

TEMANUMMER
Sekvensstratigrafi
En god metode til
efterforskning af råstoffer

Sekvensstratigrafi



Karen Dybkjær og Erik S. Rasmussen



I forbindelse med såvel olieefterforskning i Nordsøen som søgning efter rent grundvand eller andre råstoffer i den danske undergrund, er det vigtigt at have et detaljeret kendskab til jordlagenes sammensætning, samt til deres rumlige udbredelse og stratigrafiske fordeling. Ved hjælp af den sekvensstratigrafiske metode kan der opstilles en detaljeret model for fordelingen af sedimenter i et aflejringsbassin, og derved kan den mulige lokalisering af sedimenter med de egenskaber, der ønskes udnyttet forudsiges. Det kan være porøse bjergarter, der indeholder olie eller vand, lerbjergarter til den keramiske industri, eller rent kvartssand til glasfremstilling.

Opfyldningen af et aflejringsbassin er karakteriseret ved en gradvis udbygning af kystlinien som følge af sedimenttilførsel fra de landområder, der omkranser bassinet. Bassinopfyldningen foregår ved afsætning af skråtstillede lag: „klinoforme enheder“ i en proces der kaldes „progradering“. Progradering vil altid forekomme, undtagen når havniveauet stiger hurtigt. En sedimentenhed vil derfor være opbygget af prograderende enheder, både ved højt og lavt havniveau; kun i perioder med hurtig havniveauanstigning vil kystlinien, og dermed de resulterende aflejringer, rykke tilbage (ind mod kysten). I sekvensstratigrafi sættes grænserne mellem de enkelte sedimentenheder der, hvor prograderingen under højt relativt havniveau overtages af progradering under lavt relativt havniveau. Dette er ofte en meget markant grænse, hvor kraftig erosion har fundet sted. Denne erosion er ofte forbundet med nedskæring af store dalsystemer, (se fig. 1 og fig. 2).

Grundprincipperne for sekvensstratigrafi har været kendt i flere hundrede år, men metoden som vi kender den i dag er udviklet i løbet af de seneste 25 år. Metoden forbedres og forfines stadig.

Sedimenter, bassiner og cyklisitet

Dannelse af bjergkæder, nedbrydning til sedimenter, transport og aflejring i sedimen-



Figur 1. Nedskåret dal ved Paatuut på sydkysten af Nuugssuaq, Vestgrønland. En tektonisk betinget sekvensgrænse er markeret med pile. Foto Gregers Dam.

Hvad er sekvensstratigrafi?

Stratigrafi er læren om bjergarters lagdeling, aflejringsforhold og alder.

Sekvensstratigrafi er en form for stratigrafi, hvor den sedimentære lagfølge opdeles i nogle rumlige enheder, „sekvenser“, der hver især er dannet indenfor samme tidsrum. Det tidsrum, indenfor hvilket én sekvens er dannet, svarer til én overordnet cyklus i det relative havniveau.

tære bassiner er processer, der er foregået uophørligt gennem jordens historie. Nedbrydningsprodukterne eller sedimenterne bliver ofte aflejret rytmisk med skiftende grove og finkornede lag. Denne rytmiske udvikling skyldes en kombination af ændringer i det relative havniveau og variationer i mængden af tilførte sedimenter. Ændringer i det relative havniveau er en følge dels af globale ændringer i vandvolumen: „eustasi“, og dels af hævnning eller sænkning af landområder: „isostasi“. Det er kombi-

nationen af disse to processer, der på et givet tidspunkt (inden for en havniveau cyklus) bestemmer „det relative havniveau“.

Variationerne i det relative havniveau vil sammen med variationer i sedimenttilførslen være afgørende for to forhold:

- Om kystlinien rykker frem (prograderer) ud mod bassinmidten („regression“) dvs. at vanddybden i bassinet bliver mindre.
- Om kystlinien rykker tilbage ind over bassinranden („transgression“) dvs. at vanddybden i bassinet bliver større.

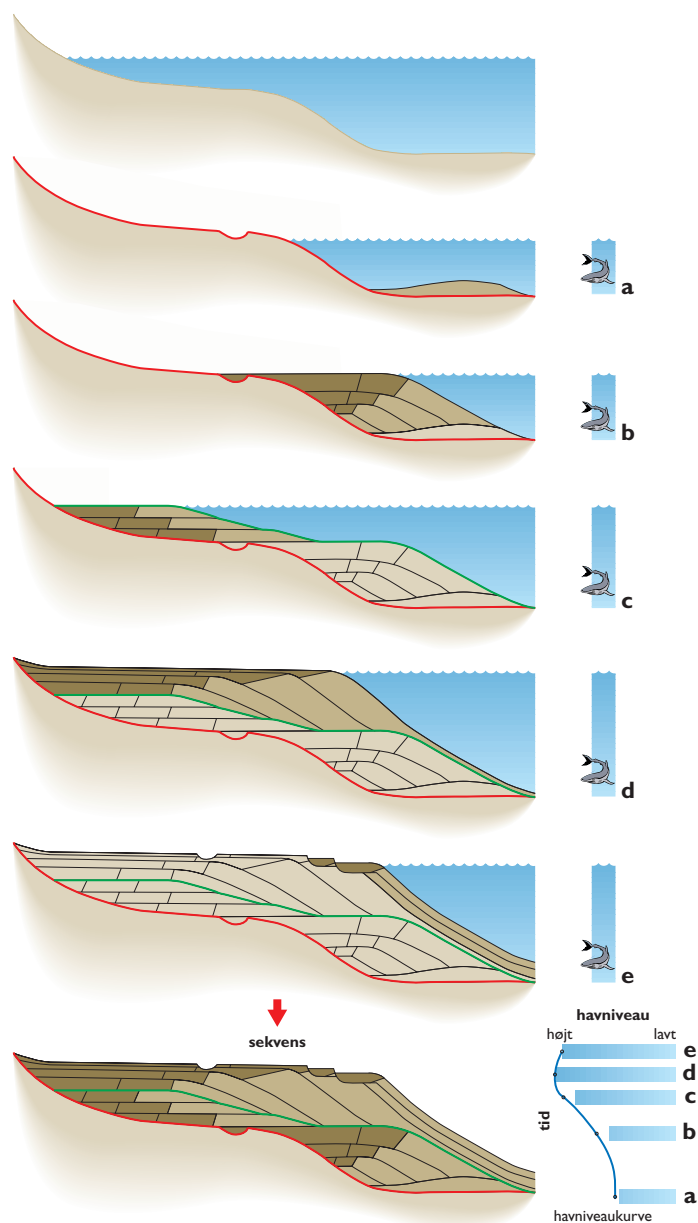
Vekslede regressioner og transgressioner vil på et bestemt sted (i en boring eller i en blotning) ses som en vertikal vekslen mellem sø- eller flodaflejringer, kystnære aflejringer og dybmære aflejringer. Det er disse variationer i sedimenterne, der er geologens basisdata. Derudfra kan en sekvensstratigrafisk model for et aflejringsbassin opstilles.

Forfatterne

Karen Dybkjær blev cand.scient i geologi fra Århus Universitet i 1986. Efter at have udvidet uddannelsen med en Ph.D.-grad blev hun i 1990 ansat ved GEUS, i Stratigrafisk Afdeling, hvor hun i dag er seniorforsker. Hun arbejder med biostratigrafi og sekvensstratigrafi i Nordsøen, dels i forskningsrelaterede projekter og dels som konsulent for danske og udenlandske olieselskaber.

Erik Skovbjerg Rasmussen blev cand.scient i geologi fra Århus Universitet og opnåede Ph.D.-graden inden for geologi i 1994. Han blev ansat ved GEUS i 1987 i Geofysisk Afdeling, hvor han har arbejdet med udviklingen af sedimentære bassiner i Nordsøen, Vestafrika og Portugal. Hans nuværende arbejde er koncentreret omkring dybmære afsætningsmiljøer.

Sekvensstratigrafi historisk set



Figur 2. Opbygningen af en sekvens med dannelse af lavstandskomplekset, det transgressive kompleks, højstandskomplekset og det tvungne regressive kompleks i forhold til ændringer i havniveau: a. Sekvensgrænsen (vist med rødt) dannes ved et fald i relativt havniveau og en dybmærket vifte af lejres distalt dvs. længst væk fra kysten, umiddelbart over sekvensgrænsen.

b. Under begyndende stigning i havniveau udbygges et lavstandskompleks.

c. Ved en forøget stigning i havniveau begynder lagfølgen at rykke tilbage og danner det transgressive kompleks. På det tidspunkt, hvor havniveauet stiger hurtigst dannes den maksimale oversvømmelsesflade (vist med grønt).

d. Når stigningen i havniveau aftager begynder lagfølgen at bygge ud igen og højstandskomplekset dannes.

e. Når det relative havniveau begynder at falde sætter erosionen i gang og kysten rykker hurtigere ud mod bassinmidten. Samtidig aflejres det tvungne regressive kompleks.

Nederst er vist en komplet sekvens og til højre er vist, hvordan den tilhørende havniveaukurve ser ud, svarende til situationerne fra a til e.

Fra Noahs Ark til Dan feltet

Selvom sekvensstratigrafi, som vi forstår begrebet i dag, er et relativt nyt fænomen, bygger det på flere hundrede år gamle teorier om sedimenters cykliske aflejningsmønstre og om årsager til havniveauændringer. Historien om syndfloden og Noah og hans ark er nok den mest velkendte af tidligere tiders historier om havniveauændringer.

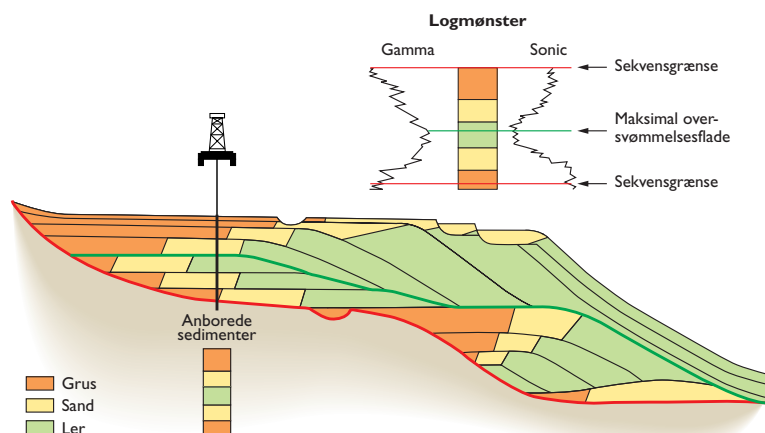
Selvom den tidligste forskning i havniveauændringer ikke havde en religiøs indgangsvinkel, som for eksempel syndfloden, så passede historien meget godt til videnskabmændenes tolkninger af deres observationer. I 1600tallet og første halvdel af 1700tallet gik en af de fremherskende teorier (den neptuniske teori) nemlig ud på, at hele jordkloden, efter sin dannelse, var dækket af vand. Derefter sank vandstanden i ét langt, ubrudt havniveau-fald, der resulterede i den fordeling af land og hav, vi ser i dag.

I slutningen af 1700tallet begyndte arbejdet med detaljeret stratigrafisk analyse af sedimentære bjergarter, og geologerne indså anvendeligheden af „inkonformiteter“ dvs. flader, der afspejler en afbrydelse af eller mangel på sedimentation, som primære grænseflader. Det blev beskrevet, hvordan inkonformiteter adskilte cykliske processer bestående af hævnning, erosion og aflejring. I 1800tallet udvikledes teorien om istider (glacial-teorien) og sammenhængen mellem mængden af vand bundet som is ved polerne og vandstanden i verdenshavene blev klarlagt. Men først et stykke op i vort århundrede blev sammenhængen erkendt mellem glacialt betinget eustasi (ændringer i vandvolumen) og rytmiske aflejringer af sediment.

Udviklingen af den sekvensstratigrafiske metode, som vi kender den i dag, tog for alvor fart i løbet af 1970'erne og -80'erne, hvor geologer ansat i olieindustrien var de førende på feltet. Metoden blev først brugt ved tolkning af seismiske profiler (seismisk stratigrafi), men gradvis blev metoden udvidet til også at inddrage data fra borer og daglokaliteter. Netop metodens velegnethed til at sammenkoble mange forskellige typer data (f.eks. seismisk, geofysiske logs, biostratigrafi og sedimentologi) i én fælles ramme, er nok hovedårsagen til metodens store udbredelse. I dag anvendes metoden i vid udstrækning, i både den akademiske verden og af olielselskaberne.

Sekvensers opbygning

For at opbygge en sekvensstratigrafisk ramme, skal der findes nogle karakteristiske lag eller flader, der kan bruges til korrelation. En sekvens er afgrænset af en nedre og en øvre sekvensgrænse. En sekvensgrænse er en lagflade, der fremkommer på det tidspunkt, hvor det relative havniveau var lavest i en hav-



Figur 3. Figuren viser fordelingen af grus, sand og ler inden for en sekvens. En tænkt gennemboret lagfølge er angivet ved boretårnet. Øverst er vist, hvordan de petrofysiske logs (her gamma og sonic logs) vil se ud for den gennemborede lagfølge. Placeringen af sekvensgrænser og den maksimale oversvømmelsesflade er angivet på loggen med henholdsvis rød og grøn streg.

niveau cyklus. En sekvensgrænse er lettest at erkende, hvor der var land. Her vil den ofte kunne erkendes som en markant erosionsflade eventuelt med dalnedskæringer (se eksemplet på figur 1). Når en sekvensgrænse følges ud mod bassinets midte, bliver den sværere at erkende, fordi den ikke længere er markeret af erosionsstrukturer, men forekommer som en ubrudt flade.

Selve sekvensen består af fire sedimentenheder:

- De sediment, der blev aflejret fra det tidspunkt, hvor havniveauet begyndte at stige svagt, men stadig var så lavt at sedimenttilførslen oversteg stigningen i havniveau, således at kystlinien enten rykkede ud mod bassinmidten, eller lå på samme plads (figur 2a-b). Denne enhed kaldes lavstandskomplekset.
- De sediment, der blev aflejret fra det tidspunkt, hvor stigningen i havniveau begyndte at overstige sedimenttilførslen og indtil havniveauet nåede sit maksimum. Under denne periode rykkede kystlinien tilbage (figur 2b-c). Denne enhed kaldes det transgressive kompleks.
- De sediment, der blev aflejret i den del af en havniveau cyklus, hvor havniveau-

stigningen begyndte at aftage og indtil havniveauet begyndte at falde. I denne periode rykkede kystlinien igen gradvis ud mod bassinmidten (figur 2c-d). Denne enhed kaldes højstandskomplekset.

- De sediment, der blev aflejret fra det tidspunkt, hvor havniveauet begynder at falde og indtil det igen når sit laveste punkt. Denne periode er kendetegnet af begyndende erosion, både i baglandet i form af nedskårne dalsystemer og i lavmarine områder. Samtidig rykker kysten

Dybmarine vifter

Sådan sediment består, i denne sammenhæng, af tidligere kystnære aflejringer, der som følge af jordskælv eller større storme bliver ustabile og transporteres ned ad kontinentalskråningen ud på dybt vand som turbiditstrømme og aflejres i dybmarine vifter.

En turbiditstrøm består af mudder, ler, sand og grus, der løber fra bassinranden ud mod bassinmidten langs med havbunden i turbulente strømme. Begyndelseshastigheden for en turbiditstrøm kan være meget stor. I det nuværende havområde syd for Newfoundland er der for en grovkornet turbiditstrøm beregnet en gennemsnitshastighed på omkring 50 km/t over en strækning på ca. 600 km.

relativt hurtigt ud mod bassinmidten (figur 2d-e).

Denne enhed kaldes det tvungne regressive kompleks.

Under den maksimale udbredelse af havet (figur 2c) får vi normalt aflejret et karakteristisk marint lag, som er let at følge i et bassin. Dette lag er derfor vigtigt når man skal binde lagfølgen sammen. Denne flade kaldes for den maksimale oversvømmelsesflade og adskiller det transgressive kompleks og højstandskomplekset.

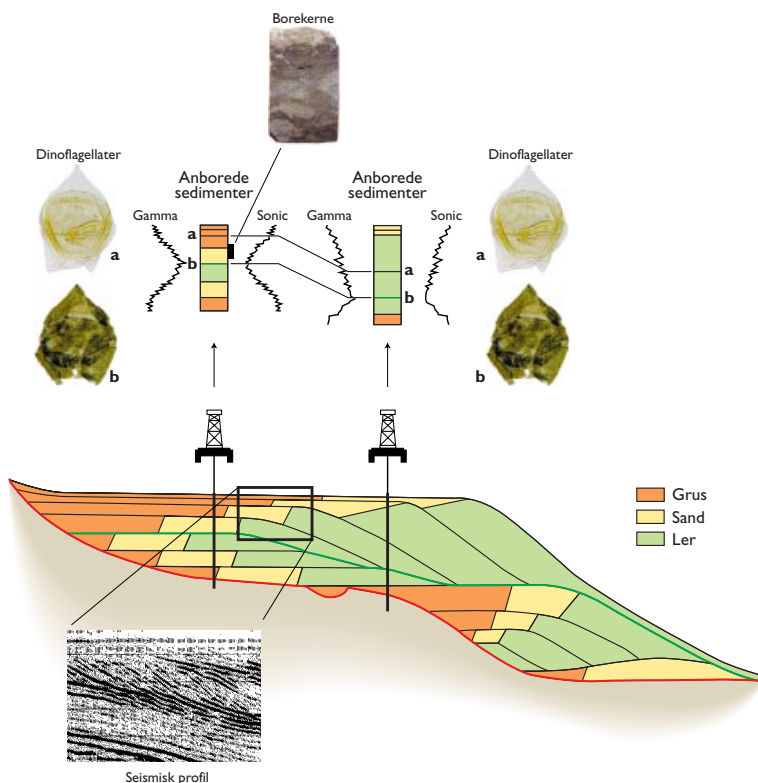
Sedimenternes fordeling inden for en sekvens

Når sekvensstratigrafi anvendes i praksis, placeres sekvensgrænsen normalt ved en vidt udbredt erosionsgrænse ved basis af de mest grovkornede sediment eller inden for det mest grovkornede interval (figur 3). Nær ved den daværende kystlinie kan disse sediment bestå af groft sand eller grus (strand- eller flodaflejringer), men ud mod bassinets midte går de gradvis over i mere finkornet sand eller silt. Lavstandskomplekset består mest af relativt grovkornede sediment, afsat på flodsletter, i deltaer, eller som kystnære aflejringer. Grovkornede sediment (sand) kan også forekomme som dybmarine vifter, langt fra den daværende kystlinie.

De mest finkornede lerlag findes normalt indenfor det transgressive kompleks og især omkring den maksimale oversvømmelsesflade. Tæt på kystlinien vil der dog fortsat kunne aflejres grovkornede sediment.

Højstandskomplekset udviser ofte en gradvis ændring fra en dominans af finkornede sediment nær den maksimale oversvømmelsesflade til overvejende grovkornede sediment op mod den overliggende sekvensgrænse. Hvor det tvungne regressive kompleks er til stede, vil det ofte bestå af velsorterede, omlejrte og relativt grove sediment.

I forbindelse med bl.a. kulbrintefterforskning gælder det om at finde frem til grovkornede, porøse lag (reservoir), der kan indeholde olie eller gas, og som er umiddelbart overlejret af tætte forseglende ler-



Figur 4. Principskitse over anvendelsen af den sekvensstratigrafiske metode. Figurene viser den fælles ramme og fælles terminologi, der gør det muligt at kombinere forskellige typer af geologiske data. Inden for kulbrinte-eftersforskning vil det typisk være seismik, petrofysiske logs, sedimentologi (borekerne) og biostratigrafi (dino-flagellater), der kombineres.

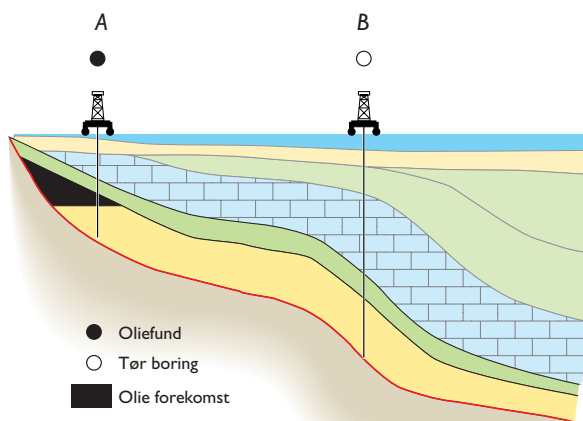
lag, der kan forhindre olien og gassen i at slippe væk. En sådan kombination kan man opnå f.eks. i de tilfælde, hvor et kraftigt relativt havniveau-fald har medført at kystlinien er rykket langt ud mod bassinmidten, efterfulgt af en hurtig havniveau-stigning (se figur 3). Også aflejring af dybmarine vifter kan resultere i den ønskede kombination af porøse, grovkornede sedimente overlejret af tætte, finkornede sedimente.

Hvorfor sekvensstratigrafi?

Hvorfor er den sekvensstratigrafiske metode blevet så udbredt, som den er i dag? Der er flere årsager, men de to vigtigste er:

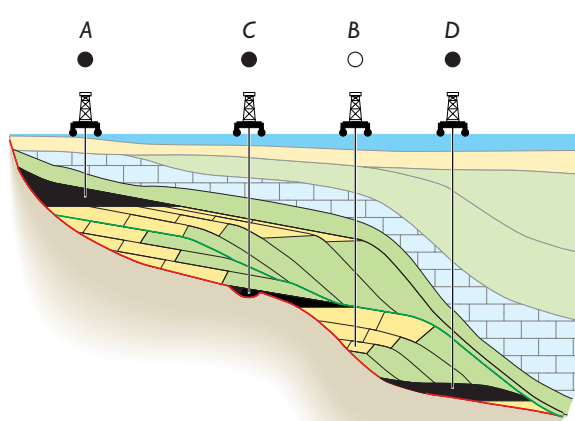
- At metoden er velegnet til at kombinere flere forskellige typer data.
- At metoden beskriver bassiners udvikling både dynamisk (til en given tid) og rumligt (fra de kystnære aflejringer til de dybmarine) og derved giver mulighed for at kunne forudsige litologier dvs. at forudsige, hvordan ler og sand er fordelt i bassinet.

Som omtalt i det foregående, bygger metoden på gammelkendte principper, og en del geologer har da også haft svært ved at se det nye og fantastiske ved den. Men efter

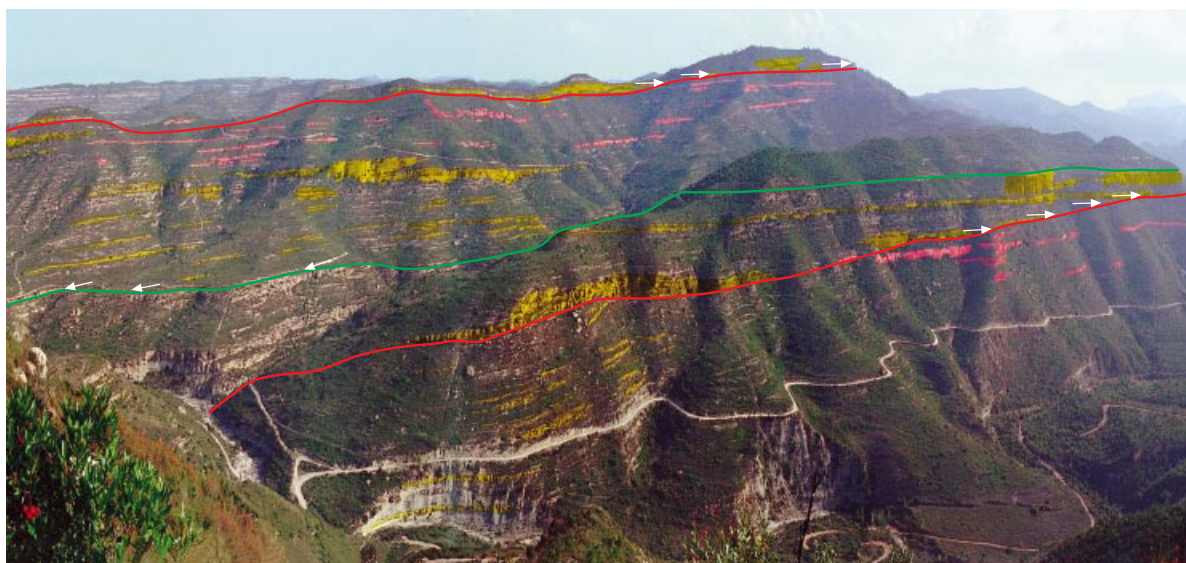


Figur 5a. Skitsen viser, hvor der er fundet et sandstenslag med forsegende lerlag over, i hver af borerne A og B.

I boring A er der fundet olie, mens boring B er tør. En traditionel efterforskningsmodel vil korrelere sandstenslagene og lerlagene, således at olieakkumuleringen kun forventes at forekomme i en strukturel fælde, som vist.



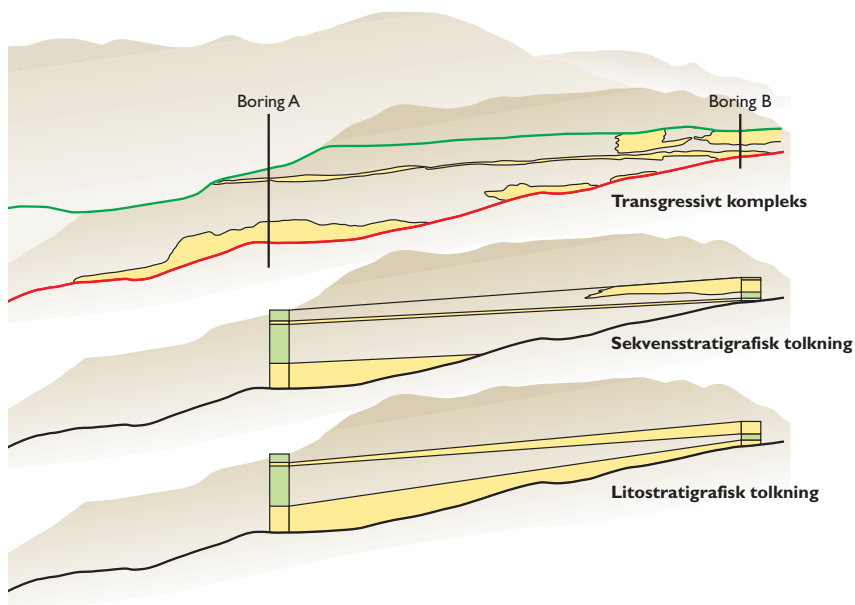
Figur 5b. Skitsen viser en sekvensstratigrafisk tolkning af dataene fra de samme to borer. Her er de to sandstenslag tolket som værende henholdsvis en del af et højstandskompleks (boring A) og et lavstandskompleks (boring B). I denne model er sandlagene isolerede og der vil være mulighed for olieakkumulering i den højere beliggende del af lavstandskomplekset (boring C). Endvidere peger modellen på muligheden af, at der eksisterer en dybmarin vifte i den dybere del af bassinet med mulighed for yderligere kulbrinteforekomster (boring D).



Marin sandsten Kontinental sandsten Sekvensgrænse Maksimal oversvømmelsesflade → Pålap ← Nedlap

Figur 6a. Foto der viser nogle kontinentale og marine aflejringer fra Saint Llorence del Munt på den spanske side af Pyrenæerne. Her ses en sekvens bestående af et transgressivt kompleks, hvor sandlagene gradvis rykker tilbage over den nederste sekvensgrænse (vist med rødt) og et højstandskompleks, der gradvist bygger ud i bassinet over den maksimale oversvømmelsesflade (vist med grønt). Følger man den maksimale oversvømmelsesflade ud mod højre i billedet udgøres den her af 0,5 meter marine skal- og gruslag indlejret i rene kontinentale aflejringer. I den venstre del af billedet ses, hvordan de kontinentale aflejringer gradvis rykker ud i bassinet (mod venstre) i højstandskomplekset. Foto Erik S. Rasmussen.

Figur 6b. Figuren viser en skitse af det transgressive kompleks fra Saint Llorence del Munt (fig. 6a). To tænkte borer, A og B, er placeret på profilet. Det er vist, hvordan henholdsvis en sekvensstratigrafisk og en litostratigrafisk tolkning af lagserien fra de to borer kunne se ud.



en periode med tendens mod specialisering og dermed også isolering af de enkelte geologiske discipliner op gennem 1960'erne og 70'erne kom sekvensstratigrafien med et koncept, hvorved mange forskellige typer af data kunne kombineres indenfor en fælles ramme med fælles terminologi. Metoden er i dag meget udbredt og er ved at sprede sig fra fortrinsvis at være anvendt indenfor kulbrinteeftersøgning til også at blive brugt til kortlægning af mineralske råstoffer og drikkevand. I forbindelse med

kulbrinteeftersøgning er det oftest seismik, petrofysiske logs fra borer, biostratigrafi og sedimentologi, der kombineres for at opstille en fælles model for et sedimentært bassin (figur 4).

Den litostratigrafiske metodes begrænsning

I forbindelse med kulbrinteeftersøgning er det vigtigt at tolke fordelingen af de grovkornede og finkornede sedimenter rigtigt. Den traditionelle måde at opdele

sedimenterne fra en boring på, er at lave en litostratigrafisk inddeling i sandede, lerede, eller kalkholdige intervaller og at korrelere disse til andre borer. En simpel sammenbinding af for eksempel sandede intervaller, kan dog ofte føre til en forkert tolkning af, hvordan disse sandlag er aflejret og hvordan de skal korreleres. En rigtig sammenkædning af sedimenterne er vigtig, når det er kulbrinter der eftersøges, fordi det skal kunne vurderes, hvor og hvor mange borer, der skal laves for at udnytte feltet

optimalt. I eksemplet på figur 5b er det illustreret, hvorledes sandlag kan ligge isolerede, hvis de tilhører enten lavstands-komplekset eller det transgressive kompleks, mens de ofte er mere sammenhængende i højstandskomplekset. I det første tilfælde, hvor vi har isolerede sandlegemer, vil det være nødvendigt at placere flere borer, hvis kulbrinterne skal udvindes optimalt; og det er derfor måske ikke økonomisk rentabelt at udvinde disse. Omvendt ville det være en fordel, hvis det drejer sig om grundvand, hvor sådanne isolerede sandlegemer vil være mere sikret mod forurening og derved være et bedre beskyttet grundvandsmagasin.

Fordelen ved den sekvensstratigrafiske metode

I det følgende gives der et eksempel på fordelene ved at bruge sekvensstratigrafi til op-

deling af en lagserie fremfor en litostratigrafisk opdeling. Eksemplet er fra Saint Llorence del Munt i Spanien (figur 6a). Lagfølgen ved Saint Llorence del Munt er nederst repræsenteret ved kontinentale aflejringer. Over disse ses en lagfølge, der pålapper de kontinentale sedimenter og som repræsenterer marine aflejringer. Vi har her et eksempel, hvor havet har oversvømmet et landområde, altså en transgression. På overgangen imellem de kontinentale og marine sedimenter ses en serie af lyse sandsten, som er aflejret i en kystzone. Disse sandsten rykker gradvist tilbage som isolerede legemer under stigende relativt havniveau. Længst til højre i billedet afsluttes tilbagerykningen af sandstenslagfølgen og den maksimale oversvømmelse af området markeres af et gruslag fyldt med skaller indlejret i kontinentale afsætninger. Dette lag repræsenterer derfor den maksi-

male oversvømmelsesflade og afgrænser det transgressive kompleks fra det efterfølgende højstandskompleks. I højstandskomplekset ses tydeligt den gradvise udbygning af kontinentale sedimenter, der viser at sedimenttilførslen dominerer over havniveaustigningen, hvilket kan skyldes enten en aftagende hastighed af den relative havniveaustigning eller en forøget sedimenttilførsel. Hvis disse sedimenter blev anført ville brugen af sekvensstratigrafiske principper kunne forudsige lagfølgen, således som det ses af eksemplet fra Saint Llorence del Munt, idet denne udvikling er indbygget i den sekvensstratigrafiske model (figur 6a). Anvendes derimod alene en litostratigrafisk inddeling på basis af 2 tænkte borer (figur 6b), vil opfattelsen af sammenhængen imellem sandlagene i det transgressive kompleks kunne blive forkert.

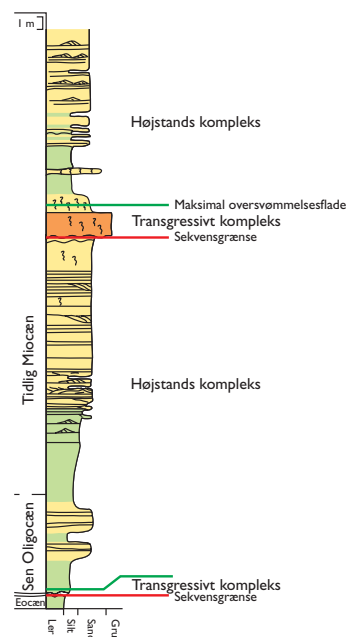


Eksempler på brug af sekvensstratigrafi

Lillebælt - Sønderjylland

Det første eksempel (figur 7-9) viser, hvordan der under lavt relativt havniveau kan aflejres deltasedimenter ude i bassinet, hvor der ellers blev aflejret lerede, marine sedimenter. Det viser også, hvordan det samme havniveaufald kan erkendes længere ind mod det daværende landområde. Eksemplet er fra Jylland, hvor man i Lillebælt området kan studere en gammel kystlinie (fra Nedre Miocæn tid). Den litologiske log i figur 7 fra Børup ved Lillebælt viser lerede og sandede sedimenter afsat i et kystnært miljø. Midt på loggen er der et markant gruslag. Dette gruslag kan tolkes som værende afsat af en flod og tyder dermed på at kystlinien under et fald i det relative havniveau blev forskudt længere ud i bassinet.

Ser vi dernæst på en seismisk linie fra Sønderjylland (figur 8) kan man se et delta, der er bygget langt ud mod bassinmidten.



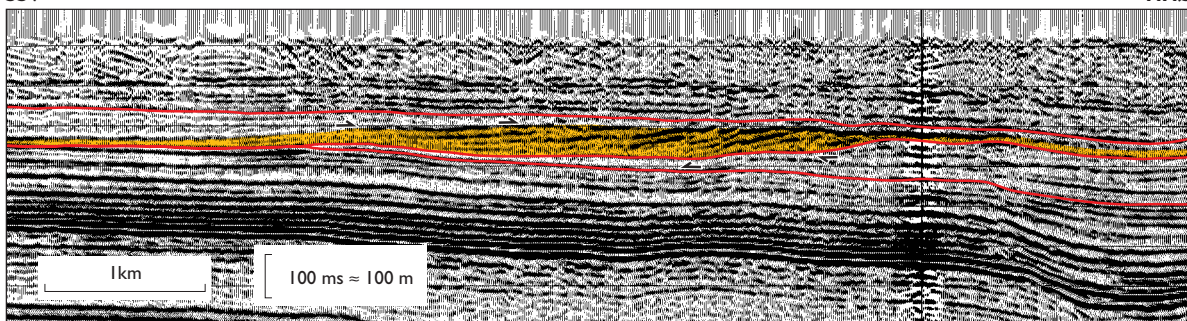
Deltaet repræsenterer en forskydning af kystlinien på ca. 100 km i Nedre Miocæn tid. Den seismiske linie ligger tæt på Borg-1 boreren. Ved hjælp af biostratigrafiske date-

Miocænen varede fra ca. 25 millioner år til ca. 6 mio. år før nu. Oligocænen varede fra ca. 35 mio. år til ca. 25 mio. år før nu. I Danmark er en stor del af aflejringerne fra Miocænen karakteriseret ved at være afsat i et tidevands præget miljø på grænsen mellem land og hav.

Figur 7. Sedimentlog fra Lillebælt området. Loggen viser udviklingen i Sen Oligocæn - Tidlig Miocæn tid, hvor kystnære sedimenter blev aflejret. I den øverste del af loggen ses et markant gruslag, der er tolket som flodsedimenter, der senere blev omlejret under marine processer. Flodsedimenterne antages at være aflejret under et fald i relativt havniveau og omlejret under den efterfølgende relative havniveaustigning. Den erosive grænse ved basis af gruslaget udgør derfor en sekvensgrænse.

SSV

NNØ



Figur 8. Seismisk profil fra Sønderjylland. Profilet viser et delta, der byggede ud i bassinet under lavt relativt havniveau i Tidlig Miocæn tid, og som sandsynligvis er associeret med sekvensgrænsen vist på loggen fra Lillebælt på figur 7.

ringer af lagserien fra Borg-1 boringen er det muligt at korrelere den deltske lagserie til loggen fra Lillebælt og til andre borer i Øst- og Sønderjylland (figur 9). Figuren viser, at deltaet ligger inden for to biostratigrafiske grænser; disse grænser kan følges fra Borg-1 boringen til Høruphav-1 boringen. Lagtykkelsen er væsentlig reduceret i Høruphav-1, ligesom det også er tilfældet ved Lillebælt og i Morsholt-2 boringen. Grunden til at lagfølgen er reduceret ved disse lokaliteter er at de ligger tæt ved bassinranden. Ud fra seismikken ses det endvidere at vanddybden har været ca. 100 m i Sønderjylland (svarende til tykkelsen af delta-loberne). Sydvest for Skærbæk ligger dette delta i dag ca. 300 m under jordoverfladen. De sand- og grusholdige deltsedimenter kan vise sig at være et ferskvandsreservoir, som evt. kan bidrage til drikkevandsforsyningen i området.

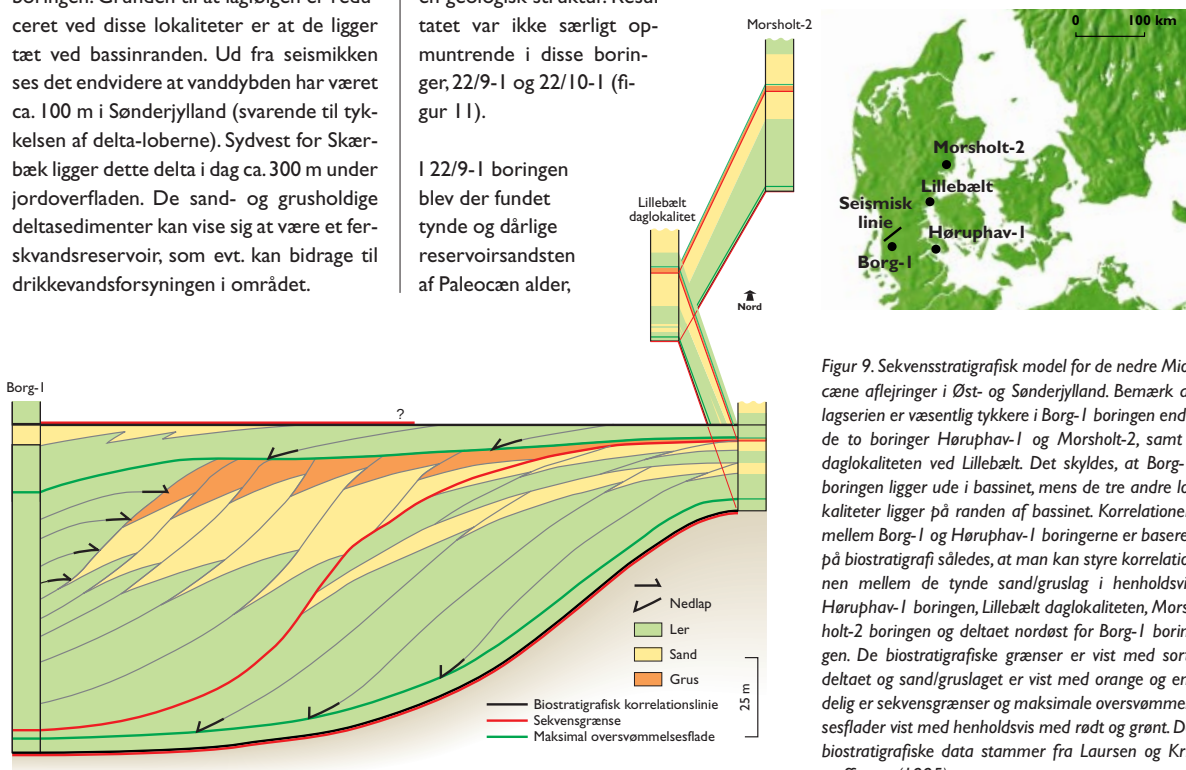
Everest området

Everest området på britisk sektor i Nordsøen (figur 10) er et eksempel på at moderne efterforskningsmetoder anvendt på data fra gamle, tørre borer kan føre til endog meget store oliefund. I henholdsvis 1970 og 1975 borede man efter olie nordvest for Skotland. Metoden der blev brugt var det gode gamle princip om at olien akkumuleres i forbindelse med en geologisk struktur. Resultatet var ikke særligt opmuntrende i disse borer, 22/9-1 og 22/10-1 (figur 11).

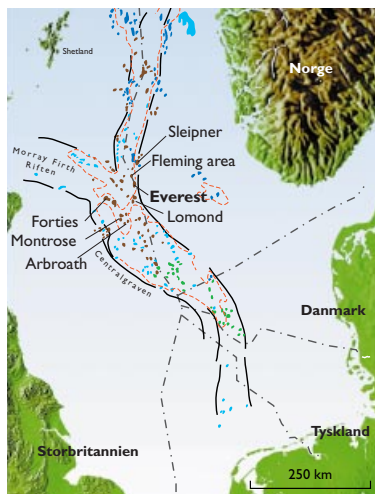
I 22/9-1 boringen blev der fundet tynde og dårlige reservoirsandsten af Paleocæn alder,

men dog med spor af olie og i boring 22/10-1 blev der kun fundet lersten.

I starten af 1980'erne førte en revideret efterforskningsmodel til fundet af store gas- og kondensat akkumulationer. Efterforskningsmodellen, der blev anvendt (figur 12 og 13), var en kombination af moderne sedimentologi og sekvensstratigrafi.



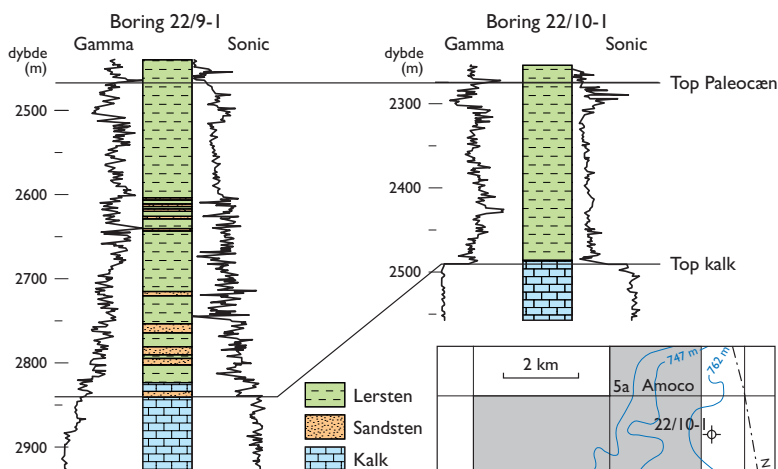
Figur 9. Sekvensstratigrafisk model for de nedre Miocæne aflejringer i Øst- og Sønderjylland. Bemærk at lagserien er væsentlig tykkere i Borg-1 boringen end i de to borer Høruphav-1 og Morsholt-2, samt i daglokaliteten ved Lillebælt. Det skyldes, at Borg-1 boringen ligger ude i bassinet, mens de tre andre lokaliteter ligger på randen af bassinet. Korrelationen mellem Borg-1 og Høruphav-1 borerne er baseret på biostratigrafi således, at man kan styre korrelationen mellem de tynde sand/gruslag i henholdsvis Høruphav-1 boringen, Lillebælt daglokaliteten, Morsholt-2 boringen og deltaet nordvest for Borg-1 boringen. De biostratigrafiske grænser er vist med sort, deltaet og sand/gruslaget er vist med orange og endelig er sekvensgrænser og maksimale oversvømmelsesflader vist med henholdsvis med rødt og grønt. De biostratigrafiske data stammer fra Laursen og Kristoffersen (1995).



- Fund i
- Palæogen sandsten
 - Kridt
 - Øvre Jura sandsten
 - Mellem Jura sandsten
 - Forkastning (Jura Rift)
 - Grænse for moden "Kimmeridge Clay"

Figur 10. Olie- gasfelter i Nordsøen og lokaliseringen af Everest feltet.

Geologerne tolkede de tynde sandstenslag i 22/9-1 boringen til at være en del af en dybmarin vifte. I dybmarine vifter aflejres sandede turbiditstrømme i lobar. Imellem lobarne med sandaflejringer er der overvejende ler med enkelte sandindslag.



Figur 11. Den paleocæne lagfølge i boringerne 22/9-1 og 22/10-1. Bemærk de tynde sandstenslag i 22/9-1, hvori der var spor af olie. Modificeret efter O'Conner og Walker (1993).

Denne aflejringstype kender man fra studier af moderne dybmarine aflejringssmiljøer ud for de store floder som Mississippi- og Amazonfloden. På basis af dette kendskab til dybmarine vifter og en revideret tolkning af data blev det klart at det, der var gennemboret, var de sedimenter

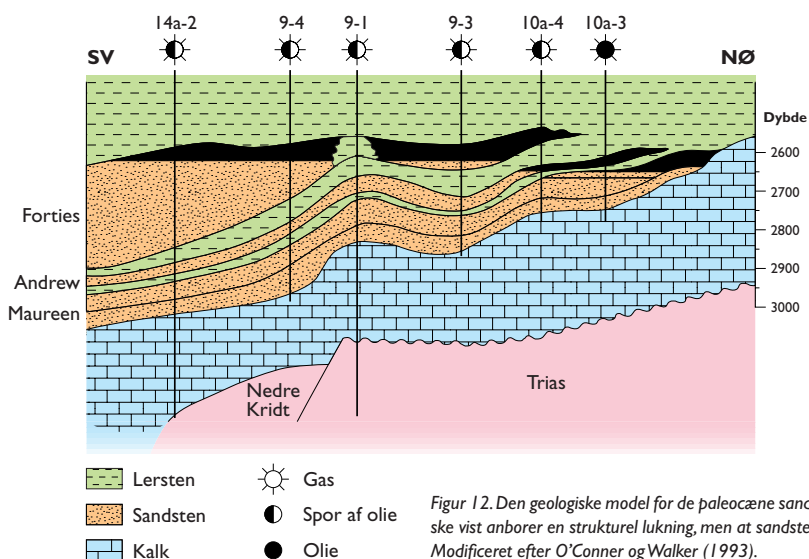
der lå imellem lobarne. Strukturen blev anført igen, og denne gang blev der fundet tykke sandstenslag indeholdende kulbrinter.

Hele Everest området, i hvilket dette koncept er blevet anvendt, er stort. Reserverne er opgjort til at rumme gas og kondensat, der svarer til en værdi på ca. 80 milliarder danske kroner.

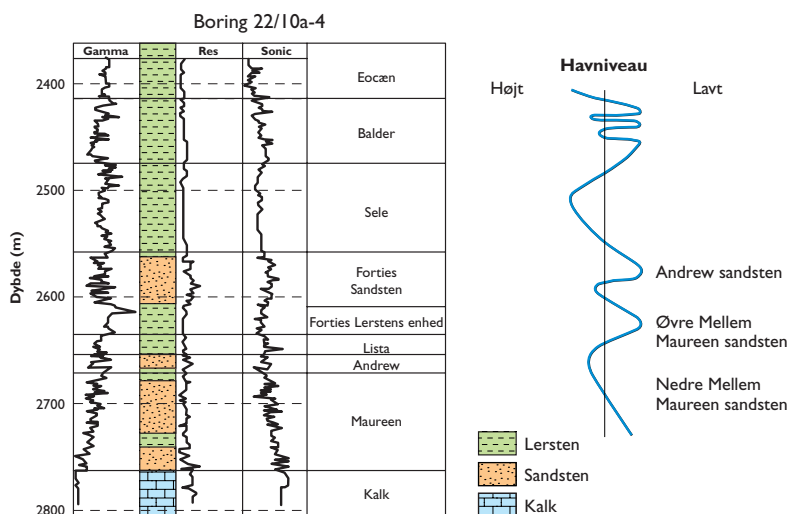
Gertrudgraven i Nordsøen

I den danske del af Nordsøen har der været søgt efter kulbrinter i godt 30 år. Der er gjort fund i en del strukturelle fælder i kalken og enkelte i sandsten af jurassisk alder. Jeppe-1 boringen (figur 14) er placeret på en struktur, i hvilken der var forventninger om at finde jurassiske sandsten.

Det viste sig også at være tilfældet, men desværre med meget dårlige reservoirsegenskaber. En sekvensstratigrafisk tolkning af de jurassiske sedimenter i denne boring har resulteret i, at tynde sandstenslag høj-



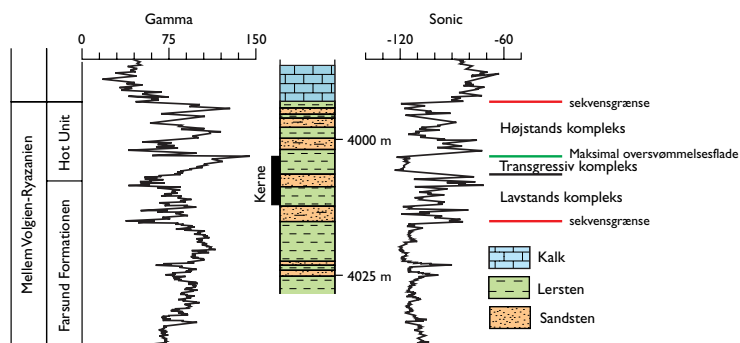
Figur 12. Den geologiske model for de paleocæne sandstenslag i Everest området viser, at boringen 22/9-1 ganske vist anfører en strukturel lukning, men at sandstenslagene er langt tykkere i lavningerne ved siden af. Modificeret efter O'Conner og Walker (1993).



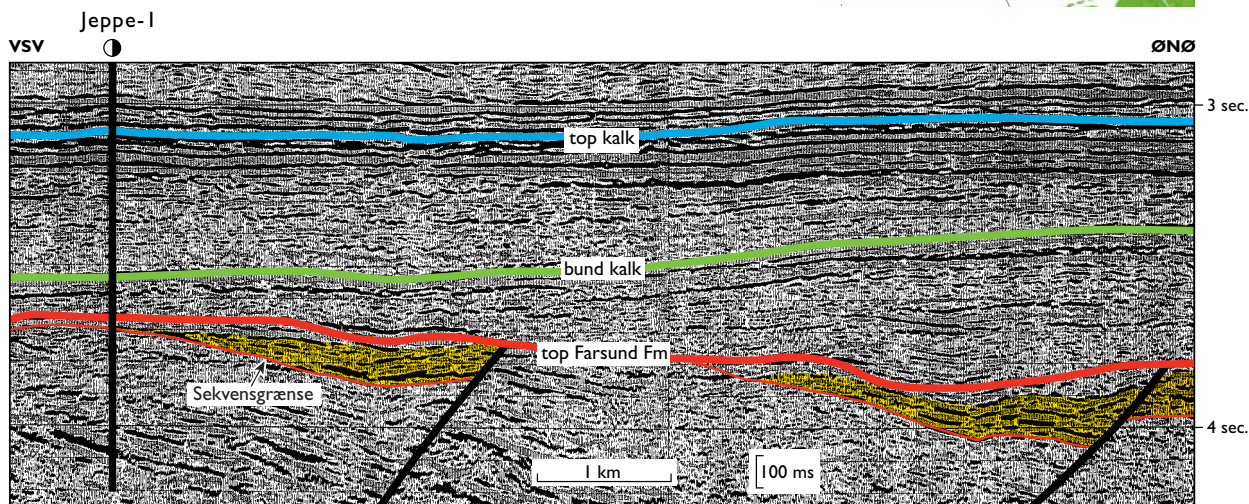
Figur 13. Litologisk log for boringen 22/10a-4, der viser tilstedeværelsen af relativt tykke sandstenslag og relationer mellem de fundne sandstenslag i Everest området og havniveau kurven for Paleocænet. Det ses at sandstenslagene, der tilhører et dybmarint viftesystem, hovedsagelig er aflejret i perioder med lavt havniveau (se havniveauekurve). Modificeret efter O'Conner og Walker (1993).

ere oppe i Jura intervallet, må opfattes som et lavstandskompleks, lige over en sekvensgrænse.

Yderligere analyser af sedimenterne har vist, at disse blev aflejret i en dybmarin vifte; altså en situation som beskrevet fra Everest komplekset, omtalt ovenfor. Følger vi denne sekvensgrænse ud i bassinet, Gertrudgraven, kan det ses på seismikken, at der i den centrale del af graven er en markant ændring i det seismiske refleksionsmønster (de kraftige sorte streger i det gul-farvede interval i figur 15). Dette refleksionsmønster kan tolkes som tykke sandlag aflejret på et dybt sted i den daværende Nordsø. En test af denne model, ved at udføre en boring, vil koste over 100 millioner kroner; men gøres der et fund kan der blive tale om en gevinst på måske flere milliarder kroner.



Figur 14. Loggen viser de øvre jurassiske sedimenter i Jeppe-I boringen, delt op i en sekvensstratigrafisk ramme. Der er her fundet tynde sandstenslag med spor af olie i et lavstandskompleks.



Figur 15. Seismisk profil, der går gennem Jeppe-I boringen og ud i Gertrud Graven. De tynde sandstenslag fra Jeppe-I kan følges ud i bassinet, hvor lagfølgen bliver tykkere. Høje amplituder i refleksionsmønsteret antyder tilstedeværelsen af tykkere sandstenslag her.

Sekvensstratigrafi og....



SAMFUNDET

Den sekvensstratigrafiske metode er udviklet af olieindustrien og bruges først og fremmest af industrien selv. Metodens styrke ligger især i, at den resulterer i modeller, der forudsiger, hvor der kan findes nye reservoirer i stratigrafiske fæl-der.

Metoden anvendes mest i „modne“ olieprovinser, dvs. i områder, hvor man allerede har efter-søgt olie i flere år og allerede har fundet større, strukturelt betingede „oliefælder“.

Metoden bruges dog også til at kortlægge og underopdele allerede kendte fund eller felter i store detaljeringsgrad, så man kan udnytte dem bedre.

Nye fund og en bedre udnyttelse af allerede kendte felter kan forlænge den periode, hvor Danmark kan være selvforsynende med olie og naturgas.

Selvom der i disse år arbejdes hårdt på at udvide den vedvarende energis andel af energi-forbruget, er der ingen tvivl om, at kulbrinter også i fremtiden i en lang periode vil dække hovedparten af vores energiforbrug.

Det er derfor af stor betydning både for Danmarks uafhængighed af andre olieproduce-rende stater og for nationaløkonomien, at vi fortsat arbejder på at øge de producerbare re-ser-ver i den danske Nordsø.



MILJØET

Det er ikke kun til kulbrinte-efterforskning at sekvensstrati-grafi kan anvendes med fordel. Metoden har også et stort potentiale i forbindelse med an-dre geologiske opgaver. Brug af metoden kan således medvirke til, at de geologiske naturres-sourcer udnyttes med større omhu.

Det er f.eks. vigtigt at have et detaljeret kend-skab til et områdes geologi, hvis man skal be-dømme muligheden for at udnytte geotermisk energi. Også i forbindelse med denne miljøven-lige energiform, skal der findes reservoirer i passende dybde, med tilstrækkeligt høje tem-peraturer, dækket af tætte forsegende bjergar-ter.

Nogle maringeologer er begyndt at bruge den sekvensstratigrafiske metode i forbindelse med efterforskning af mineralske råstoffer som grus og sand på havbunden til større bygge- og an-lægsarbejder. Det er således muligt at udføre en bedre og mere detaljeret geologisk kortlæg-ning, der letter udarbejdelsen af modeller for et områdes geologi. Man får hermed et redskab til påvisning af den mulige beliggenhed af større koncentrationer af mineralske råstoffer f.eks på havbunden, således at man kan minimere det område i havbunden, der skal opgraves ved en eventuel udnyttelse af forekomsterne.

Endelig kan det forventes at metoden i fremti-den i langt højere grad vil blive anvendt i for-bindelse med kortlægning og efterforskning af uforurened grundvandsmagasiner, som omtalt i eksemplet fra Sønderjylland.



FORSKNINGEN

Sekvensstratigrafi kan bruges til bedre, og i langt større de-taljeringsgrad, at forstå den geologiske udvik-ling af et aflejningsbassin, end det tidligere har været muligt.

Korrelationer af data fra borer og daglo-kaliteter kan lettere baseres på flere typer af data, da eksperterne inden for hver geologisk disciplin nu har adgang til en fælles terminologi og en fælles tolkningsramme at arbejde inden-for. Ved at kombinere flere typer af data opnås mere sikre tolkninger. Korrelationerne resulterer i en dynamisk og rumlig model for sedi-menternes fordeling i et aflejningsbassin, som så kan bruges til at forudsige, hvilke typer af af-lejringer, der forekommer i de områder, hvor-fra der ikke findes data.

Ud fra sekvensstratigrafiske tolkninger af aflej-ringer fra mange områder over hele verden er der blevet opstillet globale havniveau kurver. Disse kurver viser, hvilke relative havniveau-svingninger, der skyldes lokale forhold (lokal tektonik), og hvilke, der skyldes globale klima-ændringer (temperatur svingninger).

Anvendelsen af den sekvensstratigrafiske me-tode kan således hjælpe til bedre at forstå de klimaændringer, der kan påvises i fortiden og derfor hjælpe med til at beskrive globale mil-jøændringer.

Her kan man læse videre

N.P. Christensen og N. Stenftoft, 1993

Temanummer om: Olie- og gasindvinding.
DGU information Nov. 1993.

J.E. Christensen, 1995

Olieefterforskning i Norge.
Geologisk Nyt 3/1995.

O. Winther Christensen, P. Japsen og A. Dinesen, 1989

Reservoirkortlægning.
DGU Årsberetning for 1988.

S.W. Clausen, 1996

Sekvensstratigrafi - en geologisk tolknings-ramme. Geologisk Nyt 1/1996.

P. Frykman og N. Stenftoft, 1991

Oliedråbens skæbne.
DGU Årsberetning for 1990.

J.M. Hansen, 1994

Geologi for enhver. DGU og Geografforlaget.

S. Hultberg, 1991

Olieefterforskning i Nordsøen.
DGU Årsberetning for 1991.

I. Marcussen og S. Hultberg, 1995

Olie og gas i Danmark - Kort fortalt nr. 4.
DGU og Geografforlaget.

E.S. Rasmussen, 1991

Sekvensstratigrafi.
DGU Årsberetning for 1991.

K. Sørensen, 1996

Temanummer om: Olie og gasefterforskning i Nordsøen.
GEOLOGI-nyt fra GEUS, 2&3/1996.

Referencer

D. Emery & K.J. Myers (ed), 1996

Sequence Stratigraphy. Blackwell Science, Lon-don, 297 p.

Arthur Holmes, 1965

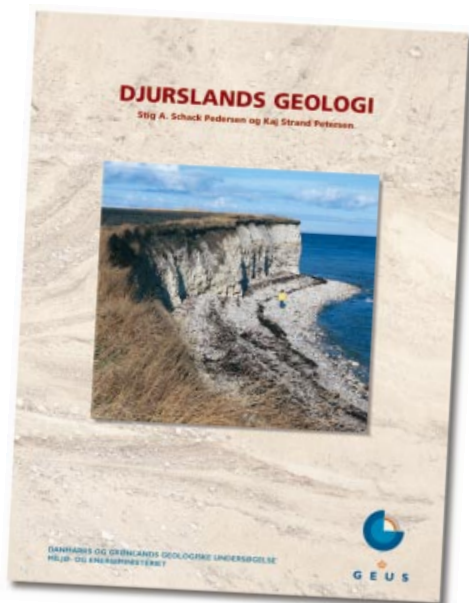
Principles of Physical Geology. Turbidity Cur-rents. Nelson, London, 864-870.

Gitte V. Laursen & F.N. Kristoffersen, 1995

Detailed foraminiferal biostratigraphy of the Danish marine Miocene formations. In: Gitte V. Laursen: Foraminiferal analyses of Tertiary de-posits in the North Sea area. Ph.D. afhandling, Aarhus Universitet, 276 s.

S.J. O'Connor & D. Walker, 1993

Paleocene reservoirs of the Everest trend. In: J.R. Parker(ed.): Petroleum Geology of the Northwest Europe: Proceedings of the 4th Conference. The Geological Society, London, 145-160.



DJURSLANDS GEOLOGI

Stig A. Schack Pedersen og Kaj Strand Petersen

Denne smukke bog rummer beretningen om Djurslands geologiske historie under istiderne og tillige en fylldig beskrivelse af udviklingen i området efter at indlandsisen for omtrent 10 000 år siden endelig forlod Danmark. Bogen er derudover en kortbladsbeskrivelse af det geologiske kort over Djursland.

De talrige illustrationer med instruktive tegninger, fotografier og kort, de fleste i farver, gør bogen indbydende og levende, og letter tilegnelsen af det omfattende stof. Med denne bog fortsætter GEUS traditionen fra det tidligere DGU med udgivelse af regionalgeologiske beskrivelser af Danmarks geologi.

Sammen med bogen følger det geologiske kort over Djursland, der blev udgivet i 1995. Kortet er i målforsholdet 1:50 000.

Bogen forhandles af Geografforlaget, 5464 Brenderup.

Tlf.: 63 44 16 83. Pris: 225 kr. ekskl. forsendelse.

Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS) er en forsknings- og rådgivningsinstitution i Miljø- og Energiministeriet.

Institutionens hovedformål er at udføre videnskabelige og praktiske undersøgelser på miljø- og energiområdet samt at foretage geologisk kortlægning af Danmark, Grønland og Færøerne.

GEUS udfører tillige rekvirerede opgaver på forretningsmæssige vilkår.

Interesserede kan bestille et gratis abonnement på **GEOLOGI - NYT FRA GEUS**. Bladet udkommer 4 gange om året.

Henvendelser bedes rettet til:
Knud Binzer

GEUS giver i øvrigt gerne yderligere oplysninger om de behandlede emner eller andre emner af geologisk karakter.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.

GEOLOGI - NYT FRA GEUS er redigeret af geolog Knud Binzer (ansvarshavende) i samarbejde med en redaktionsgruppe på institutionen.

Konsulent: Marianne Vasard Nielsen.

Skriv, ring eller mail:

GEUS

Danmarks og Grønlands
Geologiske Undersøgelse

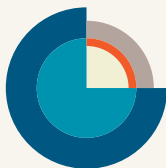
Thoravej 8, 2400 København NV.

Tlf.: 38 14 20 00

Fax.: 38 14 20 50

E-post: geus@geus.dk

Hjemmeside: www.geus.dk



GEUS

GEUS publikationer:

Hos Geografforlaget kan alle GEUS' udgivelser købes.

Henvendelse kan ske enten på tlf.:

63 44 16 83 eller telefax: 63 44 16 97

E-post: go@geografforlaget.dk

Hjemmeside: www.geografforlaget.dk



Adressen er:

GEOGRAFFORLAGET 5464 Brenderup

ISSN 1396-2353

Produktion og illustrationer:

Carsten Thuesen, GEUS Grafisk

Tryk: From & Co

Forsidebillede: *Nedskåret dal fra sydkysten af Nuussuaq, Vestgrønland.*

Foto: Chris Pulvertaft