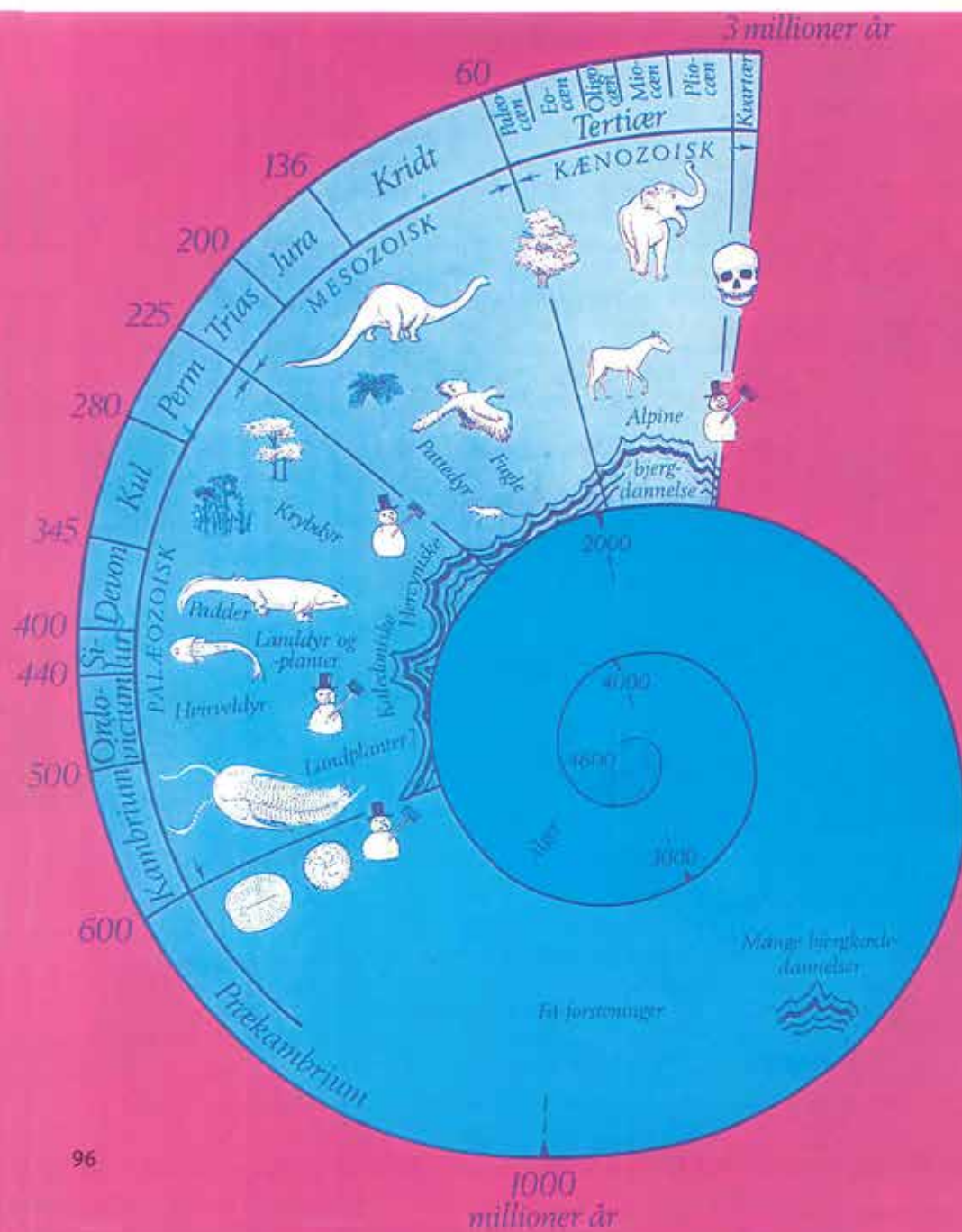




VARV "GIVER DEN EN TAND TIL" I FORM AF EN ARTIKEL OM GAMLE HAJER. VI ER IKKE FORVÆNT MED AT FINDE FORSTENED E HVIRVELDYR I DANMARK - MEN ALLIGEVEL HAR VI EN VERITABEL HAJFAUNA, SOM ER REPRÆSENTERET AF FINNEPIGGE OG TÆNDER. HEROVER SES FIRE STORE TÆNDER AF ORTHACODUS, FUNDET I FAKSE.

VI KIGGER ENDNU EN GANG PÅ DANSK JORDVARME, SOM I EN ARRÆKKE VIL VÆRE EN REALISTISK ALTERNATIV ENERGIFORM. DESUDEN KOMMER VARV MED EN SIDEBEMÆRKNING TIL ATOMDEBATTEN I EN ARTIKEL OM EN 2000 MILLIONER ÅR GAMMEL ATOMREAKTOR I AFRIKA. ENDELIG GÅR DET OP OG NED I ET INDLÆG OM NIVEAUÆNDRINGER EFTER ISTIDEN.

ISSN 0105-6301

15. august 1979.

GEOTERMI

Det geotermiske boreprojekt i Års i Nordjylland fortsætter. Dansk Olie og Naturgas (D.O.N.G.) forventer at nå reservoiret i løbet af sommeren. Hvis resultatet er positivt, skal der udføres endnu en boring til injektion af det geotermiske vand (se Varv 1978, nr. 4). Samtidig udfører Danmarks geologiske Undersøgelse i samarbejde med Laboratoriet for Geofysik ved Århus Universitet og Risø en landsdækkende undersøgelse med henblik på at påvise områder med gode geotermiske muligheder. Projektet skal være afsluttet ved årets udgang. Rapporten ventes at foreligge i begyndelsen af 1980.

SØMATERIALER

Fredningsstyrelsen har i sommerens løb udført en række seismiske målinger og bundprøveoptagninger i farvandene omkring Samsø. Undersøgelserne er et led i den kortlægning af havbundens råstoffer, der efter råstofloven skal gennemføres som led i en landsdækkende indvindings- og forsyningsplanlægning. Rapporterne ventes at foreligge ved årsskiftet.

OLIE PÅ ØSTGRØNLANDS KONTINENTALSOKKEL

Grønlands geologiske Undersøgelse foretager i sommer undersøgelser over Østgrønlands kontinental sokkel med henblik på at vurdere, om olieforekomster kan være til stede. Undersøgelserne foretages dels som magnetiske målinger fra fly, dels som seismiske målinger fra havundersøgelsesskibet "DANA".

VARV

Postadresse: Tidsskriftet VARV, Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K. Telefon: 01-13 50 01.

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

VARV udkommer fire gange om året. Prisen er 38,00 kr i abonnement. Abonnement tegnes ved indsendelse af beløbet til VARV, postgiro 9 06 88 80.

Alle henvendelser vedrørende adresseforandring, fejl ved bladets levering og lignende bedes rettet til postvæsenet.

© 1979 VARV. Eftertryk af tekst og billeder kun efter tilladelse.

FAIR-PRINT AS - ROSKILDE

muligvis beslægtet med *Heterodontus*, et fælles slægtskab som måske kan føres tilbage til *Palaeospinax*. Det er desværre meget vanskeligt at sige noget om *Squalicorax* og *Ptychodus* mulige slægtninge, idet de kun kendes fra fund af tænder (en enkelt kæbe med tænder stammende fra *Ptychodus* kendes dog). Udover de særprægede tænder, er der fundet nogle få tænder som sandsynligvis stammer fra nære slægtninge af nutidens sandhajer (*Odontaspis*).

Til sidst nogle eksempler fra Fakse kalkbrud. Flere elementer i Fakes hajfauna repræsenterer nogle meget gamle slægter. Figur 8 viser en tand af *Hexanchus* (også kaldet *Notidanus*), og figur 9 yderst til højre og til venstre, viser nogle tænder af *Heterodontus*. Begge slægter kendes, som nævnt ovenfor, allerede i Jura, og havde således allerede omkring 80 millioner år bag sig, da de levede i Fakse. Figur 9 i midten viser to *Synechodus*-tænder og forsidebilledet viser fire store *Orthacodus*-tænder. Begge disse slægter kendes også fra Jura og er sandsynligvis også nært beslægtet med *Palaeospinax*. Forekomsten af *Orthacodus* i Fakse er ovenikøbet meget mærkelig, da slægten iøvrigt ikke kendes fra lag stammende fra perioden mellem Øvre Jura og Nedre Tertiær. Derimod kendes *Synechodus*-slægten fra Kridt helt op til og med Eocæn.

Vi har således fået et eksempel på et lille selskab af "gamle" repræsentanter blandt Fakse-faunaens mere moderne elementer (sandhajer, skæghajer og andre). *Palaeospinax* og måske lignende men endnu ikke kendte slægter fra Nedre Jura, har således givet ophav til nogle særdeles vellykkede slægter, der har opnået en imponerende grad af perfekt tilpasning i de økologiske nicher, de optager og nogle lever stædigt videre i bedste velgående den dag i dag.

EKSURSION TIL SKÅNE

I tilknytning til Folkeuniversitetets orienteringskursus i geologi afholdes en eksursion til Skåne i september måned. Nærmere oplysninger om orienteringskurset og det efterfølgende grundkursus i geologi foreligger i programmet for efterårssemestret 1979, der kan fås ved henvendelse til Folkeuniversitetet, Købmagergade 52, 1150 København K, tlf. (01) 14 48 27.

Et fossilt atomkraftværk

af John Rose-Hansen

Morfologiske sammenligninger af fossile hajer hæmmes meget af eksemplernes generelt dårlige bevaringstilstand. Komplette, velbevarede fossiler er desværre uhyre sjældne. Mange slægter kendes derfor kun fra fund af isolerede tænder eller pigge. Fremtidige fund og undersøgelser vil måske vise, at de moderne hajer nedstammer fra forskellige stamformer - måske samtidige og nært beslægtede med *Ctenacanthus*.

Til slut lidt om de nye fund fra Bornholm og Fakse. I Carl Nielsens grusgrav, der ligger cirka 4,5 km øst for Rønne, er der for nyligt gjort nogle fund af pigge og tænder stammende fra *Hybodus*-hajer. Den nederste del af grusgraven udgøres af fint kvartssand med krebsdyr-gravegange, en rodhorisont og enkelte fossile træstammer. Dette overlejres af grovere kvartssand, der er rustfarvet ved gennemsvivning af grundvand. Disse sandlag hører til Robbedaleformationen, der regnes for det yngste Jura. I den sydvestlige del af graven ses, øverst over det grovere kvartssand en cirka 25 cm tyk bænk af lerjærnsten. Lerjærnstenen indeholder en mængde aftryk af ferskvandsmuslingen *Neomiodon* (tidligere kaldet *Cyrena*). Desuden forekommer aftryk af enkelte snegle og plantefragmenter samt en del store skæl af en ganoid-fisk (*Lepidotes*). Derover ses gruslag vekslede med to andre lerjærnstenslag, der er fyldt med aftryk og stenkerner af en lille ferskvandssnegl kaldet *Viviparus*. Disse lag indeholder også plantefossiler og skæl. Figur 3 viser en lille *Hybodus*-tand fra *Neomiodon*-bænken. Figur 4 viser to fragmenter af *Hybodus*-pigge fra sandet umiddelbart under *Viviparus*-lagene. Der er fundet både tænder og pigge i alle lerjærnstensbænkene. Derudover kan nævnes at der er fundet en skjoldplade fra en skildpadde i sandet under *Viviparus*-lagene. Formodentlig drejer det sig om en ferskvandsskildpadde, der har lignet den nulevende flodskildpadde (*Trionyx*). *Hybodus*-hajerne fra Bornholm befandt sig således i en slags "ungdom" nr. 2 da de levede i kystnære ferskvandsområder på overgangen mellem Jura og Kridt. Men slægten havde da, som tidligere nævnt, allerede eksisteret i mere end 85 millioner år. Denne og lignende ferskvands-hajfaunaer, som kendes fra mange andre steder blandt andet England, er meget karakteristiske for Jura/Kridt-grænsen.

Lidt vest for Arnager by på Bornholm findes en klint med Arnager Kalk fra Øvre Kridttid. Arnager Kalken overlejrer det ældre Arnager Grønsand, og overgangen markeres af et konglomerat. Gamle undersøgelser nævner faktisk kun et enkelt fossil fra laget, men nye undersøgelser har vist, at konglomeratet i virkeligheden indeholder en del fossiler blandt andet brachiopoder, søpindsvin, belemnitter (vættelys) og muslinger samt nogle gravegange.

Der er endvidere fundet nogle få hjattænder. Figur 6 viser en tand af *Squalicorax* - en slægt som ikke tidligere er kendt fra Danmark. Denne slægt står måske nær de seks/syv-gællede hajer, og kendes tilbage fra Nedre Kridt, men uddøde i Øvre Kridt. Figur 7 viser en flad knusetand tilhørende slægten *Ptychodus*, også fra bundkonglomeratet (det før omtalte "eneste" fossil var ligeledes en *Ptychodus*-tand). Knusetænderne viser, at disse hajer har sat pris på muslinger og snegle, som de har kunnet "male" mellem kæberne. *Ptychodus* er

I 1953 offentliggjorde amerikanerne Wetherill & Inghram en artikel med beregninger, der viste, at det skulle være muligt at finde naturlige atomreaktorer. På grundlag af deres beregninger, der var baseret på et detaljeret studium af en uranmineralisering anbefalede de, at man søgte efter naturlige reaktorer i forekomster, der var mindst cirka 2000 millioner år gamle, da mængderne af isotopen Uran-235 dengang havde den nødvendige størrelse.

Tre år senere formulerede Kuroda fra Arkansas de nærmere betingelser for at få dannet en naturlig reaktor, og 16 år senere - i 1972 - blev den første naturlige reaktor fundet ved Oklo i den vestafrikanske stat Gabon.

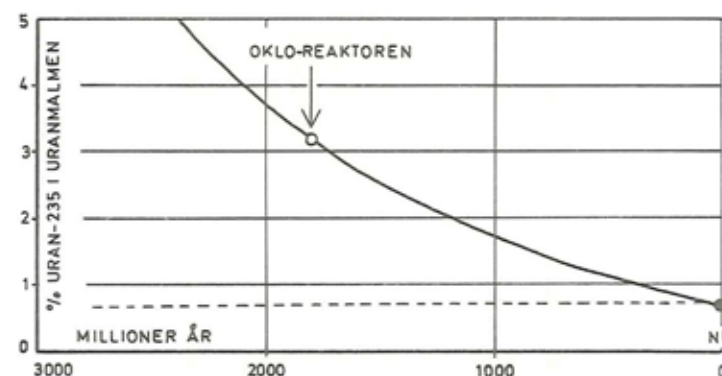
Meddelelsen om, at forudsigelserne var blevet bekræftet ved fundet af en naturlig reaktor i Gabon, blev modtaget med megen skepsis fra mange førende atomfysikere. Nærmere undersøgelser i området har imidlertid bekræftet, at naturen virkelig har skabt atomreaktorer mere end 1500 millioner år før Enrico Fermi og hans medarbejdere i 1942 startede Jordens "første" reaktor.

Følgende spørgsmål rejser sig: Hvad kræves der for at få en naturlig reaktor til at fungere? Hvorledes blev reaktoren i Gabon fundet? Kan man forvente at finde tilsvarende reaktorer andre steder? Kan naturlige reaktorer dannes i dag? Hvad har vi lært af Oklo-reaktoren?

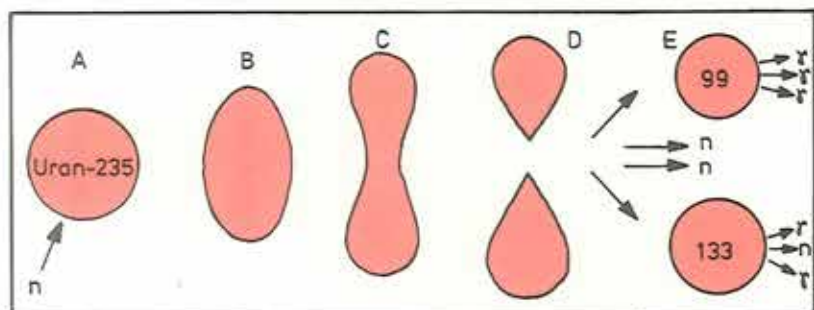
Lad os først se på princippet bag de menneskeskabte reaktorer.

HVAD KRÆVES DER FOR AT FÅ EN REAKTOR TIL AT FUNGERE?

Naturligt uran består af en blanding af Uran-235 og Uran-238, hvoraf Uran-238 i dag udgør 99,3% og Uran-235 kun 0,7%. Da Uran-235 har en halveringstid på 700 millioner år og Uran-238 på 4500 millioner år ændres forholdet mellem uranisotoperne til stadighed - se figur 1. Begge isotoper kan spaltes af neutroner, men for at få processen til at forløbe med Uran-238 skal de udlø-



Figur 1. Nedbrydning af naturligt forekommende uran. Halveringstiden for Uran-235 og Uran-238 er henholdsvis 700 millioner år og 4500 millioner år, og derfor ændres forholdet mellem isotoperne i tidens løb. Ved solsystemets dannelse antages Uran-235 at have udgjort 25% mod idag 0,7202%. Uranmalmen, der gav ophav til Oklo-reaktoren indeholdt cirka 3% Uran-235.



Figur 2. Nedbrydning af Uran-235. A: Uran-235 rammes af en langsom neutron. B: Neutronen optages. C: Kernen bliver ustabil. D: Kernen spaltes og E: bliver til to kerner med for eksempel atomvægt 99 og 133, samtidig udsendes neutroner. De nye kerner er ustabile og omdannes til nye ustabile kerner under samtidig udsendelse af neutroner og γ -stråling og så videre. Der dannes mange isotoper af mere end 30 grundstoffer.

sende neutroner have en betydelig hastighed - Uran-235 spaltes derimod lettest af langsomme neutroner.

Når en neutron indfanges af en urankerne, se figur 2, omdannes denne til en ny ustabil kerne, der i løbet af kort tid deles i to under udsendelse af 2-3 neutroner. De nydannede kerner er ligeledes ustabile (radioaktive) og omdannes i løbet af fra få sekunder til mange år til et stort antal spaltningsprodukter. Slutresultatet er utallige stabile, inaktive isotoper. Processerne er ledsaget af dannelse af stor energi blandt andet i form af varme. For at få reaktionen til at fortsætte kræves, at mindst en af de dannede neutroner optages af en ny Uran-235 kerne og så videre, hvorved der opstår "kædereaktion". Flertallet af de neutroner, der dannes ved kædereaktionen, har en gennemsnitlig hastighed der er utilstrækkelig til at spalte Uran-238, og det er følgelig kun Uran-235, man udnytter i de mest benyttede typer "kunstige" atomreaktorer.

Langsomme neutroner har meget større chance for at blive indfanget af Uran-235 end hurtige, og derfor "modererer" man normalt neutronernes hastighed ved at lade dem støde sammen med lette kerner som brint i vand. Da neutronerne indfanges af andet end Uran-235 må man have en vis minimummængde ("kritisk størrelse") af Uran-235 i reaktoren for at få dannet neutroner nok til at holde reaktionen i gang. I praksis bruger man et større indhold Uran-235 end nødvendigt og afstemmer neutronmængden ved hjælp af et stærkt neutron-"opsugende" stof.

I atomkraftværker hvor vand benyttes som moderator og til køling ("letvandsreaktorer") er det nødvendigt at forhøje det naturlige forhold mellem Uran-235 og Uran-238. Denne "berigning" er en meget kompliceret proces.

Man kan også benytte naturligt uran, men der må da benyttes en moderator og et kølemiddel, der ikke sluger neutroner. Som moderator kan benyttes tungt vand, hvor en del af brinten er erstattet af den tunge brintisotop deuterium.



Figur 8. Tand fra *Hexanchus* (også kaldet *Notidanus*).



Figur 9. Tænder fra *Heterodontus* (yderst til højre og venstre) og 2 *Synechodus*-tænder (i midten).



Figur 6. Tand fra *Squalicorax*.



Figur 7. En flad knusetand fra *Ptychodus*.

HVORLEDES BLEV DEN NATURLIGE REAKTOR OPDAGET?

Værktøjet til påvisning af fortidige atomreaktorer er forholdet mellem Uran-235 og Uran-238 kombineret med spaltningsprodukterne. Ved meget komplicerede processer kan de to isotoper separeres i laboratorier, men lignende processer er ikke påvist i naturen, og man må forudsætte en relation mellem de to isotoper som normalt kun påvirkes af en tidsfaktor (figur 1). Samme relation må iøvrigt gælde hele solsystemet og er påvist i meteoriter og måneprøver.

Forskere i Frankrig fandt i 1972 ved en rutinemæssig bestemmelse af isotopforholdet i en uranprøve et uventet lavt forhold mellem U-235 og U-238. De forfulgte sagen og konstaterede at prøven stammede fra Oklo-minen i Gabon i Vestafrika. Man undersøgte derefter uranisotoperne i et stort antal boreprøver og påviste ned til 0,44% Uran-235, det vil sige cirka halvdelen af det forhold man skulle have forventet - se figur 1. Et detaljeret analyseprogram blev iværksat i mineområdet, og der blev herved påvist tilstedeværelsen af et stort antal spaltningsprodukter, som ikke tidligere var fundet i naturen - men nok var kendt fra kunstige kerneprocesser. Dermed var selv de mest skeptiske atomfysikere blevet overbevist om, at der fandtes naturlige atomreaktorer.

OKLOREAKTORENS DANNELSE OG STØRRELSE

Der er påvist ialt 6 reaktorer i Oklo, beliggende i cirka 1 x 10 meter store begblenderige årer og lommer i sandsten, men undersøgelserne har været koncentreret om bare en af dem. Uranet har sikkert i tidlig Prækambrium (1700 - 1900 millioner år før nu) befundet sig i uranmineraler afsat som tungsandskorn på et nederoderet grundfjeld, se figur 3.

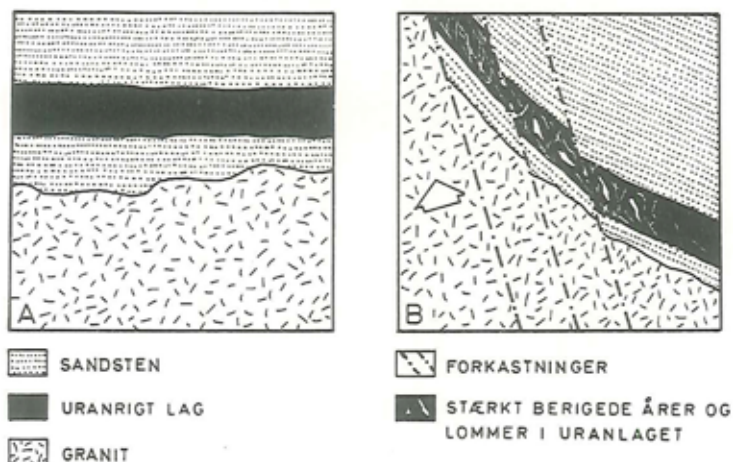


Figur 3. Gabons uran fandtes i tidlig Prækambrium i uranmineraler, der var jævnt fordelt i granit. Efter forvitring af graniten blev uranmineralerne frigjort og skyllet ud i elve. Senere, da atmosfæren blev mere iltholdig, blev uranet iltet til en vandopløselig form. Det opløste uran førtes til deltaområder med organisk materiale, og her blev uranet reduceret til en tungtopløselig form af det organiske materiale, senere er uranet opløst og genafsat i årer og lommer. Se også figur 4 og 5.



Figur 4. Geologisk kort over Oklo-området. Uranmineraliseringen har fundet sted i en lagserie domineret af sandsten.

Senere i Prækambrium da iltindholdet i atmosfæren var steget tilpas, blev uranet iltet til en letopløselig form (U^{6+}), som derefter i vandig opløsning blev udludet fra tungsandsforekomsten, senere genudfældet i årer, og endelig skete efter forkastning endnu en udludning og genudfældning som årer og lommer - se figur 5. De nævnte lommer har haft en kritisk form og størrelse - det vil sige, at uranindholdet har været over cirka 10% og årerne over 0,5 m tykke. Dermed har neutronernes vejlængde været meget mindre end årernes tykkelse, så de er blevet indfanget inden de nåede ud til sidestenen.



Figur 5. Koncentration af Uran-235 ved Oklo. A: Efter udfældning af uranmalmårene i sandlagene dækkedes det hele af sand. B: Graniten vest for legemet blev skudt op, hvorved malmforekomsten fik en betydelig hældning og samtidig blev gennemsat af revner og sprækker. Grundvand sivede gennem sprækkerne og opløste uranet, som blev genafsat som stærkt beriget malm i årer og lommer andre steder i malmlegemet.

punkter, således at kæber og kranie danner et sammenhængende hele. Nogle nulevende hajer har det samme kæbeophæng, men langt de fleste moderne hajer har et kæbesystem, hvor under- og overkæbe er løst forbundet til kraniet via nogle bruskelementer der ligger lige bagved kæberne. Et sådant arrangement bevirker, at kæben kan skydes fremad og nedefter, hvilket giver et meget effektivt bid. Cladoselache's tænder, der også er af den "Cladodonte" type, har fire mindre sidespidser - to på hver side af en stor, central midterspids.

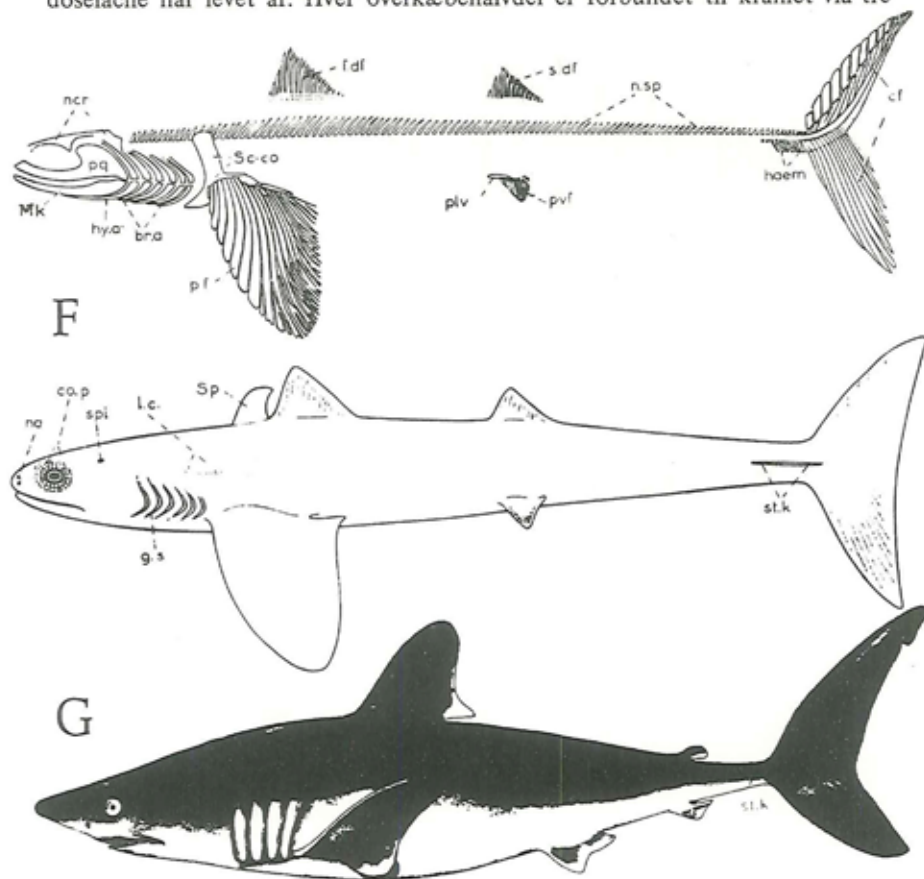
Brystfinne- og halefinnestrukturen støtter den antagelse, at Cladoselache sandsynligvis har levet i de frie vandmasser som en hurtig og udholdende jæger.

En tredje, men noget dårligere kendt tidlig haj er Ctenacanthus, som kendes fra Øvre Devon til Øvre Perm (er således samtidig med Xenacanthus og Cladoselache). Ctenacanthus havde to pigge, en foran hver rygfinne. Begge er lange og spidse, dybt forankret i kroppen. Foruden tænder og pigge er der også fundet nogle nogenlunde velbevarede skeletrester og kropspartier, således at en rekonstruktion er mulig.

Hybodus-slægten repræsenterer formodentlig en sidegren på hajernes stamtræ. Slægten kendes fra Nedre Trias til op mod slutningen af Kridt. Ligheden med nulevende hajer er også her meget slående. Halefinnen er asymmetrisk og brystfinnerne er store og brede. Ligesom Ctenacanthus har Hybodus to pigge, en foran hver rygfinne. Piggene har muligvis stået i forbindelse med nogle giftkirtler til forsvar. Den typiske Hybodus har en stor central spids omgivet af flere mindre spidser på hver side, og tænderne har emalje. Tænderne er ofte kraftigt furede og til tider udviklet som knusetænder. Nogle af formerne har endog haft spidse tænder i den forreste del af kæben og knusetænder i den bageste. I slutningen af Jura uddøde hele den marine del af Hybodus-slægten. Fra Mellem og Øvre Jura kendes en række andre marine hajslægter, som stadig eksisterer i nutidige have. Blandt de nye slægter kan nævnes: Seks/syv-gællede hajer (Notorhynchus, Hexanchus), Port Jacksonhajer (Heterodontus), Pighajer (Squalus), Skæghajer (Orectolobus), rokkellignende hajer (Squatina) og endelig tidlige rokker (Rhinobatider). Imidlertid fortsatte en gren af Hybodus-slægten i ferskvand. Ingen af de nye hajslægter fandtes på dette tidspunkt i ferskvand, og samtidigt var de Øvre Jurassiske floder og søer fyldt med fisk og mollusker (muslinger og snegle) samt krebsdyr. Hybodus-hajerne var derfor næsten enerådende som top på fødekædepyramiden i ferskvandet. Alt dette indebar, at der igen opstod nye Hybodus-slægter, specielt tilpassede til livet i floderne og søerne i Øvre Jura og Kridt.

Fra Nedre Jura kendes nogle få velbevarede fossiler af Palaeospinax. Denne form er en af de tidligste repræsentanter for de moderne hajer, der blev almindelige mod slutningen af Jura. Palaeospinax har ligesom Hybodus en pig foran hver rygfinne. Palaeospinax er blevet sammenlignet både med Hybodus og Ctenacanthus og noget kunne tyde på at de moderne hajer faktisk nedstammer fra Ctenacanthus-gruppen. Især grundige analyser af tænder og pigge afslører store ligheder mellem Palaeospinax og Ctenacanthus. Men det er et spørgsmål, hvorvidt indbyrdes slægtskab kan bevises alene på grundlag af pigge og tænder.

vet som "trekantede hudlapper" med en meget primitiv indre struktur. Imidlertid har nye undersøgelser (udført af S.E.Bendix-Almgreen på Geologisk Museum) vist, at den indre finnestruktur har mange lighedspunkter med den hos visse moderne hajer. Ved roden af den udvendigt symmetriske halefinne, er der to små, horisontale "køle", der sandsynligvis har virket stabiliserende ved hurtigsvømning. Samme form for halefinne findes idag hos store, hurtigt svømmende hajer og benfisk fra de åbne vandmasser, for eksempel sildehajer, tunfisk og sværdfisk. Cladoselache havde en stor, forholdsvis stump pig foran den forreste rygfinne og muligvis en lignende mindre pig foran den bageste rygfinne. Øjet var omgivet af en ring af specialiserede, skællignende hudtænder. Ringen har måske virket som beskyttelse mod de ofte skællede og piggede fisk, som Cladoselache har levet af. Hver overkæbehalvdel er forbundet til kraniet via tre



Figur 5. Rekonstruktioner af F = *Cladoselache fylei* (indre skelet og kropsomrids) og G = *Isurus punctatus* (nulevende, hurtigt svømmende rovhaj. Bemærk kølen ved haleroden). S.E.Bendix-Almgreen 1975.

På grund af forekomstens alder har der været en tilstrækkelig mængde Uran-235 (3%) til at opretholde en fissionsproces, se figur 1.

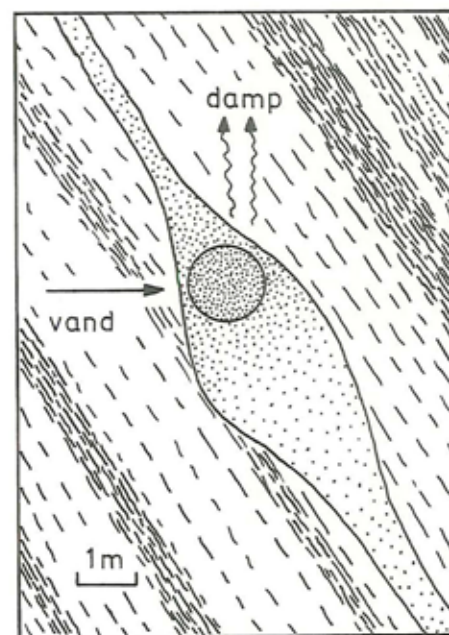
I de naturlige reaktorer ved Oklo har grundvandet fungeret som moderator.

De detaljerede kemiske undersøgelser af fordelingen af nedbrydningsprodukterne viser, at reaktoren har forbrugt cirka 25% mere Uran-235, end der oprindeligt var i forekomsten.

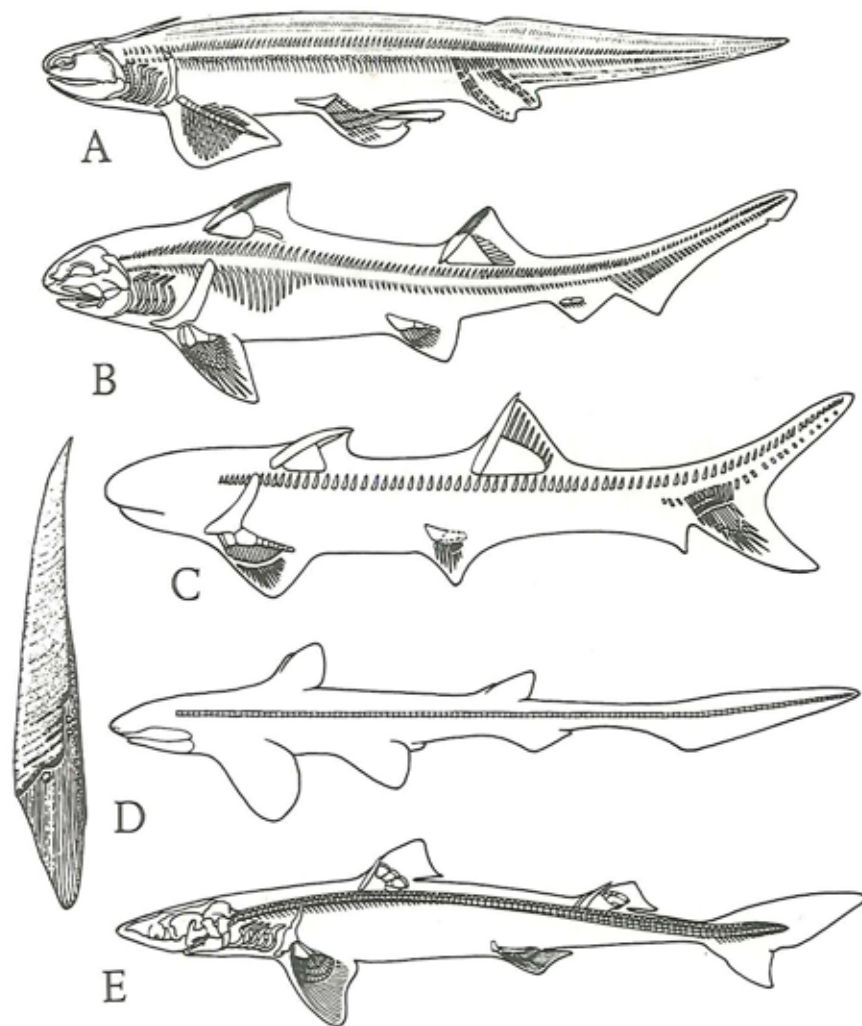
Den eneste sandsynlige forklaring på, hvorledes et sådant merforbrug kan opstå, er at der er foregået endnu en kernereaktion - se figur 7. Nogle neutroner er blevet indfanget af det tilstedeværende Uran-238, hvorved der er dannet Uran-239 som under udsendelse af en β -partikel (beta-partikel) er blevet omdannet til neptunium. Neptunium er ved udsendelse af β -partikler atter omdannet til plutonium. Plutonium (halveringstid på 24400 år) har udsendt α -partikler (alfa-partikler) og er derved omdannet til Uran-235. Naturen har altså selv været i stand til at anvende det dannede plutonium.

Beregninger viser, at reaktoren har udviklet en samlet energi på 15000 Megawatt-år svarende til forbruget af cirka 6 tons Uran-235, eller til produktionen i et stort atomkraftværk i 4 år.

Den omstændighed at næsten alt det dannede plutonium er omdannet til Uran-235 viser, at reaktoren har været i drift i flere gange plutoniums halveringstid (24400 år) sandsynligvis i mere end 100000 år. Den har i dette tidsrum haft varierende effekt og muligvis periodevis været helt stoppet. Udviklingen af den totale energi over et så langt tidsspand var iøvrigt en forudsætning for at



Figur 6. Skematisk lodret snit gennem en Oklo-reaktor. Med stregsignatur er vist diverse sandsten, mens prikssignatur viser uranmineraliseringen (tættere prikning = højere koncentration). Reaktionen kunne kun ske, hvor uran-koncentrationen var over 10%. Reaktorzone er vist med en cirkel. Da uranåren er mere end 0,5 m tyk, er de langsomme neutroner blevet indfanget af indholdet af Uran-235 inden de nåede ud i sidestenen. Grundvandet fungerede som moderator, og når temperaturen i reaktoren nåede vandets kogepunkt, fordampede noget af vandet til der var balance mellem varmeafgivelse til omgivelserne og varmen fremkommet ved reaktorprocessen.



Figur 2. Rekonstruktioner af fossile hajer og nogle nulevende. A = *Xenacanthus sessilis*. B = *Hybodus hauffianus*. C = *Ctenacanthus costellatus*. D = *Palaeospinax* sp. og pig af samme. Bemærk ligheden med *Squalus piggene*. E = *Squalus* sp. nulevende pighaj.
(Figurer fra Schaeffer og Williams 1977, Maisey 1975).

HVAD HAR VI LÆRT AF OKLO-REAKTOREN ?

Ved den naturlige kædeproces i Oklo blev som nævnt dannet de samme reaktionsprodukter som dannes i de menneskeskabte reaktorer. Studiet af Oklo-reaktoren giver os derfor en enestående lejlighed til at studere produkternes opførsel efter deres dannelse, herunder transport til omgivelserne. Detaljerede undersøgelser viser, at mindst halvdelen af de 30 dannede spaltningsprodukter er blevet tilbageholdt i selve malmlegemet - det gælder flere sjældne grundstoffer som lanthan, cerium, praseodym, neodym, europium, samarium, gadolinium og yttrium. Det meste eller alt zirconium, ruthenium, rhodium, palladium, niobium og sølv samt noget molybdæn og jod er ligeledes forblevet i malmlegemet.

I reaktoren er tilmed påvist opståede gasser som den inaktive krypton og xenon. De stoffer, der er relativt let opløselige i vand, er derimod i stor udstrækning transporteret væk - det gælder det dannede rubidium, caesium og barium. Tilsyneladende er der kun fjernet lidt Strontium-90 fra malmlegemet. Man har ikke uden for malmlegemet kunnet påvise et forøget indhold af Uran-235, der kunne være et omdannelsesprodukt af plutonium (se figur 7), og derfor må alt plutonium dannet under reaktorprocesserne være blevet i malmlegemet. Derimod er noget af det dannede bly, som er et slutprodukt i den radioaktive nedbrydning af uran, blevet fjernet. Det må dog tilføjes, at de kemiske undersøgelser endnu ikke er afsluttet for alle grundstoffer.

FINDES DER FLERE FOSSILE REAKTORER?

Som vist ovenfor må følgende betingelser være opfyldt for at få en radioaktiv "kædereaktion" til at foregå:

1. Passende stort indhold af Uran-235 i forhold til Uran-238.
2. Tilstrækkelig stor koncentration af uran, mindst cirka 10%.
3. "Moderator" i naturen, som regel i form af grundvand.
4. Passende form af malmlegemet så de igangsættende neutroners vej er kort sammenlignet med forekomstens dimensioner.
5. Forekomsten skal selvsagt desuden være gjort tilgængelig i dag gennem en passende erosion af dæklagene.

De opstillede betingelser kan være til stede flere steder - for eksempel i Canada og Australien.

Detaljerede undersøgelser af uranisotopforholdet i sedimentære aflejringer i Colorado-plateauet i USA har vist et Uran-235 underskud på 0,03%. Underskuddet kan muligvis skyldes en senere rent kemisk adskillelse i det specielle miljø? En anden mulighed er, at en del af uranet her stammer fra en naturlig atomreaktor som Oklo.

Selvom uranet i en forekomst skulle være fjernet, kan detaljerede kemiske studier af blandt andet fordelingen af de sjældne metaller afsløre tidligere reaktorer.

KAN NATURLIGE REAKTORER DANNES I DAG?

Svaret må umiddelbart blive nej, hvis alle de anførte betingelser skal være opfyldt. Det vil derfor ikke være muligt at få dannet almindelige 'letvandsreaktorer' på grund af, at forekomsternes indhold af Uran-235 i forhold til Uran-238 nu er for lavt (sammenlign med figur 1).

Som nævnt skulle der dog være en teoretisk mulighed for at få omdannet en del af Uran-238 til plutonium, der kan videreomdannes til Uran-235, som derved kan blive opkoncentreret. Men det vil kræve et samspil af så mange faktorer, at det næppe vil være praktisk gørligt.

Selv om det nu antages, at naturen idag ikke er i stand til at ændre uranets isotopforhold, kan man vel ikke se helt bort fra den mulighed, at det vil kunne lade sig gøre under helt specielle forhold.

Varmt porevand

af Edmund Gosk, Lise Holm og Søren Priisholm

Problemstillingen omkring udnyttelsen af geotermisk energi har tidligere været beskrevet i Varv (1975-1, 1978-4, 1979-2). Her vil vi definere og beskrive de fysiske faktorer, som er af vigtighed for udnyttelsen af geotermisk energi fra aflejringerne, samt give en kort gennemgang af de metoder, der anvendes til at bestemme disse faktorer.

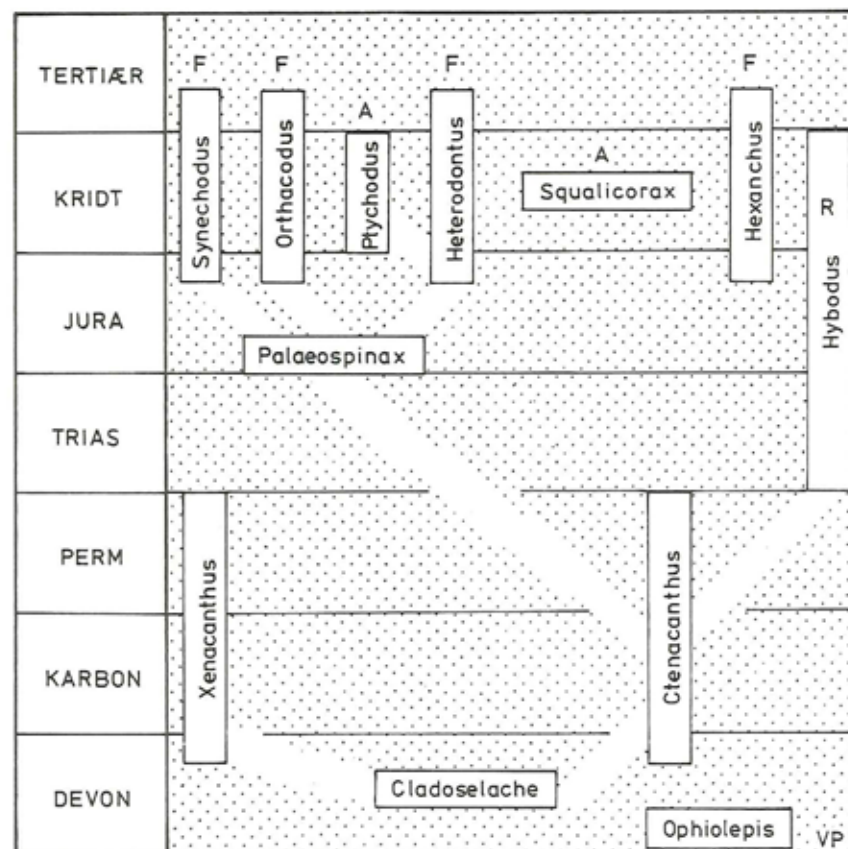
Den danske undergrund består hovedsagelig af sedimenter af varierende tykkelse, og det er overvejende dem der har interesse i forbindelse med udnyttelsen af geotermisk energi. Det er dog de færreste sedimentære bjergarter, der kan fungere som egentlige reservoirer og dermed være egnede til geotermisk udnyttelse. Geotermiske reservoirer skal have en forholdsvis stor udbredelse og en passende tykkelse for at indeholde en tilstrækkelig stor energimængde i form af det indeholdte varme vand. Dernæst skal porerne i aflejringerne tillade en nogenlunde fri gennemstrømning af vand, og sidst, men ikke mindst, skal temperaturen af vandet i reservoiret være tilstrækkelig høj.

RESERVOIR-FAKTORER

Reservoirets ydeevne kan defineres som den energimængde, der kan produceres indenfor et givet tidsinterval. Ydeevnen afhænger af temperaturen, væskemængden i bjergartens porer, samt af strømningsmodstanden i reservoiret.

TEMPERATUR

Temperatur måles direkte i borehullet. Som regel skal temperaturen korrigeres hvis målingerne er udført kort efter borearbejdets afslutning, da cirkulation af boremudder forinden har nedkølet de gennemborede lag. Bjergartens energiindhold er proportional med temperaturen.



Figur 1. Skema visende den tidsmæssige udbredelse af nogle af hajerne omtalt i teksten. De antydende linier viser et formodet slægtskab, men bør ikke betragtes som egentlige nedstammingslinier. Danske fund: R = Robbedale. A = Arnager. F = Fakse.

En anden af de bedre kendte tidlige hajer er den 0,5 - 2 m lange Cladoselache, som blandt andet er fundet i konkretioner fra Øvre Devon skifer i Ohio. Bevaringstilstanden er i nogle tilfælde helt ekceptionelt god. Således kendes både aftryk af hud og kropsomrids, spor af bløddele som for eksempel muskelfibre samt forkalket brusk skelet og tænder. Cladoselache ligner meget de nulevende hajformer - kroppen er næsten torpedoformet, brystfinnerne er store og brede, og halefinnen er stor og kraftig. Brystfinnerne er ofte blevet beskrevet

GAMLE HAJER

af Thomas Blume

Inden for dyreverdenen er der flere dyregrupper, der udmærker sig ved at have eksisteret i næsten uændret form over ganske betydelige tidsrum. Eksemplerne er talrige. Man kan for eksempel nævne trilobiterne, der levede fra Nedre Kambrium til Øvre Perm, eller de kvastfannede fisk, der kendes fra Devon og som i dag er repræsenteret af "den blå fisk" (Latimeria) ved Madagaskar. Endelig nautil-blæksprutterne, hvor former nært beslægtet med den nulevende Nautilus, kendes tilbage til Devon. De tre nævnte grupper har således eksisteret i omkring 400 millioner år.

Hajerne er, som vi senere skal se, et udmærket eksempel på en sådan "konservativ" dyregruppe. Her ser vi nærmere på deres udviklingshistorie, blandt andet illustreret ved nogle meget gamle hajer, som dog ikke kendes fra Danmark, og ved nye spændende fund fra Øvre Jura og Nedre Kridt-aflejringer på Bornholm samt fra Danienkalk fra Fakse. Nogle af slægterne findes den dag i dag.

De ældst kendte spor af hajer stammer fra Nedre Devon i form af meget små skællignende hudtænder, som alle hajer, såvel fossile som nulevende har indbygget i huden, og de har fået navnet *Ohiolepis*. Hajernes udviklingshistorie kan således følges mere end 400 millioner år tilbage i tiden. Fra Mellem Devon kendes "rigtige" kæbetænder, såkaldte "Cladodonte" tænder, hvilket vil sige tænder, som mangler emalje, og som ofte har en stor, central tandspids omgivet af et varierende antal mindre spidser. Andre hajer med typiske "Cladodonte" tænder kendes også fra Karbon, Perm og Trias.

En tidlig sidegren på hajernes stamtræ er *Xenacanthus*-gruppen, som kendes fra Øvre Devon til Trias. Udover fund af tænder kendes også rester af skelet. Kroppen var langstrakt og rygfinnen, der udgør en lang bræmme, går direkte over i halefinnen, hvilket giver denne haj et næsten åleagtigt udseende. *Xenacanthus*-gruppen udmærker sig også ved at have to gatfinner, hvilket ikke kendes hos andre hajer. Bryst- og bugfinner er store og bladformede - gode styredskaber. Øverst bagtil på kraniet er der en lang, nåleformet pig, der muligvis var bevægelig. Tænderne der er af den "Cladodonte" type, har en lille central spids omgivet af to store tandspidser. Ydermere er der en lille "pukkel" nederst ved roden, der låser tandrækkens enkelte tænder sammen. Som hos de nulevende hajer groede tænderne i rækker på indersiden af kæberne. Denne form for tandskift medfører, at kun de yderste, helt færdigdannede tænder er i brug. Efterhånden som tænderne slides eller ødelægges, udskiftes de med de næste tænder i rækken. Hos nulevende hajer producerer "tandsamlebåndet" en færdig tand fra hvert 6 - 24 døg.

Hele *Xenacanthus*-gruppen er udelukkende ferskvandsfisk, i modsætning til de fleste andre hajgrupper. Den åleformede krop hos de op til 75 cm lange *Xenacanthus*-hajer tyder måske på, at de ikke har været udholdende og hurtige svømmere, men snarere har fanget deres bytte ved pludselige bagholdsangreb.

KORNRELATION		PORØSITET	PERMEABILITET
Store, løstpakkede		48 %	høj
Små, løstpakkede		48 %	moderat lav
Små, tætpakkede		26 %	lav
Løstpakkede vel-sortede, velafrundede		høj	høj
Tætpakkede, dårligt sortede, uafrundede		lav	lav

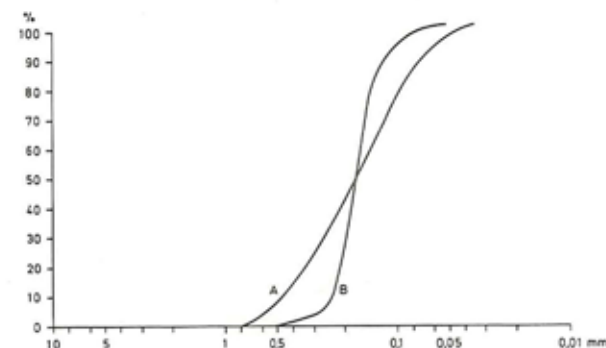
Figur 1. Porøsitet og permeabilitet er afhængig af kornstørrelse, sorterings- og afrundingsgrad samt pakning.

PORØSITET

Porøsitet defineres som forholdet mellem porerumfang og total bjergartsrumfang. Jo større porøsiteten er jo mere (varmt) vand kan bjergarten indeholde.

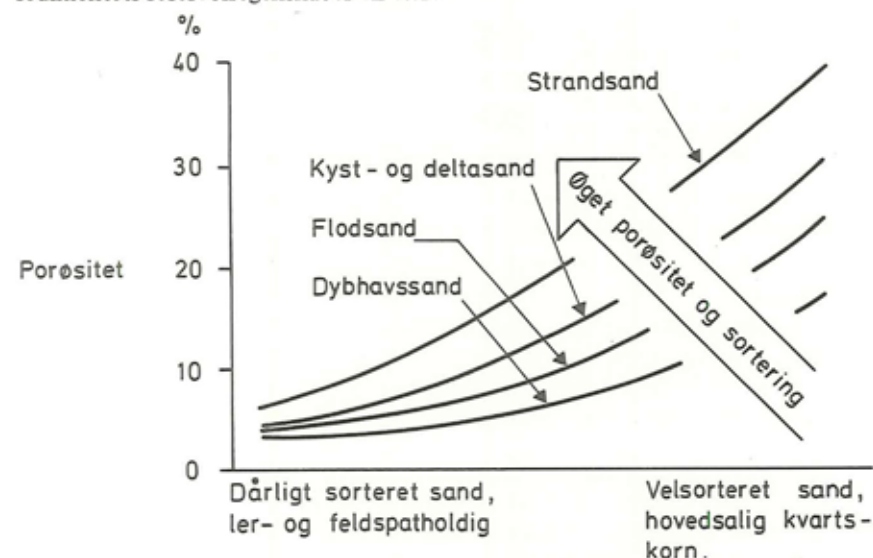
Porøsiteten i reservoiret afhænger af mange faktorer, blandt andet bjergartens kornstørrelsesfordeling, aflejningsmiljø og graden af cementering eller opløsning.

Figur 1 viser, at porøsiteten er uafhængig af kornenes størrelse, men påvirkes stærkt af hvorledes kornene er pakket. I naturen er sandkornene næsten altid af forskellig størrelse. Hvis der er stor variation i kornstørrelsen formindskes porøsiteten, fordi små korn udfylder hulrummene mellem de større. Kornstørrelsens variation ses af sedimentets kornfordelingskurve (figur 2). Jo stejlere kurven er, jo bedre er sedimentet sorteret, og jo større er porøsiteten.



Figur 2. Kornfordelingskurver for to sandprøver. De har samme middeldiameter, d_{50} , men prøve A indeholder korn af meget forskellig størrelse, mens de fleste af prøve B's korn er af næsten samme størrelse. A-sandet er dårligt sorteret, B-sandet velsorteret.

Sedimenternes aflejningsmiljø har ofte betydning for porøsiteten, idet nogle kornegenskaber er karakteristiske for et givet aflejningsmiljø. Samspillet mellem aflejningsmiljø, porøsitet, sortering og mineralogisk modenhed er illustreret i figur 3. Kendes sedimentets aflejningsmiljø og placering i forhold til det oprindelige bassins tilførselsområde, vil det være muligt at sandsynliggøre hvorledes sedimentets reservoiregenskaber vil være.

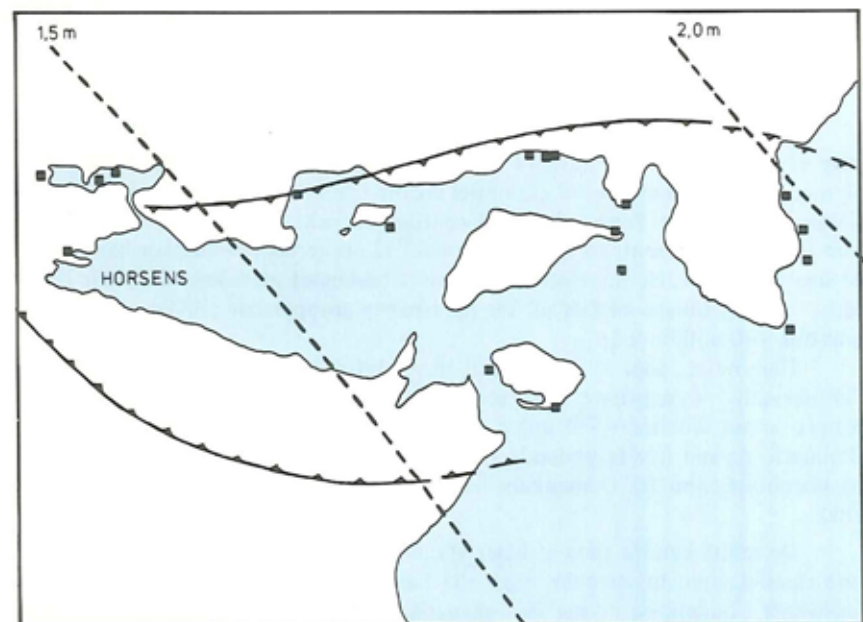


Figur 3. Ud fra petrografiske undersøgelser og tolkning af sedimentets aflejningsmiljø er det muligt at forudsige reservoirets porøsitetsforhold (efter Selley 1976).

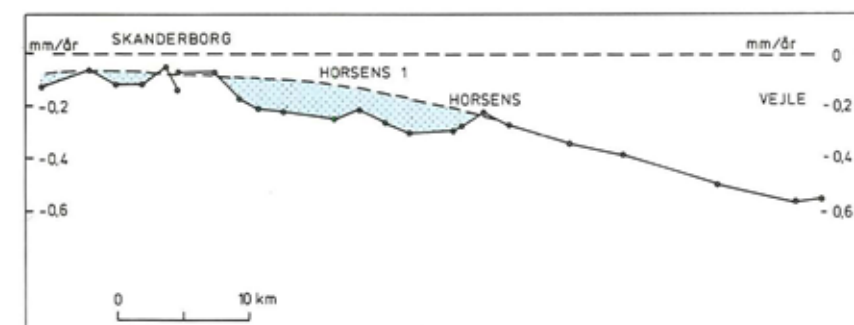
I naturen foregår der efter aflejringen forskellige processer, som har indflydelse på sedimentets porøsitet. Efterhånden som sedimentet bliver dækket af andre bjergarter, vil belastningen bevirke en sammenpresning af sedimentet, hvorved porøsiteten bliver mindre. Samtidig kan der foregå en kemisk udfældning af kisel eller kalkspat i porerummene eller en nedbrydning af de mindst stabile mineraler. Det kan for eksempel være omdannelse af feldspatkorn til lermineraler. Alle disse processer vil give en forringelse af porøsiteten, se figur 4.

Mens sammenpresning og kemisk udfældning nedsætter reservoirets porøsitet, kan andre processer omvendt føre til dannelse af en forøget sekundær porøsitet, for eksempel gennem opløsning af kalksten eller opsprækning af bjergarten.

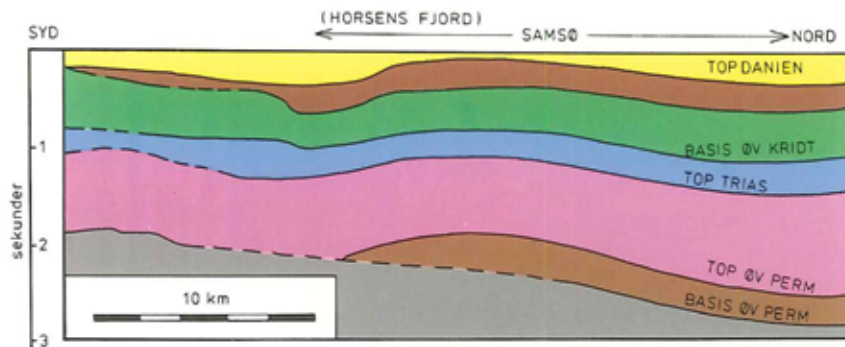
Hidtil er udelukkende beskrevet porøsitet uden relation til reservoirets dynamik. Det er imidlertid den effektive porøsitet - forholdet mellem volumen af indbyrdes forbundne porer og det totale bjergartsvolumen - der har hovedinteresse i forbindelse med vandets bevægelse i et porøst medium, fordi strømmingen kun kan finde sted gennem porerne. Den effektive porøsitet er således afgørende for permeabiliteten i reservoiret.



Figur 4. Stenalderbopladser i Horsens Fjord er markeret med kvadrater efter Søren H. Andersen. De takkede linier angiver forkastninger, som ifølge J.C. Baartman er konstateret ved basis af skrivekridtet. De stiplede linier angiver den normale landhævning siden stenalderen (efter E.L. Mertz).



Figur 5. Landoverfladens sænkningshastighed mellem Skanderborg og Vejle efter Geodætisk Instituts præcisions-højdemålinger. Med priksignatur er fremhævet områder med ekstraordinært store sænkningshastigheder. (Modificeret efter O. Bedsted Andersen m.fl. 1974).



Figur 3. Tværsnit af undergrunden tegnet på grundlag af et seismisk profil langs Samsø's vestkyst. (Det seismiske profil er venligst stillet til rådighed af DGU).

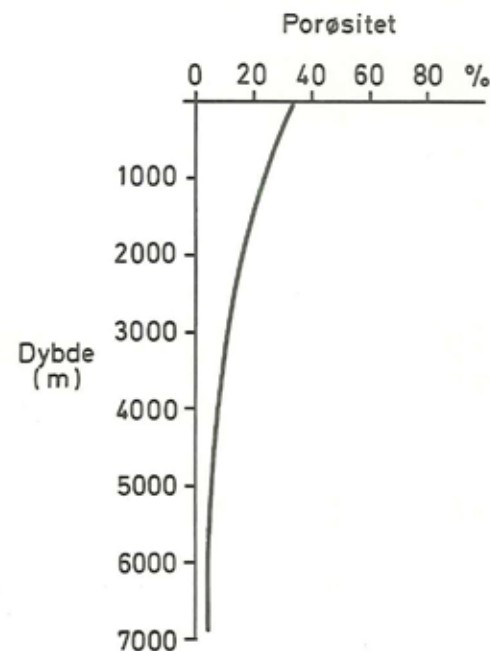
Her er registreret et stort antal bopladser, hvoraf nogle er indtegnet på figur 4. Det drejer sig om cirka 5000 år gamle kystbopladser. Man skulle tro, at bopladserne, som følge af landhævnningen, nu var at finde på tørt land et stykke inden for kystlinien. Men tværtimod finder man dem helt eller delvis under vand ude i fjorden. Det må betyde, at selve Horsens Fjord området har sænket sig mindst 1,5 - 2 m i forhold til omgivelserne inden for de sidste ca. 5000 år.

Sænkningstendenser synes også at kunne konstateres i Geodætisk Instituts præcisionshøjdemålinger langs hovedvej 10, figur 5. Målingerne, som er foretaget med cirka 50 års mellemrum viser, at landet generelt synker på strækningen mellem Skanderborg og Vejle, men at sænkningshastigheden omkring Horsens er cirka 0,1 mm større per år end det normale for området.

Betragter man igen kortet figur 1, ser man, at kalken danner en trugagtig fordybning netop under Horsens Fjord. Det samme gælder for dybere liggende laggrænser, som det ses af figur 3 og iøvrigt også af kortet i figur 4, hvor der er indtegnet to forkastningslinier, imellem hvilke undersiden af skrivekridtet ligger dybt nedsænket. Det angiver, at sænkningen ikke bare er et overfladisk fænomen, men at den må betragtes som et resultat af bevægelser i den dybere undergrund.

Om årsagerne til disse bevægelser kan der på nuværende tidspunkt kun gisnes. Som en mulighed kan tænkes, at indsynkningen er forårsaget af, at Perm-saltet bevæger sig ind mod den saltstruktur, som findes umiddelbart nord for fjorden. En anden mulighed er, at stensaltet kan være fjernet ved opløsning i cirkulerende grundvand. Endelig er en tredje mulighed, at indsynkningen står i forbindelse med forkastningsdannelser i grundfjeldet langs nordflanken af Ringkøbing-Fyn-ryggen.

De særlige forhold omkring Samsø og Horsens Fjord, synes at give et tydeligt fingerpeg om, at undergrunden og tektoniske kræfter må tages i betragtning, når man søger at udrede de overfladenære aflejrings geologi. Endnu engang har det vist sig, at man skal være varsom med helt at glemme gamle teorier, når nye dukker op.



Figur 4. Porøsiteten af sandsten aftager med dybden. Dette skyldes i al væsentlighed cementering.

PERMEABILITET

Permeabilitet er et mål for strømningsmodstanden i et porøst materiale. Stor permeabilitet er ensbetydende med lille strømningsmodstand. Det er især gnidningsmodstanden, der har betydning for den totale strømningsmodstand, og derfor vil ikke alene den effektive porøsitet, men også porenes absolutte størrelse spille en rolle for permeabiliteten. Som hovedregel gælder, at jo mindre kornstørrelse og jo dårligere sortering, des mindre porestørrelse og dermed ringere permeabilitet (figur 1). Især vil selv et lille lerindhold i et sediment have betydning ved at tilstoppe porerne og dermed nedsætte permeabiliteten og dermed reservoires produktivitet.

HVORDAN BESTEMMER MAN RESERVOIREGENSKABER?

Indtil nu er defineret porøsitet og permeabilitet. I det følgende beskrives hvorledes disse egenskaber bestemmes ved hjælp af laboratorie- og feltundersøgelser. Laboratoriebestemmelser gennemføres på borekerner. Feltundersøgelser består af forskellige fysiske målinger (logs) og prøvepumpninger i borehullet.

LABORATORIEMETODER

Porøsitet kan bestemmes på to måder, for eksempel ved under højt tryk at fylde bjergartens porer med kviksølv og måle det indpressede volumen.

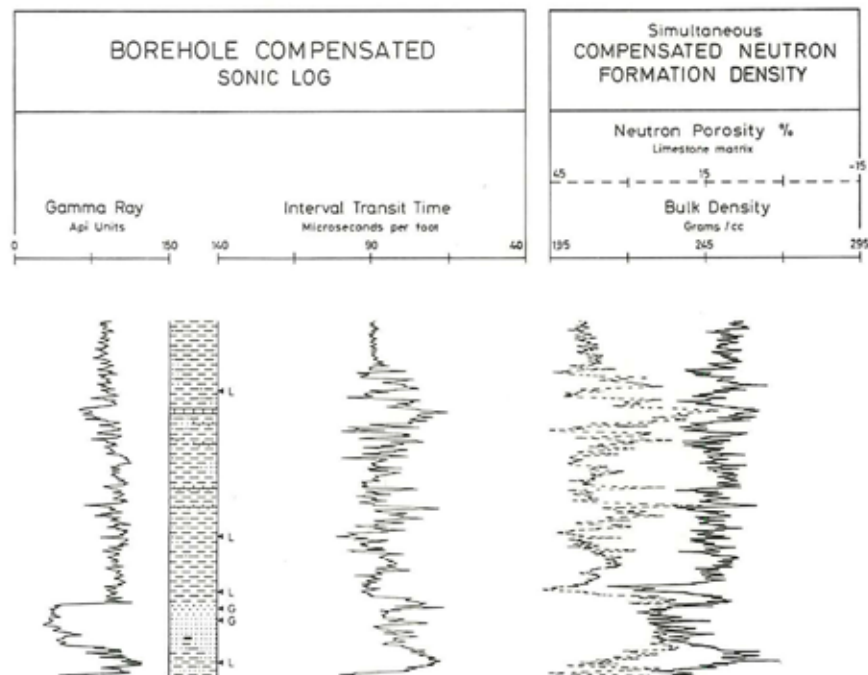
Permeabiliteten bestemmes ved, at en gasart under tryk sendes gennem kernestykket og trykfaldet måles. Permeabiliteten kan beregnes ud fra det tryk, der er nødvendigt for at presse en bestemt gasmængde igennem prøven, idet dette er et mål for sedimentets strømningsmodstand. I laboratorieundersøgelsen bruges luft i stedet for vand, og dermed skal der ved beregningerne tages højde for luftens sammentrykkelighed og for det forhold, at luftmolekyler bevæger sig anderledes gennem bjergartens porer end væske.

De to ovennævnte metoder kræver, at man analyserer kerner eller andre typer af prøver fra reservoiret, og prøverne må derfor skaffes under selve boringens forløb.

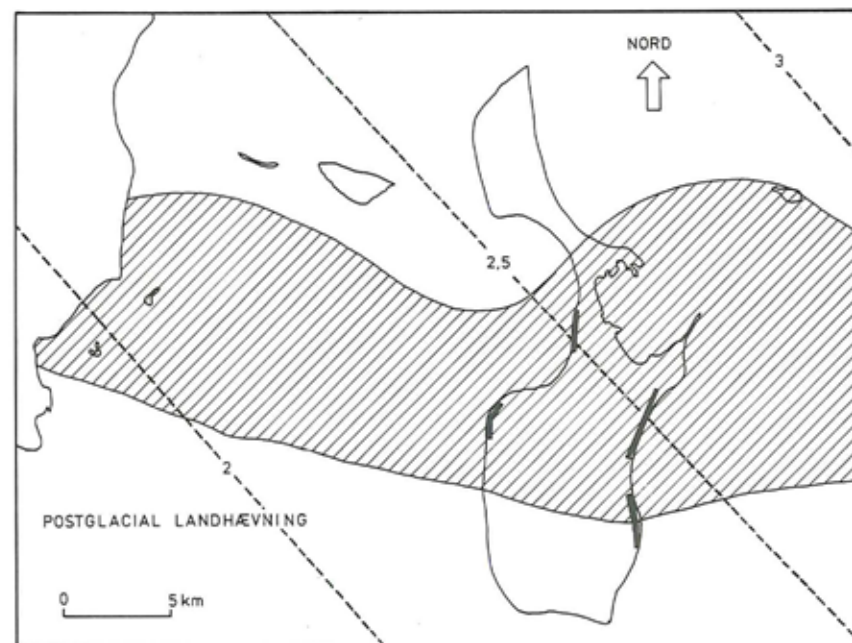
METODER I BOREHULLER

Sedimentets porøsitet kan også fastlægges gennem tolkning af fysiske borehulsmålinger. Denne metode har visse fordele fremfor de to forrige, idet der dels er tale om en kontinuert registrering af bjergartsegenskaber som funktion af dybden, og dels om måleresultater, der kan benyttes til blandt andet lithologisk tolkning (figur 5) og sammenligning med andre borer. Porøsiteten kan bestemmes fra tre forskellige "logs", sonic-, density- og neutron log (de engelske betegnelser er blevet almindelige i dansk geologisk faglitteratur).

Sonic log registrerer en lydbølges forplantningshastighed i reservoiret. Da de faste partikler og væsken, der udfylder porerummene, giver forskellige forplantningshastigheder, vil reservoiret være karakteriseret ved en hastighed, der ligger et sted imellem de to yderpunkter, afhængig af porøsiteten. Denne log-type er egnet til bestemmelse af primær porøsitet.



Figur 5. Lithologisk tolkning baseret på petrofysiske målinger. Sandlaget nederst i lagserien har en opad tiltagende kornstørrelse og aftagende lerindhold. Dette medfører en opad stigende porøsitet fra 18 til 25% (efter Priisholm & Michelsen 1978). De ovenstående begreber er forklaret i teksten. Se iverigt Varv 1, 1979.



Figur 2. De sorte områder på Samsø angiver kyststrækninger, hvor der findes tegn på en unormal stor landhævning siden stenalderen. Den normale hævnning er angivet med stiplede kurver. Efter E.L.Mertz. Det skraverede område viser, hvor kalken ligger mindre end cirka 100 meter under havniveau.

På figur 1 og 2 ses, at de stærkt hævede kyststrækninger befinder sig inden for et område, hvor kalken hvælver sig op mod jordoverfladen til dybder på mindre end 100 m. Dette sammenfald peger på, at de kræfter, som har presset kalken op, også har været virksomme siden stenalderen. Hvilke kræfter er det da som får det lille område til at hæve sig hurtigere end omgivelserne?

Svaret synes at kunne findes i det seismiske profil, som er vist i figur 3. Under Samsø findes saltaflejringer fra Øvre Perm (Zechstein), vist med brun farve. Desuden hvælver alle laggrænser, som ligger højere end saltet, sig op netop under den sydlige del af Samsø. Det ser altså ud til, at den ekstraordinært store hævnning skyldes begyndende dannelse af en saltstruktur under Samsø.

HORSENS FJORD

Horsens Fjord ligger inden for den del af landet, der er hævet siden stenalderhavets tid. Figur 4 viser, at man regner med en hævnning på 1,5 - 2 meter.

Da teorien om Danmarks nedisning blev accepteret for godt hundrede år siden skete der radikale ændringer i opfattelsen af disse kræfter og man nåede frem til de nuværende anskuelser, nemlig at landhævningen er jordskorpens reaktion på den nedtrykning, der fandt sted da indlandsisen dækkede Skandinavien, og at de lokale forstyrrelser af lagene er forårsaget af indlandsisens bevægelser hen over landet.

I de senere år er der fundet tegn på, at tektoniske kræfter alligevel spiller en vis rolle i forbindelse med de omtalte fænomener, og her skal nogle af disse tegn omtales.

SEISMISKE UNDERSØGELSER I KATTEGAT

I 1976 blev der foretaget en seismisk undersøgelse blandt andet i den sydlige del af Kattegat. Undersøgelsens formål var at kortlægge dybden til den forholdsvis hårde kalk, der i dette område danner underlaget for de blødere ler-aflejringer fra Tertiær. Kalken, som blev aflejret i Danien (ældste Tertiær), kendes for eksempel fra kystklinerne nord for Grenå og på Stevns.

På grundlag af de seismiske målinger var det muligt at tegne et ret detaljeret billede af kalkoverfladens relief, som det er vist på dybdekortet, figur 1.

Som man kan se, er dybden meget varierende. Dybest ligger kalken i et nordvest - sydøst gående strøg fra Jyllands-kysten mellem Horsens Fjord og Århus til Nordvestsjælland's kyst, hvorfra det fortsætter på land til Korsør-Ringsted-kanten. Desuden bemærkes en dyb rende, som løber ned i Store Bælt til omkring Korsør.

Under Fyn ligger kalken forholdsvis tæt på overfladen, mens den igen ligger dybere syd for Fyn.

Det mønster afspejler ganske nøje de hovedstrukturer, som er kendt i den dybere undergrund, hvor en bred grundfjeldsryg - den såkaldte Ringkøbing-Fyn-ryg - adskiller det danske og det nordtyske aflejringsbassin.

De store forskelle i dybden til kalkens overflade fortæller, at der er sket bevægelser i den dybere undergrund i tiden efter Danien. I det følgende skildres nogle forhold, der synes at vise, at en del af disse bevægelser har fundet sted efter istiden og endda helt frem i vore dage.

SAMSO

Langs Samsø's kyster findes der mange steder højtliggende kystskrænter og strandvolde, der vidner om, at havet engang har skyllet højere op på øen end i dag. Dette passer med, at Samsø har taget del i den landhævning, som blev omtalt indledningsvis. Det bemærkelsesværdige er, at hævnningen på den sydlige del af Samsø er betydelig større end man ville forvente, når man sammenligner med hævnningen i Jylland, på Fyn og på Sjælland. I figur 2 er indtegnet de kyststrækninger, hvor hævnningen har været størst, nemlig 1 - 1,5 m mere end den "normale", der beløber sig til cirka 2,5 m. Desværre findes der ingen dateringer, som kan fortælle, hvornår hævnningen er begyndt. Indtil videre må de højere kystlinier skønnes at være dannet, da stenalderhavet stod på sit højeste, for cirka 5000 år siden.

Density log registrerer formationens elektron-tæthed. For almindeligt forekommende materialer er elektron-tætheden proportional med massefylden. Da kornskelettets massefylde er cirka 2,5 gange større end vandets, kan den målte massefylde bruges til bestemmelse af vandindholdet og dermed porositeten.

Neutron log registrerer antallet af "langsomme" neutroner pr. tidsenhed. En neutronkilde udsender højenergi neutroner der kolliderer med nærliggende atomkerner. Hvis neutronen rammer en partikel med nogenlunde samme masse (en brintkerne) bliver den bremset og kan betegnes som en "langsom" neutron. Processen er forbundet med udsendelse af γ -stråling. Den totale porositet kan enten bestemmes ud fra antallet af langsomme neutroner eller fra γ -strålingsintensiteten.

Flere forskellige typer logs kombineres for at øge nøjagtigheden af de fremkomne resultater.

Feltmetoden til bestemmelse af permeabilitet bygger på en prøvepumpning (som regel med konstant vandmængde pr. tidsenhed). Prøvepumpningens varighed kan være fra timer til adskillige måneder. Pumpningen bevirker en sænkning af den lokale vandsojle.

Ud fra en afbildning af sænkingsresultaterne kan permeabiliteten beregnes. Der vil være tale om en slags gennemsnitlig permeabilitet for det prøvepumpede interval. Prøvepumpning af længere varighed kan udover permeabilitetsbestemmelse anvendes til en vurdering af reservoirets udbredelse, hvilket har stor betydning ved vurderingen af reservoirets produktivitet og levetid.

MATEMATISK RESERVOIRMODEL

Laboratorieundersøgelser giver information om reservoirets egenskaber i umiddelbar nærhed af borehullet. Prøvepumpningsforsøg kan give en grov information om, hvor uensartet reservoiret er, samt i hvilken afstand fra boringen der sker en væsentlig ændring af reservoirets egenskaber. Hvis man har andre borer end pumpeboringen er man i stand til at skønne, hvordan den geografiske fordeling af permeabiliteten er. Dette skøn suppleres med geologiske oplysninger. Alle de tilgængelige data anvendes til opbygning af en matematisk model af reservoiret. Da sænkingsberegninger for en sådan model er meget tidskrævende, anvendes EDB-metoder til matematisk simulering af reservoiret. Matematisk simulering går i dette tilfælde ud på, via beregninger at gentage det registrerede sænkingsforløb i borerne. Det kan gøres ved justering af permeabiliteter i reservoirmodellen.

GASSUM FORMATIONEN -

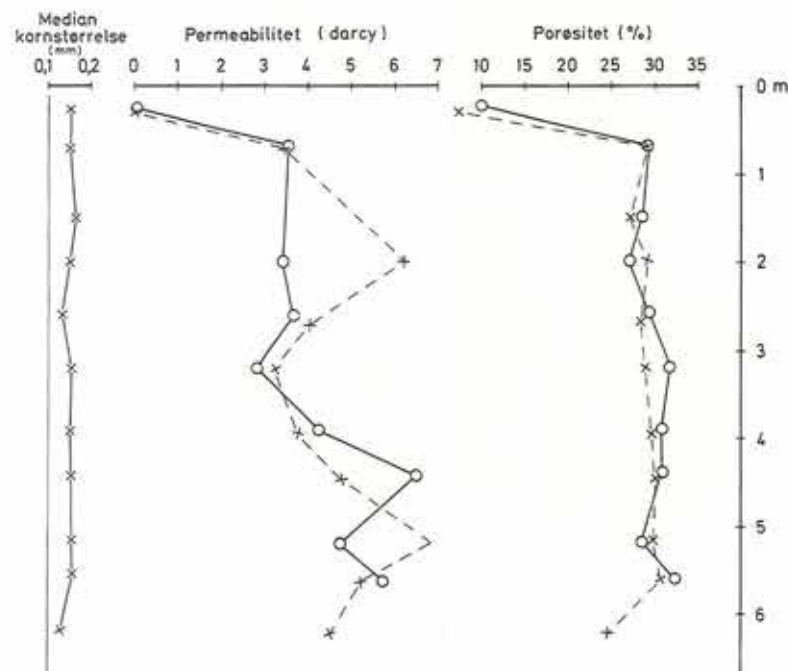
EKSEMPEL PÅ ET MULIGT DANSK RESERVOIR

Denne formation er beskrevet i Varv nr. 2, 1979. Den består af sandsten med lerede og siltede indslag. Ler- og siltlagene har på grund af meget ringe permeabilitet ikke interesse i geotermisk sammenhæng. Sandstenslagene er fin- til mellemkornede og velsorterede (prøve B i figur 2 er fra Gassum Formationen).

Sammenpresningen af bjergarten er ringe, og der er kun sket cementering af betydning i den øverste del af sandstenslagene. Forholdene tyder på gode reservoir egenskaber, og det er blevet bekræftet ved laboratorieundersøgelser af porøsitet og permeabilitet på kernemateriale samt porositetsberegninger ud fra logs.

Laboratorieundersøgelser af det mest lovende sandstenslag viser porositetsværdier på 25-30% og en permeabilitet på cirka 3 Darcy (figur 6). Logberegninger fra flere borer giver en gennemsnitlig porøsitet på cirka 25%. Prøvepumpninger viser resultater på 0,5-3 Darcy. Gassum Formationen er vidt udbredt i Danmarks undergrund og har en tykkelse på op til 200 m (se Varv nr. 4, 1978, figur 4, side 112). I de gunstigste områder ligger formationen i cirka 3 km's dybde, hvor temperaturen er cirka 90°.

Gassum Formationen er, vurderet på denne baggrund, et lovende geotermisk reservoir. Det første danske geotermiske projekt (i Aars) sigter da også mod udnyttelse af denne formation.



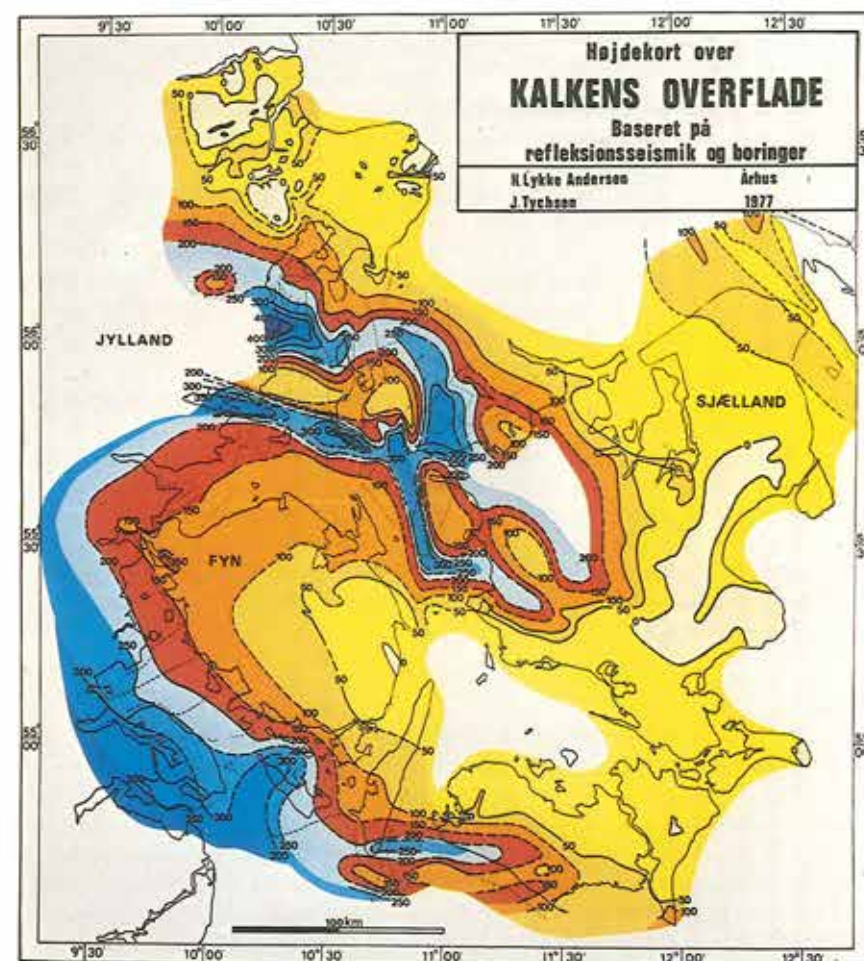
Figur 6. Porøsitet- og permeabilitetsværdier fra laboratorieundersøgelse af sandstenskerne fra Gassum Formationen. Darcy er en måleenhed for permeabilitet baseret på hastigheden af passage af 1 cm³ vand ved 1 atmosfæres tryk gennem et porøst medium med tværsnitsarealet 1 cm² og højde 1 cm. Toppen er kalkspatcementeret, hvilket tydeligt afspejles i de målte værdier. Vertikal porøsitet og permeabilitet er markeret med cirkler, horisontal med stjerner (efter Holm & Priisholm 1978).

af Holger Lykke Andersen

Siden begyndelsen af forrige århundrede har det været kendt, at nordøst for en linie fra Nissum Fjord over Fyn til Falster har Danmark siden istiden hævet sig i forhold til det nuværende havniveau.

Inden man havde godtaget istidsteorien, opfattede man denne landhævning, der var en del af "det store skandinaviske Hævningsphænomen", som et direkte udslag af geologiske kræfter i Jordens indre.

Det var kræfter af lignende art - tektoniske kræfter i undergrunden - som blev anset for at være årsag til de forstyrrelser, der kan iagttages inden for de overfladenære aflejringer.



Figur 1. Kort over kalkens overflade. På kurverne angives dybden til kalkoverfladen i meter under havniveau. Hver farve svarer til dybdeintervaller på 50 m.