

VARV

NR. 2 BLADET MED DE ÆLDSTE NYHEDER 1980



NEJ - DET ER IKKE "THREE MILE ISLAND" I USA, MEN ET KRAFTVÆRK I TOSCANA, ITALIEN, HVOR DEN VULKANSKE VARME FREMBRINGER ELEKTRICITET. AFFALDSPROBLEMER I FORBINDELSE MED ATOMKRAFT - ER UNDERGRUNDENS AFLEJRINGER AF STENSALT ET SIKKERT DEPOT FOR RADIOAKTIVT AFFALD ? DET LYDER SÆRT, MEN NU KAN USYNLIGE GRUNDEVANDSFØREKOMSTER AF GRUNDEVAND SPORES FRA LUFTEN. VAR DE ØVRE JORDLAG FROSNE, DA KVARTÆRTIDENS ISMASSER NÅEDE FREM TIL DANMARK ? - OG HVORLEDES OPSTOD DE FØRSTE FLERCELLEDE DYR ?



Af forskellige grunde er der desværre kommet forsinkelser i fremstillingen af nr. 2 - redaktionen beder om overbærenhed.

Stevns Klint besøges hvert år af mange turister - og de turister, som er interesserede i geologien, kan nu for 10 kr. få et dejligt hæfte om klintens geologi, skrevet af Søren Floris. Hæftet, der indeholder mange tegninger af de almindelige forsteninger, kan købes på Stevns Museum, Højerup (åbent kl. 12 - 18, dog ikke mandage).

VARV vil gerne formidle kontakt mellem danske og svenske amatør-samlere af mineraler, bjergarter og forsteninger. Interesserede kan bare indsende et brev eller et postkort med navn, fuldstændig adresse (og evt. telefonnummer) - og husk at fortælle om din specielle samlerinteresse. Hvem ved, en god kontakt kan give muligheder for at bytte - eller måske fælles indsamlingsture.

VARV

Adresse: Tidsskriftet VARV, Geologisk Centralinstitut, Øster Voldgade 10, 1350 København K. Telefon: 01-11 22 32.

Redaktion: Valdemar Poulsen (ansvarshavende), Erling Bondesen, Asger Berthelsen, Erik Stenestad, Steen Sjørring, Sven Laufeld.

VARV udkommer fire gange om året. Prisen er 38 kr. i abonnement. Abonnement tegnes ved indsendelse af beløbet til VARV, postgiro 9 06 88 80.

Alle Henvendelser vedrørende adresseforandring og fejl ved bladets levering bedes rettet til postvæsenet.

© 1980 VARV. Eftertryk af tekst og billeder kun efter tilladelse.

DET "LEVENDE" SALT

af Eckart Håkansson

Gennem en del år har stensaltforekomster overalt i verden været anset for en af de bedste muligheder for varig oplagring af høj-radioaktivt affald fra atomkraftværker og produktion af kernevåben. Efterhånden som den danske debat om indførelse af atomkraft er blevet mere intens, er deponeringsproblemerne - og hermed de danske stensaltforekomster - blevet stedse mere påtrængende. Med regeringens klart formulerede krav om, at højaktivt affald i givet fald skal kunne deponeres sikkert og varigt inden for landets grænser, er de danske stensaltforekomster nu centralt placeret i det politiske liv.

Men lad os først vende os mod geologien.

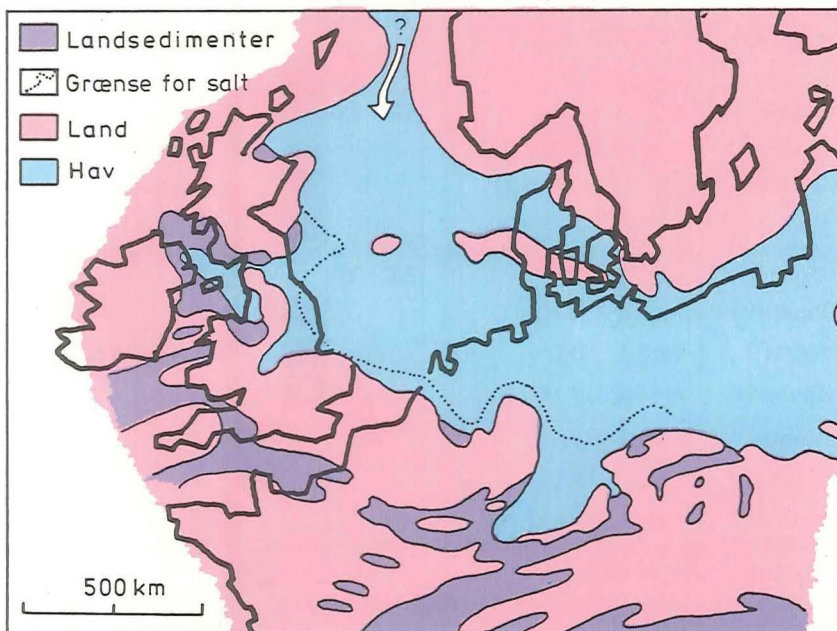
Saltbjergarternes mineraler

Karakteristisk for saltbjergarterne (såkaldte evaporitter) er, at de overvejende består af mere eller mindre letopløselige mineraler, som er udkrystalliseret ved en inddampningsproces. Vigtigst er selvfølgelig stensalt (NaCl), men alt i alt er der fundet godt 40 forskellige mineraler i de danske saltforekomster. Nedenstående tabel giver en oversigt over nogle af de vigtigere:

MINERAL.	KEMISK FORMEL	VÆGT-FYLDE	OPLØSELIG LET→TUNG	ANDRE EGENSKABER
STENSALT	NaCl	2,1 - 2,2		Plastisk
Sylvin	KCl	1,9 - 2,0		Plastisk
Bishofit	MgCl ₂ · 6 H ₂ O	1,6		Henflydende
CARNALLIT	KCl · MgCl ₂ · 6 H ₂ O	1,6		Henflydende
Tachydrit	CaMg ₂ Cl ₆ · 12 H ₂ O	1,6		Henflydende
ANHYDRIT	CaSO ₄	2,8 - 3,0		Henflydende
Glaubersalt	Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O			
Kieserit	MgSO ₄ · H ₂ O	2,5		
Epsomit	MgSO ₄ · 7 H ₂ O	1,7		
Langbeinit	K ₂ Mg(SO ₄) ₂	2,8		
Polyhalit	K ₂ Ca ₂ Mg(SO ₄) ₄ · 2 H ₂ O	2,7		
Kainit	KCl · MgSO ₄ · 3 H ₂ O	2,1		
Boracit	Mg ₃ ClB ₇ O ₁₃	3,0		
CALCIT	CaCO ₃	2,7		
DOLOMIT	CaMg(CO ₃) ₂	2,8-2,9		

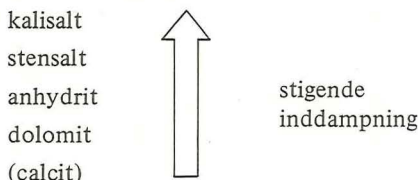
Dannelse af salt

Saltet i den danske undergrund er dannet både i Perm- og Triasperioden, men umiddelbart er det ikke særlig nemt at se forskel. For nemheds skyld vil vi her koncentrere os om saltet fra Øvre Perm, hvor de mægtigste lag blev afsat. De klimatiske og geologiske forhold omkring Danmark i sen Perm-tid, da de mægtige forekomster af stensalt blev afsat, var meget anderledes end de forhold vi kender i dag. Vi må forestille os, at aflejringen er foregået i et stort, mere eller mindre afsondret og lavvandet havbassin (fig. 1). Klimaet i området har været varmt og tørt, og rimeligvis ørkenagtigt hele vejen rundt om bassinet - herom vidner f.eks. udbredte flyvesandsaflejringer i England vest for bassinet. I Sverige, øst for bassinet, findes ikke jævnaldrende aflejringer, og nedbrudt materiale herfra må være skyllet ud i det danske bassin. Da klimaet bevirkede en kraftig fordampning fra havoverfladen, steg saltholdigheden efterhånden i det nogenlunde lukkede bassin, og det medførte snart en faunaændring, idet færre og færre dyrearter kunne tåle det efterhånden meget salte vand. Ganske som i tilsvarende situationer idag var det især bryozoaer (mosdyr), der holdt længst ud - men med stadigt stigende koncentration af opløste salte blev alle former for liv til sidst fordrevet. Som sidste led i udviklingen nåede havvandet ved inddampning mætningspunktet, og udviklingen og den kemiske udfældning (udkrystallisation) af saltminerale begyndte.



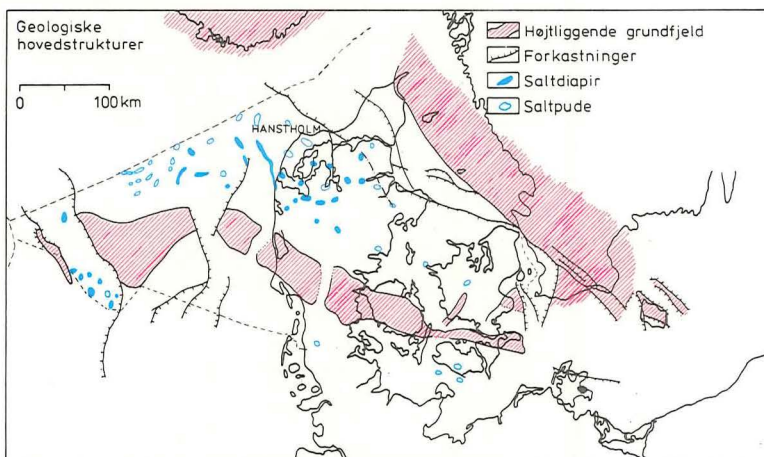
Figur 1. Nordsøbassinet mod slutningen af Perm perioden.

Almindeligt havvand indeholder en stor mængde opløste stoffer, og ved indampningsprocessen udkrystalliseres stofferne i en rækkefølge, der nøje afspejler de opløste stoffers koncentration og opløselighed. Det gjaldt også i Perm-tiden, hvor man i hver af de ialt 5 indampningsfaser finder en lagfølge af mineraler med de tungest opløselige salte nederst og de lettest opløselige øverst:



Helt så skematisk foregik det dog ikke altid i Permhavet. Dels finder man ofte en mere uregelmæssig vekslen i mineraludfældningen, og dels er der ofte markante afbrydelser og gentagelser af dele af den typiske lagfølge. Årsagen er ændringer i koncentrationen af saltopløsningerne i Permhavet - enten på grund af kortvarig tilførsel af ferskvand (regn, floder) eller på grund af fortynding ved tilførsel af frisk havvand.

Saltseriens tykkelse - op mod 1000 m Permsalt i Danmark - fortæller umiddelbart, at havvandet i bassinet må være blevet fornyet mange gange i løbet af denne periode. Der må derfor jævnligt have været åbnet en forbindelse ud til verdenshavene, men man ved ikke meget om, hvordan den har fungeret. Bedømt ud fra den fortidige geografi kan åbningen have ligget i den nordlige del af Nordsøen (fig. 1).



Figur 2. Hovedtrækkene i opbygningen af den danske undergrund (J. Baartman, DGU).

Som resultat af aflejringsforholdene gennem den yngre del af Perm-perioden findes nu op til 1000 m mægtige saltlag i den danske undergrund. Siden deres dannelse er aflejringerne gradvis sunket længere ned, og blev samtidig dækket af voksende yngre aflejringer. Derfor forekommer saltlagene nu i dybder helt ned til 8 km centralt i aflejringsbassinet nord for Ringkøbing-Fyn Ryggen.

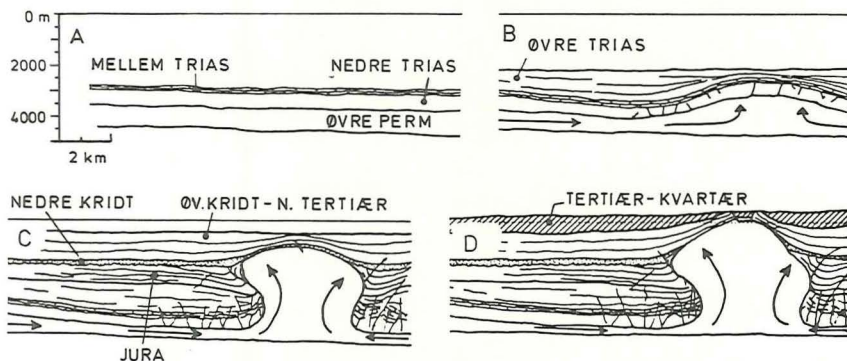
Dog er det nok kun en mindre del af Saltserien, der idag ligger uforstyrret i dybet i nogenlunde vandrette lag. Derfor er de bedst kendte saltforekomster også de såkaldte salt-diapirer ("saltskorstene"), hvor saltet er skudt op og er kommet tæt op til jordoverfladen (fig. 3). Med et tværsnitsareal op til 50 km og en total højde på måske 5-6 km er det enorme strukturer, der præger undergrunden på markant vis.

Men hvordan opstår sådanne salt-diapirer - og hvornår? Blot to helt simple egenskaber ved nogle af de mest almindelige saltmineraller er nok til at forklare saltstrukturens opståen.

Næsten alle dominerende mineraler i saltaflejringerne har en vægtfylde, der ligger betydeligt under den "normale" for mineraler som kvarts og feldspat. Da samtidig nogle af saltminerallerne - især stensalt - deformeres plastisk under selv ret ringe tryk, bliver saltlagenes stabilitet stærkt påvirket af belastningen fra de overliggende bjergarter.

Trykket fra dæklagene er naturligvis øget ganske gradvis, i takt med stigende tykkelse af dækket, men selv efter at trykket var blevet stort nok til at deformere saltet, måtte der en eller anden påvirkning til for at bryde den tyngdemæssige uligevægt med tungere aflejringer over det lette salt.

Det er påfaldende, at flere salt-diapirer ligger oven over forkastninger (fig. 2) Pludselige forskydninger langs forkastningerne har derfor utvivlsomt spillet en væsentlig rolle som "aftrækker" for diapir-dannelsen. Hastigt vekslende tryk-påvirkninger inden for geologisk set korte tidsrum - f.eks. i forbindelse med isbelastning i Kvartærtiden, har formodentlig ligeledes spillet en rolle.



Figur 3. Den formodede udvikling af Vejrum strukturen (efter I. Madirazza).

Hvor den ustabile ligevægt blev forstyrret, skød saltet - på grund af lav vægtfylde og udtalt plasticitet - op og kunne efterhånden flere steder danne en diapir, samtidig med at salt ved basis af strukturen "strømmede" til fra siden. På vej op puffede saltet selvfølgelig dæklagene op (fig. 4 B) og efterhånden som påvirkningen blev mere koncentreret, blev dæklagene også gennemtrængt, (fig. 4 C-D). På grund af saltets plastiske egenskaber er deformationen inde i selve diapiren umådeligt mere kompleks end den brud-deformation, den forårsager i de omliggende lag.

Imidlertid er saltbjergarterne fundstændig "døde" og "ugennemtsigtige" for visse geofysiske undersøgelser, og det har vist sig noget nær umuligt at få et indtryk af diapirenes indre opbygning ad traditionel geofysisk vej. Tilbage er kun at tage dyre borekerner op for at få noget som helst at vide om de indre strukturer. Derfor er det hidtil også kun en enkelt dansk salt-diapir, der er undersøgt blot nogenlunde detaljeret.

Efterhånden som salt-diapirerne under opskydningen når op i niveauer, hvor der er bevægelse i grundvandet, vil de letopløselige mineraler ret hurtigt blive opløst og transporteret væk. Følgelig har de fleste høje salt-diapirer udviklet en såkaldt kalot ("caprock"). Kalotten, som især består af anhydrit og gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, omdannet fra anhydrit ved vandoptagelse) danner en stedvis højporøs bjergart, hvis tykkelse bl.a. afhænger af den opadgående saltbevægelses hastighed og grundvandsstrømningen. Enkelte gange i løbet af tilsvarende nordvesttyske saltstrukturers udviklingshistorie har opstigningshastigheden sejret over opløsningsprocessen, med det resultat, at saltet er nået helt op til jordoverfladen. Om en lignende udvikling også har fundet sted nord for Ringkøbing-Fyn Ryggen, vides endnu ikke.

I forbindelse med beregningen af salt-diapirernes opskydningshastighed er det vigtigt at kende deres dannelses-tidspunkt og -historie. Således har salt-diapirer over hele verden tilsyneladende gennemløbet det samme karakteristiske mønster - blot til forskellig tid (fig. 3).

Først opstår en meget bred og flad bule (pude) i saltlagene, som ganske enkelt løfter de overliggende lag. Derpå sker den egentlige gennemtrængning, idet saltet så at sige skubber de overliggende lag til side. Forløbet synes at være påvirket af større, regionale geologiske hændelser. Således synes flere danske salt-strukturer at have gennemløbet "bule"-stadiet i Jura- og den ældre del af Kridttiden, medens den egentlige gennemtrængningsfase først synes at være begyndt i yngre Kridt og ældre Tertiær. Det kan rimeligvis sættes i forbindelse med den Alpine foldning, som har præget den geologiske udvikling over store dele af jordkloden i netop dette tidsrum. Den strukturelle uro virker ikke alene som "aftrækker" til saltbevægelserne, men har også påvirket aflejringsforløbet, idet lag fra yngre Kridt og ældre Tertiær er mangelfuldt udviklet ovenpå salt-diapirerne.

Hertil kommer den kolossale og relativt pludselige ydre påvirkning, som Kvar-tær-tidens gletschere utvivlsomt må have påført specielt de danske salt-diapirer. Der findes således særligt mange større partier af undergrunden løsrevet som flager, umiddelbart nord og øst for salt-diapirerne på grund af gletscherisens tryk, hvilket kunne tyde på, at salt-diapirenes dæklag har raget op som bakker i istiden.

SALTSTRUKTURER og RADIOAKTIVT AFFALD

Som antydnet i indledningen er saltet - og da især salt-diapirerne - stærkt i søgelyset som mulige slutdeponeringssteder for højradoaktivt A-affald. Med hvad er det egentlig der skal deponeres ? - og hvad skal deponeringen sikre imod ?

Det højaktive affald, man vil søge at skaffe sig af med på denne måde, er kort fortalt en blanding af talrige radioaktive og umådeligt giftige stoffer. Nedbrydningstiden for mange af stofferne er så lang, at de stadig må betegnes som farlige efter en periode på 100.000 år. Netop de lange tidsrum nødvendiggør et bredere kendskab til de geologiske processer, og derfor er deponeringsproblemerne medvirkende til at understrege den geologiske videnskabs centrale betydning for samfundet.

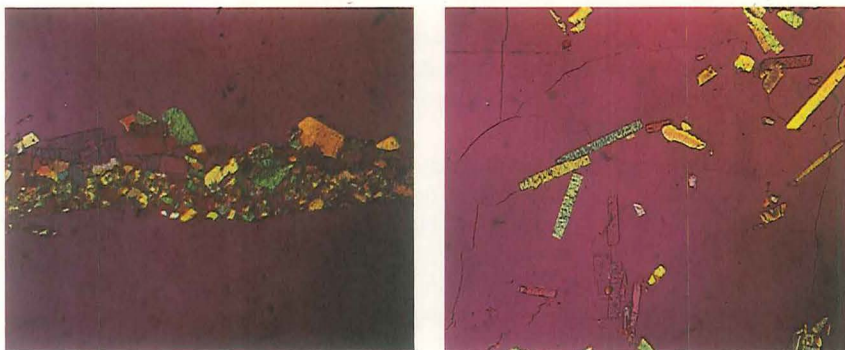


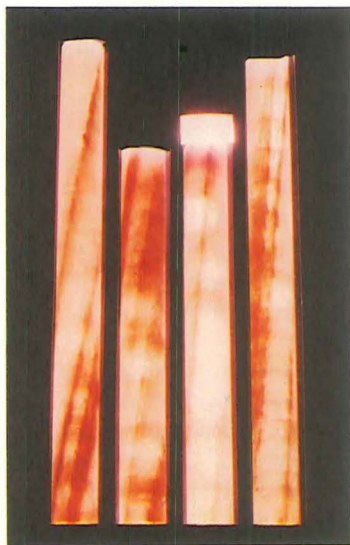
Fig. 4. Tyndslib af saltbjergarter fra Suldrup strukturen. I polariseret lys er stensalt violet, mens de forskelligt farvede korn er anhydrit. Til venstre er anhydritkornene koncentreret i et enkelt lag som oprindeligt udfældet fra havvandet. Til højre ses anhydritkornene spredt på grund af senere deformation af stensaltet (F. Lyngsie Jacobsen, DGU).

På grund af affaldets meget specielle karakter må et helt elementært samfundskrav være, at det højaktive affald ikke under nogen omstændigheder må kunne komme i kontakt med biosfæren - det vil sige levende organismer af enhver art samt de medier, de færdes i eller udnytter på anden vis, heri også inkluderet grundvand og andre underjordiske ressourcer. Nogle deponeringsplaner forudsætter dog en mulighed for genoptagelse af det højaktive affald til eventuelt senere brug. De to muligheder er naturligvis ganske uforenelige, alene af den grund, at menneskeheden - og dermed også fremtidens politikere og måske mindre demokratiske regimer - udgør en naturlig del af biosfæren.

Af de muligheder, der har været overvejet i forbindelse med en eventuel deponering i danske salt-diapirer, opfylder ingen på forhånd kravet om udelukkelse fra biosfæren i mindst 100.000 år.

Den såkaldte "skaktløsning", med anlæg af minegange i toppen af en salt-diapir mere end 500 m under jordoverfladen, giver indlysende adgang til at få fat på affaldet igen, samtidig med at det også giver mulighed for løbende kontrol af deponeringsstedet.

"Dybhulsløsningen", der for tiden synes at være den løsning el-selskaberne foretrækker, går simpelthen ud på at deponere affaldsbeholderne på bunden af et mindst 2000-3000 m dybt borehul i en salt-diapir og så derefter forsegle hullet. Denne deponeringsform må betragtes som endelig i den forstand, at den vil udelukke en genoptagelse af affaldet - men den forhindrer desværre også enhver forebyggelse og reparation af uforudsete beskadigelser af depotet i dybet.



Figur 5. Borekerner af salt fra Suldrup strukturen fotograferet i gennemfaldende lys. De rødlige lag (hæmatittrige) fremhæver den stejle hældning (F. Lyngsø Jacobsen, DGU).

Men tilbage til stensalt og årsagerne til disse forekomsters popularitet i denne sammenhæng. Ud over at saltet tilsyneladende forekommer i store, sammenhængende masser, er det især to egenskaber ved mineralet stensalt, der er værdsatte. For det første har stensalt en relativt høj varmeledningsevne, og det er en klar fordel, idet det højaktive affalds stråling producerer en vis mængde varme. For det andet er stensalt plastisk, således at eventuelle sprækker i saltet automatisk vil lukke til ved flydning. Med blandt andre de egenskaber in mente har man derfor opstillet følgende idelle krav til et slutdepot for højaktivt affald i en salt-diapir:

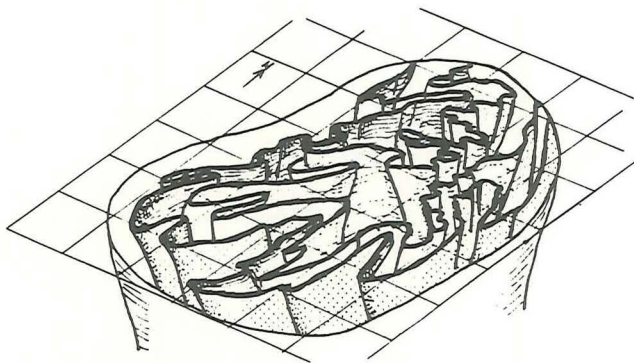
1. Forekomst af rent stensalt i mindst 200 m i alle retninger fra deponeringsstedet.
2. Salt-diapiren skal kunne bedømmes til at ville være stabil inden for en periode på mindst 100.000 år.
3. Deponeringsstedet skal være omgivet af flere hydrologiske barrierer, der ligeledes skal være stabile i mindst 100.000 år.

Det første krav sigter naturligvis på at sikre et tilstrækkeligt stort bjergartsvolumen med gunstige egenskaber. Ikke alle "urenheder" er imidlertid lige ødelæggende for de egenskaber, og det er især tre ting man må være sig for - nemlig forekomst af væske, gas og ustabile mineraler. Gas og væske (i form af stærkt korroderende, mættede saltopløsninger) er specielt generende, idet de er mobile, og derfor kan sprede radioaktivt affald fra en eventuel læk i depotet. Næsten alle saltforekomster indeholder noget væske og gas, der for det meste findes som små "libeller" inden i mineralkornene. Hvordan og hvor hurtigt de små væske- og gasindeslutninger kan vandre i selve saltmassen er hidtil kun skønnet ud fra laboratorieforsøg. Imidlertid synes væskeindeslutningernes vandringshastighed ikke at være bestemt af deres størrelse, men udelukkende af temperaturforskelle, således at selv mikroskopiske indeslutninger vil bevæge sig med en hastighed på op til 10 cm/år i retning mod en varmekilde - her mod det radioaktive affald. Det betyder, at affaldsbeholderne i løbet af nogle år vil være omgivet af en mættet saltopløsning, såfremt saltet i en vis afstand fra beholderne ikke er blottet for selv mikroskopiske væskeindeslutninger. Netop sådanne mikroskopiske væskeindeslutninger er meget almindelige overalt i Danmarks salt-diapirer. Hertil kommer, at større koncentrerede forekomster under højt tryk også er velkendte og flere gange har forårsaget "blow outs" i forbindelse med boringer i de danske salt-strukturer.

Forekomsten af ustabile saltmineraler har desuden direkte indflydelse på væskeindholdet, idet mineralerne vil afgive krystalvand ved temperaturer, der allerede vil opnås ved varmestrålingen fra det højaktive affald. F.eks. fraspalter carnallit alt sit bundne vand ved temperaturer omkring 110°C, og det betyder, at selv tilsyneladende tørre saltforekomster kan blive væskeførende direkte som følge af en deponering.

Nu vil det salte vand - hvad enten det har en oprindelse som krystalvand eller som væskeindeslutning - i sig selv ikke give anledning til korrosion af beholderne, med mindre der også findes fri ilt. At det faktisk er tilfældet, vises af forekomsten af iltede metaller (f.eks. hæmatit, se fig. 5).

Den konkrete påvisning af en tilstrækkelig stor forekomst af tilpas rent stensalt er således en meget problematisk sag. Hertil kommer, at der er al mulig grund til at antage, at samtlige danske salt-diapirer er mindst lige så kompliceret opbygget som Suldrup strukturen (fig. 6), og selv med anvendelse af de mest avancerede geofysiske metoder er det endnu ikke muligt at lokalisere de potentielt generende forekomster af væske, gas og ustabile mineraler imellem de enkelte borehuller. End ikke udbredelsen af de medfoldede ler- og anhydritlag er det muligt at fastslå uden direkte anboring.

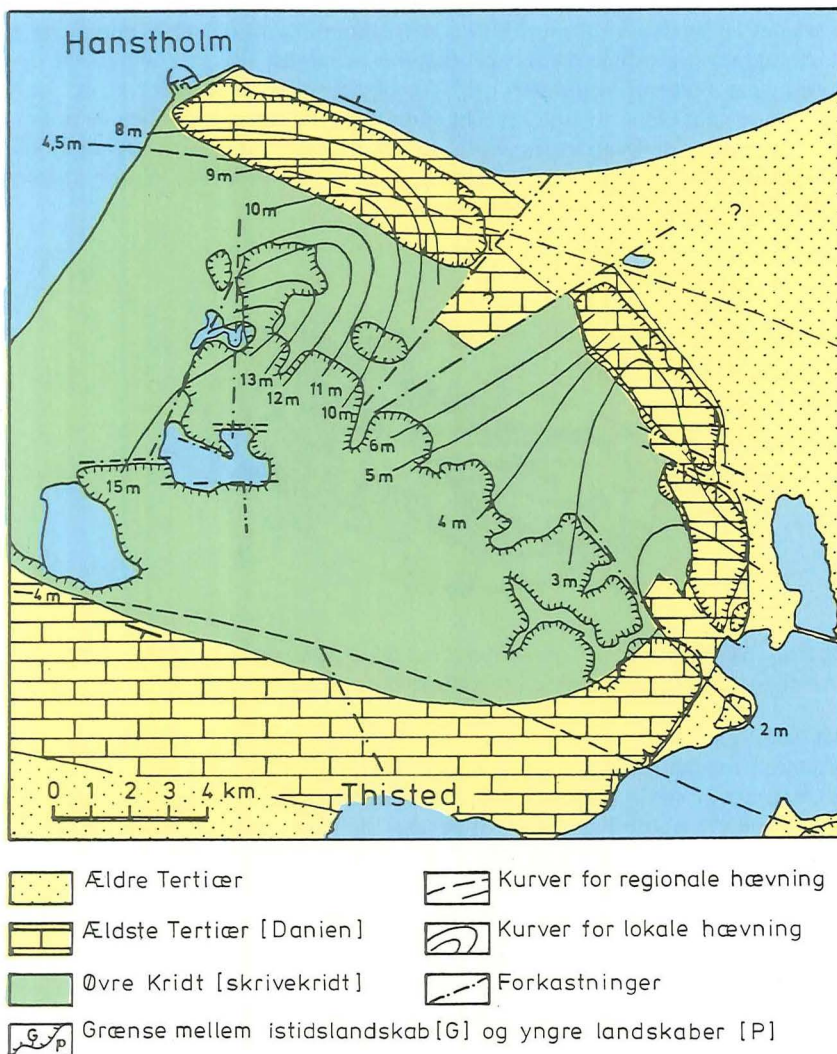


Figur 6. Skematiseret, tredimensional model af Suldrup strukturens opbygning baseret på 12 kerneboringer (efter Richter-Bernburg).

Det andet elementære krav om deponeringsstedets stabilitet igennem hele den periode, hvor det højaktive affald er potentielt farligt, er umiddelbart indlysende. Men det er straks mindre indlysende, hvordan man egentlig kan sandsynliggøre, at en given salt-diapir ikke vil bevæge sig på skadelig vis inden for en sikkerhedsperiode på 100.000 år. Et godt udgangspunkt vil dog være at fastslå, hvor meget bevægelse der har fundet sted igennem de sidste 100.000 år, samt om der har været ændringer i bevægelseshastigheden inden for den periode.

Som antydte tidligere følger opskydningen af saltet meget komplicerede mønstre, der på mange måder kan sammenlignes med de hvirveldannelser, der foregår i en skorsten med varm røg. Bevægelseshastighederne og -retningerne er derfor meget varierende i de forskellige dele af en aktiv salt-diapir. Set "udefra" resulterer summen af strømninger i en vis opadgående netto-bevægelse, som påvirker de ovenfor liggende lag med en intensitet, der også er stærkt afhængig af grundvandets opløsende effekt. Den opskydningshastighed man eventuelt

kan registrere ved jordoverfladen, er derfor under alle omstændigheder et udtryk for en absolut minimumshastighed. De faktiske bevægelsehastigheder inde i saltet er sandsynligvis mindst 10 gange så store.



Figur 7. Geologisk kort over Hanstholm området. Thisted saltdomens bevægelser har indvirket både på de Prækvarter og de Postglaciale aflejringer.

I Danmark har den seneste istids ismasser forstyrret de overfladenære lag så gennemgribende, at kun de sidste 10-12.000 års salt-bevægelser har sat sig egentlige spor i landskabet. For at sporene skal være til nogen nytte i denne sammenhæng, er det imidlertid nødvendigt dels at kunne måle størrelsen af en sådan deformation, dels at kunne fastslå hvor længe deformationen har fundet sted. I virkeligheden er det derfor kun i forbindelse med salt-strukturer, der har påvirket marine, sen- og postglaciale aflejringer, at man vil kunne få blot nogenlunde rimelige fingerpeg om bevægelsens størrelse ud fra almene geologiske metoder, og salt-strukturer, der dækkes af sådanne lag, har vi desværre ikke mange af.

Den dybtliggende Thisted struktur, der befinder sig på overgangsstadiet mellem en pude og en egentlig diapir (se fig. 3), er en af de få strukturer, hvor overfladeundersøgelser har kunnet give en fornuftig indikation. Strukturen overlejres af marine aflejringer fra en havstigning, der skønnes at være ca. 4000 år gammel, og ved at måle deformationen af de tilhørende strandlinier (fig. 7) kan man se, at Thisted-strukturens opadgående nettobevægelse beløber sig til godt 10 m siden da - eller med andre ord ca. 2.5 mm pr. år. Bevægelseshastighederne inde i Thisted-strukturens salt når derfor sandsynligvis op på 25 mm eller mere pr. år.

Bevægelser af denne størrelsesorden må formodes meget hurtigt at opbygge spændinger i det inhomogene salt, og de resulterende forskydninger må kunne få enhver type indkapsling om det højaktive affald til at revne. Hermed vil de stærkt korroderende væsker få direkte adgang til affaldet.

Det sidste krav omhandler et antal hydrologiske barrierer, der - kort fortalt - skal sikre mod udstrømning af radioaktivt forurennet vand til biosfæren. Der kan tænkes flere typer af barrierer. Egentligt vandstandsende lag vil selvfølgelig være det ideelle, men gives der tid nok, er stort set alle danske bjergarter gennemtrængelige for vand, og det er derfor mere kombinationen af de forskellige bjergarters evne til at binde de radioaktive stoffer og deres evne til at opbremse grundvandsstrømmene der har interesse.

Da alt dybtliggende grundvand i Danmark er salt, er der næppe nogen tvivl om, at salt-diapirerne har hydrologisk forbindelse med dette grundvand. Det er derfor især de relativt højtliggende Tertiærtids lerbjergarter, der må tænkes på som hydrologiske barrierer i Danmark, og formodentlig vil de fleste af dem have ganske gode egenskaber til at forsinke det radioaktive materiales vandring mod biosfæren. Men for at fungere tilfredsstillende må de nødvendigvis være fuldstændigt frie for sprækker - også langt ud i fremtiden, hvor påvirkninger fra salt-diapirerne, nye istider eller andre ukendte faktorer kan gribe forstyrrende ind i det nuværende geologiske strukturmønster.

Som en konklusion må vi konstatere, at den øjeblikkelige geologiske viden ikke kan garantere, at de tre kravs ideale fordringer umiddelbart er opfyldt. Et endeligt svar kræver et både omfattende og tidskrævende undersøgelsesprogram.



varm? -- frossen?!

-- LØSNINGEN PÅ EN ISTIDSGÅDE

af Asger Berthelsen

Den amerikanske romanfigur, detektiven Ellery Queen, opklarede engang en gådefuld mordsag ved at stille spørgsmålet: "Varm eller frossen?". En ungkarl var blevet dræbt i sit køkken med "et tungt og stumpt instrument", mens han tilsyneladende ventede på en middagsgæst. Men mordvåbenet var intetsteds at finde!

Ikke før Ellery Queen lukkede op for stegeovnen, så en saftig velstegt lammekølle - og med sin sædvanlige skarpsindighed spurgte sig selv: "Hm, mon den var varm eller frossen, da det skete?".

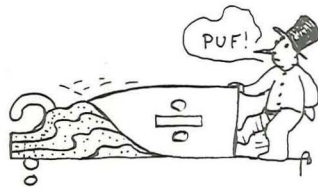
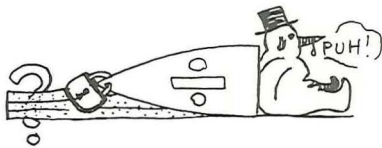
Morderen havde slået værten ned, mens lammekøllen endnu var dybfrossen, og havde så lagt den i ovnen og sat stegeuret i gang. Og ved opvarmningen forvandlede den tunge kølle til en tilsyneladende ufarlig "herreret".

Men hvad har dette med geologi at gøre? Kan geologiske gåder opklares på lignende måde ved at stille spørgsmålet: "Varm eller frossen?". At det faktisk kan være tilfældet, skal der berettes om i det følgende. Eksemplet er naturligt nok hentet fra istidsgeologien. Danske istids-geologer har de seneste år ivrigt diskuteret, om den oppresning og foldning, som istidens gletschere fremkaldte i foran- og underliggende aflejringer, indtraf, mens aflejringerne var optøede og "varme", eller mens de var kolde og permafrosne.

Man skulle umiddelbart tro, at det må være lettere at forskyde og folde varme og ufrosne aflejringer end frosne og stive lag, hvor sediment-kornene bindes sammen af is. Der er da også istidsgeologer, der forfægter den opfattelse, og nogle hævder endda, at lagforstyrrelserne skyldes, at det vandmættede materiale er skredet ud under isens afsmeltning.

Andre istidsgeologer finder det imidlertid vanskeligt at forstå, at hele lagpakker, op til 10-50 m mægtige, har kunnet hænge sammen, mens de blev presset op og forskudt indbyrdes, hvis de ikke - ligesom lammekøllen - var gjort stive ved forudgående dybfrysning - inden de udsattes for istrykket.

Men så foldningerne? Kan de udvikles i stive frosne sedimenter? Det spørgsmål bekymrer ikke tilhængerne af "det kolde istidsmiljø". De henviser blot til, at hvis kolde frosne masser ikke kunne undergå formændringer, så ville selve gletscherne eller isdækkerne ikke kunne have bredt sig fra de skandinaviske fjelde og rykket frem over Danmark, sidst mellem 20.000-14.000 år siden.



At det under visse afsnit af sidste istid har været meget koldt i Danmark, vidner forekomsten af fossile, nu usmeltede, iskiler tydeligt om (se VARV nr. 1, 1979). Men vi finder undertiden også tegn på, at iskiler under mindre kolde tidsafsnit, i de såkaldte "varmetider", er tøet op, inden nye iskiler blev dannet i overliggende og yngre lag. Det viser, at klimaet ikke hele tiden var lige strengt eller arktisk.

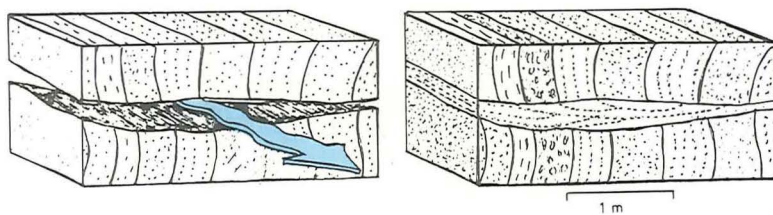
Og dette tager tilhængerne af et "varmt istidsmiljø" naturligvis til indtægt for deres teori om, at forskydningerne og foldningerne indtraf, mens jordlagene var optøede og vandmættede.

Men netop her dukker lammekøllen, eller rettere kilelagene, heldigvis op i den stående diskussion og leverer os beviset for, at de "ugerninger", som kan spores i vore istidslag, ikke blot blev begået af fremrykkende ismasser, men blev forøvet med koldt "overlæg".

Ligesom den nystegte lammekølle i stegeovnen er kilelagene ved første øjekast tilsyneladende uskyldige og lidet interessante dannelser. Deres beviskraft bliver først tydeliggjort ved besvarelsen af spørgsmålet: "Varm eller frossen?".

Kilelag er skive- eller kileformede sand- og gruslegemer, der optræder som meget nær vandrette indlejringer i ældre sand- og gruslag, der viser foldning og forskydninger som følge af istryk. Kilelagene er imidlertid slet ikke, eller kun svagt påvirket af disse forstyrrelser, og de afskærer uden hensyntagen strukturerne i de omgivende lag. Kilelag er oftest under 1 m tykke, og de kan følges fra 5-15 m i vandret udstrækning. De er næsten ligeså sjældne som lammekøller brugt som mordvåben. Kilelag er således hidtil kun truffet på enkelte danske lokaliteter (alle grusgrave), og de er ikke beskrevet fra andre lande.

Skrålejrning og andre strømbetingede aflejringsstrukturer i kilelagene viser entydigt, at kilelagenes sand og grus er blevet afsat af smeltevand, som er strømmet igennem og langs med forskydningsrevner, der er blevet åbnet i isens underlag nær isfronten. Kilelagenes orientering i forhold til lagforstyrrelserne i de omgivende lag viser endvidere, at forskydningsrevnerne dannedes kort efter lagforstyrrelserne, og at deres åbning skyldtes samme ydre kraftpåvirkning - et istryk.



Figur 1. Diagram visende en istrykbetinget forskydningsrevne gennemstrømmet af smeltevand (til venstre), som aflejrer kilelaget (til højre).



Figur 2. Kilelag i lodretstillede grus- og sandlag. Gedebjerg grusgrav nær Kundby, NV-Sjælland. Foto 1969.

De forskydningsrevner, som gav ophav til kilelagenes aflejring kan kun være blevet dannet og holdt åbne (mens gennemstrømmende smeltevand udstøbte dem med sand og grus), hvis de omgivende ældre sand- og gruslag var stivfrosne ! - ellers ville "loftet" over revnen være styrtet ind.



Figur 3. Kilelag (af skrålejret grus) i kippede sandlag. Præstebjerg grusgrav, Møn. Foto 1977.

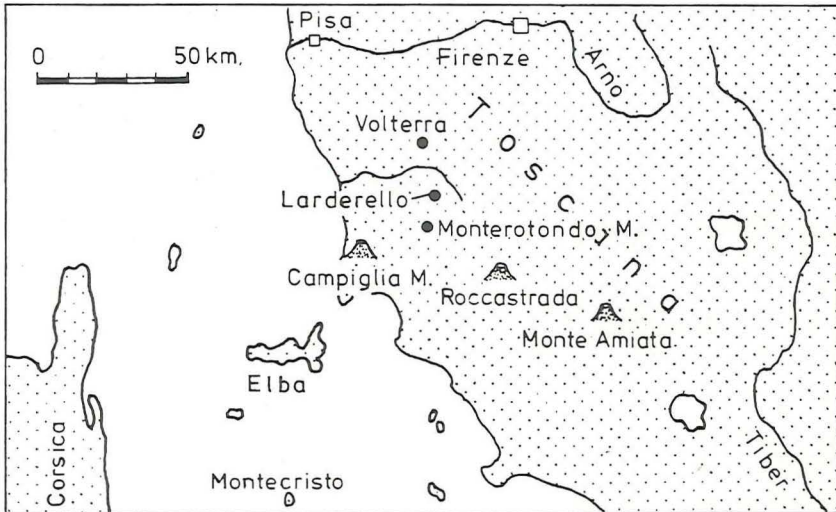
Opdagelsen og tolkningen af kilelagene taler stærkt for, at de sammenskydninger og foldninger, som skiftende isfremstød fremkaldte i aflejringerne foran og under isen, virkelig indtraf, mens isens underlag var permafrossent (helårs-frosset). Sammen med andre iagttagelser tyder forekomsten af kilelag således på, at det varigt frosne jordlag, permafrostlaget, kunne blive flere titals meter, ja over 50, og måske endda over 100 m tykt i Danmark under sidste istid.

Kilelagenes indirekte beretning om et koldt istidsmiljø er et godt eksempel på sandheden i den kendte amerikanske geolog James Gilluly's slogan: De fleste blotninger besvarer kun de spørgsmål, der bliver stillet direkte til dem !

Vulkansk Elforsyning

af Jesper Smidt

Et bælte af vulkanske områder - Campiglia Marittima, Roccastrada og Monto Amiata - strækker sig mod sydøst fra kysten ved Elba ind i Toscana. Længere mod nord i retning mod Volterra ligger det geotermiske felt Larderello i et område uden vulkanske blotninger (figur 1). Her finder man under et dække af



Figur 1. Kort over det sydlige Toscana visende steder, hvor udvinding af geotermisk energi foregår eller er påtænkt.

Kvartærtidens lag 500 meter tykke uigennemtrængelige lag af lerskifer, mergelsten og sandsten fra tidsrummet yngre Jura til Tertiær, se figur 2. Herunder kommer de såkaldte "Toskanske formationer", der overvejende består af porøse og dermed vandgennemtrængelige kalksten med indslag af bjergarter udfældet kemisk under inddampning. Dybere findes sandsten af Trias-alder og opsprækkede kalkstenlag af Kul/Permtidsalder. Nederst ses endelig omkrystalliserede (metamorfe) bjergarter overvejende fra Kultiden. I yngste tid er området hævet godt 600 meter som en efterterve af den foldning, som skabte Alperne og Appenninerne ned gennem Italien.

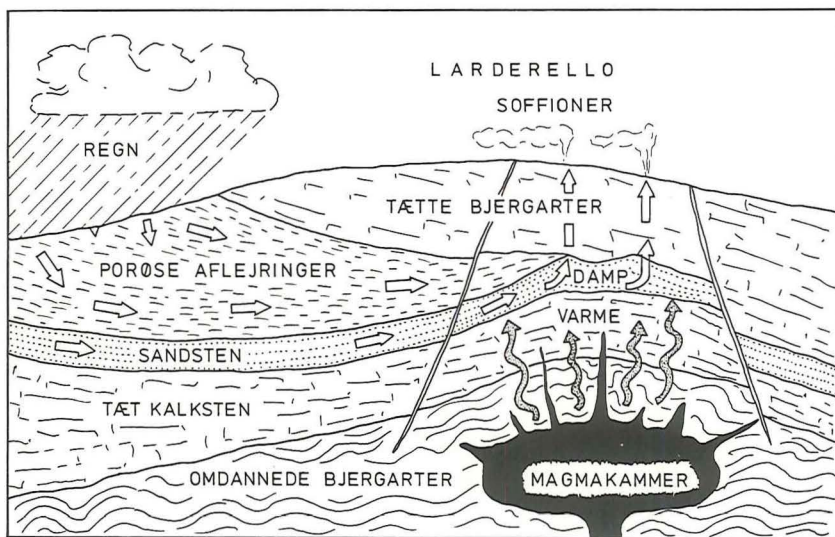
Det geotermiske system i Larderello

I Larderello-området har geofysikerne påvist et større tyngdeunderskud, som sammen med andre faktorer peger på tilstedeværelsen af et vulkansk magma-

kammer i 6-8 km dybde. Det passer også fint med den lokale geotermiske gradient - det vil sige temperaturstigningen indad i Jorden. Ved Larderello stiger temperaturen 30° for hver 100 meters dybde, eller 10 gange så meget som i Danmark/Sverige.

Syd for Larderello, se figur 2, fungerer gennemtrængelige dele af de Toskanske formationer som opsamlingssteder for nedbøren. Vandet trænger ned, og på grund af opvarmningen fra det dybtliggende magmakammer skabes der en vand-cirkulation: vand fra overfladen trænger ned, varmes op og stiger som overhedeet damp op i reservoiret under de uigennemtrængelige lag. Det undvigende vand og den varme damp erstattes af ny damp nedefra, og kredsløbet kan fortsætte.

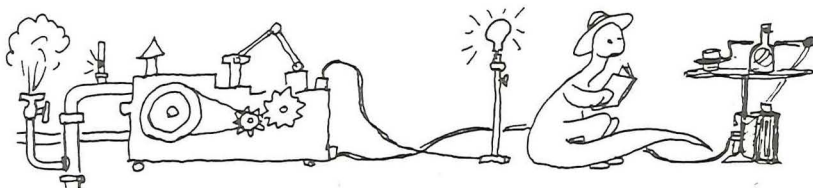
Cirkulationen giver sig til kende som varme kilder af to typer: "Tørre" dampstråler (= "soffioner") og varmtvandspøle med dampudvikling (= "lagoner").



Figur 2. Skematisk snit visende den geologiske baggrund for det geotermiske system i Larderello-området. Se iverigt teksten.

Den historiske baggrund

De varme kilder ved Velatri - det latinske navn for Volterra - er anført på et romersk kort fra det tredje århundrede, men de er allerede omtalt af romerske skribenter i århundredet før Kristi fødsel. Borsyre fra lagone-vand blev muligvis endnu tidligere anvendt af etruskerne til deres keramik-emaļjer.



I nyere tid (1777) påvistes borsyre i lagone-vand, og de første forsøg på industriel mineraludvinding blev gjort 1810 i Monterotonde Marittimo nær Larderello. Ved at overdække lagonerne (1977) blev det muligt at indfange dampen, hvis varme brugtes til inddampning af det borsyreholdige vand. Indtil 1835 byggedes her ialt 9 indvindingsanlæg, og i 1846 opkaldtes stedet for det første anlæg efter industriens grundlægger Larderel. I 1904 indledtes en ny æra med de første forsøg på elektricitetsfremstilling, der i 1913 fulgtes af indvielsen af det første el-værk på 250 kW. Siden da er el-produktionen vokset støt, kun afbrudt af krigsbegivenheder i 1944.

Produktion

Der produceres en damp/gasblanding med et gasindhold på godt 5 vægtprocent med temperaturer på 150° - 260° og tryk på 5-25 atmosfærer (dog er tryk op til 60 atm målt). Den største normale produktion i en given boring er 30-70 tons per time, selv om 300 tons per time i visse tilfælde er blevet overskredet.

Kemisk set består blandingen af 95 % vanddamp, knap 5 % kuldioxid og 0.05 % methan, brint, kvælstof, ammoniak og 0.05 % borsyre. Den kemiske produktion består af borsyre, ammoniak, kuldioxid samt andre luftarter, der findes i blandingen i forsvindende mængder - således påvistes helium af jordisk oprindelse første gang i 1895 i Larderello.

Hertil kommer så el-produktionen. I Larderello udvikles en effekt på 400.000 kW, hvortil kommer 20.000 kW fra Monte Amiata - altså på årsbasis ialt 2500 millioner kW-timer svarende til en udnyttelsesgrad på 75 % (1975). Det svarer til 2 % af Italiens samlede energiforbrug, men udgør dog halvdelen af forbruget i Toscana.

Hvad fremtiden angår, må en udvidelse af den geotermiske energiproduktion søges uden for Larderello-området, og i øjeblikket er en udvikling igang ved Monte Amiata, mens indledende geologiske og tekniske undersøgelser er iværksat i snart sagt alle vulkanske områder fra Monte Amiata over de Flegreiske Marker ved Napoli til Etna på Sicilien, samt på øerne Sardinien, Vulcano og Lipari.

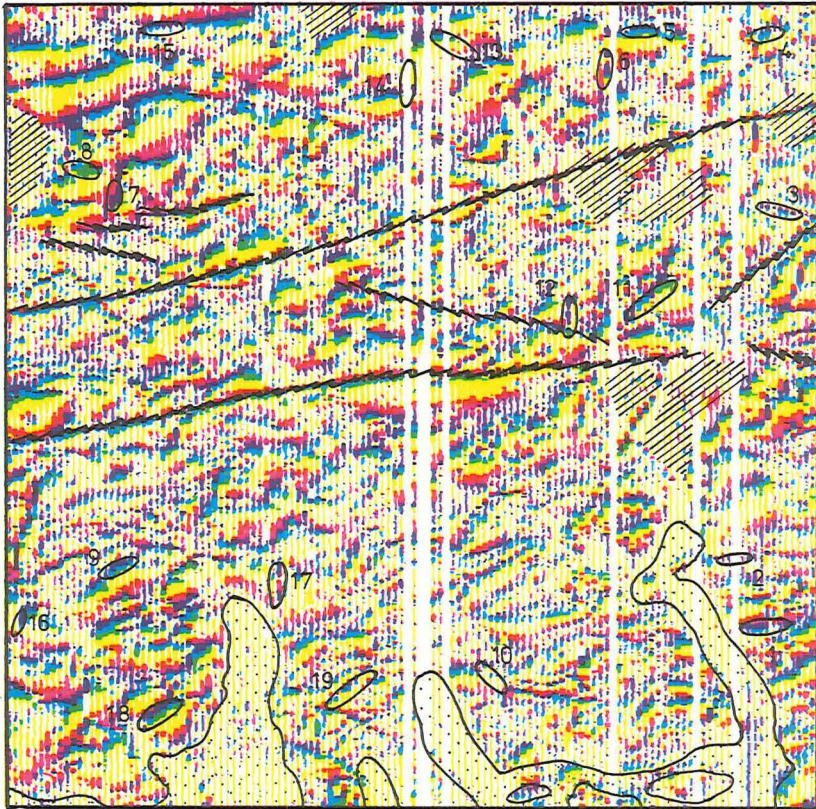
Rejsetips

Turister, som er i Pisa eller i Firenze og som ønsker at besøge Larderello, kan nå frem med diverse lokale busser, men da området ligger rigelig langt fra alfavej, er egen transport langt at foretrække.

GRUNDVAND og RADIØBØLGER

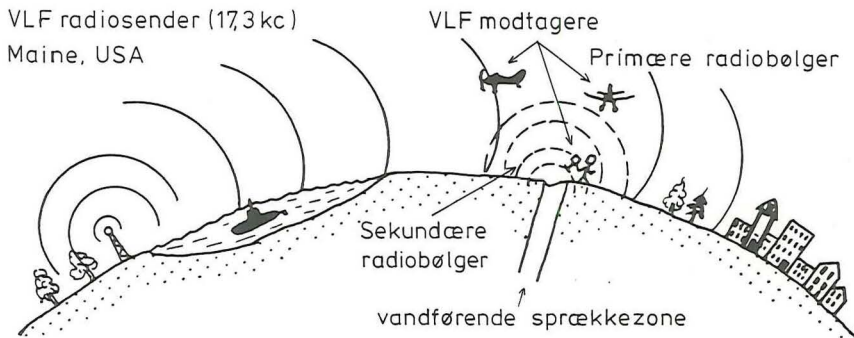
af C.F. Müllern

Radiobølger inden for VLF-båndet (very low frequency) har lav frekvens og stor bølgelængde. Sådanne radiobølger formår at trænge dybt ned i bjerggrunden og relativt dybt ned i vand. Radiosignaler på VLF-båndet anvendes ved kommunikation og navigering af u-både. Radiostationer findes blandt andet i Rugby i England (med betegnelsen GBR), i Cutler, Maine, USA (NAA), i Helgeland, Norge (JXZ) og Moskva, Sovjetunionen (UMS).



RAMA-kort visende de radiomagnetiske anomalier i et 25 x 25 km stort område ved Enköping. Anomalierne markeres af skift fra stærke til svage farver og tætliggende farver. Mange anomalier forårsages af grundvandsførende sprækkezoner. Zigzaglinier viser el-ledninger m.m., prikkede områder er søer, og større lerdækkede områder er skraveret. Numrene viser de undersøgte anomalier.

Når sådanne radiobølger træffer elektrisk ledende dannelser i bjerggrunden, f.eks. koncentrationer af visse malmminerale eller større vandførende sprækker, opstår gennem induktion i disse sekundære radiobølger. Ved hjælp af en speciel radiomodtager kan man så at sige pejle beliggenheden af en sådan dannelses ind. Figur 1 anskueliggør i grove træk principperne for dette.



Figur 1. Principskitse af VLF-metodikken ved grundvandseftersøgning.

Teknikken at prospektere efter malme ved hjælp af VLF-målinger har allerede været anvendt flere år. Derimod har man ikke i større udstrækning prøvet teknikken til grundvandsprospektering. For at få bedre kendskab til mulighederne for på denne måde at prospektere efter grundvand har Sveriges geologiska undersökning gennemført et mindre forskningsprogram med økonomisk støtte fra Styrelsen for teknisk udvikling.

RAMA-kortet

I forbindelse med den regulære geologiske kartering og malmprospekteringen udfører Sveriges geologiska undersökning målingen fra fly, blandt andet målinger på radiobølger fra VLF-stationen i Rugby (16.0 kHz). Ved målingerne udnyttes den magnetiske komponent i de elektromagnetiske radiobølger. Måledata sammenstilles til et såkaldt RAMA-kort (radiomagnetisk kort). Side 53 viser et eksempel på et sådant RAMA-kort. Fly-målingerne er udført fra en omtrentlig højde af 30 m over jorden. Afstanden mellem målelinierne er 200 m. RAMA-kortet viser en stærk dominans af nordøst-sydvestlige indikationer, anomalier. Anomalierne i denne retning, som er den samme som radiobølgerne, bliver forstærkede, mens anomalierne vinkelret på retningen bliver stærkt tilbagepressede. Dette forhold kan sammenlignes med retningsbestemt antennevirkning.

Det er ikke alene naturlige dannelser med høj ledningsevne, som registreres som

anomalier, men også sådanne ting som elektriske ledninger og telefontråde. Sådanne anomalier kan udskilles efter en kontrol. Nærværelsen af el- og telefonledninger forhindrer imidlertid registrering af eventuelle naturlige anomalier i ledningernes umiddelbare nærhed. Som det fremgår af RAMA-kortet på side 53, udgøres de stærkeste anomalier af højspændingsledninger.

Målinger på jordoverfladen med VLF

Ved målinger på jorden kan problemet med den ovennævnte retningsafhængighed undgås ved, at målingerne udføres på radiosignaler fra en radiostation med en så gunstig sendingsretning som muligt i relation til de geologiske forhold. Hvad man må tage hensyn til ved fortolkning af VLF-målinger er f.eks. områdets almene geologiske opbygning, bjerg- og jordarternes elektriske ledningsevne samt dominerende sprækkeretninger. Figur 3 er et eksempel på målingerne: Kurverne Re og Im på figur 3 er fået fra måleværdierne på den magnetiske komponent af de sekundære radiobølger. Under ideelle forhold ligger den søgte vandførende sprækkezone, hvor disse værdier overgår fra positiv til negativ eller omvendt.

Resultat af forsøgsmålinger

Forsøg er foretaget, dels som efterkontrol af eventuelle sammenhæng mellem VLF-anomalier og eksisterende brønde med høj kapacitet, dels gennem undersøgelsesboringer på RAMA- og VLF-anomalier. Det har vist sig at være meget svært at finde mange brønde med høj kapacitet og med en sådan beliggenhed, at elektriske ledninger og lignende ikke har hindret VLF-målinger. Af 12 egne og målelige brønde viste 8 en eller anden sammenhæng mellem høj kapacitet og VLF-anomali. Med hensyn til undersøgelsesboringerne på RAMA- og VLF-anomalier er resultaterne mere entydige. Fire anomalier blev boret og tre af disse gav efter forberedende beregninger 10 000, 12 000 og 14 000 liter pr. time. Den fjerde anomali gav mindre end 100 liter i timen og viste sig at være forårsaget af en forøgelse af elektrisk ledende mineraler i bjerggrunden. De opnåede kapaciteter kan sammenlignes med, at man ved brøndboringer i de bjergarter, det her drejede sig om (sedimentgnejser og gnejsgraniter) i gennemsnit kun får omkring 600 liter i timen. Disse resultater må anses for lovende til trods for, at bedømmelsesgrundlaget endnu er relativt lille.

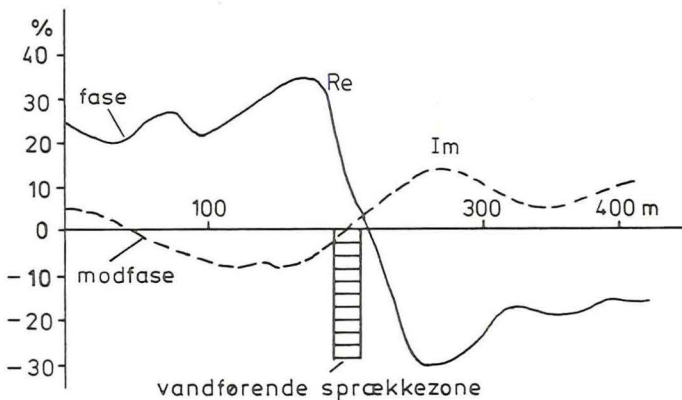
RAMA-kortets og VLF-instrumentets anvendelighed i forbindelse med grundvand

Ved hjælp af RAMA-kort ser det nu ud til at være muligt at få et vist overblik over forekomsten af større grundvandsførende sprækkezoner i bjerggrunden. Man må dog huske, at den tidligere omtalte retningsafhængighed medfører, at visse sprækkeretninger ikke repræsenteres på RAMA-kortet. For effektivt at undgå dette, må man måle på signaler fra to forskellige radiostationer samtidigt

(eller flyve to gange), en ting som endnu ikke er praktisk muligt.

RAMA-kortet kan forestilles anvendt ikke alene til grundvandsprospektering i almindelig forstand, men også til lokalisering af større lossepladser og miljøfarlig industri for at undgå forurening af grundvandet, lokalisering af tunneler og større hulrum for at undgå større sprækkezoner med indtrængning af vand. RAMA-kort kan også tænkes at kunne anvendes til lokalisering af anlæg til at udnytte varmeenergien i grundvandet og til oplagring af varmt vand på passende steder i bjerggrunden. Man kan imidlertid ikke anvende informationerne fra RAMA-kortene direkte uden at have et relativt godt kendskab til de geologiske forhold i området.

VLF-instrumentet kan anvendes ved detailmålinger på jorden, blandt andet til valg af nøjagtigt boretsted ved vandboring i en større sprækkezone. Instrumentet kræver ikke nogen omfattende uddannelse for at betjenes, men i lighed med udnyttelsen af RAMA-kortet gælder det, at man må have relativt godt kendskab til de geologiske forhold for med rimelig sikkerhed at kunne tolke måleresultaterne. Frem for alt er VLF-målinger på jorden en meget hurtig og billig undersøgelsesmetode, jævnført med f.eks. seismiske målinger, når det gælder at lokalisere vandførende sprækkezoner.



Figur 3. VLF-anomaliprofil over en vandførende åre. Kurverne viser den magnetiske komponent af de sekundære radiobølger frembragt i et ledende område. Procentskalaen angiver den magnetiske feltstyrke i forhold til den magnetiske komponent af de primære radiobølger fra radiostationen. Der er registreret to kurver, idet magnetfeltet dels er i fase og dels i modfase med de primære radiobølgers magnetfelt. Begge kurver viser forekomsten af den vandfyldt sprækkezone, der ligger nær kurvernes skæringspunkt, hvor de går fra positive til negative værdier.

Det tidlige flercellede liv

af Ulla Asgaard

”Vandet vrimle med en vrimmel af levende væsener” - ifølge Moses (1,1,20) var dette hvad Gud sagde tidligt om morgenen den 4. dag af skabelsen. Men hvilke geologiske vidnesbyrd har vi om de flercellede dyrs opståen og tidlige udvikling ?

Ved Kambriums begyndelse for ca. 600 millioner år siden finder vi svampe, gopler og koraldyr, ledorm, led dyr, bløddyr, brachiopoder og pighude, hvoraf de fire sidstnævnte grupper alle har et veludviklet skelet af kalciumkarbonat (CaCO_3). Foruden de tidlige repræsentanter for dyregrupper, der også lever i dag, findes i tidlig Kambrium en række gådefulde kegle- og hueformede skaller af kalciumfosfat, hvis tilhørsforhold inden for dyreriget endnu er ukendt.



Figur 1. Ledormen Dickinsonia fra den sen-Prækambriske Ediacara fauna i Australien. Ormen kunne blive op til 30 cm lang. Foto: V. Poulsen.

Går vi endnu lidt længere tilbage i tiden, mellem 600 og 700 millioner år før nu, optrådte i 5 verdensdele en rig fauna af dyr uden kalkskelet - mest kendt er faunaen fra Ediacara i Australien (fig. 1). Ediacara-faunaen rummer godt 30 dyrearter bevaret som aftryk af bløddelene i den sandede aflejring. Heraf er 19 tydet som vandmænd og koraldyr, 5 som ledorme (2 af dem er endda mulige overgangsformer til led dyr), 1 urbløddyr, 1 pighud og ca. 4 former, hvis tilhørsforhold er helt ukendt.

Foruden aftryk af dyrene selv forekommer en lang række af deres gravespor. Sporene kan ud fra deres ydre form tolkes som spor efter ikke leddelte dyr som fladorme, men også fra vel-leddelte (segmenterede) dyr som ledorm og leddy. Man kender også lodrette enkeltrør eller U-formede rør, som har rummet segmenterede eller usegmenterede dyr, der levede af at filtrere næringspartikler fra havvandet.

Går vi længere tilbage i tid, findes ingen rester af flercellede dyr - kun spredte gravespor, og de findes med sikkerhed kun tilbage til ca. 900 millioner år før nu. Angivelser af formodede ældre gravespor har ved nærmere eftersyn vist sig at være ikke-biologiske fænomener som udtørringssprækker eller trykdeformerede bølgeslagsmærker og andre aflejningsstrukturer. Mange tror derfor, at de første flercellede dyr opstod for godt 1000 millioner år siden.

Vi har imidlertid ingen vidnesbyrd om, hvordan de første dyr så ud. Zoologer har på grundlag af studier af nulevende dyrerækker fremsat hypoteser for de første encellede dyrs opståen og opbygning.

De to mest primitive rækker af flercellede dyr vi kender i dag er svampene (*Porifera*) og goplerne og koraldyrene (*Cnidaria*), begge rækker har kun to celleglag - ektoderm og entoderm - i kroppen (fig. 2). Mellem ektoderm og entoderm kan der være løse vandrende celler, som kan udskille et geleagtigt stof hos (*Cnidaria*) eller afstivende nåle eller spikler (hos *Spongia*). Nogle af cellerne kan være primitive nerveceller, og andre igen kan danne elastiske fibriller som en slags forløbere til muskelceller.

Af de to rækker regnes *Spongia* som den mest primitive, og på grund af de karakteristiske kraveceller regnes svampene af mange zoologer for at nedstamme fra kolonier af encellede flagellater med en lignende krave, og de står dermed isoleret fra de øvrige flercellede dyr.

Både svampe og koraldyr er fastsiddende bunddyr udviklede fra fritsvømmende kolonier af encellede dyr. Det næste trin i udviklingen må være dyr, der kan erobre den udstrakte havbund ved at bevæge sig frit på og i den. Det første udviklingstrin i denne leveys er fladormene, der sjældent når en større længde end et par cm (fig. 3). De er beklædt med fimrehår over hele kroppen, og det er især ved hjælp af fimrehårene, at ormene maver sig frem i og på sedimentet - de betjener sig dog også af grove bølgetog af muskelbevægelser.

Det næste trin i udviklingen førte til større og mere smidige dyr. Det kræver to ting: 1. en god funktionel opdeling af muskelsystemet og 2. et skelet at hænge det mere avancerede muskelsystem op på. Begge dele opnås ved skabelsen af et stærkt segmenteret dyr, hvor musklerne deles op i "pakker" og den indre kropshule (coelomet) ligeledes deles op og tjener som et indre, hydrostatisk skelet. En sådan sammensat proces kræver tilkomsten af et nyt celleglag i dyrene - nemlig mesodermen.

De gennemførte segmenterede dyr kan tænkes opstået på to måder - enten fra gopler eller fladorme. I gopler rummer udposningerne fra mavevæggen kønscel-

lerne. Udposningerne kan afsnøres og deles op som i fig. 3 og bliver til mesodermsække, hvis hulrum er coelom, og hvorfra celler danner muskel- og blodkarsystem, kønsceller og nyrer. Den anden mulighed er, at man "sammensmel-ter" vævet fra fladormens kønsceller og nyrer og på denne måde danner segmenter. Ud fra begge hypoteser kan man få dannet en ledorm, som opfylder alle krav til størrelse og smidig bevægelighed, fig. 3.

De fleste zoologer synes at være enige, når det gælder det videre udviklingsmøn-ster. Leddyrene (de uddøde trilobiter, krebsdyr, spindlere og insekter) er ud-viklet fra ledorm, de er stærkt segmenterede med et ydre hudskelet af kitin, som musklerne er fæstnet til. Hudskelettet kunne hos trilobiter og krebsdyr forstærkes med kalk. Desuden har leddyrene udviklet leddede, pansrede lem-mer, hvor ledorme altid har haft et par udvækster med kitinbørster på hvert segment. Gennem leddyrenes udvikling fra trilobiterne og frem til spindlere og insekter ser man desuden en reduktion i antallet af segmenter og en sti-gende specialisering i funktionen af de enkelte segmenter.

Bløddyr (urbløddyr, snegle, blæksprutter og muslinger) kan også afledes fra ledormene. Hos bløddyrerne udvikles der et ydre skelet bestående af en eller to skaller af kalciumkarbonat, og i gruppens udvikling skete hurtigt et tab af den oprindelige segmentering, der erstattedes af en "falsk" segmentering, idet deres krophuleopdeling ikke svarer til coelomerne hos de andre dyreræk-ker.

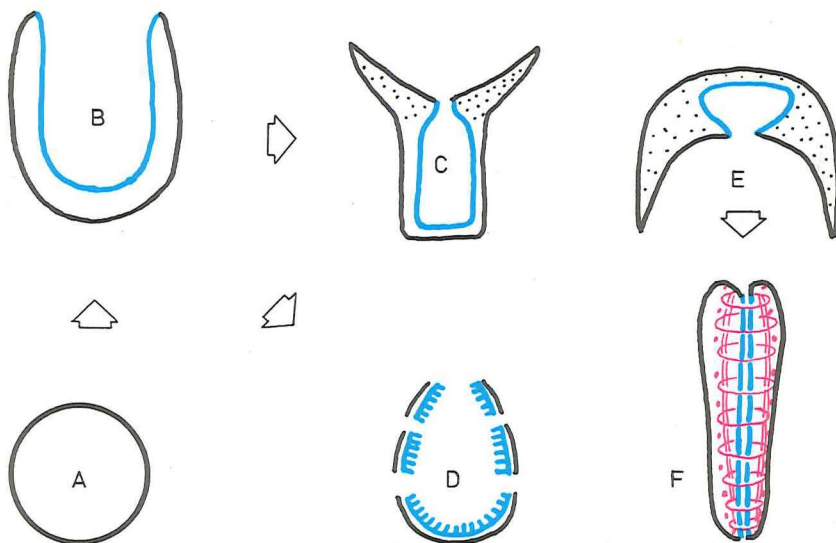
Udviklingen medfører hos bløddyrerne, at det blev nødvendigt at danne speci-elle åndedrætsorganer i form af gæller, da dyret nu er omsluttet af et skelet, der dækker en stor del af overfladen. Den stive skal, hvortil musklerne kan fæstnes, overfløddiggjorde det indre hydrostatiske skelet, og derved gik det ind-re skelet og segmenteringen tabt. Dog har bløddyrerne en form for falsk segmen-tering af blodkarsystemet, der fungerer ligesom et indre hydrostatisk skelet. Det gælder især muslingerne, der har brug for den indre afstivning, når de gra-ver ved hjælp af fod og skal (fig. 4).

De øvrige dyrerækker - på nær en - har alle et fast skelet og derfor meget få segmenter, idet det faste skelet helt har overtaget det hydrostatiske coelomske-lets funktion. Til de rækker hører brachiopoderne og bryozoerne, der begge har et ydre, ektodermalt dannet skelet af kalk, pighuderne (søpindsvin, søstjerner, slangestjerne og søliljer samt mange uddøde grupper) med et fast kalkskelet, der, selv om det ligger lige under overhuden, er af mesodermal oprindelse, og hvirveldyrerne som de højeste med indre mesodermskelet af kalciumfosfat. Endelig er der visse ormegrupper som pølseormene, der helt har mistet enhver form for segmentering.

Skulle vi forsøge at tegne et stamtræ for de flercellede dyr ud fra de zoologiske betragtninger, vil det kunne se ud som fig. 5.

Den sen-Prækambriske Ediacara-fauna viser en rigdom af dyr, der til fulde har udnyttet såvel segmentering som det hydrostatiske skelet, men der er til gen-

gæld ingen spor af et ydre skelet. Overfor står de Nedre-Kambriske faunaer, der foruden de ”bløde” former rummer repræsentanter for alle dyrerækker med et hårdt ydre skelet.



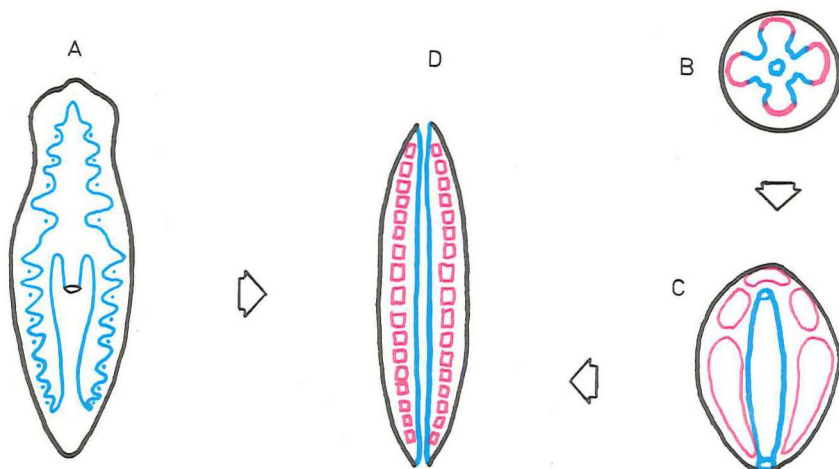
Figur 2. A: Kugleformet flagellatkoloni. B: Krukkeformet ”urform” med to cellelag - ydre ectoderm (sort) og indre entoderm (blå). C: Cnidarie - polyp. D: Svamp med kraveceller. E: Cnidarie - gople (vandmand). F: Ledorm (rød farve viser mesoderme muskler, kønsceller og primitive nyrer).

Det hårde skelet

Det har været foreslået, at de flercellede dyr udvikledes i havet, og at ”koden” for skeletdannelse udvikledes helt selvstændigt i de enkelte celler, at det skete uafhængigt i de forskellige dyrerækker. ”Koden” tænkes at være mængdeforholdet mellem forskellige aminosyrer i de enkelte celler. Kun nøglen manglede. Hvad var det så for en nøgle, der blev sat i låsen for ca. 600 millioner år siden ?

To amerikanske forskere, Rhoads og Morse, argumenterede i 1971 overbevisende for at nøglen var ilt og ingen har siden modsagt dem. Ilt var også nøglen til livets opståen for ca. 3800-3500 millioner år siden. Dengang drejede det sig om atmosfærens iltniveau, der var nået til en tusindedel af det, vi har idag. Ifølge Rhoads og Morse er et iltniveau på en tiendedel af det nutidige den egentlige nøgle til skaldannelse, og det niveau blev nået for ca. 600 millioner år siden.

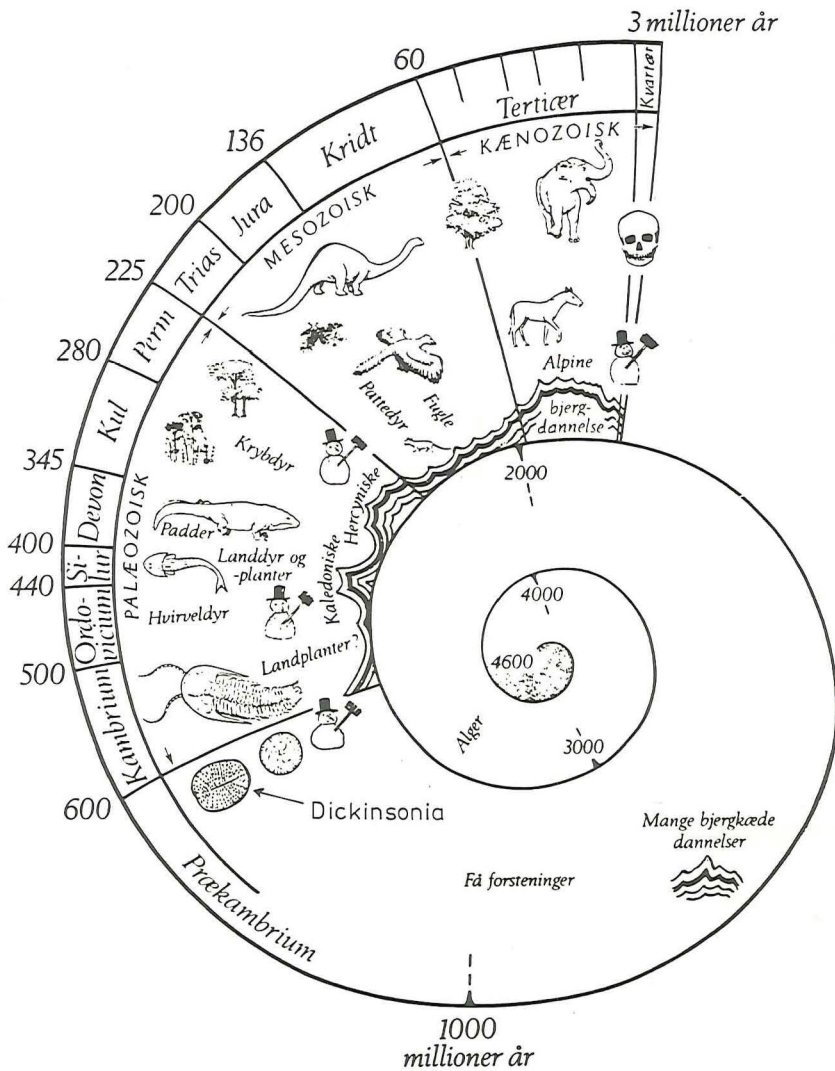
De to forskere anvendte det aktualistiske princip - ”nutiden er nøglen til fortiden” - idet de undersøgte iltniveau og fauna i en række nutidige iltfattige bassiner som Sortehavet, den Californiske Bugt og nogle dybe bassiner i Stillehavet ud for Californiens kyst, og anvendte deres resultater ved tolkningen af faunaerne fra sen-Prækambrium og Nedre Kambrium.



Figur 3. A: Fimreorm. B: Gople med kønsceller i udposning fra mavehulen. C: Hypotetisk form med mesodermale krophuler (coelomer) afsondret fra mavehulen. D: Ledorm. Pilene angiver de to udviklingsveje, der kan føre til vel-segmenterede dyr med et indre hydrostatisk skelet. Sort = ydre ektoderm. Blå: indre ektoderm. Rød: mesodermale krophuler.

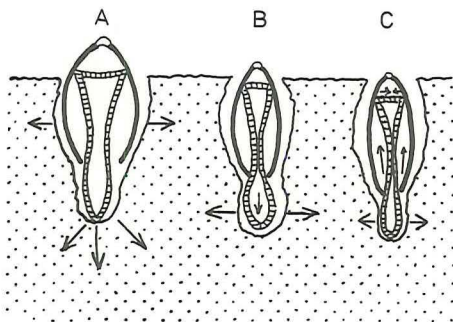
De fandt, at i de dele af bassinerne, hvor mængden af opløst ilt i bundvandet var mindre end 0.1 milliliter per liter havvand, fandtes ingen flercellede dyr, mens havbundsmudder med et iltindhold mellem 0.3 og 1 ml/l indeholdt en artsfattig fauna af små ledorme og leddyr med tyndt hudskelet uden kalk. Så snart iltindholdet overskred 1 ml/l, blev faunaen rigere, formerne større og dyr med et solidt ydre skelet dukkede op - hovedsagelig muslinger, snegle, pansrede krebsdyr, brachiopoder og stenkoraller.

Den fossile fauna fra 900-700 millioner år siden viser gravegange af små organismer, der har været ”ormeformede” og maksimalt 1-2 millimeter i diameter. Fra 700-600 millioner år siden findes en voksende rigdom af gravegange, der fortæller om stedse større dyr med god segmentering, og endelig har man den ”bløde” Ediacara-fauna, der rummer store ledorm - op til 30 cm længde.

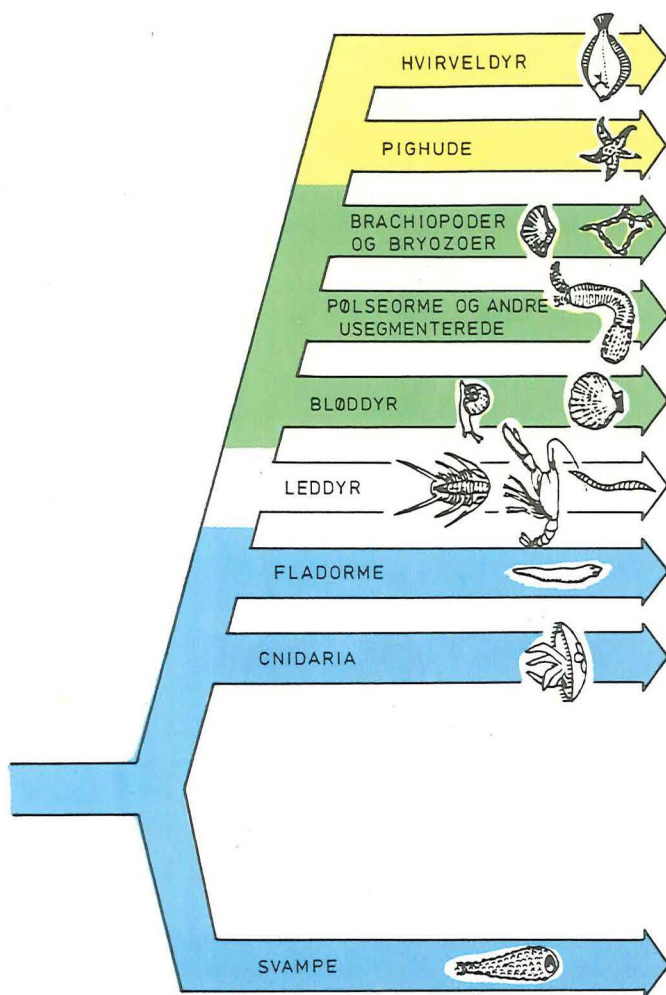


Jordens udvikling som en spiral, der fortæller sig i dybet til den fjerne fortid. Ud af de godt 5000 millioner års historie er kun de sidste 600 millioner år detaljeret opdelt - takket være de forstenede organismer. Fundene af tidlige flercellede dyr i yngre Prækambrium er vist (bl.a. Dickinsonia fra Australien). De krøllede lag viser intensiteten af bjergkædefoldninger, hvoraf mange fandt sted i Prækambrium. Snemænd viser tilstedeværelse af istider.

Herpå følger den Kambriske eksplosion med kalk- og fosfatskallede former. En tiltagen af faunaens størrelse hænger fysiologisk nøje sammen med iltindholdet i havvandet. Ved ekstremt lave iltindhold kan små, tynde dyr lige klare at ånde. Ved tiltagende iltindhold kan dyr i første omgang blive større og endelig - når grænsen 1 ml ilt/l havvand passerer - kan dyrene tillade sig den "luksus", at bruge energi til bygning af et ydre skelet. Hvor kritisk denne iltgrænse er for skaldannelsen kan ses på muslinger, der lever i tidevandszonen idag. Ved hvert lavvande må muslingerne inden for deres tættillukkede skaller gå over til et stofskifte uden brug af ilt, og udsættes de nu for langvarig tørlægning, f.eks. ved en fralandsstorm, fører det iltfri (anaerobe) stofskifte til, at muslingernes kappe begynder at opløse skallernes inderside. Det frigjorte calcium fra denne proces anvendes nu af cellerne til andre mere trængende formål. Når vandet igen overskyller muslingerne vender de tilbage til normalt åndedræt og iltstofskifte, og kappen danner igen nyt skalmateriale. Dog vil et tyndsnit af skallen vise et tydeligt ar efter den forudgående iltløse periode. Tidligere ansås en langvarig, gradvis udvikling for at være forudsætningen for den rigdom af dyreformer, der findes i Kambrium. Med den nye viden om iltniveauets store betydning forekommer det mere sandsynligt, at udviklingen af skalbærende dyr skete meget eksplosivt ved Kambriums nedre grænse, hvor mange økologiske nicher blev åbne for dyr med et ydre eller indre skelet.



Figur 4. Tværsnit gennem gravende musling. A: Lukkemusklerne slappes, og skallerne åbnes automatisk ved hjælp af det elastiske ligament (lyst) i hængselsranden foran mellem skallerne. Foden presses ned i sandet, og de åbnede skaller pres mod det omgivende sand hindrer, at muslingen glider op. B: Lukkemusklerne trækkes sammen, så skallerne lukkes om roden af foden, og denne, som forinden er pumpet fuld af blod, forankrer nu dyret i sandet. C: Blodet pumpes tilbage i kroppen, og fodens muskler trækker sig sammen, hvorved muslingen bliver trukket dybere ned i sandet. Forløbet A-C gentages, til dyret har nået den ønskede dybde.



Figur 5. Skema over udviklingen af leddeling, skelet og cellelag. Blåt: to cellelag (entoderm og ektoderm) findes, hydrostatisk skelet mangler, ægte leddeling mangler. Hvidt: hos leddyr og ledorme findes ægte leddeling, tre cellelag (entoderm, ektoderm og mesoderm) og et veludviklet hydrostatisk skelet (ledorme) eller et fast ydre skelet (trilobiter, krebsdyr m.fl.). Grønt: leddeling går tabt, veludviklet skelet hos bløddyr, brachiopoder og bryozoer. Gult: fast skelet udviklet fra mesodermen.