

# VARV

NR. 4

BLADET MED DE ÆLDSTE NYHEDER

2004



*HALKIERIA* - ET KAMBRISK FOSSIL

DEPONERING AF CO<sub>2</sub> I UNDERGRUNDEN

Forsidebillede: *Fossilet Halkeria fra Tidlig Kambrium*. Foto: J.Vinther.

Forfatterens adresser:

Jakob Vinther, Jesper Milàn og Niels Bonde: Geologisk Institut, Øster Voldgade 10, 1350 Kbh. K

Niels Springer, Dan Olsen og Niels Stentoft: GEUS, Øster Voldgade 10, 1350 Kbh. K.

Sten L. Jakobsen, Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 Kbh.K.



Adresse: Tidsskriftet VARV, Geologisk Institut, Øster Voldgade 10, 1350 Kbh. K.

Telefon: 35 32 24 00, Geologisk Institut.

E-Mail: SvendP@geol.ku.dk

Redaktion: Asger Berthelsen, Knud Binzer, Bjørn Buchardt, Bjørn Hageskov, Henrik Fougat, Jakob Vinther, Arne Thorshøj Nielsen, Mikael Pedersen (webmaster ) og Svend Pedersen (ansvarshav.)

Bestyrelse: Asger Berthelsen, Valdemar Poulsen, Bjørn Hageskov og Svend Pedersen.

Tekstredaktør: Svend Pedersen

Lay-out og grafik: Bjørn Hageskov

Repro og tryk: Holbæk Express Trykkeri A/S

VARV udkommer fire gange årligt. Prisen er 150 kr i abonnement for 2004. Abonnement kan tegnes ved at indsende beløbet til VARV, postgiro 9 06 88 80, eller 170 SEK til VARV's svenske postgirokonto: 4388-5, eller 170 NOK til VARV's norske postgiro: 7877.08.15672. Girokort vedlægges i VARV nr.1 2005.

På VARV's hjemmeside **www.varv.dk** er det bl.a. muligt at søge i VARV'S database, hvor referencer til alle artikler er lagt ind, ligesom der er et lille resume af artiklerne. Der er også oplysninger om priser på gamle numre, særnumre etc. som sammen med tegning af abonnement kan bestilles on-line.

**Adresseændringer bedes meddelt** VARV

© VARV eftertryk af tekst og billeder kan kun ske efter aftale.

# HALKIERIA

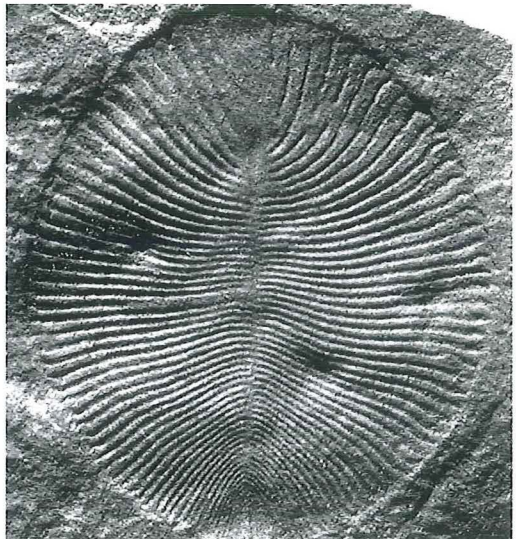
## - ET FOSSIL FRA NEDRE KAMBRIUM

Jakob Vinther

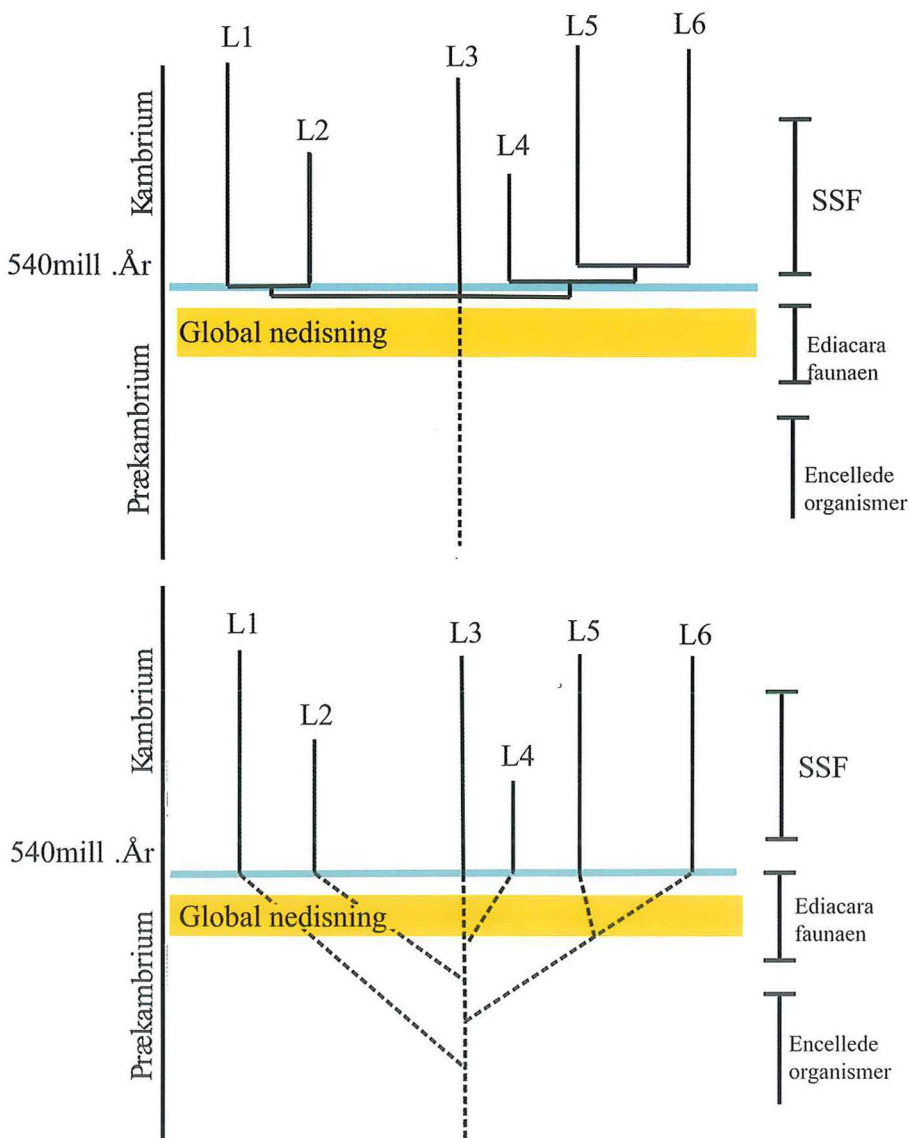
Ved overgangen fra Prækambrium til Kambrium for ca. 540 millioner år siden ses en markant ændring af dyreverdenen. I den geologiske lagfølge ser man livets udvikling i form af fossiler, og omkring grænsen Prækambrium - Kambrium opstår en rigdom af flercellet liv, hvor der før kun levede encellede organismer. Dette kaldes 'den kambriske eksplosion' på grund af den tilsyneladende kraftige udvikling indenfor et relativt kort tidsrum. Næsten alle rækker af de dyregrupper, vi ser i dag, ser ud til at opstå helt tilbage ved 'den kambriske eksplosion'.

For ca. 3,9 milliarder år siden finder man de første tegn på liv på Jorden, og op igennem Prækambrium eksisterede der encellede organismer og mikrobielle måtter, der voksede på havbunden. Umiddelbart før 'den kambriske eksplosion' fandtes der over hele Jorden en særlig fauna af primitive organismer, som kaldes Ediacara-faunaen efter en lokalitet i Australien. Denne samling af organismer, der er bevaret som aftryk i sand og muddersten, har ikke haft et hårdt skelet. Fossilerne er typisk flade, runde aftryk med et mønstre af forskellig type eller også er de udviklet som aflange, vifteformede individer. Ingen af Ediacara-dyrene har en decideret bilateral symmetri, men i stedet en slags radiær symmetri, hvilket er typisk for nutidens polyptydyr (f.eks. vandmænd og søanemoner), der betragtes som primitive i forhold til bilateralt symmetriske dyr (figur 1). Det skal dog bemærkes, at Ediacara-fossilerne slet ikke ligner nutidens polyptydyr.

Denne fauna bliver i Nedre Kambrium afløst af en fossil-fauna, der mest består af små skal-



*Figur 1. Typisk Ediacara-fossil fra Prækambrium.*



Figur 2. Diagram som viser, hvordan 'den kambriske eksplosion' kunne have taget sig ud for 540 millioner år siden. På diagrammet er der vist, hvor grænsen mellem Prækambrium og Kambrium ligger (blå streg). Der er vist et tænkt slægtskabstræ, hvor der igennem Prækambrium findes en enkelt linje af en organisme, som ved overgangen til Kambrium udvikler sig til talrige nye linjer af dyr. Det orange bånd markerer den globale nedising umiddelbart før 'den kambriske eksplosion'. De forskellige fossile faunaer, der er nævnt i teksten er markeret.

ler typisk med hvælvet eller konisk form. Populært kaldes dette fossilselskab med en engelsk betegnelse Small Shelly Fossils – SSF. Det er skaller, der er bevaret som fosfatiserede aftryk eller som stenkerner. De skaller, der primært var fosfatiske, har bevaret den originale sammensætning. Skallerne er bilateralt symmetriske og viser, at der nu fandtes mere komplekse dyr. Mange kan endda henføres til nulevende grupper af dyr, såsom brakiopoder (armfødder), mollusker (bløddyr, f.eks. snegle og muslinger), artropoder (f.eks. krebsdyr og trilobitter). Andre SSF-organismer har et mere diskutabelt slægtskab med nulevende dyrerækker. Dette er emnet for denne historie.

Længere oppe i lagserien - i den øvre del af Nedre Kambrium og i Mellem Kambrium - kendes såkaldte 'Lagerstätten', som er lokaliteter med sediment, hvori der findes særligt velbevarede fossiler. 'Lagerstätten' kendes fra hele den geologiske lagsøjle. Der er således fundet fossiler, hvor aftryk af bløddele er bevaret og fossiler, hvor skaldelene normalt er gået fra hinanden - men her er de bevaret intakt. Et berømt eksempel på en 'Lagerstätte' er den mellem kambriske Burgess skiffer fra British Columbia i Canada (VARV 1999,1). Nyere lokaliteter er Chengjiang i Kina som er endnu ældre - fra Nedre Kambrium - og Sirius Passet fra Nordgrønland, som vil blive omtalt nedenfor. Disse 'Lagerstätten' giver et uvurderligt indblik i, hvordan den forhistoriske verden så ud.

Der diskuteres livligt, hvorfor livet udvikledes så kraftigt under 'den kambriske eksplosion'. Nogle mener, at en global istid umiddelbart forinden (figur 2) kan have forårsaget den eksplosive udvikling.

Der er mange mysterier i Nedre Kambrium. Et af disse skal beskrives her. Det er en historie der går lige fra fundet af de allerførste skæl af fossilet, og om hvordan man i tidens løb har forestillet sig, at dyret har set ud, og om hvordan det har været beslægtet. Det er historien om det nedre kambriske fossil, man kalder for *Halkieria*.

## BEGYNDELSEN

Den danske palæontolog Christian Poulsen (1896-1975) var professor ved Københavns Universitet og havde været inspektør på Mineralogisk Museum (nu Dansk Naturhistorisk Museum) på Østervoldgade. Han arbejdede især med den uddøde gruppe artropoder, som kaldes trilobitter (nært beslægtet med nutidens spindlere). Han var forfatter til en række velrenommerede værker om trilobitter især fra Grønland og det nordlige Canada. I sine unge dage omkring 1935 indsamlede Christian Poulsen fossiler i de nedre kambriske aflejringer på Bornholm, som tidligere kaldtes 'de grønne skifre' (i dag henregnes de til Læså Formationen). 'De grønne skifre' er en sandet siltsten, der er utrolig rig på sporfossiler og fosforitkonkretioner. I fosforitkonkretioner fandt Christian Poulsen - formentlig efter

langt tids indsamling - en lang række fossiler. Et forholdsvist almindeligt fossil er de lange koniske skaller af såkaldte hyolitter, som er en mystisk gruppe af organismer, som eksisterede igennem Palæozoikum frem til periodens slutning ved Perm for 250 millioner år siden. Materialet henlå i mange år og først i 1967 ved sin pensionering fik Christian Poulsen materialet beskrevet.

Et af de fossiler, han beskrev, var nogle ikke tidligere kendte skaller med en hul, konisk form og ribber på overfladen (figur 3). De blev opkaldt efter Mineralogisk Museums daværende fotograf Christian Halkier, som havde stået for det fotografiske arbejde af fossilerne. Christian Poulsen mente, at disse 'nye' skaller formentlig var beslægtet med de nævnte hyolitter, der er dyr som

omsluttedes af den koniske skal, som de sekredede. Han fandt to arter, som han kaldte *Halkieria obliqua* og *Halkieria symmetrica*. Det skulle senere vise sig, at dyret som havde lavet skallerne, så helt anderledes ud end forventet.

Op igennem halvfyrdserne kom en ny generation af forskere, som tog fat på 'den kambriske eksplosion', Burges skifferen og SSF-dyrene. De



A



B



C



D

Figur 3. A. Broens Odde på Bornholm, som er typelokaliteten for de Grønne Skifre.

Nederst (B, C og D) de første løse skæl af *Halkieria*, som Christian Poulsen beskrev i 1967.

B og C er skæl beskrevet som *H. obliqua*, D er et skæl beskrevet som *H. symmetrica*. I dag regnes de for samme art *Halkieria obliqua*. Skællene er af den såkaldte cultrate form.

Billedet er lånt fra den originale publikation: Poulsen C. 1967, Fossils from the Lower Cambrian of Bornholm, De Kongelige Danske Videnskabers Selskab.

undersøgte de fossiler, man kendte fra Burgess skifferen og begyndte at overveje, om ikke nogle af de skaller man fandt i fosforitkonkretionerne i nedre kambriske lag kunne være en del af større organismer i stil med, hvad man finder i Burgess skifferen. Man havde sidenhen også fundet flere fossiler af *Halkieria*. Alle var hule skaller, men basis af skallen var indsnævret. Det er umiddelbart svært at forstå, at et dyr kunne bebo en sådan skal, og forskerne begyndte at overveje, om de hule skaller ikke kunne være et ud af flere skæl på en større organisme.

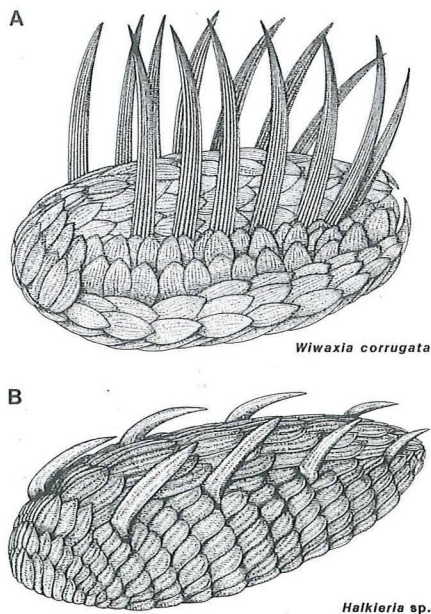
I Burgess Shale findes et fossil, man kalder for *Wiwaxia*, der er et ejendommeligt dyr, som har haft tætte rækker af organiske skæl på ryggen og i siderne (figur 4, øverst). Undersiden har været nøgen, og man finder ofte et tandapparat i forenden af dyret.

To forskere, Stefan Bengtson og Simon Conway Morris, den første fra Naturhistoriska Riksmuseet i Stockholm og specialist i Small Shelly Faunaer den anden fra Cambridge og berømt for arbejdet med mange af de mystiske dyr fra Burgess skifferen - bl.a. også *Wiwaxia*. De to foreslog i en artikel i 1984, at *Halkieria* var beslægtet med *Wiwaxia*, og at *Halkierias* skæl havde siddet på samme måde som skællene hos *Wiwaxia*. De lavede ydermere en rekonstruktion af *Halkieria* ud fra denne hypotese (figur 4, nederst). *Wiwaxia* har forskellige typer skæl på ryggen og på siden, og det passer med, at man også finder flere typer skæl fra *Halkieria* i samme aflejring.

Man var nu begyndt at arbejde med at *Halkieria* som en mere kompliceret organisme.

#### OPDAGELSEN AF SIRIUS PASSET OG *HALKIERIA EVANGELISTA*

I løbet af 1970-erne og starten af 80-erne foretog Grønlands Geologiske



Figur 4. Bengtson og Conway Morris' rekonstruktion af *Wiwaxia* og *Halkieria* fra 1984 før man vidste, hvordan *Halkieria* så ud.

Figur fra: Bengtson S. and Conway Morris S. 1984: A comparison of the Lower Cambrian *Halkieria* and the Middle Cambrian *Wiwaxia*. *Lethaia* 17, 307-329. Figur venligst stillet til rådighed af Lethaia, a Taylor & Francis Journal.

Undersøgelse en kortlægning af det nordlige Grønland, og var i 1984 i gang med kortlægning og geologisk undersøgelse af den østlige del af J. P. Koch Fjord. Her fandt man i nedre kambriske sorte skifre (Buen Formationen, figur 5) velbevarede havsvampe, hvilket ikke er særlig almindeligt. Året efter tog geologerne dertil igen og fandt flere fossiler, bl.a. velbevarede artropoder og orme. Alt dette viste, at de havde at gøre med en 'Lagerstätte' i stil med Burgess Shale. Men denne var blot endnu ældre.

De kontaktede Simon Conway Morris i Cambridge, som naturligt nok var yderst interesseret i at kigge på det nye materiale. I 1989 blev en ekspedition sat i værk udelukkende med det formål at undersøge lokaliteten, som havde fået navnet Sirius Passet, og samle flere fossiler. Blandt deltagerne var Simon Conway Morris og en britisk palæontolog fra GGU, John S. Peel (figur 6), som har været involveret i udforskningen af Palæozoikum i hele Grønland. De fandt mængder af forskellige

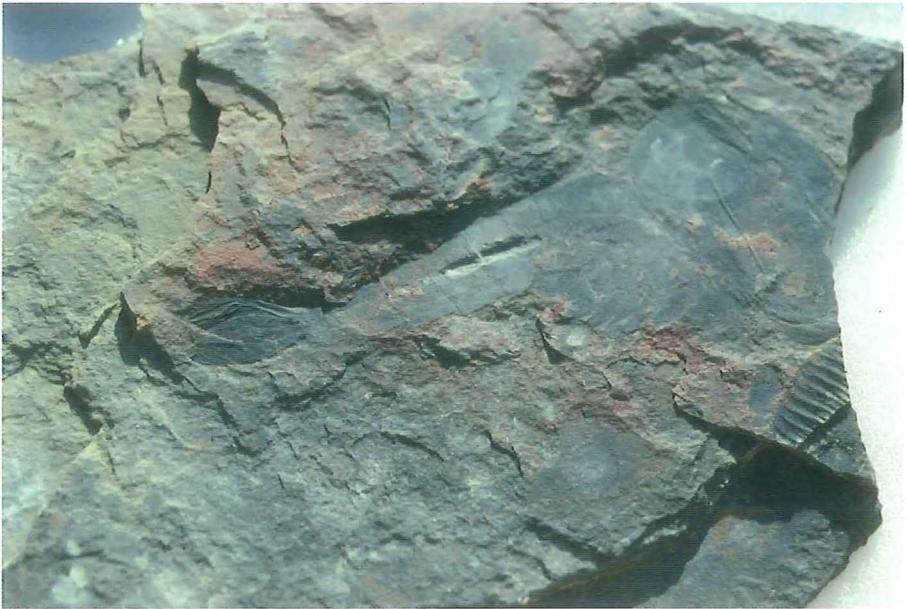


*Figur 5. Pilen markerer Sirius Passet i Nordgrønland.*



*Figur 6. John S. Peel på fossiljagt i blotningerne af Buen Formationen, ved Sirius Passet, Nordgrønland. Foto: Jon Ineson.*





Figur 7. En artropod -Waptia - fra Sirius Passet. Waptia kendes også kendes fra Burgess skifferen i Canada og Chengjiang i Kina. Foto: Jon Ineson

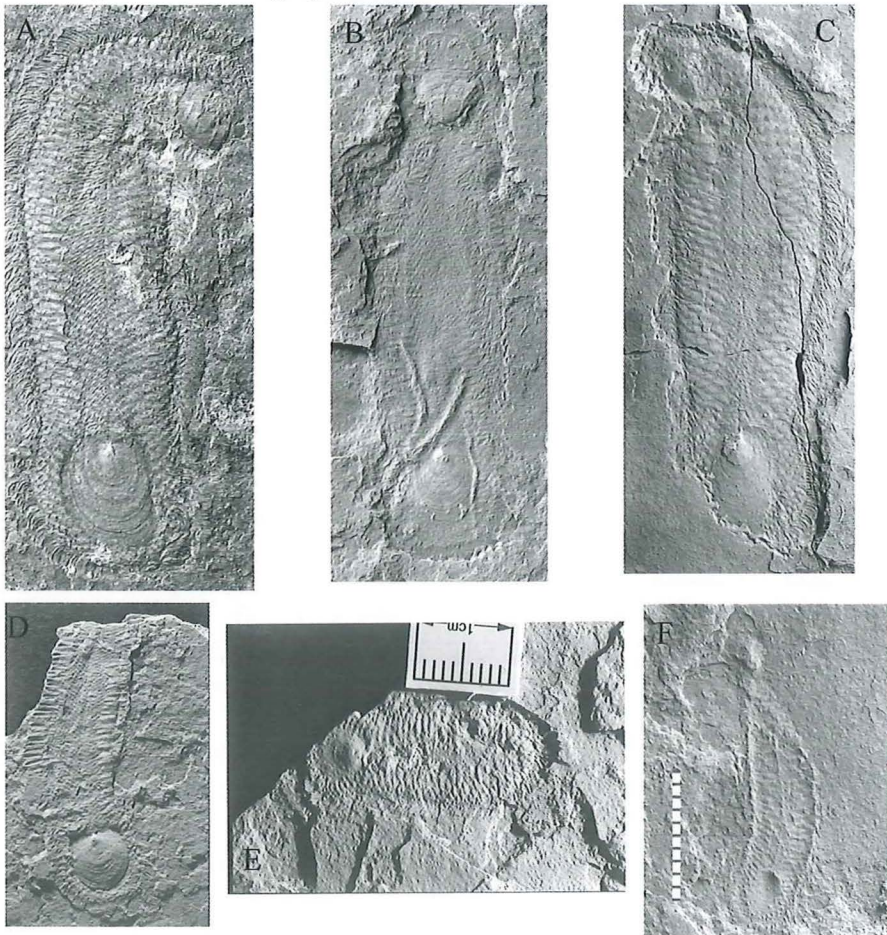
artropoder (figur 7), som minder om de man finder i Burgess skifferen. De fandt bl.a. også de ældst kendte børsteorme. Det fossile, der vakte størst opstandelse var et fossile de fandt allerede den første dag, et fladtrykt ormeligende fossile med rækker af skæl og to større plader på kroppen. Conway Morris var ikke i tvivl, han havde set disse skæl før, men som løse skæl. Det var et helt eksemplar af *Halkieria* de stod med. Et flot eksemplar, som derfor også blev gjort til holotype (figur 8, A og forsidebilledet). *Halkieria* var som Conway Morris og Bengtson regnede med et dyr med rækker af skæl på ryggen og i siderne. Det kom som en overraskelse, at den også har to større plader på ryggen, én foran og én bagpå. Det viste sig endvidere, at de havde byttet om på skælzonerne i deres første rekonstruktion (figur 4). En sidste overraskelse var, at *Halkieria* har endnu en zone af skæl langs hele randen og som støder ned til den nøgne underside. Disse skæl er tynde, krumme og pigformede.

Trods dårligt vejr indsamlede ekspeditionsdeltagerne ikke mindre end 21 eksemplarer af halkieriider, og året efter i 1990 kom en foreløbig beskrivelse af fossilerne i fagtidsskriftet Nature, med holotypen (museumsnummer MGUH 19728) som forsidebillede. To senere ekspeditioner i 1991 og 1994 resulterede i, at der er ikke mindre end 68 eksemplarer af halkieriider fra Sirius Passet.

## Beskrivelse af *Halkieria evangelista*

Fossilerne blev beskrevet i en stor artikel af Simon Conway Morris og John Peel i 1995 og fik navnet *Halkieria evangelista*. Navnet skyldes, at det for palæontologerne var som en åbenbaring til den nedre kambriske verden.

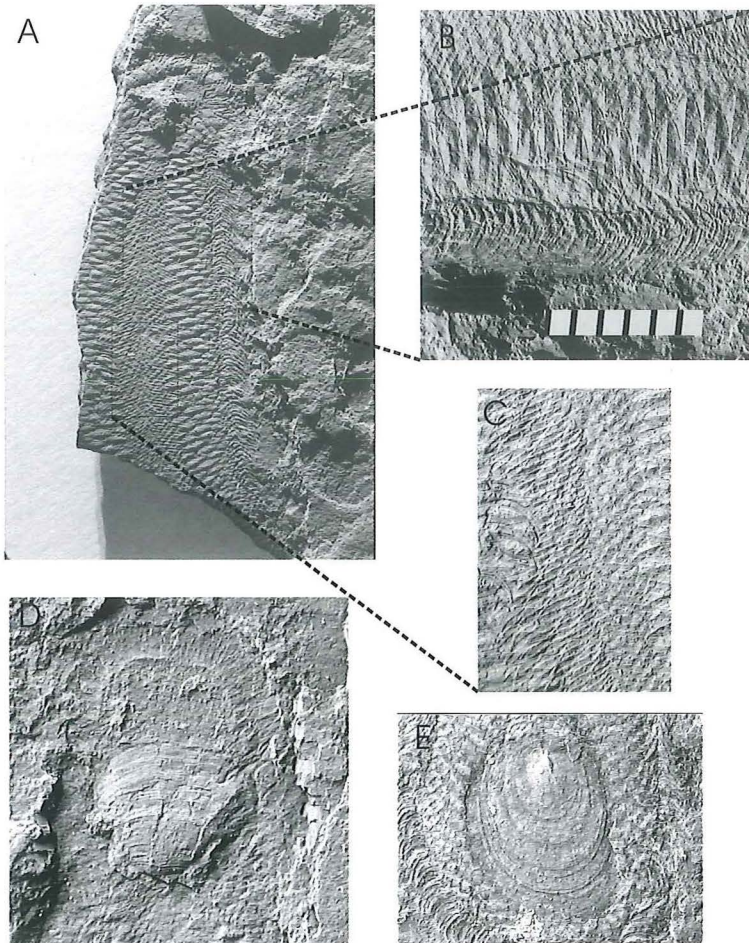
Fossilerne varierer i størrelse fra 1,5 centimeter til ca. 8 centimeter, så der er en væsentlig forskel i størrelse på dem. Alle fossilerne viser dog, at man har at gøre med en organisme, der har en nøgen underside og en rygside dækket af to skaller og tre zoner af taglagte skæl.



Figur 8. Nogle af de mest imponerende eksemplarer af *Halkieria* fra Sirius Passet. A. Holotypen MGUH19728, længde ca. 6 centimeter; B. MGUH19729, længde ca. 7 centimeter; C. MGUH19730, længde ca. 5 centimeter; D. SMX24926, eksemplar opbevaret i Cambridge; E. lille ubeskrevet eksemplar fra Cambridge (4578), længde ca. 2,3 centimeter; de små konkektioner midt på dyret er diagenetisk omdannet tarmindhold; F. MGUH19732 et lille eksemplar, længde ca. 2,4 centimeter.

De to store skaller sidder i hver sin ende, én foran og én bagved. Den forreste er næsten trekantet i omrids og den bagerste er tilnærmelsesvis oval. På dem begge ses tydelige vækstlinjer, som indikerer at skallen har vokset ved tilførsel af skalmateriale langs periferien (figur 9 D og E).

Imellem de to skaller findes to bånd af skæl langs midtlinjen. Skællene er ca. en millimeter store, ornamenteret med ribber og ligger i et krydsmønster - i skrå rækker - som løber bagud fra siden ned mod midtlinjen. Disse kaldes for palmate skæl.



Figur 9. Detaljer på Halkieria. A. billede af hele eksemplaret SMX 24911, længde ca. 5,5 centimeter - et eksemplar med særdeles velbevaret skælkledning. B. udsnit af SMX24911 (A) hvor de tre skælzoner ses, øverst; de palmate skæl, imellem; de store cultrate skæl og nederst de siculate skæl. C. detalje af midtregionen hvor de mærkelige ribber ses. D, nærbillede af forreste skal på MGUH 19729, E. Nærbillede af bagerste skal på holotypen MGUH19728.

Udenom de palmate skæl og rundt om de to store skaller er der en anden zone af skæl, som kaldes de cultrate. Disse skæl er større og ligeledes ornamenteret med ribber liggende i et krydsmønster (figur 9 B).

Visse steder kan skællene ses at være hule, ligesom der har været et slags kanalsystem i skalvæggen. Ved basis er skællet forsynet med en indsnævret åbning fra hulrummet og ud. Det må antages, at skællet her var forankret til kroppen af *Halkieria*. Langs hele randen af dyret sidder en sidste zone af skæl. Disse er tynde og krumme og mere pigformede end de andre og kaldes siculate skæl ( figur 9 B).

Alle fossilerne har besynderlige parallelle og tætsiddende ribber. De er presset mod resten af fossilet og ligger i den palmate og cultrate zone (figur 9 C). Ribbernes funktion er stadig uklar, men det kan være en slags fortykninger i huden, som har styrket skelettet.

Fossilerne er bevaret som aftryk, så det er ikke muligt at se hvad skællene og skallerne har bestået af. I andre aflejringer, hvor man finder løse skæl er de erstattet af fosfat. Der er ofte bevaret originale mikrostrukturer, der viser, at de har bestået af aragonit, en variant af calciumcarbonat, som er et almindeligt biomineral især hos mollusker.

### *HALKIERIAS* SLÆGTSKAB

I den originale beskrivelse af *Halkieria evangelista* undersøgte Conway Morris og Peel *Halkierias* mulige slægtskaber med nutidens dyregrupper. De nåede frem til, at *Halkieria* kunne være en stamform til brakiopoder. Argumentationen går på, at *Halkieria* har to skaller, hvor den ene overfladisk kunne ligne en brakiopodskal. Hos visse brakiopoder (*Crania*) ser man, at de som larver er fritlevende og kravler rundt. Derefter sker der det, at de folder om på 'maven' og danner en skal i for- og bagenden og udvikler sig til sit voksne - stillesiddende - stadie. Conway Morris og John Peels hypotese var, at *Halkieria* i tidens løb simpelthen gradvist blev kortere og til sidst foldede på maven og blev fuldstændig indesluttet i de to skaller.

Hypotesen er underbygget af en række argumenter, som bl.a. involverer *Wiwaxia* fra Burgess skifferen, som har ligheder med annelider (børsteorme) og *Halkieria*. Der er også biologer, der på det sidste har argumenteret for at annelider og brakiopoder skulle være nærmere beslægtet end tidligere antaget (figur 10 A).

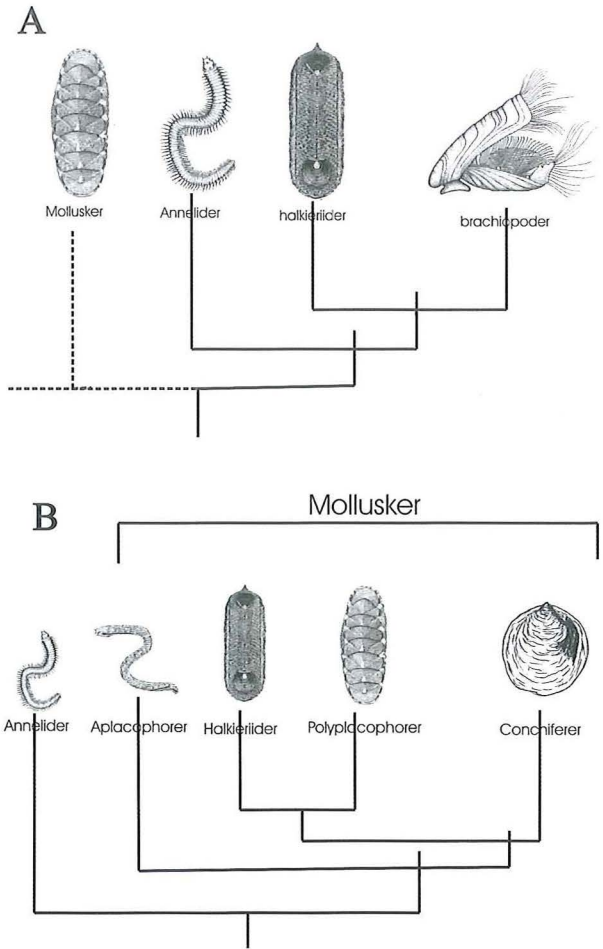
Der kan dog også foreslås en anden model for *Halkierias* slægtskab. Sammenligner man *Halkieria* med skallus, ser man en række ligheder (figur 10 B).

Skallus er mollusker), der kryber rundt på en muskuløs fod ligesom deres slægtninge sneglene. På ryggsiden har de 8 skaller, og omkring disse er der et bånd af skæl. Skælbåndet er inddelt i zoner med forskellig form som hos *Halkieria*.

Figur 10. Simplificerede slægtskabs-træer; som viser de to teorier om Halkerias slægtskab med nulevende organismer.

A. Conway Morris og Peels slægtskabstræ, hvor Halkieria er nærmest beslægtet med brakiopoder og annelider er næstmest beslægtet. Mollusker er placeret med usikker stiplede linje som værende fjernest beslægtet i de tre grupper.

B. Et alternativt slægtskabstræ, hvor Halkieria er nærmest beslægtet med skallus indenfor rækken mollusker; som er beslægtet med gruppen conchiferer, som inkluderer snegle, muslinger, blæksprutter, søtænder og den primitive gruppe monoplacophorer. Yderst hos molluskerne er placeret aplacophorerne, som er ormeligende bløddyr; traditionelt anset for primitive mollusker. Molluskernes søstergruppe skal være anneliderne.



Skallus vokser ved at størrelsen af deres skaller øges ved marginær vækst, som hos mange andre dyr, og som skallerne på *Halkieria* har gjort. Ved at tælle skællene på små og store eksemplarer hos *Halkieria* kan man sige noget om, hvordan de voksede. Problemet er, at ikke alle skæl er bevaret på en måde, så de er til at tælle, men de store cultrate skæl er dog oftest velbevaret, især langs med siden af fossilet. Ved at tælle antallet af skælrækker imellem de to skaller og antallet af skæl i en række fandt man, at det er konstant, men at skællene er større hos store dyr end hos små dyr. Morfologien af et skæl viser, at de ikke kan vokse ved marginær vækst som skallerne. Derfor må *Halkieria* have vokset ved, at den har udskiftet sine skæl med større skæl under væksten, svarende til hvad man faktisk finder også hos skallus.

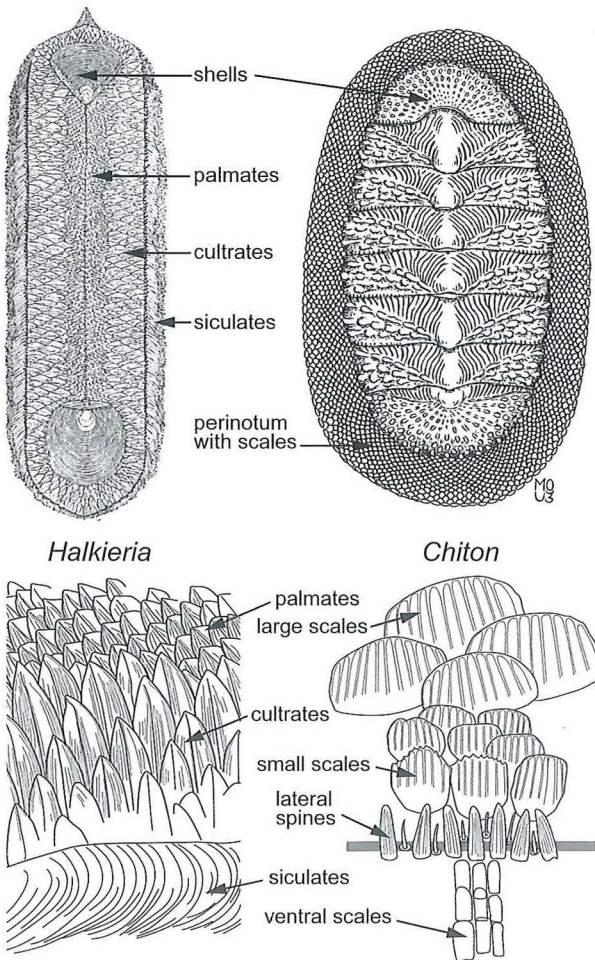
Som før nævnt genfinder man skælzoner hos begge dyr, men udseendet af skællene hos skallus varierer meget, og der er en fjerde skælzone på kanten af undersiden, som ikke er genfundet hos *Halkieria*. Hos nogle skallus udvikles skæl ikke. Mange skallus med veludviklede skæl udviser et mønster, hvor der er to øvre zoner tættest på skallerne med en tyk flad morfologi og også ofte med aflange ribber. De ligger ligeledes i et krydsmønster. Endvidere er der en zone langs randen med mere pigformede skæl - ligesom hos *Halkieria* (figur 11).

Skallus er som de fleste andre mollusker aragonitskallede. Det har som før

nævnt været hævdet, at *Halkieria* ligeledes har været aragonitskallet. En sidste indikation der er værd at nævne, er *Halkierias* overordnede udseende - den nøgne underside som passer med, at der kunne have været en fod til at krybe på.

Faktisk er den eneste umiddelbare forskel på *Halkieria* og skallus, at *Halkieria* har to skaller, hvorimod skallus altid har 8 skaller (figur 11).

Der er mange træk, der viser, at *Halkieria* ikke er beslægtet med brakiopoder. Brakiopoder er enten fosfat- eller calcit-skallede - begge mineraler der oftest vil være bevaret fossilt. Brakiopoder har en tentakelkroner, en såkaldt lophophore, som bruges til at filtrere partik-



Figur 11. Rekonstruktion af *Halkieria* sammen med en tegning af en skallus. Der er ligeledes angivet et udsnit af skælleklædningen hos *Halkieria* og hos en skallus. Læg mærke til at de tre øverste skæl zoner også ligner hinanden i form. Figur lånt fra Vinther og Nielsen, 2004, *The Early Cambrian Halkieria is a mollusc*, *Zoologica Scripta*, in Press.

ler ud af vandet. Sådan en lophopore har også to andre grupper af dyr; bryozoer og en mindre gruppe kaldet phoronider. Brakiopoder er nært beslægtet med disse. Hvis *Halkieria* er beslægtet med brakiopoder, skulle den også have denne tentakelkrone.

Der er ikke noget der taler for, at f.eks. phoronider kunne være beslægtet med halkieriider. Det er ovenfor omtalt, at visse brakiopoder krøb rundt i larvestadiet, foldede om på maven og herefter omdannedes til sit voksne - stillesiddende - stadie. Det kunne umiddelbart godt passe med *Halkieria*, som har den nøgne underside og de to skaller og derfor godt kunne tænkes at gøre dette.

Phoronider er rørlevende og folder om på ryggen under deres larvestadie. Det er ikke sandsynligt, at *Halkieria* kunne gøre dette, når man ser, at den er dækket af skæl og skaller på ryggen. Dette ville komplicere en sådan omdannelse.

Sammenfattende kan det siges at *Halkieria* har en krop som en skallus - der er en mollusk - som kryber rundt på en muskuløse fod på sin underside og indtager føde ved at skrabe materiale fra hårde overflader med sin raspetunge. *Halkieria* har formentlig levet nogenlunde på samme måde for ca. 530 millioner år siden i de kambriske have, som en af de tidligst udviklede mollusker. Senere udvikledes disse sig til nutidens skallus, snegle, muslinger og blæksprutter.

## ORDFORKLARING

**Bilateral symmetri:** Når en organisme er organiseret, så man kan spejle den i sit midtplan, f.eks. os selv. Sammenlign med radiær symmetri.

**Biominerale:** Et mineral som organismer er i stand til selv at producere. Eksempler på biomineraler er calcit, aragonit og apatit, som ses hos mange forskellige dyr, encellede organismer og planter.

**Fosfatiske aflejringer:** Aflejring hvori fosfatholdige mineraler er udfældet eller aflejret.

**Holotype:** Det fossil, som danner grundlag for artens beskrivelse.

**Morfologi:** Videnskabeligt ord for en genstands form.

**Radiær symmetri:** Når en genstand kan drejes om sit midtpunkt og gentage sin form. F.eks. en almindelig blomst set oppefra. Sammenlign med bilateral symmetri.

**Søstergruppe:** Den gruppe, der er nærmest beslægtet med en anden gruppe af dyr.

# VARV priser 2005

Årgang 1964 -1979	pr. årg. 10 kr	pr. nr. 5 kr
Årgang 1980 -1985	pr. årg. 20 kr	pr. nr. 10 kr
Årgang 1986 -1990	pr. årg. 50 kr	pr. nr. 25 kr
Årgang 1991 -1994	pr. årg 75 kr.	pr. nr. 25 kr
Årgang 1964 -1985 samlet (- 1964,1 og 1965,3)	200 kr	
Årgang 1986 -1994 samlet	450 kr	
Årgang 1995	årg. 100 kr	pr. nr. 30 kr
Årgang 1996	årg. 100 kr	pr. nr. 30 kr
Årgang 1997	årg. 100 kr	pr. nr. 35 kr
Årgang 1998	årg. 100 kr	pr. nr. 35 kr
Årgang 1999	årg. 100 kr	pr. nr. 35 kr
Årgang 2000	årg. 120 kr	pr .nr 35 kr
Årgang 2001	årg. 120 kr	pr. nr 35 kr
Årgang 2002-2004	årg. 140 kr	pr. nr. 40 kr

## Særnumre

Geologi på Øerne (Stevns-Faxe-Møn)	15 kr
Geologi på Røsnæs	15 kr
Ghana	15 kr
Nordgrønland (1986,1)	25 kr
Danmark I Istiden (1989,2)	30 kr
Iltsvind, sort slam og trilobitter (1996,1)	30 kr
<b>Særnumre samlet</b>	<b>100 kr</b>

**Palæoklima** (1996, 3+4 & 1997,2) 80 kr

## Bornholms geologi

I Generel oversigt (1988,2)	25 kr
II Palæozoikum 1988,3)	25 kr
III Grundfjeldet (1989,1)	25 kr
IV Mesozoikum (1989,3)	25 kr
<b>Bornholms geologi samlet</b>	<b>80 kr</b>

## Andre

Ivigtut (1998,1)	50 kr
Livet i kridthavet (2000,4)	55 kr
Skåne i 1.800 millioner år (2002,1)	40 kr

Alle priser er ekskl. forsendelse



# GEOLOGISK LAGRING AF KULDIOXID KAN REDUCERE DEN MENNESKESKABTE DRIVHUSEFFEKT

Niels Springer, Dan Olsen og Niels Stentoft

En større befolkning, industrialisering og en stadig voksende økonomisk aktivitet har i de sidste par hundrede år bevirket en stigning i atmosfærens indhold af kuldioxid (CO<sub>2</sub>), figur 1. Kuldioxid er, i lighed med nogle andre gasser som f.eks. metan og vanddamp en drivhusgas, dvs. en gas, der reflekterer den langbølgede (infrarøde) varmestråling tilbage mod jorden. En koncentration af drivhusgasser vil således, alt andet lige, på sigt medføre en højere temperatur på jordens overflade. Denne udvikling har været kendt i mange år, og den mulige temperaturudvikling er søgt beskrevet i stadig mere raffinerede klimamodeller. Klimamodellerne er matematisk-fysiske beskrivelser af et system med mange variable, der gerne skulle beskrive den historiske klimaudvikling korrekt, men også gerne skulle kunne bruges til forudsigelse af det fremtidige klima. Modellernes forudsigelse af en stigende temperatur i fremtiden (2-5 °C om 100 år) har vakt politisk opsigt, og en række lande har med baggrund i et forsigtighedsprincip besluttet at reducere deres udslip af CO<sub>2</sub> over en kortere årrække.

Fra videnskabelig side er det vigtigt, at vi ikke kun beskriver de processer der foregår i naturen, men at vi også kan anvise mulige løsninger på en udvikling, der kan være en trussel mod de nuværende livsbetingelser på Jorden. Et af de

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CFC-11	HCFC-22	CF <sub>4</sub>
Præ-industriell koncentration	~280 ppmv	~700 ppbv	~275 ppbv	zero	zero	zero
Koncentration in 1994	358 ppmv	1720 ppbv	312 ppbv	268 pptv	110 pptv	72 pptv
Vækstrate pr. år	0.4 %/y	0.6 %/y	0.25 %/y	0 %/y	5 %/y	2 %/y
Atmosfærisk residentid (y)	50-200	9-15	120	50	12	50,000

Figur 1. Udviklingen i de seneste 2-300 år for en række drivhusgasser i Jordens atmosfære. Der ses en stigende tendens for alle gasser. Bemærk, at de næsten alle har en kort residentid i atmosfæren, mindre end 200 år. Fluo-carbonerne er syntetiske gasser; der hovedsageligt anvendes som kølemidler. De har alle en ekstrem høj drivhuseffekt, men deres koncentration er heldigvis endnu meget lav. ppmv=volume parts per million, ppbv=volume parts per billion (10<sup>9</sup>), pptv=volume parts per trillion (10<sup>12</sup>) (IPCC, 1996).

Planet	CO <sub>2</sub> [vol-%]	N <sub>2</sub> [vol-%]	H <sub>2</sub> O [Vol-%]	Overflade temp. / Tryk [°C] / [atm]
Venus	96.5	3.5	< 0.02	~ 465 / 92
Jorden	0.03	78	< 1	~ 15 / 1
Mars	95.3	2.7	< 0.01	~ -65 / 0.01

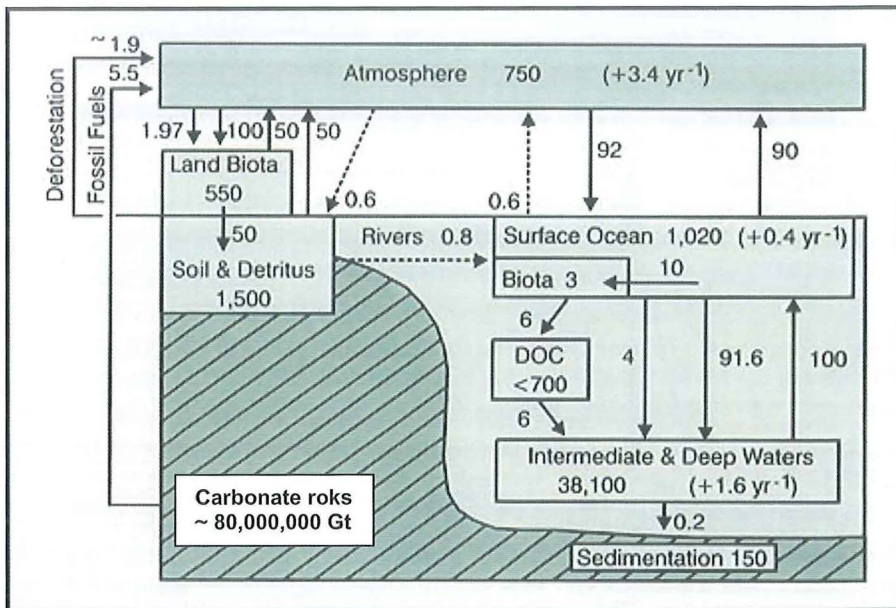
Figur 2. De terrestriske planeters atmosfære i nutiden. Atmosfærens sammensætning er resultatet af et kompliceret samspil mellem mange faktorer; som kun er delvis kendt. Nogle vigtige faktorer i atmosfærens udvikling er planetens masse (tyngdefelt), temperaturprofilen i atmosfæren samt mængden og arten af gasser; der tilføres atmosfæren over tid. Venus er langt varmere end forventet ud fra planetens afstand til Solen, hvilket skyldes en helt ekstrem drivhuseffekt, der primært er forårsaget af et højt CO<sub>2</sub>-indhold.

midler, der indenfor en kort tidshorisont vil kunne anvendes for at reducere atmosfærens indhold af CO<sub>2</sub>, er deponering i undergrunden. Vi vil i det følgende omtale nogle geologiske forskningsprojekter med dansk deltagelse, hvor man netop har undersøgt deponering af CO<sub>2</sub> i undergrunden ud fra forskellige synsvinkler.

#### KULSTOFS KREDSLØB OG ATMOSFÆRENS UDVIKLING

Det forhøjede indhold af drivhusgasser i atmosfæren må formodes at være et kortvarigt problem (nogle få hundrede, evt. tusinde år) forudsat, at vi formår at tøjle befolkningsvæksten og omlægge vores energiforsyning til CO<sub>2</sub> neutrale kilder, altså fra fossile energikilder til energikilder med lave eller ingen skadelige udslip. Derved kan vi nedsætte eller fjerne det overskud af CO<sub>2</sub>, der hvert år tilføres atmosfæren, hovedsagelig via afbrænding af fossile brændsler og skovrydning, figur 3. Mens residenttiden for CO<sub>2</sub> er kort i atmosfæren (figur 1), tager det noget længere tid før en uligevægt i oceanernes CO<sub>2</sub>-koncentration er udlignet ved sedimentation. De store mængder af karbonatbjergarter på jorden er således dannet over mange hundrede millioner år, figur 3.

Udviklingen af Jordens atmosfære er ikke kendt i detaljer, men den tidligste atmosfære sammensætning formodes at have været ret ens for de såkaldte terrestriske planeter: Venus, Jorden og Mars. Kulstof har været tilstede som CO, CO<sub>2</sub> og simple kulbrinter i det materiale, der dannede de indre planeter, og planeternes atmosfære har formodentlig haft en høj koncentration af CO<sub>2</sub> og N<sub>2</sub> (kvælstof) kort tid efter at ansamlingsfasen var slut (nogle få hundrede millioner år efter planeternes dannelse for 4.600 millioner år siden). Atmosfærens sammensætning i dag ses af figur 2. Det ses, at Jordens atmosfære nu er totalt forskellig fra de andre planeters. Årsagen hertil er primært, at H<sub>2</sub>O i form af vand er en stabil fase på Jorden, men ikke på de andre planeter. Som det fremgår

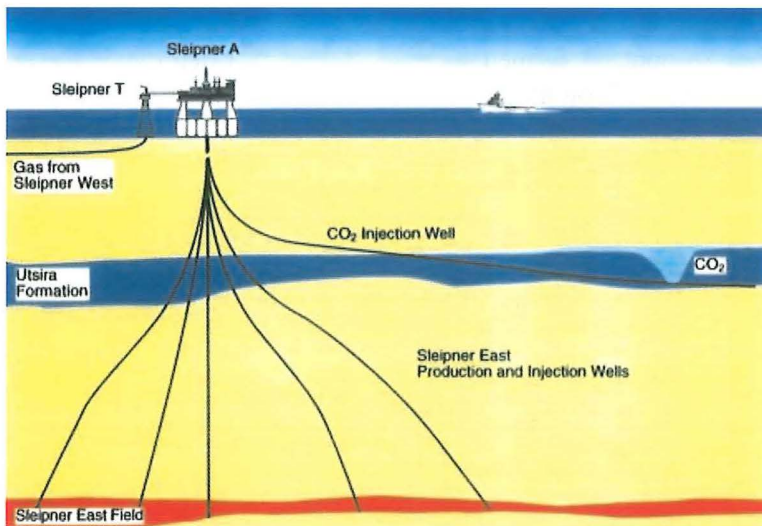


Figur 3. Det nutidige kulstofkredsløb for systemet atmosfære-ocean-kontinent i gigatons kulstoffår (GtC/year). Bemærk at kulstofligevægten atmosfære-ocean er forskudt ca. 50 gange mod oceanet. Denne tendens gælder også for  $CO_2$ . Havet fungerer derfor som en stor stødpude for  $CO_2$ , men er alligevel ikke i stand til at optage hele den overskydende mængde  $CO_2$ , som årligt tilføres atmosfæren. DOC=dissolved organic carbon (IPCC, 1996).

af figur 3, vil  $CO_2$  opløses i oceanerne - endda i ganske stor mængde. Herfra fjernes det over tid af biologisk aktivitet for til sidst at ende som kalk, dolomit og kulbrinteaflejringer (kul, olieskifre, olie og gas). Det er en meget stor andel af Jordens kulstof (> 99%, figur 3) der på denne måde er taget ud af atmosfære-ocean kredsløbet og nu er bundet i sedimenter og kulbrinte aflejringer.

#### HVORDAN NEDBRINGER VI KULDIOXID INDHOLDET I ATMOSFÆREN

Det fremgår af det ovenstående, at der relativt hurtigt vil vise sig en effekt, hvis tilførslen af  $CO_2$  til atmosfæren bremses eller formindskes. Man kan have sin tvivl om det her og nu vil være muligt at nedbringe  $CO_2$ -koncentrationen i atmosfæren uden at udvise brutal fremfærd (befolkningsudviklingen) eller at udløse økonomisk kaos (stoppe forbruget af fossile brændsler). Geologien kan imidlertid tilbyde en delvis løsning på kort sig, nemlig som nævnt ovenfor deponering af  $CO_2$  i undergrunden, en metode der for tiden praktiseres i Norge, og som i forbindelse med olieindvinding har været praktiseret igennem de sidste 30 år især i USA.



Figur 4. Sleipner A platformen producerer gas og kondensat fra Heimdal Formationen i ca. 2.500 meters dybde, angivet som Sleipner East Field. Den separerede  $\text{CO}_2$  fra Sleipner Vest-feltet pumpes ned i aquiferen i Utsira Formationen 1.150 m under havbunden og i en afstand af ca. 3 kilometer fra platformen. Den tragtformede udbredelse af  $\text{CO}_2$  er et modelleret scenario efter 20 års injektion i reservoiret. (Statoil, 1996).

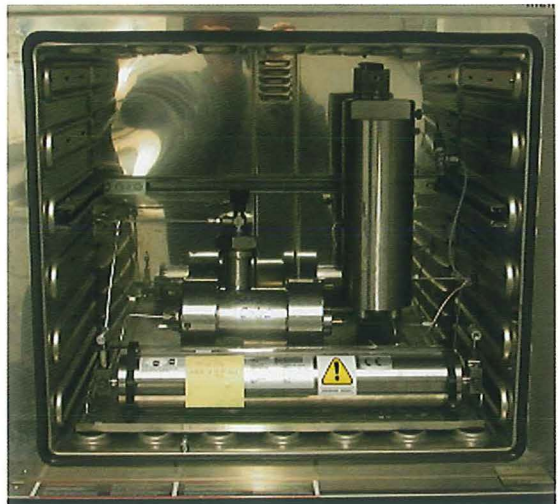
## SACS PROJEKTET

I den norske del af Nordsøen ved Sleipnerfeltet lagres der for tiden ca. 1 million ton (Mt)  $\text{CO}_2$  per år, og det forventes, at der i løbet af feltets levetid i alt vil blive deponeret 20 Mt  $\text{CO}_2$ . Sleipnerfeltet er et gaskondensat felt, der består af en øst- og en vestdel. Sleipner Vest har en kompliceret geologisk opbygning, og gassen herfra indeholder 5-10%  $\text{CO}_2$ . Det er betydelig mere, end salgsaftalerne for gas i Nordsøen tillader. Statoil, der er operatør på feltet, må derfor nedbringe  $\text{CO}_2$ -indholdet i gassen til mindre end 2,5%, før den kan sælges. Dette gøres i en såkaldt 'scrubber' proces, og den fjernede  $\text{CO}_2$  vil normalt blive udledt til atmosfæren. Det er imidlertid ganske store mængder, det drejer sig om, ca. 3% af Norges samlede  $\text{CO}_2$ -udslip. Miljøovervejelser (Kyoto-aftalen) og den norske beskatning af  $\text{CO}_2$ -udslip bevirkede, at Statoil og partnerne i Sleipnerlicensen besluttede at iværksætte verdens første industrielle  $\text{CO}_2$ -deponering i et aquifer lager (et vandførende lag i undergrunden), figur 4. Gassen fra Sleipner Vest behandles på procesplatformen (T), og den separerede  $\text{CO}_2$  føres til A platformen, hvorfra den injiceres i Utsira Formationen, en ca. 250 meter tyk sandformation af Miocæn alder med gode reservoiregenskaber, dvs. høj porøsitet og permeabilitet.

CO<sub>2</sub> injiceres i godt 1.100 meters dybde i den nederste del af Utsira sandet for at få en god opblanding med vandet i aquiferen. I den dybde er reservoir-temperaturen 37 °C og trykket omkring 110 bar, hvilket betyder at CO<sub>2</sub> er i superkritisk tilstand. Under disse forhold er CO<sub>2</sub> lettere end formationsvandet og vil derfor stige opad. Modelberegninger viser, at ca. 18% af den injicerede CO<sub>2</sub> vil opløses i vandet på vejen opad; resten vil samle sig i toppen af Utsira sandet i 800 meters dybde, hvor et 80-100 meter tykt dæklag af pliocæn ler (Nordland Shale) forhindrer videre opstigen. Efter 20 års injektion forventes det, at den paddehatformede CO<sub>2</sub> akkumulation under Nordland Shale vil have en radius mindre end 3 kilometer. Med tiden vil konvektion i vandet i Utsira sandet fordele CO<sub>2</sub> 'en. Modelberegninger viser, at 5.000 år efter CO<sub>2</sub>-injektionens ophør er al CO<sub>2</sub> opløst i vandet og fordelt jævnt i reservoiret.

SACS Projektet (Saline Aquifer CO<sub>2</sub> Storage) er igangsat og støttet af Statoil sammen med en række andre olieselskaber og tillige støttet økonomisk af EU. Formålet med projektet har været at samle en gruppe af stærke europæiske geoinstitutioner for at undersøge, hvilken effekt CO<sub>2</sub>-lagring i undergrunden har på omgivelserne, og hvilken skæbne CO<sub>2</sub> undergår på længere sigt. Seismiske undersøgelser før og efter injektion af CO<sub>2</sub> har vist, at der nu er en superkritisk boble af CO<sub>2</sub> under dækbjergarten som forudsagt i modelsimuleringerne. Modellering baseret på mineralogi, formationsvandets kemi og den kemiske reaktionshastighed har vist ingen eller kun ringe reaktion mellem det CO<sub>2</sub>-holdige formationsvand og Utsira sandet, der overvejende består af kvartssand. Særlig interesse knytter sig til kvaliteten af dækbjergarten. Fra olie- og gasforekomster

*Figur 5. Eksperimenter på borekerner ved reservoirbetingelser foregår i en ovn. En cylindrisk prøve af lersten (dækbjergarten over Utsira sandet) er anbragt i den store vandretliggende kerneholder bagerst i ovnen ved et omslutningstryk på ca. 55 atmosfære og en temperatur på 37 °C. Fra den lange cylinder i forgrunden tilføres CO<sub>2</sub> under stigende tryk til den ene ende af prøven i kerneholderen. Ved et bestemt tryk, barrieretrykket, overvindes kapillarkræfterne og CO<sub>2</sub> trænger ind i lerprøven. Når der planlægges en deponeringsstrategi er det vigtigt at kende dækbjergartens barrieretryk.*



ved man, at et tykt lerlag kan være en barriere over lange geologiske tidsrum. Det formodes at Nordland Shale har lignende egenskaber og således vil forhindre at CO<sub>2</sub> trænger op til overfladen. I SACS projektet er dækbjergartens egenskaber blevet undersøgt af flere forskningslaboratorier, herunder ved GEUS Kerne-laboratorium, figur 5.

Det er beregnet, at Utsira sandet kan lagre omkring 600 milliarder ton (Gt) CO<sub>2</sub>. Det svarer til CO<sub>2</sub> udledningen fra alle Europas kraftværker i de næste 600 år. Det er således muligt at lagre endog meget store mængder CO<sub>2</sub> i geologiske strukturer.

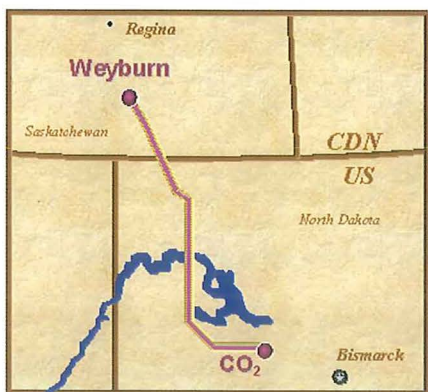
### WEYBURN PROJEKTET

I den canadiske forbundsstat Saskatchewan foregår der for tiden en storskala injektion af CO<sub>2</sub> i et oliefelt nær byen Weyburn, figur 6. Operationen er kendt som en Enhanced Oil Recovery (EOR) proces, hvorved superkritisk CO<sub>2</sub> medvirker til en forøget olieindvinding fra et modent oliefelt. Denne proces til forøget olieindvinding kendes især fra USA, hvor man i mindre skala har praktiseret

dette siden 1970'erne, fortrinsvis i mindre olieletter, hvor man ikke har kunnet producere mere olie med traditionelle midler.

Mekanismen i CO<sub>2</sub>-EOR er vist i figur 7. Som middel til at reducere udslippet af CO<sub>2</sub> til atmosfæren har de hidtidige EOR operationer i USA dog været virkningsløse, da man altid har anvendt CO<sub>2</sub> fra naturlige (vulkanske) forekomster. Operationerne har derfor ikke haft nogen effekt på CO<sub>2</sub>-udslippet til atmosfæren. Anderledes forholder det sig med

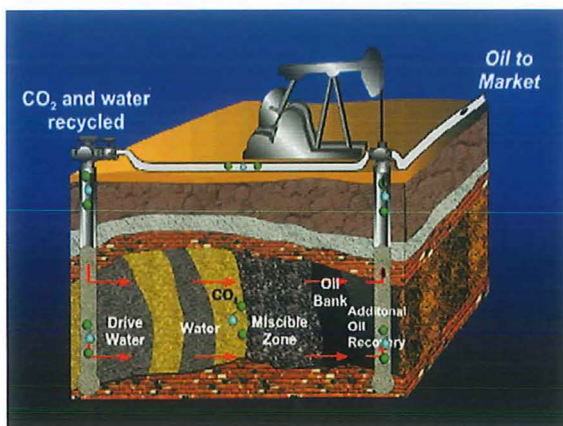
Weyburn projektet, hvor man anvender CO<sub>2</sub> fra en industriel kilde, der ellers ville være udledt til atmosfæren.



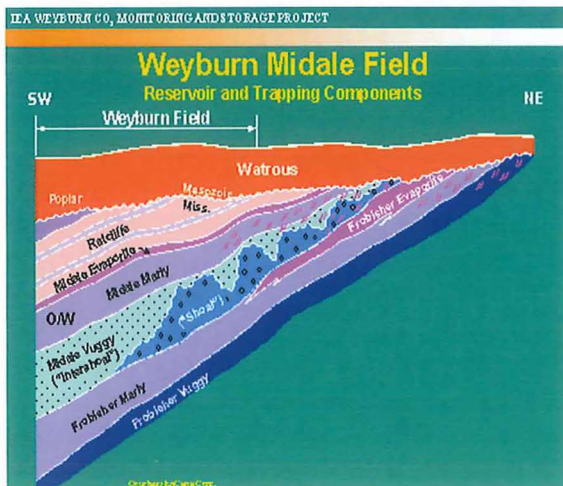
*Figur 6. 'Great Plains Synfuels Plant' vest for Bismarck i North Dakota udleder store mængder røggas. Røggassen renses og CO<sub>2</sub> sendes i en 350 kilometer lang rørledning nordpå til Weyburn i Saskatchewan, hvor den injiceres i Weyburnoliefeltet for at forøge olieindvindingen (Sask. Energy and Mines).*

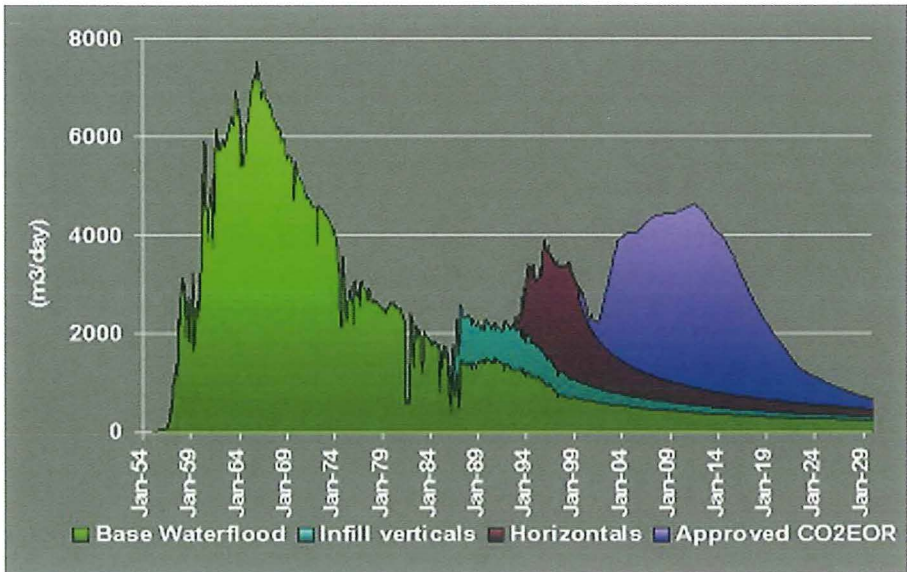
Weyburnfeltet er et karbonatfelt af Nedre Karbon alder med olieakkumulationer i 2 forskellige reservoirzoner. Den nedre zone, Midale Vuggy, er en opsprækket kalksten med en lidt højere permeabilitet end den overlejrende, tætte dolomit, Midale Marly. Reservoiret er forseglet opadtil af en tæt dækbjergart, Midale Evaporite, figur 8. Feltet, der er på størrelse med Danfeltet i Nordsøen, blev sat i produktion i midten af 1950'erne. I begyndelsen producerede man olie ved almindelig trykafkastning, dvs. at man udnyttede det overtryk, der normalt er i et oliereservoir, men i 1960'erne startede man vandinjektion fra vertikale brønde for at holde reservoirtrykket oppe. I 1980'erne borede man så afbøjede brønde og senere horisontale brønde for at få en mere effektiv fortrængning af olien. Den historiske udvikling ses udmærket af figur 9, hvor forventningen til CO<sub>2</sub>-EOR strategien også er vist. Det er ganske betydelige ekstra mængder olie, man

Figur 7. CO<sub>2</sub> injiceres i pulser vekslede med vand for at styre udbredelsen af CO<sub>2</sub> mere hensigtsmæssig i reservoiret. CO<sub>2</sub> er blandbar med olien som kvælder op, trykket stiger og blandingen, der især er rig på de lidt lettere oliefraktioner, drives hen mod oliebrønden. Ved overfladen separeres CO<sub>2</sub> igen fra oliefasen og re-injiceres sammen med ny CO<sub>2</sub> i reservoiret (Sask. Energy and Mines).



Figur 8. Weyburnfeltet er en del af Willistonbassinet, der strækker sig fra Canada ind i det nordlige USA. 'Midale Beds' er en olieførende karbonat-formation af Nedre Karbon alder (Mississippian). Den tætte 'Midale Marly' dolomit har hidtil ikke produceret meget olie. Det forsøger man nu at rette op på ved CO<sub>2</sub>-vand injektion fra vandrette brønde placeret i et tætliggende mønster i dolomitten. Profilet er stærkt overhøjet (EnCana Corp/IPCC 2002).





Figur 9. Den historiske olieproduktion fra Weyburnfeltet samt den forventede merproduktion ved CO<sub>2</sub>-EOR operationen indtil 2029 - areal angivet med violet farve (EnCana Corp/IPCC 2002).

regner med at kunne producere over de næste 20 år. Den injicerede mængde CO<sub>2</sub> er af samme størrelse som i Sleipnerfeltet - 1 Mt CO<sub>2</sub> per år.

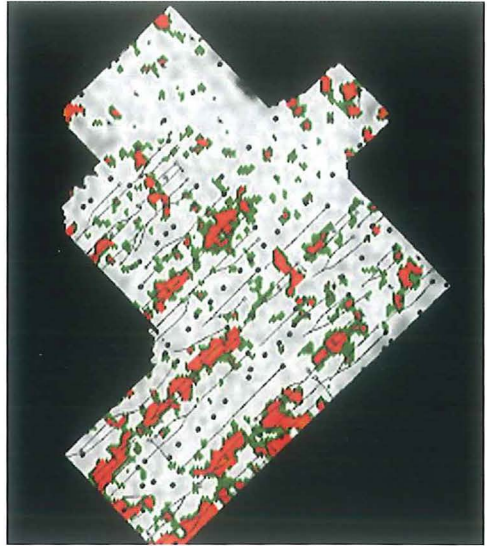
CO<sub>2</sub>-gassen kommer langvejs fra, ca. 350 kilometer sydpå i North Dakota. Her ligger et kemisk værk, der fremstiller syntetisk brændstof og kunstgødning ved gassifikation af kul. Restproduktet er røggas med et stort indhold af CO<sub>2</sub>, der normalt ledes ud i atmosfæren. I de sidste 4 år er en stor del af denne CO<sub>2</sub> imidlertid sendt videre til Canada for injektion i Weyburn feltet, figur 6. Det forventes at indvindingsgraden vil øges fra 25% til mindst 35% af den tilstedeværende oliemængde i reservoiret i løbet af de 20 år EOR projektet er planlagt at vare. Indtil nu har resultaterne af CO<sub>2</sub>-injektionen været meget tilfredsstillende, og ved hjælp af avancerede seismiske metoder er det muligt allerede nu at se udbredelsen af CO<sub>2</sub> i reservoiret, figur 10. Selv om olieselskabet betaler for at modtage CO<sub>2</sub> fra værket i North Dakota, er der ganske god økonomi i projektet, især med de nuværende høje oliepriser.

Konceptet i Weyburn - mere olie ud af feltet med CO<sub>2</sub> - er således helt forskellig fra den passive lagring af CO<sub>2</sub> i Sleipnerområdet, men resultatet er det samme: Slutdeponering af en ganske stor mængde CO<sub>2</sub> i undergrunden (20 Mt CO<sub>2</sub>).

IEA/EU Weyburnprojektet er et internationalt forskningsprojekt, der har til opgave at undersøge langtidseffekterne af den CO<sub>2</sub>-deponering, der finder sted i

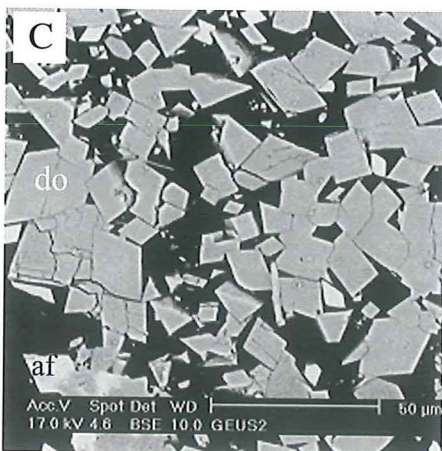
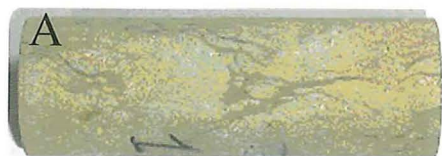


Figur 10. Avanceret seismisk kortlægning af det såkaldte fase Ia CO<sub>2</sub>-flooding- område i Weyburnfeltet. En baggrundsseismisk undersøgelse blev udført i 1999 før CO<sub>2</sub>-injektionen startede og en ny seismik med nøjagtig samme geometri blev gentaget i 2001, 14 måneder efter CO<sub>2</sub>-injektionen startede. De farvede områder på kortet viser udbredelsen af CO<sub>2</sub>-fronterne, parallelt med injektor og producer brønde som svagt anes på kortet som tynde mørke linier (EnCana Corp/IPCC 2002).

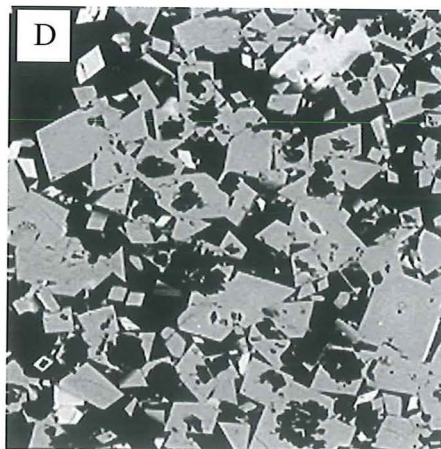


Weyburnfeltet. Projektet er støttet af Det Internationale Energi Agentur (IEA), operatøren på feltet er olieselskabet EnCana Corp. og de lokale deltagere Saskatchewan Energy and Mines samt olieforskningscentret PTRC. Senere er der kommet deltagere fra USA og i 2001 besluttede EU Kommissionen at støtte europæisk deltagelse. Selvom interesserne er forskellige, er der en række spørgsmål, et sådant projekt kan medvirke til at besvare. Det er første gang man udfører en storskala CO<sub>2</sub>-EOR operation i et karbonatfelt. Operatøren er derfor klart interesseret i at vide, hvilken effekt det har, at man injicerer CO<sub>2</sub> under højt tryk (150-250 bar) i en karbonatsekvens, der har en temperaturer på 40-60°C. Sker der f.eks. en opløsning af bjergarten, når CO<sub>2</sub> danner kulsyre i formationen, og bliver den dyrt indkøbte CO<sub>2</sub> dernede eller forsvinder den op i de overliggende geologiske formationer. Fra miljøside er man bekymret for at få CO<sub>2</sub> op i grundvandet, og om CO<sub>2</sub> i det hele taget bliver nede i feltet. Her må man så erindre sig, at selvom olien er forblevet i feltet i mange millioner år har menneskelig aktivitet nu medført, at der er ca. 1.000 borehuller igennem seglet over oliereservoiret - er de tætte ?

For at besvare disse spørgsmål omfatter IEA/EU Weyburn forskningsprojektet, en overvågning af tilstanden før og efter injektionen af CO<sub>2</sub> blev påbegyndt. Dvs. at man har 'kortlagt' feltets mineralogi, grundvandsgeokemi og fordeling af jordgasser før og efter CO<sub>2</sub>-EOR operationens start. Man har således logget både oliebrønde, grundvandsbrønde og indsamlet overfladegasprøver. Indtil nu er der ikke konstateret udsivning af CO<sub>2</sub> til hverken grundvand eller jordoverfladen.



Figur 11.  
 (a) En cylindrisk prøve af Midale Marly dolomit som den ser ud før et eksperiment.  
 (b) Efter en måneds  $\text{CO}_2$ -injektion ses der især i indløbsenden af prøven tydelig opløsning af bjergarten. Bemærk de små huller fra opløste mineraler. Der observeres også en stigning i prøvens porøsitet og permeabilitet under strømningseksperimentet. Prøvens diameter er 2,5 centimeter.  
 (c) Scanning elektron mikroskop billedet viser en typisk Marly dolomit med veludviklede dolomitkrystaller (do) samt lidt accessorisk alkalifeldspat (af) og pyrit.  
 (d) Efter  $\text{CO}_2$ -injektion er dolomit-krystallerne markant ætsede i indløbsenden, med en karakteristisk udvikling af udhulede krystaller. (c) og (d) er i samme skala (GEUS Kerne Laboratorium, 2003).



Fra europæisk side er der især fokuseret på sikkerheds- og langtidseffekterne af  $\text{CO}_2$ -deponering. Ved den engelske geologiske undersøgelse BGS er der i autoklaver udført reaktionsforsøg mellem prøvemateriale fra feltet, vand og  $\text{CO}_2$  ved højt tryk i op til 6 måneder. Ved GEUS er der udført strømningseksperimenter i kerneholdere i op til 40 dage ved samme tryk- og temperaturbetingelser som i de engelske forsøg. Resultaterne af disse forsøg viser, at calcit og dolomit opløses under indflydelse af  $\text{CO}_2$ -holdigt formtionsvand. Dette sker især i den ende af prøven, hvor der tilføres frisk  $\text{CO}_2$ -mættet formtionsvand, figur 11.

Mineralogiske, petrofysiske (porøsitet og permeabilitet) og geokemiske data fra de danske og engelske undersøgelser er leveret videre til den franske geologiske undersøgelse BRGM, der har benyttet data som input i en geokemisk simulator, der kan beskrive opløsning og udfældning af mineraler flere tusinde år frem i tiden. De første resultater af den geokemiske modellering viser, at en stor del af den injicerede  $\text{CO}_2$  opløses i formationsvandet i reservoiret. Ud over opløsning af karbonatmineraler finder der også genudfældning sted af nydannede mineraler som gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) og dawsonit ( $\text{NaAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ). Derimod reagerer silikatmineraler som kvarts og alkalifeldspat kun langsomt og i ringe omfang.

## ORDFORKLARING

**Ansamlingsfasen:** Den tidlige periode i Jordens historie, hvor planeten via sit tyngdefelt tiltrækker stof fra den primitive solsky, opbygger sin nuværende størrelse og temperaturen falder, således at der kan dannes krystalline bjergarter, og der kan fastholdes en atmosfære.

**Aquifer:** Et vandførende lag i undergrunden hvor vandet kan flyttes (strømme) momentant.

**Dolomit:** Betegnelse for en bjergart der hovedsagelig består af mineralet dolomit,  $\text{Ca}_x\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ .

**Gas-kondensat:** Betegnelse for et felt der indeholder både en gasfase og en letflygtig kulbrintefraktion på væskefase under de tryk og temperaturforhold, der hersker i feltet.

**Gassifikation:** Industriel proces, hvor der under opvarmning af kul (i en iltfattig atmosfære) kan fremstilles gas (hovedsagelig methan) syntetisk benzin, brint og kulmonoxid ( $\text{CO}$ ).

**Logning af borehuller:** Registrering af fysiske egenskaber i de gennemborede bjergartsformationer der udføres med en avanceret stak af sonder, der langsomt trækkes op gennem borehullet.

**Permeabilitet:** Udtryk for et porøst materiales evne til at transportere gas eller væske, når der opstår en trykforskel (trykgradient) hen over materialet. Permeabiliteten er (under visse betingelser) en stofkonstant, der angives i  $\text{m}^2$  eller i Darcy,  $1\text{D} = 10^{-12} \text{m}^2$ .

**Porøsitet:** Næsten alle bjergarter indeholder hulrum (porer) mellem mineralkornene eller i glasfasen (hvis det drejer sig om lavaer). Porøsiteten er et mål for det volumen, der består af porer i forhold til hele bjergartsprøvens volumen. Porøsitet angives som en brøk eller en procent.

**Residenstid:** Den gennemsnitlige tid et atom eller molekyle opholder sig i atmosfæren.

**Røggas:** Betegnelse for den røg der udledes via skorstenen i et kraftværk eller andet fysisk-kemisk procesanlæg; indeholder fortrinsvis  $\text{CO}_2$ , men også  $\text{SO}_2$  og  $\text{NO}_x$  er tilstede.

**Superkritisk:** Under bestemte tryk og temperaturforhold forsvinder grænsefladen mellem  $\text{CO}_2$  væske og gas, og  $\text{CO}_2$  siges at være i superkritisk tilstand - det er hverken en gas eller en væske, men besidder nu nogle fysiske egenskaber, der kan siges at være karakteristiske for begge tilstandsformer.

Anmeldelse:

## Tyrannosaurerne, Kridttidens superrovdyr

Per Christiansen

Forlaget Carlsen, 64 sider i stort format,  
pris: 239 kr.

Tyrannosaurerne og i særdeleshed *Tyrannosaurus rex* er nogle af de mest berømte dinosaurer der findes. De har været hovedskurken i utallige populærvidenskabelige bøger og tv-programmer, oftest akkompagneret af dramatiske lydeffekter og en speaker, der med dommedagsstemme fortæller om disse gigantiske frådende dræbermonstre.

Også inden for den seriøse del af videnskaben har tyrannosaurerne altid haft en helt speciel position. De har givet ophav til utallige ophedede debatter, der næsten har haft karakter af en regulær videnskabelig skyttegravskrig, hvor de implicerede parter har brugt mere tid og energi på at bekæmpe hinanden end på at forske i, hvordan dyrene egentligt har fungeret. Men hvad er sandheden omkring tyrannosaurerne, hvad var det for nogle dyr, hvad var deres slægtskab med andre dinosaurer, og hvor meget ved vi egentligt om, hvordan de levede. Svarene på alle disse spørgsmål har zoolog Per Christiansen samlet i denne, sin tredje danske bog om dinosaurer.

Umiddelbart ligner forsiden til bogen enhver anden populærvidenskabelig dinosaurbog med sit nærbillede af et stort tyrannosaur-tandsmil. Men det skal man ikke lade sig narre af. Selvom hele bogen er holdt i et letforståeligt sprog, så er det den nyeste og mest opdaterede viden om tyrannosaurerne, der bliver præsenteret her.

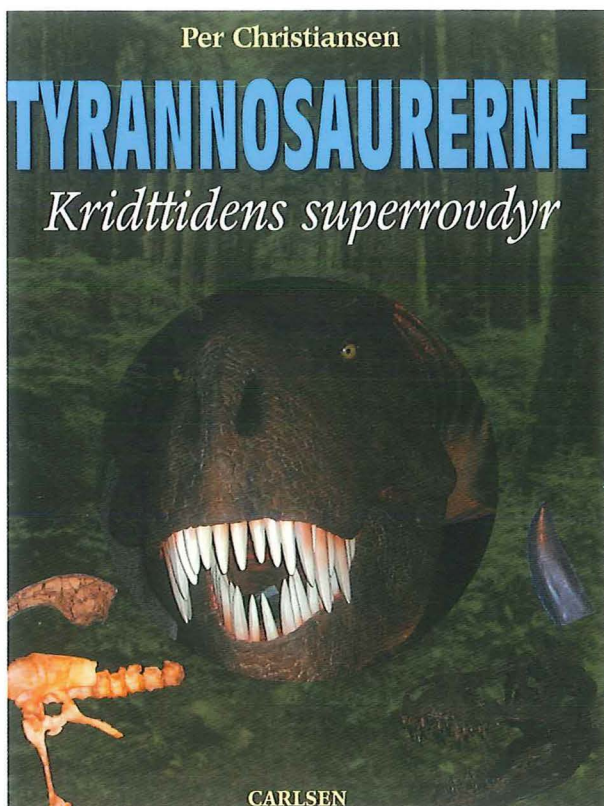
Første kapitel giver en bred historisk introduktion til rovdinosaurerne og deres indbyrdes slægtskab. Dernæst følger et kapitel om de tidlige tyrannosaurer, der levede i starten af Kridttiden og var relativt små og gracile dyr på 5-6 meters længde. I næste kapitel kommer vi videre til de avancerede former fra slutningen af Kridttiden, hvor tyrannosaurerne udviklede sig til det største og mest massive rovdyr, der nogensinde har gået på jorden, *Tyrannosaurus rex*. Netop *Tyrannosaurus rex* har været genstand for meget videnskabelig mytedannelse med en anslåede vægt på 7 tons, et enormt hoved med 20 centimeter lange tænder, ekstremt reducerede arme, der ikke engang kunne nå op til munden og en kort massiv krop. Netop *Tyrannosaurus rex*'s størrelse og massive bygning har været

årsag til, at nogle grupper af palæontologer har ment, at den ikke kunne have været en aktiv jæger, da den var for stor til at kunne løbe, og derfor måtte have været ådselsæder. Argumentet med, at den på grund af sin størrelse ikke har kunnet løbe, er måske rigtig nok, men derfor kunne den sagtens stadig være en aktiv jæger, da dens benlængde gjorde den i stand til at gå med en hastighed på omkring 40 kilometer i timen.

Selvom denne bog repræsenterer den nyeste viden omkring tyrannosaurerne, sker der hele tiden nye fund, der gør, at man løbende må ændre sit syn på dyrene. I bogen diskuteres, om hvorvidt tyrannosaurerne har haft fjer ligesom mange af de rovdinosaurer, de er tæt beslægtet med. Samtidig med at bogen blev udgivet, blev dette spørgsmål besvaret, da der i tidsskriftet *Nature* blev publiceret en artikel om en tidlig tyrannosaur, hvor der var bevaret hårlignende fjeraftryk på halen og dele af kroppen.

Bogen er flot illustreret med meget farverige tegninger af den spanske palæokunstner Luis Rey, der også har illustreret Per Christiansens tidligere bøger. Derudover er der en mængde af præcise detailtegninger af kranier og knogler, der forklarer forskellene på de forskellige typer af tyrannosaurer. Denne bog henvender sig til alle der er 'bidt' af dinosaurer, og som vil have god saglig viden præsenteret på en populær og letforståelig måde.

Jesper Milån



# DANEKRÆ - ENDNU ET FLOT FOSSIL

Niels Bonde og Sten L. Jakobsen

I sidste nummer af VARV (3-04) beskrev Niels Bonde og Sten L. Jakobsen en udvalgt række fossiler, som er blevet erklæret Danekræ. Af pladsmæssige grunde kunne vi desværre ikke bringe nedenstående med et danekræ fra Kvartærtiden (red.)

## **KVARTÆRTIDENS PATTEDYR:**

I Eem mellemistiden for ca 120 – 130.000 år siden levede der sandsynligvis mennesker i Danmark. Det ses af fundet af dådyrknogler (fra Hollerup nær Langå), der tilsyneladende er spaltede for at komme til marven. Menneskene selv har man ikke fundet rester af, de må have været neanderthalere. Skovene indeholdt de samme træarter som nu. Dog indgik også gran, der ikke har indfundet sig naturligt efter sidste istid. Der var et rigt dyreliv. Foruden dådyrknoglerne er der fundet rester af kronhjort samt skovelefant og skovnæsehorn, der begge uddøde under sidste istid. Desuden kendes spor af bæver i form af stammer med gnavespor, ligesom visse omlejrrede fund af steppebison og kæmpehjort kan stamme fra Eem.

Af de mere end 150 rester af danske mammuter, mest kindtænder, er der dateret ca. 1/10, langt de fleste til den sidste istid, Weichsel, mens nogle få er ældre end kulstof-14 metodens formåen, altså over 40.000 år gamle. Ganske enkelte kan være omlejret endda fra næstsidste istid, Saale, dvs. over 130.000 år.

I Weichsel lå det sydvestlige Jylland foran isranden selv under det kraftigste fremstød af gletscherne for omkring 20.000 år siden. I det meste af Istiden var hele Danmark imidlertid isfrit, og landet var en del af 'mammutsteppen', som strakte sig hundredvis af kilometer syd for isranden. Fund af knogler og tænder viser, at mammut, uldhåret næsehorn, kæmpehjort og steppebison levede her, fire arter, som siden er uddøde. Også vildhest, moskusokse, ren og saiga-antilope hørte med til dyrelivet. Flere fragmenter af disse dyr er blevet erklæret danekræ.

Dyrene har sandsynligvis været jaget af ulv, jærv, løve, bjørn og menneske. Dog har ingen af disse efterladt sig spor i de danske aflejringer. Mammutterne uddøde for omkring 10.000 år siden og som så mange andre store pattedyr verden over ved afslutningen af istiden og overgangen til 'nutiden' (Holocæn). Dateringer har dog vist, at dværgformer af mammut på store øer nord for Sibirien er så unge som ca 4.000 år.

## DK 214. KINDTAND AF MAMMUT

*MAMMUTHUS PRIMIGENIUS.*

Løsfund på Kelstrup Strand ved Haderslev.

Alder: Sandsynligvis næstsidste istid (Saale), over 130.000 år.

Finder: Kim Toudal, Haderslev, 1997.



Tanden, der er 32 centimeter lang, er fundet løst på stranden neden for en klint med aflejringer fra næstsidste og sidste istid. At dømme efter leret, der sad på tanden, har den været indlejret i moræne fra næstsidste istid. Blandt de næsten 100 kendte fund af mammuttænder fra Danmark er denne den mest komplette og blandt de allerældste. Muligvis har den været beskyttet af den omgivende kæbeknogle indtil kort tid før, den blev indlejret i gletcheren, som bragte morænen hertil.

## H.C.Ørsted medaljen i bronze tildelt lektor Erik Schou Jensen

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) besluttede i forbindelse med sit 180 års jubilæum, at tildele Erik Schou Jensen H.C.Ørstedmedaljen i bronze for hans mangeårige kreative formidlingsindsats for naturvidenskab.

Erik Schou Jensen har siden 1966 virket som lektor først ved Institut for almen Geologi og siden 1981 ved Geologisk Museum, begge Københavns Universitet. Begge steder har han været en værdsat underviser og har gennem årene desuden formidlet geologien og den bagved liggende naturvidenskab ved en lang række populære foredrag over hele landet og gennem flere mindre lokaludstillinger f.eks på Mors og Bulbjerg. Han har gennem de sidste 25 været underviser på Folkeuniversitet i København, Århus, Aalborg og Odense samt ved Folkeuniversitetscentret på Skærum Mølle. Han har ligeledes medvirket i adskillige radio- og fjernsynsprogrammer.

Han har som leder af Skole- og informationstjenesten ved Geologisk Museum været ansvarlig for rundvisninger af talrige skoleklasser og andre grupper i Museet og har organiseret museets populære foredragsserie samt for museets publikum ledet talrige søndagsekskursioner rundt om på Sjælland og i Skåne. Han har gennem sit virke ved Geologisk Museum været den drivende kraft bag udstillinger som 'Hvad er salt i grunden' (1981), 'Vandrende kontinenter' (1985), 'Fra stjernestøv til Kontinent' (Grønlands geologi 1993), 'Vin og Geologi' (1996) samt 'Olie og Naturgas i Nordsøen' (1982 & 2003). Desuden har han medvirket ved etableringen af 'Danmark i Dybet' (2000).

Ud over disse aktiviteter har Erik Schou Jensen i de sidste 21 år arrangeret adskillige geologiske studierejser til Norge, De Canariske Øer, Kreta og Santorini samt siden 1995 ledet 2 geologiske minikrydstogter årligt til både Syd- og Nordvestgrønland.

*SNU's præsident Dorthe Olesen overrækker Erik Schou Jensen H.C.Ørsted medaljen på Eksperimenterium i Hellerup 14. august 2004.*

