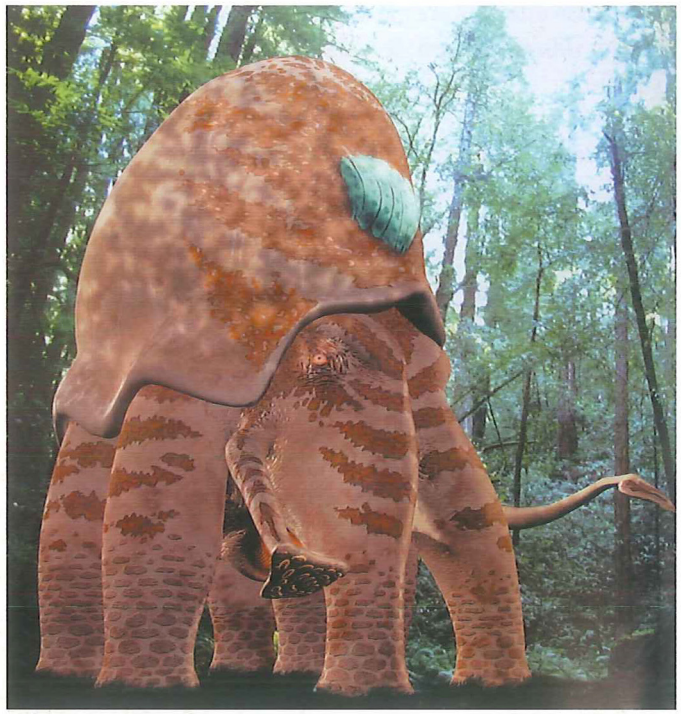


Figur 3. På det nye superkontinent Pangæa II, der dannes 200 millioner år frem i tiden, er blæksprutterne de dominerende landdyr og har både udviklet små adrætte trælevende former og kæmper som Megasquid.

The Future is Wild opstiller et kvalificeret bud på en række mulige fremtidige evolutionsliner. Selvom nogle af frembringelserne ved første blik kan virke meget fantasifulde, har det tætte samarbejde med videnskabsfolk fra hele verden omhyggeligt sørget for, at ingen af de grundlæggende evolutionsprincipper bliver brudt. I mange tilfælde bliver de komplicerede fremtidige symbioser rent faktisk overgået af, hvad der sker i naturen i dag.

Teknisk set er The Future is Wild ikke så imponerende som BBC's Walking With serie, nogle af dyrene ser lidt for computertegnede ud og mangler lige det sidste grafiske pift for at virke rigtigt overbevisende og livagtige, men kan man lide Dougal Dixon's tidligere bøger bliver man nødt til at se denne serie.

The Future is Wild har indtil nu været vist på forskellige udenlandske tv-kanaler, og vil formentlig blive vist i Dansk tv senere på året. Serien er også udgivet på DVD og som en særdeles flot bog med billeder fra serien.

Jesper Milàn

VARV

NR. 2 BLADET MED DE ÆLDSTE NYHEDER 2003



FOSSILE SPOR

SANTORINIS EKSPLOSIVE HISTORIE

MOIRÉ - LØSNINGEN PÅ EN GÅDE

ISSN 0105 - 6301 01- 10- 2003

Forsidebillede: *Lavastrømme fra Skarosvulkanen i det nordlige vulkankompleks på Santorini. Foto: Erik Schou Jensen.*

Forfatternes adresser: Jesper Milàn, Kristian Kann og Anne Dorthe Juul Petersen: Geologisk Institut, Østervoldgade 10, 1350 Kbh. K.

Eigil Holm, Byskovsvej 4, 8751 Gedved.

VARV

Adresse: Tidsskriftet VARV, Geologisk Institut, Øster Voldgade 10, 1350 Kbh. K.
Telefon: 35 32 24 00, Geologisk Institut.
E-Mail: SvendP@Geo.Geol.KU.DK

Redaktion: Asger Berthelsen, Knud Binzer, Bjørn Buchardt, Bjørn Hageskov, Henrik Fougt, Mikkel Hede, Arne Thorshøj Nielsen, Mikael Pedersen (webmaster) og Svend Pedersen (ansvarshav.)
Bestyrelse: Asger Berthelsen, Valdemar Poulsen, Bjørn Hageskov og Svend Pedersen.

Tekstredaktør: Svend Pedersen

Lay-out og grafik: Bjørn Hageskov

Repro og tryk: Dansk Erhvervstryk A/S

VARV udkommer fire gange årligt. Prisen er 140 kr i abonnement for 2003. Abonnement kan tegnes ved at indsende beløbet til VARV, postgiro 9 06 88 80, eller 160 SEK til VARV's svenske postgirokonto: 4388-5, eller 160 NOK til V 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 resume af artiklerne. Der er også oplysninger om priser på gamle numre, særnumre etc. som sammen med tegning af abonnement kan bestilles on-line.

Adresseændringer bedes meddelt VARV

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

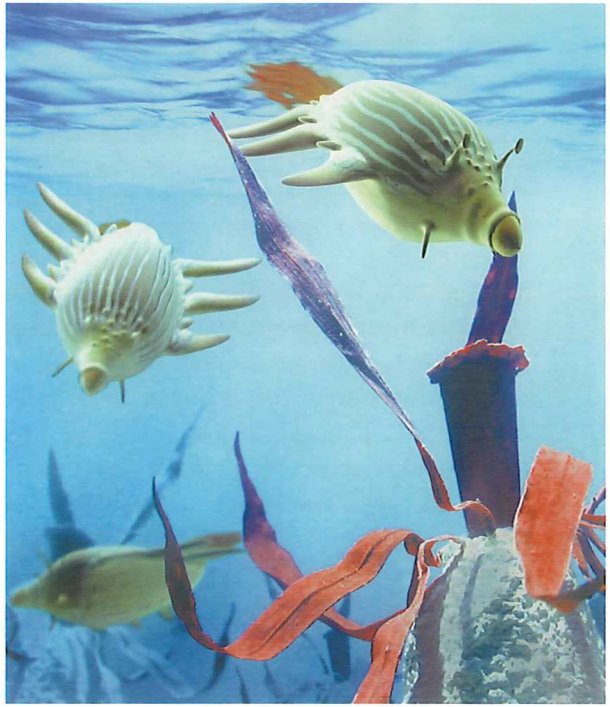
nichen efter uddøde koraller. I de vidtstrakte sumpområder, der dækker de oversvømmede kontinenter, er en blæksprutteform ved at tilpasse sig en mere og mere ´landlevende´ - terrestrisk - livsstil, hvor fire af armene er omdannet til korte brede ben. En efterkommer af skildpadderne har udviklet sig til gigantisk størrelse og har et udseende som de mesozoiske sauropoder.

I denne fremtid er pattedyrene næsten uddøde, de sidste former lever i symbiose med edderkopper i store højder på bjergkæden, der dannes ved Australiens kollision med Nordamerika. Her lever også en stor fugl, der har udviklet lange fjer på bagbenene. Disse fjer fungerer som et ekstra sæt vinger under svævning. Ironisk nok er fantasien her igen blevet overhalet af virkeligheden, da der umiddelbart efter serien blev produceret blev beskrevet en lille flyvende rovdinosaur, *Microraptor*, der havde lange fjer på bagbenene der fungerede som glideplaner.

200 millioner år fra nu

Alle Jordens kontinenter er nu samlet i et nyt superkontinent Pangæa II. I denne fremtidsversion er fuglene og pattedyrene uddøde, og andre dyregrupper har udfyldt deres nicher. Fuglenes niche bliver udfyldt af fisk, der har udviklet brystfinnerne til vinger, og som er blevet i stand til at ånde på land.

Blæksprutterne er blevet det dominerende landdyr og har udviklet både store elefantlignende former (figur 3) og små højt intelligente trælevende former, der med deres otte arme svinger sig smidigt gennem træerne. Havets absolutte toprovdyr er en blæksprutte på 25 meters længde, hvis evne til at skifte farve gør den til et formidabelt rovdyr.



Figur 2. 100 millioner år frem i tiden er rødalger de dominerende revbyggende organismer, og havsnegle har udviklet sig til store aktive rovdyr som denne reefglider.



Figur 1. Om fem millioner år har fuglene udviklet gigantiske marine former som gannethvalen, der udfylder nichen efter de uddøde marine pattedyr.

gigantiske marine former (figur 1), der udfylder hvalernes niche. Væsler og lignende udvikler store sabeltandede former, der jager gnavere af en betragtelig størrelse på den vidtstrakte tundra langs isranden. I de tempererede egne er det dominerende rovdyr en gigantisk flugtløs fugl, der genudvikler kløer på fingrede i stil med Phorusrhaciderne eller terrorfuglene fra Sydamerika, der var blandt de dominerende rovdyr op gennem Tertiærtiden.

En anden fuglegruppe har udviklet sig til underjordiske former med en muldvarpelignende tyk afrundet krop, hvor vingerne er specialiseret til at grave med. Disse fugle lever i underjordiske kolonier med en dronning i stil med mange sociale insekter og nogle pattedyr.

100 MILLIONER ÅR FRA NU

På dette tidspunkt befinder jorden sig i en opvarmningsfase, der har smeltet iskapperne ved polerne. Derved er store dele af kontinenterne blevet oversvømmet. Opvarmningen samt kontinenternes placering har skabt enorme lavvandede frodige havområder. Havsnegle har udviklet store rovformer på op til 1,5 meters længde, der jager langs de store rødalgerev (figur 2), der udfylder

DOLKHALER, FLYVEØGLER ELLER HOPPENDE DINOSAURER

Jesper Milàn

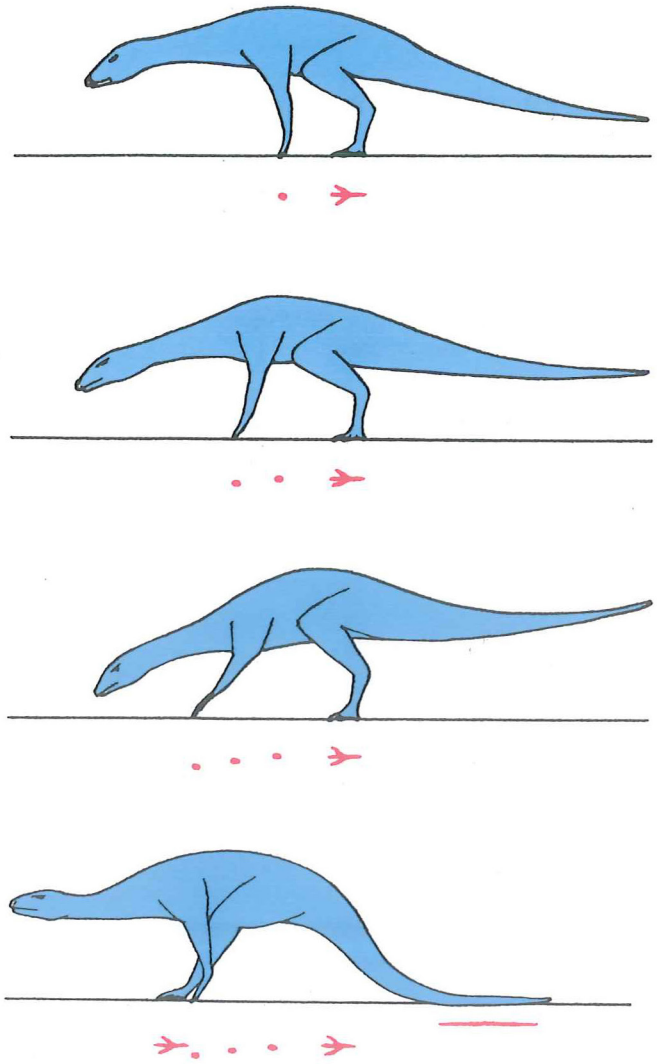
I de triassiske (ca. 210 millioner år gamle) aflejringer, der findes ved Jameson Land i Østgrønland, er der iagttaget adskillige små serier af fodspor, der har givet ophav til adskillige meget forskellige fortolkninger gennem tiden.

Sporserierne består typisk af to rækker af fodaftryk, der tilsyneladende har tre til fem tynde tæer hver. Imellem de store spor ses en række af fire mindre punktformede spor, der er placeret tættere på sporseriens midterlinie end de store spor. Centralt i sporserien optræder oftest et slæbespor efter dyrets hale (figur 1). De sedimenter, som sporene fra Jameson Land findes i, er gamle



Figur 1. Sporserie fra Jameson Land, Østgrønland. Bemærk de parvist afsatte store spor og de mindre spor indimellem. Foto: Lars Clemmensen.

flodslette- og søaflejringer. I samme område har der endvidere eksisteret en rig fauna af mindre krebsdyr, der har kravlet omkring i småpytter mellem de forgrenede flodarme, ligesom der er fundet adskillige spor og sporserier fra små rovdinosaurer som *Coelyphysis* og større planteædende dinosaurer som *Plateosaurus*.



Figur 2. Model der viser hvorledes et reptil eller tidligt pattedyr kunne frembringe denne type sporserie ved at benytte en kænguruligende gangart. Efter Wilfarth 1937.

Anmeldelse:

The Future is Wild - en ZDF produktion

The Future is Wild er det nyeste skud på stammen af computeranimerede naturhistoriske serier. Hvor de tidligere serier Walking With Dinosaurs, Walking With Beasts (anmeldt i VARV 2002,2) og Walking With Cavemen alle på mesterlig vis har genskabt fortidens dyreliv, er The Future is Wild en safari ind i fremtiden og bygger på Dougal Dixon's fremtidsvisioner om dyrelivets fortsatte udvikling.

Geologen og kunstneren Dougal Dixon er forfatter til adskillige populærvidenskabelige bøger om geologi og palæontologi, men de måske mest bemærkelsesværdige udgivelser er bøgerne, hvori han beskriver alternative udviklingsscenarier. Den første af disse bøger After Man udkom i 1981 og foregår 50 millioner år efter at mennesket har udryddet alle de dominerende dyr på jorden inklusive dem selv. Dixon opstiller her et scenario, hvor få sejlivede arter som gnavere og fugle har udviklet sig til former, der nu udfylder alle tomme økologiske nicher, alt sammen inden for evolutionens mulige rammer.

I 1988 udkom bogen The New Dinosaurs, hvor Dixon forestiller sig at dinosaurerne ikke uddøde ved Kridt/Tertiær-grænsen men fortsætter med at udvikle sig og beherske landjorden, mens pattedyrene aldrig udviklede sig udover gnaverstadiet. Interessant nok har de seneste dinosaurfund vist, at dinosaurerne i mange henseender var mere avancerede end det, Dixon forestiller sig de kunne udvikle sig til efter yderligere 65 millioner år.

Sidste bog i serien After Man udkom i 1990 og omhandler menneskets videre udvikling med alle former for genetisk manipulering og sammensmeltning mellem menneske og maskine taget med i betragtning. Selv om Dixon´s bøger selvfølgelig er ren fiction, er de respekterede i videnskabelige kredse, da hans skabninger altid nøje holder sig inden for rammerne af, hvad der er evolutionsmæssigt muligt.

The Future is Wild beskriver i tre programmer dyrelivet i tre fremtidige tidsperioder, 5 millioner, 100 millioner og 200 millioner år fra nu. Adskillige internationale eksperter i geologi, palæontologi og zoologi har medvirket som konsulenter på serien.

5 MILLIONER ÅR FRA NU

Jorden befinder sig i slutningen af en istid, der har presset økosystemerne hårdt. De fleste større pattedyr er uddøde, og mindre dyr udvikler sig til at udfylde forskellige nicher i det barske miljø. For eksempel har havfugle udviklet

VARV priser 2003

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

Særnumre

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

Palæoklima (1996, 3+4 & 1997,2) 80 kr

Bornholms geologi

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

Andre

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

Alle priser er ekskl. forsendelse

Sporene fra Øst Grønland blev første gang beskrevet i 1938 af Dr. Hans Stauber, der mente, at de stammede fra en af Triastidens padder (stegocephalier). Det karakteristiske mønster med altid parvise spor gav senere ophav til forskellige ideer om, at sporene stammede fra enten en flyveøgle, et lille reptil eller et pattedyr, der hoppede omkring på kænguruligne vis.

Sceneriet med, at sporene skulle stamme fra en flyveøgle, bygger dels på, at man på daværende tidspunkt ikke kendte sporene fra flyveøgler, og dels på, at man var meget i tvivl om, hvorledes flyveøglerne benyttede armene, når de bevægede sig på jorden. De primitive flyveøgler i Triastiden havde i modsætning til senere former stadig en lang hale, der kunne have skabt det centrale slæbespor i sporserierne. De store grenede spor skulle da være sat af bagfødderne, mens de mindre punktformede spor skulle være sat af leddet, hvor den forlængede flyvefinger bøjede op og de tre mindre frie fingre var løftet fri af jorden. Man har senere fundet rigtige flyveøglespor, og disse passer betydeligt bedre til udformningen af hænder og fødder hos flyveøglerne.

Hypotesen om, at sporene skulle være sat af et lille reptil eller pattedyr med en hoppende gang, skulle kunne forklare de parvise store spor fra bagfødderne og det højere antal små aftryk fra forfødderne. Nutidens kænguruer har, når de går i et bestemt tempo, en gangart, hvor de tager et langt hop med bagbenene og går flere små skridt med de kortere forben, før de igen tager et langt hop med bagbenene. Denne gangmodel er blevet foreslået brugt på både primitive pattedyr, mindre reptiler og rovdinosaurer for at finde en spormager, der kunne matche de fundne sporserier (figur 2).

Modellerne fik imidlertid et alvorligt knæk, da lignende spor blev beskrevet fra Devon- og Kultiden - for 300-400 millioner år siden - længe før nogle af de foreslåede spormagere var opstået. Løsningen på sporenes oprindelse skulle imidlertid findes i den litografiske kalksten fra Solnhofen i Tyskland, der mest er kendt for sine fantastisk velbevarede fossiler af krebsdyr, insekter og fisk samt den tidligst kendte fugl *Archaeopteryx*. Sporserierne fra Solnhofen kalkstenen blev først fortolket som spor fra selveste *Archaeopteryx,* der havde hoppet omkring som nogle moderne småfugle gør det i dag. Det centrale slæbespor i sporserierne skulle stamme fra *Archaeopteryx´* lange knoglehale, der havde slæbt hen af jorden, når den hoppede rundt. Sporene fra Solnhofen blev dog senere adskillige gange omfortolket som spor fra padder, flyveøgler og hoppende dinosaurer.

Mysteriet omkring spormagerens identitet blev imidlertid endeligt opklaret, og overraskende nok viste sporene sig ikke at stamme fra et hvirveldyr. I Solnhofen fandt man fossilet af en dolkhale for enden af en af sporserierne. At sporet stammede fra en dolkhale forklarede, hvordan sporene kunne findes så

Lidt om dolkhaler og litografiske kalksten fra Solnhofen

Dolkhaler bliver ofte omtalt som levende fossiler, da det stort set ikke er muligt at skelne nulevende former fra fossile. Fra de første dolkhalelignende dyr opstod sidst i Kambrium for omkring 500 millioner år siden og til i dag, har de været utroligt konservative med hensyn til deres kropsbygning.
Slægten *Limulus*, som den moderne dolkhale tilhører, bliver af mange forskere regnet for at kunne føres helt tilbage til Triastiden, hvilket betyder, at dolkhalen er forblevet uændret de sidste 240 millioner år.

Den litografiske kalksten fra Solnhofen er verdenskendt for de talrige utroligt velbevarede fossiler, hvor ikke kun skeletter er bevaret, men i mange tilfælde også dyrenes bløddele. Mest berømt er *Archaeopteryx*, den tidligst kendte fugl, hvor fjerdragten er bevaret i flere af eksemplarerne.
Kalkstenen blev kaldt litografisk, fordi den er meget finkornet og fint lamineret og derfor tidligere blev anvendt til at fremstille plader til litografiske tryk.
Kalkstenen blev dannet i slutningen af Juratiden for 150 millioner år siden på bunden af et aflukket havområde. Bundforholdene var særdeles livsfjendske med et lavt indhold af ilt og et højt indhold af salt, hvilket har givet optimale forhold for bevaring af fossiler, da der ikke fandtes bundlevende organismer til at spise de døde dyr, der sank ned på bunden.
De fundne sporserier efter krebsdyr og dolkhaler viser tydeligt, hvor barske bundforholdene i Solnhofen har været. I flere af sporserierne kan man se, at dyrene efter at være landet på havbunden er gået et par meter for derefter at dø, dvs. at man finder dyret som fossil for enden af sit spor.

tidligt i livets historie, da dolkhalelignende dyr kendes helt tilbage fra midten af Kambrium for 520 millioner år siden.

Hvordan spor fra så vidt forskellige dyr som dolkhaler, pattedyr, flyveøgler og dinosaurer kunne forveksles kræver et nærmere kig på dolkhalernes ben. Set fra undersiden (figur 3) har dolkhalen fem par ganglemmer. De fire forreste ender i små kløer og laver kun små fordybninger i sedimentet når de går. Det bagerste par lemmer derimod er længere, kraftigere og ender i en stor forgrenet 'fod', der skubber dolkhalen frem, når den går. Det er aftrykket fra disse store forgrenede lemmer der skaber, hvad der ligner aftrykket fra reptil- eller pattedyrfødder, mens de fire par gradvist mindre ben skaber rækken af små aftryk mellem de store. Dolkhalens lange stive halepig slæber henover sedimentet, når den går, og skaber den centrale fure mellem sporene.

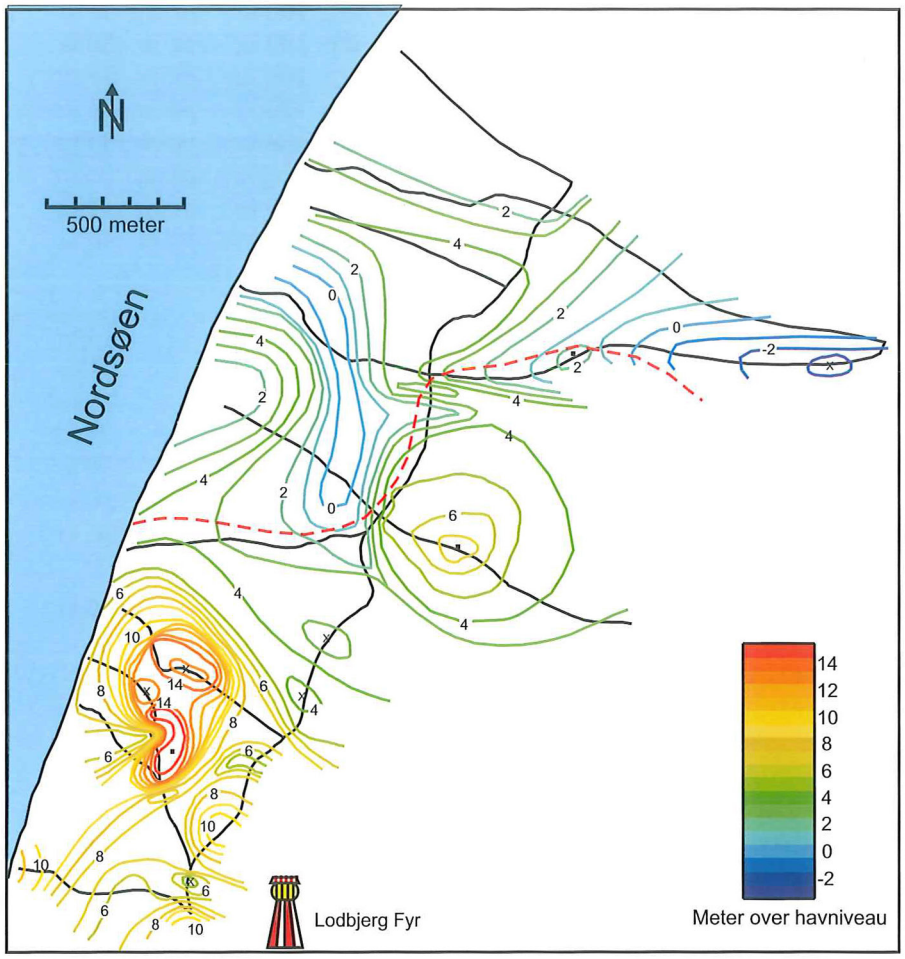
Den store forskel i størrelsen af ganglemmerne hos dolkhalerne gør, at de fire forreste par lemmer ikke bliver presset lige så dybt ned i sedimentet som de store bagerste ganglemmer. Det betyder, at hvis den overflade sporserien findes på er blevet eroderet, kan aftrykkene fra de små ganglemmer og sporet

RETTELSE

I VARV 2003 nr. 1 er **figur 7, side 30** fejlagtig identisk med figur 8 på side 31. Den rigtige figur 7 ses nedenfor i korrekt størrelse. Figur teksten er rigtig i VARV Nr.1, 2003, men er alligevel også gengivet her.

Klip siden ud og indsæt figuren i VARV nr 1, 2003 på side 30!

ER BLEVET RETTET!



Figur 7. Topografisk kort over landskabet under flyvesandet, hvor konturlinierne tydeligt viser niveauforskelle i overfladen I den sydlige del ses en bølget tilloverflade, mens den nordlige del består af marint sand. Den røde stiplede linie illustrerer den daværende kystlinie.



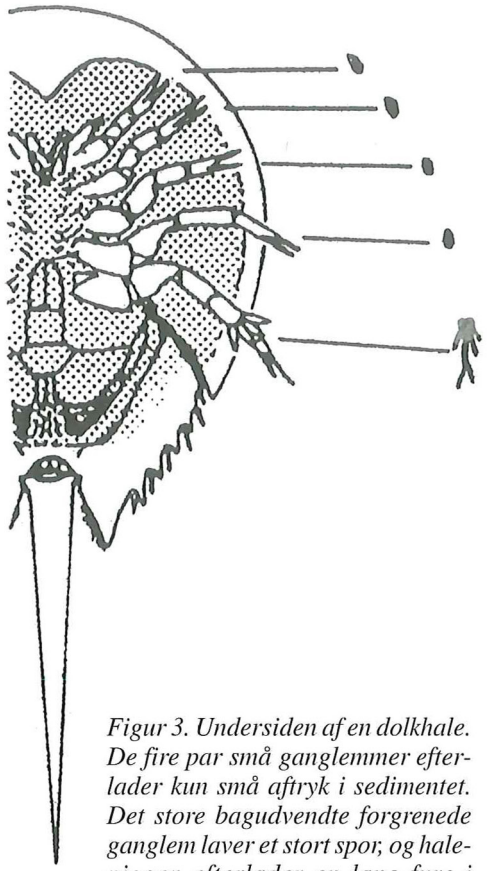
Figur. 1. Mellem tre fredede gravhøje vest for Fovsing (i Struer kommune) ses ti overpløjede gravhøje som lyse pletter. Moirémønstret fortsætter gennem disse. (foto: Lis Helles Olesen, september 1988).

Men forklaringen skal sandsynliggøres. Det gøres ved hjælp af luftfotos fra bogen: **Fortiden set fra himlen. Luftarkæologi i Vestjylland**, af Palle Eriksen og Lis Helles Olesen (Holstebro Museum 2002). Bogen indeholder mange farvebilleder, og på nogle af dem er der moirémønstre. Ved et møde med forfatterne, bemærkede Lis Helles Olesen, at moirémønstret fortsatte gennem de nedpløjede gravhøje, der består af en anden slags jord end markens. Fænomenet må altså være yngre end gravhøjen.

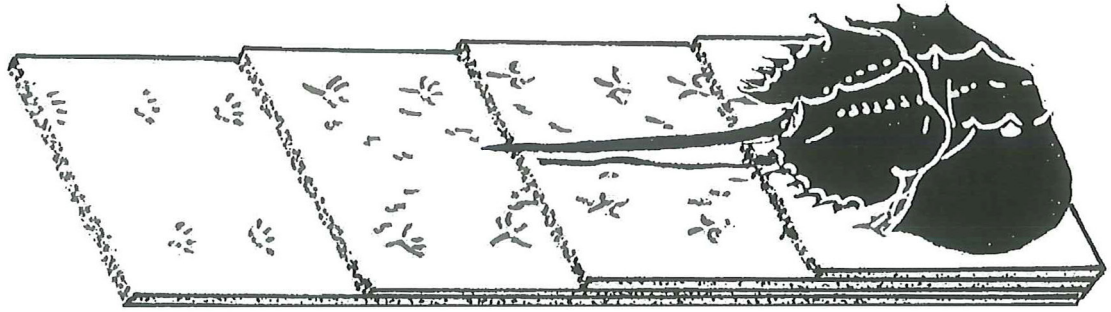
Det betyder, at forklaringen på fænomenet ikke er geologisk, men er knyttet til landbrugets teknik og det vil sige i det væsentligste til pløjning. Køber landmanden en ny plov, vil den somme tider pløje på en lidt anden måde end den gamle, idet både plovfurernes bredde og retning kan ændre sig lidt. Hvis undergrunden, der pløjes op, har en anden farve end overjorden, vil man få to furesystemer på samme mark, og det giver anledning til moirémønstre. Mønstret afhænger af vinkelen mellem furerne. Harvning må for øvrigt også kunne medvirke; harvning behøver ikke at have samme retning som plovfurerne. Undertiden harves i to retninger vinkelret på hinanden.

fra halepiggen være forsvundet. Derved kommer sporserien til at fremstå meget reptil- eller pattedyrslignende (figur 4). Der kan opstå yderligere komplikationer ved, at heller ikke alle dele af det store ganglem bliver presset lige dybt ned i sedimentet. Aftrykket ændrer derved også form alt efter til hvilken dybde, sporet eroderes. I nogle tilfælde kan de eroderede spor endda overfladisk ligne et spor, der peger i den modsatte retning af den aktuelle gangretning. Så selvom man nu kender ophavsmanden til denne type sporserier, kan de stadig skabe forvirring, hvis de bliver fundet i eroderet tilstand.

Hvad angår sporene fra Østgrønland, blev deres dolkhaleophav fastslået af den danske geolog Eigil Nielsen i 1949. Han var først lige ved at beskrive sporene som hvirveldyrspor, men så til sin forbavselse en tysk afhandling med stort set identiske dolkhalespor fundet i den tyske Bundsandstein (ældste del af Trias). Dette fik ham til korrekt at ændre sin tolkning af de grønlandske spor fra at være sporene fra et lille hoppende hvirveldyr til i stedet



Figur 3. Undersiden af en dolkhale. De fire par små ganglemmer efterlader kun små aftryk i sedimentet. Det store bagudvendte forgrenede ganglem laver et stort spor, og halepiggen efterlader en lang fure i sedimentet. Efter Caster 1939.



Figur 4. Dolkhalespor eroderet til forskellige dybder. De forskellige dele af ganglemmerne presses ned til forskellig dybde i sedimentet. Derved ændrer sporserien udseende, når den eroderes til et dybere niveau. Efter Goldring & Seilacher 1971.

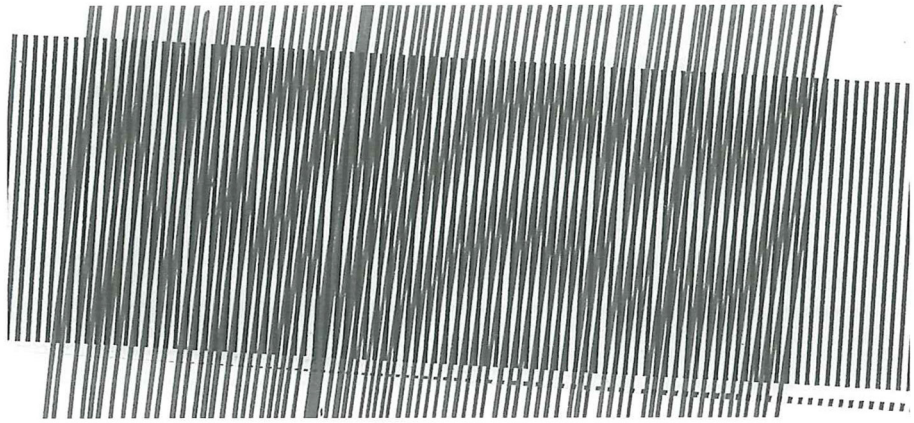


Figur 5. Hvad man først troede var sporet fra et hvirveldyr, der gik i én retning, viste sig at være en dolkhale, der gik i den modsatte retning. Figur: Bromley 1996.

at være sporene fra en dolkhale. Denne fortolkning er i 1976 brugt af den danske sedimentolog Lars Clemmensen i en rapport fra feltarbejder i området.

En morsom detalje ved hele denne historie er, at forgreningerne på det store ganglem hos dolkhaler peger bagud, når den går. Så ikke alene var alle de tidligere foreslåede spormagere forkerte, men også den, i de fleste tilfælde, foreslåede gangretning for sporserierne var forkert. Hvad man troede var sporene efter et hvirveldyr der gik i én retning, viste sig at være sporene fra en dolkhale, der gik i den modsatte retning (figur 5).

imellem dem. Forskellen er så lille, at den ikke ses, når man står tæt ved, men kun når man står på stor afstand og kan overskue mange furer på en gang'. I så tilfælde ser man altså to års pløjninger på samme mark.



Et moirémønster fremkommet ved, at to lidt forskelligt orienterede sæt af parallelle linier er lagt over hinanden. Mønstret ændrer sig med vinkelen mellem linierne.



Moirémønsteret er fremkommet ved, at to stykker gardinstof med kvadratiske masker er lagt over hinanden. Hvis det øverste stykke stof er lidt foldet eller bulet, fremkommer mønstre med koncentriske figurer.

GÅDE LØSES

Eigil Holm

I VARV 1998,3 publicerede undertegnede et flyfoto af et besynderligt mønster i en mark og bad om hjælp til fortolkning. En læser - L.K.Kristensen fra Århus - svarede i VARV 1999,1 og foreslog at forklaringen kunne være **moirémønstre**, dvs. de mønstre der opstår, når man eksempelvis ser ud gennem to lag gardiner med parallelle tråde.

L.K.Kristensen kommenterede uddybende, at to lidt forskellige pløjeretninger på samme mark måtte kunne give moirémønstre. Problemet blev ydermere belyst ved, at L.K.Kristensen, der selv har en mark med et tyndt muldlag over sand, havde bemærket, at, 'Første gang jorden pløjes, bliver der et system af parallelle linier, hvor muld skubbes sammen eller sand blottes. Næste gang der pløjes, gør det en lille forskel, om der pløjes præcist i de gamle furer eller midt



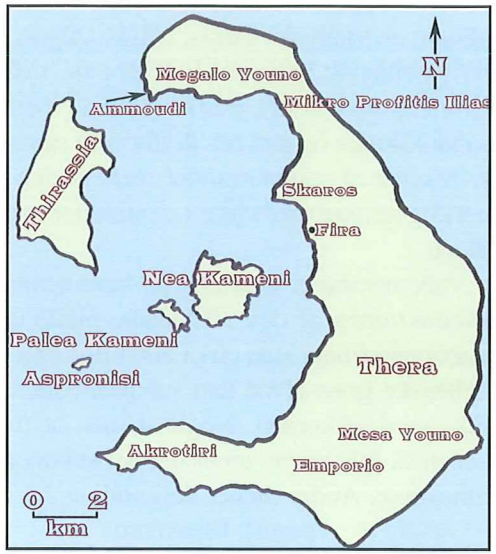
Figur 2. Luftfotoet, der blev bragt i Varv 1998,3, viser en mark ved Tingstedholm mellem Gedved og Skanderborg, fotograferet 25. oktober 1997. Den største lyse plet er en nedpløjet kæmpehøj, der stadig kan anes i terrænet. De øvrige lyse pletter kan også være rester af gravhøje. Moirémønstrene er forskellige i højre og venstre side. Til højre er der kun pløjet, til venstre er der også harvet.

SANTORINIS EKSPLOSIVE HISTORIE

Af Kristian Kann og Anne Dorthe Juul Petersen

Santorini er en græsk øgruppe, der består af vulkanøerne Thera, Thirassia, Aspronisi og de senest aktive Kameni øer (figur 1). De tre af øerne udgør tilnærmelsesvis en oval rundt om en vandfyldt caldera. Thera er den største ø (og der hvor hovedstaden Fira ligger). Thirassia den næststørste ø og Aspronisi er en ganske lille, helt ubeboet ø. I midten af calderaen ligger de to yngste øer: Nea Kameni og Palea Kameni.

Det mest kendte af alle vulkan-udbrud på Santorini er det minoi-ske udbrud, der fandt sted for cirka 3.600 år siden (se VARV 1991,2 og 3). Det var ikke det voldsomste vulkanudbrud nogensinde, ej hel-ler det der påvirkede jordens klima længst, men alligevel er Santorini en af de bedst beskrevne vulkaner i verden. Grunden til populariteten skal nok søges i, at Santorini passer utrolig godt ind i legenden om Atlantis, og at det minoiske udbrud sandsynligvis var begyndelsen til enden for det højtudviklede minoiske folk.

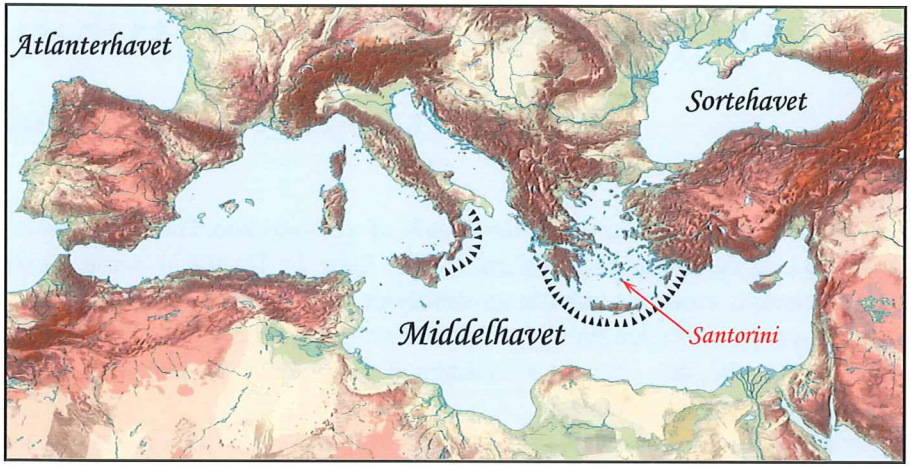


Figur 1: Øgruppen Santorini. Calderaens ovale facon er dannet af episoder af vulkan-opbygning og adskillige eksplosive caldera-kollapser gennem mindst 200.000 år. Charter-fly lander på hovedøen Thera, og man har derfor nem og billig mulighed for at besøge et enestående geologisk udflugtsmål.

Subduktionen

Santorini ligger i den hellenske øbue, som ligger ovenover den ene af to Wadati-Benioff zoner med aktiv vulkanisme i Middelhavet (figur 2). Den anden Wadati-Benioff zone er den tyrrhenske, der ligger i det vestlige Middelhav syd for Italien. Subduktionen har her givet ophav til den italienske vulkan-provins med Etna i syd og Vesuv i nord.

Den hellenske øbue er beliggende i den sydlige del af det Ægæiske Hav og strækker sig fra Tyrkiets vestkyst til Grækenlands østkyst. Santorini ligger i den centrale del



Figur 2: To af de aktive subduktionszoner i nutidens Middelhav: Den tyrrhenske i vest og den hellenske i øst. Siden Trias har der været adskillige subduktionszoner i det der i dag er Middelhavet. (Atlasudsnit: Copyright 1998. Interactive Ancient Mediterranean).

af øbuen, cirka 150 kilometer nord for Kreta. De andre vulkanøer, der indgår i øbuen, er Methana, Poros, Milos, Ægina, Nisyros, Yali og Kos, som alle har haft vulkansk aktivitet indenfor de sidste par millioner år. Vulkancentret Crommyonia på det græske fastland menes også at være dannet som følge af subduktionen og nævnes derfor ofte sammen med øerne i øbuen. Begge øbuer er resultat af sammenstødet mellem den afrikanske plade, der bevæger sig i nordlig retning med cirka 1 centimeter om året, og den relativt stabile eurasiske plade.

Vulkanøerne er etableret på kontinentalskorpe og dannet som følge af den subduktionen af den afrikanske plade under det Ægæiske Hav. Selve subduktionen finder sted cirka 200 kilometer syd for Santorini og markeres af den hellenske grav. Hvad den subducerende afrikanske pladefront består af vides ikke med sikkerhed. Nogle mener, at fronten til at begynde med bestod af oceanisk lithosfære, mens det der subduceres i dag kan være tynd kontinental-lithosfære. Andre mener derimod, at det der subduceres hele tiden har været, og stadig er, oceanisk lithosfære.

Vulkanerne i øbuen er opstået, fordi den subducerende plade under metamorfose frigiver volatiler til kappekilen, og mineralerne i kappekilen får herved nedsat deres smeltetemperatur (figur 3). På grund af den nedsatte smeltetemperatur vil en lille del af kappekilen efterfølgende kunne opsmelte, og smeltepartiklerne vil søge opefter, da de har lavere densitet end omgivelserne. Dette sker som følge af, at partiklerne udvides under opvarmning, og da de

at vulkanen er udslukt. På Kameni øerne og Thera er der stadig vulkansk aktivitet i form af fumaroler og varme kilder, hvilket antyder, at der ligger et varmt magmakammer under øen. Der vil højst sandsynligt komme et nyt udbrud på Santorini en dag, hvornår det sker er uvist. På baggrund af den hidtidige udbrudshistorie kan man nok forvente, at det lige som i 1950 bliver et mindre udbrud.

Ordforklaring

aktiv kontinental margin - subduktion af en oceanisk lithosfæreplade under kontinental lithosfære (f.eks. Nord- og Sydamerikas vestkyster.

caldera – vulkansk depression dannet ved kollaps af taget over et delvist udtømt magmakammer, eventuelt ved tilbagetrækning af magma. Eksplosiv calderadannelse, som flere gange har fundet sted på Santorini, forekommer når vand kommer i kontakt med magmaet.

detritus - Partikler af nedbrudte bjergarter og skeletdele af døde organismer.

fraktioneret krystallisation - en model, hvor de i en smelte dannede mineralkorn fjernes fra smelten, f.eks. ved hjælp af tyngdekraften eller på grund af strømninger i magmakammeret.

fumarole - udstrømningssted for vulkanske gasser (overvejende vanddamp). Særlige svovlholdige fumaroler kaldes solfatarer.

fyllit - metamorf bjergart, der overvejende består af en lys glimmer og kvarts. Fyllit dannes ved metamorfose af lerede sedimenter.

kappekilen - den del af kappen, der ligger over den subducerende plade. Det er i kappekilen, at magmaer i subduktionsmiljøer dannes. Maar – meget flad og bred vulkan dannet af flere overfladenære eksplosioner.

maar - meget flad og bred vulkan dannet af flere overfladenære eksplosioner.

oceanisk øbue - subduktion af oceanisk lithosfæreplade und en anden oceanisk lithosfæreplade (f.eks. Kurilerne og Kamchatka)

stromatolit - lamineret sedimentær kalksten dannet af sedimentbindende cyanobakterier (tidligere kaldet blågrønalger), der fanger detritus i siltstørrelse, som er i suspension i vandet. Med tiden dækkes algerne af silten, og algerne flytter sig for at få lys og fortsætte deres fotosyntese. Til sidst dannes en sten af det opsamlede silt, samt af calciumcarbonat der udfældes, når algerne optager carbondioxid fra vandet til fotosyntese.

viskositet - et udtryk for flydetræghed. Smelter med basaltisk sammensætning har lav viskositet og flyder let, mens smelter med rhyolittisk sammensætning har høj viskositet og flyder trægt.

Wadati-Benioff zonen – seismisk aktiv zone under vulkanske øbuer, som er defineret ud fra jordskælv på overfladen af den subducerende plade. Oceaniske øbuer – subduktion af oceanisk lithosfæreplade under en anden oceanisk lithosfæreplade (f.eks. Kurilerne og Kamchatka). Opkaldt efter de to geofysikere, der første gang påviste zonen.

ikke som andre steder på høje planter. Af den levende vinstok opbygges derimod kurve (figur 11), hvori vindrueklaserne placeres, så de er beskyttet mod vinden. Hvis de havde vokset på almindelig vis, ville druerne blive knust af alle de små pimpsten, der hvirvles op af blæsten (lokalt kaldet meltemi).

Er man arkæologisk og historisk interesseret, kan det ved Akrotiri anbefales at besøge udgravningerne efter det højtudviklede minoiske samfund, som beboede øen cirka 2.000-1.600 f.Kr. Siden hen slog lacedaemonianere (cirka 900 f.Kr.) og ptolemesere (cirka 600 f.Kr.) sig ned på toppen af Mesa Vouno og efterlod her et spændende fæstningsværk, som senere blev anvendt af romerne.

På resterne af Skaros vulkanen kan ligeledes ses ruiner, her er det resterne af en by bygget af katolske frankere, som kom til øen i 1204, mens resten af øen beboedes af ortodokse kristne. I 1579 kom osmanerne til Santorini, og udenfor byen Emporio kan stadig ses de velbevarede rester af en Goulas, et fæstningsværk, bygget i denne periode (figur 12). Når man har set nok historie, kan man tage til pimpstensbruddene ved hovedstaden Fira og hygge sig i mange timer med at lede efter velbevarede plantefossiler (figur 13).

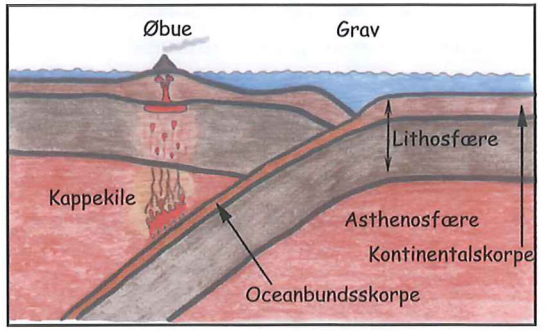
Santorini har været en af de mest aktive vulkaner i Middelhavet gennem de sidste 200.000 år, og at der har været en eruptiv pause siden 1950, betyder ikke



Figur 13: Plantefossil af dværgpalme (Chamaerops humilis) fra pimpstensbruddet umiddelbart syd for Fira. Samme sted kan findes fossiler af f.eks. oliventræ og daddelpalme.

stadig vejer det samme, får de en lavere densitet. Under opstigningen vil partiklerne samles i større og større ansamlinger, for til sidst at danne et magmakammer mellem skorpen og kappen.

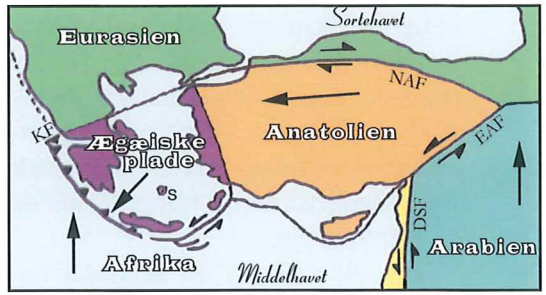
Subduktionen i det Ægæiske Hav er langt mere kompliceret end ovenfor beskrevet, da flere kontinentplader er indblandet heri (figur 4). Den ægæiske mikroplade, som Santorini ligger på, bevæger sig i sydvestlig retning. Dette forårsages af et pres fra øst, der opstår fordi den anatoliske plade (med Tyrkiet) bevæger sig mod vest og skubber på den ægæiske mikroplade. Den anatoliske plade bliver igen skubbet af den arabiske plade, og denne bevægelse kommer fra havbundsspredningen i det Døde Hav. Hele serien af bevægelser får den ægæiske mikroplade til at glide mod sydvest og ikke kun mod vest, som man måske skulle tro. Grunden til at pladen ikke kan bevæge sig stik vest er, at der her ligger kontinentalskorpe med bjergkæder, og det er derfor nemmere for pladen at glide i sydvestlig retning.



Figur 3: Tværsnit af subduktionen af den afrikanske plade (til højre) under den ægæiske mikroplade. Magmadannelse i kappekilen over den subducerende plade giver ophav til vulkanerne i den hellenske øbue, som ligger cirka 140-150 km ovenover. Den hellenske grav er ca. 5 kilometer dyb og markerer selve subduktionen.

Dette er stadig ikke nok til at forklare hele subduktionsbevægelsen, for trækket fra den subducerede del af den afrikanske plade får, efterhånden som den synker, subduktionszonen til at rulle tilbage i sydlig retning og forårsager et træk i den ægæiske mikroplade.Dette medfører, at kontinentalskorpen på den ægæiske mikroplade er blevet strakt til dobbelt længde i de centrale dele (og lidt mindre i yderkanterne), og dermed er fortyndet væsentligt.

Selve subduktionen menes senest at være begyndt for cirka 13-16 millioner år siden.



Figur 4: Mikropladernes bevægelser i det ægæiske område (pilene viser pladernes bevægelsesretninger). En serie af bevægelser resulterer i, at den ægæiske mikroplade bevæger sig mod sydvest. Som følge af alle disse bevægelser er hele det ægæiske område præget af jordskælv.
S: Santorini, DSF: Dødehavsforkastningen, KF: Kefaloniske forkastning, NAF: Nordanatoliske forkastning, EAF: Østanatoliske forkastning.

Santorini

Thera, Thirassia og Aspronisi er hovedsageligt opbygget af vekslende lag af lava og pyroklastisk materiale, men på Sydøstthera kan man se blotninger af det underlag, som hele økomplekset hviler på. Underlaget (også kaldet basement) består her af marmor og fyllit, der er gammel, metamorfoseret, hævet havbund, der som følge af pladekollisionen mellem Afrika og Eurasien er blevet skubbet op i Tertiær. Under resten af Santorini ligger basement under havniveau, og derfor er kun de vulkanske aflejringer blottede.

Santorini kan groft opdeles i et nordligt og et sydligt vulkanfelt. De adskiller sig ved at det nordlige vulkanfelt hovedsageligt er opbygget af lavastrømme (se forside foto), mens det sydlige felt hovedsageligt består af pyroklastisk materiale. I nord har der desuden været flere vulkaner end i syd, og disse er flere steder opsprækket og gennemskåret af lavagange.

Udbrudshistorie

Santorini har haft en spændende vulkanologisk historie. Den første vulkan så dagens lys på den sydlige del af øen Thera for omkring en million år siden (figur 5), i området hvor byen Akrotiri i dag ligger. Derefter rykkede vulkanismen nordpå, og den næste vulkan opstod på Nordthera. Denne vulkan kaldes Peristeria vulkanen og er kernen i Megalo Vouno vulkankomplekset. For cirka en halv million år siden flyttede aktiviteten så til området, hvor hovedstaden Fira i dag ligger.

Den første caldera dannedes i det centrale (Thera) vulkanfelt, omkring 180.000 år før nu. Eksplosiv calderadannelse er en bortsprængning af vulkanens krater - og endog store dele af selve vulkanbygningen, som finder sted, når større mængder vand trænger ind i magmakammeret og giver anledning til meget voldsom eksplosiv aktivitet. Denne proces kaldes et phreatomagmatisk udbrud og har så voldsom karakter, fordi vandet bliver til damp og udvider sig, når det ved kontakten med det mange hundrede grader varme magma opvarmes kraftigt og øjeblikkeligt.

De næste vulkaner der dannedes var Mikro Profitis Ilias og Megalo Vouno, der dannede grundlaget for det store overlappende vulkanfelt mod nord. Herefter kom yderligere to vulkaner til: Simandiri og Skaros. Simandiri opbyggede den underste del af øen Thirassia, og Skaros havde sine første udbrud lige syd for Mikro Profitis Ilias. Thera vulkanen opbyggedes på ny, for til sidst at kulminere i endnu en caldera mellem vore dages Kameni øer og Fira, omkring 80.000 år før nu. Vulkanismen på Thirassia og Skaros fortsatte, og vulkanerne voksede med tiden sammen til den store Thirassia-Skaros vulkan. Lavagange gennemsatte Megalo Vouno og Mikro Profitis Ilias og to slaggekegler dannedes

Et udbrud kan stoppe, når sejtflydende lava størkner i røret, når kraterrøret lukkes til af den omkringliggende klippe fordi trykket i røret falder, eller hvis magmasøjlen trækker sig tilbage. Efter et udbrud vil langt hovedparten af magmaet stadig ligge tilbage i magmakammeret.

På Santorini er lange perioder af vulkanopbygning (begyndende med lavviskøse lavastrømme og afsluttende med højviskøse askeudbrud) altså gang på gang blevet afbrudt, når magmaet har trukket sig tilbage og har efterladt området ustabilt. Phreatomagmatiske udbrud har derpå sønderrevet vulkanbygningerne og givet plads til nye vulkaner i calderaen, nøjagtig som vi ser det i dag.

Lidt historie og kultur

Når man kommer til Santorini betages man øjeblikkeligt af den spektakulære geologi. Man skal naturligvis også nyde den dejlige mad og vin på øen, og hvis man stifter bekendtskab med de utroligt imødekommende og hjælpsomme lokale, kan man endda være heldig at blive inviteret med til vintrampning. Da naturen på Santorini kan være ret barsk med kraftig blæst, dyrkes vindruerne



Figur 12: Goulas; fæstningsværk bygget af osmanerne. Her gemte beboerne i kystbyer sig under angreb fra pirater. I dag vedligeholdes disse monumenter ikke, da de ikke har græsk oprindelse.

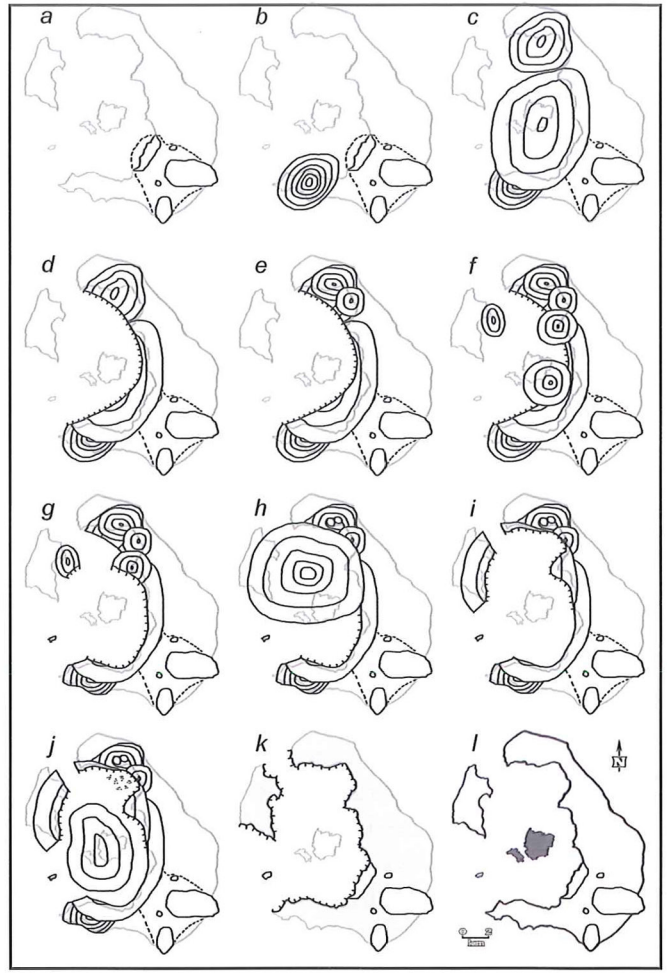
denært magmakammer med mulighed for yderligere krystallisation (olivin og plagioklas samt mineraler som clinopyroxen, orthopyroxen og titanomagnetit), og herfra vil selve udbruddet endelig finde sted.

Når et udbrud begynder, og magmaet stiger op gennem kraterets føderør, er der flere ting der afgør, hvordan udbruddet efterfølgende bliver:

- magmaets viskositet (hovedsagelig indholdet af SiO_2 – jo mere, jo sejere).
- magmaets indhold af krystaller (et stort indhold vil øge magmaets viskositet, dvs. hvor sejtflydende magmaet er)
- magmaets indhold af volatiler (et stort indhold kan føre til et eksplosivt udbrud)
- magmaets tryk, eller rettere trykforskel mellem kammer, føderør og krater (vil afgøre hvor hurtigt tilstedeværende volatiler vil udvide sig – er trykforskellen stor, sker udvidelsen hurtigt og eksplosivt)
- kraterrørets længde (et langt rør kan virke som et kanonløb, og accelerere magmaet således at udbruddet bliver voldsommere) og
- kraterrørets udformning (et lige rør giver bedre acceleration, mens et rør der er tragtformet opefter dæmper eruptionen).



Figur 11: På Santorini vikles den levende vinplante rundt og opbygges med tiden til en beskyttende kurv, så druerne ikke bliver beskadiget eller går til grunde, når pimpstenen hvirvles op i blæsevejr.



Figur 5: Fortolkning af Santorinis mulige eruptionshistorie. Beskrivelsen begynder i øverste venstre hjørne og slutter i nederste højre hjørne og viser den mulige udbredelse af vulkancentrene og altså ikke alle disses udbrudsprodukter.

I figur a ses basement, og den mulige udbredelse af dette, inden vulkanisme har fundet sted.

Figur b viser den første vulkanisme i Akrotiri og på figur c vises Peristeria vulkanen i nord og Thera vulkanen i syd. Den første calderadannelse finder sted, da Thera vulkanen kollapser som vist på figur d.

På figur e har de to nordlige vulkaner Megalo Vouno og Mikro Profitis Ilias nået deres største udbredelse.

Figur f viser Simandiri mod vest og Skaros mod øst, mens Thera vulkanen på ny har aktivitet mod syd. Den anden caldera dannes ligeledes under Thera vulkanen som afbildet på figur g, hvor også de første lag afsættes på øen Aspronisi. Ustabilitet efter calderakollapset medfører sammenstyrtning af Akrotiri vulkanens sydlige flanke.

Figur h viser to små slaggekegler ovenpå Megalo Vouno, samt opbygningen af den store Thirassia-Skaros vulkan i nord, mens denne på figur i er bortsprængt under den tredje calderadannelse, der har sin begyndelse i Cape Riva området.

Figur j viser den minoiske vulkan (Minoernes Atlantis) beliggende omtrent midt i calderaen, og de små prikker i den nordøstlige del af calderaen repræsenterer stromatolitterne, som omtales i teksten. Det minoiske udbrud efterlader øen med et udseende som på figur k, da den fjerde caldera dannes og bortsprænger store dele af øen samt aflejrer enorme mængder pimpsten og andet vulkansk materiale på ydersiden af øerne.

Endelig afbilder figur l Santorini, som øgruppen ser ud i dag med den nyeste vulkanisme, Kameni øerne, i midten.



Figur 6: Blok med stromatolitter, der er slynget ud af calderaen under det minoiske udbrud. På store dele af øen, kan man finde sådanne løse blokke og mange af dem er af de lokale anvendt som byggemateriale.

oven på Megalo Vouno. I den nordlige del af Thirassia-Skaros vulkanen blev endnu en caldera dannet cirka 22.000 år før nu. Denne såkaldte Cape Riva eksplosion bortsprængte store dele af alle de nordlige vulkaner (Peristeria, Simandiri, Thirassia-Skaros, Megalo Vouno og Mikro Profitis Ilias) og dannede et lavvandet hav, hvor vulkanerne før stod. Heri slog cyanobakterier sig efterfølgende ned og dannede stromatolitter (figur 6). Nyere undersøgelser har vist, at Cape Riva eksplosionen mindst har været af samme størrelse som det efterfølgende minoiske udbrud, og derfor kan det udmærket tænkes, at der tidligere har været flere udbrud af samme størrelse eller måske endda større.

Den Minoiske vulkan opbyggedes lige omkring vore dages Kameni øer, og dens udbrud kulminerede i en sidste calderadannelse cirka 3.600 år før nu. På calderaens stejle skråninger kan man den dag i dag finde rester af de førnævnte stromatolitter, som blev slynget ud samtidig med det voldsomme udbrud (se detaljeret beskrivelse af udbruddet i VARV 1991, 3). At stromatolitterne ligger på calderaens indervægge viser, at Santorini før det minoiske udbrud, lige som nu, havde en vulkanø i en vandfyldt caldera, og at øen ikke, som man førhen troede, var kegleformet. Meget tyder på, at minoerne, der beboede Santorini på tidspunktet for udbruddet, havde anlagt en større by på vulkanøen, der altså lige som nu må have ligget nogenlunde centralt i den vandfyldte caldera, men



Figur 10: Øverst lavagange (i alt omkring 70) som skærer calderavæggen i det nordøstlige hjørne af Santorini. Mindst 12 af gangene fortsætter hele vejen op igennem den 330 meter tykke lagpakke.
Til højre: Lavagangene har meget forskelligt udseende - både med hensyn til farve og tykkelse. Den tykke gang til højre i billedet er 2 meter bred ved havniveau. Den smalle sorte gang til venstre er derimod først blottet i væggen ca. 3 meter over havniveau.



op førend temperaturen i magmakammeret daler, og mineraler som olivin og plagioklas begynder at udkrystallisere (se også VARV 2001,4). Magmaet får som følge af krystallisationen en lavere densitet. Når det derefter stiger mod overfladen vil der typisk dannes et mere overfla-



Figur 9: Enkelte af lavastrømmene på Thirassia skiller sig ud ved at være størknet koncentrisk og har derfor fået kælenavnet 'roulade-lavaer'. Øverst ses almindelige lavastrømme. To 'roulade-lavaer' ses lige til højre for personen og skråt til venstre ovenfor ham.

Vouno, mens andre stopper i forskellige niveauer i calderavæggen. Et enkelt sted skærer én lavagang to andre, som altså må være indtrængt tidligere. Sprækkerne, hvorigennem magmaet har trængt op, tænkes at være dannet på grund af den tektoniske ustabilitet i denne del af det Ægæiske Hav (NØ-SV-gående normalforkastninger), sandsynligvis kombineret med vulkansk betinget indsynkning (calderakollaps) forårsaget af Cape Riva udbruddet.

Hvad driver en vulkan?

Mange forskellige faktorer skal opfyldes førend en vulkan erupterer. F.eks. skal der udover den komplicerede smeltedannelse, som er meget forskellig i de enkelte tektoniske miljøer, være sprækker eller revner i skorpen, så magmaet kan trænge op til overfladen. Først og fremmest skaber radioaktivt henfald varme inde i Jorden, hvilket medfører at en del af mineralerne i kappen er nær deres smeltepunkt. Hvis der opstår gunstige forhold, som f.eks. i forbindelse med en subduktionszone, vil der kunne dannes magmaer, og hvis magmaet har lavere densitet end den omgivende lithosfære, vil magmaet naturligt stige op. Et magma kan også have samme densitet som omgivelserne, og vil ikke stige

dog var en del større end vore dages Kameni øer. Dette fremgår f.eks. af en fresko udgravet fra den minoiske bebyggelse ved Akrotiri, som netop viser en stor, beboet ø omgivet af vand og en omgivende halvmåneformet ø med bjerge. Disse fakta sammenholdt med Platons dialoger om Atlantis, en ø der var beboet af et højtudviklet folk og som pludselig sank i havet, har fået mange til at foreslå Santorini som værende resterne af det forsvundne Atlantis.

Kameni øernes vulkaner begyndte deres aktivitet i den nuværende, vandfyldte caldera cirka 200 år f.Kr., og den lille Columbos Bank vulkan blev dannet i 1650. Columbos vulkanen er en undersøisk maar vulkan, der ligger otte kilometer nordøst for Santorini. Dens top er nu 20 meter under havoverfladen.

Adskillige udbrud har opbygget de centrale calderaøer, og det seneste vulkanudbrud på Santorini fandt sted på øen Nea Kameni i 1950.

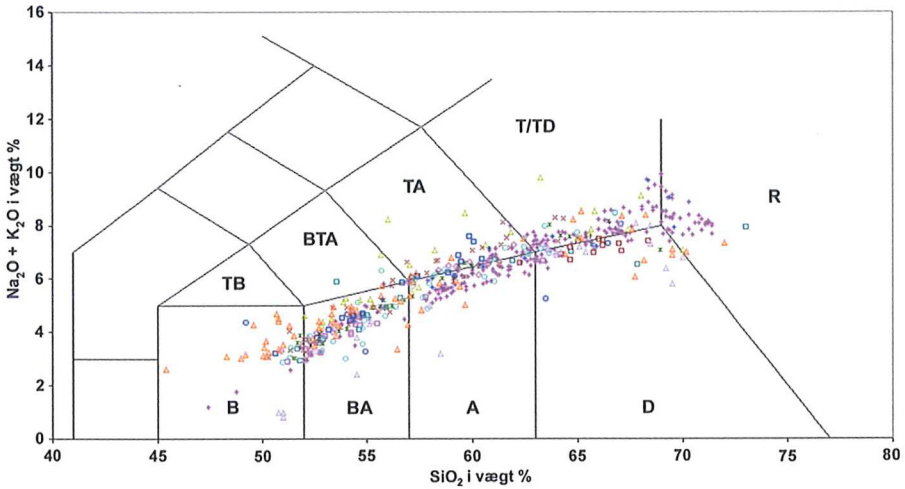
Talrige voldsomme eksplosioner (mindst de fire beskrevet her, men muligvis så mange som tolv) skaber vore dages op til 400 meter dybe, oversvømmede, ovale caldera, som senest er formet af den minoiske eksplosion. Den eksisterende caldera har stejle vægge, der rejser sig fra havet og op til 330 meter over havniveau.

Geokemi

Indsamling af lavablokke på Santorini har tilvejebragt nye informationer om de processer, der har spillet ind i dannelsen af vulkankomplekset. Af de hjembragte prøver er der lavet tyndslib, så bjergarternes mineralindhold har kunnet undersøges i mikroskop, og den resterende del af hver prøve er blevet knust til udførelse af geokemiske analyser. Ved at afsætte de opnåede data i udvalgte diagrammer kan man klassificere bjergarterne, og af- eller bekræfte de teorier man måtte have.

Tidligere geokemiske undersøgelser har vist, at der er flere holdepladser for magmaet under opstigning, samt at sedimenter har spillet ind i dannelsen af smelterne og derfor må være blevet trukket med ned i kappen sammen med den afrikanske plade. Santorinis lavaer menes at have opholdt sig op til et par tusinde år i nogle mindre magmakamre nogle få kilometer under overfladen inden udbrud. Geokemien af Santorinis lavaer viser desuden, at de forskellige vulkaner i komplekset er nært beslægtede, da der kun ses mindre variationer i kemien på tværs af de enkelte udbrudscentre.

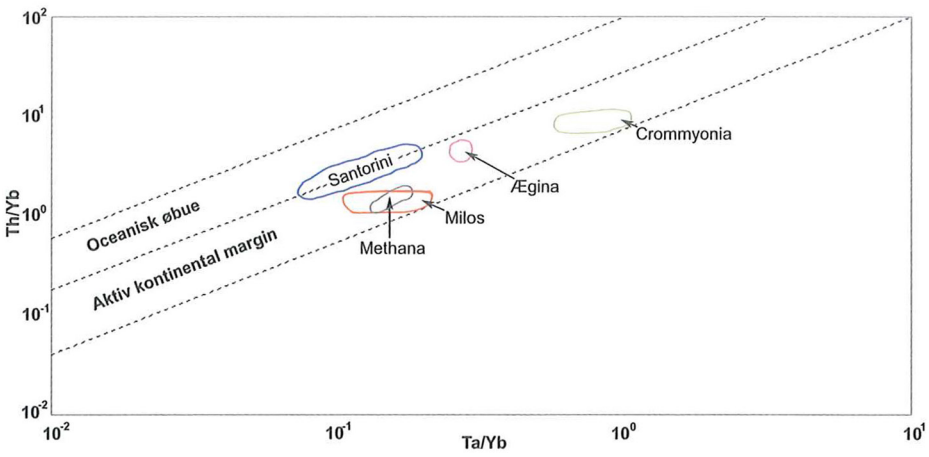
Bjergarter kan klassificeres udfra forskellige kriterier. Ved at afsætte de opnåede data i et TAS-diagram (VARV 2002,4 og figur 7) får man vist den totale mængde alkalier ($Na_2O + K_2O$) mod silika (SiO_2). Bjergartens grad af udvikling afspejles i SiO_2-indholdet, og det kan således ses, at vulkanske bjergarter med et lavt SiO_2-indhold (45-52 vægtprocent SiO_2) ikke har



Figur 7: TAS-diagram. Santorinis lavaer følger en fælles magmatisk udvikling, hvilket betyder at krystallisation af mineraler resulterer i en udvikling fra basalt til rhyolit. Sammenfatning af geokemien viser, at Santorinis lavaer er udviklet ved processerne fraktioneret krystallisation, assimilation og magma mixing.
B – basalt, BA – basaltisk andesit, A – andesit, D – dacit, R – rhyolit, TB – trachybasalt, BTA – basaltisk trachyandesit, TA – trachyandesit, T/TD – trachyt eller trachydacit. Der er afsat i alt 600 datasæt i diagrammet.

gennemgået særlig stor grad af fraktioneret krystallisation og de klassificeres så som basalter. I subduktionszonemiljøer vil et basaltisk modermagma, der gennemgår fraktioneret krystallisation (af mineraler med lavere SiO_2-indhold end smelten), udvikle sig til en basaltisk andesit og kan efterfølgende udvikles yderligere til andesit, dacit og rhyolit. Andre vigtige processer, der har medvirket til dannelsen af Santorinis lavaer, er magma mixing, en proces hvor et eller flere magmaer blandes - f.eks. ved ny tilførsel af magma til et magmakammer, og assimilation, som er en proces, hvor magmaet reagerer med sidebjergarten og 'forurenes med grundstoffer fra denne.

Sædvanligvis kaldes miljøet, hvor en oceanplade glider under en kontinentalplade for en aktiv kontinental margin. De fleste vulkanøer i den hellenske øbue udviser som forventet karakteristika for dette miljø. Af geokemiske analyser kan dog ses, at Santorinis vulkanprodukter tilnærmelsesvis følger en udvikling for oceaniske øbuer, nemlig det miljø hvor oceanplade subduceres under oceanplade (figur 8). At Santorini-lavaerne viser en sådan udvikling kan blandt andet skyldes, at kontinentalskorpen under Santorini er særdeles fortyndet (cirka 20-25 kilometer mod gennemsnitligt cirka 40-50 kilometer). Derfor minder forholdene, hvorunder magmaet udvikler sig, mere om miljøet for de oceaniske øbuer. Da kontinentalskorpen her dog stadig er en del tykkere end den typiske



Figur 8: Forenkling af et Th/Yb-Ta/Yb diagram (de kemiske symboler står for følgende sporgrundstoffer: Th= thorium, Ta= tantal og Yb= ytterbium), som opdeler bjergartsprøver i forskellige tektoniske miljøer. Prøver fra andre øer i den hellenske øbue falder alle inden for feltet for 'aktiv kontinental margin', mens prøver indsamlet på Santorini i 2000 og 2001 ligger på grænsen mellem 'aktiv kontinental margin' og 'oceanisk øbue (se ordforklaring). Crommyonia er et vulkancenter beliggende på det græske fastland, som ofte sammenlignes med øerne i øbuen, da det også er dannet som følge af den hellenske subduktion.

oceanbundsskorpe (5-10 kilometer), vil der være mulighed for, at magmaet forurenes med kontinentale karaktertræk, hvis magmakammeret tilbageholdes på grænsen mellem skorpen og kappen. Andre vigtige faktorer for, at Santorini følger denne specielle udvikling, er eventuelle variationer i kappens sammensætning i øbuens længde og ændringer i kappens sammensætning under Santorini gennem tid.

På baggrund af geokemiske og mineralogiske ligheder i de indsamlede prøver kan det, der i dag ligner rester af tre selvstændige vulkaner (Ammoudi, Skaros og Thirassia) (se figur 1) samles til den store, forhistoriske Thirassia-Skaros vulkan. Af feltobservationer (figur 9) fremgår det tydeligt, at Thirassia og Ammoudi har været forbundet, men at Skaros også har været en del af den oprindelige vulkan, kan kun ses af kemien. Thirassia-Skaros vulkanens top har ligget inde i calderaen mellem vore dages Kameni øer og Skaros. Hovedkrateret har sandsynligvis leveret lavastrømme til Skaros, mens sidekratere har leveret lavaer til Thirassia og Ammoudi.

Lavagangene i det nordøstlige hjørne af calderavæggen synes at have gennemsat Megalo Vouno vulkankomplekset af flere omgange (figur 11). Nogle af gangene gennemsætter hele komplekset og er blottede på toppen af Megalo