

VOLKER JÖRG DIETRICH¹

Griechenland im Feuer – von Prometheus zum Feuerteufel

Zusammenfassung des Vortrags vom 26. Februar 2013

Zusammenfassung

Gemäss griechischer Mythologie brachte Prometheus den Menschen das Feuer. Zwei Meteoritenkrater aus prähistorischer Zeit unweit des Olympos, sind Zeugnisse dieser Legende. Später erscheint der Titan Typhoeus als Personifizierung vulkanischer Kräfte und heisser Winde, glühende Lava, Steine und Asche spuckend aus der Tiefe des Santorin Vulkans und ist für die minoische Katastrophe vor 3630 Jahren verantwortlich, welche die frühe abendländische matriachalische Kultur und deren Gedankengut grundlegend verändert. Historischen Überlieferungen zufolge wird Griechenland seit dieser Zeit auch durch grosse Erdbeben, Auslöser von Feuersbrünsten und Tsunami verwüstet. In jüngster Vergangenheit fegt der Feuerteufel mit riesigen Waldbränden über das Land.

Naturkatastrophen in der griechischen Mythologie

Griechenland und die Ägäis, in Schönheit mit ihren vielgestaltigen Landschaften, Gebirgen, bizarren Küsten, ihrer Inselwelt und tiefblauen Wassern von keinem Land und Meer zu übertreffen, sind seit Jahrtausenden Mittelpunkt der Entstehung abendländischer Kulturen. Aber gerade dieser Teil der Erde wird seit Urzeiten von Naturkatastrophen heimgesucht, welche ihren Ursprung in der Dynamik der Erde haben.

Vier grosse Naturkatastrophen aus der Vorzeit, Frühzeit, historischer Zeit und Neuzeit, gebunden an «zerstörerische Feuer» als Folge eines Meteoriteneinschlags, eines riesigen Vulkanausbruchs, Erdbeben und Klimawandel, sollen das Schicksal dieses Landes und ihrer Bewohner verdeutlichen.

Zeugnisse aus Vorzeit und Frühzeit sind in der griechischen Mythologie verankert und durch die ersten Geschichtsschreiber und Philosophen überliefert. Hesiod (ca. 700 v.Chr.) lässt die Götter des Olympos, Gaia (Erde) und Uranus (Himmel), die sich in den Titanen und ihren Abkömmlingen (u.a. Zeus) fortpflanzen, aus dem Chaos entstehen. Prometheus «der Vorausdenkende», in der Mythologie als Titan ein

¹ Prof. emer. Dr. Jörg Volker Dietrich, Institut für Geochemie und Petrologie, ETH Zürich

Freund und Kulturstifter der Menschheit, wird sogar als Schöpfer der Menschen und Tiere bezeichnet.

«Um das Feuer für die Menschen wiederzuerlangen, hob Prometheus einen langen Stängel des Riesenfenchels in den Himmel, um ihn am vorüberrollenden funkensprühenden Sonnenwagen des Helios zu entzünden. Mit dieser lodernen Fackel eilte er zur Erde und setzte einen Holzstoß in Flammen», Platon (428–347 v.Chr.). Der Titan Typhon (Typhoeus), der jüngste Sohn der Gaia, ist ein im Erdinnern hausendes Ungeheuer mit hundert Drachenköpfen und Schlangenfüssen, das als Gluthauch erscheint und Verwüstungen anrichtet; Inbegriff aller elementaren (bes. vulkanischer) Zerstörung (BAUDY 1992). Er lebt in den Tiefen unter der Vulkaninsel Santorin.

Mythen, Sagen und Legenden waren oftmals nicht nur die Auslöser intensiver historischen Forschungen, wie es die Entwicklung der Archäologie gezeigt hat, sondern auch treibende und inspirierende Kräfte für viele naturwissenschaftliche Forschungen. Viele archäologische Ausgrabungen haben eine unglaubliche Fülle an Daten und Zeugnissen geliefert und so Interpretationen zu frühen und historischen Epochen des ostmediterranen Raumes erlaubt, welche Abläufe und kulturelle Entwicklungen erkennen lassen. Allerdings wurden viele Darstellungen griechischer und römischer Naturhistoriker und Philosophen in den letzten mehr als zweitausend Jahren immer wieder umgedeutet und für eigene Zwecke missbraucht. Bereits spätere antike Schriftsteller, aber auch heutige Medien entstellen die originalen Texte und interpretieren die Naturkatastrophen gerne als Antworten und Warnungen auf politische, ökonomische oder religiöse Ereignisse.

Den Auswirkungen von Naturkatastrophen, sofern sie überhaupt detailliert wissenschaftlich untersucht wurden, ist bis vor wenigen Jahrzehnten leider wenig Beachtung geschenkt worden. So wurden oft Zeugnisse von Feuerbrünsten und Zerstörungen von Siedlungen und Städten einerseits als räuberische und kriegerische Überfälle, andererseits als göttliche Strafen gedeutet. Allerdings hinterlassen gerade grosse Erdbeben, Vulkanausbrüche und Tsunamis augenblicklich totale Verwüstung, Brände, soziales Chaos, Plünderungen und Anarchie. Häufig folgen Degradation und Bevölkerungsabnahme einer ganzen Region.

Ein Meteoriteneinschlag in der Vorzeit ?

Die rätselhaften Zerelia Zwillingseen (Thessalien, Zentralgriechenland) – mögliche Einschlagkrater

Zwei permanente Seelein mit 150 und 250 m Durchmesser und einer heutigen Tiefe von nur 6–8 m bis zu einem schlammigen Grund, liegen, getrennt durch einen Hügel mit einer neolithischen Siedlung, inmitten der Felder südwestlich der Stadt Almiros. Geologische Aufschlüsse, welche Auskunft über den Untergrund geben, liegen erst in mehreren Kilometern Entfernung vor. In Analogie mit diesen

Formationen besteht der Untergrund der Seelein aus alluvialen und mergelig-sandigen, neogenen Ablagerungen auf mesozoischen Kalken, Schiefnern, Phylliten, Radiolariten und ophiolithischen Mélange-Relikten. Letztere Gesteine bauen die ca. 10 km südlich liegenden, unter die Almiros Ebene abtauchenden Pelagonischen Decken des Orthris Gebirges auf.

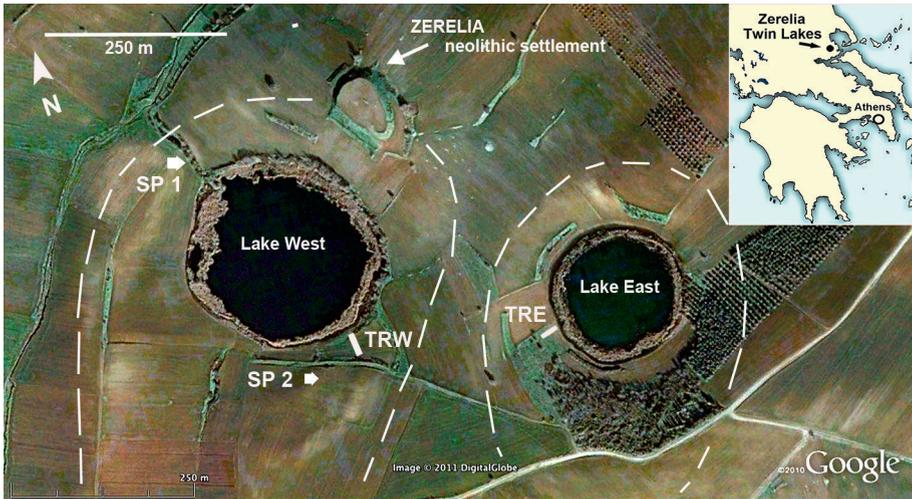


Abbildung 1: Weisse unterbrochene Linien markieren die Bereiche der polygenen Brekzien als möglichen Impakt-Auswurf. SP 1 und 2 sind Aufschlusslokalitäten in den flachen Wällen um die Seen; TRW und TRE sind die Lokalitäten der Baggerschlitze (Satellitenbild von Google Maps).



Abbildung 2: Der kreisrunde westliche ZERELIA Zwillingsee (ZLW, Abb. 1) mit einem heutigen Durchmesser von 250 m und einer Tiefe von 6–8 m bis zum schlammigen Grund. Der See liegt auf 130 m Meereshöhe. Im Hintergrund erhebt sich das Othrysgebirge.

Das Alter der Seen kann aufgrund der Morphologie der Umgebung als spätes Pliozän bis Holozän und einem Minimumalter von ca. 5000 Jahren v.Chr. abgeschätzt werden, letzteres aufgrund einer neolithischen Siedlung zwischen den Seen. Ein palynologisches Alter von 540 ± 60 Jahren AD wurde an der Basis einer zentralen, 10 m tiefen Bohrung festgestellt (REINDERS & BOTTEMA 1983). Mittels der Cäsium/Blei Datierung konnte die Sedimentationsrate der unverfestigten Sedimente auf ca. 0.5 cm/Jahr bestimmt werden (KELLER 2010, ETHZ).

Evidenz aus dem Untergrund der Seen

Detaillierte mineralogische, petrographische und chemische Untersuchungen des Gesteinsmaterials in den flachen Uferwällen sowie in zwei, bis 8 m tiefen ufernahen Baggerschlitzten ergaben folgende Resultate: In einer weitgehend mergelig-tonigen Matrix liegen unsortiert und unstratifiziert zahlreiche polymikte, lithische, karbonatische Brekzien und Klasten sowie Radiolarit-, Chert- und Quarzfragmente



mit Dimensionen von Millimetern- bis zu einigen Dezimetern. Typische mesozoische Kalkfragmente oder Gerölle, welche die Oberfläche der umliegenden Felder übersähen, fehlen hingegen völlig (DIETRICH & GARTZOS, 2009).

Im Mikrobereich weisen kleinste Quarzfragmente vereinzelt sub-planare bis planare Deformationsgefüge auf, welche durch schock-metamorphe Einwirkung entstanden sein könnten. Hinweise für eine mögliche Impakt-Aufschmelzung von Mergeln und Kalken mit nachfolgender Abschreckung liegen als typische «Feder-Karbonate» in den Karbonatklasten und als spheroidale Partikel mit mm-cm Durchmesser vor. Beide bestehen aus einer homogenen Calcitmatrix mit «Feder- und Spinifextexturen», welche entweder als Netzwerk- oder Fleckenaggregate («patch-



Abbildung 3: Baggerschlitz TRE am Südwestufer des östlichen Zwillingssee (ZLE) von 7 m Tiefe und 1 m Breite. Die Zahlen beziehen sich auf Meterangaben, die Löcher sind Probeentnahmestellen mit manuellem Kernbohrer im lehmigen, standfesten Boden mit unterschiedlichen Brekzienanteilen. Fotos: K. Kyriakopoulos 2013

work») vorliegen und zudem von feinsten Quarzfragmenten durchsetzt sind. Weitere Indizien einer hochtemperierten partiellen Aufschmelzung liefern unregelmässig ausgebuchtete «angeschmolzene» Fragmente von Quarz, Zirkon, Rutil und Ilmenit (reliktisch mit Skelett- und undeutlichen Granulatgefügen), für welche Schmelztemperaturen von 1400°–1800°C notwendig sind. Derartige Temperaturen werden weder in metamorphen noch in magmatische Prozessen erreicht.

Die modellierten gravimetrischen Anomalien beider Seen ergeben jeweils eine Pfannenstruktur, sie erreichen eine Tiefe von ca. 150 m und scheinen das Resultat des Schlammes der Seeböden, vermischt mit den unverfestigten, tonig-mergeligen und detritischen Sedimenten in den oberen Anteilen der «Kraterfüllung» zu sein.

Dagegen dürften die tieferen Anteile des Untergrundes eher ein «plastisches» Neogen und die darunterliegenden zerklüfteten Kalke des Mesozoikums repräsentieren, was die Undurchlässigkeit des Seeuntergrundes und das Fehlen eines ständigen Abflusses der Seen erklärt.

Mehrere Ursachen können für die Entstehung der rätselhaften Zwillingsseen in Frage kommen: Maare als Folge vulkanischer Tufferuptionen, hydrothermale oder CO₂-Gas/Schlamm-Explosionen; Dolinen-Einbrüche mit assoziierten Zementmergelschüsseln in verkarstetem Untergrund oder der Einschlag eines Meteoriten. Aufgrund der vorliegenden Daten favorisieren wir mehrheitlich die Meteoritenhypothese, obwohl bis heute keinerlei Bruchstücke eines Projektils gefunden wurden.

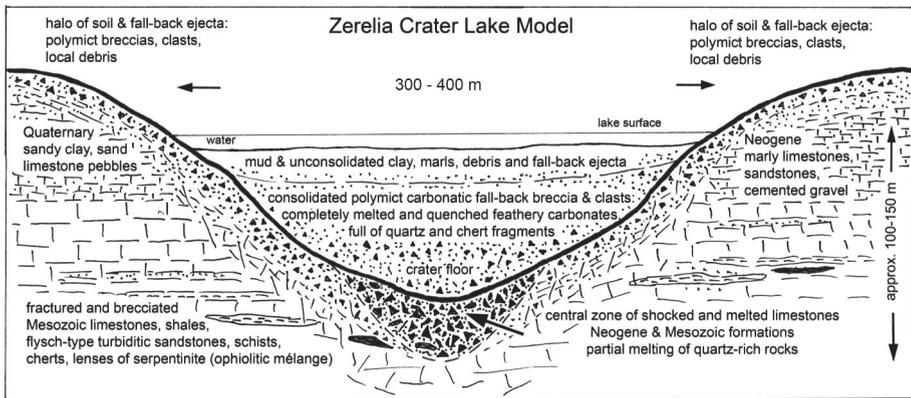


Abbildung 4: Hypothetisches Modell des westlichen Kratersees mit annähernden Dimensionen. Es wird angenommen, dass der Untergrund durch den Schockeffekt stark zerklüftet, brekziert und mit lehmiger Grundmasse zementiert ist. Im Zentrum könnten mögliche lithifizierte Karbonat-Impaktschmelzen angetroffen werden. Es wird vermutet, dass der Krater zur Hälfte seiner ursprünglichen Tiefe von sehr unterschiedlichen Brekzien, resultierend aus den Gesteinsvarietäten des Untergrundes (mesozoische und neogene Kalke und Mergel) aufgefüllt ist. Sehr unterschiedliche Mächtigkeit dürften die oberflächigen «Auswurfbrekzien» mit lehmiger Matrix in den flachen umgebenden Uferwällen haben (DIETRICH ET AL. 2013).

Die Morphologie und die Dimensionen der eng benachbarten Kraterseen sowie der Dichtekontrast lassen vermuten, dass ein 10 bis 30 m grosser Meteorit in zwei grössere Fragmente explodierte, bevor er die Oberfläche erreichte.

Neuinterpretation der Prometheus-Sage

Mit der naturwissenschaftlichen Interpretation eines Meteoriteneinschlags, der zur Entstehung der Zwillingskraterseen führte, bekommt die Prometheus Sage der griechischen Mythologie einen realistischen Hintergrund. Geht ein Meteorit dieser Grösse auf der Erde nieder und wird beim Aufschlag an der Oberfläche evaporisiert, werden unglaubliche Energien innert Sekundenfrist freigesetzt. War der funkensprühende Sonnenwagen des Helios in Wahrheit ein Meteorit?

Wie man sich ein solches Ereignis vorzustellen hat, konnte völlig unerwartet am 15. Februar 2013 beobachtet werden, als ein leuchtender Meteorit über dem südlichen Ural mit einer Geschwindigkeit von 18 km/sec in die Atmosphäre mit einem Aufprallwinkel von 20° eintrat. Als Feuerball von zahlreichen Videokameras gefilmt, erschien er über der Stadt Tscheljabinsk und zerbarst mit drei mächtigen Explosionen in ca. 70 bis 30 km Höhe über dem Boden. Der ersten stärksten Explosion war ein Blitz von ca. 5 Sekunden vorausgegangen. Die Schockwelle dieser Explosion erreichte Tscheljabinsk 2 Minuten und 57 Sekunden später und zerstörte alle Fenster an 3700 Gebäuden, was wiederum zu über 1500 registrierten Unfällen führte. Die Explosionsenergie während des Zerberstens entsprach etwa 100–1000 Kilotonnen TNT, was vergleichbar mit einer 20–30fachen Energie der Atombomben von Hiroshima und Nagasaki ist. Die «*National Aeronautics and Space Administration, NASA*» schätzte den Durchmesser des in die Atmosphäre eintretenden Meteoriten auf 20 m, mit einer Masse von etwa 10'000 Tonnen. In dem ca. 70 km südwestlich von Tscheljabinsk entfernten Streufeld (u.a. einem 6 m Loch im Boden des Chebarkul Sees) wurden über 100 Bruchstücke des Meteoriten bis zu einem Kilogramm von gewöhnlicher chondritischer Zusammensetzung gefunden.

(Zusammenfassende Einzelheiten in *Wikipedia.org 2013: Meteor von Tscheljabinsk*)

Griechenland und die Ägäis, Zonen höchster Geodynamik Europas

Erdbeben, Vulkanausbrüche und Tsunamis

Griechenland, die Ägäis und die westliche Türkei sind seit mindestens fünf Millionen Jahren Zonen höchster geodynamischer Aktivität in Europa. Ihre Ursachen liegen in plattentektonischen Vorgängen der Erdkruste und des oberen Erdmantels.

Auswirkungen an der Oberfläche sind krustale Hebungen und Senkungen, horizontale Verschiebungen und Meeresspiegelschwankungen, welche immer mit

Erdbeben und Überflutungen verbunden sind. Hinzu kommen Vulkanausbrüche, begleitet von Megaflutwellen (Tsunamis) und Klimabeeinflussung.

Zehntausend Jahre der prähistorischen und historischen Entwicklung im ostmediterranen Raum zeigen in eindrucksvollster Art und Weise die Auswirkungen von Naturkatastrophen, insbesondere die Folgen starker Erdbeben und des gewaltigen Vulkanausbruches von Santorin vor 3620 Jahren, zur Zeit der minoischen Kultur. Zu den (auch heute noch) von stärksten Erdbeben (Magnituden >7) betroffenen Regionen zählen:

- die Gebiete innerhalb des Gürtels der nord-anatolischen Bruchzonen, die durch Nordanatolien hindurchziehen, über Bosporus, Marmara See und Dardanellen in die Nordägäis einbiegen und schliesslich am Peliongebirge Ostgriechenlands enden;
- ein Erdbebengürtel, der sich von Rhodos über Kreta bis in den Peloponnes erstreckt und in den Ionischen Inseln endet;
- eine vom Golf von Patras nach Korinth Ost-West verlaufende Grabenbruchzone (GrZ, Abb. 5);
- sowie die ost-anatolische Bruchzone, welche von Zentralostanatolien in die Levante nach Süden verläuft.

Vulkanismus im südägäischen Inselbogen (Pliozän bis heute)

Das Gebiet der Ägäis stellt einen abgesunkenen Teil des Alpenin Orogens dar, welches sich von den Pyrenäen bis zum Himalaya erstreckt und heute die wohl höchste geodynamische Aktivität Europas aufweist. Die Lage der Erdbebenzentren (Hypozentren) definiert das Abtauchen von Resten ozeanischer Kruste (Subduktion und Benioff-Zone) des östlichen Mittelmeeres (Hellenische Mikroplatte als Teil der Eurasischen Platte) bis in maximale Tiefen von ca. 150 km unter die afrikanische Platte. Die interne Zone der Helleniden, mit eher geringerer Krustendicke von 25 bis 30 km, ist mit Ausnahme der Vulkane des ägäischen Inselbogen geodynamisch eher indifferent und seismisch ruhig, obwohl die Regionen der Vulkaninseln durch sehr hohen Wärmefluss gekennzeichnet sind.

Strukturkarte und Vulkaninseln im südägäischen Inselbogen (DIETRICH & HURNI, 2002; GEOWARN, 2003). Die vulkanischen Inseln der Südägäis, Aegina A, Methana M, Poros, Milos M, Santorini S, Yali, Nisyros N und Kos K formen einen klassischen kontinentalen Inselbogen mit einer Ausdehnung von ca. 650 km, welcher das magmatische Resultat aktiver Subduktion der afrikanischen Platte unter die kontinentale Mikroplatte der Aegäis darstellt.

Im oberen Pliozän (ca. vor viereinhalb Millionen Jahren) setzte im westlichen Sektor des Inselbogens (Suzaki und Aegina) vulkanische Tätigkeit als Resultat aktiver Subduktion mit einer Benioffzone zwischen 100 und 130 km Tiefe ein (FITIKAS ET AL. 1984). Innerhalb von vier Millionen Jahren entstanden in den zent-

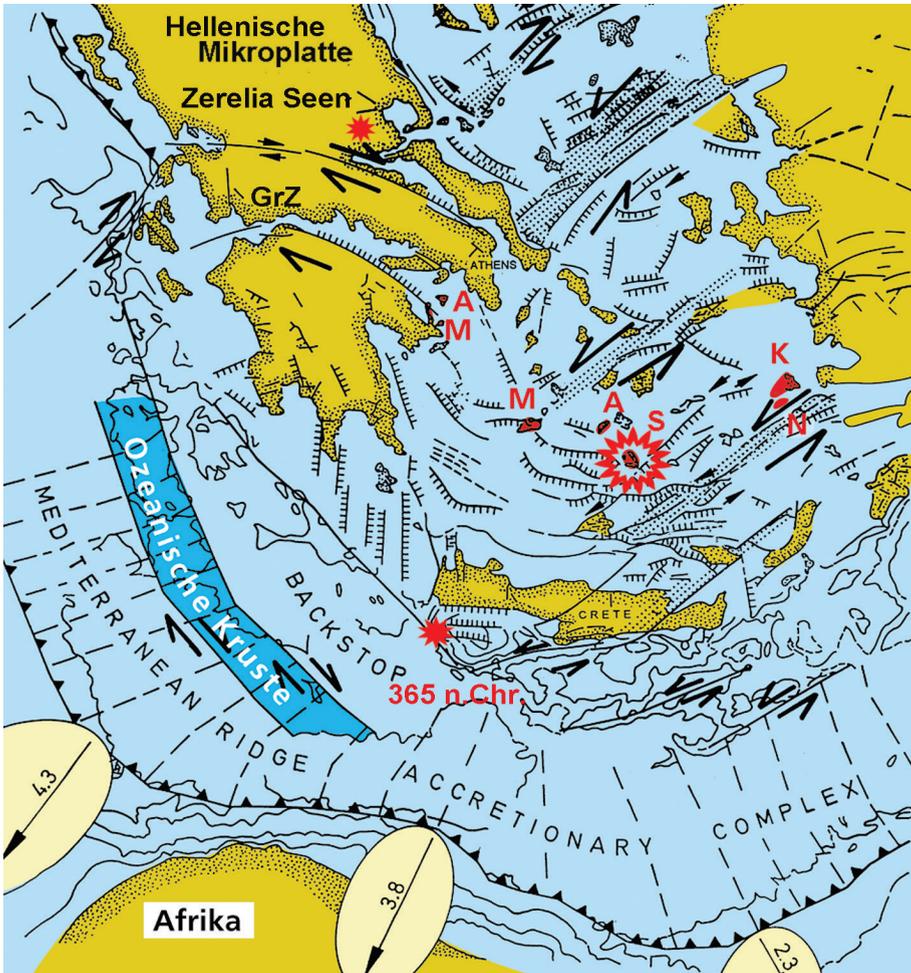


Abbildung 5: Tektonische Strukturkarte des östlichen Mittelmeers zwischen Griechenland und Nordafrika mit Lokalitäten der Zerelia Zwillingseen als potentielle Meteoritenkrater, die Vulkaninseln des südägäischen Inselbogens (A Aegina, M Methana und Milos, A Antiparos, K Kos und N Nisyros) mit Santorin (S) und der Lage des Megabebens 365 AD mit $M_w > 8$ südöstlich von Kreta. Überschiebungsgeschwindigkeiten der Hellenischen Mikroplatte über die Afrikanische Platte in Millimeter/Jahr; Transversalbrüche und Grabenzonen sind mit schwarzen Pfeilen (GrZ = Patra – Korinth Grabenzone), der Überschiebungskontakt des mediterranen Akkretionskomplex mit schwarzen Dreiecken. Karte nach einem Entwurf von J. Makris (GEOWARN, 2003).

ralen und östlichen Sektoren die Vulkaninseln: Methana, Poros, Milos, Santorin, in der Halbinsel Kephalos auf Kos, Yali (Türkei) und Nisyros. Die Volumina der individuellen Vulkanzentren variieren zwischen 10 und 40 km³. Alle Zentren scheinen an Schnittpunkte grösserer aktiver Bruchsysteme (z.B. NE-SW, E-W) gebunden

zu sein, also an krustale Schwächzonen und Dehnungserscheinungen. Die vulkanischen Eruptionsprodukte (Laven, Dome und Pyroklastika) gehören zur typischen kalk-alkalischen Differenzreihe aller Inselbögen an Kontinentalrändern, mit basaltischen bis rhyolithischen Gesteinen/Chemismen. Andesite und Dazite dominieren, während die basischen Vulkanite (Basalte und basaltische Andesite) weniger als 25% des gesamten Eruptivvolumens betragen.



Abbildung 6: Die Ringinsel Santorin heute. Die bis zu 600 m tiefe (380 m Wassertiefe und ca. 200 m Schlamm und Schutt) und 8 x 12 km Santorin-Caldera, mit zentralen Vulkaninseln Paleo und Nea Kameni. Während der kykladisch-minoischen Zeit von ca. 2000-1630 v.Chr. Kallisti (minoischer Name) wurde Santorin zum Kultur- und Handelszentrum des östlichen Mittelmeeres.

Einzig in Santorin wurden während der vergangenen 350'000 Jahren grosse Mengen basaltischer Magmen gefördert, was wahrscheinlich auf ein stärkeres Aufsteigen (upwelling) der Astenosphäre und damit auf grössere krustale Dehnungserscheinungen zurückzuführen ist. Die jüngste Eruption erfolgte 1950 im Nea Kameni Vulkan, im Zentrum der Santorin Caldera. Magmatische Aktivität in Verbindung mit einer «seismischen Krise» scheint während 2011/2012 erfolgt zu sein (LAGIOS ET AL. 2013).

Die minoischen Eruption des Santorin Vulkans in der Frühzeit vor ca. 3630 Jahren

Atlantis und der Untergang der minoisch-kykladischen Hochkultur

Eine weitere Legende, der Untergang von Atlantis, hat ihren Ursprung wohl in der «Minoischen» Vulkankatastrophe von Santorin (1620 v.Chr.):

«Im Zeitraum eines einzigen Tages und einer Nacht wurde das ganze Heer auf einen Schlag von der Erde verschlungen und die Insel Atlantis selbst stürzte ins Meer und verschwand.» Platon (428–347 v.Chr.), Dialoge «Kritias & Timaios»

Die Legende von den «Keftiu» (Atlantiden), dem Volk der «grünen Inseln», entstammt den Erzählungen ägyptischer Priester, die der griechische Staatsmann Solon (560 v.Chr.) von seiner Reise nach Sais, einer Tempelstadt im Nildelta, heimbrachte. Platon benutzte die Überlieferung des Unterganges der Atlantiden, als göttliche Bestrafung, als Gleichnis und Warnung an das dekadente Leben der Athener. Sie diente der moralischen Erbauung und sittlichen Vervollkommnung, aber keinesfalls einer historischen Wiedergabe.

Santorin (minoisch «Kallisti») als Kultur- und Handelszentrum

Am zentralen Südrand der Kykladen liegt die ringförmige Vulkaninsel Santorin. Die Hauptinsel Thera, die Nachbarinsel Therasia und das Inselchen Aspronisi bilden einen Ring um einen zirka fünf mal zehn Kilometer weiten und bis zu 400 m tiefen, vom Meer gefüllten Krater, welcher vor 3630 Jahren, während des gewaltigen «minoischen» Ausbruchs, gebildet wurde. Vor dieser Eruption hatte die Vulkaninsel ein anderes Erscheinungsbild. Sie war eine blühende, mit üppiger Vegetation bedeckte Ringinsel, die ebenfalls einen Calderakrater und einen zentralen Schildvulkan umschloss. Diese Situation trug ihr den Namen «Kallisti» die «Schönste» aller Kykladeninseln ein. Anders als heute war die Caldera damals allerdings nur durch eine Meerenge im Südwesten zugänglich und von sehr geringer Wassertiefe. Der Krater dürfte vielen Schiffen Schutz geboten haben, obwohl die Stürme auch in der Caldera ihre Wirkung entfalten konnten. Jährlich dürften unzählige Schiffe aus der gesamten Ägäis die Insel aufgesucht haben. Der Handel brachte ihr Wohlstand, Reichtum und Ansehen. Beste Zeugen davon sind die wundervollen Fresken in den Ausgrabungen der Stadt Akrotiri auf Thera, auf denen das Leben auf der Ringinsel während der Blütezeit der minoisch-kykladischen Kultur eindrücklich dargestellt wird. Nur in einem Zentrum mit grossem Handels- und Kulturaustausch konnte ein derartiges Kunstschaffen entstehen.

Anders als heute, wo der Krater von mehreren hundert Meter hohen Steilwänden umgeben ist, gab es am Rand der damaligen Ringinsel nur kleinere Klippen mit flachen Stränden. Der letzte Ausbruch lag rund 17'400 Jahre zurück, und der Calderakrater war weitgehend mit Schutt aufgefüllt. Der langen vulkanischen

Ruhephase ist es auch zuzuschreiben, dass sich auf der Insel eine vielseitige Vegetation entwickeln konnte und fruchtbarer Boden Landwirtschaft ermöglichte.

Der Beginn des Untergangs von Santorin

Diese eigenständige und von vollkommener Harmonie gekennzeichnete Kultur sollte schon bald zu Ende gehen, und es war die Natur selbst, die ihren Untergang herbeiführte. Erste Anzeichen der nahenden Vulkankatastrophe stellten sich allmählich ein. Im Zentrum der Ringinsel Kallisti traten übelriechende Gase aus, das Wasser wurde siedend heiss und Erdbeben erschütterten die Ringinsel. Da niemand, auch nicht die weitgereisten Seefahrer, Vulkanausbrüche kannten, müssen diese Erscheinungen für die Bewohner unerklärbar gewesen und als Zeichen erzürnter Gottheiten angesehen worden sein. Während der minoischen Epoche existierten aktive Vulkane ca. 1500 Kilometer weit entfernt im östlichen Teil Kleinasiens (Hassan Dag), auf Sizilien und in den Phlegräischen Feldern bei Neapel.

Während mehreren Monaten muss es auf Kallisti Gas- und Wasserexplosionen sowie zunehmend stärkere Erdbeben gegeben haben. Als die Lebensbedingungen untragbar wurden, müssen nahezu alle Bewohner die Insel verlassen haben, ein Exodus, der offenbar nicht überstürzt ablief, da weder wertvolle Gegenstände noch Mobiliar zurückgelassen wurden. Gras auf den Dächern der zerstörten Gebäude deutet darauf hin, dass mindestens eine Regenzeit zwischen der Evakuierung und dem Beginn der Vulkaneruption liegen muss.

Die vulkanischen Ausbruchphasen

Die minoische Vulkankatastrophe bahnte sich also über Monate bis Jahre an. Der eigentliche Ausbruch wird heute in vier Phasen unterteilt, während derer ein Magmavolumen von ca. 40 km³ eruptiert wurde (DRUITT ET AL., 1999). Diese entspricht der vierzigfachen Menge der Mt. St. Helens Eruption 1980. Die *erste Phase* begann offenbar recht abrupt. Im Zentrum der Caldera setzten wasserdampfreiche Eruptionen ein, darauf folgend wurden während einigen Stunden etwa 1 km³ Bims und Asche gefördert. Die Aschensäule erreichte bereits eine Höhe von 30–40 Kilometern. Der Himmel verdunkelte sich während Stunden, und eine mehrere Dezimeter mächtige Aschenschicht lagerte sich auf der Ringinsel ab. Wer noch auf der Insel war, erstickte nicht, sondern konnte sich auf Schiffe oder in Höhlen retten.

Nach einer Ruhepause von Tagen oder Wochen begann die *zweite, wesentlich stärkere Eruptionsphase*: Explosive, «phreato-magmatische» Eruptionen führten zu einer noch ausgedehnteren Aschensäule; Aschen-, Lapilli- und Bombenregen wechselten mit mächtigen Glutwolkenströmen ab, die sich über die Ringinsel ins Meer ergossen. Wie lange diese Phase dauerte, ist nicht bekannt. Starke Winde verfrachteten diese riesigen Aschenwolken weit über das östliche Mittelmeer; Aschen dieser Phase wurden in Kleinasien, Syrien, Israel und im Nildelta nachgewiesen.



Abbildung 7: Der Vulkanausbruch Santorins vor 3630 Jahren; Eruptionssäule mit radialen Asche-strömen. Insgesamt wurden 30–40 km³ Magmavolumen ausgeworfen. Fortpflanzung der Glutwolken und zahlreichen Riesenwellen (Tsunami) in alle Richtungen von Santorin ausgehend mit Geschwindigkeiten über 100 km/h und Wellenhöhen von 10–50 m beim Aufbränden an die Kykladeninseln und Nordküste Kretas. (Grafik: Dietrich, 2004).

Die *dritte Phase* ist durch zahlreiche Explosionen gekennzeichnet. Der Krater erreichte bereits eine ähnliche Grösse wie die heutige Caldera. Weit versprengte Bruchstücke des früheren Zentralvulkans zeugen von der Heftigkeit dieser Phase. Auch die vierte Phase ist durch pyroklastische Ströme, durchsetzt mit viel Fremd-



Abbildung 8: Tsunami-Ablagerungen mit unsortierten, Meter grossen Kalk- und Schieferblöcken in Hügeln und Klippen am Ost-Strand von Paläokastro (NE Kreta). Generell erheben sich die Klippen ca. 8 m über das heutige Meeres-Niveau und stellen Erosionsrelikte einer ehemaligen grösseren Ausdehnung dar. In ca. 1 km Entfernung, hinter den Klippen, beginnen die ausgegrabenen Fundamente der minoische Stadt Paläokastro.

material, Aschenwolken, die bis in die Stratosphäre reichten und Glutwolken in Bodennähe gekennzeichnet. Wahrscheinlich kam es bereits während der dritten und vierten Phase zu grösseren submarinen Hangrutschungen und damit zu Riesenwellen, Tsunamis genannt, wie sie auch beim Ausbruch des Krakatau im Jahre 1883 beobachtet wurden.

Calderaeinbruch und Tsunamis

Der grosse neugebildete Explosionskrater wurde nach dem Ausbruch mit Schutt und Schlamm aufgefüllt. Unklar ist, wann es zum Einbruch der Caldera kam. Auf Grund von jüngeren Beispielen kann angenommen werden, dass dies nach Tagen bis Monaten geschah, sicher jedoch nicht erst nach Jahren bis Jahrzehnten. Ein Bereich von 5 x 10 km sank, wahrscheinlich in mehreren Phasen, bis zu 800 m tief ein. In der Folge gab es in der näheren und weiteren Umgebung der Ringinsel grössere Schwankungen des Meeresspiegels. An den noch instabilen Calderawänden kam es zu Hangrutschungen und Felsstürzen, die Tsunamis auslösten. Über



Abbildung 9: Westliche Fortsetzung von Abb. 8, den Tsunami-Ablagerungen in den Klippen am Ost-Strand von Paläokastro. Die roten Pfeile deuten die Untergrenze der völlig unsortierten, chaotischen, multi-modalen, geröllreichen Tsunamiablagerungen an, welche kanal- und wannenartig die älteren alluvialen Küstenablagerungen der Paläokastro-Bucht überlagern.

die Höhe und Geschwindigkeit dieser Flutwellen sowie über ihr Zerstörungspotential wird immer noch kontrovers diskutiert. Sicher ist, dass mit diesen Wellen grosse Mengen an Bims und Schutt über weite Strecken verfrachtet wurden, fand man doch vom Wasser verfrachtete Bimse an der Westküste Zyperns, in Israel, an den nördlichen Küsten Kretas und im Nildelta. Bimsfunde in den Fundamenten der minoischen Siedlung Amnisos veranlassten den wohl berühmtesten griechischen Archäologen, Spiros Marinatos schon 1939 zur Annahme, die minoische Zivilisation sei durch die gewaltige Eruption Santorins untergegangen (MARINATOS, 1939). Heute ist diese Hypothese aus den Dreissiger Jahren nach wie vor aktuell. Auf Kreta wurden die Orte Mallia, Phaistos, die bedeutende Flottenbasis Kato Zakro und im Osten die grosse minoische Ansiedlung Palaikastro zerstört, sowie auf Rhodos die Küstenstadt Kyrbe.

Gerade die Ausgrabungen, geoarchäologischen und geologischen Untersuchungen von Paläokastro ergaben ein umfassendes Bild der Tsunami Zerstörung und erlaubten realistische Modellierungen der Wellen an ihrem Ursprung: Amplituden



Abbildung 10: Tsunami Ablagerungen in einer vorgelagerten Landzunge, ca. 100 m nordwestlich der Ablagerungen des Ost-Strandes (Abb. 8 und 9). Hier erscheinen multimodale Ablagerungen mit Keramikbruchstücken, Resten von Mauer- und Pflastersteinen, sowie Viehknochen, welche mittels ^{14}C Datierungen als minoischen Alters bestimmt wurden. Zwischen den Ablagerungen liegen vereinzelt kleinere Einschnitte, aufgefüllt mit fluviatilen Feinmaterial, welche den Durchfluss von Wasser dokumentieren (BRUINS ET AL. 2008).

von max +35m / –15 m und Wellenkronenlängen bis zu 15 km (BRUINS ET AL. 2008) sowie Ausbreitungsgeschwindigkeiten von 50 bis 100 km/h.

Die jüngsten Tsunamikatastrophen bestätigen nur allzu deutlich die Katastrophenausmasse der Vergangenheit. Tsunamis zerstören in Minutenschnelle, transportieren und hinterlassen Schutt, zerstörte Vegetation und fluviatiles Material. Sofern der Schutt nicht in natürlichen oder künstlichen Vertiefungen (Höhlen, Karren, Fundamenten, Kellerräumen etc.) zurückgehalten und abgelagert wird, beseitigen natürliche Prozesse in Jahren bis Jahrzehnten sämtliche Relikte und Zeugnisse der Katastrophen. Die Tsunamiwellen des Sumatra-Andamanen-Überschiebungsbeben mit der Magnitude 9.1 vom 26.12.2004 erreichten an der Nordküste Sumatras eine Höhe von ca. 30 m und hinterliessen an allen Küsten des Indischen Ozeans verheerende Verwüstungen mit ca. 230'000 Toten. Die Bilder der erschreckenden, alles vernichtenden Tsunamiwellen mit Brandungshöhen bis zu 38 m, ausgelöst durch das japanische 9.0 M_w Tōhoku-Erdbeben 2011 vom 11. März 2011, gingen rund um die Welt.

Zusammenbruch der Infrastruktur der kykladisch-minoischen Kultur

Die Flutwellenscharen, die während verschiedener Zyklen der minoischen Eruption Santorins ausgelöst wurden, können demnach als das zerstörerischste Element dieser Katastrophe angesehen werden. Im Mittelpunkt vieler Sagen und Überlieferungen tauchen denn auch mysteriöse Überflutungskatastrophen auf. So wird von zerstörerischen Wellen an der Küste Kretas und Rhodos, mit grossen Verwüstungen am Peloponnes, im Golf von Argolis, im Saronischen Golf und in Attika berichtet. Die Legende der Deukalionischen Flut (Deukalion, Stammvater der Hellenen, rettet sich aus der Flut, mit der Zeus die Menschen vernichten wollte) ist nur ein Beispiel.

Auch in Attika gibt es Überlieferungen, die auf eine gewaltige Überschwemmung hindeuten. So wird etwa von einem mythischen Kampf zwischen Athene und Poseidon um den Besitz Attikas berichtet; Athene schenkte dem Land einen Ölweig, Poseidon liess eine Quelle entspringen. Athenes Gabe fand grösseren Beifall, und Poseidon, so berichtet Apollodor, überschwemmte, äusserst ergrimmt, die Thriasische Ebene (KREUZER, 1812) und liess Attika in den Fluten der See versinken. Und noch bei einer zweiten Überlieferung geht es um eine Flutwelle, die den Saronischen Golf heimsuchte: Es handelt sich um jene Woge, die Poseidon aussandte, um Hippolytos zu ertränken.

Dem Ablauf der «minoischen» Eruption kommt grosse Bedeutung zu, will man den Zusammenbruch der minoisch-kykladischen Zivilisation verstehen (DIETRICH, 2004). Dramatisch war insbesondere, dass der Lebensnerv der Kultur, der Handel und der Schifffahrt, vollständig zerstört wurde. Denn die Schiffe, mit denen die Flüchtenden mit ihrer Habe und Schätzen in den Häfen der umliegenden Inseln Schutz gesucht hatten oder mit denen sie noch auf der Flucht waren, konnten den Riesenwellen nicht standhalten. Wahrscheinlich waren nahezu alle geschützten Buchten und Landungsplätze der südlichen Ägäis mit Schiffwracks übersät und alle Siedlungen auf Meereshöhe zerstört. Die gesamte kykladisch-minoische Infrastruktur wurde vernichtet.

Das Mega-Beben Kretas und dessen Tsunami 365 n.Chr.

Historische Überlieferungen

In unmittelbarer Nähe der südöstlichen Küste Kretas ereignete sich am 21. Juli 365 ein Überschiebungsbeben mit einer Stärke über 8 M_w in 40-45 km Tiefe, während einer Phase von ca. achtzig Jahren verstärkter seismischer Aktivität. Das Resultat waren, ohne genauere Angaben, Zerstörungen in vielen Siedlungen Kretas (gemäss einem Schreiben des Bischofs von Alexandria) sowie eine massive Anhebung des Südwestteiles der Insel bis zu 10 m (STIROS, 2001; SHAW ET AL. 2008). Allerdings waren die Ausmasse der Zerstörung durch Tsunamiwellen entlang der nordafrikanischen Küste von Apollonia (Libyen) bis Alexandria, in der Südküste Zyperns,

im Peloponnes (Argolis) und im Ionischen Meer und Adria bis nach Dubrovnik gravierender.

So brandeten die Riesenwellen gegen die Stadtmauern Alexandrias und begruben das königliche Viertel (Portus Magnus) und die gesamte Stadt unter sich, Schiffe wurden kilometerweit ins Landesinnere gespült und tausende Bewohner ertranken, da es keine Fluchthügel gab. Das Nildelta wurde flächenhaft verwüstet und alles Agrikulturland zerstört (DIETRICH & SHAHIEN, 2009).

Der römische Geschichtsschreiber Ammianus Marcellinus lieferte als Augenzeuge folgenden Bericht (*Römische Geschichte*, Buch 26,10,15-19):

Kurz nach Tagesanbruch, eingeläutet von einer Folge heftiger Blitze, wurde die Grundfestigkeit der gesamten Erde erschüttert und schauederte, das Meer wurde weggetrieben, seine Wellen rollten zurück und verschwanden, sodass der Abgrund der Tiefen aufgedeckt wurde und verschiedene Arten von Seekreaturen im Schlamm stecken blieben; die große Einöde dieser Täler und Berge, die diese Bildung zwischen den tiefen Wasserstrudeln zurückgelassen hat, wie es auf uns gekommen ist, schauten in diesem Moment hoch zu den Sonnenstrahlen. Viele Schiffe strandeten wie auf trockenem Land und Menschen wanderten über die erbärmlichen Überbleibsel des Wassers um Fisch und dergleichen mit ihren bloßen Händen zu sammeln. Dann kehrte die tosende See wie beleidigt um und strich über die vielen Untiefen gewaltsam auf Inseln und Ausläufer des Festlandes und zerquetschte zahllose Gebäude in Städten oder wo auch immer sie anzutreffen waren. In diesem wütenden Kampf der Elemente wurde das Gesicht der Erde neu geformt, um wundersame Aussichten zu offenbaren. Als die Wassermassen zurückkehrten, dann als man sie am wenigsten erwartete, starben viele Tausende durch Ertrinken und mit den Wellen in die Höhe geschaukelt sah man, als sich der Ärger der See allmählich legte, einige Schiffe sinken und die Körper von Leuten, die in den Schiffswracks getötet wurden, lagen da, mit dem Gesicht nach oben oder unten. Andere riesige Schiffe strandeten aufgrund der irrsinnigen Kraft auf den Dächern von Häusern, wie in Alexandria geschehen, und andere wurden von der Küste fast zwei Meilen weitergespült, wie das Schiff aus Lakonien in der Nähe der Stadt Methone, das ich sah als ich vorbeizog, auseinanderklaffend durch den schleichenden Zerfall.

Der Feuerteufel und Waldbrände der Neuzeit

Einflüsse des Menschen auf das Klima

Seit Beginn der siebziger Jahre werden Griechenland wie auch alle europäischen mediterranen Länder jährlich in den Sommermonaten durch verheerende Waldbrände heimgesucht. Die Zahlen der Waldbrände haben sich seit dieser Zeit verdrei- bis verfünffacht. Die schwersten Waldbrände Griechenlands ereigneten sich Ende August 2007, bei Höchsttemperaturen um 40 °C. Sturmartige Winde ent-

fachten die Brände nahezu gleichzeitig in mehreren Regionen, in Attika im Norden und Osten Athens, auf dem Peloponnes und der Insel Euböa. Am 24. August waren es mehr als 190 Brände. Auch in den folgenden Jahren, insbesondere 2010 und 2011, litt das Land unter weiteren chaotischen Waldbränden, welche lediglich eingedämmt, aber nie gelöscht werden konnten. Neben zahlreichen Opfern geht der jährliche wirtschaftliche Verlust in die Milliarden Euro. Viele dieser Brände dürften ihren Ursprung in fahrlässiger oder auch krimineller Brandstiftung zugunsten von Bodenspekulationen haben. Der griechische Staat hat scharfe Gesetze erlassen, um vor allem Spekulationen zu verhindern aber bis zum heutigen Tag nur in einzelnen Fällen durchgesetzt.



Abbildung 11: Waldbrände auf dem Peloponnes, Athen und Euböa. NASA image 25. August 2007 (Wikipedia)

Die Ursachen der Waldbrände weltweit sind sehr komplexer Natur. Sicher liegen die Hauptfaktoren in der Zunahme von Temperatur (Brohan et al., 2006) und der Abnahme von Niederschlägen, die zu grösserer Trockenheit mit einem gehäuften Auftreten von Hitzewellen und Dürren führen. Hauptgrund ist der kontinuierliche anthropogene Eintrag an CO₂ in die Atmosphäre, welcher vor allem auf den extremen Verbrauch von fossiler Energie durch die Industrieländer zurückzuführen ist; weltweit mit den Extremverursachern USA und China. Rodungen von Tropenwäldern mit kommerziellem Ziel haben bereits in zahlreichen äquatorialen Regionen Mittel- und Südamerikas, Afrikas und Indonesiens zu Sauerstoffverarmung der Atmosphäre und Dürren geführt.

Neuere Klimamodelle rechnen mit einer starken Zunahme der Waldbrände in den kommenden Jahrzehnten durch stetigen Klimawandel und mit einer Verlängerung der Sommersaison mit Waldbrandgefahr. Dies dürfte vor allem auf die grossen Waldgebiete der USA, Brasiliens, Südeuropas, Mittelasiens und Südafrikas zutreffen.

2007 wurde durch den «*Inter-governmental Panel on Climate Change*» statuiert: «*Die klimatische Erwärmung ist eindeutig durch Daten der globalen Luft- und Meerestemperaturen belegt, weltweit ausgedehntem Abschmelzen der Gletscher und langsamen, aber kontinuierlichen Anstieg der Meeresspiegel.*»

Aber auch anthropogene Gründe sind für die Zunahme von Waldbränden, Wildfeuern und Buschbränden seit Jahrzehnten in grossem Masse verantwortlich: Auf allen Kontinenten häufen sich ökologische Wechsel, vor allem die stetige Landflucht der jüngeren Generationen, welche zur massiven Zunahme der Millionenstädte und Wohngebietsagglomerationen führt und die von grossräumigen Rodungen, Vegetationsfeuer und Rauch begleitet wird (GOLDAMMER, 2012). Meist treten vermehrt fehlende Infrastrukturen der Gemeinden und Regionen auf. Es kommt zur fehlenden Kultivierung und Schutz der Wälder. Als Folgen stellen sich eine hohe Waldbelastung durch Brennstoffe aus Verkehrsmitteln ein und die Zunahme menschlicher Nachlässigkeit im Umgang mit Feuer.

Referenzen

- BAUDY, G. J., 1992: Die Wiederkehr des Typhon. Katastrophen-Topoi in nachjulianischer Rhetorik und Annalistik: zu literarischen Reflexen des 21 Juli 365 n.C.«, JAC 35, 47–82
- BROHAN, P., J. J. KENNEDY, I. HARRIS, S. F. B. TETT, AND P. D. JONES, 2006: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850, J. Geophys. Res., 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548
- BRUINS, H. J., MACGILLIVRAY, J. A., SYNOLAKIS, C., BENJAMINI, CH., KELLER, J., KISCH, H. J., KLÜGEL, A. & VAN DER PUCHT, J., 2008: Geoarcheological tsunami deposits at Palaikastro (Crete) and the Late Minoan IA eruption of Santorini. Journal of Archeological Sciences (JAS) 35, 191–212
- DIETRICH, V. J., 2004.: Die Minoische Katastrophe, ein Vulkan verändert die Welt. Neujahrsblatt Naturf. Ges. Zürich 207., 149. Jahrg., 93 S.

- DIETRICH, V.J. & GARTZOS, E., 2009: Twin meteorite impact craters in Thessaly Central Greece of Holocene age. *Proceedings of the 7th Swiss Geoscience Meeting, Neuchâtel*, November 2009.
- DIETRICH, V. & HURNI, L., 2002: Frühwarn-Informationen-System für Vulkane. *Spektrum der Wissenschaft*, März 2002, 26–28.
- DIETRICH, V. J., LAGIOS, E., REUSSER, E., SAKKAS, V., GARTZOS, E. AND KYRIAKOPOULOS, K.: (2013, online, under discussion) The enigmatic Zerelia twin-lakes (Thessaly, Central Greece): two potential meteorite impact Craters.
- DIETRICH, V.J. & SHAHIEN, M., 2009: Report of the reconnaissance trip to Egypt November 23–30, 2008 within the 2008 Project: The Impact of the Minoan Eruption in Egypt. Foundation «Vulkaninstitut Immanuel Friedlaender», Zurich, Switzerland. *Solid Earth Discuss.*, 5, 1511–1573, 2013. www.solid-earth-discuss.net/5/1511/2013/
- DRUITT, T.H., EDWARDS, L., MELLORS, R.A., PYLE, D.M., SPARKS, R.S.J., LANPHERE, M., DAVIES, M., BARRIERO, B., 1999: Santorini Volcano. *Geol. Soc. Mem.* 19, 165.
- FRIEDRICH, W.L., KROMER, B., FRIEDRICH, M., HEINEMEIER, J., PFEIFFER, T. & TALAMO, S., 2006: Santorini Eruption Radiocarbon Dated to 1627–1600 B.C. *Science* 312. no. 5773, p. 548.
- FYTIKAS, M., INNOCENTI, F., MANETTI, P., MAZUOLI, R., PECCERILLO, A., VILLARI, L., 1984: Tertiary to Quaternary evolution of the volcanism in the Aegean Region. In: Dixon J.E., Robertson A.H.F. (eds), *The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean*. *Geol. Soc. London, Spec. Pub.* 17, 687–699.
- GEOWARN, 2003: Geowarn – Geospatial Warning Systems – Nisyros Volcano, Greece. www.geowarn.ethz.ch
- GOLDAMMER, J.G., 2012: Wildland fires in the Eastern Mediterranean and the Near East from the perspective of the United Nations international strategy for disaster reduction. *Climate change & forest fires in the Mediterranean basin: management & risk reduction*; January 26–26, 2012 NIR ETZION, Israel. www.sviva.gov.il/InfoServices/.../p0625.pdf
- LAGIOS, E., SAKKAS, V., NOVALI, F., BELLOTTI, F., FERRETTI, A., VLACHOU, K., & V. DIETRICH, V., 2013: SqueeSAR™ and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992–2012): Tectonic implications, *Tectonophysics* (2013). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195113001868>
- KELLER, M., 2010: Die Sedimente der Zwillings-Impaktkraterseen in Thessalien, Griechenland. *Semesterarbeit FS 2010, Dept. Environmental Sciences, ETH Zurich, Switzerland*, 53S.
- KREUZER, F., 1812: *Symbolik und Mythologie der alten Völker, besonders der Griechen*. Vierter Band, S. 355 ff. Leipzig und Darmstadt bei Heyer und Leske.
- MARINATOS, S., 1939: The volcanic destruction of Minoan Crete. *Antiquity* 13, 426p.
- REINDERS, R. & BOTTEMA, S., 1983: Investigations at Halos and Zerelia, preliminary report. *Bulletin Antieke Beschaving*, 58, 91–100.
- SHAW, B., AMBRASEYS, N. N., ENGLAND, P. C., FLOYD, M. A., GORMAN, G. J., HIGHAM, T. F. G., JACKSON, J. A., NOCQUET, J.-M., PAIN C. C. & PIGGOTT, M. D., 2008: Eastern Mediterranean tectonics and tsunami hazard inferred from the AD 365 earthquake. *Nature Geoscience* 1, 268–276. www.nature.com/ngeo/journal/v1/n4/abs/ngeo151.html
- STIROS, S.C., 2001: The AD 365 Crete earthquake and possible seismic clustering during the fourth to sixth centuries AD in the Eastern Mediterranean: a review of historical and archaeological data. *Journal of Structural Geology* 23, 545–562.