



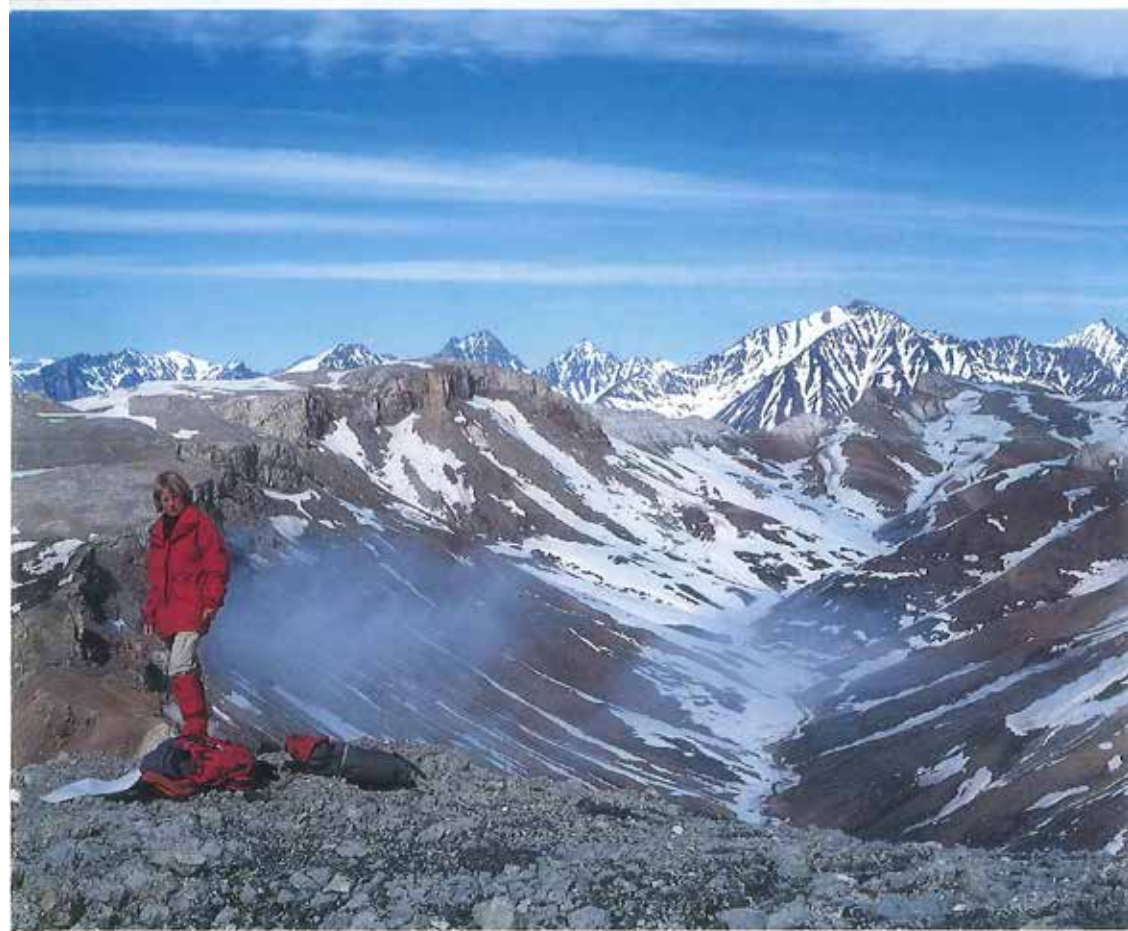
Billeder fra bogen "Grønlands Geologiske Udvikling".

VARV

NR. 3

BLADET MED DE ÆLDSTE NYHEDER

2005



SVOVLISOTOPER GUDDOMMELIGE SPIRALER

ISSN 0105 - 6301

05- 01 - 2006

Forsidebillede:

Udsigt over Karstryggen området i den vestlige del af Jameson Land i Østgrønland. Kalksten og gips af Øvre Perm alder ses at overlejre røde sandsten og konglomerater af Karbon til Perm alder. De takkede tinder i horisonten er Stauning Alper - en del af den Kaledone bjergkæde, der flankerer Jameson Land bassinet, og som også kendes fra bl.a. Norge.

Forfatternes adresser:

Jesper Kresten Nielsen, Institutt for geologi, Universitetet i Tromsø, Dramsveien 201, NO-9037 Tromsø, Norge.

Ulla Asgaard og Richard Bromley, Geologisk Institut, Københavns universitet, Øster Voldgade 10, 1350 Kbhvn K.

Troels V. Østergaard, Næsvangsvej 8, 4550 Asnæs.



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

Telefon: 35 32 24 00, Geologisk Institut

E-mail: svendp@geol.ku.dk

Redaktion: Asger Berthelsen, Bjørn Hageskov, Jesper Milan, Jakob Winther, Arne Thorshøj Nielsen, Mikael Pedersen (webmaster) og Svend Pedersen (ansvarshavende).

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

Tekstredaktør: Svend Pedersen

Lay-out: Askvig Grafisk Design

Repro og tryk: Holbæk Express Trykkeri A/S

VARV udkommer fire gange årligt. Prisen er 150 kr. i abonnement for 2005. Abonnement kan tegnes ved at indsende beløbet til VARV's postgiro: 9 06 88 80, eller 170 SEK til VARV's svenske postgirokonto: 4388-5, eller 170 NOK til VARV's norske postgiro: 7877-08.15672.

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

Adresseændringer bedes meddelt 

©  eftertryk af tekst og billeder kan kun ske efter aftale

Kapitel 10 - **Istider og mellemistider** - har vekslet gennem tiderne med istider på ca. 100.000 år og mellemistider på ca. 10.000 år. Grønlands indlandsis er en rest af kvarterperiodens nedisning, der dækkede næsten hele Canada, Grønland, Nordeuropa, Sibirien, Polhavet og Antarktis. Vi befinder os i øjeblikket i en mellemistid og en ny istid forventes om ca. 20.000 år. De ældste spor af istid på Grønland er 2.4 millioner gamle. I borekerner på shelfen har man dog påvist en begyndende nedisning for ca. 7 millioner år siden. I bogen gives en gennemgang af isens frem og tilbagetrækning på Grønland baseret på undersøgelser på land, studier af iskerner og af boreprøver fra shelfen

Kapitel 11- **Mineralske råstoffer** - er blevet brudt i Grønland siden midten af 1800-tallet. Den første mine var kryolitminen ved Ivittuut i Sydgrønland, der har bidraget meget væsentligt til den grønlandske samfundsøkonomi. Bly-zinkminen ved Maarmorilik, der blev drevet i perioden 1973-1990, var ligeledes en stor mine, hvor der var ansat mellem 250 og 335 medarbejdere. Der blev gennemsnitligt udskibet 135.000 tons zinkkoncentrat pr. år. I bogen gennemgås tidligere minedrift i Grønland, mineraliseringer i Grønland med et kort, der viser nedlagte og den eneste aktive mine i Grønland (Nunalaq guld minen), samt potentielle muligheder for udnyttelsen af grundstoffer som uran - thorium - sjældne jordartsmetaller – beryllium-mineraliseringerne i Ilímaussaq komplekset Sydgrønland, og chromit-forekomsten ved Qeqertarsuaat i Sydgrønland.

Kapitel 12 - **Olie og gas** - mulighederne i Østgrønland er knyttet til de meget tykke ufoldede lagserier dannet i de yngre sedimentære bassiner, som opstod i forbindelse med den begyndende opsplitning af det sammenhængende kontinent, hvori Norge og Grønland indgik. Selvom der er udfoldet store anstrengelser for at finde olie i sedimenterne såvel på land som under havoverfladen, er der kun konstateret oliespor i aflejringerne fra landområderne, mens der er mere markante spor i aflejringer under havoverfladen ud for Nordgrønland.

I Vestgrønland findes flere områder, der kunne være oplagte oliereservoir, og der er siden 1969 foretaget seismiske undersøgelser over 50.000 linjekilometer og foretaget seks dybdeboringer. En del af den konstaterede olie er af samme type som i en vigtig kildebjergart, der kendes fra shelfen ud for Newfoundland. Det har endnu ikke været muligt at konstatere, om der findes forekomster der kan udnyttes.

Bogen afsluttes med henvisninger og en ordliste over faglige betegnelser og begreber samt af udvalgte geologiske fænomener

Anmelderen ønsker Grønland tillykke med dette klenodie, som snarest bør oversættes til grønlandsk og engelsk.

John Rose-Hansen

ges at repræsentere verdens ældst kendte bjergarter. Nogle af bjergarterne indeholder kulstof, hvis isotopsammensætning sandsynliggør organisk oprindelse.

Kapitel 5 - Gardar-Provinsen i Sydgrønland - omhandler riftzonen, der går fra Sydgrønland til det østlige Canada, og hvori der i perioden fra 1.350 til 1.125 millioner år siden blev dannet en op til 3.600 meter tyk serie af sandsten og lava. Endvidere dannedes en række spændende intrusioner. Bedst kendt er Ivigtutgranitten med verdens eneste kryolitforekomst, som har været genstand for brydning og Ilimaussaq komplekset, der er berømt for sine meget særprægede bjergarter - nefelinsyenitter som naujaite og kakortit - og store mineralrigdom med over 200 forskellige mineraler, hvoraf mange er opstillet her for første gang, og en del ikke er fundet andre steder.

Kapitel 6 - Bassinaflejringer - som er dannet efter grundfjeldet, og som især er lokaliseret langs dettes randområder, har en udstrækning på op til over 1.000 kilometer og en tykkelse på op til 20 kilometer. De ældste sedimentaflejringer findes alt overvejende i Nord- og Nordøstgrønland, medens de yngre bassinaflejringer overvejende findes i de centrale dele af Øst og Vestgrønland samt på den havdækkede kontinentalsokkel omkring det meste af Grønland.

Kapitel 7 - Foldebjergene i Nord- og Østgrønland - omfatter det kaledoniske foldebælte, der er opstået ved kontinentsammenstød mellem Grønland og Skandinavien for ca. 425 millioner år siden samt en øst-vest gående foldekæde langs kysten af Nordgrønland, det såkaldte ellesmeriske foldebælte, der er dannet ved sammenstød mellem det nordamerikanske kontinent med Grønland/Canada og et ukendt nord for liggende kontinent for ca. 360 millioner år siden.

Kapitel 8 - Yngre sedimentbassiner - træffer man i Nord-, Øst- og Vestgrønland. De er langt overvejende upåvirkede af senere bjergkædefoldninger så deres oprindelige strukturer og fossiler er ofte bevaret. Bassindannelsen fandt sted fra Devon til nutiden, dvs. i en periode på over 380 millioner år. I denne periode flyttede Grønland sig fra en position lige syd for ækvator til dets nuværende arktiske placering.

Kapitel 9 - Palæogen vulkanisme - der er knyttet til åbningen af Atlanterhavet, træffes i både Vest- og Østgrønland som kilometertykke ufoldede vulkanske lagserier overvejende af basaltisk sammensætning. Til denne periode hører den klassiske intrusion - Skærgårds intrusionen i Østgrønland - der er blevet studeret detaljeret siden 1930. Den isafhængige ubevoksede overflade tillader studiet af et tidligere 10 x 3-4 kilometer stort magmakammer.

Kapitel 9 - Undergrunden under havet - på shelfen, består inderst af grundfjeld, der længere ude overlejres af store sedimentære bassindannelser. I bogen gennemgås de metoder, der anvendes til at opnå geologisk viden om de havdækkede områder ikke mindst af hensyn til eventuelle olieforekomster. Shelfområdet omkring Grønland er 825.000 kvadratkilometer.

SVOVLISOTOPER – ET VÆRKTØJ TIL AT BELYSE MARINE PROCESSER

Jesper Kresten Nielsen, Mikael Pedersen, Yanan Shen og Adrian J. Boyce

Svovlisotop-systematik i marine sedimenter kan bruges til at belyse biogeokemiske processer helt tilbage til Jordens tidligste historie. I denne artikel introduceres disse processer, og der vises et eksempel på, hvorledes svovlisotoper kan benyttes til at afdække de biologiske og metal-berigende processer, der var aktive igennem dele af Øvre Perm i det østgrønlandske sedimentære bassin. Aflejringen af sedimenterne er samtidig med tilsvarende aflejringer i store dele af Europa og skete under forhold, der vurderes at have omfattet en storstilet afgasning af hydrogen sulfid (H_2S) til biosfæren, hvilket muligvis var en medvirkende årsag til den hidtil størst kendte masseuddød, nemlig ved grænsen Perm-Trias for ca. 251 millioner år siden (se VARV 2005,1).

STABILE ISOTOPER

Isotoper er atomer med samme atomnummer (dvs. samme antal protoner), men forskellig vægt, hvilket skyldes et varierende antal neutroner i kernen. Der kan være en relativ stor vægtforskel på lette og tunge isotoper af samme grundstof. Det er denne vægtforskel, der bestemmer de fysiske og kemiske egenskaber af den enkelte isotop. De lette isotoper bindes svagere i en kemisk forbindelse end de tunge, og denne forskel i binding gør, at forholdet mellem lette og tunge isotoper er afhængig af udefrakommende faktorer som forskellige geologiske og biologiske processer. Man siger, at isotoperne fraktionerer.

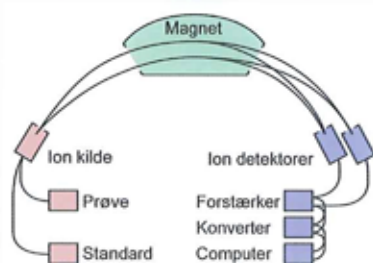
I geologi arbejder man oftest med stabile isotoper af grundstofferne brint (H), kulstof (C), kvælstof (N), ilt (O) og svovl (S). Isotoperne kaldes stabile, da de i modsætning til ustabile isotoper ikke henfalder radioaktivt.

Svovl, der er bundet i sulfater og (metal)sulfider, findes i de fleste bjergarter. Sulfater er mineraler som gips og anhydrit, der indeholder oxiderede svovlforbindelser (SO_4^{2-}). Disse mineraler findes specielt opkoncentreret i inddampningsbjergarter – evaporitter – dvs. bjergarter, der udover gips og anhydrit typisk er rige på stensalt og kalk og dannet ved inddampning af havvand. Sulfider indeholder reduceret svovl (S^{2-}) og findes i mindre mængder i de fleste bjergarter, men er specielt opkoncentreret i malmforekomster. Endvidere forekommer svovl i organiske forbindelser i biosfæren, i marine sedimenter samt som sulfat i havvand. Fordelingen af naturligt forekommende svovlisotoper er: ^{32}S : 95,02 %, ^{33}S : 0,76 %, ^{34}S : 4,22 %, ^{36}S : 0,0136 %, ^{37}S : 0,0002 %.

hvor tallene 32, 33, 34 og 36 angiver vægten af den enkelte isotop. Denne artikel fokuserer på de mest almindeligt forekommende isotoper nemlig ^{32}S og ^{34}S .

MÅLING AF SVOVLISOTOPER

Svovlisotoper måles ved at lede positivt ioniseret svovldioxid- (SO_2^+) -gas igennem et massespektrometer. Svovldioxidgassen dannes ved opvarmning af nedknust prøvepulver eller ved at enkelte mineralkorn afbrændes in-situ i prøven ved hjælp af en laserstråle. I massespektrometeret afbøjes isotoperne i forhold til deres vægt (figur 1) - de lette ^{32}S isotoper afbøjes mere end de tunge ^{34}S isotoper. Hver isotopfraktion bliver opsamlet i separate detektorer og omdannes til elektriske impulser. Korrektion af det opnåede resultat sker i henhold til en intern referencegas og forskellige internationale standarder. Analysen skal endvidere korrigeres for mineralspecifik fraktionering. Analyser af mekanisk eller kemisk separeret svovlholdige mineralfaser kan i dag udføres ved f.eks. Geologisk Institut, Københavns Universitet.



Figur 1. Analyser af stabile isotoper foretages oftest ved brugen af et gas-massespektrometer som skitseret. Inden i massespektrometeret bliver f.eks. forholdet mellem ^{32}S og ^{34}S målt som et resultat af en mere krum bane for den lette isotop ^{32}S i forhold til den tunge ^{34}S .

Svovlisotopværdierne er baseret på forholdet mellem ^{34}S og ^{32}S og beregnes ud fra formelen:

$$\delta^{34}\text{S} = \left[\left(\frac{(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{prøve}}}{(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] \cdot 1000$$

Variationerne i svovlisotopsammensætninger er normalt udtrykt ved den konventionelle δ (delta)-notation angivet i promille (‰), der udtrykker afvigelsen af en prøves svovlisotopforhold i forhold til den anerkendte Cañon Diablo troilit standard, CDT. Standarden definerer nulpunktet på δ -skalaen og repræsenterer meteoritisk svovl, som antages at være tæt på Jordens gennemsnitlige værdi. En ny Vienna Cañon Diablo troilit (V-CDT) skala er defineret ved standarden IAEA-S-1 (sølvulfid, Ag_2S fra International Atomic Energy Authority), da den oprindelige CDT standard er næsten opbrugt.

Med Niels Henriksens bog 'Grønlands geologiske Udvikling fra urtid til nutid' har vi fået et pragtværk, der belyser udviklingen af verdens største ø gennem de sidste ca. 3.800 millioner år, dvs. fra 600 millioner år efter Jordens dannelse til i dag. Værket er en æstetisk nydelse med 280 imponerende billeder og 570 illustrationer, hvoraf mange aldrig tidligere har været tilgængelige. Billederne viser resultatet af den største arkitekts - naturens - formning af landskaber og dannelsen af mineraler. Bogen henvender sig til alle, der er interesserede i naturen og miljøets udvikling. Bogen er let læselig med en meget oplysende tekst med faktabokse og en fyldestgørende ordliste bag i bogen. Den vil være velegnet som undervisningsmateriale i naturfag fra de øverste klasser i folkeskolen til Universitetet, ligesom såvel amatør- som faggeologer vil have stort udbytte af at læse bogen. Den eneste forudsætning, der kræves, er faktisk interesse for naturen, idet de geologiske processer på en pædagogisk måde er gennemgået i bogen. En grønlandstur vil blive en helt anderledes oplevelse, når man i forvejen ved hjælp af bogen har sat sig ind i områdernes geologi. 'Grønlands geologiske udvikling' bør derfor ligge på alle gaveborde og stå på alle biblioteker. Prisen - 290 kr. - er overraskende lav for en bog, der rummer så mange oplevelser. 'Grønlands geologiske udvikling' er baseret på over 200 års geologisk udforskning i Grønland på land og til havs, som har resulteret i over 2.300 geologiske afhandlinger. Den største del er baseret på ekspeditioner siden 2. verdenskrig, og er udført under Grønland geologiske Undersøgelse og GEUS med deltagelse af flere hundrede danske og udenlandske geologer samt geofysikere, geobotanikere og zoologer. Det fremgår tydeligt af bogen, at forfatteren, der har været ekspeditionsleder i Grønland i mere end 25 år, har en meget stor kærlighed til Grønland og nok er den, der har det største kendskab til Grønlands geologi.

Bogen er inddelt i 12 kapitler:

Kapitel 1 - **Landets geologiske udvikling** - giver en kort, smukt illustreret oversigt over Grønlands udvikling gennem 3.800 millioner år, herunder Grønlands placering på jorden gennem tiderne.

Kapitel 2 - **Geologi i Grønland** - fortæller kort om landet og geologens arbejdsmetoder.

Kapitel 3 - **Landskaberne** - beskriver, illustreret med flotte fotos og skitser, eksempler på imponerende bjerglandskaber og deres opståen.

Kapitel 4 - **Grundfjeldet** - handler om det prækambriske grundfjeldsskjold, der udgør langt størstedelen af Grønland, og som er dannet i to perioder, 3.800-2.500 millioner år og 2.000-1.750 millioner år, ved sammensvejsning af områder af forskellig alder. I afsnittet beskrives de gamle foldekæder som f.eks. det 1.900-1.800 millioner år gamle Nagssugtoquidiske foldebælte, der strækker sig på tværs af Grønland. Ved Isukasia findes svagt omdannede sedimenter og vulkanske bjergarter, der anta-

ANMELDELSE

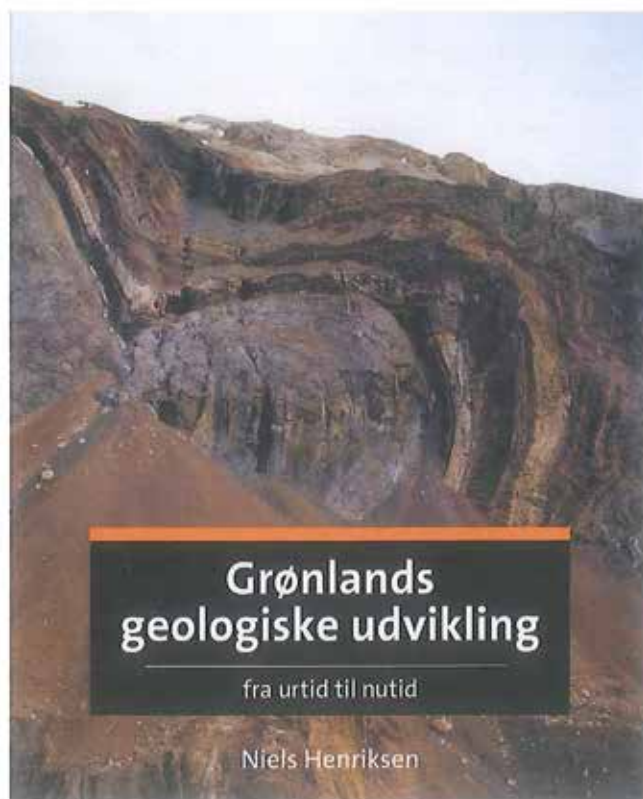
GRØNLANDS GEOLOGISKE UDVIKLING - FRA URTID TIL NUTID

Et uovertruffet pragtverk, der bør ligge på ethvert gavebord.

Niels Henriksen, Grønlands geologiske udvikling - fra urtid til nutid,
ISBN 87-7873-163-0, 270 sider, 570 illustrationer,
280 fotos og 60 faktabokse, 270 sider, indbunden.

Udgivet af Danmarks og Grønlands geologiske Undersøgelse (GEUS).

Kan købes hos GEUS, Øster Voldgade 10, 1350 København K,
telefon 38142000/bogsalg@geus.dk eller hos Geografforlaget,
telefon 63441683/go@geografforlaget.dk

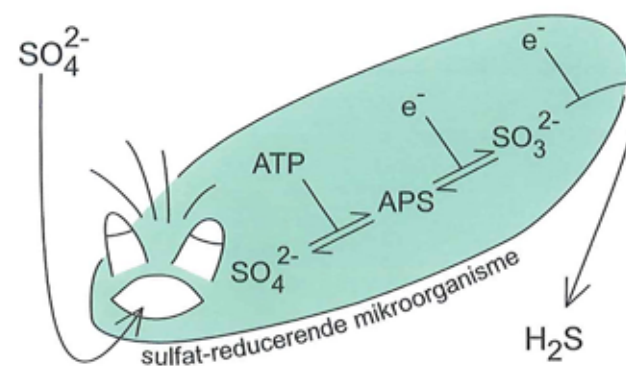


FRAKTIONERING AF SVOVLISOTOPER I ET MARINT MILJØ

I marine sedimenter forekommer det meste sulfat-svovl i mineralerne gips og anhydrit, mens sulfid-svovl hovedsageligt findes i pyrit. Svovlisotopsammensætningen af sulfatminerale afspejler isotopforholdene i det havvand, der var til stede, da sedimenterne blev aflejret. En afvigelse af isotopforholdene i samtidige sulfidminerale vidner om fraktionering i forbindelse med de processer, der har omdannet havvandsulfat til sulfid. Størrelsen af fraktioneringen kan anvendes til belysning af aflejringssmiljøet ud fra et kendskab til naturlige svovl-fraktionerende processer. Disse processer vil blive belyst nedenfor.

SVOVLCYKLEN

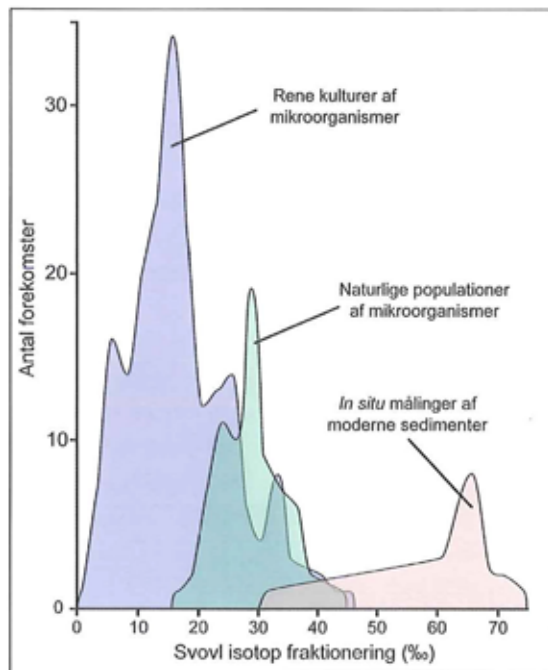
I iltfattige marine aflejringssmiljøer findes der mikroorganismer, der er i stand til at fraktionere svovlisotoper således, at der sker en ændring i forholdet mellem ^{32}S og ^{34}S og dermed $\delta^{34}\text{S}$ -værdien. Mikroorganismene, der f.eks. tilhører slægten *Desulphuvibrio*, foretrækker den lette isotop (^{32}S) og sørger dermed for en berigelse i ^{32}S i forhold til sulfatkilden. Processen, der kaldes mikrobiel sulfatreduktion, er energigivende og bidrager til organismens vækst ved at organisk kulstof eller brint (H_2) oxideres, mens sulfat reduceres igennem følgende overordnede reaktioner (figur 2):



Figur 2.
Sulfat bliver reduceret til hydrogensulfid inden i en sulfat-reducerende mikroorganisme. Den største svovlisotopiske fraktionering sker ved udskillelsen af hydrogensulfid til porevandet, som er en irreversibel proces. ATP står for adenosin trifosfat og APS for adenosin-5'-fosfosulfat, som er bestanddele af organismens enzymer.



Tilgængeligheden af organisk materiale (repræsenteret ved CH_2O) og sulfat (SO_4^{2-}) bestemmer sulfatreduktionens hastighed. Processen fører til dannelse af hydrogensulfid (H_2S), som frigives til porevandet og kan danne pyrit (FeS_2), samt bikarbonat (HCO_3^-), der kan lede til en udfældning af tidlig diagenetisk calcit (CaCO_3).

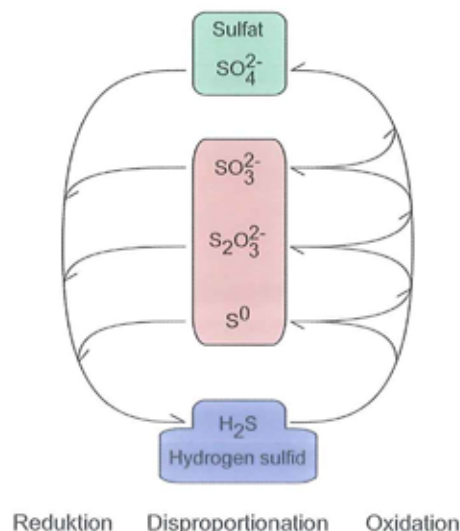


Figur 3.
Svovlisotopisk fraktionering udført af rene kulturer og naturlige populationer af sulfat-reducerende mikroorganismer samt ved in-situ målinger i moderne marine porevandsmiljøer.

Laboratorieforsøg har vist, at mikrobiel sulfatreduktion kan forårsage fraktionering af sulfat til sulfid fra -2 ‰ til -49 ‰. Imidlertid kan der observeres helt op til ca. -70 ‰ fraktionering i moderne marine sedimenter (figur 3).

Dette kan forklares ved gentagne repetitioner af en svovlcyklus, der omfatter svovlreduktion, reoxidation af dele af det reducerede svovl og efterfølgende fornyet reduktion.

Figur 4.
De oxidative og reductive dele af svovlcyklen i marine miljøer: Sulfid kan reoxideres til gradient svovl (S^0) (og andre svovl forbindelser i en mellemtilstand som f.eks. sulfat (SO_4^{2-}) og thiosulfat ($S_2O_3^{2-}$)) efterfulgt af disproportionering (både en oxidation og reduktion) til f.eks. sulfat og sulfid, hvor den sidstnævnte kan fældes sammen med jern til et metalsulfid, der i reglen er pyrit (Fe_2S).



inddelingen af magmabjergarter i sure, intermediaære, basiske og ultramafiske (den korrekte betegnelse er ultrabasiske) på grundlag af indholdet af SiO_2 ; desværre med delvis divergerende angivelse af SiO_2 procenter i teksten og i ordlisten. Det er et eksempel på ikke-konsistens.

Endnu et problematisk eksempel på forenkling er Schou Jensens behandling af magmadannelse, magmaers størkning og migmatitdannelse. Side 106: 'Alt tyder på, at magmaer dannes af faste bjergarter, der varmes op over deres smeltepunkt, eller rettere op over smeltepunkterne for de mineraler, bjergarterne opbygges af'. Denne forklaring går igen og igen i teksten, men det bliver den ikke bedre af. Her har Schou Jensens i bestræbelsen på at give en letforståelig enkel forklaring mistet balancen; på'en igen.

En del navne og fagord bliver nævnt uden forklaring og er ikke er med i ordlisten. Eksempler er Afar, Skærgaarden, laterit, apatit, mylonit, zircon, zeolit. Til gengæld er i ordlisten medtaget fagord, som jeg ikke har fundet i teksten. En del fagord, som er fyldigt omtalt i teksten, får alligevel megen plads i ordlisten, endnu et eksempel på gentagelser.

Burde der være et kapitel om fossiler?

Sammenfattende kan om bogen siges, at den præsenterer sig godt med et attraktivt layout, flotte illustrationer og en oftest god og medrivende tekst. Men Rom blev som bekendt ikke bygget på én dag. Ligeså kan man om Schou Jensens bog sige at den repræsenterer en enorm arbejdsindsats. Hovedkonstruktionen er på plads, bygninger og rum er stort set indrettet, men finpudsningen mangler. Der er faktiske fejl, unødvendige gentagelser, uheldige formuleringer og ganske få trykfejl at rette.

Mit ønske for bogen er at den må blive udsolgt hurtigt, således at den ligesom ovennævnte bog Jorden kan komme i en ny revideret udgave og blive den meget bedre bog, som den har form og stof til.

Henning Sørensen

der bl.a. dannes ved geologiske processer i vulkaner, men som ingen vil finde på at kalde for et mineral. Af forskellige grunde er det ikke muligt at give en kort udtømmende definition af, hvad et mineral er. Men det indgår i hvert fald i definitionen, at der skal være tale om selvstændige faste stoffer, hvilket er faldet ud i denne bog. Populærvidenskabelige bøger og artikler har ofte et problem med betegnelsen bjergart. I stedet bruges betegnelser som sten og klippe. Bogens indledende kapitler er entydige og behandler de løse sten på markerne og langs kysterne, deriblandt ledeblokke. På side 6 defineres sten som 'fragmenter af den faste jordskorpe – løsrevne dele af en større sammenhæng'. Andre steder i bogen er det ikke altid klart, om der tales om sten eller om bjergarter. På side 6 siges f.eks. om Alperne, at 'stenene indgår som en lille del af ofte tusind meter høje foldebjerge' og 'Geologerne kalder derfor almindeligvis de forskellige stenarter for bjergarter', samt 'når geologer anvender ordet bjergart, kan det hentyde til både en sten og et helt bjerg'. Jeg må tage afstand fra de sidstnævnte formuleringer. Den geologiske betegnelse for stenart er bjergart, og jeg har aldrig hørt nogen bruge ordet bjergart om et helt bjerg (men det er rigtigt, at rock på engelsk både bruges om bjergart og om klippe). Hvad menes med at stenene udgør en lille del af foldebjerge? Teksten ville vinde i klarhed, hvis der konsekvent skelnes mellem sten, som betegnelsen for fragmenter af bjergarter, og bjergart, som betegnelsen for de sammenvoksninger og sammenhobninger af mineraler, der dannes af de geologiske processer.

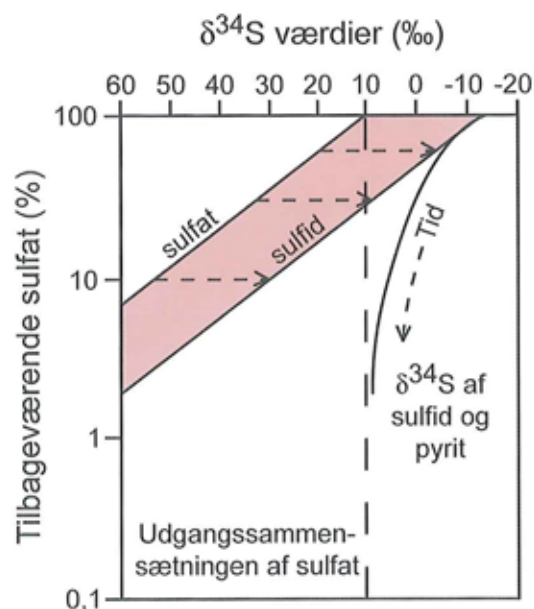
Der er foretaget forskellige forenklinger for at gøre teksten lettere at forstå. Én er at vulkansk bruges næsten konsekvent i stedet for magmatisk, også når det drejer sig om processer dybt inde i Jorden. Mere problematisk er det forenklede system til klassificering af magmabjergarter, som er baseret på noget så lige at gå til som bjergarters farve. Side 108: såvel dag- som dybbjergarter 'identificeres ud fra deres generelle farve'. Der inddeles i hovedgrupperne felsiske, intermediære, mafiske og ultramafiske, dvs. fra lyse til mørke bjergarter (skemaer på side 92 og 94). Det er ikke nogen god idé. Granitten på Rockall med op mod 50 % mørke mineraler og gabbroen, som Narsaq er bygget på, med kun ca. 20 % mørke mineraler viser at klassifikation baseret på felsisk og mafisk er problematisk. Den Internationale Geologiske Unions petrologiske komité har på grundlag af gennemgang af tusindvis af modale og kemiske bjergartsanalyser konstateret at farve ikke kan bruges til klassifikation af magmabjergarter, bortset fra at bjergarter med mere end 90 % mørke mineraler udskilles som en gruppe af ultramafiske bjergarter. Alle andre bjergarter, dvs. langt de fleste, inddeles på grundlag af deres indhold af lyse mineraler. Indholdet af mørke mineraler kommer i anden række og bruges evt. til fininddeling af bjergarterne. Hoveddiagrammet er den velkendte Streckeisen dobbelttrekant med kvarts, alkalifeldspat, plagioklas og feldspatoider i hjørnerne (se VARV 2004,4, og Dansk Geologisk Forenings Årsskrift 1981, 39-46 og 1986, 59-65). På side 94 nævnes

Da oxidationen ikke involverer nævneværdig fraktionering, vil sulfidfraktionen efterhånden forarmes mere og mere på tunge isotoper og $\delta^{34}\text{S}$ -værdierne vil følgelig blive lavere. Man har fundet ud af, at op til 90 % af hydrogensulfiden (H_2S) bliver reoxideret i et marint sediment, og kan derfor potentielt indgå i de gentagne repetitioner af svovlcyklen (figur 4).

RAYLEIGH-DESTILLATION

Undertiden finder man $\delta^{34}\text{S}$ værdier for pyrit-svovl, der er større end eller tæt på den samtidige havvandssammensætning. Sådanne små forskelle mellem sulfid og sulfat kan forklares ved en såkaldt Rayleigh-destillation (figur 5), der forekommer i et lukket porevandssystem, hvor mængden af havvandssulfat er begrænset. Den begrænsede sulfatmængde bevirker, at der med tiden bliver en mindre mængde sulfat, mens sulfidmængden øges ved hjælp af mikrobiel sulfatreduktion. Sulfatreduktionen bevirker, at sulfat bliver forarmet på ^{32}S og dermed, at $\delta^{34}\text{S}$ -værdien for den tilbageværende sulfat stiger. Sammensætningen af både sulfid og pyrit ændres med tiden, således at det ender med en samlet $\delta^{34}\text{S}$ værdi, der nærmer sig til udgangssammensætningen for havvandssulfat.

Framvaren Fjord i det sydlige Norge er usædvanlig rig på sulfider og er et moderne eksempel på berigelse af ^{34}S i sulfid i bundvandet, hvor udvekslingen med det åbne hav er forhindret af en undersøisk tærskel og af et låg af overfladevand med lav saltholdighed.



Figur 5. Dette Rayleigh-diagram viser, hvorledes den isotopiske sammensætning ændres i de udfældende og residuale faser med tiden. Hvis der er tale om et lukket system uden tilførsel af sulfat vil isotopsammensætningen af den sidst udfældende mineralfase være beriget på ^{34}S i forhold til udgangssammensætningen af havvandssulfat-svovl.

TERMOKEMISK SULFATREDUKTION

Termokemisk sulfatreduktion omfatter reduktion af sulfat til sulfid under indflydelse af varme frem for biologisk aktivitet. Dette kan ske under sen diagenese ved indsunkning af sedimenter til flere kilometers dybde og dermed ved temperaturer, der generelt er højere end 120-140°C. Nogle studier har vist, at den termokemiske sulfatreduktion kan starte ved 85°C.

Termokemisk sulfatreduktion er karakteriseret ved en fraktionering af svovl-isotoperne på mindre end ca. -20 ‰. Udover svovl-isotopsignaturen vil påvisning af termokemisk sulfatreduktion altid være betinget af petrografen, der som regel viser forstørrede porerum og indeslutninger af hydrokarboner (olie og gas) i diagenetisk cement (f.eks. kalcit og kvarts) foruden tilstedeværelsen af bl.a. gedigent (rent) svovl (S⁰) og metalsulfider (f.eks. galena (PbS), pyrit (FeS₂) og sphalerit (ZnS)). Termokemisk reduktion af sulfat under indflydelse af hydrokarboner på fast, flydende eller gasform i dybt begravede sedimenter kan forløbe over mange tusinde til millioner år efter den overordnede reaktion:



Et konkret eksempel er opløsning og reduktion af anhydrit-sulfat (afledt fra dehydreret gips) i varmvandskarbonater som f.eks. sabkha-aflejringer (saltslette-aflejringer), hvilket giver følgende generaliserede reaktion:



PYRITDANNELSE I MARINE MILJØER

Svovl forekommer ofte i mineralet pyrit (FeS₂), der i marine miljøer dannes ved reaktioner mellem jern og mikrobielt reduceret sulfid (figur 6). Jernet stammer ofte fra jernoxyhydroxider og -oxider, der kan nedbrydes i løbet af få minutter til timer, samt de mere krystallografisk set ordnede mineraler (goethit, magnetit og hæmatit) med en nedbrydningshastighed af størrelsesorden måneder til år. Derimod reagerer jernsilikater (f.eks. biotit og amfibol) relativt langsomt med sulfid i porevandet. Nogle jernsilikater (de såkaldte reaktive silikater) har en nedbrydningshastighed på et par hundrede år, mens den for andre er væsentligt længere (>100.000 år).

De tegnede diagrammer er flotte og instruktive. Fotografierne taget i naturen er glimrende til fremragende, både billedmæssigt og indholdsmæssigt. Blot kunne billedteksterne gøres mere oplysende i ikke så få tilfælde, ikke mindst der, hvor de mangler. Fotografierne af bjergarter er acceptable, men der er et målestoksproblem. I forordet siges at de fotograferede bjergarter er håndstykker, som måler ca. 10 x 20 centimeter. De er sat ind i teksten uden angivelse af deres størrelse og i forskellige målestoksforhold, som gør sammenligning vanskelig. En del af de fotograferede stykker bidrager ikke til belysning af teksten. Fotografierne af mineralerne er ikke helt tilfredsstillende. De viser sjældent glans, farvespil eller de rigtige farver, hvilket de har tilfælles med tilsvarende fotografier i de fleste andre stenbøger, inklusive tidligere udgaver af 'Sten i Farver'. Det er en kunst at fotografere mineraler.

Der er meget godt at sige om bogen, men det kan ikke skjule, at den som så mange andre nyfødte, deriblandt ovennævnte bog 'Jorden', er kommet til verden med diverse børnesygdomme, muligvis fordi den er for tidligt født. De sproglige og indholdsmæssige problemer, som jeg har konstateret, tyder i hvert fald på at bogen er blevet sendt i trykken, før blækket i manuskriptet var tørt. Det er ikke stedet for en detaljeret gennemgang af disse forhold, men nogle få stikprøver vil vise, hvad jeg tænker på.

Schou Jensen har bestræbt sig på at skrive letforståeligt, og det er lykkedes i betydelig grad. Men hist og her tager omhyggeligheden overhånd, bl.a. ved at et udsagn gentages flere gange inden for få linier, og ved at forklaringer bliver så indviklede, at klarheden går tabt. Afsnittet om silikatstrukturer på side 65 til 67 har flere eksempler på disse forhold. Det siges f.eks., at silikatmineralers grundenhed, silicium-ilt-tetraedret, kan forbinde sig med andre tetraedre ved, 'at iltionerne er fælles om en siliciumion'. Tre linier senere siges med få liniers mellemrum to gange at det er karakteristisk at siliciumionerne er 'fælles for/om flere iltioner', altså den omvendte orden. Det fremgår ikke, hvordan det skal forstås, og den enkle forklaring, at tetraedre kan knyttes sammen ved at dele hjørner med hinanden, forsvinder i omhyggeligheden. To steder opremses de metalioner, som kan knytte individuelle tetraedre sammen, men det forklares ikke, hvordan de mere komplicerede strukturer såsom kæder og ringe bindes sammen. Det nævnes at magnesium og jern kan erstatte hinanden i silikatmineraler, og at dette kun medfører ændring af mineralernes farve. Hvad med massefylde, optiske egenskaber og stabilitetsforhold?

Tre lidt forskellige definitioner af, hvad et mineral er, findes f.eks. på siderne 7 og 58 og i ordlisten, hvor den på side 58 er næsten acceptabel, mens de to andre ikke er korrekte. På side 7 hedder det f.eks.: 'Et mineral er betegnelsen for et grundstof eller en kemisk forbindelse dannet ved geologiske processer i naturen'. Grundstoffer dannes som bekendt ikke ved geologiske processer, med mindre Big Bang og processerne i stjernernes indre gøres geologiske. Kuldioxid er en kemisk forbindelse,

NY UDGAVE AF STEN I FARVER

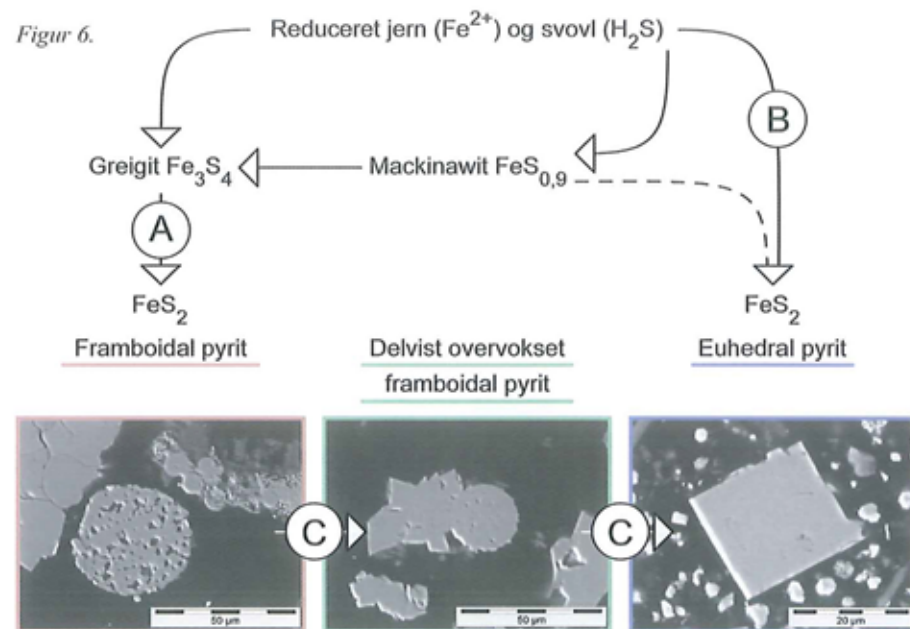
Erik Schou Jensen: *Sten i Farver*, 6. udgave,
Politikens Forlag 2005, 222 sider, pris: 169 kr.

Vi har i mange år savnet en dansksproget lettilgængelig geologibog til afløsning af Arne Noe-Nygaards bog *Geologi – materialer og processer*, hvis sidste udgave er fra 1967. Det er derfor glædeligt at der nu er udkommet to sådanne bøger: for et år siden *Jorden – Illustreret Opslagsværk* (Forlaget Aktium) og for nylig sjette udgave af den velkendte bog *Sten i Farver* (Politikens Forlag). Den førstnævnte er i stort format, på 520 sider, vejer 3 kg og er helt klart til indendørsbrug. Den anden er i lommeformat på 222 sider, vejer 0,5 kg og kan tages med på turen. Den indgår i Politikens Forlags serie af Naturguider.

Den nye udgave af *Sten i Farver* er med helt ny tekst og nye illustrationer. Bogens forfatter, lektor Erik Schou Jensen, Geologisk Museum, har ydet en kraftpræstation i tilvejebringelse af ikke blot den nye tekst, men også i udvælgelsen af et stort antal fotografier, de fleste taget af ham selv på spændende geologiske lokaliteter rundt om i verden, i forberedelsen af mange instruktive diagrammer tegnet af Bent Knudsen og i udvælgelse af det store antal prøver af mineraler og bjergarter, som Søren Kuhn har fotograferet. Bogen fremtræder i indbydende layout og udstyr.

Bogens første 57 sider betegnes i forordet som en grundbog i geologi rettet mod enhver med interesse for sten i alle afskygninger. De behandler hvad sten er, hvor man finder dem, hvor de kommer fra, og hvad de anvendes til. Der er desuden korte afsnit om Jorden som ensom planet, Jordens opbygning og pladetektonik. Afsnittet om pladetektonik slutter med to sider om atomer og atombindinger, som strengt taget ikke hører til det afsnit og i øvrigt ikke har nogen funktion i bogen. 20 sider med overskriften sten og mineraler behandler de vigtigste bjergartsdannende mineraler. Så følger 36 sider med overskriften sten og bjergarter om de mest almindelige magmabjergarter. Sedimenter behandles på 36 sider, metamorfe bjergarter på 18 sider og smykkesten på 7 sider. Bogen afsluttes med 16 sider ordforklaringer, nogle sider om bøger og museer, samt et register.

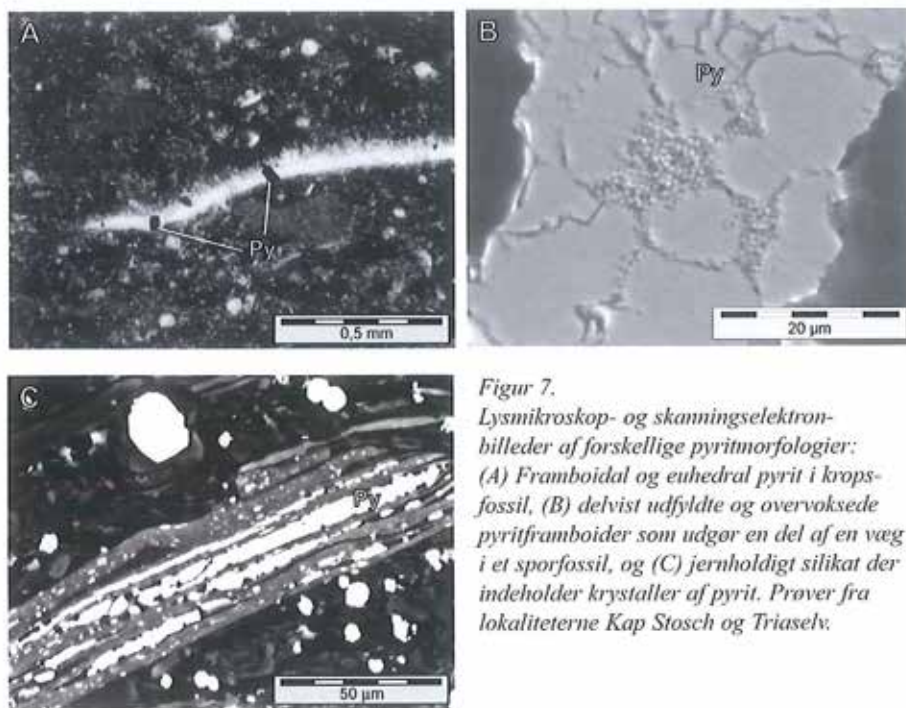
Schou Jensens udvalg af mineraler og bjergarter er rimeligt afbalanceret. Teksten indeholder ud over beskrivelse af mineraler og bjergarter engagerede og levende skildringer af de geologiske processer, som har dannet bjergarterne: vulkanisme, magmatiske processer med Bowens reaktionsserier, forvitring og sedimentdannelse, metamorfose, mm.



Udfældningen af framboidal og euhedral pyrit sker ved henholdsvis indirekte (A) eller direkte (B) reaktion mellem opløst reduceret jern og svovl. Den indirekte reaktion involverer metastabile mineralfaser såsom mackinawit og greigit. Framboidal pyrit kan omdannes til euhedral pyrit (i reglen terningsformet) ved en kontinuerlig pyrit udfældning (C) i og uden på den framboidale pyrit.

I marine sedimenter vil den første pyrit typisk udfældes som kugleformede krystal-aggregater (framboidal pyrit) under selve sedimentationen. Dannelsen af framboidal pyrit fortsætter under den tidlige diagenese (omfatter tiden og de processer der foregår efter aflejring af sedimentet og inden en væsentlig kompaktion), hvor også krystallisation af enkeltstående terningformede pyritkrystaller (euhedral pyrit) finder sted (figur 6). Framboidal og euhedral pyrit kan både findes spredt i sedimentet, og som udfyldninger i krops- og sporfossiler eller udfældet i sprækker i jernsilikater (figur 7A, B og C).

Selve krystallisationen af pyrit leder ikke til en markant isotopfraktionering (<1 ‰), og en analyse af svovlisotoper i pyrit vil direkte bidrage med information om, hvorvidt svovlet har undergået mikrobiel reduktion, og om det eventuelt har involveret den oxidative del af svovlcyklen.

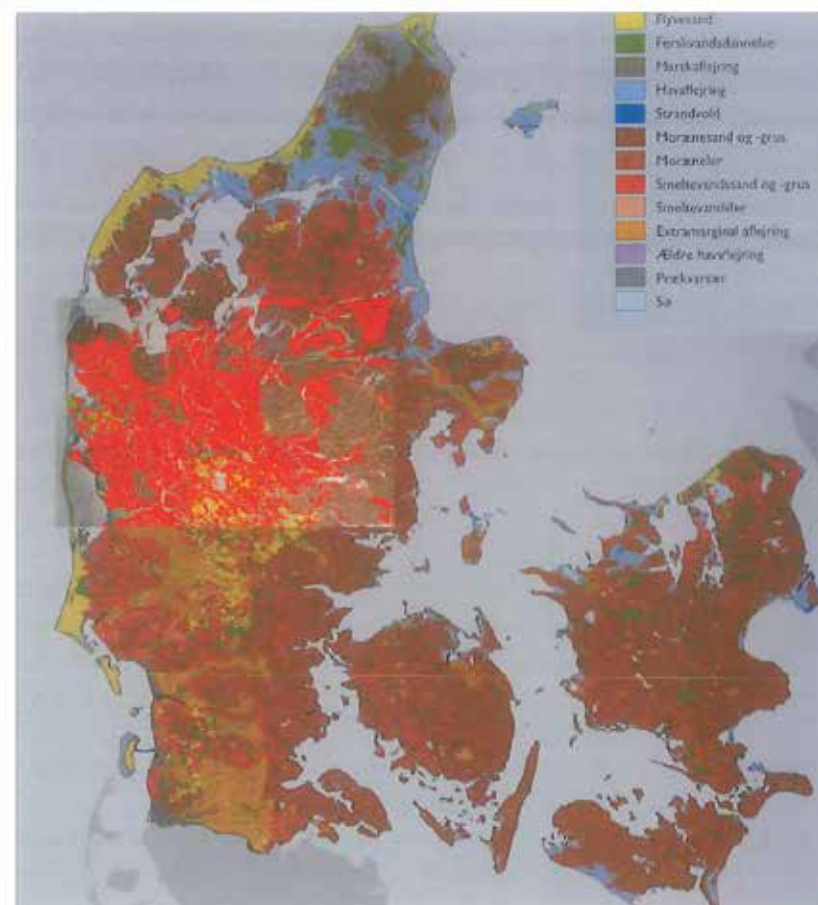


Figur 7.
Lysmikroskop- og skanningselektronbilleder af forskellige pyritmorfologier: (A) Framboidal og euhedral pyrit i kropsfossil, (B) delvist udfyldte og overvoksede pyritframboider som udgør en del af en væg i et sporfossil, og (C) jernholdigt silikat der indeholder krystaller af pyrit. Prover fra lokaliteterne Kap Stosch og Triaselv.

DE FØRSTE SULFATREDUCERENDE MIKROORGANISMER

Der findes mange forskellige typer sulfatreducerende mikroorganismer, og visse grupper har dybe rødder i 'livets træ' og udgør sandsynligvis nogle af de ældste livsformer på Jorden. De lever under økologiske forhold, der strækker sig fra ekstrem kulde til varme aktive hydrotermale kilder. Morfologisk set er de meget simple – enten simple sfærer eller trådformede filamenter – og kan derfor i fossil form vanskeligt adskilles fra andre mikrobielle fossiler. Den biologiske evolution og stofskifte i sulfat-reducerende mikroorganismer er – ud fra selve mikroorganismene og mineralisering af disse – kendt fra andre stofskifte systemer såsom ilt-producerende fotosyntese, men dette er dårligt kendt fra prækambriske sedimenter. Derfor er brugen af svovlisotoper til påvisning af deres eksistens essentiel.

Mikrobiel sulfatreduktion er en proces, der allerede kendes fra Tidlig Arkæikum (ca. 3,47 milliarder år) og er for nyligt blevet påvist i sedimenter fra et arkæisk lagunalt aflejringsmiljø. Sedimenterne repræsenterer Dresser Formationen, Warrawoona Gruppen, ved North Pole i det nordvestlige Australien.



Figur 1.
Jordartskort, hvor 'Midtjylland' er ændret, så alt smeltevandssand har fået samme røde farve. Jordartskortet er taget fra GEUS 2001: 'Billedatlas over udvalgte danske landskabsformer'. Midtjylland fra 'Jordartskort over Danmark 1:200.000' udgivet af DGU 1989. Redaktion: Stig A. Schack Pedersen.

Noget andet er så, at der er flere ting, der taler for, at isen faktisk var længere ude end til 'Hovedopholdslinien' under sidste istid. Der er dødishullerne. Sunds Sø er et af dem, som er så stort, at det er vanskeligt at forestille sig en isklump kommet så langt ud på hedesletten, med mindre den er blevet efterladt af et smeltende isdække. Kurt Kjær, Michael Houmark og Niels Richard påviser i en artikel (Boreas, 2003), at de flydelinier i isen, som kan udledes af landskabets strukturer heller ikke passer med den isgrænse som 'Hovedopholdslinien' definerer. Der kommer en mere uddybende diskussion af 'Hovedopholdslinien' i Geologisk Tidsskrift i 2006.

DET ÆRLIGE JORDARTSKORT

Troels V. Østergaard

Jordartskortet – som viser hvilke jordarter, der ligger under muldlaget – er meget brugt og findes i mange geografibøger. En af de ting, som fremgår meget tydeligt af kortet er den såkaldte 'Hovedopholdslinie', der skulle være grænsen for isens udbredelse i sidste istid.

Min skepsis overfor jordartskortet blev vakt meget tidligt. Som ganske ung student var jeg assistent for statsgeolog på DGU (Danmarks Geologiske Undersøgelse) Helge Gry og karterede i Nordjylland. På en af de aftener, hvor vi sad på hotellet og skulle have tiden til at gå til sengetid, fortalte han anekdoter fra livet på DGU.

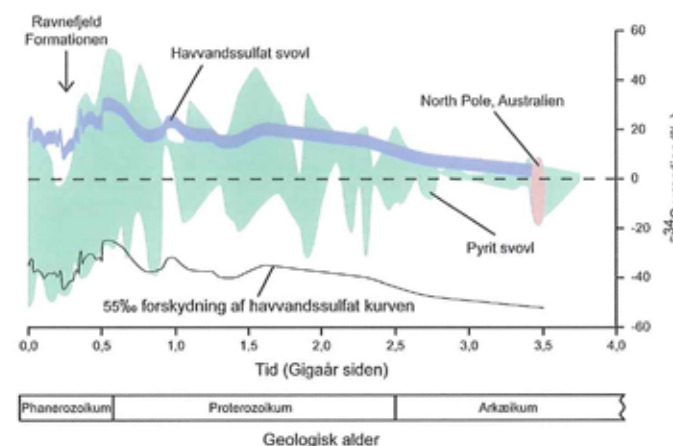
En af dem var, at når man så på de originale karteringskort, var der meget stor usikkerhed om, hvor 'Hovedopholdslinien' egentlig skulle løbe. Så man på kort, hvor den karterende havde bevæget sig mod vest, lå den meget længere mod vest, end på nabokort, hvor den karterende var kommet fra vest og havde arbejdet sig østpå. Forklaringen er den enkle, at sand er sand. Har man gået på hedesletten og har karteret hedeslettesand, bliver man ved med at kalde sandet hedeslettesand, indtil man pludselig opdager, at nu må det være smeltevandssand, for nu må man have passeret 'Hovedopholdslinien'. Og tilsvarende fortsætter man med smeltevandssand selvom man er kommet vest for 'Hovedopholdslinien'. Det er jo ikke alle steder, den er lige synlig i terrænet.

I forbindelse med diskussionerne omkring bogen 'Danmarks Geologiske Seværdigheder' (Politikens Forlag, 2003) er det gået op for mig, hvilken sakrosankt stilling 'Hovedopholdslinien' har, og at jordartskortet har en meget stor del af æren/skylden for det. Der er ikke det menneske i dette land, som ikke på et eller andet tidspunkt er blevet præsenteret for jordartskortet, hvor billedet af '7-tallet' i Jylland har brændt sig fast i bevidstheden.

Jeg fik derfor lyst til at se lidt nærmere på, hvad kortet egentlig viser. Og stor var min forbavselse, da det gik op for mig, at den gulbrune farve, der definerer '7-tallet' mod vest, viser 'extramarginale aflejringer', altså dannelser afsat udenfor en isrand. Jamen, et jordartskort er – bør være – et litologisk kort, og 'extramarginale dannelser' er ikke en lithologisk betegnelse, men en tolkning.

Ved at tolke sandlagene vest for 'Hovedopholdslinien' som 'extramarginale dannelser' har man vildført generationer af danskere til at lave den smukke lille cirkelslutning, at jordartskortet viser, at isen under sidste istid ikke kom længere end til 'Hovedopholdslinien'. I det 'ærlige jordartskort' har smeltevandssand smeltevandssandets farve uanset om det ligger øst eller vest for 'Hovedopholdslinien' og så forsvinder den ganske!

En mikrobiel fraktionering på op til -21,1 ‰ (med et gennemsnit på -11,6 ‰) kan påvises igennem en forarmelse i ^{34}S i pyrit svovl i forhold til samtidigt havvands-sulfat repræsenteret ved baryt, BaSO_4 (figur 8). Dette betyder, at mikrobiel sulfatreduktion som biologisk proces kan føres 750 millioner år længere tilbage, end man hidtil har troet. I modsætning til de afgrænsede marine forhold i lagunen, udtrykker en mindre fraktionering (falder til nær 0 ‰) i de åbne marine forhold på samme tid en sulfiddannelse i et sulfatfattigt ocean. Tilstedeværelsen af sulfat i den arkæiske lagune skyldtes en lokal oxidering af vulkansk sulfid grundet sollys. Dette tolkes som resultatet af et relativt lavt iltindhold i den arkæiske atmosfære. Senere i Jordens historie foregik der en større fraktionering mellem havvandssulfat og pyrit svovl (figur 8), der kan forklares ved et højere iltniveau i atmosfæren.

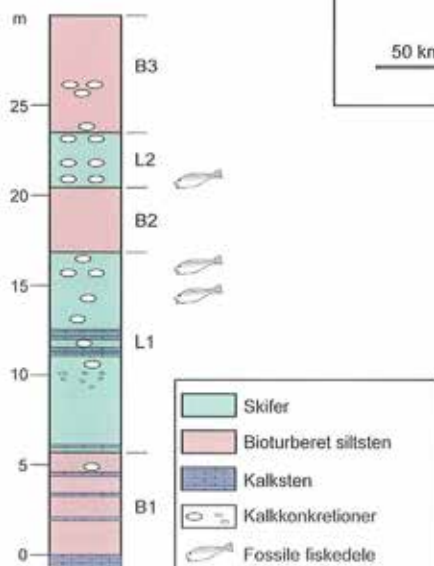
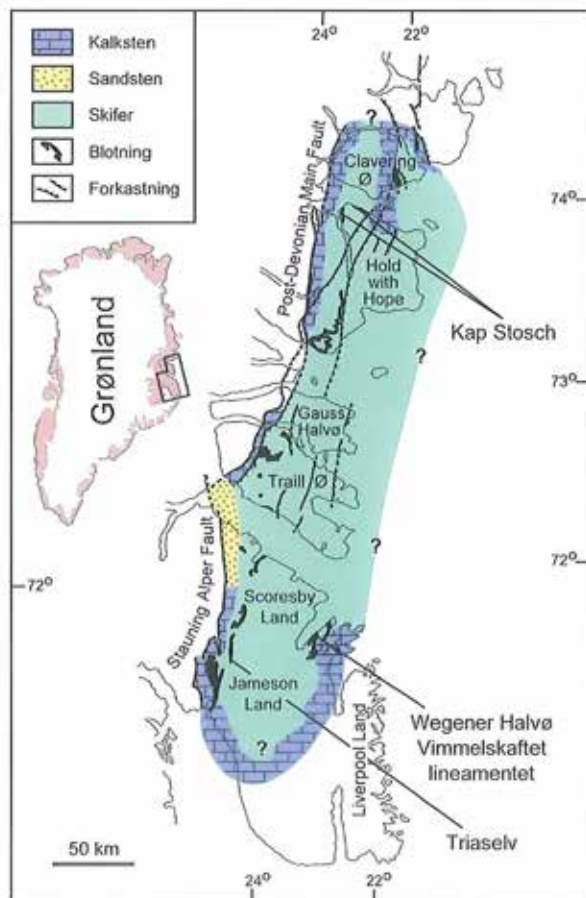


Figur 8. Variationen i $\delta^{34}\text{S}$ -værdier af havvandssulfat (repræsenteret ved analyser af bl.a. evaporitter) og pyrit-svovl gennem Jordens historie. Analyser af prøver fra North Pole er markeret med rød cirkel.

SVOVLISOTOPER I PYRIT I RAVNEFJELD FORMATIONEN I ØSTGRØNLAND

Undersøgelser af krystalformer og svovlisotoper i pyrit fra Ravnefjeld Formationen (Øvre Perm) i Østgrønland er et aktuelt eksempel på, hvorledes man forsøger at afdække marine sedimenters aflejringsforhold. Prøverne til studiet blev indsamlet under feltarbejde ved Triaselv i det vestlige Jameson Land, på Wegener Halvø i øst og på Hold With Hope i nord (figur 9). Undersøgelser af karbonatrev fra den samtidige Wegener Halvø Formation viser, at to laminerede skifferenheder i Ravnefjeld Formationen blev aflejret under et relativt højt havniveau, mens tre bioturberede siltstensenheder (gennemgravede af dyr) blev aflejret under et lavt havniveau. De fem enheder er udbredt i hele det 80 x 400 kilometer store Østgrønlandske Bassin (figur 9, 10 og 11). Under aflejringen af Ravnefjeld Formationen befandt det, vi i dag kalder for Østgrønland, sig på omkring 35°N.

Figur 9.
Lokalitetskortet viser fordelingen af skiffer og siltsten (Ravnefjeld Formation) og karbonatrev (Wegener Halvø Formation) i det Østgrønlandske Bassin. Undersøgte lokaliteter er Kap Stosch, Triaselv og Wegener Halvø.



Figur 10.
En sedimentologisk log der viser den typiske litologiske fem-delning af Ravnefjeld Formationen. Der blev ofte fundet fossiler af fisk inden i de mange kalkkonkretioner.

Dette mønster gav den bedste udnyttelse af et lag med organisk detritus i det ellers fattige dybhavssediment. Det ret overfladiske spor blev kun bevaret fossilt, når den næste slamstrøm rutschede ned ad kontinentsoklen og gravede sporet ud og lavede en afstøbning af det som et ophøjet relief på sin underside (figur 5 og 6).

De søfarende oldgrækere må undrende have sejlet tæt forbi stejle kyster med opfoldede spiraldækkede turbiditer for at finde ind i de få naturlige havne. Hyrder har fulgt deres geder på de smalle klippeafsatser og med fingrene fulgt spiralernes forløb. De måtte være tegnet på klipperne af guderne selv!

Andre vil måske sige, at en pottemager legede med to pinde forbundet med en snor på en fugtig pandekage af ler, og mønstret var dér rede til at blive indridset i ler og metaller og mejslet i sten (figur 7).

Vi kan selvfølgelig som ichnologer bedst lide den 'guddommelige' *Spiroraphe*.



Figur 7.
Først planter man den røde blyant i centrum og vandrer rundt om den med den blå, indtil al snoren er vundet rundt om den røde. Så planter man den blå blyant i centrum og vandrer rundt med den røde, indtil snoren er viklet ud igen. Det kræver lidt øvelse!



Figur 8.
Tæt på en kvindelig ichnolog.

Fra Karpathos beskrev italieneren Carlo di Stefani i 1895, hvad han mente var fosile orm. De dækkede de stejlt opfoldede Tertiære lagflader på den uvejsomme ø. 'Ormen', der fik navnet *Spiroraphe*, er et sporfossil kendt fra Kridt til nu (figur 4). *Spiroraphe* optræder i dybhavssedimenter i dag. Fossilt er sporet kendt fra turbiditter ('flysch') fra hele Verden. Det dannes af en ormeformet organisme, der bogstaveligt åd sig vej gennem et lag rigt på organisk materiale i en spiral udefra og ind for dernæst at vende i centrum og 'spiralere' ud igen.



Figur 4.
Afbildning af *Spiroraphe* i sporfossilbindet i 'Treatise on Invertebrate Paleontology'. Naturlig størrelse. Vi har tilladt os at rette det foldede eksemplar ud via computeren!

Figur 5.
Centrum af *Spiroraphe* i turbidit, Karpathos. Spiralen er 2 centimeter bred.



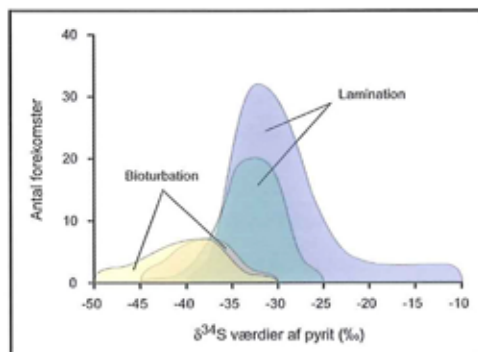
Figur 6.
Spiroraphe på turbiditflade, Venezuela. Spiralerne er ca. 25 centimeter i diameter.



Figur 11.
Ravnefeld Formation (RF) i den øvre del af billedet overlejrer evaporitter og kalksten af henholdsvis Karstryggen (KR) og Wegener Halvø (WHØ) Formationerne. Skala Bo Møller Nielsen (GEUS) under feltarbejde i Triaselev, sommeren 1998.

Aflejringen af de tre grå sandede bioturberet siltstensenheder skete i oxiske (ilttrige) bundvandsforhold, hvilket illustreres ved en overordnet homogen sedimentær struktur og sommetider tilstedeværelsen af sporfossiler. De to sorte laminerede skifferenheder er derimod ikke blevet bioturberet, hvilket skyldes sulfidiske (iltfrie forhold med H_2S) bundvandsforhold. Opløst sulfid virker som gift for de fleste makroorganismer. Tilstedeværelsen af sulfidiske bundvandsforhold er konstateret ud fra størrelsesfordelingen af framboidal pyrit. Framboiderne er relativt små i diameter (op til ca. 5 μ meter, μ meter = 1/1.000 millimeter) og forekommer fint fordelt i de sorte skifre. De små framboider blev dannet ved overgangen mellem det sulfidiske bundvand og de ovenliggende oxiske vandmasser, og da framboiderne nåede en vis størrelse og dermed vægt, dalede de ned i gennem bundvandet og indlejredes i sedimentet uden at fortsætte krystalvæksten. I modsætning hertil indeholder de bioturberede sedimenter relativt store framboider (op til ca. 35 μ meter), der ofte forekommer i pyritiserede grave gange (figur 7B). De store framboider havde længere tid til at vokse i porevandet. Dannelsen af framboiderne kan ske relativt hurtigt - fra få timer til dage.

Andre pyrit-krystalmorfologier (figur 6 og 7) forekommer i væsentligt mindre mængder end den framboidale pyrit. Samtidigt med dannelsen af framboiderne er enkeltstående krystaller af terningsformet pyrit udfældet i porevandet. Endvidere findes der pyrit med en gradvis morfologisk overgang fra framboid, udfyldt framboid, overvokset framboid til euhedral pyrit. Dette afspejler en mere eller mindre kontinuerlig udfældning af pyrit med et skift fra reaktionsvej A til B i figur 6C. Disse krystalmorfologier findes også i væggene til pyritiserede gravegange. Organismernes aktivitet i gravegangene fungerede som en biologisk pumpe, som tilførte gravevæggene og det omkringliggende sediment frisk havvandssulfat og organisk materiale. Det organiske materiale blev oxideret under mikrobiel sulfatreduktion med det resultat, at der blev udfældet pyrit (figur 7B). I sedimentet forekommer der kropsfossiler af f.eks. bryozoa og gastropoder (figur 7A). Disse blev pyritiseret da store mængder af opløst reduceret jern (Fe^{2+}) i porevandet reagerede med sulfid-holdigt porevand fra lokal mikrobiel oxidering af det organiske materiale i fossilerne. Derimod kan pyritiseringen af jernholdige silikater (figur 7C) forklares ved diffusion af opløst sulfid fra det omgivende porevand mod jernkilden i silikaterne. En halveringstid på mere end 80.000 år er estimeret for reaktionen mellem de almindeligst forekommende jernsilikater og opløst sulfid i porevandet.



Figur 12.
Variationen i $\delta^{34}\text{S}$ -værdier af pyrit i laminerede og bioturberede sedimenter (henholdsvis grøn og rød kurve) samt konkretioner (blå og gul kurve) fra Ravnefeld Formation. Analyser fra Kap Stosch og Triaselv.

Svovlisotopværdierne viser, at mikrobiel sulfatreduktion skete under tidlig diagenese i et åbent porevandssystem med fri tilgængelighed af havvandssulfat (Figur 8 og 12). Den mikrobielle sulfatreduktion vises ved, at den isotopiske fraktionering mellem havvandssulfat og pyrit-svovl var fra ca. -21 ‰ til -49 ‰. Prøver med $\delta^{34}\text{S}$ værdier lavere end ca. -35 ‰ viser, at større isotopisk fraktionering (op til ca. -60 ‰) har fundet sted. Dette betyder, at gentagne cykler af sulfatreduktionen og disproportionering (omfatter både en oxidation og reduktion af svovl), har fundet sted som forklaret tidligere (figur 4). Samlet set omfattede den isotopiske fraktionering både en biologisk faktor, som styrede sulfatreduktionen og en miljømæssig faktor, der styrede oxidering og disproportionering.



Figur 2.
Lille keramisk
parfume-flaske fra
Naxos (Kykladerne,
3. årtusinde f. Kr.).



Figur 3.
Bund af 'stegepande-
formet' lerkar fra Naxos;
3. årtusinde f. Kr. (dia-
meter 20 centimeter).

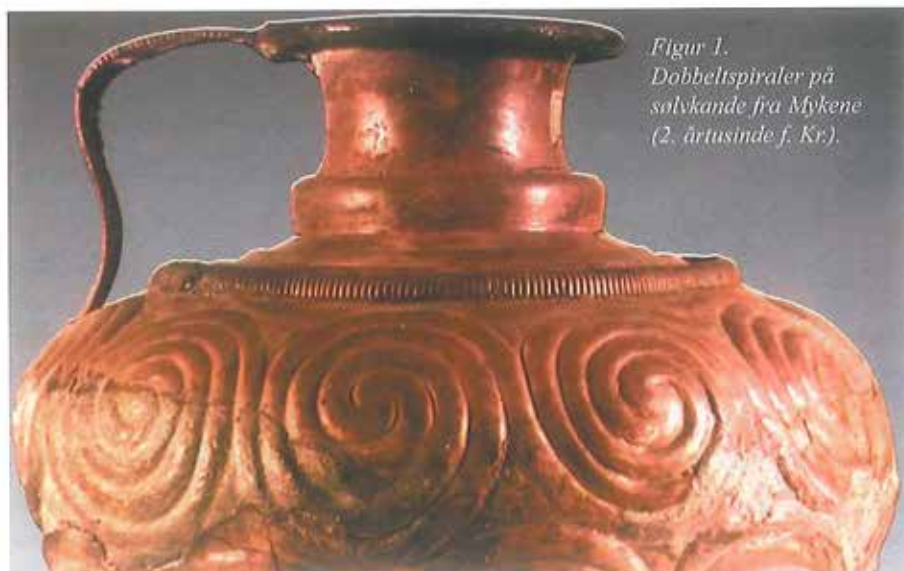
GUDDOMMELIGE SPIRALER

-HISTORIEN BAG ET MØNSTER, 2

Ulla Asgaard, Richard Bromley og Alfred Uchman

Forskellige spiralmønstre er blevet brugt gennem tusinder af år. I de oldgræske kulturer i og omkring det Ægæiske Hav i det 3. årtusinde f. Kr. fandtes et sæt geometriske mønstre på brugskeramik og på smykker af metaller, men også på monumentale og kultiske objekter af sten. I sen Stenalder og i Bronzealder vandrede spiralerne sammen med bronzen mod vest via Middelhavet og fra Sortehavet gennem Donau, Elben og Rhinen så langt som til Irland i vest og Skandinavien i nord. I Danmark behøver vi kun at tænke på Solvognen, alle pragtsmykkerne og de mere beskedne dragtnåle og rageknive her er der spiraler alle vegne.

De fleste spiraler er simple; men der er også mere komplicerede former. Én form, som optræder igen og igen i de oldgræske kulturer i og omkring Ægæerhavet, er spiralen, der bevæger sig ind mod centrum for dernæst at returnere ud i mellemrummet mellem de første 'vindinger' (figur 1-3). Bøger om oldgræsk kunst fortæller, at spiraler symboliserer havet; men hvor kom inspirationen til den 'dobbelte' spiral fra? Efter at have været på feltarbejde på den Dodekanesiske ø Karpathos mellem Kreta og Rhodos var et besøg på Museet for Kykladisk Kunst i Athen 2 uger efter den helt store déjà vue oplevelse for os ichnologer, der arbejder med sporfossiler.

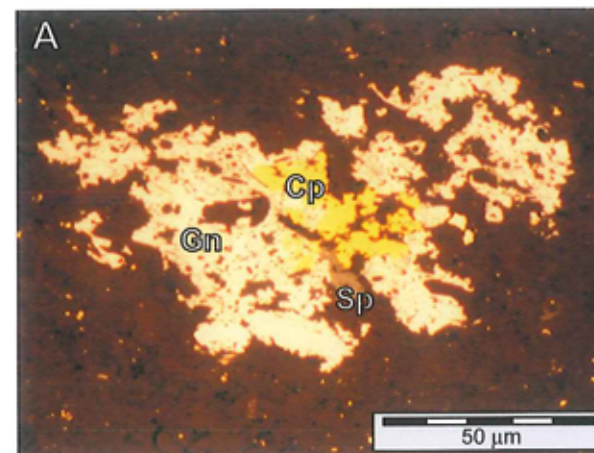


Figur 1.
Dobbeltspiraler på
solvogne fra Mykene
(2. årtusinde f. Kr.).

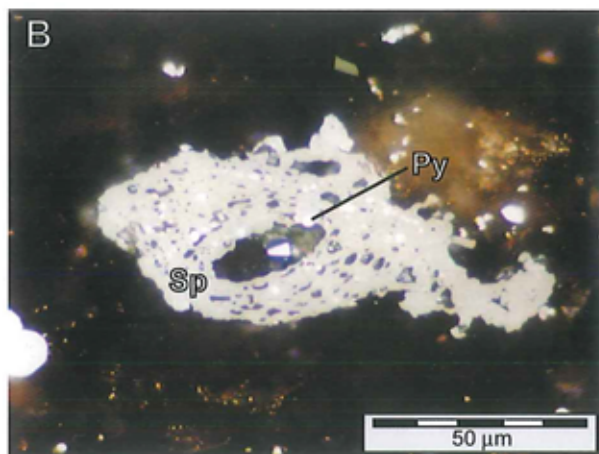
En forklaring på de ensartede isotopværdier for bioturbere og laminerede sedimenter (figur 12) kan findes ved isotopanalyser af pyrit-svovl i tidlig diagenetiske kalkkonkretioner fra Ravnefjeld Formationen. Disse viser, at der er relativt lave negative $\delta^{34}\text{S}$ værdier i de bioturbere sedimenter, mens der er høje negative værdier i de laminerede sedimenter (figur 12). Værdierne kan alene forklares ud fra mikrobiel sulfatreduktion i de laminerede sedimenter, mens der i tillæg skete oxidering og disproportionering af sulfiden i de bioturbere sedimenter. Endvidere må mængden af sen diagenetisk pyrit have været begrænset i de tidlig diagenetiske kalkkonkretioner, som har fungeret som lukkede systemer uden tilførslen af porevand mættet med hensyn til pyrit. Sen diagenetisk pyrit er i reglen beriget på ^{34}S eftersom tilgængeligheden af havvandssulfat mindskes (Raleigh destillation). De ensartede isotopværdier kunne derfor afspejle en større mængde af sen diagenetisk pyrit i forhold til mængden af tidlig diagenetisk.

SVOV LISOTOPER I BLY-, ZINK- OG KOBBER-SULFIDER I RAVNEFJELD FORMATIONEN

Forekomster af bly-, zink- og kobber-sulfider i Ravnefjeld Formationen har siden 1968 været kendt fra et ca. 50 kvadratkilometer stort område i Wegener Halvø området (figur 9). Forekomsterne har været undersøgt af bl.a. Nordisk Mineselskab A/S og Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS). Mineraliseringen findes oftest i de nederste meter af Ravnefjeld Formationen og er specielt koncentreret omkring et N-S orienteret strukturelt element kaldet Vimmelskiftet lineamentet. De mineraliserede sedimenter indeholder metalsulfiderne chalcopyrit (CuFeS_2), galena (PbS) og sphalerit (ZnS) i tillæg til pyrit (Figur 13). Disse metalsulfider forekommer i sedimenterne og indeni kalkitkonkretioner, der blev dannet under tidlig diagenese inden signifikant kompaktion af sedimenterne.



Figur 13.
A: Forekomst af metalsulfider (chalcopyrit = Cp, galena = Gn, pyrit = Py og sphalerit = Sp) i konkretioner fra Ravnefjeld Formationen.



Figur 13.
B: Prøver fra Wegener
Halvøen er vist i reflekteret
lys.

Undersøgelserne af Ravnefjeld Formationen i dette område viser, at aflejringen af sedimenterne fandt sted i en sulfid-domineret vandsøjle i de dybere vande imellem karbonatrene af Wegener Halvø Formationen. Analyser af syn-sedimentær og tidlig diagenetisk pyrit viser markant højere $\delta^{34}\text{S}$ værdier (ca. -30‰ til 2‰) end observeret i prøver af Ravnefjeld Formationen fra Triaselv og Kap Stosch (se forrige afsnit). De forholdsvis høje $\delta^{34}\text{S}$ værdier kan forklares ved mikrobiel sulfat reduktion i længerevarende sulfidiske bundvandsforhold imellem karbonatrene, hvor udveksling med frisk havvandssulfat var begrænset. Svovlet i bly-, zink- og kobber-sulfiderne er generelt tungere (ca. -12‰ til -4‰) end i pyritten og menes at repræsentere udfældning i sulfid-domineret porevand, der har været beriget i ^{34}S på grund af den foretrukne fjernelse af ^{32}S af sulfat-reducerende mikroorganismer og udfældningen af tidlig diagenetisk pyrit i nær havbundsmiljøet. Forekomsten af metalsulfider i konkretioner dannet inden kompaktionen af sedimenterne vidner om, at mineraliseringen er af tidlig diagenetisk karakter. Det menes, at varmt, bly-, zink- og kobber-beriget grundvand blev introduceret fra dybereliggende dele af bassinet via Vimmelskaflet lineamentet og kanaliseret ud igennem syn-sedimentære forkastninger og sprækker i karbonater i Wegener Halvø Formationen. Udfældningen af metalsulfiderne fandt sted da disse fluider mødte det sulfidiske porevand i de nedre dele af Ravnefjeld Formationen.

Karbonaterne fra den samtidige Wegener Halvø Formation indeholder også bly-, zink- og kobber-sulfider, men svovlet i disse er lidt tungere end i de sorte skifre, og der er petrografiske indikationer på, at disse sulfider er dannet i forbindelse med termokemisk sulfatreduktion under dyb begravelse af lagpakken sidst i Kridt og Tidlig Tertiær under tilstedeværelse af migrerede hydrokarboner (olie). Den isotopiske

fraktionering mellem disse metalsulfider og samtidig sulfat (repræsenteret ved baryt, BaSO_4) er fra $\delta^{34}\text{S}$ -værdier på $-18,5\text{‰}$ til $-24,4\text{‰}$, og vidner om lave udfældnings-temperaturer, fra 70 til 100°C .

MASSEUDDØDEN OG DET SULFIDISKE BUNDVAND

Sedimenterne af Ravnefjeld Formationen blev aflejret i tiden op til den største masseuddøden, som Jorden har været igennem. Ved grænsen Perm-Trias ($251,4 \pm 0,3$ millioner år) blev måske 90 % eller mere af eksisterende arter i havene udslettet. Vores undersøgelse af Ravnefjeld Formationen viser, at der var sulfidiske bundvandsforhold igennem hele Østgrønland Bassinet. Lignende aflejringsforhold ses i dag som pulser af skiffer i den geologiske lagfølge i de nordatlantiske områder, Svalbard og det centrale Europa. Dette foregik omtrentligt i samme tidsperiode Wujipigian (ca. 254-260 millioner år), hvor der blev initieret 'super-anoxiske' forhold i det gigantiske Panthalassa ocean, der omgav det store sammensatte kontinent Pangea, og fortsatte videre over grænsen Perm-Trias. Årsagen til disse anoxiske (og sulfidiske) forhold er stadigvæk et omdiskuteret emne. En af de seneste foreslåede modeller omfatter voldsom vulkansk aktivitet i Sibirien og det sydvestlige Kina med dannelsen af mægtige basaltdekker. Varmen fra denne vulkanske aktivitet førte til, at store isdækker smeltede og frigtigt smeltevandet lagde sig som et låg over havvandet og førte til en lagdeling af havvandet og nedsat havvandscirkulation, der førte til de vidt udbredte anoxiske bundvandsforhold. Vi mener, at et stresset miljø for organismer med stinkende forrådnelsesprocesser og giftige forhold kunne have ført til den biologiske krise ved grænsen Perm-Trias. Det kunne have været resultatet af stigende havniveau, som førte til ekspansion af sulfidisk bundvand fra Panthalassa oceanet til de kontinentale havområder. En mulig afgasning af H_2S gas til luften kunne have resulteret i giftige miljøer på landjorden, hvor masseuddøden også gjorde sit indtog.

Vi takker Det Naturvidenskabelige Fakultet ved Københavns Universitet, Danmarks Grundforskningsfond, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Det Naturvidenskabelige Forskningsråd og Statoil Nord-Norge for støtte til dette isotopstudie af malmforekomster og potentielle kildebjergarter i det nordatlantiske område.