumlig og detaljeret kortlægning af land-vand-overgangszonen giver mulighed for at generere ny viden om de naturlige processer, som foregår på tværs af kysten. Dette kan bidrage til optimeret forvaltning af kystzonen med bedre integration af naturlige processer, lovgivning og administration på tværs af kysten.

Overgangszonen mellem land og vand – kystzonen mellem det terrestre og det marine miljø – er generelt blandt de mest dynamiske miljøer. Dette gælder både dannelsen og udviklingen af naturlandskabet, bl.a. som følge af vindens, bølgenes og tidevandets vedvarende påvirkning af landskabet, men også udviklingen af kulturlandskabet, idet langt størstedelen af Jordens befolkning lever i nærheden af disse overgangszoner mellem land og vand, dvs. langs floder og søer, men primært langs

kysten. Og specielt kystzonen er under stort pres som følge af et stigende havspejl, en mulig stigende stormstyrke og -hyppighed samt stigende befolkningstal og en øget udnyttelse af naturlige ressourcer. Rumlig og detaljeret information og viden om landskabet og landskabsudviklingen er et nødvendigt fundament for at kunne planlægge og forvalte kystzonen på en effektiv og bæredygtig måde.

Historisk set har kortlægning til lands og til vands været adskilt og uafhængig, været baseret på forskellige metoder og haft udgangspunkt i forskellige discipliner, og ikke mindst været varetaget af forskellige myndigheder og tilmed placeret under forskellige ministerier. Kombinationen af højteknologisk udvikling indenfor computerteknologi (bl.a. hurtigere CPU), positionsteknologi (bl.a. præcis GPS) samt udviklingen indenfor hhv. sonarteknologi (med flerstråleekkolod) og laserteknologi (med rød laser) har revolutioneret kortlægningen både til lands og til vands siden indgangen til dette årtusinde. Dog er det først indenfor de seneste få år, at de to miljøer ved hjælp af grøn laser kan forbindes 'sømløst', se figur 1.



Figur 1. Med flybåren grøn laserscanning – topobatymetrisk LiDAR – kan overgangszoner mellem land og vand samt lavvandede områder i søer, floder og langs kysten opmåles med fuld dækning og med høj detaljeringsgrad.

Illustration: Carsten Egestøl Thuesen, GEUS.

Til vands

Skibsbåret flerstråleekkolod (multibeam echosounding – MBES) har siden årtusindeskiftet revolutioneret kortlægning og undersøgelser i det marine miljø fra de dybere områder og helt op til 5 m dybdekurven. Dette har muliggjort en hidtil uset rumlig beskrivelse og bestemmelse af havbundens morfologi. Med successive opmålinger er det desuden muligt med høj præcision at bestemme morfologiske ændringer både over kortere og længere tidsperioder (fx enkelte tidevandsperioder, storme og årstidsvariationer) drevet af bølger og strøm, men også morfologiske ændringer som følge af menneskelige indgreb i det marine og kystnære miljø.

Til lands

Flybåren rød laser (topografisk Light Detection and Ranging – LiDAR), med en bølgelængde i det infrarøde spektrum, har ligeledes siden årtusindeskiftet revolutioneret kortlægning og undersøgelser i det terrestriske miljø, men kun til kystlinjen. Og ligeledes har dette muliggjort en hidtil uset rumlig beskrivelse og kvantificering af landskabet, både af landskabets terræn men også af landskabets overflade med vegetationsdække, bygninger, veje og anden infrastruktur. I Danmark har staten finansieret to landsdækkende opmålinger omkring årene 2007 og 2015, som har givet ny viden om det danske landskabs dannelse. Og med den seneste opmåling er der en enestående mulighed for også at undersøge kystudviklingen over knap et årti på nationalt plan og med en høj detaljeringsgrad, men altså kun til kystlinjen. I overgangszonen mellem land og vand og i de lavvandede områder i kystzonen eksisterer på nationalt plan ingen detaljeret rumlig information.

Land og vand

Flybåren grøn laser (topobatymetrisk LiDAR), med en bølgelængde i det grønne spektrum, reflekteres både fra landoverfladen (overflade og terræn) og vandoverfladen, men den grønne bølgelængde kan desuden trænge gennem vandsøjlen og blive reflekteret fra havbunden (og fra materiale i vandsøjlen). Dermed er det muligt også at kortlægge overgangen fra land til vand og havbunden i lavvandede kystnære områder. Vandsøjlegennemtrængningen og dermed den maksimale vanddybde, som kan kortlægges, afhænger

primært af turbiditeten i vandsøjlen, dvs. af hvor meget materiale og hvilken type af materiale, der er suspenderet i vandsøjlen.

Ved laserscanninger langs Nordsjællands kyst og omkring Rødsand lagune ved Femern Bælt har vi kunnet kortlægge havbunden helt ud til 7–8 meters vanddybde. Der er således et potentiale for, at hele kystzonen i de indre danske farvande kan kortlægges med en detaljeringsgrad svarende til den seneste nationale højdemodel. Kystzonen langs den jyske vestkyst vil ligeledes kunne kortlægges, forudsat overflyvningerne foretages under gunstige forhold, fx efter en periode med østenvind, hvor bølgeenergien og turbiditeten i vandsøjlen er lav.

Det mest udfordrende kystområde at kortlægge med flybåren grøn laser i Danmark er dog Vadehavet, som er karakteriseret ved en konstant varierende vandstand og høj turbiditet i vandsøjlen som følge af tidevandets dynamik og den relaterede sedimentdynamik. Vadehavet er derfor ideelt til at teste begrænsningerne for flybåren grøn laser. I 2014 blev et 50 km² stort område ved Knudedyb i Vadehavet overflyvet, se figur 2. Knudedyb er et af de mest dynamiske kystområder i Danmark, med store omlejninger af sediment, både som følge af den daglige tidevandsdynamik, en stor sydgående materialetransport langs kysten og fordi det er eksponeret for stormfloder fra vest.

Resultaterne har afsløret, at selv i disse udfordrende områder med et netværk af tidevandskanaler, små vanddækkede lavninger, høj turbiditet i vandsøjlen og konstant varierende vanddybder kan landskabet kortlægges med fuld dækning helt ned til vanddybder på knap 4 meter. Detaljeringsgraden er høj med ca. 20 målepunkter pr. kvadratmeter, og den vertikale nøjagtighed er bedre end 10 cm. Dermed vil det være muligt ved en kombination af flybåren grøn laser og skibsbåren flerstråleekkolod at kortlægge hele Vadehavet med en hidtil uset detaljeringsgrad, hvilket vil være et unikt fundament for en fremtidig bæredygtig forvaltning af Vadehavet, som i 2014 blev UNESCO Verdensarv.

Perspektiver

Flybåren grøn laser-teknologi har i løbet af de sidste par år udviklet sig kolossalt, og der er et stort potentiale for brug af teknikken til grundvidenskabelig forskning såvel som miljøkortlægning, -monitoring og -forvaltning.

Hidtil er metoder primært blevet udviklet til at kortlægge den overordnede topografi og bathymetri samt landskabsformer. De næste skridt bliver bl.a. udviklingen af metoder til at kortlægge havbundens materialesammensætning ud fra det reflekterede lasersignal, at beskrive vandsøjlen turbiditet med stor rumlig dækning og høj detaljeringsgrad, og at kortlægge bl.a. stenrev, muslingebanker og ålegræs, som alle er relevante i vurderinger af vand- og havmiljøets økologiske tilstand i kystzonen, som er et krav i henhold til EU's Vandramme- og Havstrategidirektiv.

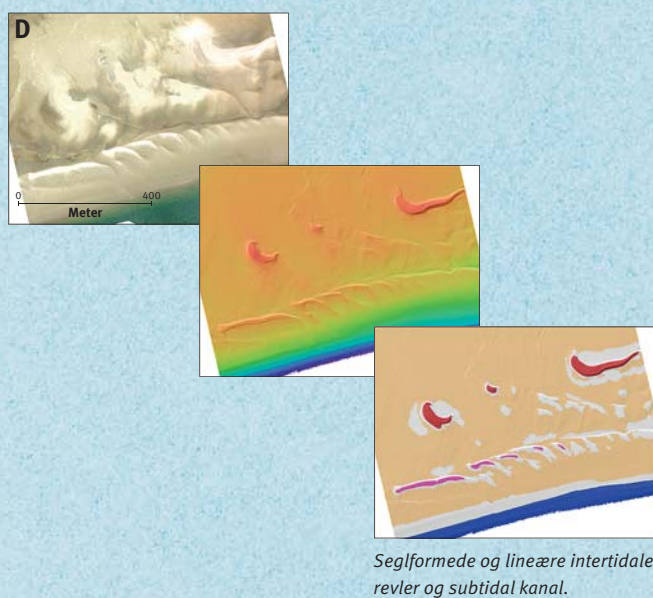
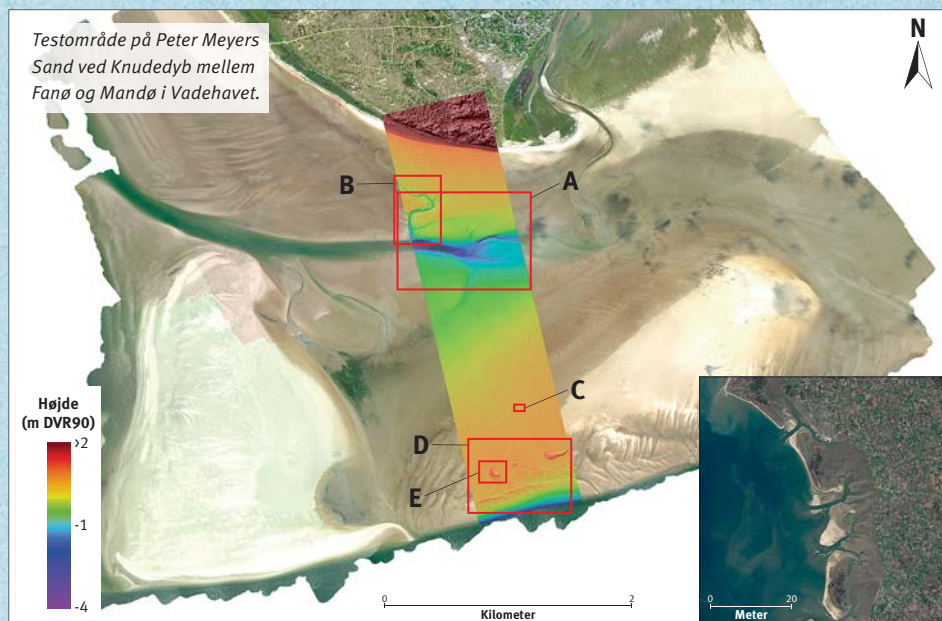
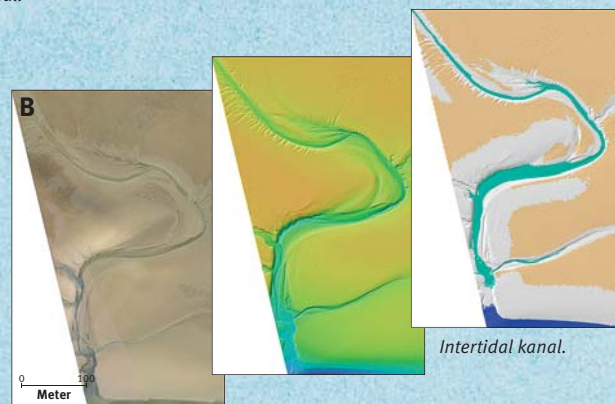
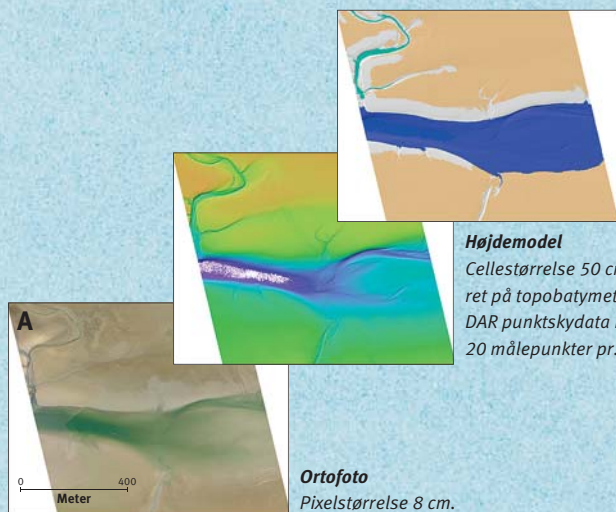
Derudover er der potentiale for en bedre og mere effektiv kortlægning af Grønlands enorme kyststrækning, som forventes at blive udsat for store materialeomlejninger og ændringer i økosystemer i dette århundrede, som følge af de globale ændringer i klima- og miljøforhold.



Verner B. Ernstsen Lektor, IGN vbe@ign.ku.dk	Mikkel S. Andersen Forskningsassistent, IGN msa@ign.ku.dk
Zyad Al-Hamdani Seniorforsker, GEUS azk@geus.dk	Jørgen Overgaard Leth Seniorrådgiver, GEUS jol@geus.dk
Carlo Sørensen Senior Kysttekniker, Kystdirektoratet cas@kyst.dk	Frank Steinbacher CEO, AHM Hydro Mapping GmbH f.steinbacher@ahm.co.at
Laurids R. Larsen Team- og Projektchef Mapping, NIRAS lrla@niras.dk	Aart Kroon Lektor, IGN ak@ign.ku.dk

Her kan du læse videre

Geoviden 2014, nr. 2
Den danske havbund
Geoviden 2009, nr. 1
Vadehavet
Geoviden 2005, nr. 3
Danmarks kyster



Maringeologi i arkæologiens tjeneste

Zyad Al-Hamdani
Seniorforsker, GEUS
azk@geus.dk

Jørn Bo Jensen
Statsgeolog, GEUS
jbj@geus.dk

David John Gregory
Forskningsprofessor, Nationalmuseet
David.john.gregory@natmus.dk

Ved hjælp af maringeologisk kortlægning af lavvandede områder i kystzonen ved Tudsehage vest for Skælskør har det været muligt at dokumentere kystlinjens forandringer i den yngste halvdel af Ældre stenalder (Kongemose – Ertebølle, 9000 – 6000 år før nu).

Den marine kulturarv er under konstant trussel fra menneskelige aktiviteter omfattende uddybningsarbejder, råstofindvinding, fiskeri (trawling), anlægsarbejder (bl.a. vindmøller), søkabler og forurening samt naturlig nedbrydning i forbindelse med storme. De igangværende klimaændringer har bl.a. medført en større hyppighed og intensitet i stormene, og dermed øget risikoen for nedbrydning af fx vrage og bopladser på havbunden.

I erkendelse af dette, har hovedformålet med det europæiske samarbejdsprojekt SASMAP (se boksen til højre) været at udvikle innovative teknologier og procedurer for at optimere lokalisering, vurdering og forvaltning af den europæiske marine kulturarv. Forskere fra forskellige videnskabelige discipliner (arkæologi, geologi og ingeniørvidenskaberne) har deltaget sammen med 4 teknologiske, mindre firmaer i projektet.

Hovedmålene med projekt SASMAP har været:

- At udvikle regionale geologiske modeller til forståelse af forhistoriske kystændringer og på den baggrund at vurdere sandsynligheden for at finde undersøiske arkæologiske bopladser, samt udvikle metoder til hvordan de kan bevares.
- At anvende ikke-destruktive undersøgelsesværktøjer, fx regional satellit-scanning, udvikling og innovativ anvendelse af detaljeret multibeam (se boksen til højre) og endelig 3D seismiske undersøgelser til brug på lavt vand.

Disse undersøgelsesmetoder gør det muligt at fremstille digitale billeder og modeller af mulige fundområder uden risiko for at ødelægge et eventuelt kulturminde. Det vil også være muligt at vise digitale billeder af skibsvrage, mens det næppe er muligt at identificere bopladser.

Ved hjælp af GIS-værktøjer, der 'fodres' med data om bl.a. den lokale hydrodynamik, sedimenternes beskaffenhed, osv. er det mu-

SASMAP

SASMAP står for *Development of Tools and Techniques to Survey, Assess, Stabilize, Monitor and Preserve Underwater Archaeological Sites*. Det 3-årige projekt (2012 – 2015) blev koordineret af David Gregory fra Nationalmuseet. Der var i alt 11 partnere, som repræsenterede 7 europæiske lande, hvoraf 4 partnere var mindre firmaer. Detaljerede oplysninger om projektet kan ses på projektets hjemmeside <http://sasmap.eu/>.



SASMAP har i april måned modtaget Europa Nostra prisen 2016, for at være et af årets bedste Europæiske kulturarvsprojekter i kategorien Research (<http://www.europanostra.org/news/748/>). Europa Nostra har til formål at medvirke til at beskytte Europas kulturarv og landskabelige værdier og bredest muligt at fremme opmærksomheden på og forståelsen for den europæiske kulturarv. En stemme for påskønnelsen af kulturværdier i Europa er Europa Nostras vigtigste opgave. Europa Nostra vil øge værdsættelsen af den nationale kulturarv og samtidig gøre den europæiske kulturarv til alles eje.



Multibeam ekkolod

Flerstråleekkolodet (multibeam) udsender adskillige separate lydbølger i et vifteformet mønster på tværs af sejlretningen, op til 75° i forhold til det lodrette plan, se figur 1 s. 5. Her ved fås en fuldstændig dækning af havbunden i en zone, hvis bredde måler 3 til 7 gange vanddybden. Flerstråleekkolodet er således væsentlig mere effektivt end det gængse enkeltstråleekkolod (som kun udsender én bred stråle), når man ønsker at foretage en søopmåling med 100 % dækning af havbunden. Ved sejlads i parallelle linjer med en tilpas indbyrdes afstand kan man med multibeam lave en fulddækkende kortlægning af havbundens dybdeforhold.

ligt at vurdere havbundens stabilitet samt sandsynligheden for at arkæologiske fund fortsat kan være bevaret i havbunden.

Andre mål med projektet har været 1) at undersøge de biogeokemiske parametre i havbundens sedimenter, som kan afsløre nedbrydningsgraden af organiske materialer, hvorved det bliver lettere at vurdere bevaringspotentialen for arkæologiske fund; 2) at udvikle ny teknologi i form af dykkerholdte

værktøjer til prøvetagning af sedimentkerner fra marinarkæologiske udgravninger; 3) at udvikle nye teknikker til på forsvarlig måde at bringe stærkt nedbrudte, organiske arkæologiske fund op fra havbunden; 4) at undersøge mulighederne for anvendelse af kunstigt søgræs til stabilisering af sedimenterne omkring arkæologiske udgravninger, og endelig at udvide viden om og gennemføre uddannelse i brugen af de nyudviklede teknologier.



Figur 1. Lokalisering af Tudsehage fundområde (rød cirkel) og ortofoto af bugten nord for Tudsehage. Hvid stiplede linje angiver placeringen af profilet i figur 5. Lokaliseringen af det seismiske eksempel i figur 4 er vist med et rødt rektangel.

Figur 2. Arkæologisk udgravning ved Tudsehage. Det er en af forfatterne, David J. Gregory, der er på arbejde.

Foto: Morten Johansen. Copyright: Vikingeskibsmuseet i Roskilde.

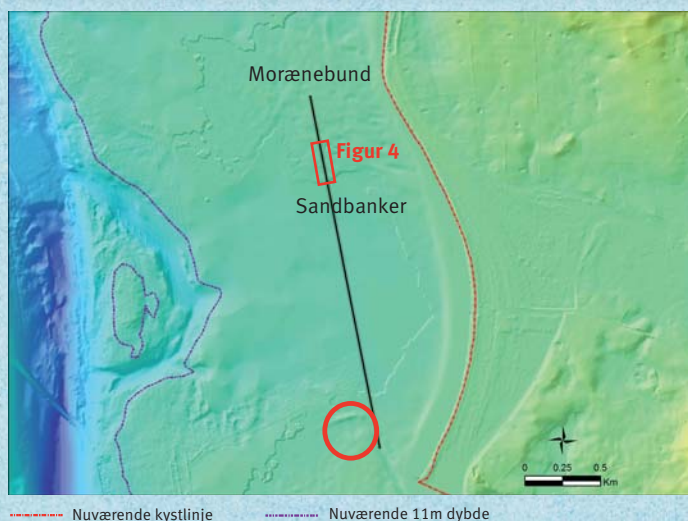


Geologiske modeller til hjælp for marinarkæologiske undersøgelser

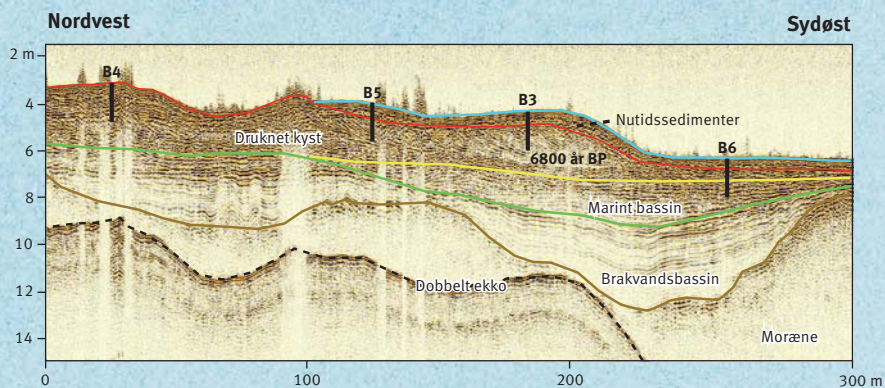
De geologiske metoder og procedurer, som er opstillet i SASMAP-projektet, er gennemført i udvalgte undersøgelsesområder i Danmark og Grækenland.

Der er etableret en geologisk model for det danske undersøgelsesområde ved Tudsehage (se figur 1) med henblik på at afsløre potentielle arkæologiske bopladsområder på forskellige vanddybder. Området ved Tudsehage indeholder et 7000 år gammelt bopladsområde fra Ertebøllekulturen i slutningen af ældre stenalder. Undervandsudgravningen er lokaliseret på en nuværende vanddybde af 2–3 meter (se figur 2). Her er der fundet helt usædvanligt velbevarede fiskeredskaber samt meget velbevarede grønne blade. Du kan læse mere om de arkæologiske fund ved Tudsehage i Nyhedsbrev Nr. 19, Vikingeskibsmuseet, 2002.

For at opnå den bedst mulige økonomi ved de arkæologiske undersøgelser benyttes vi et såkaldt nedskalerings-koncept. Vi begyndte med at analysere ortofotos, se figur 1, og satellitbilleder, dækkende undersøgelsesområdet i bugten nord for Tudsehage. Som det fremgår af ortofotoet, kan man identificere forskellige bundtyper, så som morænebund og sandbanker. Ved hjælp af specialiseret software og under forudsætning af, at man kender dybden i en række kontrolpunkter, kan man omsætte satellitbilledet til dybde-data. Satellitbilledet kan kun benyttes til vanddybder på maksimalt omkring 4–5 meter og derfor var det nødvendigt at benytte marine akustiske opmålingsmetoder (multibeam ekkolod) på dybere vand og med et vist overlap. Resultatet blev kombineret med den danske højdemodel på land i en samlet terrænmodel, som dækker både land og hav, se figur 3.

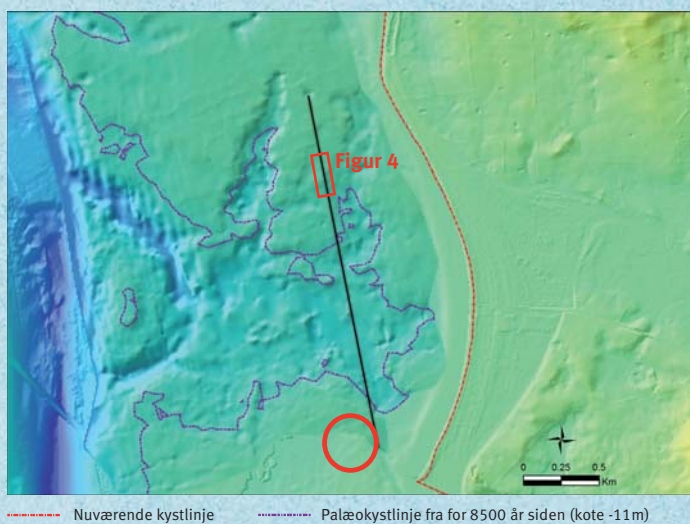
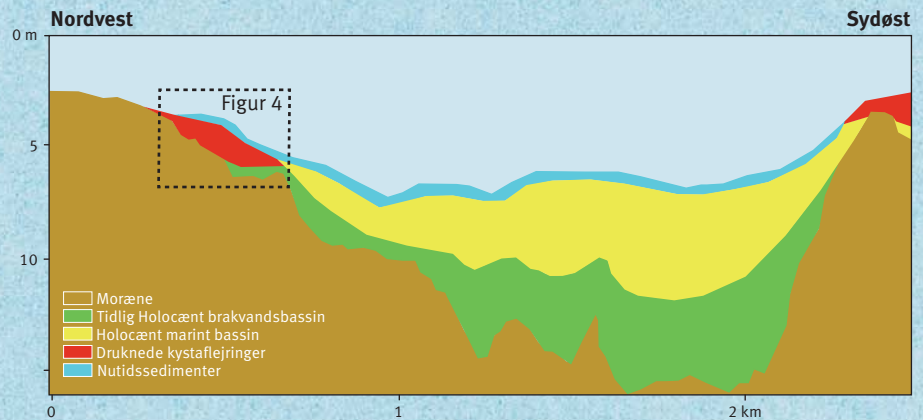


Figur 3. Terrænmodel som viser den nutidige kystlinje og et sammenhængende dybde-/højdekort for området ved Tudsehage og havbunden vest herfor i Storebælt. Nuværende 11 m dybdekurve er angivet. Desuden er angivet placeringen af det seismiske eksempel-profil (figur 4), hvor der ses sandbanker.

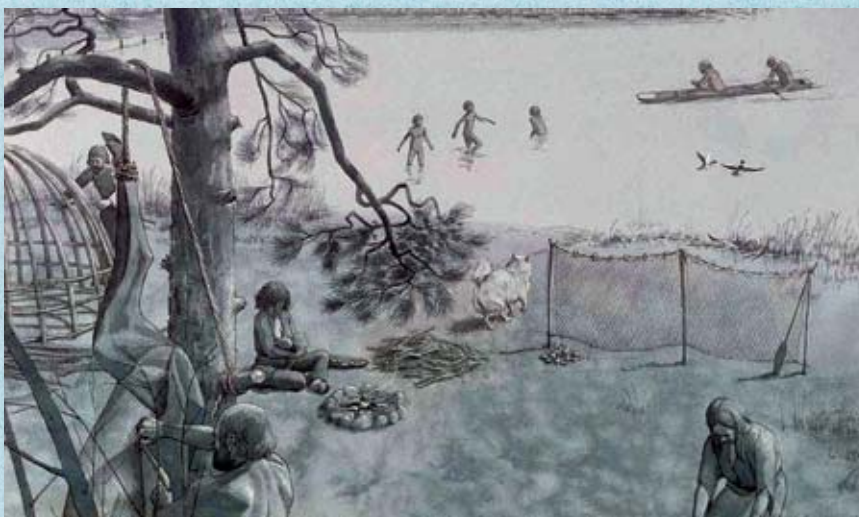


Figur 4. Eksempel på et seismisk profil, på tværs af druknede sandede kystsedimenter. Kystsedimenterne er ^{14}C -dateret til at være ca. 6800 år gamle. For placering se figur 1 og 3.

Figur 5. Profil gennem undersøgelsesområdet ved Tudsehage, med angivelse af istidens moræne, som er delvist dækket af geologiske lag aflejret i arkæologisk tid. Profillinjen er angivet på figurene 1, 3 og 6. Placeringen af det seismiske eksempel i figur 4 er angivet.



Figur 6. Eksempel på et backstripping kystscenarie, som viser kystlinjen for ca. 8500 år siden (kote -11 m) i forhold til den nuværende kystlinje. Desuden er angivet placeringen af det seismiske eksempel fra figur 4.



Figur 7. Stemningsbillede fra rekonstruktion af Mesolitisk stenalder kystboplads ved Østersøen.

Tegning: Flemming Bau.

Terrænmodellen viser hovedsagelig en flad havbund, der dog indeholder sandbanker, som det også kunne ses på ortofotos.

Terrænmodellen, som blev suppleret med indsamling af seismiske profiler, er første skridt mod opstillingen af en geologisk model, se figur 4. De tolkede, seismiske profiler på tværs af bugten (se tværsnit i figur 5), viste lagfølgen af havbundens sedimenter, og dannede baggrund for udpegning af borepositioner. Boringerne har dokumenteret tilstedeværelsen af sandbanker, samt sedimenter, der tolkes som tidligere sø- eller marine bassinaflejringer. Men vigtigst af alt indeholder borekerne muslingskaller, som kan ^{14}C -dateres. Resultatet af dateringen viste, at sandbankerne blev aflejret for omkring 6800 år siden og at de i virkeligheden er druknede kystsedimenter, der blev aflejret, da havniveauet var ca. 3 meter lavere end i dag.

På basis af de indsamlede data har det været muligt i store træk at rekonstruere ændringerne i havets vandstand gennem de sidste 9000 år. Ved at fjerne de yngre jordlag, som dækker moræne-lagene (metoden kaldes backstripping), har det samtidig været muligt at rekonstruere, hvordan havbundens terræn så ud på forskellige tidspunkter, medens havet gradvist dækkede området. Et eksempel på dette ses i figur 6, der viser havbundens topografi og kystlinjens beliggenhed for ca. 8500 år siden, hvor havniveauet lå ca. 11 meter lavere end i dag.

Det er et velkendt arkæologisk faktum, at stenalderfolkene generelt yndede at bo meget tæt på kysten og gerne ved naturlige strømsteder. Når man kobler denne viden med de rekonstruerede palæo-kystscenarier og arkæologiske data, får man et effektivt værktøj til at lokalisere arkæologiske hot spots, dvs. lokalteter, hvor der er størst sandsynlighed for at finde bopladser, se figur 7.



Kystfodring – et eksempel på genbrug i naturen

Kystbeskyttelse har foregået i Danmark igennem århundreder og i lang tid udelukkende i form af bastante konstruktioner som diger, høfder og forskellige former for bølgebrydere og skræntsikringer. Igennem de sidste årtier har kystfodring – også kaldet sandfodring – vundet indpas som den foretrukne metode til at beskytte mange udsatte kyststrækninger. Sandet indvindes på 'større' dybde og transporteres ind til kysten af sandsugere. Fremtidige klimascenarier, der indebærer en stigende vandstand og kraftigere storme, gør det vanskeligere at prioritere mellem indsatsområder – både geografisk og metodemæssigt – og at finde dækning for de stigende omkostninger.

Kystbeskyttelse – et nødvendigt onde?

En af Danmarks største attraktioner, dets kyststrækning med offentligt tilgængelige strande, rekreative områder, og naturbeskyttelsesområder vil blive udsat for øget erosion i takt med en forøget vandstandsstigning og hyppigere kraftige storme. Det må derfor forventes, at der – for at beskytte væsentlige samfundsmæssige værdier – vil være et stigende ønske om at kystbeskytte flere og længere kyststrækninger. For at optimere kystbeskyttelsesindsatsen vil det kræve en fremsynet planlægning og en detaljeret viden om de processer og kræfter,

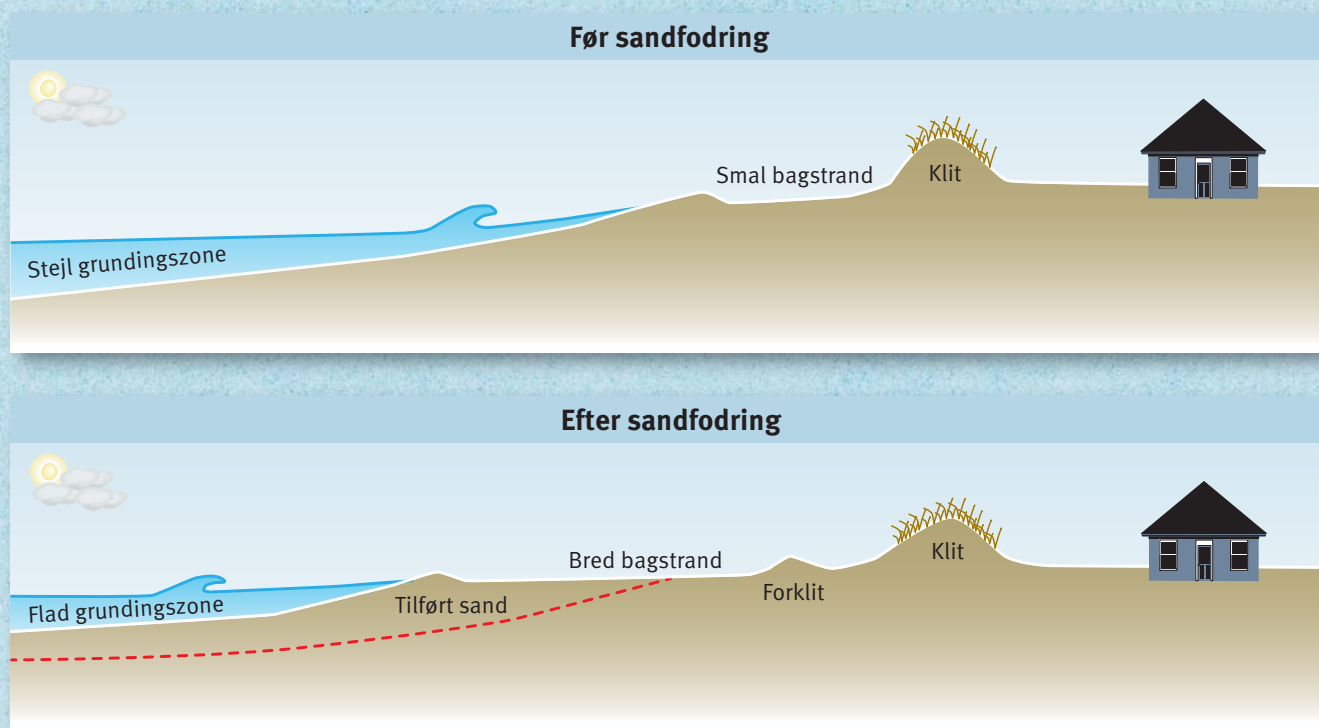
der vedvarende påvirker vores kyster. Kystbeskyttelse kan være dyrt for de enkelte udsatte grundejere, som jf. den nuværende lovgivning må betale udgifterne. Langs mange naturlige kyststrækninger med få huse og begrænset infrastruktur bør grundejerne overveje om naturen skal gå sin gang, fordi det er for dyrt at kystbeskytte set i forhold til husenes værdi.

Blød beskyttelse foretrækkes

Kystdirektoratet har ansvaret for at vedligeholde og føre tilsyn med kystsikringen. Det tilstræbes generelt at kystbeskyttelsen skal være så naturlig som muligt og være en del af

en langsigtet helhedsløsning, som tager hensyn til behov og påvirkning over en længere kyststrækning. Dette indebærer bl.a. at man i de sidste årtier langs den centrale del af Vestkysten og i tiltagende grad langs andre af landets erosionsprægede kyststrækninger er gået over til at benytte kystfodring. Ved kystfodring tilføres strandzonen sand indvundet på 'større' dybde. Ved sandtilførslen hindres bølgerne i at gnave i klitter eller skrænter og dermed bremses tilbagerykningen, se figur nedenfor. Med tiden vil sandet blive omlejret og indgå i de naturlige erosions- og aflejringsprocesser langs kysten. For at skabe den sikkerhed, som vi ønsker, er det derfor nødvendigt at gentage fodringen med års mellemrum.

For at opnå så skånsom og effektiv en kystbeskyttelse som muligt, kræver det en detaljeret indsigt i de processer, der former kystens udvikling på både kort og langt sigt. Kysten er en dynamisk zone under kontinuerlig forandring og de meteorologiske forhold og



Tværsnit af kystzone henholdsvis før og efter strandfodring. Ved tilførsel af sand gøres bagstranden væsentligt bredere og bølgegrundingszonen mindre stejl.

Illustration: Annabeth Andersen, GEUS.

Niels Nørgaard-Pedersen
Seniorforsker, GEUS
nnp@geus.dk

Per Sørensen
Kystteknisk chef,
Kystdirektoratet
per.sorensen@kyst.dk



Her kan du læse videre

Kystdirektoratet

<http://www.kyst.dk/>

Naturstyrelsen

<http://naturstyrelsen.dk/vandmiljoe/havet/raastoffer/raastofindvinding-paa-havet>

Geviden 2005

16-20: Binderup, M. & Nielsen, N.: Kystproblemer

Geviden 2014

15-18: Kroon, A., Ernsten, V. B. & Fruergaard, M.: Sedimentdynamik i kystzonen

Sandfodring af forstranden ved Thyborøn på Jyllands vestkyst.

Foto: Kystdirektoratet/Rohde Nielsen A/S.

kystens udformning er af afgørende betydning for udviklingen. Sandtransport foregår både på tværs og på langs af kysten, og aflejring af sand ét sted vil medføre, at det mangler et andet sted. Under storm med forhøjede vandstande, store bølger og kraftige strømme øges sedimenttransporten væsentligt, og det kan medføre stor erosion og kysttilbage-rykning. Sandet er dog ikke tabt for evigt, men ligger i stedet ude på revlen eller længere nede ad kysten, hvor det nu har en beskyttende virkning. Under mildere vejrforhold vil strandprofilet så igen kunne opbygges, idet bølgerne langsomt skubber sand fra revlen og omkringliggende strande ind på kysten. Dette kan betegnes som naturens egen sandfodring. Havet gnaver selektivt af kysten, der hvor den skyder frem, og aflejrer erosionsmaterialet andre steder på kysten, hvor der er bugter eller læ. Nordsjællands kyst er et eksempel på en sådan udligningskyst. Bølger eroderer i klinerne ved Hundested og ved Liseleje og sandet bliver med den fremherskende vestenvind transporteret mod øst i retning af Gilleleje og Helsingør.

Sådan foregår kystfodring

Kystfodring foregår enten ved tilførsel af sand eller grus på selve stranden for reduktion af klit- og skrænterosion; som strandnær fodring til opbygning af kystprofilet; eller som revlefodring, der bevirker bølgebrydning længere ude i kystprofilet og dermed reduktion af bølgeenergien tæt ved land. Sandressourcer anvendt til kystfodring er typisk indvundet på dybt vand, men kan også indvindes fra land-siden eller være genbrug af sediment fra eksempelvis oprensninger af sejløb (fx ved Thyborøn). Som udgangspunkt bør sandet indvindes der, hvor det aflejres naturligt og genbruges. Det kaldes populært bypass eller backpass. Det er dog ikke altid muligt og Naturstyrelsen har af denne grund udlagt specifikke miljøgodkendte reservationsområder med offshore sandressourcer, der kan anvendes til sandfodring.

Ved kystfodring sejler en sandsuger ud til reservationsområdet på dybt vand og suger sand op i lastrummet. Sandsugeren transporterer sandet ind til kysten og via en rørledning bliver sandet pumpet fra sandsugeren og ind

på stranden, hvor det fordeles med hjælp af rørsystemer og gravemaskiner. En anden metode er, at sandet enten pumpes ud over stævnen direkte på forstranden (se foto øverst), eller at sandsugeren åbner lastrummet i to dele, så sandet falder direkte ned (dumps) på havbunden, fx ved revlefodring.

Klimaændringer vil gøre det sværere at vælge hvilke værdier og kyststrækninger, der skal beskyttes, og de vil præge den fremtidige udvikling på kysterne. Kun ved at forstå og samarbejde med de naturlige processer kan vi opnå en effektiv beskyttelse af værdierne og samtidig undgå at skulle etablere for mange uskønne forsvarsværker.





DANMARK

PP

Magasinpost UMM
ID-nr. 46439

GEUS i Århus:

GEUS har i de seneste 9 år været repræsenteret i Århus af Afdeling for **GR**undvands- og **K**vartærgeologisk kortlægning (**GRUK**), som flyttede ind i Universitetsparken i marts måned i år. Pr. 1. september 2016 rykker **Marin**-geologisk Afdeling (**MG**) ligeledes til Århus Universitetspark, hvor de 2 afdelinger vil holde til i Bygning 1110. De 2 afdelinger vil intensivere samarbejdet med særlig fokus på den kystnære zone og 3D geologiske modeller og ser samtidig frem til at udbygge samarbejdet med Århus Universitet.

Foto: Bente F. Nedergaard, GEUS.

GEOCENTER DANMARK

GEOCENTER DANMARK

Er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet samt Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, samt Geologisk Museum (Statens Naturhistoriske Museum) begge ved Københavns Universitet. Geocenter Danmark er et center for geovidenskabelig forskning, uddannelse, rådgivning, innovation og formidling på højt internationalt niveau.

UDGIVER

Geocenter Danmark.

ISSN 1604-6935 (PAPIR)

ISSN 1604-8172 (ELEKTRONISK)

REDAKTION

Geoviden – Geologi og Geografi redigeres af Seniorforsker Merete Binderup (ansvarshavende) fra GEUS i samarbejde med en redaktionsgruppe.

Geoviden – Geologi og Geografi udkommer fire gange om året og abonnement er gratis. Det kan bestilles ved henvendelse til Annette Thy, tlf.: 91 33 35 03, e-mail: athy@geus.dk og på www.geocenter.dk, hvor man også kan læse den elektroniske udgave af bladet.

Produktion: Annabeth Andersen, GEUS.

Tryk: Rosendahls - Schultz Grafisk A/S.

Forsidefoto: Klintkyst ved Lindehoved, Sejerø.

Foto: Merete Binderup, GEUS.

Reprografisk arbejde: Benny Schark, GEUS.

Illustrationer: Forfattere og Grafisk, GEUS.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.



DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND (GEUS)

Øster Voldgade 10
1350 København K
Tlf: 38 14 20 00
E-mail: geus@geus.dk



INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB OG
NATURFORVALTNING (IGN)

Øster Voldgade 10
1350 København K
Tlf: 35 32 25 00
E-mail: sl@life.ku.dk



INSTITUT FOR GEOSCIENCE (IG)

Aarhus Universitet
Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670
8000 Århus C
Tlf: 89 42 94 00
E-mail: geologi@au.dk

GEOLOGISK MUSEUM (SNM)

Øster Voldgade 5-7
1350 København K
Tlf: 35 32 23 45
E-mail: rcp@snm.ku.dk