

Kosmische Kollision in der Frühgeschichte Der Chiemgau-Impakt: Die Erforschung eines bayerischen Meteoritenkrater-Streifelfelds

MICHAEL RAPPENGLÜCK,¹ BARBARA RAPPENGLÜCK,² KORD ERNSTSON³

Zusammenfassung – „Chiemgau-Impakt“ bezeichnet ein Ereignis, das sich in der Bronze-/Eisenzeit mit der Schaffung eines großen Meteoritenkraterstreifelfeldes durch den Einschlag eines Kometen/Asteroiden in Südostbayern abgespielt hat. Die Forschung ist von Anfang an interdisziplinär angelegt und umfasst u. a. Geologie, Geophysik, Limnologie, Archäologie, Mineralogie, Speläologie, Astronomie und historische Wissenschaften. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass sich im Gebiet zwischen Altötting, dem Chiemsee und dem Alpenrand eine große Katastrophe abgespielt haben muss. Funde von exotischem Material, das teilweise nur in Meteoriten vorkommt, durch höchste Drücke und Temperaturen und Einwirkung von Säure extrem beanspruchte und veränderte Gesteine, verschiedenste ganz ungewöhnliche Kohlenstoff-Modifikationen, Nanodiamanten, geophysikalische Anomalien, enorme, weit verbreitete Bodendeformationen und viele andere Auffälligkeiten können durch die Hypothese eines nacheiszeitlichen Impakts stimmig erklärt werden. Sämtliche in der Forschung geforderten Impaktkriterien konnten nachgewiesen werden. Der Einschlag verbunden mit einem großen Air Blast hat erhebliche regionale und wohl auch überregionale Wirkungen

-
- 1 Michael A. Rappenglück, M.A. in Philosophie, Logik, Wissenschaftstheorie, Christliche Philosophie und Theologische Propädeutik (LMU, München); Dr.rer.nat. Geschichte der Naturwissenschaften, Astronomie (LMU, München); Präsident der European Society for Astronomy in Culture (SEAC) von 2011–2017, (Senior) Vice President SEAC (ab 2017); 1. Vorsitzender der Gesellschaft für Archäoastronomie, Deutschland seit 2011; seit Beginn (2004) Mitglied im wissenschaftlichen Team des Chiemgau Impact Research Teams (CIRT) und seit 2006 zweiter Vorsitzender des Vereins CIRT; Mitglied der Astronomischen Gesellschaft, Deutschland; Leiter der Volkssternwarten der VHS Gilching und VHS Stadt Fürstenfeldbruck; Geschäftsführer der VHS Gilching; Mitglied in der Redaktionsleitung des Journal of Skyscape und des Journals Science Culture; Peer Reviewer bei professionellen wissenschaftlichen Journals; Mitwirkung an zahlreichen wissenschaftlichen Filmen (national / international).
 - 2 Barbara Rappenglück, M. A. ist Historikerin mit einem abgeschlossenen Zusatzstudium Erwachsenenpädagogik. Ein Fokus ihrer wissenschaftlichen Publikationen liegt auf der Interpretation von Mythen und Symbolen. Sie ist Mitglied der „European Society for Astronomy in Culture (SEAC)“ und der „Gesellschaft für wissenschaftliche Symbolforschung“, deren Schriftführerin sie von 2002–2009 war. Seit 2004 gehört sie dem Chiemgau Impact Research Team an.
 - 3 Kord Ernstson ist Geologe (Dr. rer. nat habil.) und Geophysiker (Dr. rer. nat). Neben seiner beratenden freiberuflichen Tätigkeit und als Autor von Fachliteratur besitzt er eine Professur an der Universität Würzburg. Er forscht seit rund 40 Jahren über meteoritische Impaktstrukturen und die Prozesse ihrer Entstehung, was sich auch in der Bereitstellung von weitgehend allgemeinverständlichen Internetseiten zum Thema jeweils in Englisch, Deutsch und Spanisch niederschlägt.

hervorgehoben. Menschen nicht nur aus der Region des Chiemgaus waren Augenzeugen des faszinierenden, schockierenden und verstörenden Ereignisses. Möglicherweise wurden recht genaue Beschreibungen des Ablaufs und der regionalen Auswirkungen sogar im antiken griechischen Mythos des jugendlichen Sonnenwagenfahrers Phaeton geschildert. Der Beitrag erläutert den heutigen (2017) Kenntnisstand und geht kurz auch auf die Forschungsgeschichte ein.

Schlüsselbegriffe: Holozän – Impakt – Krater – Meteorit – Archäologie

Cosmic collision in prehistory

The Chiemgau Impact: research in a Bavarian meteorite crater strewn field

Abstract – “Chiemgau Impact” is an event which took place in the Bronze Age / Iron Age with the creation of a large meteorite strewn field by the impact of a comet / asteroid in southeast Bavaria. The research is interdisciplinary from the outset. It covers, among other things, geology, geophysics, limnology, archaeology, mineralogy, speleology, astronomy, and historical sciences. The research results show that a major disaster must have taken place in the area between Altötting, the Lake Chiemsee, and the Alps. Finds of exotic material, found only in meteorites, extremely stressed and altered rocks, caused by extreme pressures, high temperatures and the action of acid, strange carbon spherules, glass-like carbon, nanodiamonds, magnetic anomalies, soil compaction, sinkholes, and many other abnormalities can be explained by the hypothesis of a post-ice impact. All the impact criteria required according to scientific standards were demonstrated. The impact associated with a large air blast may have produced considerable regional and probably transregional effects. People not only from the Chiemgau region were witnesses of the fascinating, shocking and disturbing event. Perhaps quite accurate descriptions of the event and the regional effects were even described in the ancient Greek myth of the young racer Phaeton, driving the solar chariot. The paper presents the current (2017) state of knowledge and briefly also the research history.

Key words: Holocene – crater – impact – meteorite – archaeology

Einführung

Das Kraterstreufeld des „Chiemgau-Impakts“ zeugt von einem großen Meteoriteneinschlag (engl. *impact*), der sich in prähistorischer Zeit im südostbayerischen Voralpenland ereignete (Ernstson, 2010; Ernstson, 2015; Ernstson et al., 2010). Das Areal erstreckt sich etwa ellipsenförmig über eine Fläche von rund 60 x 30 km (c. 1800 km² von 47.8° bis 48.4° N und von 12.3° bis 13.0° O) zwischen Altötting, dem Chiemsee und den Alpen.

Über 80 Krater mit Durchmessern zwischen 3 m und mehreren 100 m (Ernstson et al., 2010: 74, Fig. 3, 75, Fig. 4) wurden durch Geländebegehungen, das Studium von Luftbildern und alten Karten sowie das Digitale Geländemodell (LIDAR) ermittelt, vermessen, kartiert und fortlaufend unterschiedlich intensiv mineralogischen und geophysikalischen Untersuchungen unterzogen. Neben den eigentlichen Kratern werden immer mehr Begleiterscheinungen

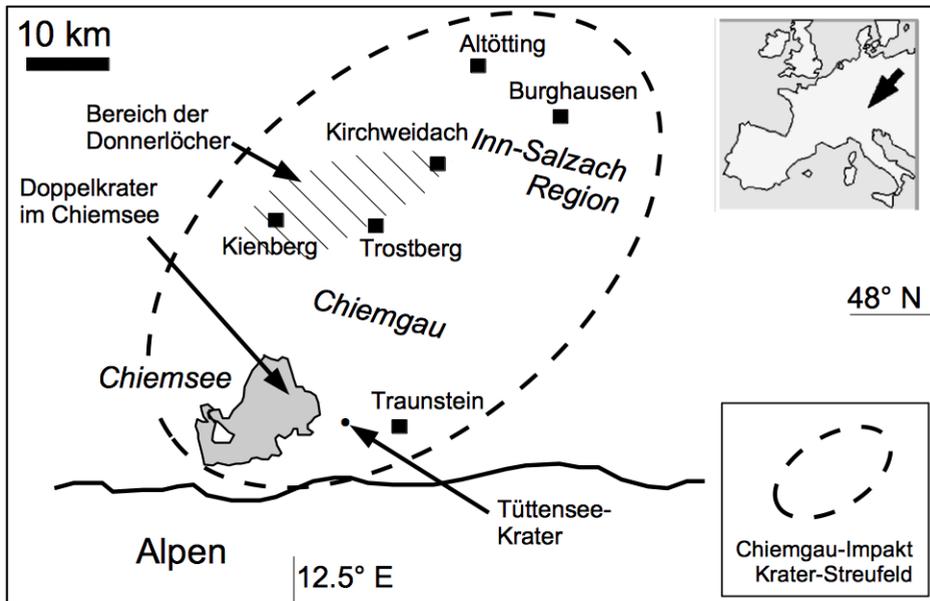


Abb. 1: Lageplan für die Region des Chiemgau-Impaktes.

des Einschlags entdeckt und erforscht, so z. B. magnetische Anomalien, Säureeinwirkungen, exotische Mineralien und Nanodiamanten, heftig deformierte Gesteine und vieles mehr. Der kosmische Körper, der die Katastrophe im Chiemgau anrichtete, dürfte ein ziemlich poröses, aus verschiedenen Komponenten bestehendes Objekt gewesen sein, das in der Atmosphäre auseinanderbrach.

Die Erforschung des Einschlags wurde durch eine Gruppe von Heimatforschern angestoßen, die ab dem Jahr 2000 in offiziellem Auftrag und mit entsprechender Genehmigung in der Region nach archäologischen Relikten suchten, und dabei auch auf eigenartige metallische Stücke und kraterähnliche Strukturen stießen. Sie stellten sich schließlich die Frage, ob sie die Spuren eines Meteoriteneinschlags gefunden hatten. Es folgte eine wechselvolle Odyssee auf der Suche nach Experten, die die Beobachtungen der Heimatforscher wissenschaftlich bewerten und einordnen könnten (Fehr et al., 2005: 187). Im Jahr 2004 schloss sich dann das Chiemgau Impact Research Team (CIRT⁴) zusammen, in dem neben den Heimatforschern Wissenschaftler verschiedener Disziplinen vertreten sind (u. a. Geologie, Geophysik, Astronomie,

4 Siehe <http://www.chiemgau-impakt.de/cirt/>

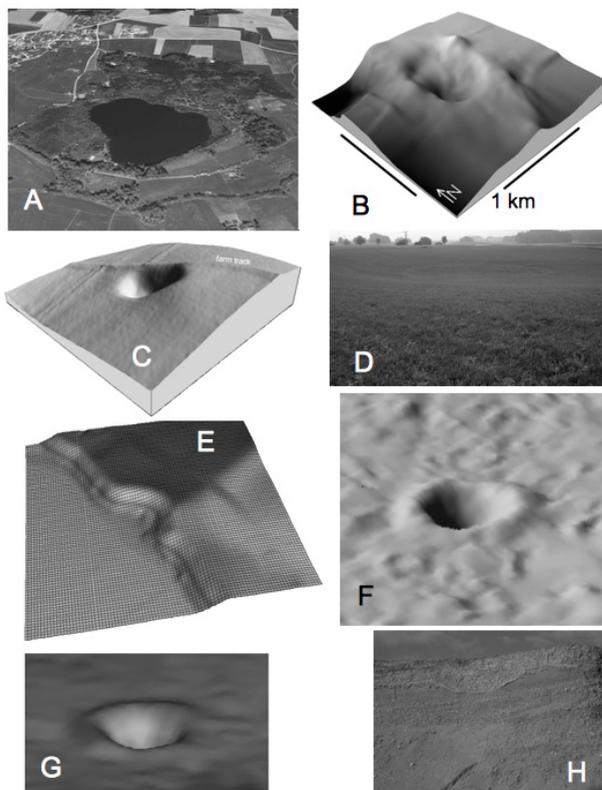


Abb. 2: Krater unterschiedlicher Größe in der Impact-Streuellipse. Der Kraterdurchmesser (für die Wallkrone) ist jeweils in Metern angegeben. A: Tüttensee (600), B: Doppelkrater im Chiemsee (800 x 400), C: Purkering (75), D: Bergham (150), E: Halbkrater in der Inntal-Böschung (55), F: Einsiedeleiche (15), G: Schatzgrube (13), H: Kiesgrube Emmerting (4).

Geschichtswissenschaft). Seitdem kooperiert CIRT mit zahlreichen in- und ausländischen Experten und Institutionen⁵, die das Spektrum der eingebundenen Fachdisziplinen und methodischen Ansätze weiter bereichern. Zum Einsatz kommt eine breite Palette an Untersuchungs- und Analyseverfahren: Georadar, Geoelektrik, Elektromagnetik (Impuls-EM, Frequenz-EM), Schweremessungen (Gravimetrie), Seismik, Echolotungen, Elektronenmikroskopie (REM, TEM) bis hin zur Heliumionen-Mikroskopie, Röntgendiffraktometrie, Raman-Spektroskopie, C14- und OSL-Datierungen, Kurzzeitmesstechnik mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, LIDAR u. a. m. Die im Folgenden erläuterten Erkenntnisse über den Chiemgau-Impakt beruhen auf den durch diese u. a. wissenschaftlichen Verfahren erzielten Resultaten. Sie sind in wissenschaftlichen Aufsätzen und Beiträgen zu internationalen Fachkongressen veröffentlicht.⁶

5 Carl Zeiss Microscopy, Oberkochen; Oxford Instruments, Wiesbaden; Diamant-Labor Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar (Russland); University of the Aegean, Laboratory of Archaeometry (Griechenland); Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics, Karls-Universität, Prag (Tschechien); Institut für Gesteinsstrukturen und Gesteinsmechanik der Akademie der Wissenschaften, Prag (Tschechien); Werner Mehl (Fa. Kurzzeitmesstechnik Werner Mehl, Diebach), u. a.

6 Siehe Literaturverzeichnis und <http://www.chiemgau-impakt.de/publikationen/>

Das Krater-Streifeld: Topographie und Geologie

Der topographische und geologische Rahmen für den Chiemgau-Impakt ist das eiszeitlich geprägte Alpenvorland. Abgesehen vom nördlichsten Bereich des Streufeldes, wo tertiäre Schotter, Sande und Mergel in dem hügeligen Gelände anstehen, ist das Einschlaggebiet vorwiegend aus pleistozänen Moränesedimenten und Schottern aufgebaut. Die Komponenten repräsentieren alpines Material in Form von Sedimentgesteinen, Magmatiten sowie Metamorphiten. Gelegentlich beobachtet man größere Blöcke zementierter Konglomerate (Nagelfluh). Örtlich können holozäne Schotter sowie Löß und Lößlehm zu den obersten Schichten im Einschlaggebiet beitragen. Die Gesteinsvielfalt im Zielgebiet trägt zu einer Vielfalt von Impakterscheinungen in den betroffenen Gesteinen bei. Das Kraterstreifeld wird von einer gedachten Linie, die den weitesten Vorstoß des Gletschereises der letzten (Würm-) Vereisung vor ganz grob 10.000 Jahren markiert, in zwei nahezu gleich große Bereiche aufgeteilt (Ernstson, 2010: 72 Fig. 7). Krater gibt es im südlich gelegenen Gebiet der letzten Vereisung, aber auch im selben Maße in den nördlichen großen Schotterebenen und in den dortigen Arealen der älteren Vereisung. Bei einem entsprechend großen Entstehungsalter dürften die nördlichen Krater aber dann nicht mehr die heutige frische Erhaltung zeigen, die ein ganz junges Alter belegt. Das ist ein wichtiger Punkt in der Diskussion um einen immer wieder behaupteten Eiszeiturprung („Toteislöcher“; Darga & Wierer, 2009: 174–185) der Krater.

Angesichts dieser fortdauernden Kontroverse erscheint es ratsam, dem Leser kurz vorzustellen, aufgrund welcher Kriterien die Forschung eine Geländehohlform als „Toteisloch“ bzw. als „Meteoritenkrater“ einordnet.

Kriterien

a) Toteisloch

Für Toteislöcher gibt es keine Kriterien, sondern nur ein Erklärungsmodell: Bei Stillstand und Rückzug von Gletschern können sich Eiskörper ablösen und – mit Gletscherschutt zugedeckt und gegen Wärme und Sonneneinstrahlung abgeschirmt – über lange Zeiträume im Untergrund erhalten bleiben. Beim endgültigen Zusammenschmelzen sackt der Gletscherschutt nach, und es bilden sich Wannen – die Toteislöcher, in denen sich unter Umständen Seen bilden können. Dass es sich bei einer Geländehohlform um ein Toteisloch handle, wird aus der allgemeinen geomorphologischen Prägung der Landschaft durch Eiszeitrelikte wie z. B. Moränen abgeleitet, ohne unmittelbar aus sich heraus belegt werden zu können.

b) Meteoritenkrater

Meteoritenimpakte sind durch die Gleichzeitigkeit von ungeheurer Geschwindigkeit (11,2-72 km/s) und ungeheurem Druck (von 5–10 bis zu 100 Gigapascal [GPa]) mit extremen Temperaturen (bis zu mehreren 1000 °C) (= Schock) geprägt. Die besondere Impaktphysik und die enormen Kräfte, die bei einem Impakt wirksam werden, hinterlassen an den Gesteinen vielfältige Spuren, die häufig bei nur mit ‚traditioneller‘ Geologie befassten Geologen zu Verwirrung führen oder erst gar nicht erkannt werden, dem Impaktexperten aber z. T. eindeutige Belege für das Geschehen liefern. In der Forschung wurden daher als Basis für das Vorhandensein eines Meteoritenkraters morphologische, geologische, geophysikalische, mineralogisch-petrographische und geochemische Kriterien festgelegt (z. B. French & Koeberl, 2010). Einige davon gelten als gute Anhaltspunkte für einen Impakt, andere sind zwingende Nachweise. In die erste Kategorie gehören: Morphologie, geophysikalische Anomalien, besondere exotische geologische Horizonte, Ähnlichkeit mit magmatischen Gesteinen, spezielle Deformationen, Brekzien, Schmelzgesteine und natürliche Gläser, Sphäruliten, akkretionäre Lapilli. Zu den zwingenden Impakt-Kriterien zählen Schockeffekte (s. u.), Shatter Cones (kegelförmige Brüche mit typischen Bruchmarkierungen, die von Schockwellen erzeugt werden), Projektilreste (Bruchstücke von Meteoriten) und die Beobachtung (Augenzeugen, historische Überlieferung). Von den Kriterien dieser zweiten Kategorie gilt jedes für sich allein als Bestätigung für einen Impakt.

Die Kenntnis der Kriterien ermöglicht, die Bedeutung der im Folgenden dargestellten Forschungsergebnisse zum Chiemgau-Impakt einzuschätzen.

Der Tüttensee und andere große Krater

Der größte Krater des Chiemgau-Impakts wird heute vom Tüttensee bei Grabenstätt ausgefüllt (s. Abb. 2A). Der umgebende Wall hat eine Höhe von bis zu 8 m und von Wallkrone zu Wallkrone beträgt der Durchmesser 600 m. Das Projektil, das den Krater geschaffen hat, dürfte 25–50 m gemessen haben. Die Grafik skizziert die verschiedenen Stadien der Entstehung: Der mit kosmischer Geschwindigkeit (ca. 11–72 km/s) ankommende Meteorit kollidiert mit der Erdoberfläche unter gewaltigem Druck, der sich in Form von Schockwellen (Stoßwellen) in den Untergrund ausbreitet. Der Schockdruck führt zu extremen Temperaturen, die 10.000 Grad übersteigen können. Dadurch verdampft der Meteorit beim Eindringen in den Untergrund, und allenfalls sehr winzige Mengen des meteoritischen Materials können überleben. Aber auch das Gestein des direkt betroffenen Untergrundes verdampft hinter der sich ausbreitenden Schockfront, und in einer anschließenden Zone wird es geschmolzen. Bei sich weiter ausbreitender Schockfront reicht die Energie nicht mehr zum Verdampfen und Schmelzen aus; aber ein Teil des Gesteins wird heftig deformiert und zertrümmert. Die Minerale in den Gestei-

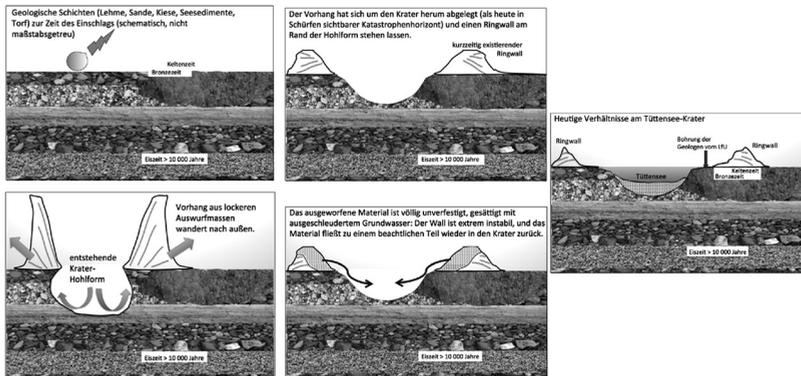


Abb. 3: Die Entstehung der Tüttensee-Hohlform als Meteoritenkrater (schematisch, nicht maßstabgetreu). Zur Bohrung des LfU: Sie steht an einer Stelle außerhalb des eigentlichen Kraters.

nen erleiden charakteristische Veränderungen, die unter dem Mikroskop als Schockeffekte (Schockmetamorphose) erkannt werden. Hinter der Schockfront beginnt das Gestein, sich auf gekrümmten Bahnen aus dem sich entwickelnden Krater hinaus zu bewegen. Gesteinsschmelze, zertrümmerte (brekzierte) Gesteine und weniger betroffene Gerölle, Sande und Kiese werden als Auswurfmassen (Ejekta) aus dem hinter der Schockfront immer größer werdenden Krater hinausbefördert. Die Auswurfmassen bewegen sich wie ein steilgestellter Vorhang radial nach außen, der in die Bildung eines Ringwalls und eines anschließenden Ejekta-Schleiers übergeht. Der Einschlag in das sehr lockere, wassergesättigte Material hat vermutlich mehr Verwandtschaft mit einem Einschlag in Wasser als in ein hartes Gestein. Deshalb behält der Ringwall auch nicht eine stabile Form, sondern große Volumenanteile fließen in die entstandene Hohlform zurück. Zudem ist der Großteil der Gerölle im verbliebenen Ringwall auch wenig bis gar nicht sichtbar deformiert. Der Krater füllt sich mit Grundwasser ... und wird sehr viel später der Tüttensee genannt.

Die Relikte dieses Prozesses und damit der meteoritische Ursprung der Tüttenseehohlform wurden mit einem ganzen Arsenal mineralogischer und geophysikalischer Methoden belegt.

Zahlreiche Dünnschliffe von Gesteinen vom Tüttensee-Wall bzw. aus den über 70 Schürfen im unmittelbaren Umfeld zeigen ein breites Spektrum an Schockeffekten (Ernstson, 2010: 44–51). Schockeffekte in Mineralen werden bei der Ausbreitung von Schockwellen in Gesteinen erzeugt. Eine Schockwelle (oder Stoßwelle) ist eine Deformation, die sich in einem Medium mit einer Geschwindigkeit ausbreitet, die höher ist als die Schallgeschwindigkeit (seismische Geschwindigkeit). Schockwellen in Mineralen hinterlassen je nach der Intensität unterschied-

liche Spuren. Zu den wichtigsten gehören sogenannte planare Deformationsstrukturen (englisch: *planar deformation features*, PDFs), die einen Druck von mindestens 5–10 GPa erfordern. Bei diesen besonderen Strukturen handelt es sich um extrem engständige, parallele und optisch isotrope Lamellen, die nach kristallographischen Ebenen im Quarz ausgerichtet sind. Nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnisse (z. B. Stöffler & Langenhorst, 1994) bilden sich multiple Scharen dieser engständigen isotropen Lamellen nur bei extremen Schockdrücken, und ihr natürliches Auftreten in Gesteinen wird – wie oben erwähnt – generell als ein Beleg für einen Impakt angesehen. PDFs und sogar noch stärkere Schockeffekte (Diaplektisches Glas, ab 10 GPa) wurden in Dünnschliffen zahlreicher Proben vom Tüttensee nachgewiesen, ebenso wie in Gesteinsproben einer Reihe kleinerer Krater (Ernstson, 2010: 47, Fig. 29; 48, Fig. 30; 82, Fig. 19; 83, Fig. 20, 21; Rappenglück, B. et al., 2010: 432, Fig. 3, Ernstson, 2015: 56, Fig. 25).

Aus dem Ringwall des Tüttensees konnten viele auffällig deformierte Gerölle geborgen werden. Dazu gehören stark zerbrochene, aber dennoch zusammenhaltende Blöcke, weit offene scharfkantige Risse in ebenfalls kohärenten Geröllen, rotierte Brüche, und Brekzierungen mit Vergriesungserscheinungen und Mörteltextur (Ernstson, 2010: 27–28 mit Abbildungen). Sie belegen eine Hochdruck-Kurzzeit-Deformation durch den Impakt-Schock. Treffen die Druckwellen des Schocks auf freie Oberflächen, so werden sie dort als nahezu gleichstarke Zugwellen reflektiert, die deutlich mehr Schaden anrichten können als Druckwellen (Ernstson, 2015: 34–38). Das hängt damit zusammen, dass die Zugfestigkeit von Gesteinen viel geringer ist als die Druckfestigkeit. Eine Reflexion von Druckenergie als Zugenergie geschieht an allen Grenzflächen im Gestein, an denen die sogenannte Impedanz (das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit des Gesteins) abnimmt. Im Chiemgau, wo harte, dichte Gesteine (alpine Gerölle) häufig im Kontakt mit lockeren, weichen Gesteinen (Sande und Lehme) stehen, ist diese Situation weitläufig gegeben. Die Hochdruck-Kurzzeit-Deformation müssen die Blöcke und Gerölle vor Ort erfahren haben, denn einen Transport aus den Alpen durch Gletschereis oder einen Fluss hätten diese Phänomene nicht überstanden.

Vom Tüttensee aus in einem Radius von bis zu 1000 m Entfernung wurde in zahlreichen Schürfen immer wieder eine charakteristische Schichtenfolge angetroffen (Ernstson, 2010: 33–39): zuunterst autochthones Moränenmaterial oder Seeton, darüber fossiler Boden und eine ‚Katastrophenschicht‘, sowie eine Bedeckung durch ein Kolluvium oder gleich den Pflughorizont. Die sog. ‚Katastrophenschicht‘, ein Diamiktit, der als Auswurfmaterial (Ejekta) des Tüttensees zu verstehen ist, ist gekennzeichnet durch ein völlig unsortiertes Gemenge an Steinen unterschiedlichster Größe in einer tonigen Matrix. Die Steine sind z. T. angeschmolzen, stark plastisch verformt und häufig heftig korrodiert bzw. scharfkantig gebrochen. In Dünnschliffen zeigen sie immer wieder die impakt-spezifische Schockmetamorphose (PDFs). Neben den Steinen sind in der Schicht Holzsplitter und Holzkohlestückchen häufig; vereinzelt kommen auch zerbrochene Tierknochen und -zähne vor. Außergewöhnliche Funde in der Kata-

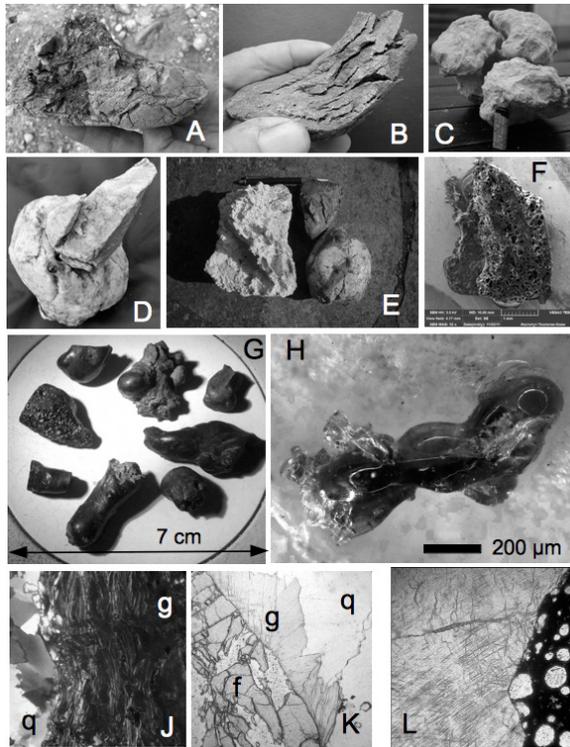


Abb. 4: Extreme Drücke, Temperaturen und Korrosionseffekte im Kraterstreufeld. A: typische Bruchdeformation und Korrosion eines alpinen Gerölls – bei einer Kiesgrubenerweiterung freigelegt. B: Durch Spallationsbruch aufgefächertes Geröllbruchstück eines Sandsteins; aus Krater 004 (bei Emmerting). C: Extrem korrodiertes Kalkstein-Block vom Chiemsee-Randbereich. Wirkung von Karbonatschmelze oder/und Säurelösung. D: Intensiv verbackene Gesteine – Geröllbruchstück und mit Glashaut versehenes Quarzit-Geröll (aus Krater 004). E: Zwei extrem kurzzeitig und hoch erhitze Gerölle mit rundum umschließender sub-millimeterdünner Glashaut; Restfragment aus Entkohlung/Karbonatschmelze eines alpinen Kalkstein-Gerölls (aus Krater 004). F: Chiemit aus dem Chiemgau-Kraterstreufeld unter dem Rasterelektronenmikroskop. Der Gehalt an speziellen Kohlenstoff-Allotropen (Carbine) verlangt Temperaturen zwischen 2500 und 4000°C zur Entstehung. G: Aerodynamisch geformte schwarze Gläser, die reichlich im Kraterstreufeld auflesen werden können. H: Beispiel eines Mikrotektiten aus Bodenproben in den ersten Alpenvorbergen südlich vom Chiemsee. J, K: Starke Schockeffekte in Mineralen – optisch isotrope, normal doppelbrechende Minerale Glimmer (g) und Feldspat (f) sind zu diaplekischem Glas umgewandelt. q = gewöhnlicher Quarz. J = gekreuzte Polarisatoren, K = linear polarisiertes Licht. Dünnschliff eines Quarzits aus dem Krater Schatzgrube; Bildbreite 1mm. L: Planare Deformationsstrukturen (PDF) als starker diagnostischer Schockeffekt in einem Quarz im Kontakt zu einem blasigen Glas. Dünnschliff eines Schmelzgesteins aus Krater 004. Bildbreite 480 µm.

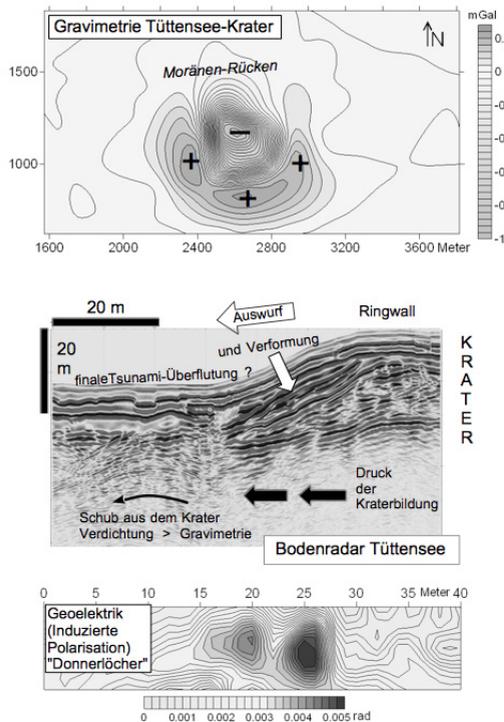


Abb. 5: Geophysikalische Messungen im Kraterstreufeld. Oben: Schweremessungen (Gravimetrie) auf dem zugefrorenen Tüttensee-Krater und in seiner Umgebung. Die zentrale negative Schwereanomalie (-) wird hauptsächlich von der wassergefüllten Hohlform erzeugt. Die relativ positiven Anomalien in der Umrahmung des Sees (+) werden durch eine Schock-Verdichtung der lockeren Sedimente bei der Kraterbildung erklärt. Mitte: Bodenradarmessungen (25 MHz-Antenne) auf einem Profil über den Tüttensee-Krater mit signifikanten Strukturmerkmalen. Radiale Bodenradar-Profile um den Krater herum mit vergleichbaren Indikationen „Druck von innen nach außen“ schließen eine Toteisgenese definitiv aus. Unten: Geoelektrische Messungen des Parameters Induzierte Polarisation über einem frisch entstandenen Erdfall („Donnerloch“). Die Messungen zeigen den durch das Impakt-„Erdbeben“ extrem deformierten Untergrund.

strophenschicht sind der Rohling eines neolithischen/bronzezeitlichen Steinbeils und bronze- bzw. eisenzeitlicher Keramikscherben. Sie spielen für die Datierung (s. d.) des Chiemgau-Impakts eine wichtige Rolle und unterstreichen, dass der Diamiktit nichts mit der Eiszeit zu tun hat, die schon viele Jahrtausende vorüber war, als die Scherben in den Boden gerieten.

Die klaren Belege, die die Steine für eine Genese der Tüttensee-Hohlform als Impaktkrater liefern, werden noch weiter untermauert durch die Ergebnisse verschiedener geophysikalischer Untersuchungen. Grundlage der Gravimetrie (= Schweremessung) sind Dichteunterschiede der Gesteine, die lokal, regional und kontinental die generelle Erdanziehung beeinflussen können. Mit höchstempfindlichen Instrumenten (Gravimetern) werden Änderungen der Schwere gemessen und in Karten dargestellt. Sie geben Auskunft über Art, Form und Tiefe im Untergrund verborgener geologischer Strukturen. Das gilt auch für Impaktstrukturen/Meteoritenkrater. Der Tüttensee-Krater zeigt eine sogenannte negative Schwereanomalie (Ernstson et al., 2010: 90–91). Sie besagt, dass Gesteine im Untergrund geringere Dichte besitzen bzw. Masse im Untergrund fehlt. Für den Tüttensee-Krater ist das wegen des Seewassers mit der geringen Dichte sofort verständlich. Ein Kranz relativ positiver Anomalien bedeutet eine ringförmige Gesteinsverdichtung um den Krater herum. Das ist nicht der sichtbare Wall, dessen Wirkung zuvor rechnerisch

entfernt wurde, sondern die enormen Drücke in der nach außen wandernden Schockfront komprimierten das anstehende lockere Material (s. Abb. 5 oben).

Ein anderes geophysikalisches Verfahren, das Boden- oder Georadar, benutzt elektromagnetische Wellen, die über Antennen als Impulse in den Untergrund geschickt werden. In unterschiedlichen Gesteinsarten breiten sich diese Wellen mit jeweils charakteristischer Geschwindigkeit aus und werden an Diskontinuitäten im Untergrund reflektiert. Die Laufzeit der Wellen und die entstehenden Reflexionsmuster geben Aufschluss über Art und Struktur des Untergrundes. Radarsignale verschiedener Frequenzen können verschieden weit in den Untergrund eindringen und differenzieren das sich ergebende Bild weiter aus. Georadar-Messungen (in verschiedenen Frequenzbereichen: 25 MHz-Antenne bistatisch; 200 MHz-Antenne monostatisch; 300 MHz-Antenne monostatisch) auf dem Tüttensee, um den See herum und in zahlreichen Profilen quer über den Wall zeigen ein deutliches Ergebnis (s. Abb. 5 Mitte): Der Wall weist intern schräge, aus dem Krater nach außen auf- und absteigende Schichtung auf. Dieser Befund belegt, wie bei der Entstehung des Kraters der sukzessive Materialauswurf inklusive Zurückrutschen eine ‚Dachziegel‘-Lagerung erzeugt hat.

Mit einer Entstehung der Tüttensee-Hohlform als Toteisloch – wie vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (Doppler et al., 2011) sowie Darga & Wierer (2009) behauptet – sind die mineralogischen Ergebnisse sowie die der Gravimetrie und des Georadars grundsätzlich nicht verträglich. Sie sprechen eindeutig für eine Genese als Meteoritenkrater.

Der Tüttensee-Krater ist nicht der einzige große Krater im Kraterstreufeld. SONAR-Echolotmessungen, von der CIRT-Forscherguppe zusammen mit der Chieminger Wasserwacht durchgeführt, zeigen am Boden des Chiemsees eine auffällige Struktur, die für den Boden eines eiszeitlichen Sees ganz untypisch ist (s. Abb. 2 B; Ernstson, 2010: 20–21). Die etwa 800 m x 400 m messende Struktur ist ein Doppelkrater, der einen Ringwall besitzt. Da sich das Kraterstreufeld über den Chiemsee hinaus erstreckt, ist es plausibel, dass Bruchstücke des Großmeteoriten auch in den Chiemsee gestürzt sind und am Boden Krater erzeugt haben. Die Höhe der dadurch ausgelösten Tsunamiwellen kann mehr als 25 m betragen haben. Deutliche Hinweise auf einen solchen Tsunami geben Diamiktite mit ausgeprägten Blocklagen und Kreuzschichtungen, wie sie in Kiesgruben auf der Ostseite des Chiemsees verschiedentlich anzutreffen sind (Ernstson, 2016).

Mineralogie, Petrographie, Geochemie – der Blick in die Gesteine

a) Meteoritisches Material

Ungewöhnliche metallische Partikel standen am Anfang der Erforschung des Chiemgau-Impakts (Schryvers & Raeymaekers, 2004; Schüssler et al., 2005; Rappenglück, M. et al., 2005,

Hoffmann et al., 2006) und stellten sich im Laufe der Jahre und umfassender Analysen immer mehr als einer der Schlüssel zum Geschehen heraus. Zügig wurden die besonderen Eisensilizide Xifengit und Gupeit nachgewiesen (Schryvers & Raeymaekers, 2004), vorschnell aber als aus der Industrie stammend und als Pseudometeorite klassifiziert (Fehr et al., 2004).⁷ In der Natur sind die Eisensilizid-Mineralen Fe_3Si (Gupeit) und Fe_5Si_3 (Xifengit) extrem selten, und nur wenige Einzelfunde sind bekannt geworden. Der Grund: Eisensilizide können sich nur in extrem reduzierendem, sauerstoffarmem Milieu bilden, das als natürliches Milieu auf der Erde so gut wie nicht vorkommt. Doch im Chiemgau-Kraterfeld finden sich Eisensilizide über Hunderte von Quadratkilometern großflächig verteilt, häufig in aerodynamisch geprägten Formen wie Kugeln, Knöpfen und Tropfen, aber auch als Splitter und Stücke, bis hin zu einem 8 kg schweren Brocken. Die Fundorte sind im Hinblick auf die Diskussion um einen industriellen Ursprung erwähnenswert: in tiefen Bodenschichten, unter uralten Baumwurzeln, unter einem mittelalterlichen Münzschatz, unter mittelalterlichen Burgmauern, im Moor und bis hinauf in die ersten Alpenberge. Gupeit wird erst seit den 1950er Jahren synthetisiert, Xifengit sogar erst seit 1997. Die Mineralen Gupeit und Xifengit konnten allerdings früher in Kleinstmengen und nur für einige Jahre bei einem ganz bestimmten Ofenprozess in einer südostbayerischen Fabrik entstehen, ohne dass das damals erkannt wurde. Mit den genannten Fundumständen im Chiemgau-Kraterfeld sind diese künstlich erzeugten Eisensilizide logisch nicht zu vereinbaren. Viel entscheidender aber ist, dass inzwischen mit wesentlich besseren Untersuchungsmethoden gezeigt werden konnte, dass eine Verwechslung mit den ganz besonderen Geländefunden im Kraterstreufeld nur bei sehr oberflächlicher Analyse möglich ist. Schon die bislang weltweit seltenen Funde von Xifengit und Gupeit sind in 13 von 19 Fällen gesichert kosmischen Ursprungs. Die neuen Analysen (Bauer et al., 2013) wiesen in Eisensilizen aus dem Chiemgau-Kraterfeld aber sogar Hapkeit (Fe_2Si) nach, der zum ersten Mal 2004 in dem Mondmeteoriten Dhofar 280 entdeckt wurde, und seitdem nur in anderem meteoritischem bzw. Supernova-Material. Die genannten Eisensilizide (Xifengit, Gupeit und Hapkeit) erfordern alle zur Entstehung eine sehr sauerstoffarme Umgebung, wie sie im Weltraum gegeben ist, sowie hohe Temperatur (1500°C-2800° C) und hohen Druck (einige GPa).

Die besonderen Eisensilizide Xifengit, Gupeit und Hapkeit bilden in den Funden im Chiemgau eine Matrix für ihrerseits z.T. exotische Mineraleinschlüsse: Karbide und CAI (Calcium-Aluminium-reiche Einschlüsse). Nachgewiesen wurden z.B. kubischer Moissanit ($[\beta]\text{3C-SiC}$)-Kristalle extremer Reinheit (Hiltl et al., 2011). Während einfaches irdisches Siliziumkarbid, das z.B. als Schleifmittel verwendet wird, ein hexagonales Kristallgitter besitzt, ist

7 An dieser Stelle sei kurz ein Abstract und Poster erwähnt (Huber et al., 2017), das alle im Folgenden aufgeführten Ergebnisse bestreitet und die Funde als „Pseudometeorite“ bezeichnet. Die Leserinnen und Leser sind gebeten, die dort präsentierte wissenschaftliche Herangehensweise (Analysenbeschreibung und Argumentationsaufbau) mit der hier genannten Literatur zu vergleichen.

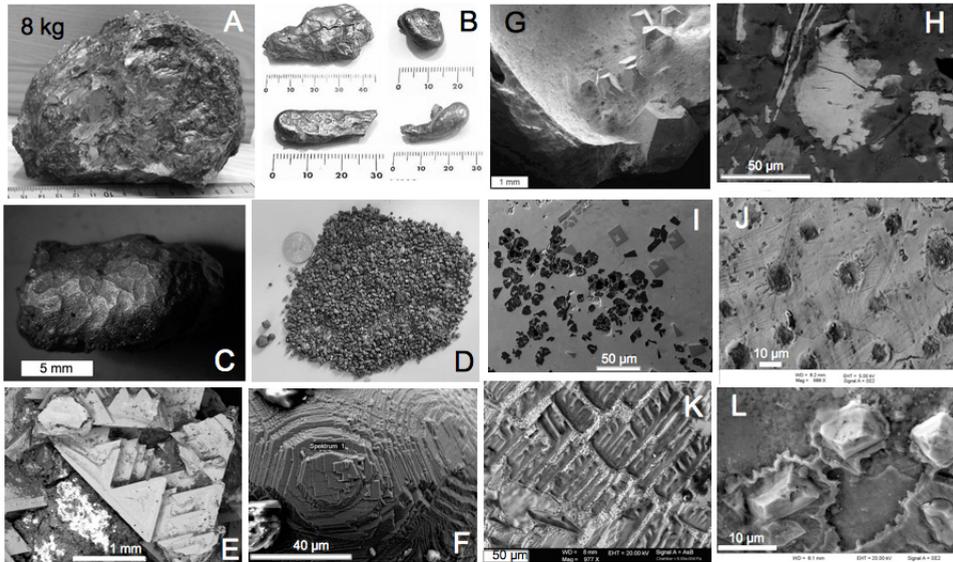


Abb. 6: Eisensilizide aus dem Chiemgau-Kraterstreufeld. A: 8 kg schwerer Eisensilizid-Brocken; vor ca. 30 Jahren bei Grabenstätt am Chiemsee gefunden. B: Eisensilizid-Proben aus dem Streufeld mit aerodynamisch geprägten Formen und Oberflächen. C: Eisensilizid-Partikel aus dem Streufeld mit regmaglyptischer Oberflächenkultur. D: Feinkörnigere Fraktion von Eisensiliziden aus dem Streufeld. E, F: Eisensilizide unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM). G: Kubische Moissanit(SiC)-Kristalle in Eisensilizid-Matrix. H: Eisensilizid mit Uran und Cerium (hell), REM. I: Kristalle von Moissanit (schwarz) und Titankarbid(TiC, grau) in Eisensilizid-Matrix. J: Mikrokrater auf Eisensilizid (Impakte von kosmischen Staubpartikeln?), REM. K: Entmischungslamellen von Eisensilizid und Zirkon in Eisensilizid-Probe, REM. L: Zirkon-Kristalle, eingetaucht in plastische Eisensilizid-Matrix.

Moissanit mit kubischer Kristallstruktur zumeist extraterrestrischer Herkunft und wird z. B. in präsolaren Körnern gefunden. Es bildet sich bei Temperaturen zwischen 1400° und 1600° C. Als CAI wurde Krotit (CaAl_2O_4) bestätigt (M. A. Rappenglück et al., 2013; M. A. Rappenglück et al., 2014), das bei hoher Temperatur (>1500°C) und niedrigem Druck gebildet wird und in Meteoriten nachgewiesen wurde (NWA 470 CH, Chondrit; NWA 1934, kohliges Chondrit). Belegt ist auch Dicalcium-Dialuminat ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5$), das bei hoher Temperatur (1500° C) und hohem Druck (zwischen 4 und 9 GPa) stabil ist. Es ist erst seit dem Jahr 2000 bekannt; bislang wurde kein natürliches Vorkommen nachgewiesen. Die unmittelbare Koexistenz des Hochtemperatur-Niedrigdruck-Minerals Krotit mit der Hochtemperatur-Hochdruckphase des Dicalcium-Dialuminat in den Chiemgau-Eisensiliziden belegt eine sehr komplexe Entstehungsgeschichte und lässt an eine Mischung im Weltraum denken (M. A. Rappenglück et al., 2014).

Die Gesamtheit der Befunde mit den modernsten Untersuchungsmethoden der Mineralogie schließt nach dem gegenwärtigen Stand der Wissenschaft eine irdische Bildung der Chiemgau-Eisensilizide aus. Sie müssen als eine besondere Art von Meteoriten angesehen werden, die mit dem Chiemgau-Impakt in enger Beziehung stehen.

b) Schmelzgesteine

Glas und Schmelzgesteine sind ein verbreitetes Kennzeichen im Krater-Streufeld und sie werden in ihrer vielfältigen Ausbildung sowie im Hinblick auf Verwechslungsmöglichkeiten mit künstlichen Produkten diskutiert. Wegen ihrer grundsätzlichen Bedeutung für das Verständnis der beim Impakt abgelaufenen Prozesse sind sie sehr detailliert mineralogisch-petrographisch untersucht worden. Ein deutliches Schwergewicht lag dabei auf den vielen ungewöhnlichen Schmelzgesteinen aus dem Krater 004 bei Emmerting, ganz im Nordosten des Streufeldes. Dieser Krater, mit einem Ringwalldurchmesser von 11 m einer der kleinen im Streufeld, hat einen Halo von ca. 20 m Durchmesser, in dessen Bereich das Gestein des Untergrundes auf 1500° C erhitzt worden sein muss (Hoffmann et al., 2005). Zahlreiche Steine unterschiedlicher Lithologie zeigen eine äußere Verglasung, die z. T. nur Mikrometerdünn ist und für eine sehr hohe und sehr kurze Erhitzung spricht (Ernstson et al., 2010: 92; Prochazka & Trojek, 2017). In Dünnschliffen sind PFs (planar fractures) in Quarz, mehrfache Sets von PDFs (planar deformation features) in Quarz und Feldspat sowie diaplektisches SiO₂ zu beobachten, was alles Anzeichen für Schockmetamorphose bei hohen Drücken sind. Schmelzglas durchzieht auch innere Klüfte im Gestein oder ist als allochthoner Klumpen zusätzlich auf die Gesteinsoberfläche aufgeschmolzen. Die Laboranalysen schließen normale tektonische Prozesse und menschliche Aktivitäten als Ursache all dieser Schmelzerscheinungen aus, sondern verweisen mit den nachgewiesenen Schockeffekten klar auf einen Zusammenhang mit dem Meteoriteneinschlag.

Glas findet sich auch in der Form von kleinen Glassphärulen (Neumair & Ernstson, 2013), Tektiten und Mikrotektiten (Ernstson et al., 2014; Ernstson, 2015: 12–15). Tektite entstehen nach vorherrschender Meinung in einer sehr frühen Phase eines Meteoriteneinschlags durch Aufschmelzen von Oberflächengestein, das als Schmelze herausgeschleudert wird. Während des Zurückfallens und der Abkühlung erhalten sie ihre charakteristischen, aerodynamischen Formen. Tektite zählen zu den Impakt-Ejekta und wurden im Chiemgau in Bodenproben bis hinauf in die Voralpen gefunden. Ihre chemische Zusammensetzung verweist auf alpinen Kieselkalk als Ausgangsgestein.

Neben den Steinen mit Glaskruste gibt es im Chiemgau-Kraterfeld reichlich Anzeichen für umgewandelte Karbonatschmelzen (Ernstson, 2010: 57). Kalkstein kann sich bei geeigneten Druck- und Temperaturverhältnissen sowie Umgebungsbedingungen in eine sogenannte Kar-

bonatschmelze verwandeln, die dünnflüssig wird wie Benzin und bei Abkühlung sehr rasch wieder zu Karbonatmineralen kristallisiert, also vor allem zu Calcit oder Aragonit. Typisch ist dann z. B. das Auftreten von stark porösen Massen, die manchmal watteähnlichen Charakter besitzen. In den hochporösen Karbonatmassen finden sich z. T. Relikte von nicht geschmolzenen Calcit-Kristallen mit Mikrozwillingbildung, die als Anzeichen für Schock gilt.

c) Inkohlungsvarietäten und ein neues Impaktgestein

Im Zusammenhang mit dem Chiemgau-Impakt tritt Kohlenstoff weit verbreitet in vielen Formen auf (Ernstson, 2015: 15-21). Kohlenstoffsphärulen gingen in mindestens ganz Westeuropa als Fallout (Rösler et al., 2005) nieder, Nanodiamanten, deren Entstehung je nach Herstellungsverfahren einen Druck von wenigstens 5–6 GPa verlangt, wurden schon sehr früh in Kohlenstoffkügelchen gefunden, die wiederum u. a. in der Schmelzkruste eines Gesteins aus Krater 004 eingebettet waren (Rösler et al., 2005; Yang et al., 2008). Darüber hinaus ist im Bereich des Kraterstreufeldes eine bemerkenswerte Folge zunehmender Inkohlung zu beobachten, die in den letzten Jahren intensiv analysiert wurde (Ernstson et al., 2013; Isaenko et al., 2012; Shumilova et al., 2012). Mit Inkohlung bezeichnet man die Umwandlung von Pflanzenresten über Torf, Braunkohle, Steinkohle, Anthrazit bis hin zum Graphit. Druck und Temperatur sind maßgebliche Faktoren. In geologischen Zeiträumen führt die Inkohlung zu den Kohlelagerstätten auf der Erde; technisch kann sie aber innerhalb von Stunden durch Erhitzen von Biomasse in Druckbehältern nachgeahmt werden. Die Inkohlungs-Varianten im Kraterstreufeld reichen von Holzkohlepartikeln über verschiedene Zwischenformen bis zu dichten, sehr harten, schwarzen, glasartigen Stücken („Glaskohlenstoff“) und einem glasartigen Kohlenstoff („Chiemit“), der aber im Gegensatz zum Glaskohlenstoff im Inneren bimsartig porös ist und plattige Einschlüsse aufweist. Raman-Spektren einer Probe glasigen Kohlenstoffs zeigen weitgehend ungeordneten elementaren Kohlenstoff in amorphem Zustand. Sehr ähnliche Raman-Spektren eines gestörten Kohlenstoffs sind z. B. vom kohligen Chondriten Allende und von Kohlenstoff aus der Sudbury-Impaktstruktur bekannt. Chiemit wurde umfassenden Analysen unterzogen (Raman Spektroskopie, Röntgenbeugung [XRD], Rasterelektronenmikroskopie [REM] und Rasterkraftmikroskopie [AFM], Transmissionselektronenmikroskopie [TEM] und Differenz-Thermoanalyse [DTA]). Chiemit ist zu über 90% reiner Kohlenstoff; der Rest ist Silizium, Aluminium und Eisen, untergeordnet Schwefel und Spuren weniger anderer Elemente. Der Kohlenstoff ist eine Mischung aus amorphem Kohlenstoff und Kohlenstoff in Kettenbindung aus der Gruppe der Kohlenstoff-Carbine. Die Erzeugung dieser Carbine erfordert Drücke von 4–6 GPs und Temperaturen von 2.200–3.700°C. Gleichzeitig deutet die Porosität des Chiemits darauf hin, dass er aus einer entgasenden Kohlenstoffschmelze entstanden ist, die bei etwa 3.500–3.700° C entsteht. Mit den genannten Eigenschaften ist der Chiemit bislang auf der Erde

nicht als natürliches Material bekannt; wegen seiner erstmaligen Entdeckung im Chiemgau-Kraterstreufeld erhielt er seinen Namen. Die aufgeführten Entstehungsbedingungen – sehr hoher Druck und sehr hohe Temperatur – kennzeichnen den Chiemit als ein neues Impactgestein.

Aber wie sind die verschiedenen Kohlenstoffvarietäten und besonders der Chiemit im Chiemgau-Kraterstreufeld entstanden? Folgendes Erklärungsmodell wurde hierzu entwickelt (Ernstson et al., 2013): Der Impact treibt eine Schockfront vor sich her, verknüpft mit gewaltigen Explosionen (Airbursts), höchsten Drücken und extremen Temperaturen, und trifft auf die Vegetation, die in einem Prozess von Kurzzeit-Inkohlung die verschiedenen Inkohlungs-Varietäten ausprägt. Dabei setzen die Extremformen, nämlich die Nanodiamanten und der dichte, harte, glasartige Kohlenstoff vor allem hohe Schockdrücke voraus, während der Chiemit vor allem extreme Temperaturen für die Bildung einer entgasenden Kohlenstoff-Schmelze benötigt.

d) Makroskopisch verformte Steine

Von Geröllen, die enorme mechanische Deformationen aufweisen, war schon oben beim Tüttensee die Rede. Sie beschränken sich keineswegs auf diesen, sondern sind in vielen der Krater am Boden, in den Kraterwänden und in dem Material, das die Ringwälle aufbaut, zu finden.

Verbreitet im Chiemgau-Kraterfeld sind darüber hinaus extrem zerfressene, manchmal zu regelrechten Skeletten gewordene alpine Gerölle der verschiedensten Gesteinsarten (Ernstson, 2010: 51–57). Die derart beanspruchten Gerölle bestehen immer aus zwei oder mehr verschiedenen Gesteinsarten: z. B. Quarzite oder Tonschiefer mit Calcit-Adern, Kalksteine mit Quarzadern, Sandsteine mit kalkiger Bindung, Silexknollen und verkieselte Fossilien in Kalkstein und andere. Das deutet auf einen Korrosionsprozess, der die eine Gesteinsart viel stärker angreift als die andere. In Frage kommen direkte chemische Lösungsprozesse oder hohe Temperatur. Kalk z. B. zersetzt sich bei Temperaturen ab etwa 1000° C oder kann sogar in eine Karbonatschmelze übergehen. Es können aber auch bei einer gewaltigen Impact-Explosion (Airblast) in der Atmosphäre Sauerstoff und Stickstoff zu Stickoxiden reagieren, die sich mit Wasser(dampf) zu salpetriger Säure und Salpetersäure verbinden. Beim Chiemgau-Impact könnte es allein die Salpetersäure gewesen sein, die eine unbekannte Zeit abregnete und die Gesteine am Boden zerfraß, wobei verständlicherweise Kalkzersetzung unter Hochtemperatur und Säurelösung zusammenwirken konnten. Dieser Prozess muss *in situ* abgelaufen sein; bei einem Transport wären diese scharfkantig zersetzten, brüchigen, vielfach leicht zerreibbaren Gerölle rasch wieder gerundet worden bzw. gleich ganz zerfallen.

Sekundärphänomene

Der Chiemgau-Impakt war begleitet von einer großen Vielfalt an Sekundärphänomenen, sei es z. B. der Tsunami, der durch die Einschläge in den Chiemsee ausgelöst wurde (Ernstson, 2016), oder seien es die sog. ‚Donnerlöcher‘ (Ernstson et al., 2011; Ernstson & Poßekel, 2017), auf die etwas näher eingegangen werden soll. Die Region nördlich des Chiemsees, von Obing, Kienberg und Traunreut bis nach Kirchweidach (s. Abb. 1), war und ist immer wieder von plötzlichen Erdfällen (den ‚Donnerlöchern‘) betroffen. Dabei bricht der Boden mit einem Durchmesser von bis zu mehreren Metern und einer Tiefe ebenfalls bis zu mehreren Metern steil ein. Die Ursache der Donnerloch-Bildung war stets ein Rätsel und bei Geologen häufig mit einem vagen Hinweis auf die Eiszeit verknüpft. Denkbare Erklärungsansätze wie Verkarstung, Vulkanismus, Gasaustritte, Bergbau und Schlammvulkanismus scheiden aufgrund der lokalen Geologie aus. Aufschluss gaben umfangreiche geologische und geophysikalische Untersuchungen (Georadar, Geoelektrik, s. Abb. 5 unten) mehrerer Donnerlöcher, bis hin zum Aufbagern. In allen Fällen konnte ein z. T. sehr energiereicher Materialtransport von unten nach oben nachgewiesen werden, der in explosiven Druckentladungen u. a. bis zu 200 kg schwere Gesteinsblöcke um bis zu 1 m angehoben hat. Eine Erklärung bringt sämtliche Beobachtungen stimmig in Zusammenhang mit erdbebenähnlichem Schock und daraus resultierender Gesteinsverflüssigung (Bodenverflüssigung, Liquefaktion), die sich explosiv durch Schwachstellen der überdeckenden Gesteinsschichten nach oben entlud. Erdbeben der erforderlichen Stärke sind in der Region nicht bekannt, doch die Schockwellen des Chiemgau-Impakts waren ein plausibler Auslöser dieses Prozesses. In den entstehenden Transportkanälen blieb das Material vielfach stecken, wird aber im Laufe der Jahrtausende nach und nach ausgewaschen – ein weiteres Donnerloch bricht ein.

Was kam da wohl wie herunter?

Die Form und Lage des Streufeldes, seine Größe und die Verteilung der Krater lassen gewisse grobe Rückschlüsse auf die Größe, Beschaffenheit, Dichte und Geschwindigkeit des in die Erdatmosphäre eindringenden Himmelskörpers und seine Flugbahn zu. Die bisher identifizierten Krater zeigen in dem elliptischen Streufeld eine gewisse ‚Sortierung‘: Die kleinen befinden sich überwiegend im nördlichen, die großen häufen sich im südlichen Bereich des Areals. Diese Verteilung ist erklärbar mit der kinetischen Energie der Bruchstücke eines einzigen Körpers oder der Objekte eines Schwarms je nach ihrer Masse bei ursprünglich gleicher Eintrittsgeschwindigkeit. Das größere Moment der massereicheren Fragmente führt zu einem längeren Weg in der Atmosphäre, bevor die Luftreibung das Objekt abbremst. Masseärmere Bruchstücke folgen einem kürzeren Weg in der Atmosphäre bevor sie abgebremst werden und laufen auf einer steileren Bahn. Die Fragmentation der Teile kann je nach ihrer Beschaffenheit (Dichte, Festigkeit, Form, Material) mehrfach explosionsartig erfolgen: Eine Kaskade herabfallender

Bruchstücke, deren unterschiedliche Fallkurven entlang und seitlich zur Flugbahn die beobachtete Größenverteilung der Krater auf dem Boden ergibt, ist die Folge. Druckwellen, die von den mit großer Geschwindigkeit im Schwarm fliegenden Objekten durch die Kompression der Luft ausgelöst werden, tragen zu seitlichem Abtrieb bei.

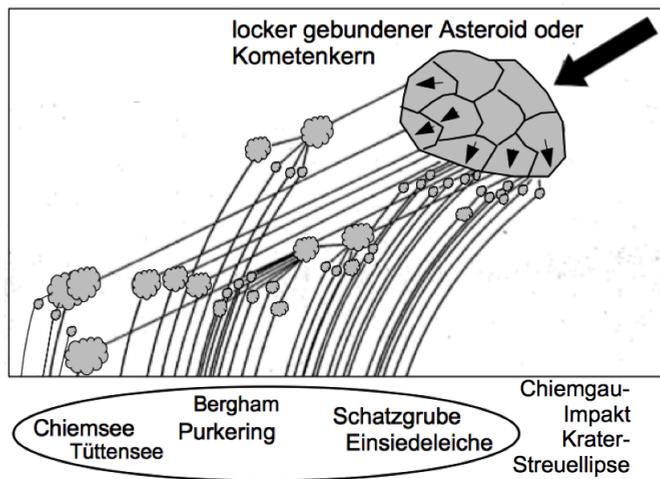


Abb. 7: Projekttil- und Krater-Gradierung. Aufbrechen des Asteroiden/Kometenkerns im Anflug, dabei Gradierung der Bruchstücke nach der Größe. Entsprechend gibt es eine ganz grobe Anordnung der Krater in der Streuellipse nach ihrer Größe. Stark schematisiert.

Im Falle des Chiemgau-Impakts muss – nach der bisher bekannten Verteilung der Krater – das Objekt aus Richtung Nordosten nach Südwesten geflogen (Azimut 43°) und unter einem sehr flachen Winkel von etwa 7° in die Lufthülle der Erde eingedrungen sein. Auf ca. 70 km brach es auseinander und eine fortgesetzte Fragmentation begann. Dieses Szenario gilt für einen Meteoroid, der noch intakt war, als er die dichteren Schichten der Atmosphäre erreichte. Der Chiemgau-Impaktor könnte auch schon in Erdnähe durch die Gezeitenkräfte auf einer Höhe von ca. 22.200 km (Roche'sche Grenze bei $1,3 \text{ g/cm}^3$ Dichte) in verschieden große Fragmente auseinandergerissen worden sein. Besonders ‚poröse‘ Objekte, deren häufigere Existenz durch Raumsonden und irdische Radarbeobachtungen bestätigt wurde, mit nur leicht zusammengefügten Komponenten (adhäsive Bindung), sind anfällig für eine derartige Fragmentation in Planetennähe. Die Teile wären dann in die Atmosphäre gestürzt und dort – wie beschrieben – in Kaskaden weiter fragmentiert: ein ‚multipler Impakt‘. Dafür spräche die ungewöhnliche Breite der Verteilungsellipse von ca. 27 km. Während mehrere Bruchstücke extrem kurz hintereinander herabstürzten,

drehte sich die Erde unter ihren Flugbahnen ein wenig weiter, was einen Versatz von Osten nach Westen und damit eine Aufweitung des Kraterstreufelds zur Folge hat.

Aus der Flugrichtung des Objekts und dem Eintrittswinkel lässt sich schließen, dass es grad um die Sonne lief und relativ langsam (um 12 km/s) gewesen sein muss. Derartige Objekte stammen eher aus dem inneren Sonnensystem, d. h. zum Beispiel aus dem zwischen Mars und Jupiter befindlichen Planetoidengürtel. Es könnte sich dann entweder um ein Bruchstück eines Planetoiden von sehr geringer Dichte ($< 1,3 \text{ g/cm}^3$) oder um einen nicht mehr aktiven Kometenkern (kurzperiodischer Komet) ähnlich geringer Dichte handeln. Der Himmelskörper mag aber auch aus dem Kuiper-Belt oder der Oortschen Kometenwolke stammen und dann vom Planeten Jupiter, der bekanntermaßen die Bahnen von Kometen beeinflussen kann, in das innere Sonnensystem gelenkt worden sein.

Einige der exotischen Stoffe, die im Chiemgau-Kraterfeld gefunden wurden, lassen vorsichtige und vorläufige Schlüsse auf die Art des Chiemgau-Impaktors zu. Acht dieser Stoffe sind bisher auch von Meteoriteneinschlägen bekannt: Nanodiamanten, $(\beta)3\text{C-SiC}$ (Moissanit), Fe_2Si (Hapkeit), Fe_3Si (Gupeit), Suessit ($\text{Fe,Ni})_3\text{Si}$, Fe_5Si_3 (Xifengit), Khamrabaevit ((Ti,V,Fe)C) und Krotit (CaAl_2O_4). Im Chiemgau treten sie in Materialproben als Mischungen auf, aus Material, das bei niedrigen und hohen Drücken sowie niedriger und hoher Temperatur (also unter widersprüchlichen Bedingungen) gebildet wurde. Ein Teil stammt aus der Entstehungszeit unseres Sonnensystems, ein Teil aus späteren Perioden. Die Mischung könnte bereits im Weltraum durch mehrfache Kollisionen zustande gekommen sein. Ureilite, eine Klasse sehr seltener Steinmeteorite, zeigen Hinweise auf derartige Kollisionen, und es sind interessanterweise gerade Ureilite, in denen einige der exotischen Stoffe, die man auch in Chiemgau-Proben findet, erstmals und z. T. auch einzig in der Natur nachgewiesen wurden. Es könnte sich also auch bei dem Chiemgau-Impaktor um einen Ureilit gehandelt haben.

Datierung: Wann ‚stürzte der Himmel ein‘?

Für viel Irritation hat eine Bohrung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) am Rand des Tüttensees gesorgt, deren Bohrkern mit der Radiokarbon-Methode datiert wurden. Das LfU gab an, die Bohrung sei am „Kesselboden“ (Pressemitteilung LfU) niedergebracht worden. Unter einem halben Meter zersetztem Torf wurde bei 0,60 m Tiefe von Torf ein erstes Alter von 4.800 BP (= vor heute) Jahre ermittelt, in 2,50 m Tiefe 10.000 Jahre und darunter sogar 12.500 Jahre (Doppler et al., 2011: 274–275). Die Schlussfolgerung lautete, dass damit bewiesen sei, dass der Tüttensee ein Toteisloch sei und es niemals eine kosmische Katastrophe gegeben habe (Pressemitteilung LfU). Doch diese Schlussfolgerung beruht auf falschen Annahmen (B. Rappenglück et al., 2011: 279): Die Bohrproben wurden keineswegs am Kesselboden des Tüt-

tensees entnommen, sondern am Uferrand. Dort allerdings war eine Bohrung, die das Alter der Entstehung der Hohlform ermitteln möchte, deplatziert, denn sie traf nicht den eigentlichen beim Impakt ausgehobenen Krater, der heute unter der Wasseroberfläche des Tüttensees liegt, sondern die ungestörten nacheiszeitlichen Schichten (s. Abb. 3 unten). Damit ist die Bohrung mit ihren Datierungen als ‚Totschlagargument‘ gegen den Impakt hinfällig. Ganz im Gegenteil ist der in der Bohrung angetroffene, oberste halbe Meter von offenbar nicht datierbarem, zersetztem Torf bemerkenswert: Ist das der beim Impakt übrig gebliebene Horizont? Liefert uns die Bohrung ganz unbeabsichtigt einen Fingerzeig auf ein nacheiszeitliches Ereignis am Tüttensee, das jünger als 4.800 Jahre vor heute ist?

Weiter oben war schon die Rede von den Funden, die CIRT mitten in der Katastrophenschicht nahe des Tüttensees gemacht hat: Das ist zum einen der Rohling einer Steinaxt, der zeitlich zwischen mittlerem Neolithikum und Bronzezeit einzuordnen ist. Keramikscherben, im selben Areal ebenfalls in der Katastrophenschicht gefunden, datieren in die Bronze- oder Eisenzeit und sind vermutlich der späten Bronzezeit (= Urnenfelderzeit) zuzuordnen. Eingebettet mitten in die Impakt-Katastrophenschicht, sind sie bei dem Einschlag hineinverfrachtet worden und belegen, dass der Impakt nicht vor der Bronzezeit stattgefunden haben kann.

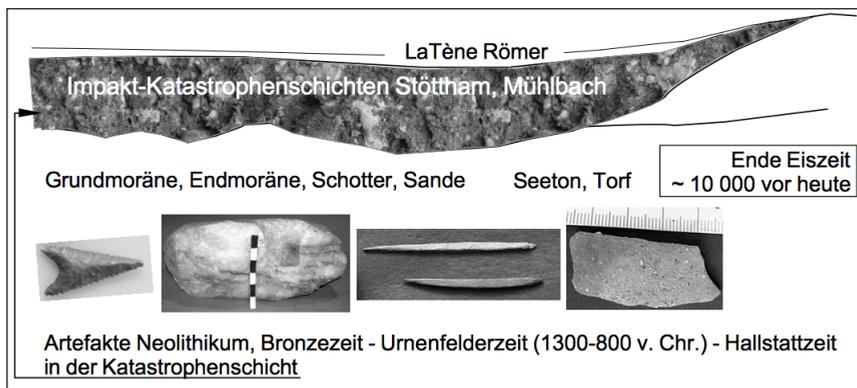


Abb. 8: Die bisher zuverlässigste Datierung des Impakt-Ereignisses resultiert aus archäologischen Funden und Befunden. Es muss jünger als die jüngsten Funde in der Katastrophenschicht und älter als die ältesten Funde unmittelbar über der Katastrophenschicht sein.

Römerzeitliche Funde auf dem Tüttenseewall zeigen, dass das der Chiemgau-Impakt schon Geschichte war, und der Fund einer mittel-/spätlatènezeitlichen Scherbe in der Schicht über den Auswurfmassen deutet – stimmig mit den dieser Zeit zuzuordnenden Siedlungsnachweisen in der Region – darauf hin, dass sich der Einschlag vor ca. 300 v. Chr. ereignet haben muss.

Weltweit bislang einzigartig war die stratigraphische Situation, die bei einer Ausgrabung in Chieming-Stöttham, am Ostufer des Chiemsees, angetroffen wurde: Dort zeigte sich die Impakt-Katastrophenschicht eingebettet in archäologische Schichten. Die komplexe geologisch-archäologische Situation wurde von Völkel et al. (2012: 376–377) als chronologisch kontinuierliches Kolluvium in einer Paläo-Rinne interpretiert und die Entstehung der Katastrophenschicht im Zusammenhang eines Meteoriteneinschlags abgestritten. Doch der Nachweis (Ernstson et al., 2012: 252–254) von verschiedenen Formen der impaktdiagnostischen Schockmetamorphose belegt, dass das Material dieser Schicht vom Impakt betroffen war. OSL-Datierungen, die sowohl von Völkel et al. (2012: 371) als auch von CIRT (Liritzis et al., 2010: 17) vorgenommen wurden, datierten die Schicht in die Bronzezeit um ca. 2000 v. Chr., werden jedoch bezüglich ihrer Aussagekraft in der Situation eines Impakts und Tsunamis diskutiert (Liritzis et al., 2010: 29–30). Die Schichten sind mit Funden unterschiedlichster Zeitstellung stark durchmischt – ein Umstand, der möglicherweise den Bodenbewegungen durch den Impakt geschuldet ist. Der ausgrabende Archäologe erschloss, dass die Schicht „nach dem beginnenden Jungneolithikum und spätestens während der Urnenfelderzeit abgelagert worden sein“ müsse (Möslein, 2009).

Insgesamt reichen die bisherigen, mit verschiedenen Methoden gewonnenen Datierungen aus, den Chiemgau-Impakt mit Sicherheit in die Bronzezeit/Eisenzeit einzuordnen. Da die archäologischen Funde – trotz aller situationsbedingter Unschärfe – die zuverlässigsten Anhaltspunkte geben, ist auf weitere Ausgrabungen zu hoffen, bei denen die Katastrophenschicht angetroffen und die Zeitstellung noch genauer ermittelt werden kann.

Angesichts der Datierung des Chiemgau-Impakts und der nachgewiesenen Besiedlung des Gebietes zu der betreffenden Zeit stellt sich die Frage nach Augenzeugen und Überlieferungen des Ereignisses. Leider haben die Kulturen, die zur fraglichen Zeit die Region geprägt haben, abgesehen von keltischen Inschriften, keine schriftlichen Zeugnisse hinterlassen. Aber der antike Mythos von Phaethon, der als Sohn des Sonnengottes mit dem Sonnenwagen abstürzt und die Welt in Brand setzt, ist in detaillierten Untersuchungen als mythische Verarbeitung des Chiemgau-Impakts gedeutet worden (B. Rappenglück & M. Rappenglück, 2007; B. Rappenglück et al. 2010). Der Mythos muss zwischen ca. 2000 v. Chr. und 428 v. Chr., als er erstmals eindeutig schriftlich belegt ist, entstanden sein. Einige der antiken Autoren verorten das Geschehen im „Keltenland“, was mit dem Chiemgau in der Kernregion der keltischen Kultur gut übereinstimmen würde. Nicht nur in der Datierung und dem Schauplatz, sondern auch in wesentlichen weiteren Details (B. Rappenglück & M. Rappenglück, 2007: 103–105; B. Rappenglück et al., 2010: 431–435) zeigen der Mythos von Phaethon und der Chiemgau-Impakt ungewöhnliche Übereinstimmung, von denen nur einige Beispiele genannt seien: Das Auseinanderbrechen des Sonnenwagens kann mit der Fragmentation des Chiemgau-Impaktors verglichen werden; die zahllosen, oben beschriebenen Inkohlungsprodukte belegen verbrannte Vegetation, wie sie der Mythos schildert; die Einschläge in den Chiemsee lösten Tsunamiwellen aus, und korrespon-

dieren mit Phaethons Sturz in einen See und dem Umstand, dass der Gott Neptun sich dreimal aus dem Wasser erhob und wieder zurückzog; Säureeinwirkung, wie sie die heftig zersetzten Gesteine belegen, dürfte auch giftige Dämpfe erzeugt haben, von denen der Mythos spricht.

Interpretiert man die in dem Mythos geschilderten Details als Verarbeitung von konkreten Beobachtungen beim Chiemgau-Impakt, so geht man von Augenzeugen aus. Bei dem Tunguska-Ereignis 1908 – der gewaltigen Explosion eines unbekanntes Himmelsobjekts über Sibirien – überlebten Personen das Ereignis in einer Distanz von 10–60 km vom Epizentrum und berichteten darüber. Auch in der hügeligen Landschaft des Chiemgaus mit ihren zahlreichen Gewässern und den nahen Alpen wird das Ereignis lokal sehr unterschiedliche Auswirkungen gehabt haben, und ein Überleben von Augenzeugen möglich gewesen sein. Verschiedene Phänomene des Chiemgau-Impakts waren über weite Teile Europas wahrnehmbar (vorsichtige Schätzungen): Die Flugbahn des Objekts konnte mindestens über dem ganzen nördlichen Eurasien beobachtet werden. Die Explosion(en) in der Atmosphäre war(en) über einen Radius von mindestens 500–600 km zu sehen und wohl über eine Distanz von 1000 km und mehr zu hören. Je nach Fragmentation des Objektes gingen Teile nicht nur im Chiemgau nieder. Ein Fallout von Karbonsphärulen erfolgte über weiten Teilen Europas. Die vom Impakt ausgelösten Erschütterungen waren noch in einer Entfernung von mehreren hundert Kilometern zu spüren. Die Beobachtungen und Erfahrungen werden sich – auch durch gut etablierte Handelskontakte – schnell verbreitet haben. Ein unvorhersehbares Ereignis von solchen Ausmaßen und Auswirkungen erforderte eine Erklärung. Dazu diente in dieser Zeit ein Mythos.

Resümee

Den oben genannten Kriterien für einen Meteoriteneinschlag genügt der Chiemgau-Impakt, wie hier dargestellt, in umfassender Weise. Von anderen holozänen Impakten hebt er sich durch einige herausragende Merkmale ab:

- der Impakt als solcher ist durch Schockmetamorphose eindeutig belegt;
- Fund von meteoritischem Material,
- die Größe des Krater-Streifeldes (ca. 60x30 km),
- die Zahl der Krater (ca. 80), - die Größe des Tüttensee-Kraters (600 m Ø),
- die Vielfalt der Begleiterscheinungen und Sekundäreffekte,
- die direkte Einbettung der Impaktschicht in eine archäologische Stratigraphie,
- die vergleichsweise genaue Datierung.

Die Erforschung des Chiemgau-Impakt ist exemplarisch dafür, wie jahrelange akribische interdisziplinäre wissenschaftliche Forschung unter Einbeziehung der interessierten Bevölkerung und von Amateurforschern zu unerwarteten, faszinierenden, aber gut gesicherten Ergebnissen führt, die wissenschaftliches Neuland beschreiten und neue Perspektiven für die Forschung eröffnen.

Dank

Für unermüdliche Unterstützung bei den Geländearbeiten und vielen anderen mit der Erforschung und Darstellung des Chiemgau-Impakts verbundenen Aufgaben danken wir (in alphabetischer Reihenfolge): Rudolf Beer, Gerhard Benske, Tom Bliemetsrieder, Alfred Dufter, Till Ernstson, Sepp Konhäuser, Hans-Peter Matheisl, Werner Mayer, Ernst Neugebauer, Andreas Neumair.

Literatur

- Bauer, F., Hiltl, M., Rappenglück, M. A., Neumair, A., & Ernstson, K. (2013). Fe₂Si (Hapkeite) from the subsoil in the alpine foreland (Southeast Germany): Is it associated with an impact? *Meteoritics & Planetary Science*, 48 (S1) (76th Annual Meeting of the Meteoritical Society), Abstract #5056. Abgerufen von <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2013/pdf/5056.pdf>
- Darga, R., & Wierer, J. F. (2009). *Wanderungen in die Erdgeschichte: Bd. 27. Auf den Spuren des Inn-Chiemseegletschers – Exkursionen*. München: Pfeil.
- Doppler, G., Geiss, E., Kroemer, E., & Traidl, R. (2011). Response to ‘The fall of Phaethon: a Greco-Roman geomyth preserves the memory of a meteorite impact in Bavaria (south-east Germany)’ by Rappenglück et al. (*Antiquity* 84). *Antiquity*, 85(327), 274–277.
- Ernstson, K. (2010). *Der Chiemgau-Impakt – Ein bayerisches Meteoritenkraterfeld*. Traunstein: Chiemgau Impakt e.V.
- Ernstson, K. (2015). *Der Chiemgau-Impakt – Ein bayerisches Meteoritenkraterfeld, Teil 2*. Traunstein: Chiemgau Impakt e.V.
- Ernstson, K. (2016). Evidence of a meteorite impact-induced tsunami in lake Chiemsee (Southeast Germany) strengthened. *47th Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract #1263. Abgerufen von <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/pdf/1263.pdf>
- Ernstson, K., Mayer, W., Neumair, A., Rappenglück, B., Rappenglück, M. A., Sudhaus, D., & Zeller, K. (2010). The Chiemgau crater strewn field: Evidence of a Holocene large impact event in Southeast Bavaria, Germany. *Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies*, 1/3, 72–103.
- Ernstson, K., Mayer, W., Neumair, A., & Sudhaus, D. (2011). The sinkhole enigma in the Alpine Foreland, Southeast Germany: Evidence of impact-induced rock liquefaction processes. *Central European Journal of Geosciences*, 3/4, 385–397.

- Ernstson, K., Sideris, C., Liritzis, I., & Neumair, A. (2012). The Chiemgau meteorite impact signature of the Stöttham archaeological site (Southeast Germany). *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 12/2, 249–259.
- Ernstson, K., Shumilova, T. G., Isaenko, S. I., Neumair, A., & Rappenglück, M. A. (2013). From biomass to glassy carbon and carbynes: Evidence of possible meteorite impact shock coalification and carbonization. *Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin Memorial Seminar–2013): Proceedings of mineralogical seminar with international participation* (S. 369–371). Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS.
- Ernstson, K., Hiltl, M., & Neumair, A. (2014). Microtektite-like glasses from the Northern Calcareous Alps (Southeast Germany): Evidence of a proximal impact ejecta origin. *45th Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract #1200. Abgerufen von <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2014/pdf/1200.pdf>
- Ernstson, K., & Poßekel, J. (2017, Dezember). Meteorite impact „earthquake“ features (Rock liquefaction, surface wave deformations, seismites) from ground penetrating radar (GPR) and geoelectric complex resistivity/induced polarization (IP) measurements, Chiemgau (Alpine Foreland, Southeast Germany). *Abstract (EP53B-1700) presented at 2017 Fall Meeting, AGU, New Orleans, LA*.
- Fehr, K.T., Hochleitner, R., Hölzl, St., Geiss, E., Pohl, J.-P., Fassbinder, J. (2004). Ferrosilizium-Pseudometeorite aus dem Raum Burghausen, Bayern. *Der Aufschluß*, 55, 297-303.
- Fehr K. T., Pohl J., Mayer W., Hochleitner R., Fassbinder J., Geiss E., & Kerscher H. (2005). A meteorite impact crater field in Eastern Bavaria? A preliminary report. *Meteoritics and Planetary Science*, 40, 187–194.
- French, B. M., Koeberl, C. (2010). The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, 98, 123–170.
- Hiltl, M., Bauer, F., Ernstson, K., Mayer, W., Neumair, A., & Rappenglück, M. A. (2011). SEM and TEM analyses of minerals xifengite, gupeite, Fe₂Si (hapkeite?), titanium Carbide (TiC) and cubic moissanite (SiC) from the subsoil in the Alpine Foreland: Are they cosmochemical? *42nd Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract #1391.
- Hoffmann, V., Rösler, W., Patzelt, A., & Raeymaekers, B. (2005). Characterisation of a small crater-like structure in SE Bavaria, Germany. *68th Annual Meteoritical Society Meeting, Gatlinburg*, Abstract #5158. Abgerufen von https://www.lpi.usra.edu/meetings/metsoc2005/pdf/download/alpha_g-i.pdf
- Hoffmann, V., Tori, M., Funaki, M. (2006). Peculiar magnetic signature of Fe-Silicide phases and diamond/fullerene containing carbon spherules. *Travaux Géophysiques XXVII - Abstracts of the 10th „Castle Meeting“ – New Trends in Geomagnetism, Paleo, Rock and Environmental Magnetism*, 52–53.
- Huber, R., Darga, R., & Lauterbach, H. (2017). Pseudoimpactites in anthropocenically overprinted quaternary sediments. *Geophysical Research Abstracts*, 19, EGU2017–16545. Abgerufen von <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-16545.pdf>
- Isaenko, S. I., Shumilova, T. G., Ernstson, K., Shevchuk, S., Neumair, A., & Rappenglück, M. (2012). Carbynes and DLC in naturally occurring carbon matter from the Alpine Foreland, South-East Germany: Evidence of a probable new impactite. *European Mineralogical Conference*, 1, EMC 2012–217. Abgerufen von <http://meetingorganizer.copernicus.org/EMC2012/EMC2012-217.pdf>

- Liritzis, I., Zacharias, N., Polymeris, G.S., Kitis, G., Ernstson, K., Sudhaus, D., Neumair, A., Mayer, W., Rappenglück, M.A., & Rappenglück, B. (2010). The Chiemgau meteorite impact and tsunami event (Southeast Germany): First osl dating. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 10/4, 17–33.
- Möslein, S. (2009). *Grabungsbericht Stöttham TS, Dorfäcker 2007/008* (unveröffentlichter Ausgrabungsbericht; einsehbar im Landratsamt Traunstein).
- Neumair, A., Ernstson, K. (2013). Peculiar Holocene soil layers: Evidence of possible distal ejecta deposits in the Chiemgau region, Southeast Germany. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(S1), (76th Annual Meeting of the Meteoritical Society), Abstract #5057. Abgerufen von <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2013/pdf/5057.pdf>
- Pressemitteilung LfU Nr. 37, Dienstag, 24. August 2010. Abgerufen von https://www.lfu.bayern.de/presse/pm_detail.htm?ID=441
- Prochazka, V., & Trojek, T. (2017). XRF- and EMP- investigation of glass coatings and melted domains of pebbles from craters in Chiemgau, Germany. *48th Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract #2401. Abgerufen von <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2017/pdf/2401.pdf>
- Rappenglück, B., & Rappenglück, M. (2007). Does the myth of Phaethon reflect an impact? Revising the fall of Phaethon and considering a possible relation to the Chiemgau impact. *Ancient watching of cosmic space and Observation of astronomical phenomena. Mediterranean Archaeology and Archaeometry Special Issue 6.3 (Proceedings of the International Conference on Archaeoastronomy, SEAC 14th 2006, Rhodes 6-11 April 2006)*, 101–109.
- Rappenglück, B., Rappenglück, M., Ernstson, K., Mayer, W., Neumair, A., Sudhaus, D., & Liritzis, I. (2010). The fall of Phaeton: a Greco-Roman geomyth preserves the memory of a meteorite impact in Bavaria (south-east Germany). *Antiquity*, 84, 428–439.
- Rappenglück, B., Rappenglück, M.A., Ernstson, K., Mayer, W., Neumair, A., Sudhaus, D., & Liritzis, I. (2011). Reply to Doppler et al. ‚Response to ‚The fall of Phaeton: a Greco-Roman geomyth preserves the memory of a meteorite impact in Bavaria (south-east Germany)‘ by Rappenglück et al. (Antiquity 84)‘. *Antiquity*, 85, 278–280.
- Rappenglück, M., Schüssler, U., Mayer, W., & Ernstson, K. (2005). Sind die Eisensilizide aus dem Impakt-Kraterstreufeld im Chiemgau kosmisch? *European Journal of Mineralogy*, 17(1), 108.
- Rappenglück, M.A., Bauer, F., Hiltl, M., Neumair, A., & K. Ernstson, K. (2013). Calcium-aluminium-rich inclusions in iron silicide (xifengite, gupeiite, hapkeite) matter: Evidence of a cosmic origin. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(S1), (76th Annual Meeting of the Meteoritical Society), Abstract #5055. Abgerufen von <https://www.hou.usra.edu/meetings/metsoc2013/pdf/5055.pdf>
- Rappenglück, M.A., Bauer, F., Ernstson, K., & Hiltl, M. (2014). Meteorite impact on a micrometer scale: Iron silicide, carbide and CAI minerals from the Chiemgau impact event (Germany). *Proceedings of Problems and Perspectives of Modern Mineralogy (Yushkin Memorial Seminar – 2014)*, Syktyvkar, 106–107.
- Rösler, W., Hoffmann, V., Raeymaekers, B., Schryvers, D., & Popp, J. (2005). Carbon spherules with diamonds in soils. *Paneth Kolloquium*, Abstract PC2005 #026. Abgerufen von http://www.paneth.eu/PanethKolloquium/Archive_files/PanethKolloquium_2005.pdf

- Schryvers, D., & Raeymaekers, B. (2005). EM characterisation of a potential meteorite sample. *Proceedings of EMC, Antwerp*, vol. II, 859–860.
- Schüssler, U., Rappenglück, M. A., Ernstson, K., Mayer, W., Rappenglück, B. (2005). Das Impakt-Kraterstreufeld im Chiemgau. *European Journal of Mineralogy*, 17(1), 124.
- Shumilova, T. G., Isaenko, S. I., Makeev, B. A., Ernstson, K., Neumair, A., & Rappenglück, M. A. (2012). Enigmatic poorly structured carbon substances from the Alpine Foreland, Southeast Germany: Evidence of a cosmic relation. *43rd Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract & Poster #1430. Abgerufen von <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2011/pdf/1391.pdf>
- Stöffler, D., & Langenhorst, F. (1994). Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observation and theory. *Meteoritics*, 29, 155–181.
- Völkel, J., Murray, A., Leopold, M., & Hürkamp, K. (2012). Colluvial filling of a glacial bypass channel near the Chiemsee (Stöttham) and its function as geoarchive. *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF, 56(3), 371–386.
- Yang, Z. Q., Verbeeck, J., Schryvers, D., Tarcea, N., Popp, J., & Rösler, W. (2008). TEM and Raman characterisation of diamond micro- and nanostructures in carbon spherules from upper soils. *Diamond & Related Materials*, 17, 937–943.