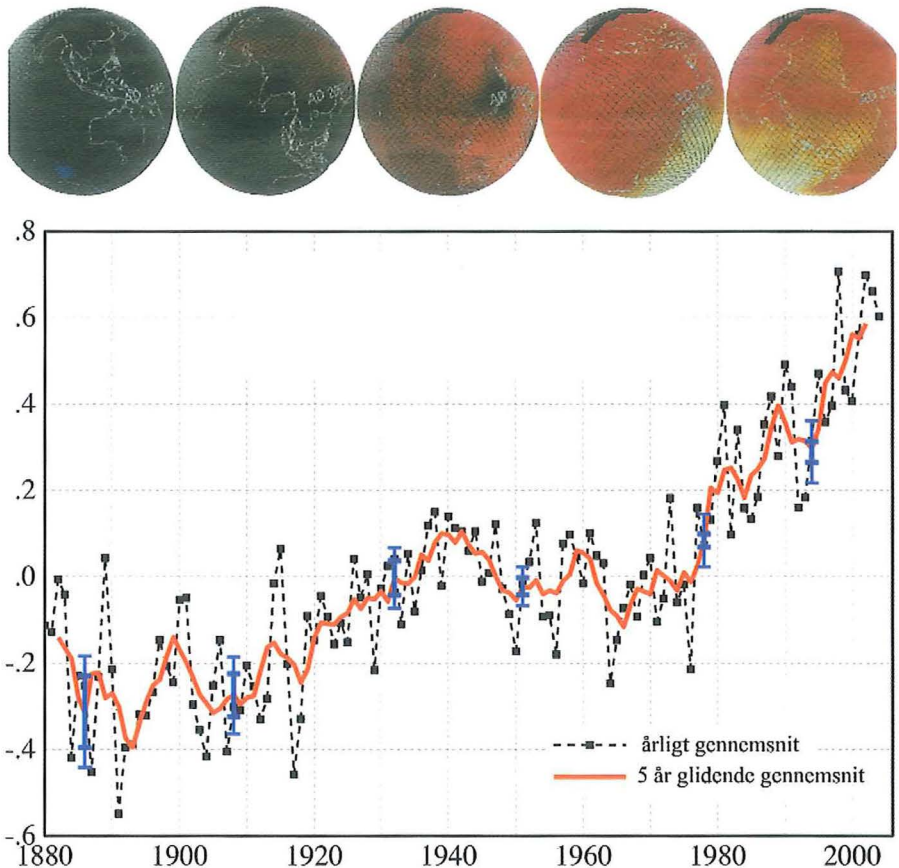


PLANKTONISKE FORAMINIFERER OG PALÆOKLIMATOLOGI

Kurt Nielsen

I de senere år har medierne i stigende grad fokuseret på kommende klimaændringer samt konsekvenserne af disse. Overskrifter som, 'Global feber', 'Iskjoldet smelter hurtigere end hidtil antaget' og '2004 varmeste år nogensinde' (her refereres formodentligt til, at gennemsnitstemperaturen i 2004 var 0,46 °C højere end gennemsnittet for perioden 1961-1990) forekommer hyppigt i diverse medier og er typisk illustreret som i figur 1.



Figur 1. Den globale temperaturudvikling siden 1880.

Set i et geologisk perspektiv er den sidste overskrift naturligvis nonsens, da man kender til adskillige geologiske perioder, hvor klimaet har været varmere end det nuværende. Uagtet dette har det sidste årtis ekstreme vejrforhold sat fokus på ændringerne i det globale klimasystem.

Her er det måske lige værd at bemærke, at klimadebatten faktisk også blev ført for 30-40 år siden. Dengang blev den ikke taget alvorligt af ret mange, og de, der påstod, at klimaet ville forandre sig på kort sigt, blev stemplet som miljøfanatikere, eller det der var værre. I dag synes der at være generel enighed om, at nutidens klima er ved at forandre sig på grund af menneskelig indflydelse - hastigheden og konsekvensen af de mulige forandringer diskuteres imidlertid stadigvæk.

En ting, der både i forbindelse med den hjemlige og den internationale debat har undret forfatteren til denne artikel, er, at geologer ikke synes at deltage. Det er af flere årsager jo lidt mærkeligt: dels bliver geologer vel påvirket ligesom alle andre af kommende klimatiske ændringer, og dels kunne geologer tænkes at være i stand til at belyse et af kardinalpunkterne omkring klimaforandringer. Kritikken mod klimaforudsigelser er ofte, at der ikke findes tilstrækkeligt pålidelige klimatiske målinger, der strækker sig langt nok tilbage i tiden (de første pålidelige målinger er fra ca. 1856). Det ville derfor være naturligt, hvis geologer, der om nogen må formodes at vide noget om fortidens klima (palæoklima), bidrog med deres viden til debatten. Det kan selvfølgelig være, at geologer generelt ikke ønsker at deltage i denne debat, men jeg tror nu snarere, at grunden skal søges i de resultater, der er fremkommet inden for den geologiske klimaforskning. Mens den aktuelle 'nutidige' klimaforskning som diskussionsgrundlag benytter sig af data fra en forholdsvis kort tidsserie, er en geologisk tidsserie derimod typisk på 10.000 år eller derover. Så mens geologer generelt arbejder med lange tidsserier - med begrænset tidsopløselighed (prøvetæthed) - så arbejder forskere af nutidens klima med korte tidsserier med stor opløselighed f. eks. årsgennemsnit (figur 1). Til gengæld er længden af dataserien begrænset (160 år). En undtagelse fra ovennævnte er iskernestudierne fra f. eks. Grønland.

Betyder dette forhold - de lange tidsserier med begrænset opløselighed - så, at geologer generelt ikke kan bidrage med fagligt viden til den nuværende debat?

Måske, men efter forfatterens mening behøver det ikke forholde sig på denne måde. Talrige eksempler på geologisk klimaforskning har vist, at den geologiske metode 'virker' og sagtens vil kunne inddrages i de mange facetter af den nuværende debat.

Dette faktum er forsøgt illustreret i det nedenstående eksempel, der omhandler en palæoklimatisk analyse af et marint profil af Plio-Pleistocæn (ca. 1,87 millioner år) alder fra den græske ø Rhodos. Den 'palæoklimatiske analyse' er baseret på forekomsten af fossile planktoniske foraminiferer, som af mange geologer anses for ideelle redskaber til palæoklimatiske studier. Planktoniske foraminiferer er dog blot én af mange mulige tilgange til sådanne studier (se f. eks. VARV 1996, 3 og 4 og VARV 1997, 2).

Der er to hovedgrunde til, at planktoniske foraminiferer egner sig fortræffeligt til de nævnte studier. Dels er de udbredt i de fleste marine miljøer, nutidige såvel som fossile, og dels er det muligt på grund af deres ringe størrelse (som i nedenstående tilfælde er omkring 100 µm; 1 µm: 1/1.000 millimeter) at udtage tætliggende prøver dvs., at opløseligheden bliver meget stor.

PLANKTONISKE FORAMINIFERER

Foraminiferer er encellede skalbærende marine organismer i familie med amøber, der udviser henholdsvis en bentonisk og planktonisk levevis (henholdsvis bundlevende og frit svævende i vandmasserne).

Planktoniske foraminiferer blev første gang beskrevet af D'Orbigny i 1826, men først omkring 1884 blev deres planktoniske levevis erkendt. De ældste planktoniske foraminiferer anses for at have en førstegangs optræden i den nedre del af den jurassiske periode (ca. 210-150 millioner år).

Planktoniske foraminiferer forekommer kun i de åbne oceaner og er derfor kendetegnet ved at være høj-marine, dvs. at de kun forekommer i vandmasser, der ikke er influeret af ferskvand. Planktoniske foraminiferer lever frit svævende i vandmasserne, men kan bevæge sig op eller ned.

Generelt er de udbredt fra pol til pol og kan forekomme i meget store koncentrationer i de øvre vandmasser. Studier har vist, at en 1 kubikmeter vandsøjle gennemsnitligt indeholder mellem 10-100 individer i de tropiske egne, men der er talt op til 1.000 individer pr. kubikmeter i særligt næringsrige vandmasser. Selv om antallet af individer kan være meget stort i de polare egne, er disse domineret af få arter modsat de subtropiske eller tropiske vandmasser, hvor man finder den højeste artsdiversitet (artsdiversitet er et begreb der beskriver antallet af forskellige arter der lever i et givet miljø). En høj artsdiversitet betyder således, at der er observeret mange forskellige arter. En høj/lav artsdiversitet siger dog ikke noget om antallet af individer af den enkelte art. Artsdiversiteten er dog stærkt afhængig af vandmassens fysiske samt biologiske parametre, f. eks kan der forekomme høj artsdiversitet i up-dwelling zoner. Up-dwelling zoner er kystnære marine områder, hvor koldt og næringsrigt bundvand bliver presset op til overfladen, der derved bliver beriget med f. eks. mikronæringsstoffer. Størstedelen af de planktoniske foraminiferer lever på mellem 0-400 meters vanddybde, men enkelte arter formodes at leve langt dybere. En enkelt art er således fundet levende på 2.000 meters vanddybde.

Laboratorieforsøg har vist, at nogle få arter overvejende er rovdyr, mens andre overvejende er planteædere. De fleste er dog formodentlig altædende og kan ernære sig ved både animalsk og vegetabilsk føde. I forbindelse med deres ernæring er der undersøgelser, der tyder på, at nogle arter kan optage 'DOM' direkte fra vandmassen, hvor DOM står for Dissolved Organic Matter dvs. opløst organisk materiale, der findes i enhver vandmasse.

Man formoder at de planktoniske foraminiferer har kønnet formering, og levetiden er fra mellem 2-3 uger og op til et par år afhængig af den enkelte art.

NUTIDIGE ARTER

I de nuværende oceaner kendes der ca. 44 forskellige arter, fordelt på 21 slægter. Antallet af arter varierer, afhængig af hvilken taksonomisk skole man tilhører (taksonomi er den gren af naturvidenskaben der beskæftiger sig med at beskrive, bestemme samt navngive de enkelte arter). Dette kan lyde lidt underligt for en art er vel en art?

Uden at gå i dybden med denne diskussion der vil fører alt for vidt i denne forbindelse, kan jeg kort nævne at der findes tre 'forskellige' artsbegreber, som benyttes af henholdsvis biologer og geologer.

Den biologiske art er en her og nu art (dvs. en nulevende art der kan observeres) og er til dels defineret ud fra evnen til at reproducere sig med andre individer af samme art og føde levedygtigt afkom.

Den geologiske art strækker sig i tid (den kan være nulevende, men har desuden også fossile repræsentanter og er defineret ud fra morfologiske karakteristika - dvs. artens fysiske udseende, i dette tilfælde skallens karakteristika; se plancherne tabel 1). Den nyeste er DNA-arten, og som navnet antyder, er definitionen af denne baseret på DNA-profiler. Det siger sig selv at den biologiske og DNA arten er uanvendelig i de fleste fossile sammenhænge, men begge er dog anvendt med mere eller mindre held af geologer på nulevende arter.

Historisk set, har det altid været geologer, der har beskæftiget sig med foraminiferer (sådan forholder det sig stort set også i dag), hvilket har bevirket at de forskellige foraminiferarter har været beskrevet og bestemt ud fra det morfologiske artsbegreb. Alle arter udviser en vis naturlig variation indenfor den enkelte arts fysiske karakteristika, og det samme gør sig naturligvis også gældende inden for de enkelte foraminiferarter, og det er denne variation, der giver ophav til uenigheden vedrørende antallet af arter, deres udseende osv.

I mange år har geologer der har beskæftiget sig med foraminiferer generelt været inddelt i to hovedgrupperinger: splittere og samlere. Den første gruppe har ment at selv meget små morfologiske forskelle tillod oprettelsen af nye arter, mens samlerne tillod en større morfologisk variation inden for den enkelte art. Dette har betydet at 'splitterne' arbejdede med mange forskellige arter, mens 'samlerne' arbejdede med få arter.

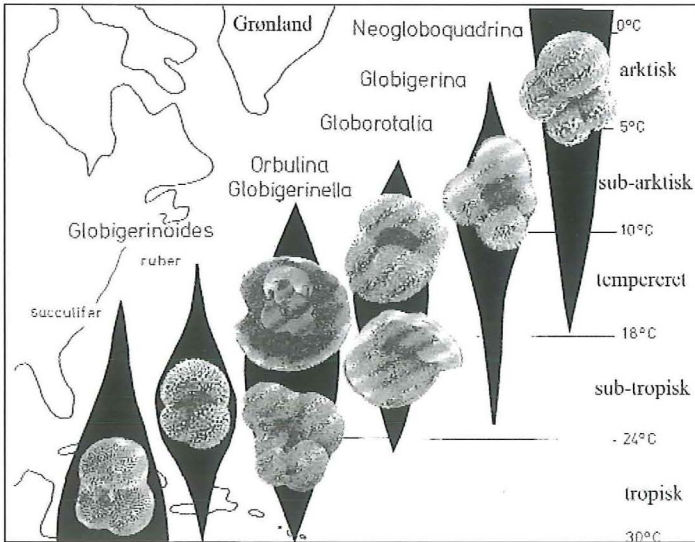
Den nyeste DNA forskning synes til dels at give begge grupper ret. I forbindelse med DNA-studier af enkelte udvalgte arter af planktoniske foraminiferer er der resultater der antyder, at antallet af arter er omkring det dobbelte af, hvad man hidtil har regnet med. Ud af disse 44 er omkring 18-20 arter almindeligt forekommende i oceanerne i dag (tabel 1). Skalaerne er 100 μ m i plancherne, medmindre andet er nævnt.

<i>Globigerina bulloides</i> Planche 1	<i>Orbulina universa</i> Planche 5	<i>Neogloboquadrina eggeri</i> Planche 8
<i>Globigerina falconensis</i> Planche 1	<i>Globigerinita glutinata</i> Planche 5	<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> Planche 9
<i>Globigerina quinqueloba</i> Planche 2	<i>Berggrenia clarkei</i> Planche 6	<i>Globorotalia pakerae</i> Planche 9
<i>Globigerina rubescens</i> Planche 2	<i>Berggrenia riedeli</i> Planche 6	<i>Globigerinoides elongatus</i> Planche 10 (uddød)
<i>Globigerinoides ruber</i> Planche 3	<i>Globorotalia crassaformis</i> Planche 7	<i>Globigerinoides extremus</i> Planche 10 (uddød)
<i>Globigerinoides sacculifer</i> Planche 3	<i>Globorotalia scitula</i> Planche 7	<i>Globigerinoides pyramidalis</i> Planche 11 (uddød)
<i>Globigerinella aequilateralis</i> Planche 4	<i>Globorotalia truncatulinoides</i> Planche 7	
<i>Globigerinella calida</i> Planche 4	<i>Neogloboquadrina dutertrei</i> Planche 8	

PLANKTONISKE FORAMINIFERER SOM KLIMAINDIKATORER

Relativt tidligt (1897) blev det observeret, at fordelingen af skaller fra de planktoniske foraminiferer i havbundssedimenterne syntes at afspejle de generelle nutidige klimazoner i oceanerne (arktisk, subarktisk, tempereret/transitional, subtropisk og tropisk). Nogle arter dominerer det arktiske marine miljø, mens andre dominerer de tropiske vandmasser. Det ville således være naturligt at antage, at det er vandtemperaturen, der primært styrer både udbredelsen samt det totale antal individer af planktoniske foraminiferer i de nuværende oceaner. Nyere undersøgelser har imidlertid påvist, at antallet samt fordelingen af arter afhænger af langt flere faktorer end vandtemperaturen.

Af de primære fysiske og biologiske faktorer, der synes at have indflydelse på den enkelte arts vertikale og horisontale udbredelse, dvs. den dybde, hvor arten lever og dens geografiske udbredelse, skal nævnes: mængden af føde, fødens beskaffenhed, mikronæringsstoffer, vandmassens salinitet (saltindhold) og vandtemperatur. Ud over disse parametre tyder nyere undersøgelser på, at kvaliteten af lyset (dvs. bølgelængden) også har stor indflydelse på bestemte arters vækst og formering. Selvom forekomsten af nulevende planktoniske foraminiferer således styres af langt flere faktorer end vandtemperaturer, er det alligevel muligt at foretage en generel temperaturzonering baseret på udbredelsen af nogle bestemte planktoniske foraminiferer (figur 2).



Figur 2.
Udbredelsen af forskellige slægter af planktoniske foraminiferer korreleret med de klimatiske zoner:

MIDDELHAVET

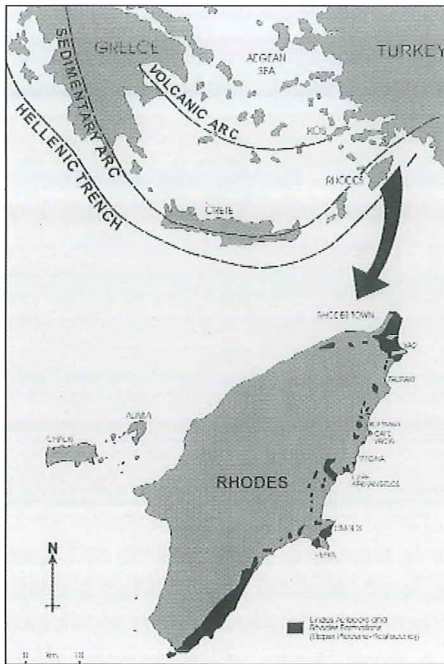
Da øen Rhodos ligger i det østlige Middelhav, vil det i denne forbindelse være naturligt kort at nævne den nutidige artsfordeling her samt nogle af faktorer, der kan have indflydelse på denne fordeling.

Middelhavet er et afsnøret hav, hvis vandbalance er negativ dvs. den årlige fordamning overstiger den mængde nedbør, der årligt falder i området.

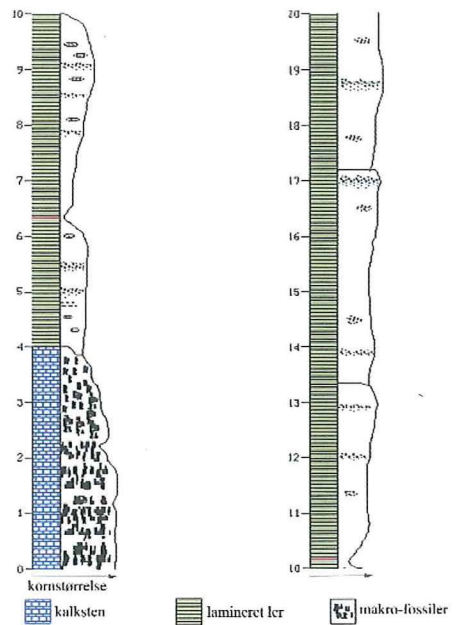
Den negative vandbalance bliver opvejet af en tilstrømning fra Atlanterhavet samt Sortehavet, men generelt er Middelhavet varmere og mere salint end tilsvarende vandmasser på disse breddegrader. Disse og andre forhold betyder, at også den planktoniske foraminiferfauna er anderledes sammenlignet med de omgivende oceaner.

Studier af nulevende planktoniske foraminiferer i Middelhavet er desværre begrænset til to undersøgelser. Resultaterne fra disse peger på, at det er muligt at opdele Middelhavet i en vestlig og østlig faunaprovins. Den vestlige er en blandet kølig-subtropisk provins (dette skyldes formodentlig indflydelsen fra Atlanterhavet), mens den østlige er en ren subtropisk-tropisk faunaprovins. Den vestlige (kølige) fauna provins er domineret af arter som *G. bulloides* (57 %), *G. aequilateralis* (11 %), *G. ruber* (6 %), *G. quinqueloba* (6 %), mens den østlige (varme) er domineret af arter som *G. aequilateralis* (26 %), *G. quinqueloba* (15 %), *H. pelagica* (13 %) (denne art er ikke vist på plancherne), *G. ruber* (12 %), *G. falconensis* (5 %) og mindre forekomster af *G. calida*.

Det er altså muligt generelt at henføre den planktoniske fauna i Middelhavet til to faunaprovins, hvis adskillelse kunne skyldes forskelle i temperatur og salinitet.



Figur 3. Beliggenheden af den græske ø Rhodos. Farven sort angiver udbredelsen af Plio-Pleistocæn sedimenter i det nordøstlige kystområde.



Figur 4. Profilet består af to hovedtyper af sedimentære enheder; en henholdsvis 4 meter tyk kalkstensenhed, der er overlejret af en 36 meter tyk marin lerenhed. Bemærk, at der kun findes makrofossiler i kalkstensenheden, og at kun den nederste del af profilet (A) er vist her.

RHODOS

Rhodos ligger mere præcist i det Ægæiske hav i det østlige Middelhav, ca. 10 kilometer fra det tyrkiske fastland (figur 3). Det undersøgte profil er beliggende på østkysten og måler vertikalt i alt 40 meter. Profilet er delt op i 2 sektioner (A og B), i en henholdsvis øvre og en nedre del. De to sektioner er adskilt af en vej (figur 4) og kan opdeles i 3 sedimentære enheder.

Den nederste enhed (basement) består af mesozoisk metamorf kalksten og skal ikke kommenteres yderligere. Den mellemste enhed (4 meter) består af svagt cementeret skalgrus (figur 5). Denne enhed er overlejret af den øverste enhed, som består af 36 meter marint ler (figur 6).

FREM GANGSMÅDE OG METODIK

Der er indsamlet ca. 350 prøver i alt svarende til en prøve for hver 15 centimeter. Samtlige prøver er derefter blevet oparbejdet og de planktoniske foraminiferer talt,



Figur 5. Kalkstensenhed (se tekst).

beskrevet og identificeret. I alt er der identificeret mere end 56 forskellige planktoniske arter. Disse arter og deres antal (for hver prøve) er registreret i et regneark med 56x350 rækker og koloner.

Der skal ikke megen fantasi til at forestille sig, at det er ret uoverskueligt at finde et eller flere mønstre i denne mængde af data, men når man har studeret dem tilstrækkelig længe, er det faktisk muligt at finde mønstre, der repræsenterer forskellige faunasammensætninger, der kunne afspejle temperaturvariationer op gennem profilerne.



Figur 6. Marin lerenhed (se tekst).

RESULTATER

Faunasammensætningen af de planktoniske foraminiferer viser, at det er muligt at inddele profilet i tre generelle palæotemperaturzoner (disse zoner må ikke forveksles med den sedimentologiske inddeling).

Den første zone er domineret af arter som *G. quinqueloba*, *G. elongatus*, *G. extremus*, *G. ruber*; *O. universa* samt mindre forekomster af *N. eggeri* og *N. pachyderma*. Dette faunaselskab repræsenterer sandsynligvis en periode med vandtemperaturer som i dag eller måske endda lidt varmere (subtropisk). Enkelte opblomstringer af former relateret til køligere forhold tyder på, at der har været enkelte indslag af perioder med koldere klima (tempereret).

Den anden zone er domineret af arter som *G. calida*, *B. clarkei*, *G. bulloides*, *G. quinqueloba* samt mindre forekomster af *G. ruber*; *G. crassaformis*, *G. aequilateralis*, *G. truncatulinoïdes* samt – i mindre grad - *N. pachyderma*. Denne faunasammensætning tyder på, at vandtemperaturen har været højere end i den foregående zone (tropisk).

I slutningen af zone 2 og gennem zone 3 synes et drastisk klimaskift at have fundet sted. Den tredje zone er domineret af arter som *G. falconnensis*, *G. glutinata*, *G. quinqueloba* og *N. pachyderma*. Forekomsten af disse viser, at vandtemperaturen er faldet drastisk i forhold til den foregående zone (subarktisk-arktisk). Periodiske opblomstringer af arter som *G. ruber*; *B. clarkei* og *G. rubescens* indikerer dog små perioder med temperaturstigninger.

Generelt synes de to første zoner altså at minde om den østlige provins, som kan observeres i Middelhavet i dag, mens artssammensætningen i den tredje zone minder om en egentlig subarktisk provins (Atlantehavet). Diversiteten er dog generelt højere i alle tre zoner sammenlignet med den nutidige diversitet af tilsvarende zoner.

MØNSTERGENKENDELSE

Som nævnt i det foregående afsnit er tolkningen af palæoklimaets udvikling baseret på mønstergenkendelse dvs. forfatterens vurdering af, hvilke arter/faunaselskaber der dominerer den enkelte prøve eller succession af prøver. Selvom det ikke ville være totalt uforsvarligt at basere en tolkning og en konklusion alene på resultaterne af denne vurdering, vil det være ønskeligt at verificere tolkningen ved hjælp af andre metoder.

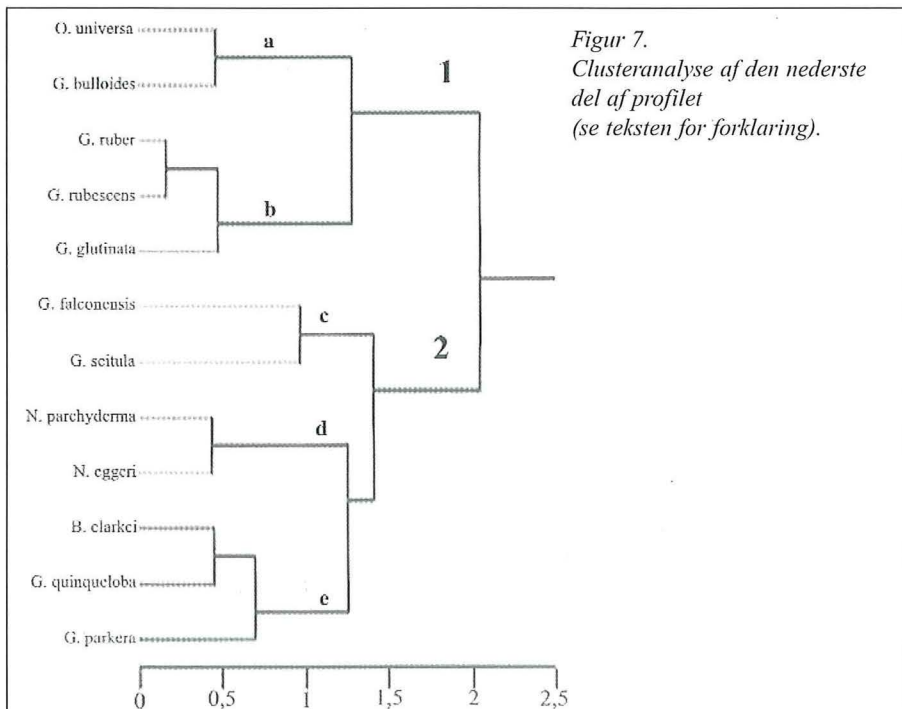
I dette tilfælde vil det være ønskeligt at udvælge en analysemetode, der reducerer den oprindelige såkaldte datamatrix (56 x 350 celler) til nogle få genkendelige parametre eller mønstre. Der findes adskillige statistiske metoder, der er velegnede til sådanne studier.

Forfatteren har ved undersøgelsen valgt to analysetyper: en såkaldt Cluster-analyse samt PCA (principal component analysis). Da der er overensstemmelse mellem resultaterne fra de to analysetyper, skal kun Clusteranalysen diskuteres her.

Clusteranalysen er ikke en egentlig statistisk metode, men fungerer ved hjælp af forskellige algoritmer (her menes blot ligninger/matematiske operationer, der gentages), der grupperer objekter med ens egenskaber i samme kategorier (clustre). Resultaterne fra clusteranalysen bliver præsenteret som et dendrogram, en graf, hvis opbygning minder om et træ, hvor grenene (linier) forbinder de enkelte clustre. Styrken ved denne metode er, at den er hurtig, reducerer datamatricen, let at bruge samt at den er meget velegnet til at finde mønstre. Svagheden er, at Clusteranalysen vil tvinge de undersøgte objekter (i dette tilfælde arter/prøver) ind i et cluster, også selvom de ikke er relateret til hinanden.

I denne undersøgelse var det ønskeligt at det endelige resultat blev baseret på en mindre matrix end den totale (56 arter), hvorfor der blev udført to clusteranalyser med datamatricer på henholdsvis 35 og 12 udvalgte arter.

På baggrund af resultatet af den første clusteranalyse (clustertræet er ikke medtaget her), som indeholder 35 arter blev 12 arter udvalgt til den videre analyse. Resultatet fra clusteranalysen af den nederste del af profil A ses i figur 7. Clustertræet viser to hovedgrene. På gren 1 (a;b) indgår clustre med alle de arter, der kan relateres til tempereret-tropiske miljøer, mens gren 2 (c;d;e) indeholder clustre med alle de arter, der kan relateres til arktisk-tempererede miljøer.



Figur 7.
Clusteranalyse af den nederste del af profilet
(se teksten for forklaring).

Det er dog ikke alle clustrene i figuren, der kan relateres til palæotemperaturer. Lidt uventet clustrer *G. parkera* (e) tæt på koldtvandsclustret (2) mens *G. glutinata* (b) clustrer tæt på varmtvandsclustret. De økologiske data vedrørende disse arter er dog yderst sparsomme, og det kan tænkes at deres placering i clustertræet skyldes andre faktorer end temperatur og/eller salinitet.

Resultaterne af clusteranalyserne synes altså at indikere, at det er muligt at identificere tre artsselskaber bestående af kolde, tempererede og varmekrævende planktoniske arter.

Hvis man plottes den procentvise forekomst af disse 3 artsselskaber i et diagram, har man således fremstillet en temperaturkurve (bestående af tre parametre – koldt, tempereret og varmt) der afspejler den klimatiske udvikling op gennem Pleistocæn (figur 8, model 1). Spørgsmålet er nu: hvor pålidelig er sådan en palæotemperaturkurve?

For at få yderligere informationer om dette forhold kunne man sammenligne kurven med andre forskeres resultater. Endvidere kunne den øvrige fauna i profilet (f. eks. de bentoniske foraminiferer) måske give et fingerpeg.

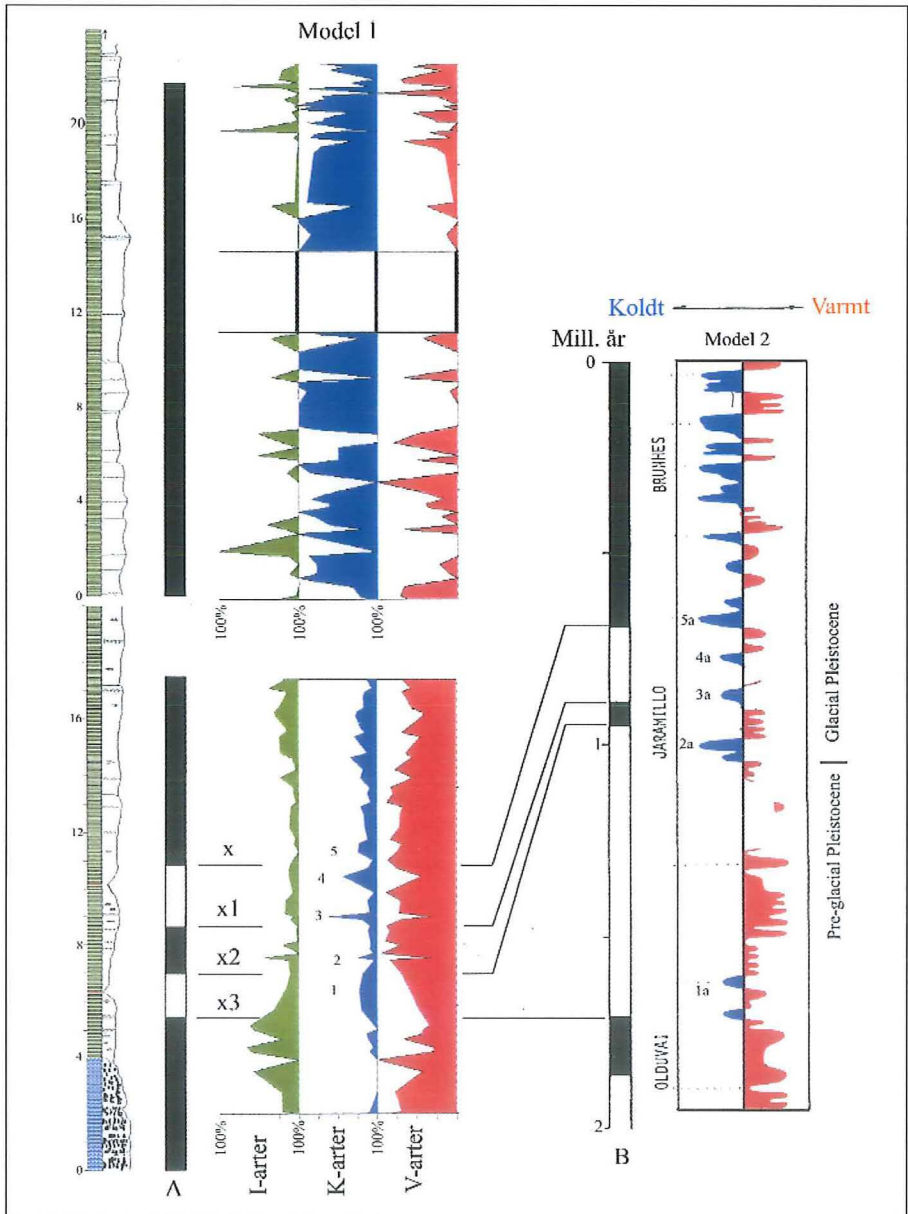
Den fossile fauna fra den mellemste kalkstensenhed består af fragmenter fra enkeltstående koraller, muslinger, brakiopoder, søpindsvin (fragmenter samt pigge), bryozoa, svampespikler samt diverse knogler fra forskellige fisk. Det enestående ved denne fauna er imidlertid diversiteten af de bentoniske foraminiferer, idet der skønsmæssigt er mellem 200-350 forskellige arter i prøverne fra den enhed. Sammenlignes den med nutidige marine miljøer, er den fossile fauna enestående divers.

I nutidige marine miljøer findes der ikke, så vidt jeg ved, en tilsvarende forekomst med en så høj en diversitet. Det der kommer nærmest, er egentlige rev eller revassocierede miljøer. Udbredelsen af sådanne er i dag begrænset til egne, hvor vandtemperaturen i årsgennemsnit er omkring 18-20 °C eller derover.

Den fossile bentoniske foraminiferfauna fra kalkstensenheden kunne altså repræsentere et revlignende marint miljø med vandtemperaturer svarende til et nutidigt subtropisk klima. Der synes således at være overensstemmelse mellem den nederste del af den konstruerede palæotemperaturkurve og det miljø, den bentoniske foraminiferfauna synes at indikere. Sammenligningen er imidlertid kun mulig i de første 4 meter af profilet, da denne enhed bliver overlejret af marint ler. Det er derfor ønskeligt at sammenligne den påståede temperaturudvikling for det østlige Middelhav med andres resultater.

KORRELATION MED ANDRE KLIMATISKE MODELLER

For at kunne sammenligne forskellige resultater eller modeller skal disse naturligvis dække samme tidsinterval (periode), men ikke nødvendigvis samme sted eller miljø (den ene kurve kunne i princippet repræsentere et marint miljø, mens den anden kunne repræsentere et terrestrisk miljø). Jeg har valgt at sammenligne min klimatiske model (C) med en tilsvarende model fra det vestlige Middelhav (D), figur 8.



Figur 8.

Figuren viser den klimatiske udvikling af Model 1 sammenlignet med Model 2.

Forkortelserne i Model 1 er hhv.; I-arter (arter der repræsenterer den tempererede klimazone; K-arter (arter der repræsenterer den kolde klimazone) og V-arter (arter der repræsenterer den varme klimazone). For yderligere forklaring se tekst.

Begge modeller bygger således på analyser af planktoniske foraminiferer og for begge gælder det endvidere, at dateringen er foretaget både på grundlag af biostratigrafiske samt palæomagnetiske studier. Derfor burde resultaterne fra disse studier i princippet være direkte sammenlignelige.

Figuren er delt op i adskillige delelementer. Disse vil blive gennemgået i det følgende.

Længst til venstre er profilet vist (1). Som nævnt i begyndelsen af denne artikel, er profilet delt op i to hovedsektioner (A+B). En sammenligning af faunaelementerne fra hovedsektionerne viser, at der er et hul i sedimentpakken mellem de to sektioner, som gør at de ikke umiddelbart kan forbindes.

De palæomagnetiske resultater er grafisk afbildet i søjlerne 2 og 3. Som det kan ses på figuren, er søjlerne delt op i en række af normale (sorte) og reverse (hvide) magnetiske events. Disse events afspejler beliggenheden af de magnetiske poler. Sort betyder, at de ligger som i dag, hvid at den magnetiske nordpol lå, hvor den magnetiske sydpol ligger i dag, og den magnetiske sydpol lå, hvor nordpolen ligger.

Alderen på (dvs. begyndelsen og slutningen) disse events er kendt med stor nøjagtighed og bruges generelt til korrelation.

Nogle af de yngre normale events er navngivet i søjle 3 (Bruhnes, Jaramillio og Olduvai 'normal events'). I figuren repræsenterer linierne x, x1 samt x2 samme tidshorisont i begge kurver. Det er således muligt at sammenligne udviklingen af begge klimakurver inden for samme tidsepoke eller samme tidshorisont.

Generelt viser tolkningen af begge kurver, at slutningen af Pliocæn samt begyndelsen af Pleistocæn (fra begyndelsen af profilet og op til afslutningen af Olduvai normal event) må betragtes som relativt varmt (subtropisk), dog afbrudt af enkelte korte perioder med tempererede forhold.

Denne periode efterfølges af en længerevarende varmere periode (subtropisk til tropisk). Perioden har dog flere korte koldtandsperioder (1,1a; 2,2a osv.). Som det ses er længden af denne varmeperiode forskellig i de to modeller. I model D slutter den varme periode lige før begyndelsen af Jaramillio eventen, mens perioden i model C foresætter ind i Bruhnes eventen (denne forskel vil blive kommenteret i slutningen af artiklen). Efterfølgende viser begge modeller en lang kold periode med mange kortvarige indslag med varmere klima. I det store og hele giver de 2 modeller ensartede udviklinger.

SAMMENLIGNING AF MODELLERNE FRA RHODOS MED DEN GENERELLE KLIMATISKE UDVIKLING

Hvordan harmonerer denne påståede klimatiske udvikling nu med den generelle udvikling af det globale klima gennem Pleistocæn?

Da både den pleistocæne og den holocæne periode er karakteriseret ved mange isti-

der (der er påvist omkring 20 større eller mindre istider i det skandinaviske område), forekommer resultaterne måske overraskende.

Den klimatiske udvikling i de to modeller er i overensstemmelse med de nyeste resultater indenfor klimaforskning, der blandt andet har påvist, at de store istider (samt de ekstreme klimasvingninger) forekommer relativt sent i Pleistocæn, hvilket stemmer ganske godt med forfatterens resultater.

Hvordan forklarer man så den forskel, der trods alt er i de to modeller? Det nemmeste ville være at påstå, at forskellen er et resultat af den lokale variation i temperaturforholdene, eller at forskelligheder i vandmassernes fysiske/biologiske parametre (næring, salinitet, mikronæringsstoffer osv.) har indflydelse på resultaterne.

På grundlag af de tilgængelige oplysninger er det ikke muligt at afgøre, om nogle af disse faktorer kunne forklare forskellen på de to modeller.

Udover de ovennævnte er der andre, men sjældent omtalte faktorer, der kunne have betydning.

TOLKNINGSMULIGHEDER AF FORSKELLE PÅ TEMPERATURMODELLERNE

Traditionelt har den mest benyttede størrelsesfraktion inden for studier af planktoniske foraminiferer været $> 125\mu\text{m}$. Jeg skal ikke komme nærmere ind på årsagen til dette forhold, men blot nævne, at nyere undersøgelser viser, at denne størrelsesfraktion er uhensigtsmæssig og utilstrækkelig i undersøgelser baseret på foraminiferer.

Det forholder sig nemlig sådan, at hvis man sænker den nedre grænse fra $125\mu\text{m}$ til $63\mu\text{m}$ i sien/nettet som man bruger til at adskille de forskellige fraktioner i prøven forøges både diversiteten og antallet af enkeltindivider. Når man baserer sine resultater på den procentvise fordeling af individer, kan dette have meget stor betydning for det endelige resultat.

Den model, jeg har sammenlignet med, har brugt samtlige planktoniske arter med en størrelse på $> 125\mu\text{m}$, mens min undersøgelse er baseret på planktoniske arter med en størrelse på $> 63\mu\text{m}$. Da der ikke er mange arter, der er $> 125\mu\text{m}$, betyder det, at hvis fraktionen $> 125\mu\text{m}$ var brugt, ville artsdiversiteten i prøverne have været helt anderledes. Mange arter ville simpelthen være 'forsvundet' fra prøverne.

Ud over ovennævnte kan forfatterens opfattelse af taksonomien som beskrevet under afsnittet nulevende arter også have påvirket resultatet.

Når man som i dette studie bruger andre studier til at verificere sine resultater med, er det naturligvis vigtigt, at man bruger det samme artsbegreb, specielt fordi man tolker tilstedeværelsen/fraværet af arter som en respons på klimatiske forhold.

Som konsekvens af dette vil jeg lige kort nævne et eksempel.

En af det mest anvendte planktoniske foraminiferer inden for nyere klimaforskning er *N. parchyderma*. Denne art tilhører slægten *Neogloboquadrina* og har en første-

gangsoptræden i Miocæn. I dag er *N. pachyderma* en relativt almindelig art, som dominerer de polare områder, og som sådan er dominansen af *N. pachyderma* en glimrende koldtvalsindikator. Den geografiske udbredelse er dog langt større end de polare områder og arten forekommer også i varmere vandmasser, men i langt mindre mængder.

Man har i lang tid diskuteret, hvor mange arter der er indeholdt i slægten *Neogloboquadrina*, og alt fra en til fem forskellige arter er foreslået i perioden fra Pleistocæn og frem til i dag. Der er således ikke enighed om, hvilke morfologiske karakterer der kendetegner de potentielt forskellige arter inden for denne slægt.

Som beskrevet opererer forfatteren med tre forskellige arter af *Neogloboquadrina* henholdsvis *N. dutertrei*, *N. eggeri* og *N. pachyderma*, som er illustreret i plancherne 8-9 i min klimamodel, mens den anden model så vidt det kan observeres kun benytter *N. pachyderma*. Forskellen er, at mens *N. pachyderma* er en lavsalin koldtvalsart, så er *N. eggeri* en kølig og højsalin art, mens *N. dutertrei* er en tempereret art. De to sidstnævnte arter forekommer kun i den første del af profilet, så det er kun her denne diskussion er interessant.

Da disse tre potentielle arter nu er adskilt, er den lavsaline, koldtvals-komponent reduceret i forhold til, hvis alle tre arter var *N. pachyderma*. Dette har betydet, at temperaturkurven er blevet en anelse varmere og måske af længere varighed end den model, der sammenlignes med.

Man kan naturligvis ikke sige med sikkerhed, om forskellene skal søges i de nævnte faktorer, men det ansporer til at være kritisk over for både sin egen og andres modeller.

OPSUMMERING

For at opsummere håber forfatteren - på trods af diverse forbehold, antagelser og mulige fejlkilder - at have påvist, at planktoniske foraminiferer kan bruges som klimaindikatorer. Den konstruerede klimakurve er således stort set i overensstemmelse med de nyeste resultater inden for den pleistocæne klimaforskning.

Så for at vende tilbage til udgangsspørgsmålet, så mener jeg i høj grad, at geologer kan bidrage med data og fagligt begrundede holdninger til klimadebatten. Vores metoder (i dette tilfælde illustreret ved planktoniske foraminiferer) virker, men problemet har i dette tilfælde været at opløseligheden, dvs. prøvetætheden, ikke har været god nok. Det giver ikke umiddelbart meget mening at sammenligne mine data (der strækker sig over ca. 1 million år) med f. eks. temperaturmålinger baseret på årsgennemsnit.

Men selvom paleoklimatiske studier som beskrevet her ikke har den prøveopløselighed, der kræves, kan opløseligheden sagtens forbedres. Der findes adskillige borekerner fra f. eks. Nordatlanten som ville egne sig til et højopløseligt klimastudie

baseret på planktoniske foraminiferer. Så vidt jeg kan vurdere, ville dette kunne lade sig gøre, hvis to forhold bliver opfyldt; dels skal en del af borekernen repræsentere en tidsmæssig kort og veldateret periode, og dels skal denne periode være repræsenteret med en sedimentmægtighed på en vis tykkelse. Planktoniske foraminiferer har grundet deres ringe størrelse den fordel, at man ville kunne udtage prøver relativt tæt. Så vidt jeg kan bedømme, udgør brugen af planktoniske foraminiferer som klimaindikatorer et uudnyttet, men potentielt stærkt værktøj inden for højopløsligheds klimatiske studier.



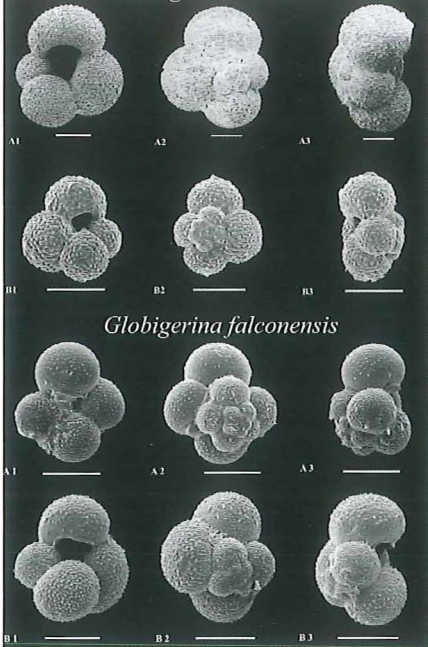
Figur 9.

Billedet viser Tsambika bjerget. I nederste venstre hjørne skimtes den øvre del af den marine lerenhed og Tsambika klosteret på toppen af bjerget (rød pil)..

Det sidste billede (figur 9) viser de smukke omgivelser, der kan opleves i det beskrevne - Tsambika - område. Øverst på bjergtoppen ses Tsambika klosteret (rød pil). Sagnet om dette kloster vil vide, at unge og ufrugtbare kvinder kunne tilbringe et par måneder deroppe og vende tilbage befrugtet af Helligånden. Om dette kloster stadigvæk vedligeholder denne tradition vides ikke.

Planche 1

Globigerina bulloides



Globigerina falconensis

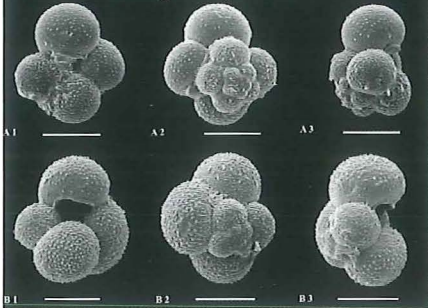
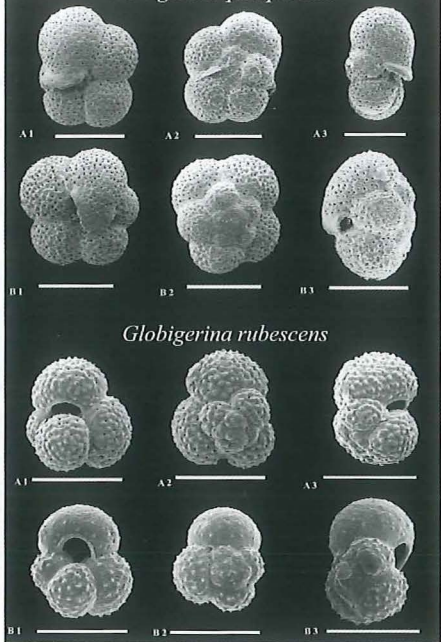


Planche 2

Globigerina quinqueloba



Globigerina rubescens

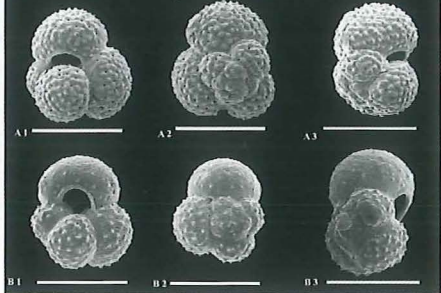
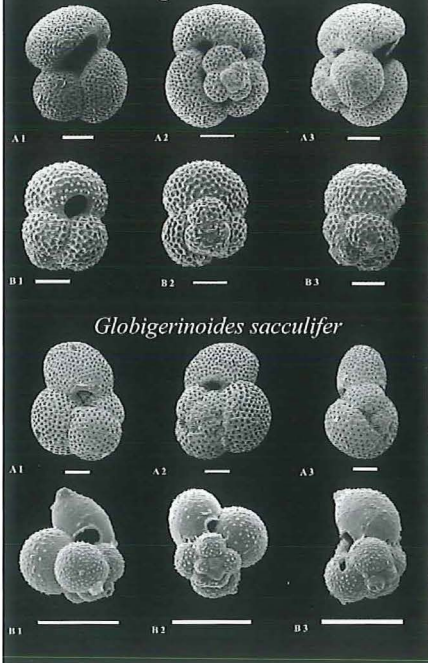


Planche 3

Globigerinoides ruber



Globigerinoides sacculifer

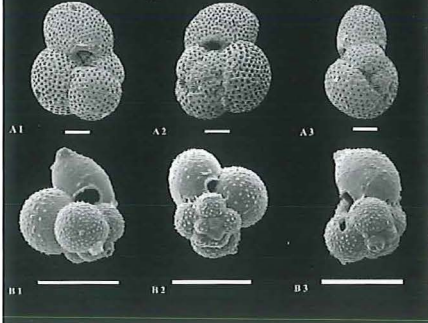
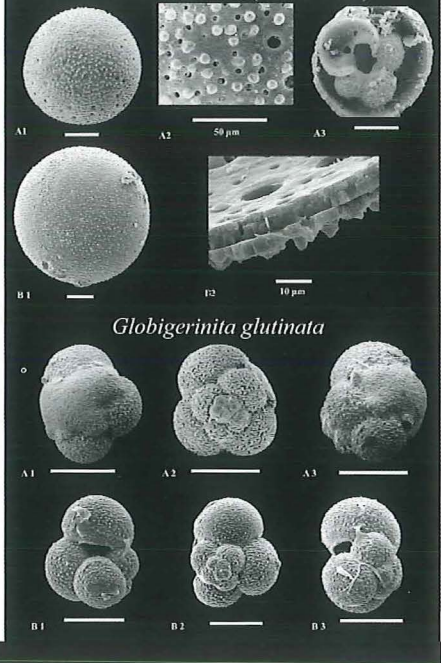


Planche 4

Orbulina universa (Pleistocene)



Globigerinita glutinata

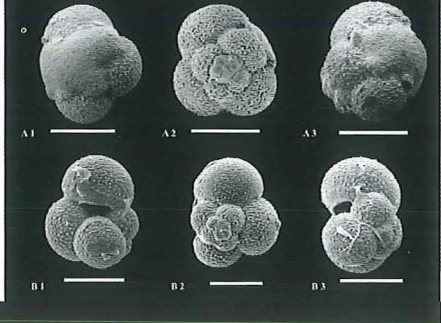


Planche 5

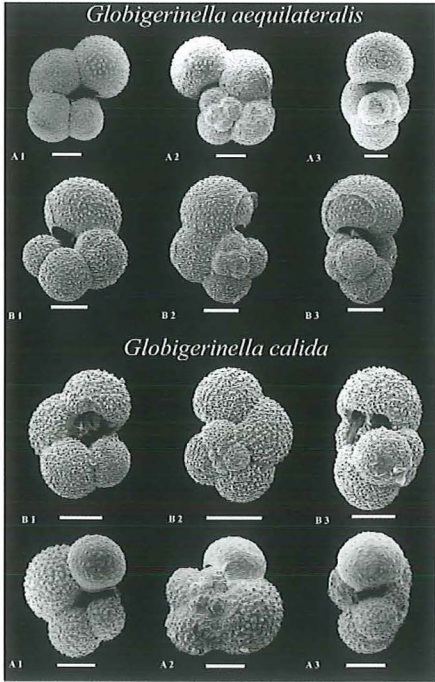


Planche 6

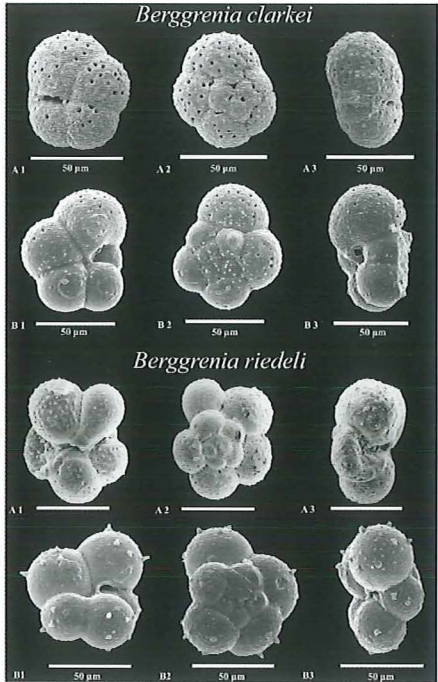


Planche 7

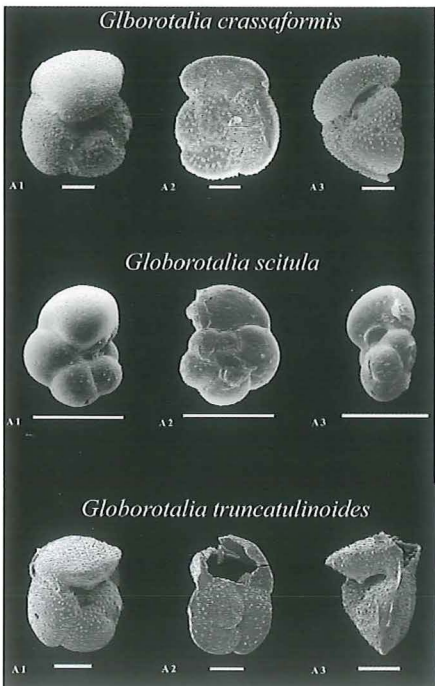


Planche 8

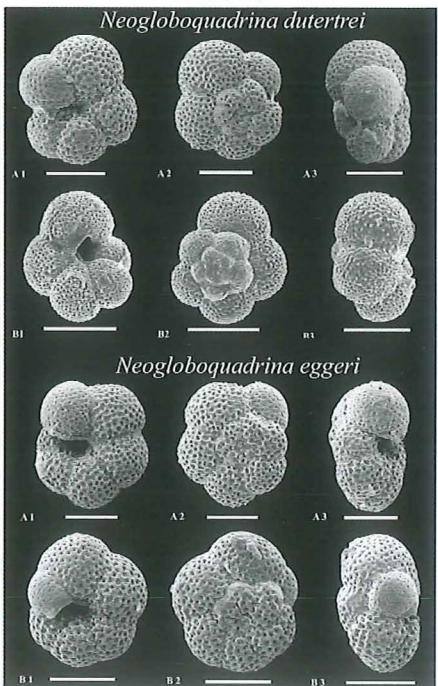


Planche 9

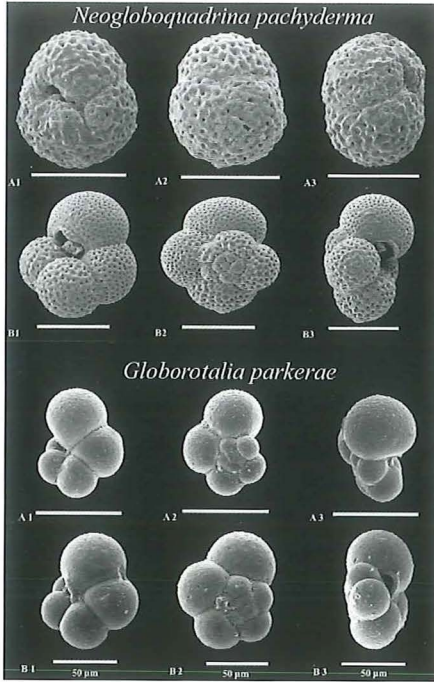


Planche 10

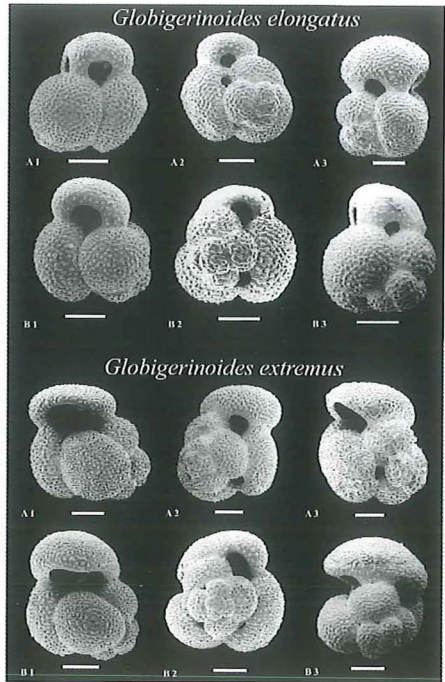
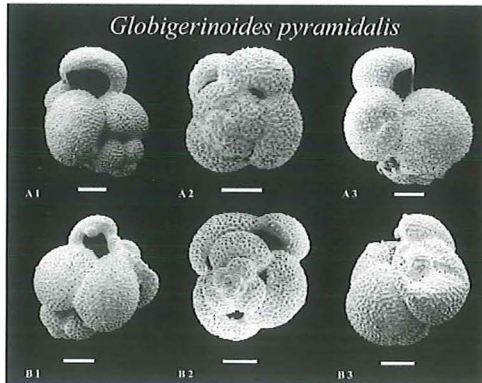


Planche 11

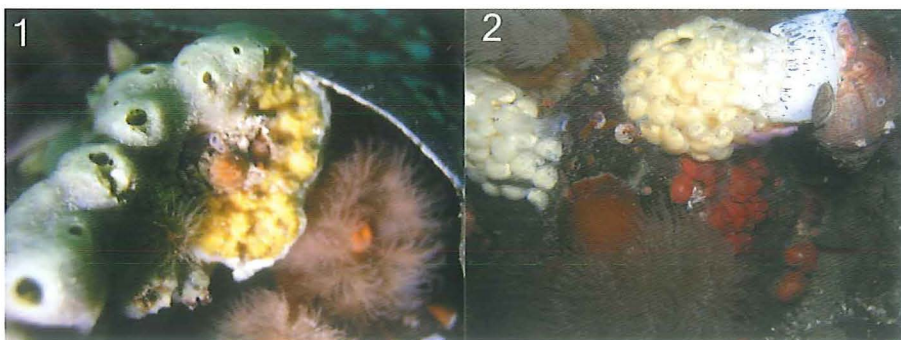


UNDERVANDSPALÆONTOLOGI - EREMITKREBS I LIEBHAVERBOLIGER

Jakob Vinther og Anders Finn Jørgensen

I begyndelsen af maj i år var dykkerklubben AUG på tur til Lillebælt. Det smalle stræde er berømt for en kraftig strøm og store dybder i modsætning til de ellers lavvandede indre danske farvande.

Den kraftige strøm, som primært drives af tidevand og vindstuvning, giver gunstige betingelser for et rigt dyreliv af forskellige filtrationsædere såsom spongier (havsvampe), søpunge, mosdyr, blåmuslinger, rurer og sønemoner (figur 1).

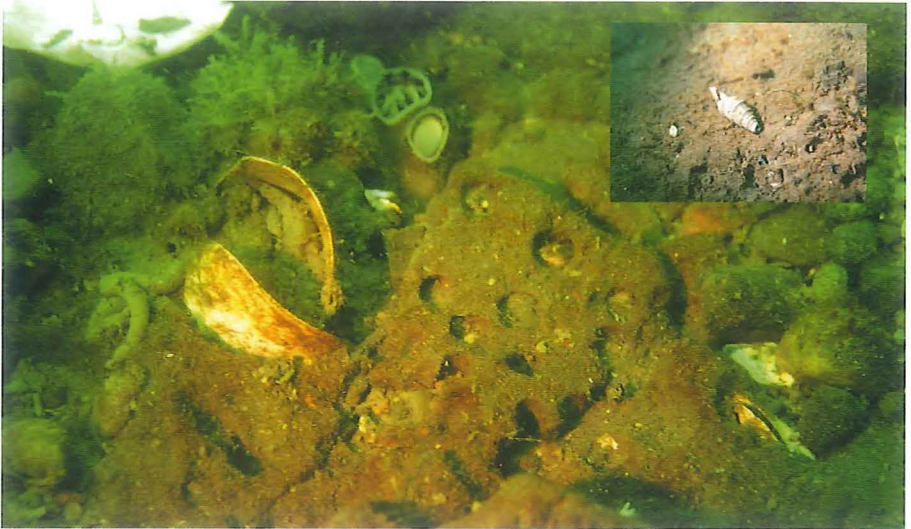


Figur 1.

Havbunden under Lillebælt er rig på forskellige filtrationsædere og andet liv. Venstre billede (1) viser en havsvamp (porifera) med sin sækformede krop og det store udblæsningshul (osculum), hvor det filtrerede vand sendes ud af. I baggrunden ses tentakelkrøner af sønelliken Metridium. Højre billede (2) viser en konksnegl *Buccinum undatum* under æglægning (store lyse masser) imellem sønelliker og små røde stikkelsbærsøpunge *Dendrodoa grossularia*.

Lillebæltområdet er kendt for forekomsten af tertiære ler- og mergellag i isopskudte lag flere steder langs med kysten. Lerlagene findes faststående dybere nede, og på grund af strømmen blotlægges lagene flere steder på havbunden og kan studeres af dykkerne.

Ved Ammoniakhavn syd for Fredericia stødte vi således på lyse mergellag, som overlejres af en mørk, sandet ler og mere massive lag, der fremstår som stejle skrænter. Det var de oligocæne formationer Søvind mergelen, Brejning leret og muligvis Øksenrade sandstenen, som var fritlagt. Lagene er horisontale, og der er ingen tegn på, at de er deformerede af isbevægelser. Stor boremusling (*Zirphaea crispata*) ses flere steder med sine cylindriske borer i de geologiske lag (figur 2).



Figur 2.

Brejning leret som det kommer til syne på havbunden ved Ammoniakhavn. Billedet er taget på ca. 13 meters dybde. Der ses talrige rørformede huller efter boremuslingen *Zirphaea crispata*. I venstre side af billedet ses de to skaller stadig i leret og bagved ses ånderøret og kloakrøret fra en nedboret musling. Det lille billede i højre hjørne er en fossil snegl *Orthosurcula regularis*, der ligger på havbunden skyllet ud af leret.



Figur 3.

Forskellige fossiler indsamlet på 13 meters dybde i Lillebelt ved Ammoniakhavn.

A: Pelikanfodsneglen *Drepanocheilus speciosus*. B: Et udvalg af de typiske fossile snegle: 1. Rovensneglen *Natica nysti*, 2. *Orthosurcula regularis*, 3. *Fusiturris selysii*, 4. ung pelikanfodsnegl, *Drepanocheilus speciosus*, 5. muslingen *Glycimeris obovata*, 6. enkeltkoral *Ceratocythus*?



Figur 4.

Eremitkrebs *Pagurus* i oligocænt sneglehus. Stereofoto.

Forneden ses et nærbillede af eremitkrebsen i åbningen af sneglehuset. Stereofoto

Især Brejning leret indeholder en del fossiler. Det er ikke ualmindeligt at finde forskellige snegle og muslinger. Disse kan man se skyllet ud af leret og ligge nedepå havbunden (figur 2). Mest iøjnefaldende er den store pelikanfodsnegl *Drepanocheilus speciosus* (figur 3, venstre), men også rovsneglen *Natica nysti* findes som fossil, ligesom dens borehuller kan ses i andre fossiler. En oversigt over den indsamlede fauna kan ses på figur 3.

Der blev samlet en del fossiler som skulle vises til de andre dykkere på overfladen. Men overraskelsen var stor, da flere af de fossile sneglehuse 'gik' deres vej, når man prøvede at samle dem op. Inde i sneglehuset sad en eremitkrebs.

Det viste sig, at eremitkrebs tager de cirka 30 millioner år gamle sneglehuse i brug ligesom de moderne! I løbet af dykket sås flere eremitkrebs med fossile sneglehuse (figur 4).

Da den besynderlige konstellation af eremitkrebs og fossilt sneglehus bagefter blev vist frem til de andre dykkere, blev det bemærket at, 'Det må man da kalde for liebhaveri'!

Når eremitkrebsene uden problemer kan flytte ind i disse fossile sneglehuse, skyldes det, at ler er meget finkornet og gennemsivningen af vand er ringe. Derfor er skallerne ikke opløst eller erstattet af andre mineraler, hvilket typisk er tilfældet med molluskskaller af mineralet aragonit - et mineral, som i princippet ikke er stabilt i overfladenære miljøer.

Brejning leret er stort set ikke cementseret til en hård bjergart og begravet særlig dybt. Derfor er skallerne ikke krakeleret ved sammenpresning og kan let skylles frit af leret. De fossile skaller kan dog let skelnes fra de moderne, på den brunfarvning mange millioner år i leret har givet. Det blev desværre ikke muligt at fotografere eremitkrebsen med sit bo under vandet, men vi vil forsøge at gøre det i den nærmeste fremtid og sende billedet til VARV. Foreløbig må VARV's læsere tage til takke med billedet (figur 4) af en lille eremitkrebs, som måtte lade livet for at kunne foreviges i sit fossile sneglehus, der nok skal gøre de af VARV's læsere, der har en liebhaverbolig, grønne af misundelse.

OCEANØER LEVERER OPLYSNINGER FRA DEN NEDRE KAPPE: SANTO ANTÃO, KAP VERDEØERNES HOTSPOT

Paul Martin Holm

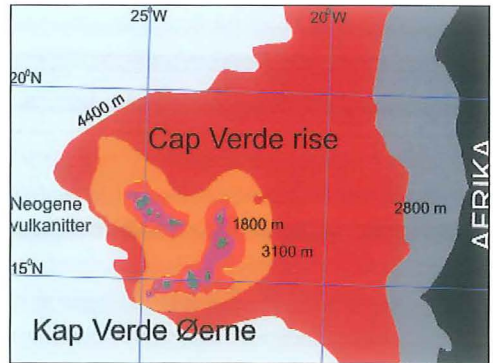
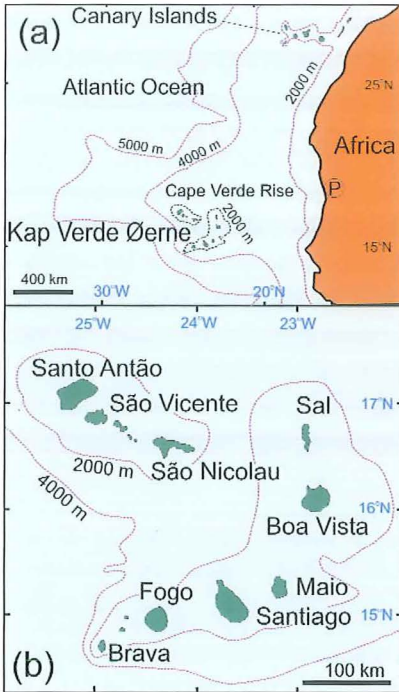
Vulkanisme på Jorden er knyttet til tre typer geologiske miljøer, dels lithosfærepladernes randområder – midtoceanryggene og subduktionszonerne og dels områder inde på pladerne – de såkaldte hotspots, hvoraf der findes ca. fyrre. I forbindelse med disse hotspots hersker der særlige betingelser for magmadannelse i Jordens kappe: den er enten særlig varm eller har en særlig sammensætning. Kappen er den primære kilde til magma, idet der dannes magma, når kappen smelter delvist op.

Den yderste del af Jorden - lithosfæren - der består af skorpen samt den del af kappen, som sammen med skorpen afkøles ved, at varme strømmer ud gennem den ved ledning (konduktion). I den underliggende asthenosfære, som er langt blødere end lithosfæren, domineres varmemestrømningen af, at varmere materiale stiger op og koldere ned (konvektion). Smeltepunktet for kappen øges med stigende tryk. Ved de høje tryk under lithosfærepladerne er asthenosfæren normalt for kold (omkring 1.300°C) til at danne smelter: Vulkanisme er resultatet, når magma strømmer op til Jordens overflade, og forekommer ikke på pladerne.

Blandt kendte undtagelser fra reglen om fravær af vulkanisme inde på pladerne er de to hotspots Hawaiiøerne og De kanariske Øer; mindre kendt er hotspottet i Eifel i Sydtykland, som omfattede stærkt eksplosiv vulkanisme for ikke mere end 11.000 år siden. Studier af hotspotvulkanisme afdækker nogle af de mest storladne processer i de dybere dele af Jorden. Det kan dog også blive aktuelt at forstå processerne, når en vulkan dukker op i baghaven.

Kap Verdeøerne, som ligger 500-800 kilometer vest for Afrika og ca. 1.500 kilometer sydsydvest for De kanariske Øer (figur 1a) er også et hotspot. Her har et hold af geologer og studerende fra universiteterne i København og Århus gennem 10 år studeret den vulkanske udvikling med henblik på at forstå årsagen til hotspotdannelsen og oprindelsen af de magmadannende bjergarter i kappen. Her fortælles om nogle af de resultater, som er opnået ved studiet af en af øerne.

Republica de Cabo Verde med ca. 400.000 indbyggere blev uafhængig af Portugal i 1975 og består af 10 større øer på i alt 4.033 kvadratkilometer, hvor Santo Antão (figur 1b) er den næststørste med et areal på 770 kvadratkilometer. Klimaet er tropisk og meget tørt, men den konstante nordøstenvind gør ophold behageligt. Øerne er næsten udelukkende vulkanske og dannet gennem de seneste 20 millioner år.



Figur 2. ▲
 The Cape Verde Rise er havbund hævet 2 kilometer over den omgivende havbund. Denne hævn-
 ing skyldes bl.a. udvidelse af lithosfæren som
 følge af opvarmning fra en opstigende diapir af
 særlig varm kappe.

◄ Figur 1.

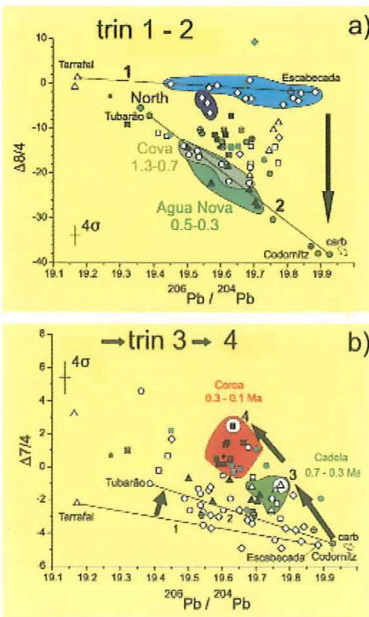
(a) Kap Verdeøernes beliggenhed vest for Afrika.
 (b) Santo Antão er den næststørste og nord-
 vestligste af de 10 større øer i øgruppen.

Kap Verdeøerne er et særligt hotspot, idet Den afrikanske Plade ligger så godt som stille. Pladen bevæger sig med kun 2 millimeter/år under Santo Antão. Hotspots er ofte omgivet af et område med hævet havbund. Dette gælder i udpræget grad Kap Verde. The Cape Verde Rise er et område på mere end 300.000 kvadratkilometer, hvor havbunden er hævet 2 kilometer over den omkringliggende (figur 2). Denne hævn-
 ing skyldes tilstedeværelsen af ekstra varm kappe under lithosfæren. Denne kappe har gennem 20 millioner år opvarmet bunden af lithosfæren, som derved har udvidet sig og fået en mindre massefylde. Dette har medført, at den ligger højere på asthenosfæren – ligesom kontinentale områder med bjergarter med relativ lav massefylde ligger højt i forhold til havbunden af basaltiske bjergarter med relativ høj massefylde. Med vulkanøerne beliggende på det hævede område er der tale om et klassisk hotspotmiljø, hvor ekstra varm kappe danner smelter under lithosfæren.

Der er imidlertid to fænomener, der ikke er almindelige: Beregninger har vist, at den meget store havbundshævning ikke alene kan forklares ved denne opvarmning, og Kap Verdeøerne ligger ikke centreret på The Cape Verde Rise.

Gennem feltarbejde på Santo Antão især i årene 1996-2000 er den vulkanske udvikling blevet afdækket. De geologiske relationer mellem lavastrømme og eksplosionsprodukter samt datering af udvalgte bjergarter har vist, at øen er opbygget i perioden

fra 7,5 millioner år før nu til for ca. 100.000 år siden. Analyser af sammensætningen af de vulkanske bjergarter har vist, at de alle er dannet fra meget siliciumfattige magmaer. Der er således ikke en eneste basalt på øen, som ellers er den altdominerende vulkanske bjergart i oceanskorpen. I den tidlige del af perioden var det især basanitter (stærkt alkaline siliciumfattige basaltiske bjergarter), der dominerede, medens det er nephelinitter (bjergarter der er så fattige på silicium, at de næsten ikke fører feldspat, og i stedet er rige på de komponenter, der danner nephelin) blandt de yngre. Den variation i den overordnede kemiske sammensætning som giver sig udslag i navngivningen af bjergarterne, ledsages af mere subtile forskelle i hyppighederne af sporgrundstoffer og i isotopsammensætningen af visse grundstoffer, såsom bly (Pb), strontium (Sr) og neodymium (Nd). Alle disse forskelle sammenholdt med kendskabet til den tidsmæssige udvikling har givet et usædvanlig detaljeret indblik i de systematiske skift i sammensætningen af de producerede smelter. Dette kan illustreres i diagrammer, som de der vises i figur 3.



Figur 3. (a) $D\ 8/4$ mod $206Pb/204Pb$ og (b) $D\ 7/4$ mod $206Pb/204Pb$. I diagrammerne illustreres hvorledes kappematerialer af fire forskellige sammensætninger (Trin 1-4) med tiden afløser hinanden som kilder til Santo Antãos vulkaniter. Sammensætningerne af bjergarterne på Trin 1 og Trin 2 består af blandinger af hhv. endeledene 'Escabecada' og 'Tarrafal' samt 'Codornitz' og 'Tuburão'. $D\ 7/4$ og $D\ 8/4$ er udtryk for afvigelsen af isotopforholdene $207Pb/204Pb$ henholdsvis $208Pb/204Pb$ fra en referencelinie for mange basalter.

Afbildningen af isotopsammensætningen af Pb behøver ikke en teknisk forklaring. Det fremgår, at de ældste bjergarter fra det vestlige og centrale af Santo Antão ligger øverst til højre i diagrammet i figur 3a. De individuelle bjergarter kan forklares som i det væsentligste blandinger af variable andele af to endeled, 'Escabecada' og 'Tarrafal'. Dette har vi kaldt Trin 1 i udviklingen. De lidt yngre af de ældste vulkaniter, de nordlige, begynder at få lidt afvigende sammensætning (figur 3a) og i løbet af udviklingen under den mellemste periode af vulkanisme på øen skifter isotopsammensætningen af Pb markant. Afslutningen af den udvikling udgøres bl.a. af Cova og Agua Nova-grupperne af vulkaniter fra mellemprioden, der kan beskrives som blandinger af to andre endeled, 'Codornitz' og 'Tuburão' (figur

