

# Stratigrafi i et vulkansk område – Santorin som eksempel

WALTER L. FRIEDRICH



Friedrich, W.L.: Stratigrafi i et vulkansk område – Santorin som eksempel. *Dansk geologisk Forening, Årsskrift for 1986*, side 1–6, København 1. juni 1987.

The application of relative and absolute dating methods in a volcanic area is demonstrated on Santorini. Pyroclastics from the volcanic island Santorini in Greece are valuable marker beds for the correlation of marine and terrestrial sediments in the Mediterranean. Tephrochronology based upon absolute dated ash layers from Santorini, is commonly used in deepsea studies, underlining the importance of Santorini in regional and global stratigraphy.

Walter L. Friedrich, *Geologisk Institut, Aarhus Universitet, C. F. Møllers Alle 120, DK-Aarhus C. 12. september 1986.*

Santorin, som ligger ca. 120 km nord for Kreta i Det Ægæiske Hav, indtager på mange måder en nøgleposition, jf. fig. 1. Den geografiske placering i området mellem Europa, Asien og Afrika, præger denne besynderlige ø-gruppe. Geologisk set er ø-gruppen beliggende på sydenden af den ægæiske plade – en delplade af den store europæiske lithosfæreplade. Kollisionen med den afrikanske plade er den vigtigste årsag til de mange geologiske fænomener, der udspringer sig på Santorin og i de omliggende områder.

Geologien i dette nøgleområde præges især af de vulkanske aflejringer, der findes i såvel marine som terrestriske sedimentter. Disse danner grundlag for de stratigrafiske dateringer. Især tephrokronologien er et velegnet redskab, da de vel-daterede askelag fra Santorin har en stor udbredelse i det Middelhavsområdet. Der kan således dateres både relativt og absolut i langt højere grad end i mange andre »normale« sedimentære områder.

En stratigrafisk oversigt over Santorin er tidligere blevet givet af Pichler & Kussmaul, (1980) i forbindelse med det geologiske kort over Santorin, men en række nye dateringer og feltobservationer berettiger til en justering af tidsskalaen.

## Relative dateringsmetoder

### Biostratigrafi

Den ikke-vulkanske del af Santorin består af sedimentære marine aflejringer, der rækker fra Trias til Pliocæn. De ældste aflejringer tilhører Kyklademassivets marine dele, der blev aflejret i Tethyshavet i Perm-Trias og opfoldet under den Alpine orogenese. I dag ligger det meste af dette Kyklademassiv under havniveau, og kun enkelte bjergtoppe rager op som øer i Ægæerhavet. På Santorin er Kyklademassivets relikter synlige i den sydøstlige del af øen, ved det 568 meter høje Eliasbjerg, byen Pyrgos, Kap Plaka og ved Monolithosbjerget. Det er metamorfe bjergarter med fyllitter, kalk, lerskifer og sandsten; de er alle ret fossilfattige. De hidtil eneste fund af muslinger (megalodontider) (Papastamatiou, 1958: 106; Davis & Bastas 1978:62) tillader dog en sikker stratigrafisk henføring til Trias, jf. fig. 2.

I samme Kykladekompleks er der ved Selladabjerget også gjort enkelte fund af store foraminiferer. Disse Numulitter (Miliolidae), samt fund af *Laffiteina* sp. og Gastropoder indikerer en Paleocæn alder (Montian?) og viser, at denne lagserie fortsat blev aflejret under marine forhold (Tataris, 1964).

På den sydlige del af Santorin, på Akrotirihalvøen, findes der et område med domestrukturer med pillow-breccier og marin tuff. Især området

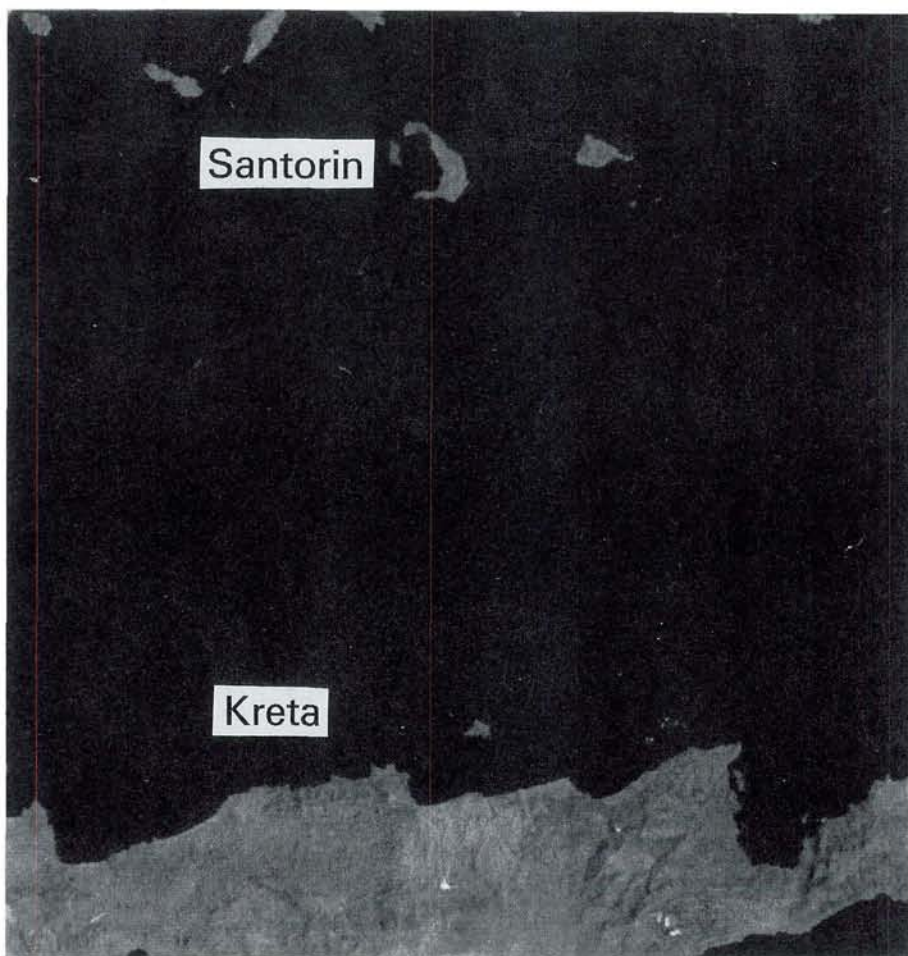


Fig. 1. Santorin øgruppen ligger 120 km N for Kreta. Satellitbillede.

Santorini is situated 120 km N of Crete. Satellite photo.

ved landsbyen Akrotiri med Lumaravi og Archangelos bjergene blev allerede i sidste århundrede beskrevet som et submarint vulkanogent kompleks. I det nævnte område fandt von Fritsch, Reiss og Stübel (1866) marine fossiler; Fouqué (1879) anbragte på basis af flere fossilfund ved Balos lagserien i øverste Pliocæn. Han sammenlignede fundene med forekomsterne fra Rhodos og Italien (Asti). Keraudren (1970) har på basis af fund af *Chlamys septemradiata* Müller ved Archangelos og *Turritella subangulata* Brochi ved Balosbugten konkluderet, at alderen kunne være Calabrien, hvor begge arter optræder samtidigt. Han udelukkede dog ikke den mulighed, at der kunne være tale om to forskellige niveauer, nemlig Pliocæn og Calabrien eller yngre.

Vest for byen Akrotiri og ved Archangelos har Sauvage & Jarrige (1978) foretaget palynologiske undersøgelser. På grund af forekomsten af pollen fra Neogen konkluderer de, at de før omtalte lag godt kan tilregnes Pliocæn som tidligere konstateret af Fouqué (1879). Dette synes også bekræftet af absolutte aldersbestemmelser, som omtales senere.

Et endnu udateret fossilt svamperev ved fyrtårnet på sydspidsen af Akrotirihalvøen formodes ligeledes at tilhøre den pliocæne lagserie. Denne relative datering angiver alderen af de første vulkanske dannelser på Santorin, der her startede med submarin pudelava og tuff, jf. fig. 2.

I dag ligger disse områder hævet til omkring 160–210 meter over havniveau som enkelte do-

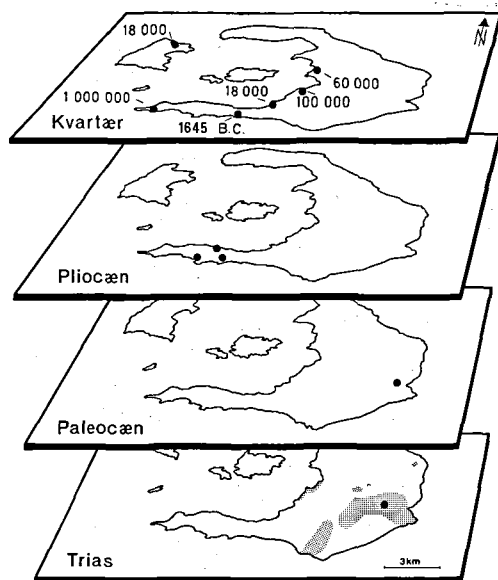


Fig. 2. Santorin-øgruppen består af tre ældre samt to yngre øer, de er dannet efter det store Minoiske udbrud; disse ligger centralt i calderaen. Ringøerne er: Therasia (øverst til venstre), Thera (halvmåneformet) og den lille ø Aspronisi i sydvest. Nea Kameni er den største af de to centrale øer; Palæa Kameni den mindste. Med sorte punkter angives, hvorfra de daterede prøver stammer. Priksignaturen markerer udbredelsen af Kyklademassivet på Thera.

The Santorini islands consist of the three older ring-islands: Thera, (half-moon shaped and largest), Therasia and Aspronisi (smallest) and two younger islands in the middle of the caldera: Nea Kameni (larger) and Palæa Kameni. The latter two islands were formed after the Minoan eruption. The location of the dated samples is indicated by black dots. The shaded areas mark the occurrence of the metamorphic basement on Thera.

mestrukerer. Opståen af Akrotirihalvøens submarine vulkanske bjergdome kan sættes i genetisk sammenhæng med de hændelser, der prægede udbrudsforløbet på Nea Kameni, den yngste ø i Santorin calderaen, i de seneste fire hundrede år. Man kunne på en meget instruktiv måde under udbruddet på Nea Kameni i 1707 iagttage en opdoming af et havbundsområde, der medførte dannelsen af en ny 800 meter lang ø, på kun nogle få uger. Denne ø bestod for det meste af hvid pimpsten, og der fandtes endnu levende havdyr på den. A. Forbes undersøgte disse dyr (citater i A. Fouqué, 1879) og fandt, at området oprindeligt havde ligget på 40 meters dybde. Akrotirihalvøens domestrukturer kan godt være opstået på lignende måde.

Xenolitter af algekalk med muslinger og snegle i det Minoiske pimpstenslag er spredt over hele Santorinkomplekset, med undtagelse af de unge

Kameni øer. Disse xenolitter tyder på, at der i Santorins undergrund findes brakvandsaflejringer fra senkvartær. (Quenstedt, i H. Reck, 1936).

### Tefrokronologi

Denne relative dateringsmetode er et særdeles nyttigt redskab i geologien. Metoden baseres på, at aske (tephra på græsk) fra et vulkanudbrud aflejres som et synkront lag i alle aflejringsmiljøer og derved danner en nøgle-horisont. Vulkansk aktivitet på Santorin har i løbet af senkvartæret frembragt en række askelag, der findes i dybhavssedimenter i det Middelhavsområdet og som anvendes i stratigrafien. Det vigtigste askelag stammer fra det Minoiske udbrud fra bronzæalderen, jf. fig. 3.

#### Det Minoiske udbrud (ca. 1645 f. Kr.)

Analysen af Z-2 tephraen, som forekommer i talrige borekerner, viser, at det Minoiske udbrud var det største i det Middelhavsområdet indenfor de sidste 4000 år. (Watkins m. fl. 1977:123; Keller 1981:236; Vinci 1985:147; Stanley & Sheng 1986:734). Det var måske også det største eksplosive udbrud på den nordlige halvkugle i denne periode. Således anslår Sparks m. fl. (1984) det samlede udbrudsvolumen til 40 kubikkilometer (ca. 20 kubikkilometer tæt magma). Glaspartikler fra udbruddet er nu også fundet i Nil Deltaet (Stanley & Sheng 1986:734).

Da udbruddet begravede minoiske beboelser på Santorin og spredte en stor askeovfald over det Sydøstlige Ægæerhav, er aske fra dette udbrud en vigtig ledehorisont både for arkæologer og geologer, jf. fig. 3 og 4. Mens arkæologer på basis af keramiske fund anslår en alder af udbruddet til omkring 1500 f. Kr. (Doumas 1983), giver en serie af kalibrerede kulstof-14 dateringer aldre på mellem 1630 og 1665 f. Kr. (Hammer m. fl. i tryk).

#### Akrotiri/Millo ignimbrit (18 000 f. Kr.)

Denne ca. 7 meter tykke ignimbrit danner på Santorin et markant rødt lag. Laget korreleres med Y-2 tephraen i dybhavssedimenterne (Keller 1981:236). Ignimbrittens alder anslås til ca. 18 000 år (Pichler & Friedrich 1976:373; Friedrich m. fl., 1977:37). Alderen må anses for at være ret sikker, da den er baseret på et antal kul-

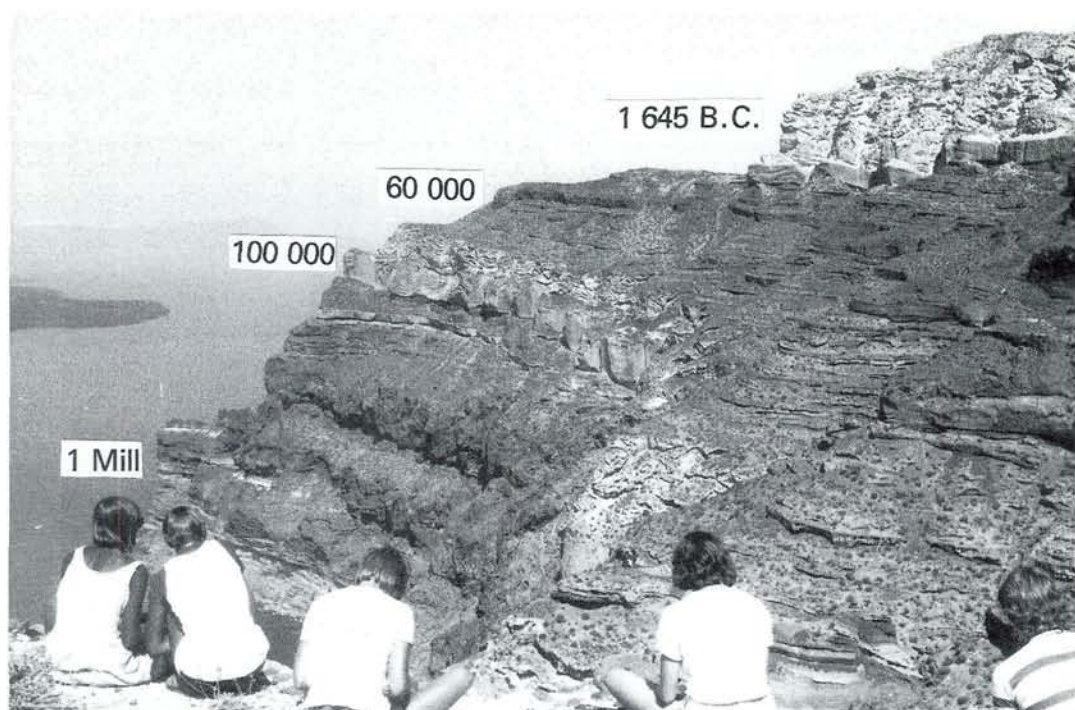


Fig. 3. Calderavæggen S for byen Fira på Thera med angivelse af de absolutte aldre. Alderen for det Minoiske udbrud (1645 B.C.) er efter Hammer m.fl. (i tryk).

Caldera-wall S of the town Fira on the island Thera. Absolute dated layers are shown. The age of the Minoan eruption (1645 B.C.) is from Hammer et al. (in press).

stof-14-analyser af mindre træer, der alle blev begravet, da ignimbritten blev dannet, jf. fig. 2. Ignimbrittens udbredelse og genese på Santorin er beskrevet af Druitt (1985).



Fig. 4. Udbredelsen af tephra fra det Minoiske udbrud. Efter McCoy, 1980.

Areal distribution of tephra from the Minoan eruption. After McCoy, 1980.

*Det mellemste pimpstenslag (BM) (ca. 60 000 år f. Kr.)*

BM-laget er blotet på Santorin langs calderavæggen, hvor det kan følges over flere kilometer. Det danner en markant pyroklastisk horisont med kraftig lateral variation. På calderavæggen nedenfor byen Fira er BM-laget udviklet som en massiv sort ignimbrit, der gradvis går over til lys pimpsten. Dette mellemste pimpstenslag korreleres med W-2 tephraen fra dybhavssedimenter i det Mediterrane område (Keller 1981:237; Vinci 1985:152). BM-lagets alder anslås nu til ca. 60 000 år, altså 10 000 år ældre end tidligere angivet (Friedrich & Velitzelos 1986:296).

*Det nedre pimpstenslag (BU) (ca. 100 000 år)*

BU-askeseriens alder på Santorin angives til 100 000 år (Seward m. fl., 1980:104). Denne aske har man korreleret med V-1 asken fra dybhavskerner (McCoy 1980:75; Keller 1981:239; Vinci 1985:153). Keller regner dog med en alder på 160 000 år for dette lag. Da der således består forskellige opfattelser vedrørende dette lags alder, er denne korrelation lidt usikker, jf. fig. 2.



## Absolutte dateringsmetoder

### *Kalium-argon metoden*

Optræden af de første vulkanske dannelser på Santorin og tilknytningen af de før omtalte marine fossilfund fra Pliocæn rykker aldersskalaen til et tidsrum, hvor kalium-argon-metoden med fordel kan tages i brug. Denne dateringsmetode blev anvendt på lavastrømme fra øen Milos (alder: 3 mill. år) og Santorin, som begge ligger på den vulkanske Kykladebue. Herved fik man aldre på ca. 1 million år. Ferrara et al. (1980) angiver kalium-argon aldre på 1–1.5 mill. år for en tyk dacitisk lavastrøm, som danner Kap Akrotiri og en submarin breccie ved Kap Mavros på Thera, jf. fig. 4.

### *Spaltespormetoden (Fission Track)*

Spaltespor-dateringsmetoden bygger på, at bl. a. krystaller fra deres dannelsesetidspunkt påvirkes af radioaktive stråler. Disse efterlader spaltespor i krystallen, og de kan tælles i et tyndslib. Denne metode blev her anvendt på zirkon fra de ældste askelag, som kunne dateres til ca. 1 million år og på obsidian i xenolitter fra »BU«-pimpstenshorisonten (tysk forkortelse »Bimsstein, unterer«, som anvendes internationalt for dette lag), hvis alder derved kunne fastslås til ca. 100 000 år (Seward et al., 1980:104). BU-lagene opnår på Santorin en tykkelse på ca. 40 meter, og de findes bl.a. i mange dybhavs borekerner i Det Ægæiske Hav, hvilket understreger betydningen af dette lags datering og Santorins vigtige rolle for stratigrafien i det Middelhavsområde.

### *Radiokarbonmetoden*

Aflejringen af subaeriske lavastrømme på Santorin begyndte for ca. 1 mill. år siden, og den i kvartæret etablerede vegetation efterlod tydelige spor i de talrige askelag. Studier af planterester i vulkanske områder (f.eks. på Hawaii og Island) viser tydeligt, at selv den ringeste bevoksning (f.eks. græs) i et område efterlader fossiler, når det pågældende område tildækkes af lava eller aske (Friedrich, 1966, 1968).

Detaljerede studier af askelagene på Santorin og analyser af velbevarede planterester muliggjorde en rekonstruktion af senkvartærets klimahistorie og på grundlag af radiokarbon dateringer kunne lagene korreleres med en veldateret tørveforekomst i Makedonien og enkelte findesteder i

NV-Europa (Friedrich m. fl. 1977:36; Friedrich 1980:125).

En i Groningen (W. G. Mook) udført datering af en træstamme fra pimpstensbrudet syd for byen Fira på Thera, resulterede i en alder på  $54\,250 \pm 700$  år. Dette tyder på, at et andet markant askelag »BM«, eller Det Mellemske Pimpstenslag er ældre end de 50 000 år, som Pichler & Kussmaul (1980:417) angiver for dette lag. Da BM-laget ligger under den daterede træstamme, og med BU-laget som nedre grænse, må BM-lagets alder ligge et sted mellem 54 250 og 100 000 år. På grund af beliggenheden i profilet konkluderer Friedrich & Velitzelos (1986:295), at BM-laget har en alder på de tidligere nævnte ca. 60 000 år, jf. fig. 2.

Radiocarbonmetoden blev dog i særlig grad anvendt til dateringen af det Minoiske udbrud. Her gav planterester (frø fra forråds krukke fundet i udgravningen ved Akrotiri) de bedste resultater. Da man i de seneste år har kunnet fremstille meget præcise kalibreringskurver baseret på dendrokronologien, kan man nu angive radiokarbon dateringerne i kalenderår.

### *Thermoluminescens metoden*

Lag, som på grund af manglen af daterbar substans eller som har for ung alder til datering ved hjælp af kalium-argon eller radiokarbon metoden, søges nu dateret med thermoluminescens metoden. Denne undersøgelse er endnu ikke afsluttet, men der foreligger allerede ret lovende delresultater fra det Minoiske Pimpstenslag med en alder på 1580 f. Kr. med en dateringsusikkerhed på  $\pm 200$  år. Undersøgelsen udføres af V. Mejdal sammen med Chr. Kronborg og undertegnede.

### *Dendrokronologi*

Det Minoiske udbrud startede med en kraftig plinisk fase, hvor store mængder af aske og gas blev slynget op i stratosfæren. Man ved fra lignende store vulkanudbrud (f.eks. Krakatau i 1886 og Tambora 1815), at særlige eksplosive udbrud medfører klimaforandring, som kan spores i træernes årringe. Således regner man med, at udbruddet har haft en så stor virkning på det globale klima, at der skete klimaforandringer med frostskafer på træer i Nordamerika som følge. Disse frostskafer i dendrokronologisk daterede børstekogle-fyrretræer blev således fastlagt til

1626–1628 f. Kr. (Lamarche & Hirschboek, 1984:123).

### Iskernedateringer

Da man ligeledes regner med, at svovlsyre fra det Minoiske udbrud kan være blevet spredt med luftstrømme til Grønland, forsøger man for tiden at finde syrespor i iskerner taget fra den grønlandske indlandsis. Derved forventer man en bedre datering af dette betydningsfulde udbrud (Hammer m. fl., i tryk).

### Dateringer i historisk tid

Der findes mange øjenvidneberetninger til den vulkanske aktivitet. Disse strækker sig fra 197 f. Kr. til det nyeste udbrud i 1950. Udbruddene førte til dannelsen af Kameni Øerne. En oversigt over de ældre udbrud på Kameni Øerne findes især hos Ross (1840); dernæst om udbruddene 1866–1870 hos Fouqué (1879) og udbruddene 1925–1928 findes beskrevet af Reck (1936). En populariseret beretning om disse udbrud giver Friedrich og Nordentoft (i tryk).

### Litteratur

- Davis, E. N. & Bastas, C. 1978: Petrology and geochemistry of the metamorphic system of Santorini. In: *Thera and the Aegean World I*, 61–79, London. (ed. Doumas, C.).
- Doumas C. 1983: *Thera, Pompeji of the Ancient Aegean*. Thames and Hudson, London.
- Druitt, T. H. 1985: Vent evolution and lag breccia formation during the cape Riva eruption of Santorini, Greece. *J. Geol.* 93, 439–454, London.
- Fouqué, F. 1879: *Santorin et ses éruptions*. 440 pp., Paris (G. Maçon).
- Ferrara, G., Fytikas, M., Giuliani, O. & Marinelli, G. 1980: Age of the Formation of the Aegean Active Volcanic Arc. In: *Thera and the Aegean World II*, 37–41. London. (ed. Doumas, C.).
- Friedrich, W.L. 1966: Zur Geologie von Brjánslækur (Nordwest-Island) unter Besonderer Berücksichtigung der fossilen Pflanzen. Dissertation, *Sonderveröff. Geol. Inst. Köln*, 10, 1–108, Köln.
- Friedrich, W. L. 1968: Tertiäre Pflanzen im Basalt von Island. *Medd. Dansk Geol. Foren.* 18 (3–4) 266–276, København.
- Friedrich, W. L., Fichler, H. & Kussmaul, S. 1977: Quaternary pyroclastics from Santorini/Greece and their significance for the Mediterranean palaeoclimate. *Bull. geol. Soc. Denmark* 26, 27–39, Copenhagen.
- Friedrich, W. L. & Velitzelos, E. 1986: Bemerkungen zur spätquartären Flora von Santorin/Griechenland. *Courier Forschungsinst. Senckenberg* 86, 387–395, Frankfurt.
- Friedrich, W. L. & Nordentoft, A. 1987: Santorins sortbrændte øer. Et geologisk portræt af Kameniøerne i det Græske Øhav. *Naturens Verden* (in press).
- von Fritsch, Reiss & Stübel 1867: *Santorin und die Kameni Inseln*, Heidelberg.
- Hammer, C., Clausen, H. B., Friedrich, W. L. & Tauber, H. 1987: The Minoan Eruption of Santorini in Greece dated to 1645 B. C.? *Nature* (in press).
- Keller, J. 1981: Quaternary Tephrochronology in the Mediterranean Region. In: *Tephra Studies*. 227–244. Reidel Publ. Comp. (Self, S. & Sparks, R. S. J. eds.)
- Keraudren, B. 1970: *Bull. Mus. Anth. Preh. Monaco* 16, p. 5, Monaco.
- MaCoy, F. W. 1980: The upper Thera (Minoan) ash in deep-sea sediments: Distribution and comparison with other ash layers. In: Doumas, C. (ed.): *Thera and the Aegean World II*, 57–100, London.
- Papastamatiou, J. 1958: Sur l'âge des calcaires cristallines de l'île de Théra (Santorin). *Bull. Soc. Geol. Greece* 3, 104–113, Athen (In Greek with French summary).
- Pichler, H. & Friedrich, W. L. 1976: Radiocarbon dates of Santorini volcanics, *Nature* 262, 373–374, London.
- Pichler, H. & Friedrich W. L. 1980: Mechanism of the Minoan Eruption of Santorini. In: *Thera and the Aegean World II*, 15–30. London. (ed. Doumas, C.).
- Pichler, H. & Kussmaul, S. 1972: The calc-alkaline volcanic rocks of the Santorini group (Aegean Sea, Greece). *N. Jahrb. Mineral. Abhandl.* 116, 268–307, Stuttgart.
- Reck, H. 1936: *Santorin – Der Werdegang eines Inselvulkans und sein Ausbruch 1925–1928*. 3 vols, Berlin (D. Reimer).
- Ross, D. L. 1840: *Reisen auf den griechischen Inseln des ägäischen Meeres*. 1–170, Stuttgart und Tübingen.
- Sauvage, J. & Jarrige, J.-J. 1978: Sur l'âge des stades initiaux de l'activité volcanique dans l'île de Thira (Grèce): *Études palynologiques. Comptes Rendus de des Séances l'Académie des Sciences*, Ser. D. 286, 929–931. Paris.
- Seward, D., Wagner, G. A. & Pichler, H. 1980: Fission track ages of Santorini volcanics (Greece). In: *Thera and the Aegean World II*, 101–108. London. (ed. Doumas, C.).
- Sparks, R. S. J., Brazier, S., Huang, T. C. & Muerdter, D. 1984: Sedimentology of the Minoan deep-sea tephra layer in the Aegean and Eastern Mediterranean. *Mar. Geol.* 54, 131–167.
- Stanley, D. J. & Sheng, H. 1986: Volcanic shards from Santorini (Upper Minoan ash) in the Nile Delta, Egypt. *Nature* 320, 733–735.
- Tataris, A. A., 1964: The Eocene in the semi-metamorphosed basement of Thera Island. *Bull. Geol. Soc. Greece* 6, 232–238, Athen (In Greek with English summary).
- Vinci, A. 1985: Distribution and chemical composition of tephra layers from eastern Mediterranean abyssal sediments. *Mar. Geol.* 64, 143–155.