

Vulkanøen Santo Antão

- endnu en geologisk historie

Af geolog Susanne Plesner, *GeologiskNyt*

Geologistuderende fra universiteterne i København og Århus har siden efteråret 1996 arbejdet med forskellige aspekter af geologien på Santo Antão, som dengang var relativt uudforsket. De forskellige studerende har med deres specialer og Ph.D.-afhandlinger bidraget med utroligt vigtig viden om øens vulkanske oprindelse og udvikling. Som rosinen i pølseenden afsluttede forfatteren af denne artikel sin forskning med aflevering af sin Ph.D.-afhandling i maj i år.

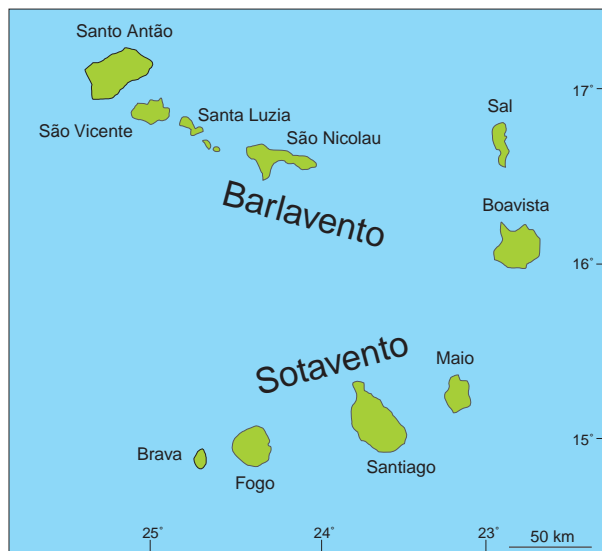
Med udgangspunkt i forfatterens egen forskning synes det nu derfor at være tid til at præsentere et sammendrag af de forskellige resultater, der er opnået gennem årene. I denne forbindelse skal der lyde en stor tak til alle, der har været involveret i forskningen på Santo Antão, for oplysninger om deres respektive specialeområder.

Nogle forskningsresultater er tidligere blevet præsenteret af forfatteren samt Anette K. Mortensen i en artikel i *GeologiskNyt* 5/98.

Den nordlige gruppe af øer kaldes Barlavento (vind-øerne) og udgøres af øerne Santo Antão, São Vicente, São Nicolau, Santo Luzia, Sal og Boavista, mens den sydlige gruppe (Sotavento eller læ-øerne) består af øerne Maio, Santiago, Fogo og Brava. Kap Verde øerne var en portugisisk koloni indtil 1975, hvor de blev selvstændige. Det officielle sprog er derfor portugisisk, men befolkningen taler dog en lokal kreolsk dialekt.

Kap Verde Øernes placering

Kap Verde øerne består af 10 større beboede øer og nogle mindre ubeboede. De ligger i Atlanterhavet mellem 15°N og 17°N, 300 til 600 km fra Senegals kyst. Øgruppen ligger på den afrikanske lithosfæreplade og er dannet ved interaktion mellem et hotspot og nogle dybe forkastninger i jordens skorpe. Hawaii-øerne og De Kanariske Øer er andre meget velkendte og velstuderede

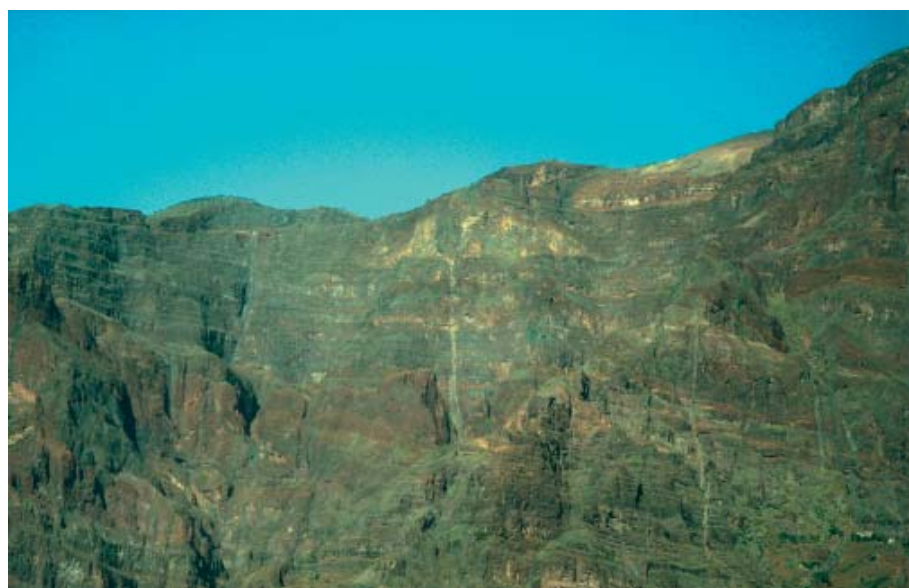


eksempler på oceanøer dannet ved hotspot-aktivitet.

Kap Verde øerne inddeles i to grupper på baggrund af deres placering i forhold til de dominerende vinde (se kort herover). Santo Antão, som behandles i denne artikel, er den vestligst beliggende af øerne i den nordlige kæde. Øen dækker et areal på ca. 780 km² og er dermed den næststørste i øgruppen. Det højeste punkt udgøres af den udslukte(?) vulkan Tope de Coroa (billedet øverst på modstående side), der rager ca. 1900 m op over havets overfalde på den vestlige del af øen (se geologisk kort over Santo Antão nederst på næste side).

Geologien på Santo Antão er repræsenteret udelukkende ved forskellige typer af magmatisk aktivitet (her findes altså ingen sedimentter). Hyppigst er lavastrømme med stor lateral udbredelse. De ældre lavastrømme, i særdeleshed på den centrale del af øen, gennemskæres af flere gangsværme og også adskillige intrusioner (billedet til venstre). Nogle sills er også blevet observeret. En tredje type magmatisk aktivitet manifesterer sig ved udbredte scoriekegler på dele af øen samt pimpstensaflejringer. Scoriekegler er (mindre) vulkaner, der primært er opbygget af vesikulært (hulrum i lavaen), der er dannet ved at gasbobler fanges under størkningen af lavaen) vulkansk materiale, der på trods af den vesikulære natur er både tungere og indeholder flere krystaller end pimpsten.

En lang række forskellige analyser er



Et skoleeksempel på en laccolith med tilførselskanal (midt i billedet). På fotoet ses også tværsnit af to vulkaner samt adskillige gange. (Foto: forfatteren).

blevet udført på bjergartsprøverne fra Santo Antão. Her vil jeg dog først fokusere på resultaterne af argondateringerne og præsentere den geologiske historie af øen, hvorefter den geokemiske sammensætning af bjergarterne på baggrund af de mest almindelige hoved- og sporelementgrundstoffer vil blive præsenteret.

Øens geologiske historie

Ved hjælp af feltobservationer og aldersdateringer er øen blevet inddelt i 10 perioder med vulkansk aktivitet, hvor en del af dem overlapper. I det følgende vil de enkelte perioder med vulkansk aktivitet blive kort beskrevet i en sammenhæng, så det giver et billede af øens geologiske udvikling. Læseren henvises samtidig til at følge med på det forsimplede geologiske kort nedenfor over øen for nemmere at få et overblik over den geografiske placering af den vulkanske aktivitet gennem tiden. En tabel med aldrene for de forskellige perioder er ligeledes vist.

Aldre på den centrale del af øen

På den centrale del af øen er et gammelt basement, Dos Bodes-Formationen, der består af meget fænokrystrige lavastrømme, blottet. Alderen af en lava fra toppen af dette basement er bestemt til 7,57 millioner år (Ma). Beskaffenheden af de underliggende bjergarter er ukendt. En inkonformitet er blevet observeret over denne 7,57 Ma gamle prøve, hvilket indikerer et (ukendt) tidsrum uden vulkansk aktivitet eller med udbredt erosion.



Fotoet viser den højeste vulkan på Santo Antão, *Tope de Coroa*. Da forfatteren besøgte øen første gang i 1996 hævdede en påståelig turistguide, at han ikke sjældent så damp komme op af vulkanen! Der var dog ingen i vores gruppe, der umiddelbart troede på ham, men faktum er, at vi ikke med sikkerhed kan sige, at den ikke vil komme i udbrud igen. (Foto: Richard Wilson).

Den næstældste prøve på øen er fra bunden af Agua Nova profilet på den vestlige del af øen og er dateret til 3,24 Ma. Vi har altså et tidsrum på ca. 4,3 Ma, hvor vulkansk aktivitet ikke er registreret.

På den centrale del af øen, oven på de eroderede rester af Dos Bodes-Formationen, blev Chã de Morte-Serien dannet. Den består af tykke sekvenser af lavastrømme og inddeles i tre underserier: nedre, mellem og øvre Chã de Morte-Serie. De to nederste

underserier tilhører en ældre vulkanbygning og er repræsenteret ved relativt kontinuerede lavasekvenser. Den øvre Chã de Morte Serie repræsenterer vulkanske produkter fra en yngre vulkanbygning, der blev dannet efter et formodet flanke-kollaps af dele af den ældre vulkanbygning (se senere). Nedre og mellem Chã de Morte-Serie blev dannet mellem 2,94 og 2,13 Ma, mens aldersdateringer angiver, at øvre Chã de Morte-Serie (den yngre vulkanbygning) blev eruperet for mellem 2,04 og 1,18 Ma siden.

Lavasekvenserne, der opbygger den ældre vulkanbygning på den centrale del af øen, gennemskæres af adskillige gangsværme. Tilstedeværelsen af gange i den yngre vulkanbygning er derimod yderst sparsom, så selvom der ikke eksisterer nogle aldersdateringer af gangene, formodes det, at de må være ca. 2 Ma. Gangsværme er også blevet observeret på øens østkyst.

Aldre på den sydlige del af øen

Samtidigt med den vulkanske aktivitet på



Forsimpleret geologisk kort over Santo Antão der viser de mest betydende geologiske træk, veje, byer og lokaliteter. Kun de største blotninger af Cão Grande pimpstenen er vist og størrelsen af den blottede Dos Bodes Formation er overdrevet. (Grafik: forfatteren)

Område	Alder
Dos Bodes-Formationen	> 7,57 Ma
Chã de Morte-Serien	2,94 til 1,18 Ma
Gange og sills	ca. 2 Ma
Agua Nova-vulkanitter	3,24 til 0,52 Ma
Paúl-vulkanitter	1,35 til 0,58 Ma
Tarrafal-vulkanitter	0,54 til 0,38 Ma
Cão Grande-pimpsten	ca. 0,20 Ma
Topo de Coroa-vulkanitter	0,17 Ma
Porto Novo-lavaerne	0,09 Ma

Tabellen viser en oversigt over aldrene for de omtalte områder. (Grafik: UVH)

den centrale del af øen blev Escabecada-lavaerne på den sydlige del af øen dannet for 2,67 Ma siden. Ligeledes foregik der også vulkansk aktivitet på den nordvestlige del af øen ved Agua Nova. Disse lavasekvenser blev eruperet over en relativ lang periode, nemlig fra for 3,24 til 0,52 Ma siden. De er dog overlejret af endnu yngre lavaer og pyroklastiske aflejringer (aflejringer af fragmenteret vulkansk materiale), der stammer fra Tope de Coroa-komplekset. Aktiviteten i Agua Nova området er derfor formodentlig fortsat indtil for ca. 0,17 Ma siden (alderen for en lavastrøm fra vulkanen Tope de Coroa; se senere).

Aldre på den østlige del af øen

Før den vulkanske aktivitet tog af i de vestlige og centrale dele af øen, begyndte aktiviteten på den østlige del af øen (Paül vulkanitterne). Fra denne del af øen er aldre på 1,35, 0,92 og 0,58 Ma blevet bestemt. Det virker sandsynligt, at aktiviteten har været kontinuert fra 1,35 til 0,58 Ma, men dette er dog ikke dokumenteret. En lavastrøm, der er dateret til 0,73 Ma, repræsenterer sandsynligvis alderen for dannelsen af Cova krateret og dermed kulminationen på den vulkanske aktivitet på den østlige del af øen.

Aldre på den vestlige del af øen

Tarrafal-vulkanitterne på det vestlige Santo Antão blev dannet fra 0,54 til 0,38 Ma siden. Aktiviteten her overlapper altså med de sene udbrud i Agua Nova-området (0,52 Ma) længere mod nord. Samtidigt er den ældste prøve i Tarrafal-profilet også eruperet nogenlunde samtidigt med den yngste daterede lava på den østlige del af øen.

Alderen af Cão Grande-pimpstenen er blevet estimeret til ca. 0,20 Ma. Den blev dannet ved et eksplosivt udbrud af relativt kort varighed og dækkede hele øen umiddelbart efter udbruddet. Udbrudscentret befandt sig på den vestlige del af øen (indikeret som typelokaliteten på det geologiske kort). For detaljerede oplysninger henvises der til førnævnte artikel i GeologiskNyt 5/98.

Efter pimpstensudbruddet fortsatte den vulkanske aktivitet på den vestlige del af

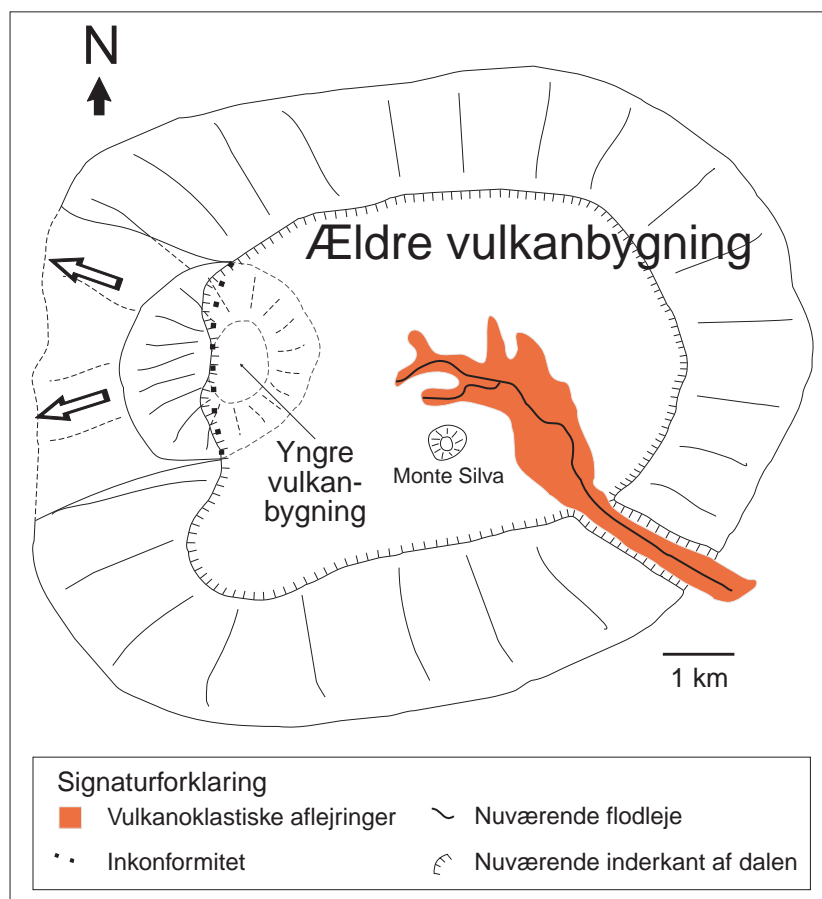
øen, og en datering af en lavastrøm fra Tope de Coroa-vulkanen giver en alder på 0,17 Ma. Dannelsen af scoriekegler og pyroklastiske aflejringer på de vestlige og sydlige dele af øen menes også at stamme fra dette tidspunkt og frem til den yngste registrerede aktivitet på øen, som var for 90.000 år siden. Denne aktivitet resulterede i dannelsen af Porto Novo-lavaerne, der løb fra Lagoa-området på den centrale del af øen og ned til øens sydkyst lige vest for, hvor byen Porto Novo ligger i dag.

Som det fremgår af beskrivelsen oven-

for, har der altså på flere tidspunkter i Santo Antãos historie været vulkanske udbrud på det meste af øen samtidig. Der kan altså ikke registreres en "vandring" af den vulkanske aktivitet fra den ene ende af øen til den anden. Vulkansk aktivitet samtidigt flere steder på øen er helt normalt for relativt små oceanøer som Santo Antão.

En drastisk begivenhed

På den centrale del af øen finder man en karakteristisk sub-cirkulær dal (se geologisk kort). Området inde i og omkring da-



Illustrationen viser tolkningen af feltrelationerne for den centrale del af Santo Antão. I felten ser man ikke to separate vulkanbygninger som på tegningen, men det er den bedste måde at illustrere opbygningen af den centrale del af øen på. Flanke-kollaps skete mod vest og er indikeret med pile, hvorefter en ny vulkankegle blev dannet i løbet af ca. 1 Ma i "hullet" efter kollapsen af den gamle. Den lille Monte Silva kegle repræsenterer den yngste vulkanske aktivitet inde i den sub-cirkulære dal (ca. 0,20 Ma). (Grafik: forfatteren).

Dansk Geofysik arbejder med vand....

- Kortlægning af grundvandsressourcer
- Kildepladsundersøgelser
- Risikoanalyser
- Sporing af forureningskilder
- Opstilling af grundvandsmodeller
- Kortlægning af nedgravede tankanlæg og rør
- Kortlægning af råstoffer

Dansk Geofysik

Kortlægning og rådgivning

Dansk Geofysik A/S
 Forskerparken
 Gustav Wieds Vej 10
 DK-8000 Århus C
 Tel. +45 86 20 50 80
 Fax. +45 86 20 97 88
 E-mail: dg@geofysik.dk
 Web: www.geofysik.dk

len er generelt yngre end ca. 3 Ma (bortset fra den 7,57 Ma gamle prøve fra Dos Bodes-Formationen) og er opbygget af mindst to vulkanbygninger (tegning). De vulkaniske produkter er nævnt ovenfor som Chã de Morte-Serien. Den ældre vulkanbygning blev dannet for mellem ca. 3 og 2 Ma siden. Tilstedeværelsen af en inkonformitet tæt på dalens bund i den vestlige dalvæg vidner sandsynligvis om en drastisk begivenhed, nemlig et flankekollaps, som er en almindelig begivenhed på oceanøer.

Et flankekollaps sker på grund af ustabilitet, der som regel skabes i forbindelse med intrusion af gange. I "arret" efter flankekollapset er der i dette tilfælde blevet dannet en ny vulkanbygning. Den blev dannet for mellem ca. 2 og 1 Ma siden. Forskellen i aldersdateringerne mellem den yngste prøve i den ældre vulkan og den ældste prøve i den yngre vulkan er ca. 90.000 år. Dette vidner om, at dannelsen af den yngre vulkanbygning må være begyndt kort tid (geologisk set) efter flankekollapset af den ældre.

Den geokemiske sammensætning

Magmatypen, der dannes i kappen under oceanøer, er meget forskellig fra den type magma, der typisk dannes ved de midt-oceaniske rygge. Forskellen skyldes graden og dybden af partiel opsmeltning af kappen de to steder. Ved de midt-oceaniske rygge er graden af opsmeltning stor og sker på lav dybde, mens der kun sker ringe grad af opsmeltning på stor dybde under oceanøer. Graden af opsmeltning under oceanøer kan dog variere en del, og man finder derfor ofte en stor variation af lavasammensætninger her. På Kap Verde Øerne finder man typisk silika-undermættede bjergartsammensætninger, hvor eksistensen af mineraler som kvarts og orthopyroxen er udelukket. Derimod er SiO_2 -fattige mineraler



Den gule linie på fotoet indikerer inkonformiteten, der lokalt kan ses i felten som "ar" (især mod nord, til højre i billedet) i bjergvæggen. Gange (i den venstre del af billedet), der kommer fra den østlige del af dalen stopper pludseligt hvilket understøtter teorien om flankekollapset. Hvide huse i forgrunden er scala. (Foto: forfatteren).

som olivin og nefelin hyppigt forekommende, og undermættede mineraler som melilitit og sodalit er også relativt almindelige. Klinopyroxen (som oftest diopsid) er ligeledes hyppigt forekommende.

Klassifikation af bjergarterne

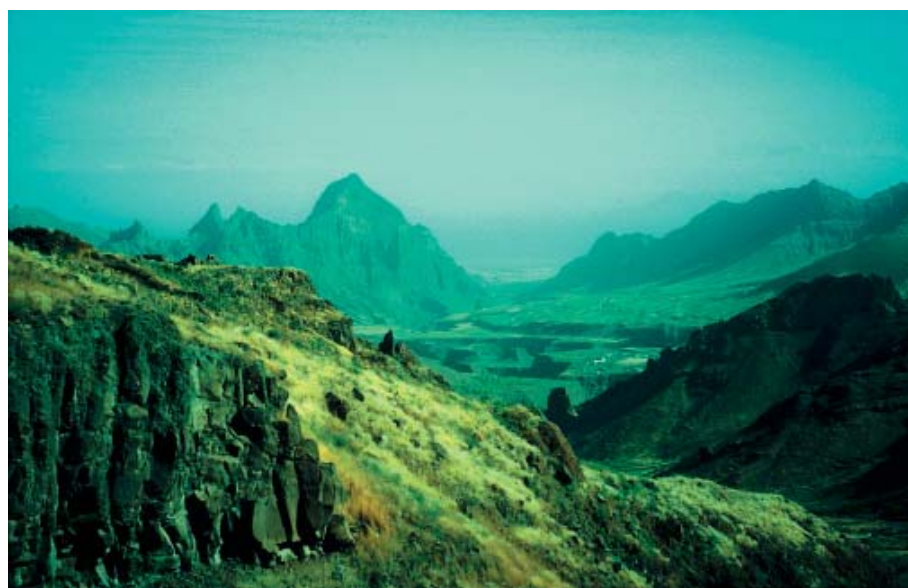
Til klassifikation af vulkaniske bjergarter bruges ofte TAS-diagrammet (se næste side nederst). I dette diagram sker den første "grove" klassifikation, og det fremgår her, at langt de fleste bjergarter fra Santo Antão er SiO_2 -undermættede (alkaline). Med stigende grad af SiO_2 -undermætning kaldes de bjergarter, der dannes, for alkali-basalt, basanit/tefrit, nefelinit og melilitit. Klassifikationen af nefelinit og melilitit sker ved

hjælp af andre diagrammer end TAS-diagrammet (ikke vist her). Nefelinit fremkommer ved en mere detaljeret klassifikation af de bjergarter, der plotter i foidit og basanit/tefrit-felterne i TAS-diagrammet. Det viser sig ved denne klassifikation, at omkring halvdelen af bjergartsprøverne fra Santo Antão er nefelinit. Melilititer forekommer, men er ikke særligt hyppige.

Forskellige dannelsesfaser

Hawaii-øerne blev tidligere nævnt i denne artikel som et kendt eksempel på oceanøer. Et meget karakteristisk træk ved Hawaii-øerne er, at man typisk ser fire dannelsesfaser. Fra en Hawaii-ø "fødes" og til den er udslukket, gennemgår den således med tiden følgende faser: præ-skjold-fasen, den skjold-byggende fase, post-skjold-fasen og til sidst post-erosions-fasen. De forskellige faser karakteriseres ved forskellige sammensætninger af de vulkaniske produkter. Således går sammensætninger fra at være alkaline (SiO_2 -undermættede) i den første fase til at være tholeiitiske (SiO_2 -mættede) den anden fase. Den tredje fase er igen karakteriseret ved alkaline bjergarter, og de vulkaniske produkter i den sidste fase er ekstremt SiO_2 -undermættede i stil med den type bjergartssammensætninger, vi ser på Santo Antão.

Denne inddeling i forskellige dannelsesfaser er også blevet beskrevet for nogle af De Kanariske Øer, og derfor ville det være interessant at undersøge, om det også skulle være gældende for De Kapverdiske Øer. Det har imidlertid ikke været muligt at erkende en lignende udvikling på Santo Antão. Der er dog nogen systematik i lavasammensætningerne på storskala på Santo Antão, idet der i flere af de ovenfor beskrevne områder af øen ses en udvikling fra relativt magnesiumrige bjergarter med



På den centrale del af billedet ses de vulkanoklastiske aflejringer, der er markeret med rødt på illustrationen (øverst på modstående side), der viser tolkningen af feltrelationerne for den centrale del af Santo Antão. Disse aflejringer når mægtigheder på over 30 m og består af erosionsprodukter fra den subcirkulære dals sider. (Foto: Forfatteren)

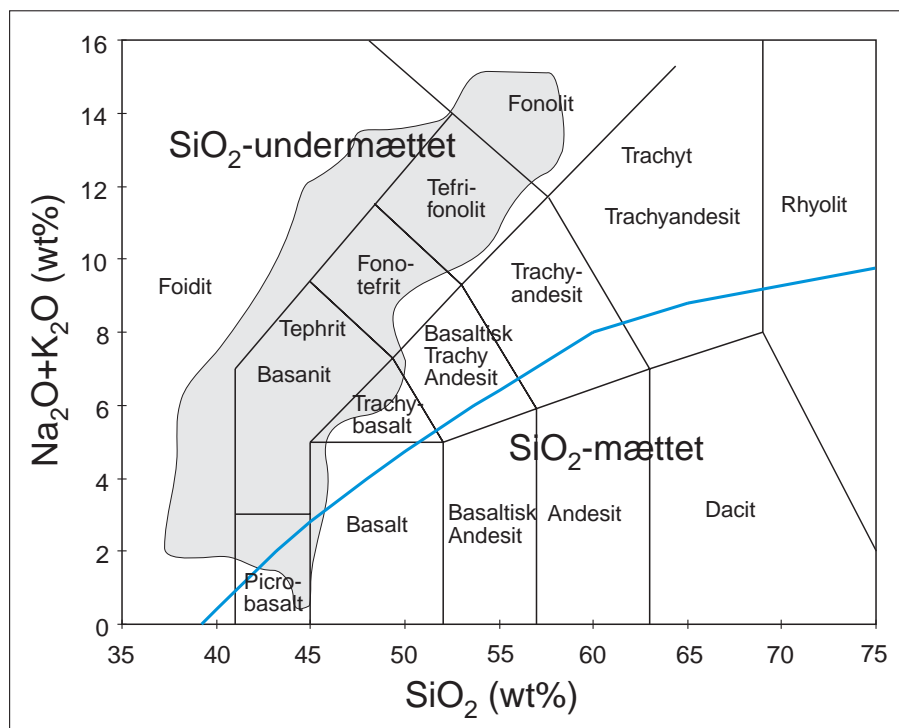


Udsigt mod SØ fra den subcirkulære dals vestvæg (ud over dalen). Man ser den sydlige del af dalen med Monte Silva-keglen, der er dækket af Cão Grande-pimpstenen. I baggrunden af billedet (uden for dalen) ses også pimpstenen på sydkysten af øen samt Porto Novo-lavaerne (mørke). (Foto: Forfatteren)

lavt alkali-indhold ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) i bunden af de stratigrafiske profiler (basalter, picrobasalter og tefrit/basanit i TAS-diagrammet) til relativt (nogle gange ekstremt) magnesiumfattige bjergarter med højere indhold af alkalier ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) i toppen af de stratigrafiske profiler (typisk fonotefrit, tefrifonolit og fonolit i TAS-diagrammet). De nefelinitiske sammensætninger er ikke blevet registreret i de ældre dele af den vulkanisme, der er yngre end ca. 3 Ma, men ellers fordeler de sig aldersmæssigt lidt rundt over det hele fra ca. 2,5 Ma og frem til den yngste vulkanisme, der udelukkende består af nefelinit.

Magmakamre

Diskussionen ovenfor med udvikling af bjergarterne med stratigrafisk højde leder frem til en kort bemærkning om magmakamre under Santo Antão. Bjergarterne picrobasalt, basalt, tefrit/basanit, fonotefrit, tefrifonolit og fonolit i TAS-diagrammet, hvor mange af prøverne fra Santo Antão plotter, kan relateres til hinanden ved forskellige processer i magmakamre. Her falder nefeliniterne dog udenfor. De kan nemlig ikke relateres til picrobasalter og basalter ved magmakammerprocesser, og siden der er fundet både picrobasalt/basalt og nefelinit i nogle af de samme lavasekven-



TAS-diagrammet hvor bjergarterne karakteriseres på baggrund af deres Totale indhold af Alkalimetaloxyder ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) og Silika (SiO_2). Den fede linie gennem diagrammet inddeler det groft set i SiO_2 -mættede og SiO_2 -undermættede bjergarter. Disse betegnes også som henholdsvis subalkaline og alkaline bjergarter. De ca. 350 bjergartsanalyser fra Santo Antão, der er plottet i diagrammet (det grå område), indikerer, at langt de fleste bjergarter fra øen er alkaline (SiO_2 -undermættede). (Grafik: forfatteren)



Gange, der skærer de ældre lavasekvenser, er et udbredt fænomen på især den centrale del af Santo Antão. (Foto: forfatteren).

ser, må det betyde at lavaerne i sekvensen kommer fra mere end ét magmakammer. Der har sandsynligvis været adskillige magmakamre under øen, der har været aktive på samme tid.

Grundforskning

Kap Verde Øerne blev i sin tid kortlagt geologisk af en portugisisk geolog ved navn Bebiano. Han udgav sit arbejde i 1932, men siden har der ikke været udført

detaljeret arbejde på Santo Antão. Ikke noget der har været publiceret i hvert fald. Vores arbejdsgruppe er imidlertid et par gange inden for det sidste år blevet kontak- tet af blandt andet italienske geologer, der har fundet materiale om os og vores arbej- de ved at søge på "Santo Antão" på Inter- nettet. Interessen for øen og øgruppen som helhed er altså stigende, og det har været en glæde for os at være med fra begyndel- sen med grundforskning på øen. ■

Kort nyt

Naturen renser selv drikkevandet

Pesticider har en kedelig evne til at sive ned og forurene jorden og grundvandet, og nogle mener, at op mod halvdelen af vores drikkevand efterhånden er forurenede. Forskere fra Statens Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd mener dog nu at have fundet løsningen på denne voksende forurening, idet de har fundet ud af, at en passende kombination af bakterier og svampe under de rette forhold i jorden kan arbejde sammen og derved naturligt omdanne pesti- cider til vand og kuldioxid. Svampene har den egenskab, at de udskiller enzymer, som angriber forskellige miljøfremmede stoffer.

Hvis de rigtige bakterier samtidig er til- stede i jorden, kan man opnå en fuldstæn- dig nedbrydning af kemiske stoffer som fx pesticider. Teknikken med selv at lade na- turen rense miljøet vil i første omgang kunne bruges ved egentlige giftdepoter for opsamling af kemikalier, olieforurenede jord eller lignende, men det kan ikke udelukkes, at det med tiden vil blive muligt at tilsætte de rette svampe og bakterier samtidigt med, at man sprøjter med pesticider, så

man på den måde kan rense jorden med det samme. Men det er der endnu lang vej til.

Jyllandsposten/SP

Spør af Danmarks ældste istid

Der er fundet beviser for den ældste istid i Danmark i borer i forbindelse med det kommende motorvejsanlæg mellem Her- ning og Brande. Forskerparret Christian Kronborg og Allan Kragelund fra Geolo- gisk Institut på Aarhus Universitet vurde- rer, at det er det bedste geologiske fund på dansk grund siden 1922, og de udtaler: "Vi har fundet spor af en mellemistid i nogle søbundsaflejringer, og lige under dem har vi fundet rester af, hvad vi tror, er det æld- ste isfremstød, der har passeret landet. Det vil sige ca. 600.000 år gammelt." Det inte- ressante ved de aflejringer, der nu er hentet op fra 96 meters dybde, er, at de har nogle meget tydelige lagdelinger, det der kaldes års-varv, som kan sammenlignes med årringe i et træ. Som sidegevinst har borin- gerne afsløret et godt grundvandsmagasin i 60 meters dybde.

Jyllandsposten/SP ■

Geologisk Tidsskala

	System	Serie		
Kænozoikum	Kvartær	mio. år Holocæn		
		Pleistocæn		
	Tertiær	1,8 Neogen	Pliocæn Miocæn	
		24 Palæogen	Oligocæn Eocæn	
		65	Paleocæn	
	Mesozoikum	Kridt	Øvre	
Nedre				
Jura		135	Øvre Mellem Nedre	
		Trias	203	Øvre Mellem Nedre
Phanerozoikum	Perm		250	Lopingien Guadalupien Cisuralien
		Karbon	295	Pennsylvanien Mississippien
			Devon	355
	Silur			410
		Ordovicium		435
			Kambrium	500
Proterozoikum	540			
	2500	(Præ-kambrium)		
Archæikum				