

# VULKANUDBRUD I 1995 PÅ FOGO

## KAP VERDEØERNE

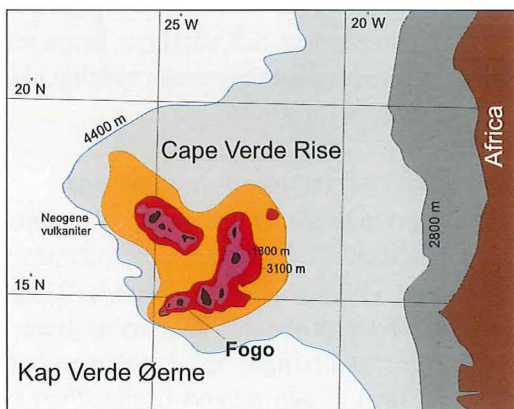
Paul Martin Holm, Thomas F. Kokfelt & Lise E. Pedersen

Artiklens forfattere havde i 1995 indledt et geokemisk-petrologisk forskningsprojekt på øen Fogo og var knap nok kommet hjem fra feltarbejde på øen, før vi hørte, at vulkanen Pico var gået i udbrud. Det lykkedes os i løbet af nogle uger at få skabt et hul i kalenderen og skaffet midlerne til endnu et besøg på øen. Her giver vi en beretning om hele udbruddet ledsaget af vore egne billeder fra en periode i maj. Artiklen ledsages af en forklaring på nogle af de benyttede fagudtryk.

Vi havde valgt Fogo for at studere unge vulkanske bjergarter, som kunne dateres med U/Th-metoden, som netop var blevet tilgængelig på Geologisk Institut, Københavns Universitet, i forbindelse med erhvervelsen af et nyt massespektrometer.

### KAP VERDEØERNE

Republica de Cabo Verde ligger i Atlanterhavet omkring 500 kilometer vest for Kap Verde, Afrikas vestligste punkt på 15-17°N (figur 1). Klimaet er tropisk og meget tørt, men behageligt på grund af den konstante passatvind fra nordøst. Der er 10 større og mange mindre øer, i alt 4.050 kvadratkilometer med en befolkning på ca. 400.000. Landet er demokratisk og fungerer langt bedre end de fleste afrikanske, og befolkningen anser sig selv for kulturelt nærmest at befinde sig midt mellem Sydamerika, Europa og Afrika. Øerne var ubeboede, indtil portugiserne opdagede dem omkring 1456, og de er nu beboede især af en blanding af afrikanere og portugiseres efterkommere.



Figur 1. Vestafrika og Kap Verdeøerne. Kap Verdeøerne ligger på hævet havbund - the Cape Verde Rise - godt 500 kilometer fra Afrikas kyst.



*Figur 2. Fogo med Pico. Foto taget mod nordnordvest fra fly over det sydøstlige Fogo. Midt i billedet ses Pico hæve sig 2.829 m fra havet og fra calderabunden ca. 1.600 m o.h. Øverst tv. i billedet ses en del af calderaranden. I bunden af calderaen og flere steder udenfor ses sorte unge lavaer.*

Øerne ligger på Atlanterhavets basaltiske oceanbundsskorpe, der her ligger 2-3 kilometer højere end havbunden normalt gør - the Cape Verde Rise - og overvejende består af vulkanske bjergarter. På nogle af øerne (Santo Antão, São Vicente, São Nicolau, Sal, Santiago, Brava) er denne fortid tydeligvis ikke særlig fjern, og her ses vulkanbygninger tydeligt i landskabet. En enkelt af øerne, Fogo, har været aktiv i historisk tid.

#### FOGO, PICO OG DE HISTORISKE UDBRUD

Fogo er 476 kvadratkilometer med en omtrent cirkulær kystlinie. Øen består i al sin enkelhed af en dominerende vulkanbygning, Pico, der fra østkysten rejser sig næsten 3 kilometer fra havet (figur 2). Der bor 33.000 mennesker på Fogo, heraf de fleste på landet. De største byer er São Filipe og Mosteiros. Den nordøstlige vind tvinges op ad vulkanens sider og afgiver derved regn, hvilket gør vindsiden af øen relativt frodig. Pico er særdeles aktiv med mere end 24 udbrud siden 1460.

Fra øen blev opdaget og indtil år 1761 var Pico i hyppige udbrud fra sit centrale krater i den perfekt formede kegle, der fra havet hæver sig 3 kilometer



*Figur 3. Calderaen. Fra Picos skråning ses calderavæggen 3-4 kilometer mod nordvest. Calderaen er omtrent cirkulær med en diameter på 8 kilometer og den lodrette væg hæver sig op til 1 kilometer over calderagulvet, der ligger 1.600-1.700 m over havet. Calderavæggen er et tværsnit gennem den gamle Fogovulkans lavaer, der ses i billedet som omtrent vandrette lag.*

og består af både pyroklastisk materiale (hovedsagligt lapilli) og lava - en såkaldt stratovulkan. Picos basis mod nord, vest og syd hviler i en højde af 1.600-1.700 meter over havet på bunden af en cirkulær caldera med en diameter på 8 kilometer (figur 3). Udbrud fra Pico er rapporteret fra årene 1500, 1564, 1604, 1664, 1675, 1680, 1689, 1693, 1695, 1699, 1713, 1721-25 og 1761. Derefter har udbruddene fundet sted i calderabunden ved laterale udbrud med eller uden dannelse af parasitkegler i årene 1769, 1785, 1799, 1816, 1847, 1852, 1857, 1951 og 1995.

Calderaen er begrænset af en næsten lodret stejl væg, der er op til 1 kilometer høj. Calderaen dannedes for måske 10.000 år siden ved indsynkning af den gamle vulkanbygningens top. Det er foreslået, at den dannedes ved udskridning i havet af hele den østlige del af vulkanbygningen. Den gamle vulkan var formentlig over 3.500 m høj. Det meste af den gamle vulkanbygning er bevaret og udgør størstedelen af øen, nemlig området udenfor calderaen. Her ses en jævnt skrånende flade dannet af hundreder af lavastrømme fra det gamle centralkrater. På denne flade ligger talrige små scoriekegler, som er dannet ved flankeudbrud.

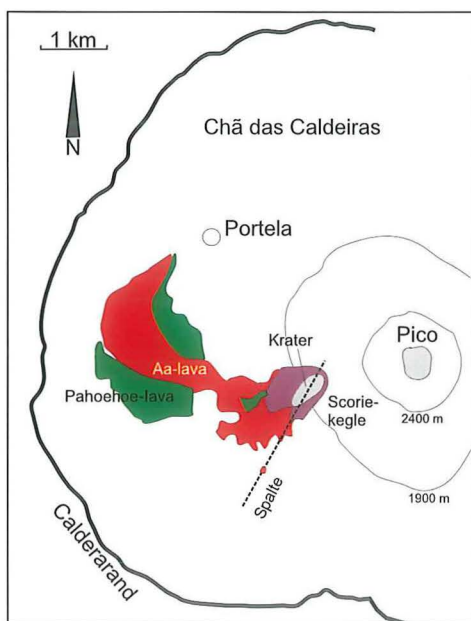
## 1995 UDBRUDDET OG DETS FORLØB

Udbruddet varede i knap to måneder og havde et stærkt varieret forløb resulterende i mange typer af vulkanske produkter. Alle bjergarterne er sorte med strørkorn af mineralet clinopyroxen. Rumfanget af erupteret materiale anslås til at være ca. 60 millioner kubikmeter (0,06 kubikkilometer) og det dækker et område på 8 kvadratkilometer, heraf (se beskrivelse nedenfor) 2,7 kvadratkilometer aa-lava, 4,3 kvadratkilometer pahoehoe-lava og en 0,9 kvadratkilometer scoriekegle (figur 4). Selv om rumfanget af erupteret magma var ret lille, havde udbruddet lokalt omfattende negative miljømæssige virkninger.

*Optakten:* Indbyggerne i landsbyen Portela i Chã das Caldeiras mærkede en række svage jordskælv fra 25. marts 1995. Den 2. april var der kraftigere jordskælv kl. 7 og kl. 15, og kl. 20 et væsentligt kraftigere.

*Første fase - sprækkeudbrud:* Udbruddet startede kort før midnat d. 2. april 1995 med en sprækkeeruption langs en nordøst-sydvestgående spalte radierende fra Picos vestlige fod (figur 4). Fra sprækken, som hurtigt blev ca. 2 kilometer lang, strømmede først gas eksplosivt ud, ledsaget af blokke revet ud af sidestenen. Derpå dannedes et hundreder af meter højt ildgardin af kontinuerte lavafontæner langs sprækken og en lava begyndte at dannes af fontænernes glødende regn. Fra krateråbninger lokaliseret langs sprækkerne udslyngedes magma eksplosivt, blandt andet, i form af op til 4 meter lange bomber (pyroklastisk materiale med

en diameter på mere end 64 millimeter) op til 500 meter fra spalten (figur 5). En eruptionssøjle af aske og gas steg op til en højde af 5 kilometer. I den sydlige ende af sprækken dannedes en lav spatterkegle. Omkring dette krater ses gamle vulkanske bjergarter at være overstrøet med lapilli og bomber, hvilket viser, at før den lave kegle dannedes var der en kortvarig episode med et mere eksplosivt udbrud, formentlig med en magmafontæne. I løbet af få timer evakueredes de 1.300 beboere i calderaen til fods.



*Figur 4. Kort over calderaen med 1995-udbruddets produkter markeret.*



*Figur 5. Under første fase af 1995-udbruddet var der en episode med udslyngning af udsædvanligt store bomber. Her ses en ca. 4 meter lang bombe, der blev fladtrykt da den stadig flydende landede. Bemærk dens dråbeform. Den har et tyndt ydre lag af glas og et indre af opblæret scorie. Den sorte farve skyldes magmaets jern-magnesiumrige sammensætning. På grund af bombernes store porøsitet vil de formentlig forvitre i løbet af få år. Bemærk lapilli og mindre bomber, der dækker jorden under den store bombe. Den brune bjergart er en gammel lava.*

*Anden fase - Begyndende opbygning af scoriekegle:* Efter mere end et døgn blev udbruddet koncentreret omkring den nordøstlige ende af spalten, på Picos nedre skråning, og en fase med Hawaii-type aktivitet blev indledt. Magma stod op i fontæner og faldt ned dråbevis, som lapilli. Lapilli-tuffen (bjergarten dannet af lapilli) voksede til en scoriekegle omkring krateret. Den blev i løbet af få dage mere end 100 meter høj. Magma flød ud fra scoriekeglen og dannede først en 10-20 meter dyb lavasø vest herfor. Efter nogle dage brød magmaet ud fra søen og begyndte at strømme mod vest i calderaen. Man kan stadig se store flager af den lavaskorpe, der udgjorde lavasøens overflade, ligge hulter til bulter, hvor de aflejredes, da magmaet strømmede bort og søen tømtes. Langs de nu inaktive dele af spalten afsatte udstrømmende gas sublimater, som f.eks. svovl.

*Tredie fase - aa-lavaen:* I 15 dage fortsatte den hawaiianske aktivitet og aa-lavaen avancerede først 2 kilometer indtil calderavæggen og bøjede så af mod nord og gled mod landsbyen Portela. Lavastrømmen var flere hundrede meter bred og 10-15 meter høj og var en såkaldt aa-lava, der dannes af viskøst



*Figur 6. Aa-lavaen og vingården. Den 10-15 meter høje aa-lava knuste adskillige bygninger. Her står en hvidkalket mur af en vingård tilbage, medens resten enten er faldet sammen eller dækket af lavaen.*

(sejtflydende) magma, som ved afkøling brister i blokke, hvorfor lavaen avancerer over en front af lavafragmenter. På sin vej dækkede den talrige huse og dyrkede arealer, der lå ved calderavæggen, foruden en vandcisterne af essentiel betydning for landbruget i calderaen. Af en vingård står kun verandaen tilbage (figur 6). Bebyggelsen Boca de Fonte blev helt ødelagt. Aa-lavaen nåede i alt 4 kilometer væk fra krateret og standsede 1 kilometer fra Portela. Endnu en aa-lava dannedes ovenpå den første, og 16. april nåede den nye strøm fronten af den første og avancerede yderligere 1/2 kilometer mod Portela.

*Fjerde fase - pahoehoe-lavaen:* Fra 22. april skiftede lavaens viskositet, så udbredelsen herefter skete som pahoehoe lavastrømme. Den aktuelle lavas måde at avancere ved dannelse af pahoehoe-tæer fremgår af figur 7. På figur 8 illustreres, hvordan pahoehoe-tæer kan vokse til pladepahoehoe. Aktiviteten skiftede 19. april til Strombolisk-type med eksplosioner i krateret og udslyngning af pyroklastisk materiale i mindre omfang. Til gengæld begyndte magmaet nu at strømme ud fra en åbning ved den vestnordvestlige-lige basis af den nu 200 meter høje scoriekegle. Magmaet strømmede kort på overfladen, hvorefter det løb ned i en kanal (lavatunnel) i den tidligere dannede aa-lava. Fra flere punkter strømmede magmaet ud fra siden af aa-lavaen ca. 1 kilometer fra krateret og dannede pahoehoe-lava både nord og syd for aa-lavaen. På sydsiden nåede

pahoehoelavaen calderavæggen, og dækker her et større areal end aa-lavaen. På nordsiden løb pahoehoelavaen omtrent parallelt med aa-lavaen og nåede nogle få meter længere end denne. Dermed blev Portela skånet. Flere gårde og dyrkede arealer blev derimod ødelagt under denne fase af udbruddet. Lavaen avancerede langsomt med en hastighed af omkring 1 meter i timen. Nogle steder dannedes reblava, når letløbende lavas størknede skorpe foldedes (figur 9). Den stromboliske aktivitet var ofte voldsom, og askeskyer steg til flere hundrede ters højde (figur 10), mens bomber og lapilli slyngedes ud over scoriekeglens rand. Ofte drev askeskyer mod sydvest fra krateret. Asken faldt især i calderaen, men også på sydvestflanken af Fogo. Langs lavastrømmens front opstod ofte stærke hvirvelvinde på grænsen mellem kold luft og den varme luft over den nye lavaoverflade. Udstrømningen af magma varede indtil 26. maj.

*Senere aktiviteter:* Efter udbrudsfaserne fortsatte fumaroler med at være aktive mange steder i mere end en måned, og såvel i 1996 som i 1999 var der stadig svag fumarolaktivitet omkring krateret. Den 31. januar 1996 var der igen jord-skælv og mærkelige lyde hørtes af beboerne i calderaen, men der fulgte intet udbrud.



*Figur 7. Pahoehoe-lava. Relativt letflydende lava, pahoehoe-lava, udbredes ved at den størknede lavafront brister og der vokser 'tæer' ud. Her ses en sådan tå i vækst, ligesom lavafronten andre steder kan ses at briste under trykket fra magmaet, der strømmer frem fra krateret inde i lavastrømmen. I baggrunden ses Pico og den nye scoriekegle, hvorfra en askesky driver mod sydvest.*



*Figur 8. Plade-pahoehoe. Større pahoehoe-tæer vokser til plade-pahoehoe. Bemærk hvordan lavaen under væksten af tærne skubber lidt til sandet til højre i billede, medens lavaen i øvrigt udbredes ovenpå den eksisterende overflade.*



*Figur 9. Reblava dannes. Pahoehoe-lava strømmer ned ad skrånende terræn og danner en overflade af reb-lava.*



## VORE UNDERSØGELSER AF DET ERUPTEREDE MAGMA

Vi havde oprindeligt sat næsen op efter at måle isotopforhold i lavaen, hvorfra tidsrummet mellem smeltedannelse og eruption ville kunne bestemmes. De erupterede magmaer havde imidlertid en kemisk sammensætning, som viste at de havde ligget længe i magmakamre, og de kunne derfor ikke bruges til formålet.

I stedet viste vore undersøgelser af en række produkter fra hele udbrudssekvensen, at der var en endog meget stor variation i den kemiske sammensætning: de dækker således op mod halvdelen af den totale variation blandt alle Fogos lavaer. Der er endvidere tale om flere markante trin og modsatte retninger i disse ændringer. Ofte forklares variation i vulkaniternes sammensætning under en eruption som en afspejling af den gradvise taping fra et magmakammer af et sammensætningsmæssigt zoneret magma.

Det kan dog ikke være hele forklaringen i dette tilfælde, hvor mindst tre komponenter var til stede. Vor model er, at magma er steget op fra et dybere liggende magmakammer til et zoneret højereliggende magmakammer. Indstrømning af nyt magma i kammeret kan have medvirket til vulkanudbruddet.

### FORKLARINGER TIL UDTRYK, HVIS BETYDNING IKKE FREMGÅR AF TEKSTEN

Hawaiiansk aktivitet omfatter udstrømning af magma fra et krater uden voldsomme eksplosioner og er den mildeste form for udbrud. På trods af dette kan disse udbrud være særdeles kraftfulde, f.eks. hvor magma står mere end en kilometer op i en ildfontæne. Udbrud langs sprækker kan resultere i ildgardiner ('curtains of fire'). Disse fænomener skyldes afgivelse af luftarter, som under højt tryk er opløst i magmaet, men som under udbruddet afblandes som en selvstændig gasfase, som på grund af den lave massefylde skubber magmaet opad med stor fart. Står magmaet blot i krateret og afbobler gas, kan resultatet være dannelse af en oftest lav vulkanbygning af klatter/sprøjt af magma, som kaldes spatter kegler eller spatter volde. Denne typer vulkanisme skabes især af letflydende (lavviskøs) magma, og mange udbrud på Hawaii er typeeksempler. Vulkanbygningernes flanker har oftest en meget lav hældning af nogle få grader.

Strombolisk aktivitet er næste trin på skalaen af eksplosiv vulkanisme og omfatter sønderdeling af magma ved pludselig gasafgivelse under udbruddet. Dette kan skyldes at magmaet er sejt (viskøst). Typisk sker der en eksplosion med udslyngning af pyroklaste (se nedenfor) op til hundreder af meter op i luften. Stromboli i De Æoliske Øer nord for Sicilien har givet navn til denne type, og der er oftest tale om ikke katastrofale udbrud. Vulkanbygninger er oftest kegler med stejle sider med en hældning på op til 30-40° - så stejlt som fragmenterne kan stables.

Vulkanitter dannet ved sønderdeling og udslyngning af magma er pyroklastiske bjergarter. Pyroklaste opdeles efter størrelsen, som magmaet sønderdeles i under eksplosionen: aske mindre end 2 mm, lapilli er 2-64 mm og bomber er større end 64 mm. Fordi fragmenterne lynafkøles under flugten gennem luften er de ofte fyldt med hulrum af fanget gas afgivet fra magmaet (pimpsten er et eksempel).

Sådanne opblærede bjergarter betegnes også scorie, og denne betegnelse dækker også over ikke-pyroklastisk materiale, som f.eks. lavaoverflader. Vulkanbygninger opbygget hovedsagligt af lapilli og bomber betegnes scoriekegler.

Vulkanbygninger kan helt eller delvist synke ind, hvis magmakammeret derunder delvis tømmes, f.eks. under et udbrud. Indsynkningen, der er ofte cirkulær, kaldes en caldera.

Centralvulkaner (med et krater på toppen af en kegle) har ofte udbrud på flankerne, man taler om flankeudbrud eller laterale udbrud og der kan dannes en mindre parasitkegle på hovedvulkanens side.

Lavastrømme udbredes som funktion af magmaets viskositet og tilførselsrate. Sejt magma er tilbøjeligt til at brydes op under sin bevægelse og danner aa-lavastrømme, der på ydersiden, hvor den køles hurtigt af, består af en rodet bunke af brokker, ligesom lavafrenten avancerer ved at afskalle uregelmæssige brokker. Det indre af en aa-lava er massiv. Letflydende lava, danner en mere sammenhængende overflade, pahoehoe-lava, som typisk udbredes gennem udposninger på lavafrenten. Disse udposninger kaldes pahoehoe-tæer og kan variere i størrelse og form. Overfladen kan variere enormt, f.eks. være glat, krøllet/snoet (reblava), bestå af plader. Lavaen kan være massiv, have en scorieoverflade eller være helt porøs og skør.

En fumarole er en åbning, hvorfra varm, vulkansk gas strømmer. Mineraler kan dannes direkte fra luftarterne, sublimation.



*Figur 10. Eksplosioner fra scoriekeglen. Strombolisk aktivitet i krateret i den 200 meter høje scoriekegle ved foden af Pico. Den brune sky består af eksplosivt afgivet gas og partikler af aske og lapilli, der føres op i suspension med den varme luftstrøm. Bomber, ligesom det meste af lapillien, falder hurtigt ned og bidrager til væksten af scoriekeglen.*