

# Ein prominentes Streufeld mit Eisensiliziden und seine Beziehung zum bronzezeitlichen/eisenzeitlichen Chiemgauer Meteoriteneinschlagsereignis (Deutschland)

Kord Ernstson<sup>1</sup>, \*, Frank Bauer<sup>2</sup>, Michael Hiltl<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Philosophische Fakultät, Universität Würzburg, Würzburg, Deutschland

<sup>2</sup>Oxford Instruments GmbH Nano Science, Wiesbaden, Deutschland

<sup>3</sup>Carl Zeiss Microscopy GmbH, Oberkochen, Deutschland

## E-Mail-Adresse:

kernstson@ernstson.de (Kord Ernstson), frank.bauer@oxinst.com (Frank Bauer), hiltl\_m@online.de (Michael Hiltl)

\* Korrespondierender Autor

## Um diesen Artikel zu zitieren:

Kord Ernstson, Frank Bauer, Michael Hiltl. Ein prominentes Eisensilizid-Streufeld und seine Beziehung zum bronzezeitlichen/eisenzeitlichen Meteoriteneinschlag im Chiemgau (Deutschland). *Geowissenschaften*. Vol. 12, Nr. 1, 2023, S. 26-40. doi: 10.11648/j.earth.20231201.14

Eingegangen: 22. Januar 2023; Angenommen: 8. Februar 2023; Veröffentlicht: 24. Februar 2023

**Zusammenfassung:** Vor etwa 20 Jahren entdeckten Hobbyarchäologen und Heimatforscher das etwa 60 km x 30 km große Eisensilizid (FESI)-Streufeld in den Kreisen Chiemgau und Inn-Salzach-Kreis im Südosten Deutschlands. Sie bewiesen die Verbindung zwischen der FESI-Verteilung und den allgegenwärtigen Randwandkratern und deuteten auf ein Meteoriteneinschlagsereignis hin, das heute weithin unter dem Namen Chiemgau-Einschlag bekannt ist. Verbreitet im Streufeld und in Einzelfunden weit darüber hinaus haben sie tausende FESI-Partikel von Millimeter- bis Zentimetergröße mit einer Gesamtmasse von mehr als 2 kg geborgen und dokumentiert, wobei ein großer Klumpen von 8 kg als Einzelfund auffällt. Die Fundschicht befindet sich weitgehend einheitlich in einer Tiefe von 30 - 40 cm in einem glazialen Lockersedimentboden. Mikrosonden-, SEM-EDS-, TEM- und EBSD-Analysen bestimmten als Hauptminerale Gupeit und Xifengit, untergeordnet Hapkeit, Naquit und Linzhit. Neben den Hauptelementen Fe und Si der Matrix wurden bisher mehr als 30 weitere chemische Elemente adressiert, darunter Uran und verschiedene REE. Eingebaut in die FESI-Matrix sind die Karbidminerale Moissanit und Titankarbid als hochreine Kristalle, sowie Khamrabaevit, Zirkoniumkarbid und Urankarbid, ferner CAIs. SEM-Bilder weisen auf eine Schockmetamorphose hin. Der vorliegende Artikel beschreibt die Fundgeschichte dieses weltweit einmaligen FESI-Vorkommens mit den genauen Fundsituationen, sowie die sehr unterschiedlichen Morphologien der Fundpartikel mit den makroskopisch erkennbaren Bestandteilen und REM-EDS-Beispielen.

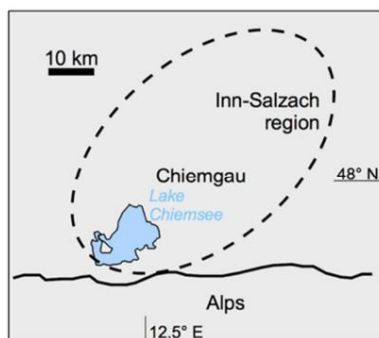
**Schlüsselwörter:** Eisensilizide, Gupeit, Xifengit, Hapkeit, Meteoriten, Chiemgauer Meteoriteneinschlag, Deutschland

## 1. Einleitung

Das Kraterstreufeld des "Chiemgau Impact" zeigt einen großen Meteoriteneinschlag im südostbayerischen Alpenvorland [1-3], wird in die Bronzezeit/Keltenzeit (900-600 v. Chr. [4]) datiert und umfasst mehr als 100 meist umrandete Krater, die in einem Gebiet von etwa 60 km Länge und ca. 30 km Breite (Abbildung 1). Sie wurden bestimmt, vermessen, kartiert und kontinuierlich geologisch-mineralogischen, petrographischen, geomorphologischen und geophysikalischen Untersuchungen unterschiedlicher Intensität mittels Geländeaufnahmen, dem Studium von Luftbildern und historischen Karten sowie dem Digitalen Geländemodell (LIDAR) unterzogen [5]. Der

Kraterdurchmesser liegen zwischen wenigen Metern und mehreren hundert Metern. Es wird angenommen, dass ein Doublet-Einschlag am Grund des Chiemsees einen riesigen Tsunami ausgelöst hat, der in weit verbreiteten Tsunami-Ablagerungen rund um den See sichtbar ist [6], und kürzlich wurde ein Krater mit 1,3 km Durchmesser nachgewiesen [7]. Geologisch kommen die Krater in pleistozänen Moränen und fluvioglazialen Sedimenten vor. Die Krater und die umliegenden Gebiete weisen starke Verformungen des quartären Kopfsteinpflasters und Felsbrocken, Aufprallschmelzgestein und verschiedene Gläser, starke schockmetamorphe Effekte und geophysikalische (Schwerkraft, geomagnetische, Sediment-Echolot, Bodenradar) Anomalien auf. Impakt-Ejekta-Lagerstätten in einer katastrophalen Mischung enthalten polymikte Brekzien, Schockgesteine, Schmelzgesteine und Artefakte aus der Steinzeit und der Bronzezeit/Keltik

Ära Menschen [8]. Der Einfluss wird durch das reiche Vorkommen von metallischen, glasigen und kohligten Kügelchen, Akkretionslapillen, Mikrotekten [9] und begleitenden Epiphänomenen, z. B. Säureeffekten, weit verbreiteter Gesteinsverflüssigung [10] und einer neuen Art von Kohlenstoffimpaktiten, die Diamanten enthalten, untermauert und Karabiner [11]. Der kosmische Körper, der die Katastrophe im Chiemgau verursachte, war wahrscheinlich ein ziemlich poröses Objekt, das aus verschiedenen Komponenten bestand, die in der Atmosphäre auseinanderbrachen [2].



**Abbildung 1.** Lagekarte für das elliptische Streufeld des Chiemgau-Impaktkraters und Eisensilizidkonzentrationen gemäß aktueller (2022) Dokumentation.

Die Entdeckung des Kraterstreufeldes vor etwa 20 Jahren durch ein Team von Lokalgeschichtsforschern und Amateurarchäologen war neben der großen Anzahl von Kratern im Wesentlichen die Ausgrabung unbekannter, manchmal gehäufte metallischer Partikel im Boden, die anscheinend weit verbreitet waren mit den Kratern und wurden schnell als Eisensilizidminerale Gupeit und Xifengit entlarvt, die auf der Erde praktisch nicht vorhanden sind. Diese Erkenntnisse standen am Beginn der Erforschung des Chiemgau-Impakts [12-15] und haben sich im Laufe der Jahre und im Zuge umfassender Analysen immer mehr als einer der Schlüssel zum Geschehen herausgestellt.

Dieser Artikel berichtet über die sehr wechselvolle Geschichte der Entdeckung und Erforschung der in dieser Masse weltweit einzigartigen Eisensilicide [16], die mit vielen Widrigkeiten zu kämpfen hatte, aber letztlich zum heutigen Stand der Forschung geführt hat

mit überzeugenden Merkmalen einer neuen Klasse von Eisensilizid-Meteoriten.

Der Einfachheit halber werden wir im Folgenden, wo es sinnvoll erscheint, für den Begriff Eisensilizid(e) die Abkürzung FESI verwenden.

## 2. Materialien und Methoden

Die Entdecker, überzeugt nach den Fundsituationen von einem außerirdischen Ursprung der Eisensilicide, setzten ihre systematische Geländeerkundung auch in der Folgezeit fort und dehnten Stichproben weit über das elliptische Streufeld hinaus bis nach Frankreich und Tschechien aus (siehe 3. Ergebnisse). Neben den Funden der Forscher vor Ort kamen Beiträge aus der Bevölkerung, die durch Vorträge und Veröffentlichungen auf das eigentümliche Material aufmerksam geworden war. Die umfangreiche mineralogisch-petrographisch-geochemische Untersuchung der schlagbegleitenden Materialien wurde insbesondere von einer gründlichen Analyse der Eisensilicide mit Lichtmikroskopie, REM, TEM und EBSD an den Instituten Oxford Instruments und Zeiss begleitet [17, 18].

## 3. Ergebnisse

### 3.1. Finden Sie Situationen – regional und lokal

Abbildung 2 zeigt die Karten der Gebiete, in denen die Forscher vor Ort ihre Suche nach Eisensiliciden ausgeweitet haben. In Frankreich wurde an fünf Teststandorten nichts gefunden, und in Richtung Osten gab es einen seltenen Fund in der Nähe der Stadt Ansbach, der sich auf einer Linie zu einer bestimmten Anhäufung in der Nähe der Stadt Regensburg und dann zum Kraterstreufeld der fortgesetzte Chiemgauer Einschlag. Im Kraterstreufeld selbst sind die Eisensilicide durchweg gut nachweisbar. Drei Teststandorte jenseits der tschechischen Grenze ergaben zudem nach kurzer Zeit Eisensilizidanreicherungen in der bereits bekannten Bodentiefe mit Partikelgrößen bis zu 2 mm.

Angesichts der Größe des Feldes, in dem die Eisensilicide vorkommen (Abbildung 4), ist es verständlich, dass keine flächendeckende Beprobung des Untergrunds durchgeführt wurde und unterschiedliche Auswahlkriterien verwendet wurden.

Ein wesentliches Kriterium basierte von Anfang an auf der Beobachtung der Forscher vor Ort, dass sich Eisensilicide zunehmend in der Nähe der ursprünglich dokumentierten rund 80 Krater konzentrierten, was ursprünglich die Annahme eines gemeinsamen Ursprungs in einem Meteoriteneinschlagsereignis überhaupt erst aufkommen ließ. Konfrontiert mit einer anfänglichen Ablehnung eines meteoritischen Ursprungs und Deklaration der Funde als Pseudometeorite und aus der Industrie stammend, verbrachten die Forscher vor Ort viel Zeit mit sorgfältiger Probenahme an ausgewählten Stellen, was eine solche Erklärung in vielen Fällen absurd machte.

Abgesehen von der ganz besonderen Fundsituation im Tiefenboden wie in Abbildung 5 dargestellt, wurden Eisensilicide direkt unter einem mittelalterlichen Silberfund gefunden, den die Hobbyarchäologen nach ihrem Metalldetektorsignal zunächst geborgen hatten, unter den Mauerresten der mittelalterlichen Burg von Die Stadt Burghausen, unter den Wurzeln uralter Bäume in den sogenannten 1000-jährigen Wäldern bei Burghausen, in Wiesenlandschaften auf der Höhe der

ersten Alpenvorland und aus Moorgewässern gefischt. Die „rote Schicht“ in Abbildung 5 ist für mehrere Fundsituationen, die eine menschliche Ablagerung ausschlossen, insofern bedeutsam, als die Hauptmasse der Eisensilizidpartikel von dieser extrem verdichteten Schicht bedeckt war, die eine mit Klinker vergleichbare Härte aufwies und konnte nur vom Pflug auf dem Feld gekratzt werden. Eine Erklärung sieht im Zusammenhang mit dem Aufprallereignis ein extremes Airburst-Braten der obersten Lehmschicht.

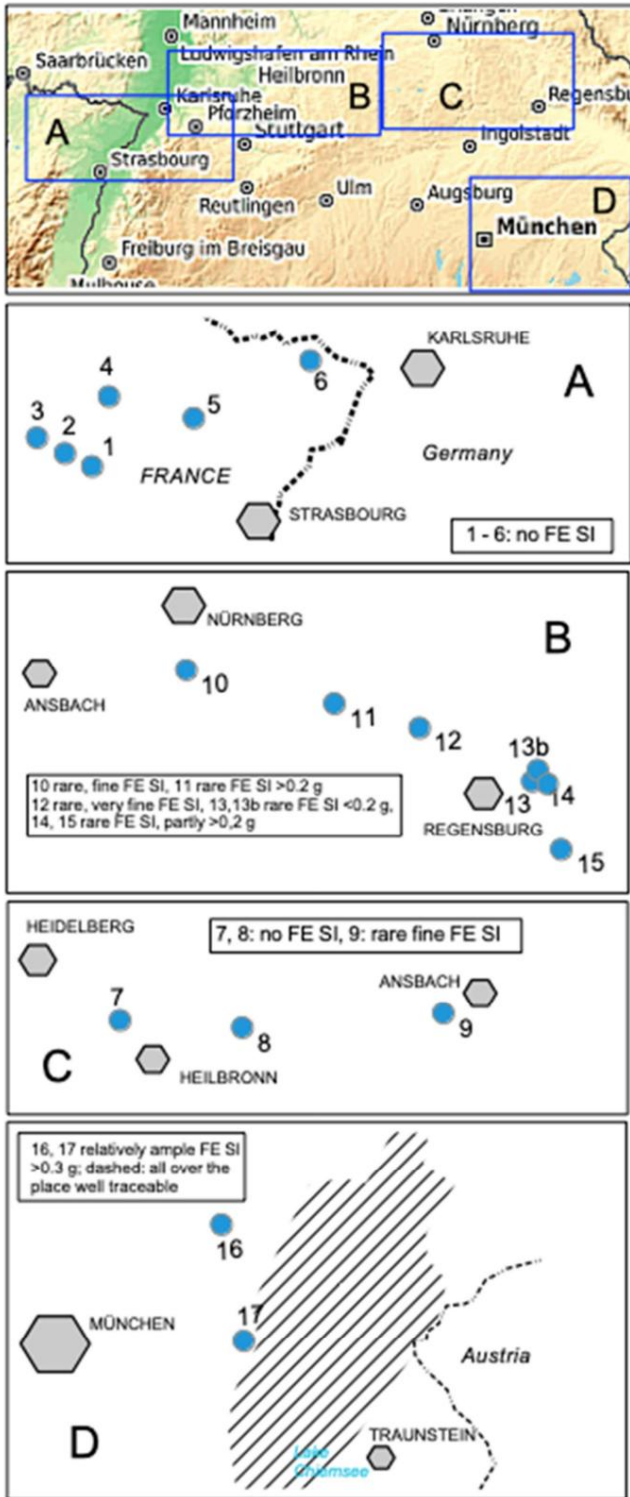


Abbildung 2. Lagepläne für die Suchgebiete der Lokalhistoriker zu Eisensiliziden.

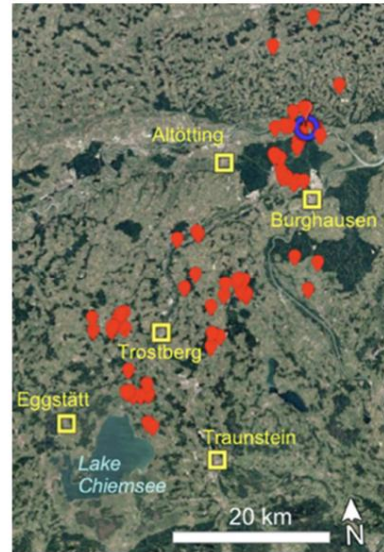


Abbildung 3. Lageplan (Google Earth) für die wichtigsten FESI-Konzentrationen. Blauer Kreis: Fund der prominentesten FESI-Häufung. Siehe auch Abbildungen 4 und 5.

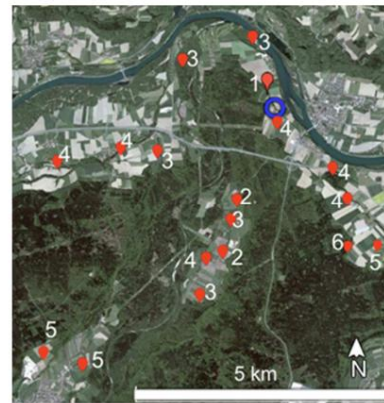


Abbildung 4. Ausgewählter Ausschnitt der Karte in Abbildung 3 mit einer (subjektiven) Einstufung der Wichtigkeit der Stätten von 1 = schwach bis 6 = ausgezeichnet.

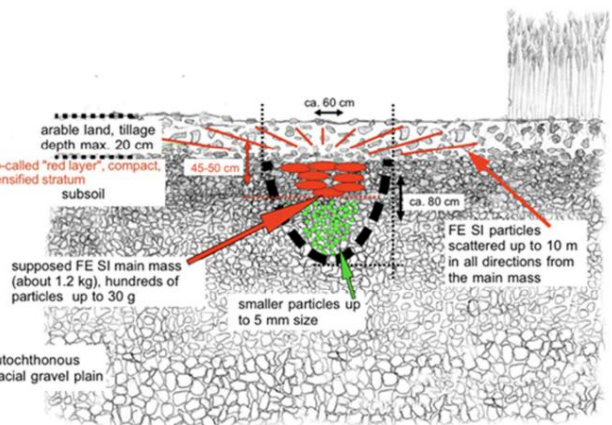


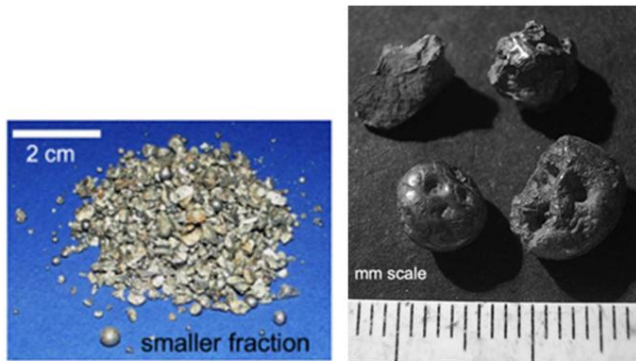
Abbildung 5. Fundskizze mit den Hauptparametern der bislang bedeutendsten FESI-Anreicherung, in den Abbildungen 4 und 5 mit dem blauen Kreis markiert. Dieser Fund (Nr. 4) umfasst etwa 1000 Partikel bis zu einer Größe von 2 mm und etwa 100 bis zu maximal mehrere Zentimeter bei einem Gesamtgewicht von 2.100 g. Grüne Partikel bis 0,5 cm Größe, rote Partikel bis 5 cm Größe.

Auch Landwirte waren hilfreich, wenn sie mit Traktoren die Oberbodenschichten des Ackers abrissen und Eisensilizidpartikel in größeren Kratern freilegten, z. B. dem 50 m großen Halbkrater Aiching

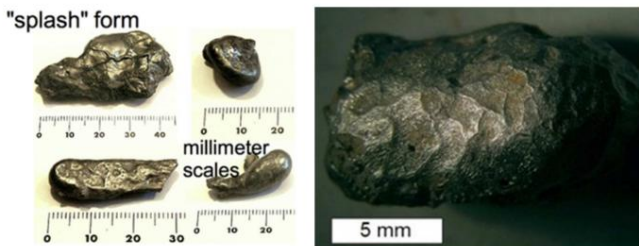
der Talkante des Inn [7]. Der starke Magnetismus der Partikel war auch hilfreich bei der Ausgrabung durch einen starken Magneten.

### 3.2. Die Chiemgauer Schlageisensilicide – Größen und Formen

Die Gesamtausbeute von mehreren 1000 Eisensilicid-Partikeln, die von den Forschern vor Ort gewonnen wurden, liegt bei über 2 kg, einschließlich der kleinsten Partikel von weniger als 0,2 g. Die Oberflächen zeigen metallischen Glanz und sind praktisch frei von Korrosion. Sie kommen oft in aerodynamisch geformten Formen wie Kugeln, Knöpfen und Tropfen vor, aber auch als Splitter und Stücke bis zu einem 8 kg schweren Brocken.



**Abbildung 6.** Der kleinere Anteil der Eisensilicide aus dem Streufeld des Chiemgau-Impakts. Neben einer großen Anzahl zersplitterter Partikel treten auch perfekte Kugeln auf.



**Abbildung 7.** Links: Aerodynamisch geformte FE-Si-Partikel in Spritzerform. Rechts: FESI-Partikel mit regmaglyptischer Oberfläche, die an Ablationsstrukturen erinnert Meteoriten.



**Abbildung 8.** Eisensilicidpartikel mit angelagerten Mineralkristallen (oben) Unten: Eisensilicid mit angelagerten mikrosphärolithischen Partikeln. Probengröße 8 mm.



**Abbildung 9.** Der 8 kg schwere Eisensilicidbrocken aus dem Streufeld des Chiemgau-Impakts.

Der 8 kg schwere Brocken wurde vor etwa 30 Jahren bei Ausgrabungsarbeiten nahe der Gemeinde Grabenstätt am Chiemsee ausgegraben, von der Familie des Finders als merkwürdiges Objekt vergessen und nach dem Zusammenhang mit Eisensiliciden den Impaktforschern zur Untersuchung übergeben, die zwischenzeitlich bekannt wurde, wurde vermutet. Die FESI-Zusammensetzung wurde schnell mit dem Nachweis der Mineralien Xifengit, Gupeit und Hapkeit und anderen exotischen Komponenten bestätigt.

Bisher nicht weiter untersucht wurden Funde, die von den ursprünglichen Entdeckern als Kombimaterial beschrieben wurden, das Eisenpartikel und FESI-Partikel als Plättchen und Kügelchen in einer porösen Matrix aus den Elementen Ca, Fe, untergeordnetem Si und Al enthält (Abbildung 10). Ebenfalls noch nicht weiter untersucht sind Kalksteinpflaster mit äußerlich sichtbaren FESI-Einschlüssen (Abbildung 10).

Akkretionäre Lapilli (Abbildung 11) können aufgrund ihres magnetischen FESI-Gehalts leicht mit einem starken Magneten aus einem lockeren Boden extrahiert werden.



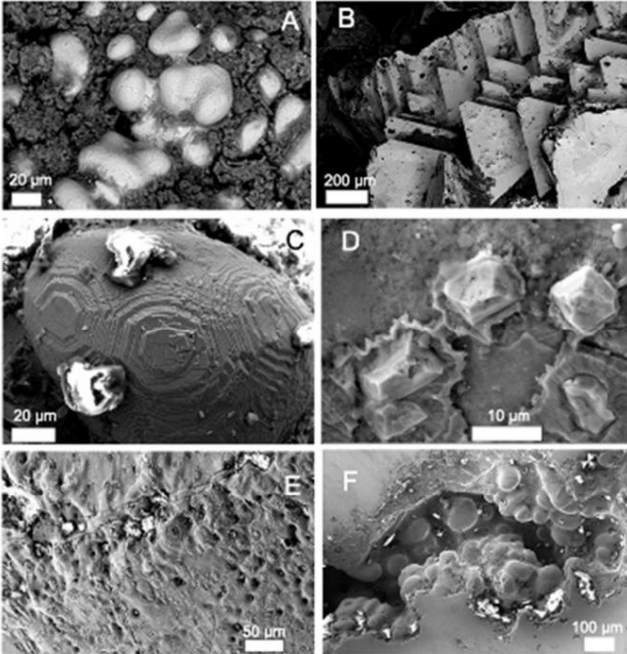
**Abbildung 10.** Oben: Das sogenannte Kombi-Material der frühen Untersuchungen mit FESI-Plättchen und -Kügelchen. Unten: Ein Kalksteinblock mit Einschlüssen winziger FESI-Partikel (Pfeile).



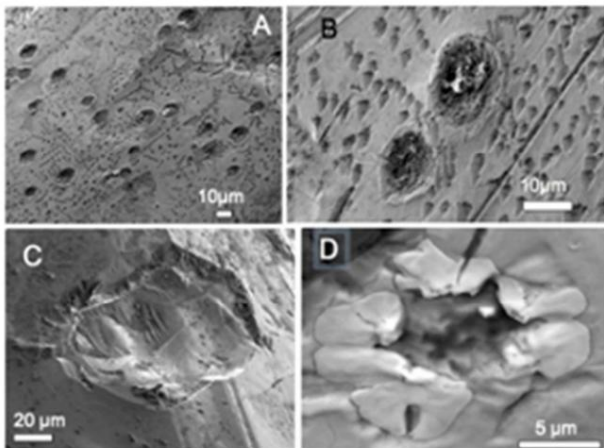
**Abbildung 11.** Akkretions-Lapilli aus dem Streufeld des Chiemgau-Impakts und ein geschnittener Lapilli mit einem Kern aus Eisensilicid.

### 3.3. Eisensilizidpartikel unter dem SEM

Tatsächlich geben die hier gezeigten Aspekte (Abbildungen 12, 13) nur einen stark eingeschränkten Einblick in die immense Vielfalt an Texturen und Komponenten der beprobten Eisensilizide.



**Abbildung 12.** Ausgewählte SEM-Bilder von Merkmalen mit mehreren Varianten von FESI-Partikeln. A, B: Amöbenartige und pyramidenförmige Eisensilizide in weitgehend unstrukturiertem FESI. C: Kugelförmiges FESI-Partikel mit seltsamer Kristallform. D: Zirkonkristalle, die offensichtlich auf eine plastische oder flüssige FESI-Matrix aufgeschlagen sind, die während der Störung eingefroren zu sein scheint. E: Mikrostöße in eine plastisch verformte Matrix. F: FESI möglicherweise mit beginnender (und dann gestoppter) Sezession von kugelförmigen Schmelzpartikeln.



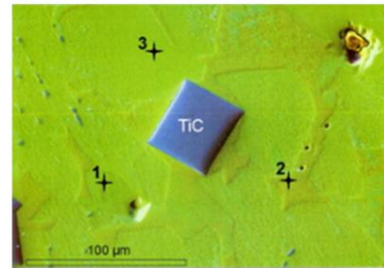
**Abbildung 13.** A, B: Das Auftreten der vielen Mikrometer großen Randkrater auf der Oberfläche eines Eisensilizid-Partikels könnte auf ein hochenergetisches kosmisches Bombardement hindeuten, und die vermeintlichen offenen Abdrücke verlorener Zirkonkristalle könnten Zeugen eines Schocks sein Kollision im Weltraum. C: Ein winziger Impact-Spallationskrater in einer spröden FESI-Oberfläche. D: Ein Einschlagsmikrokrater in einem weicheren FESI-Target.

### 3.4. Die Eisensilizide-Mineral-Ansammlung im Chiemgau-Impakt-Streufeld

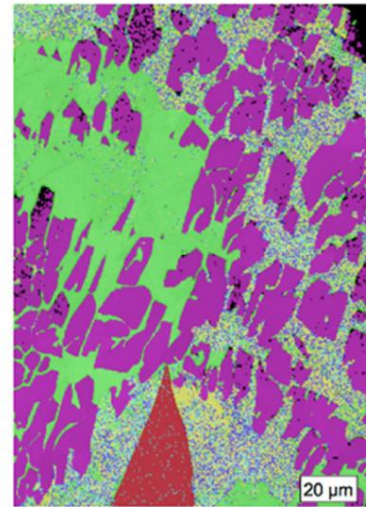
Die ungewöhnlichen metallischen Funde, die von lokalen Forschern in Verbindung gebracht werden

mit Dokumentation der anfänglich etwa 80 Krater wurden schnell als Eisensilizide mit den Mineralien Gupeit ( $\text{Fe}_3\text{Si}$ ) und Xifengit ( $\text{Fe}_5\text{Si}_3$ ) [12] erkannt (Abbildungen 14-16). Spätere detaillierte Analysen verschiedener FESI-Proben fügten Naquit ( $\text{FeSi}$ ), Linzhit ( $\text{FeSi}_2$ ) und Hapkeit-Polymorphe ( $\text{Fe}_2\text{Si}$ ) hinzu (Abbildung 17, Abbildung 18). Insbesondere Hapkeit wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt [19], nachdem es erstmals auf der Erde im Mondmeteoriten Dhofar 280 nachgewiesen wurde [20, 21]. Aus den SEM-, TEM- und EBSD-Untersuchungen wurde die Existenz des Eisensilizids  $\text{Fe}_2\text{Si}$ , Mineral Hapkeit, als ein sehr wichtiges Mineral, das zu den Chiemgauer Eisensiliziden beiträgt, deutlich.

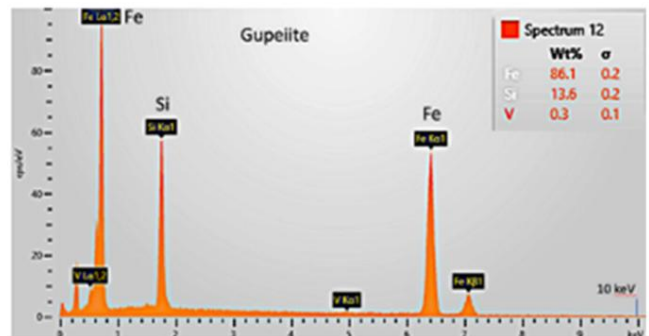
Wie der Hapkeit weist auch der Gupeit eine Verwandtschaft zu meteoritischen Mineralen auf, was der Vergleich mit der Zusammensetzung des Suessits in zwei Meteoriten zeigt (Abbildung 19).



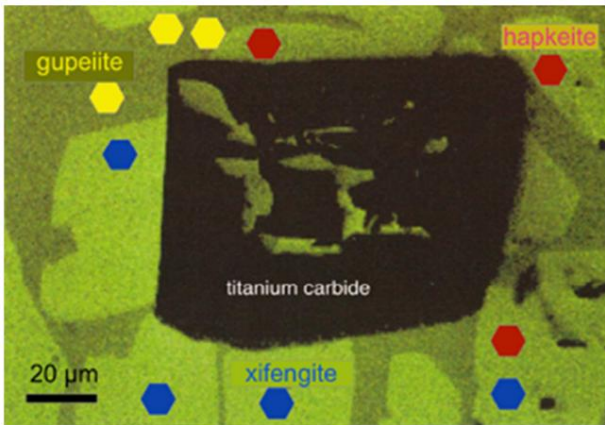
**Abbildung 14.** Titancarbid (TIC)-Kristall in einer Matrix aus Eisensiliziden; 1:  $\text{FeSi}$  (Naquit), 2:  $\text{Fe}_3\text{Si}$  (Gupeit), 3:  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$  (Xifengit). Für TIC siehe 3.4.2.



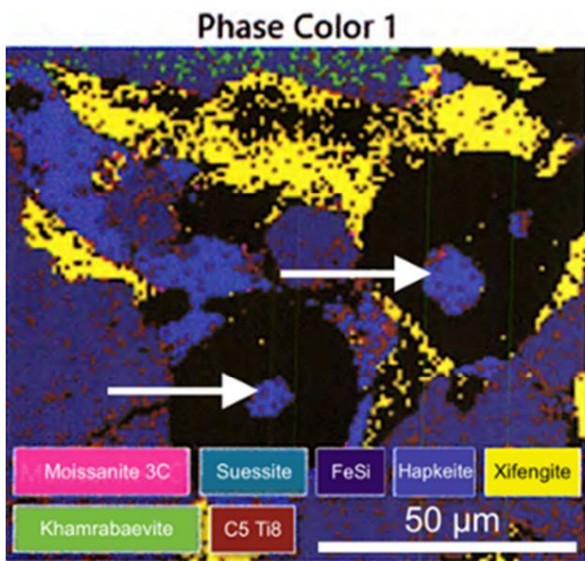
**Abbildung 15.** EBSD-Bild einer FESI-Mineralansammlung; Rot = Ferrosilite (Naquit,  $\text{FeSi}$ ), Grün = Ferrosilicide (Linhit  $\text{FeSi}_2$ ), Gelb = Gupeit, Magenta = Xifengit als Hauptphasen in einer Eisensilizidmatrix.



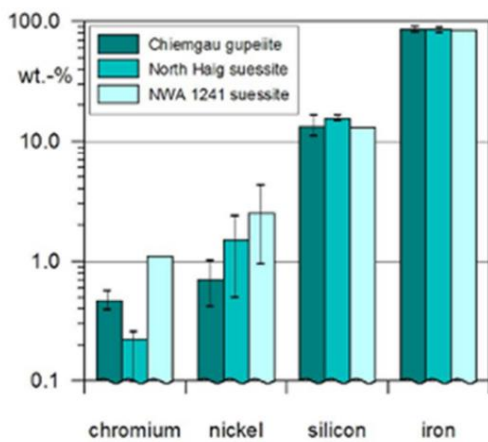
**Abbildung 16.** EDS-Spektrum von Gupeit in einem FESI-Partikel.



**Abbildung 17.** Hapkeite in FESI-Mineral-Ansammlungen. Das Hapkeite zeigt sich mit Gupeiit und Xifengit verwachsen, um die Eisensilicidmatrix zu bilden, die einen Titancarbid (TiC)-Kristall beherbergt.



**Abbildung 18.** Die Hapkeite-Phase ist ebenfalls deutlich dokumentiert (Pfeile) und erscheint teilweise wie das Eigelb von Spiegeleiern innerhalb einer bisher nicht identifizierten Calciumsilikat-Phase, möglicherweise ein Wollastonit-Polymorph. In der Literatur wurde über zwei Hapkeite-Polymorphe, eine kubische und eine trigonale Modifikation, berichtet [18], und hier wurde das trigonale Polymorph (SG P3m1, Nr. 164 [22, 23]) etabliert. - Suessite ist nur mit wenigen Grafen vertreten.

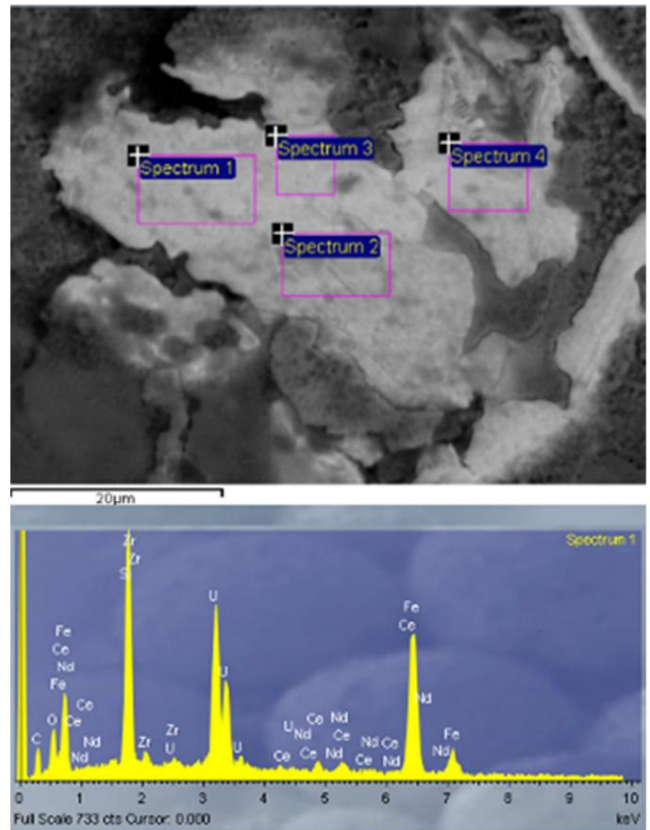


**Abbildung 19.** Ein Gupeiit-Partikel aus dem Streufeld des Chiemgau-Impakts mit sehr ähnlicher Zusammensetzung wie der Suessite der Meteoriten North Haig und NWA 1241. Daten aus [24].

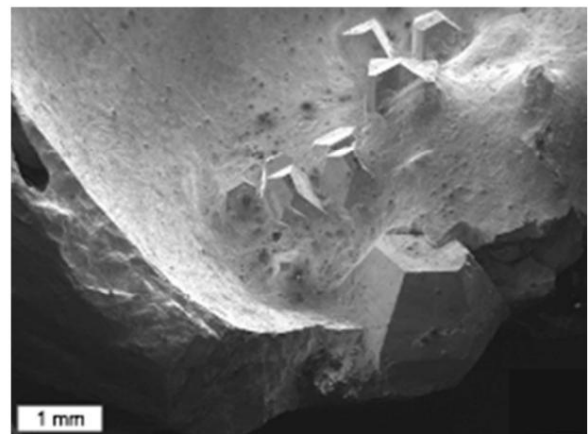
### 3.5. Die Chiemgauer Schlageisensilizide – Begleitminerale und Elemente

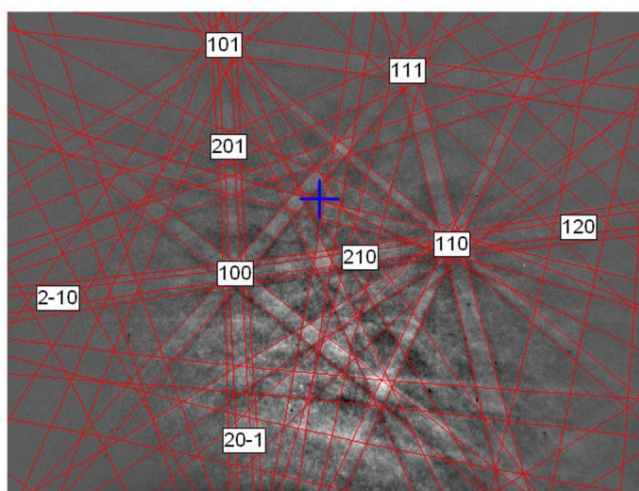
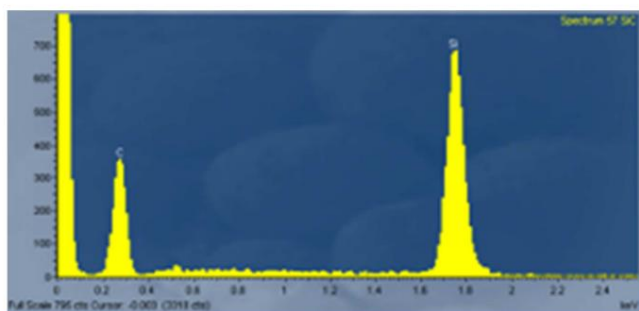
#### 3.5.1. Besondere Elemente

Mehr als 30 chemische Elemente wurden bisher mit dem EDS in Eisensilicidproben aus dem Streufeld des Chiemgau-Impakts nachgewiesen. Dazu gehören die REE Yttrium, Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Gadolinium und Ytterbium, aber nur wenige Nickel (siehe auch Abbildung 19). Einige weitere Elemente, die die Gesamtzahl auf etwa 40 Elemente erhöhen, sind statistisch weniger zuverlässig. Uran ist ziemlich häufig, häufig in Verbindung mit Zirkonium und Cer/Neodym (Abbildung 20).



**Abbildung 20.** Signifikantes Uran in einem FESI-Partikel mit etwas REE. Der Sauerstoffpeak kann vorerst nicht zugeordnet werden; der Kohlenstoffpeak kann mit dem Uran und Zirkonium zu den Zr- und C-Carbiden gehören, die in 3.6.2 besprochen werden.





**Abbildung 21.** Oben: SEM-Bild der Moissanit-Kristalle in Abbildung 8 (oben links), die aus der FE-SI-Matrix herausragen. Mitte: EDS-Spektrum von Moissanit-SiC in einem FESI-Partikel. Die extreme Reinheit ist offensichtlich. Unten: Elektronenrückstreuung von kubischem Moissanit aus dem Chiemgauer Streufeld. Bilder: Carl Zeiss Microscopy und Oxford Instruments.

Anlass zur Diskussion ist die Beobachtung, dass außer zwei EDS-Spektren, die Spuren von Thorium bzw. fragwürdigem Polonium zeigen, keine Uran-Zerfallsprodukte einschließlich Blei existieren. Das völlige Fehlen von Blei in sehr vielen EDS-Spektren ist überraschend und muss weiter untersucht werden.

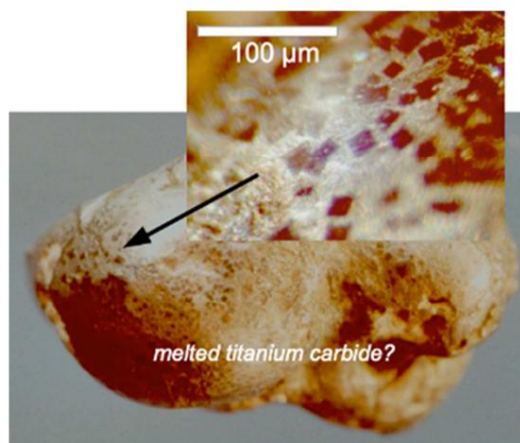
### 3.5.2. Karbide Moissanit, Titankarbid, Khamrabevit, Zirkoniumkarbid, Uran Hartmetall

Ein wesentliches Merkmal aller analysierten Eisensilizidpartikel ist ihr Gehalt an Titankarbid und Siliziumkarbid.

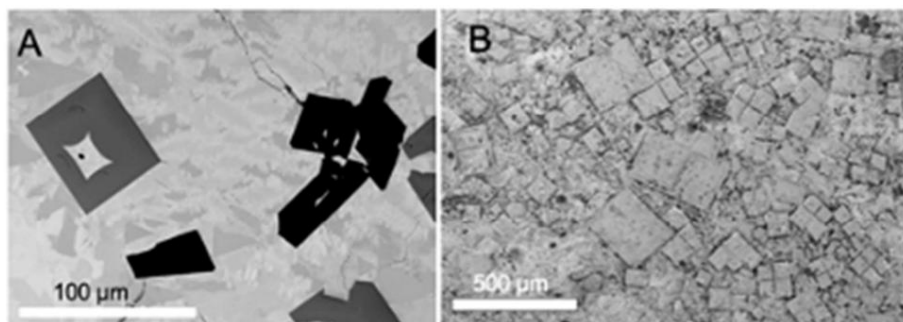
Sie treten als hochreine Kristalle (Abbildung 14, Abbildung 21) und feiner verteilt in der Matrix (Abbildungen 14, 22, 23) auf.

Das SiC wurde als kubisches Moissanit-Mineral analysiert – (b) 3C-SiC. Natürlicher Moissanit ist extrem selten und kommt nur in wenigen Gesteinen des oberen Mantels (z. B. Kimberlite) und in Meteoriten vor. Dabei ist die kubische Polymorphie im Vergleich zur meistzitierten hexagonalen Form wiederum viel seltener.

Das Titankarbid tritt im Allgemeinen als (Ti, V, Fe) C-Mineral Khamrabaevit auf (Abbildung 18, Abbildung 24), und es wurde auch gezeigt, dass die unterstöchiometrische Form von  $TiC_{0,63}$  existiert ( $C_5 Ti_8$ , Abbildung 18). Die Kristalle sind reich an FESI-Partikeln und können in einigen Fällen im Feld identifiziert werden, wenn sie aus der FESI-Matrix herausragen (Abbildung 22). In SEM-Bildern können sie als einzelnes Individuum auftreten, Moissanit-Kristalle verbinden oder dicht gepackt sein (Abbildung 23).



**Abbildung 22.** FESI-Partikel mit Titankarbid TIC, das aus der Matrix herausragt - Die Schmelztemperatur von TIC beträgt 2.890 K. Modifiziert nach [12].



**Abbildung 23.** SEM-Bilder: Verschiedene Aspekte von Titankarbid/Khamrabaevit-Kristallen in FESI-Matrix. Links (gräulich) in Begleitung mit Moissanit (schwarz); rechts dicht gedrängt.

In einer kürzlich durchgeführten Analyse des 8 kg schweren FESI-Boulders [18] wurden Zirkonium- und Urankarbid identifiziert, die dem Titan hinzugefügt wurden und Siliziumkarbid (Abbildungen 25, 26).

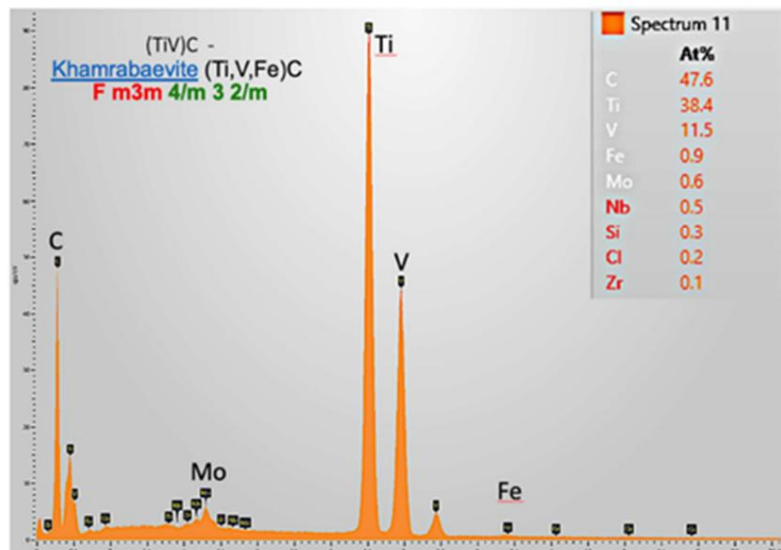


Abbildung 24. EDS-Spektrum von Khamrabaevit im 8-kg-FESI-Block (Abbildung 12).

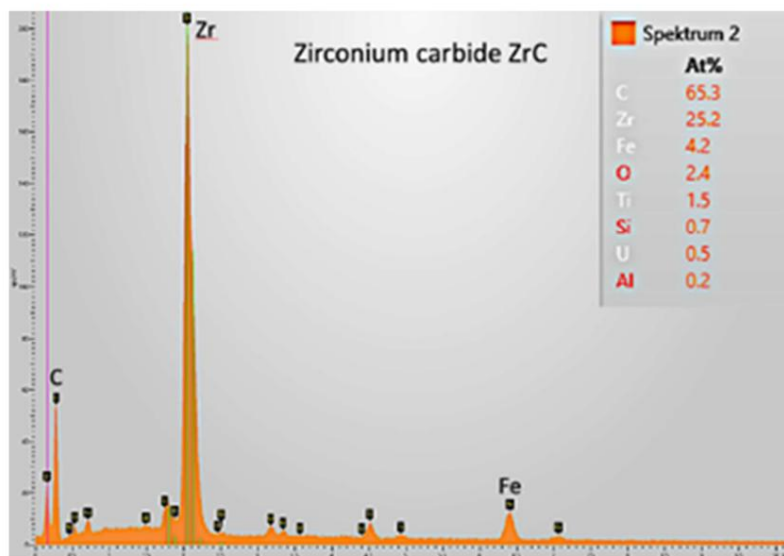


Abbildung 25. EDS-Spektrum von Zirkoniumcarbid im 8-kg-FESI-Boulder.

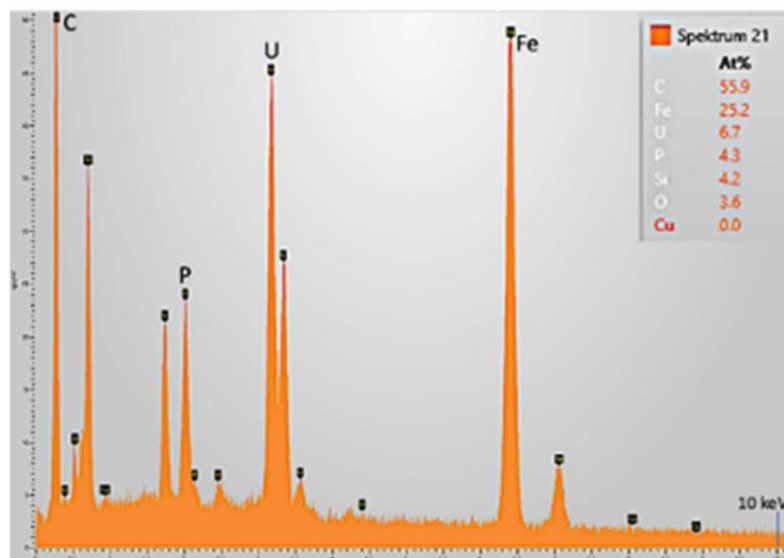
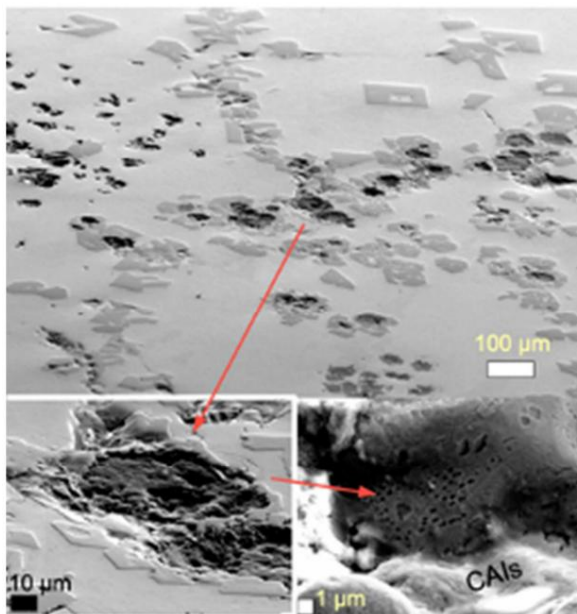


Abbildung 26. EDS-Spektrum von Urancarbid im 8 kg schweren FESI-Boulder. Phosphor und Eisen als mutmaßliche Carbide können der Carbidgefamilie hinzugefügt werden.





**Abbildung 27.** Eisensilizid-Matrix (hellgrau) mit Einschlüssen aus Titancarbid TIC/ Khamrabaevit (Ti, V, Fe) C und Moissanit-SiC (dunkelgrau) und schwarzen Flecken aus C-Film (Graphit, amorpher Kohlenstoff?) und hellem Rand CAIs.

### 3.5.3. CAIs – Calcium-Aluminium-Einschlüsse

Neuere Analysen [17] haben gezeigt, dass die Eisensilizide aus dem Streufeld des Chiemgau-Impakts CAIs mit den Mineralien  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ , Calciummonoaluminat und  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5$ , Dicalciumdialuminat enthalten (Abbildung 27). Das monokline Hochtemperatur- (>1.500 °C) Niederdruck-Dimorph von  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ , Mineral Krotit, wurde zuerst in einem CAI aus dem CH-Chondriten NWA 470 identifiziert [25] und später [26, 27] als in einem CAI vorkommend berichtet im kohligen Chondrit-Meteoriten NWA 1934.

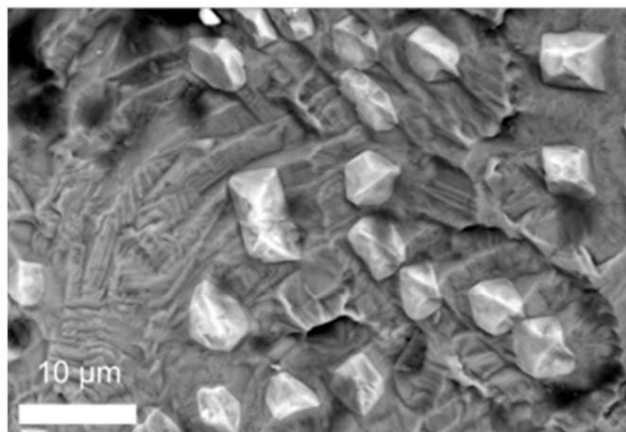
### 3.5.4. Zirkon, Baddeleyit

Das Mineral Zirkon  $\text{ZrSiO}_4$  ist ein häufiger Bestandteil in den Eisensiliziden des Impact-Streufeldes (Abbildungen 28-30) und kann in vielen Fällen anhand der Kristallform in den SEM-EDS-Aufnahmen identifiziert werden. Kommt nur das Element Zirkonium im Spektrum vor, sind auch andere Minerale mit anderen elementaren Verbindungen möglich, für die derzeit weitere Untersuchungen laufen. Bisher wurde Zirkoniumcarbid  $\text{ZrC}$  (3.6.2) identifiziert. Baddeleyit  $\text{ZrO}_2$  wäre ein Kandidat, zumal das Mineral als weit verbreiteter und empfindlicher Indikator für Meteoritenbeschuss in Planetenkrusten beschrieben wird [28]. Bezeichnenderweise kommt Zr in FESI-Partikeln hauptsächlich in Kombination mit Uran vor, das bekanntermaßen für die radiometrische Datierung über die U-Th-Pb-Zerfallsreihe der ältesten zirkonhaltigen Gesteine verwendet wird. Die Zirkon-Uran-Kombination unterscheidet sich hier, da die Zerfallsprodukte Thorium und Blei überraschenderweise nicht in den EDS-Spektren vorkommen (su). Wie oben erwähnt, wurde Urancarbid als Begleitmineral von Zirkoniumcarbid identifiziert (Abbildungen 25, 26).

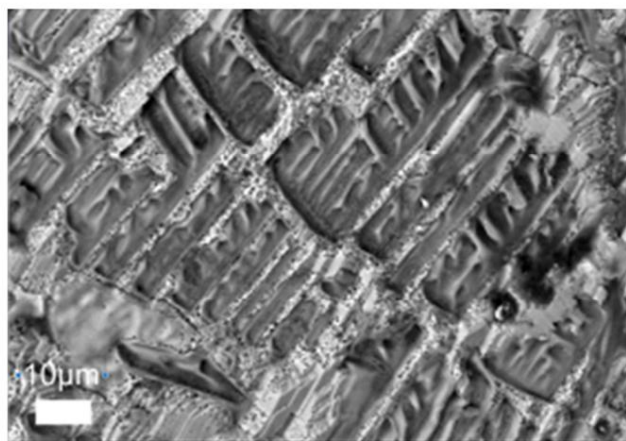
Zirkonkristalle sind auch im FESI im REM-Bild auffällig, in dem sie offenbar auf eine stark plastische oder gerade aufgeschmolzene FESI-Matrix aufgeprallt sind (Abbildung 12 D), wodurch die Bewegung der Kraterbildung abrupt eingefroren erscheint. Wann und wo dieser fast kuriose Vorgang stattfand, bleibt unbeantwortet, aber a

Schockeffekte wie das Einfrieren von Wasser unter Schockwellenkompression [29] oder allgemein Phasenänderungen in schockbelasteten Flüssigkeiten (z. B. [30]) können diskutiert werden (siehe auch unten).

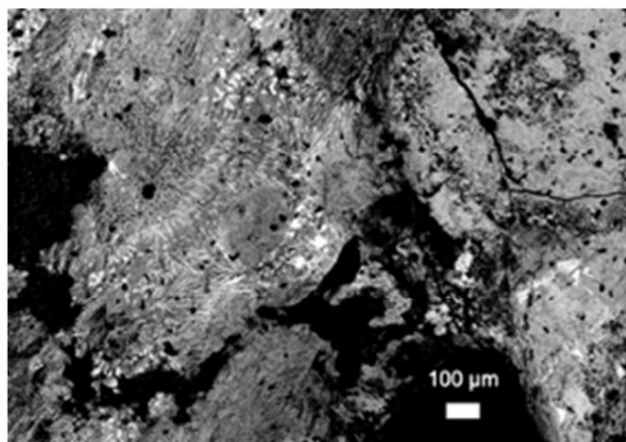
Abbildung 29 zeigt Exsolutionlamellen von Zirkon (Zirkon oder/und Baddeleyit) in FESI. Ein stärkeres Verwachsen von fächerartiger und wurmartiger Form von Zirkon/Baddeleyit in FESI wird häufig beobachtet (Abbildung 30).



**Abbildung 28.** Zirkon- oder Baddeleyit-Kristalle in eigenartig texturierter Eisensilizid Matrix.

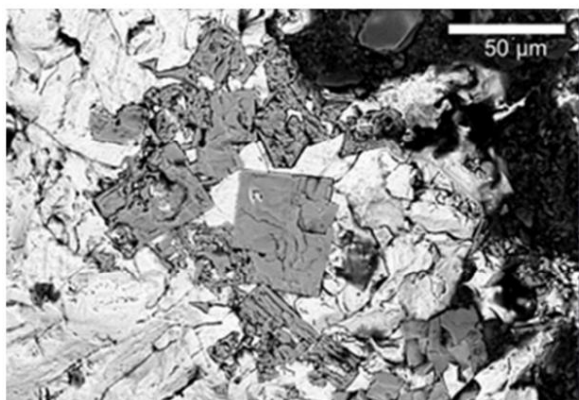


**Abbildung 29.** Auflösungsmerkmale von Zirkonium (Zirkon oder/und Baddeleyit) in Eisensilicid.

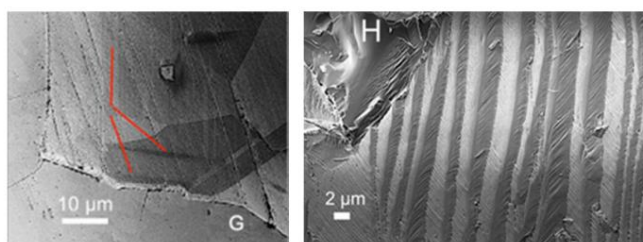
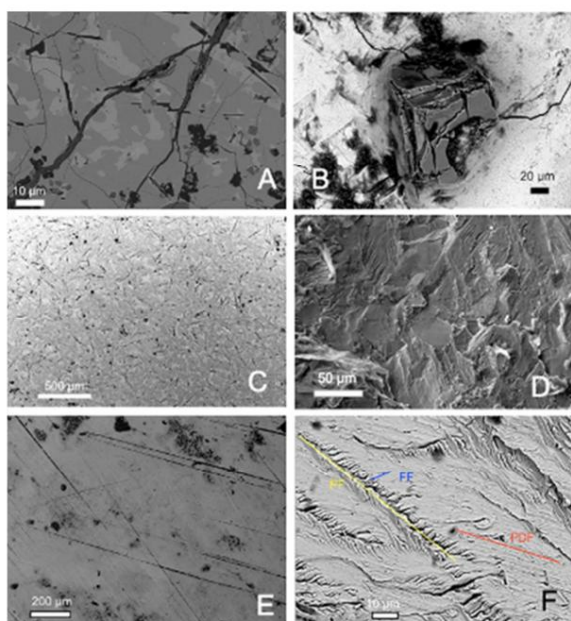


**Abbildung 30.** Verwachsung von fächerartiger und wurmartiger Form von Zirkon/Baddeleyit in FESI.

### 3.6. Nachweis von Schockeffekten



**Abbildung 31.** Mikrobrekzie von gebrochenen TiC- und SiC-Komponenten.



**Abbildung 32.** Wahrscheinliche Schockmerkmale in Moissanit aus dem Streufeld des Chiemgau-Impakts, gesehen im SEM. A: Offene Frakturen in unregelmäßigen Mustern. B: TiC-Kristall bricht stark. Die offenen Risse weisen auf eine Zugverformung hin, die sich am besten durch Stoßabplatzungen erklären lässt. C: Mehrere Sätze von subplanaren offenen Frakturen, die auch auf einen Schock hinweisen können, der mit planaren Schockfrakturen (PF) in Quarz vergleichbar ist. D: SiC-Bruch zeigt mehrere Sätze von eng beabstandeten (in der Größenordnung von 1 &mgr;m) planaren Verformungsmerkmalen. E: Auf der polierten SiC-Ebene betont das SEM die große Ähnlichkeit mit den bekannten planaren Deformationsmerkmalen (PDFs) in Silikatgesteinen als Hinweis auf Schockmetamorphose. F: Erst kürzlich als Schockeffekt in Quarz vorgeschlagen: Möglicherweise ähnliche Federmerkmale FE (oder Federlamellen) in SiC (siehe Text), die an planare Brüche PF grenzen. Eine vorgeschlagene Stoßinventur wie in Quarz wird durch planare Verformungsmerkmale im PDF-Format ergänzt. G: Stärkere Vergrößerung von drei Sätzen von PDFs in einem Moissanit-Kristall mit einem Abstand von weniger als 1 µm. H: Eng beabstandete Knickbänder in einem Moissanit-Kristall. Alle Knickbänder zeigen deutliche PDFs mit Abständen bis hinunter zu 200 nm.

FESI-Partikel aus dem Chiemgauer Streufeld zeigen im Allgemeinen einen starken mechanischen Überdruck, der auf Brekziation (Abbildung 31), Thermoschock, Schockdruck oder dynamische Schockabplatzung (Abbildung 32) zurückgeführt werden kann. Unregelmäßige Risse (Abbildung 32 A) erinnern an ähnliche Risse und Schockadern in Meteoriten. Offene Risse in der FESI-Matrix und in Mineralkristallen (Abbildung 32 A, B) weisen auf eine Zugverformung hin, die am besten einer dynamischen Stoßabplatzung zugeschrieben werden kann. Mehrere Sätze subplanarer offener Brüche (Abbildung 32 C) können kristallographisch orientiert sein und einen Schockeffekt wie bei geschocktem Quarz haben.

Bisher unbekannt, aber in vielerlei Hinsicht dem Schockverhalten von Quarz sehr ähnlich, ist die Beobachtung planarer Deformationsmerkmale (PDFs) in Moissanit, von denen Abbildung 32 DH Beispiele in verschiedenen Konstellationen zeigen. Die absolute Ähnlichkeit zu mehreren Sätzen von PDFs in Quarz ist auffällig, ebenso wie der Abstand und die Breite der Elemente bis zu 1 µm und weniger.

Eine weitere bemerkenswerte Ähnlichkeit zu geschocktem Quarz zeigt Abbildung 32 F, die als Federstrukturen oder Federlamellen bekannt geworden ist [31]. Federstrukturen, wie sie in Abbildung 32 für einen Moissanit markiert sind, werden niedrigen Stoßdrücken in geschocktem Quarz zugeschrieben, sind kristallographisch in den gleichen Abständen wie die PDFs orientiert und werden immer in Verbindung mit einem planaren Bruch beobachtet. Genau das ist in Abbildung 32 F zu sehen, nicht zu vergessen die gleichzeitig wohlgeformten PDFs im selben Abschnitt. Inwieweit ein vergleichbarer Bildungsmechanismus der Federstrukturen bei Quarz und Moissanit existiert, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten. Knickbänder in Silikat- und Karbonatgesteinen sind ebenfalls als Schockeffekte bekannt und finden hier ein schönes Gegenstück in Kombination mit dicht beabstandeten PDFs (Abbildung 32 H).

## 4. Diskussion

Eisensilizidminerale sind aus der Industrie vor allem als Eisenmonosilizid FeSi bekannt, aus dem unter anderem verschiedene Legierungen hergestellt werden. Eisensilizide sind in der Natur sehr selten, wenig bekannt und erst in den letzten Jahrzehnten der Wissenschaft zugänglich geworden. Dabei ist vieles (Herkunft, Entstehung) noch unklar. Der Grund für das seltene Vorkommen von Eisensilizidmineralen auf der Erde sind die Entstehungsbedingungen, die extreme Temperaturen und ein extrem reduzierendes Milieu erfordern, das bei terrestrischen Prozessen kaum vorhanden ist. Dementsprechend wurden Eisensilizide in einigen Fulguriten nachgewiesen, zuletzt (2020) in einem Michigan-Fulgurit [32]. Die eutektische Verwachsungstextur von zwei Eisensiliziden zeigte Naquit und Linzhit oder Naquit und Xifengit. Eisensilizidpartikel, die im südlichen Ural, Russland, bis zu 1 m tief in pleistozänen Sedimenten gefunden wurden, wurden als mögliche neue Klasse von Meteoriten untersucht, aber am Ende wurde eine terrestrische Formation aus einem völlig unbekanntem Prozess favorisiert. Kosmische Zusammenhänge werden jedoch immer mehr diskutiert, obwohl Widerstand gegen außerirdischen Ursprung aufrechterhalten wird. Kürzlich wurde Hapkeit (1–2 µm) in einem Meteoriten aus Koshava, Bulgarien [33] und im Meteoriten DAG 1066 [34] entdeckt; es kommt auch in einem Korn des Ureilits FRO 90228 vor [35]. Fe<sub>2</sub>Si, das für magnetische Kügelchen in Ungarn gemeldet wurde, könnte mit kosmischem Staub oder a verwandt sein

Meteoriteneinschlag [36]. Hapkeit wurde auch in einem 7 µm Supernova-Graphit (OR1d3m-18) aus dem Orgueil-Meteoriten gefunden [37]. Vor einigen Jahren wurden Naquit, Suessit und Xifengit im kohligen Chondrit von Khatyrka CV3 identifiziert [38].

Ein neuerer Artikel über Eisensilizid-Kügelchen [39] mit zum Teil erstaunlich ähnlichen Analysen wie den von uns hier vorgestellten, verneint wiederum einen kosmischen Ursprung, ebenso auch eine anthropogene Entstehung, und postuliert eine Entstehung als eine Art Fallout von Impakt-Ejekta eines sedimentären Targets). Eine interessante Diskussion wurde auch über die Entstehung und Bildung verschiedener Eisensilizidphasen im Aerogel der Stardust-Mission ausgelöst.

Dennoch bleibt anzumerken, dass natürlich vorkommende Eisensilizide sehr spärlich vorkommen und die wissenschaftliche Literatur dazu überschaubar geblieben ist. Als noch spannender erwies sich der Fund tausender Eisensilizid-Partikel in einem großen, verstreuten Feld auf einer Fläche von einigen tausend Quadratkilometern im Südosten Deutschlands vor etwa 20 Jahren, die von einheimischen Forschern und Hobbyarchäologen dokumentiert und assoziiert wurden mit Meteoriteneinschlag.

Die von den Hobbyforschern aufgestellte Hypothese des Zusammenhangs der Eisensilizid-Funde mit dem großen Streufeld meteoritischer Einschlagskrater hat sich bis heute eindeutig manifestiert, was einleitend erläutert wird. Gegen diese spektakuläre neue Hypothese hatte es von Beginn der Entdeckung an heftigen Widerstand gegeben, obwohl die ersten Analysen schnell klargestellt hatten, dass es sich bei den metallischen Funden um die auf der Erde praktisch nicht vorkommenden Verwachsungen der Eisensilizide Gupeitit und Xifengit mit Titancarbid handelte. und die Fundumstände, die hier beschrieben werden, schlossen eine menschliche, industrielle Herkunft praktisch aus.

Widerstand insbesondere gegen das Kraterstreufeld kam aus der regionalen Eiszeitalterforschung [40, 41], die die Krater als Toteislöcher oder schlicht als menschliche Konstrukte sah, vor allem aber aus der Szene der etablierten Impaktforschung. Das Hauptargument war, dass solche kleinen Meteoritenkrater unmöglich auf der Erde entstehen könnten [42], was sich nur kurze Zeit später als gründliche wissenschaftliche Fehleinschätzung herausstellte, als der Carancas-Steinmeteorit als Gegenstück einen identischen Krater mit 13 m Durchmesser bildete [43], wie sie im Chiemgau reichlich vorhanden sind [44].

Bei den Eisensiliziden speiste sich die Ablehnung daraus, dass sich nach dem Zweiten Weltkrieg an den Elektroden eines Industrieofens, der zur Düngemittelherstellung diente, kurzzeitig Eisensilizide der gleichen mineralischen Verbindung bilden konnten und von Gegnern des Aufpralls behauptet wurden die Quelle der Eisensilizide beim Ausbringen des Düngers. Eine vergleichende Analyse wurde durchgeführt [24], aber weder Bilder noch Daten davon wurden jemals veröffentlicht. Die Charakterisierung der Eisensilizide durch die einheimischen Forscher als Pseudometeoriten basierte auf einer Bleisotopenmessung [45] einer Probe, die ein typisches terrestrisches Bleisotop ergab, was sich jedoch als falsch interpretiert zeigte [24]. Bis heute ist diese Bleisotopenuntersuchung ungeklärt, da nicht einmal eine der SEM-EDS-Messungen an einer Vielzahl von Eisensilizidproben aus dem Kraterstreufeld auch nur den geringsten Beweis dafür erbracht hat

führen.

Auch wenn heute das Chiemgau-Impaktereignis mit begleitenden Eisensiliziden nur noch sporadisch mit den altbekannten, mittlerweile absurden Gegenargumenten der Eiszeitalterforscher und Befürworter der industriellen Eisensilizide in Frage gestellt wird (z. B. [46]), ist die wesentliche Diskussion um die Herkunft der Eisensilizide bleiben zurück. Dafür sind hier noch einmal die Erkenntnisse zusammengefasst, die zur Klärung beitragen können: 1) Eisensilizid-Mineralen Gupeitit, Xifengit, Ferrosilizit,

Ferrosilizit, Hapkeit und stöchiometrisch ähnliche Varianten; Spuren des meteoritischen Minerals Suessit; das Chiemgauer Hapkeit ist das trigonale Polymorph (SG

P3m1, Nr. 164).

- 2) Ein 8-kg-Eisensilizid-Aushubblock ist außergewöhnlich.
  - 3) Bisher mehr als 30 chemische Elemente ermittelt, darunter sechs REE; wenig Nickel. Uran ist ziemlich häufig und wird häufig mit Zirkonium/ Zirkon und Cer/Neodym in Verbindung gebracht; es existieren keine Uran-Zerfallsprodukte einschließlich Blei (mit Ausnahme von zwei EDS-Spektren, die mögliche Spuren von Thorium bzw. Polonium zeigen).
  - 4) Extrem reine Kristalle aus Titancarbid (TiC, (Ti, V, Fe) C, Khamrabaevit) und Siliziumkarbid (SiC, Moissanit), die die Eisensilizidmatrix durchsetzen. Zirkoniumkarbid und Urancarbid wurden verifiziert.
  - 5) CAls (Calcium-Aluminium-Einschlüsse) in Koexistenz des monoklinen Hochtemperatur- (>1.500 °C), Niederdruck-Dimorphs von CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Mineral Krotit und der orthorhombischen Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>5</sub>- Dicalciumdialuminat-Hochdruckphase, was auf komplexe Bildungsbedingungen hinweist.
  - 6) Wahrscheinlich ein oder mehrere Schockereignisse, denen die Eisensilizide
- ausgesetzt waren: 7) Moissanit mit mehreren Sätzen eng beieinander liegender planarer Merkmale (Abbildung 32), die Schock-PDFs in Silikatgesteinen, Federmerkmalen und starken, eng beieinander liegenden Knickbändern
- sehr ähnlich sind. 8) Uran ohne seine Zerfallsprodukte (Abbildung 26), interpretiert als Ergebnis eines Schockereignisses, das zu einem vollständigen Reset des U-Pb-Isotopensystems hätte führen können (siehe z. B. [47, 48]).
- 9) Allgegenwärtige offene Zugrisse, die die Eisensilizidpartikel in unregelmäßigen Mustern (Abbildung 32) und als mehrere Sätze von subparallelen offenen Rissen (Abbildung 32) durchqueren, interpretiert durch Aufprallschock-Spallation.
  - 10) Cluster von Mikrometergroßen Randkratern auf der Oberfläche eines Eisensilizid-Partikels (Abbildung 13), interpretiert durch ein hochenergetisches kosmisches Bombardement. Die vermeintlichen offenen Abdrücke von verlorenen Zirkonkristallen (Abbildung 13) könnten möglicherweise Zeugen einer Schockkollision im Weltraum sein.
  - 11) Einschlag winziger Zirkone in eine plastische oder sogar flüssige Materie und das offensichtliche plötzliche Einfrieren der Ausdehnungswellen der Störung (Abbildung 12 D), was auf eine abrupte Änderung der Materialeigenschaften hinweist.

Basierend auf dieser Zusammenstellung und in Bezug auf die Auswirkungen

Dabei sind grundsätzlich zwei Prozesse zu diskutieren: Die Eisensilizide stammen aus dem Kosmos und gehören zu den Projektile des Einschlags, oder sie haben sich während des hochenergetischen Einschlags aus Targetmaterial mit oder ohne Beteiligung von Meteoritenmaterial neu gebildet, wie z. B. für die Eisensilizid-Kügelchen der Arbeit in [39] postuliert. Die beiden Möglichkeiten müssen sich nicht gegenseitig ausschließen. Zumindest für einen kosmischen Teil der Eisensilizide würde sich das nachgewiesene Ereignis des Chiemgau-Einschlags anbieten.

Meteoritenformen sehr ähnlich, die den Entdeckern schon früh aufgefallen sind und ihre Hypothese des Meteoriteneinschlags bekräftigt haben, waren die typischen Regmaglypt-Oberflächen (Abbildung 7) und die „Splash“-Formen vieler FESI-Partikel (Abbildung 7), die eine aerodynamische Prägung zu beweisen schienen.

Eine Neubildung eines 8 kg schweren, rundum metallisch glänzenden Eisensilizid-Boulders (Abbildung 12), der zumindest aus den Eisensilizid-Phasen Gupeit, Xifengit und größeren Anteilen Hapkeit besteht [18], scheint von einer Impakt-Krater-Beziehung ausgeschlossen zu sein.

Die Bildung von perfekt geformten hochreinen Kristallen aus Titancarbid, Khamrabaevit und Moissanit (Abbildungen 14-21), einige von ihnen dicht gewachsen in einer Eisensilizidmatrix, während oder nach einem katastrophalen großen Einschlagsereignis scheint nicht wirklich möglich. Bereits bei den allerersten EDS-Analysen von TiC [12] erregte die extreme Superreinheit der Kristalle ohne Beimischung anderer Elemente erhebliches Aufsehen und führte zu Aussagen, dass solche TiC-Kristalle in dieser Reinheit auf der Erde nicht hergestellt werden könnten (Mitteilung Dr. B.

Raymaekers). Für die extreme Reinheit der Moissanit-Kristalle, die wir später gemessen haben, könnte das gleiche zutreffen.

Auch die Bildung der nachgewiesenen CAIs in den Eisensiliziden scheint unter terrestrischen Bedingungen praktisch unmöglich zu sein. Hinsichtlich der direkten Koexistenz der Hochtemperatur-/Niederdruckphase des Krotits mit der Hochdruckphase des Dicalciumdialuminats ist eine gemeinsame Entstehung bei einem kurzen Impaktereignis nicht denkbar.

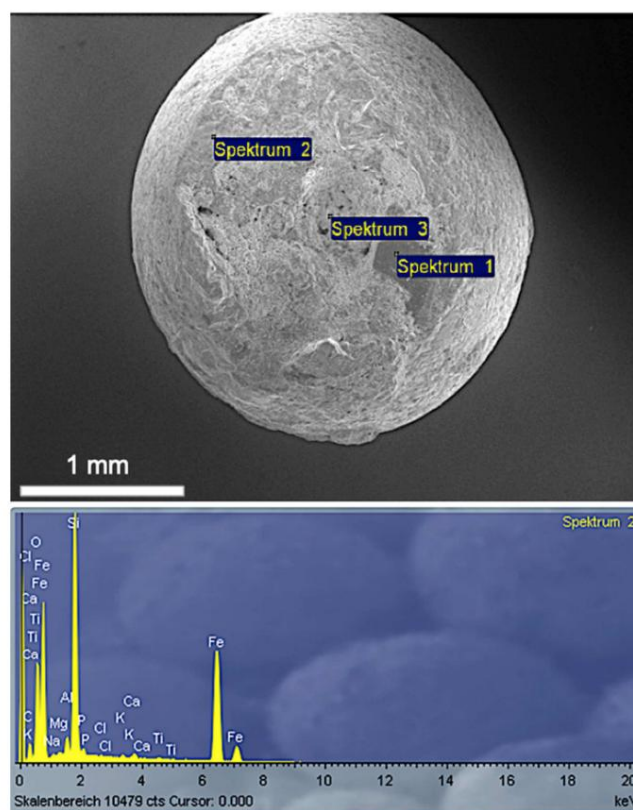
Von besonderer Bedeutung sind die postulierten Schockeffekte. Die absolute Ähnlichkeit der gezeigten planaren Deformationsstrukturen von planaren Brüchen, PDFs, Federmerkmalen und Knickbändern in Moissanit mit schockerzeugten analogen Formationen in Quarz lässt auch für den Moissanit kaum einen anderen Entstehungsmodus zu. Die häufig auftretenden Netzwerke unregelmäßiger Risse als offene Zugrisse über die FESI-Matrix und die offenen Brüche durch einzelne Titancarbidkristalle lassen sich bruchmechanisch am plausibelsten durch dynamische Stoßabspaltung erklären. Aus der Tatsache, dass die Einschlagkraterbildung in der ersten Kontakt- und Kompressionsstufe mit der Ausbreitung von Stoßwellen in das getroffene Ziel und zurück in das Projektil die typischen bekannten Stoßeffekte in den Mineralien und Gesteinen erzeugt, ist die einfache Schlussfolgerung, dass die Eisensilizide haben müssen bestanden, bevor der Aufprall stattfand, als sie erreicht und durch den Stoß deformiert wurden

Wellen.

Eisensilizide mit offenen Spallationsrissen und Moissanit-Kristalle mit planaren Deformationsstrukturen können sich nach Stoßfrontausbreitung beim Abbau und beim Auswurf in ungeklärten Prozessen nicht gebildet haben. Sie

muss schon beim Einschlag vorhanden gewesen sein und die Schockverformungen logischerweise bei früheren Schockkollisionen im Kosmos erfahren haben, wie man es grundsätzlich von Meteoriten kennt. Die Aufprallgeschwindigkeit der meist kleinen FESI-Partikel beim Aufprall selbst muss zu gering gewesen sein, da sich noch erhebliche Schockeffekte gebildet haben könnten.

Für die Impaktmikrokrater, die teilweise die Oberflächen der Eisensilizide übersäten (Abbildung 13), gilt die gleiche Überlegung, dass sie vor dem Chiemgau-Einschlag durch einen hochenergetischen Beschuss auf im Kosmos vorhandene Eisensilizide entstanden sind. Es ist schwer vorstellbar, dass sich während des Aufpralls neue Eisensilizidpartikel auf der Oberfläche bilden. Wir kennen zB die Mikrokrater auf vermutlich terrestrisch gebildeten australasiatischen Mikrotektoniten [49], sehen aber in ihrer Entstehung keine Beziehung zu den Mikrokratern auf den Eisensiliziden. Auch der "eingefrorene" Einschlag der Zirkonkristalle in eine vermutlich geschmolzene FESI-Matrix wird höchstwahrscheinlich durch Stoßkompression erklärt, erfordert aber auch die Präexistenz des FESI-Partikels vor dem Chiemgau-Einschlag.



**Abbildung 33.** REM-Aufnahme und EDS-Spektrum einer FESI-Kugel aus dem Streufeld des Chiemgau-Impakts mit typischen Bodenelementen.

Trotz der Annahme, dass zumindest ein erheblicher Teil der Eisensilizide aus dem Kosmos stammt und ein wesentlicher Bestandteil des gesamten Chiemgau-Impaktereignisses war, wollen wir eine Neubildung von Eisensiliziden bei der heftigen Einwirkung extremer Temperaturen und Drücke nicht ausschließen, ohne bisher zu verstehen, wie ein solcher Prozess hätte stattfinden können. Wir bringen hier in Abbildung 33 das SEM-Bild einer Chiemgauer FESI-Kugel und ein daraus entnommenes EDS-Spektrum

seine Oberfläche. Bemerkenswert und anders als der Großteil der FESI-EDS-Spektren sind die chemischen Elemente mit Ausnahme der FESI-Komponente diejenigen, die typischerweise in Böden vorkommen, wie Mg, Al, Na, K, Ca, Cl, P. Obwohl gründlich gereinigt, kann dies nicht ausgeschlossen werden. Dies sind in der Tat ursprüngliche Bodenbestandteile, die während des Aufpralls oder der Kugelhenerholung in Mikrorisse eingedrungen sind (und gemessen wurden). Wir belassen es dabei und verweisen auf weitere Untersuchungen, die der Frage der Neubildung von Eisensiliziden bei einem Impakt nachgehen werden.

## 5. Schlussfolgerungen

Etwa 20 Jahre nach der Entdeckung des Kraterstreufeldes des Chiemgau-Impakts mit dem gleichzeitigen reichlichen Nachweis der auf der Erde praktisch nicht natürlich vorkommenden Eisensilizide Gupeit und Xifengit sehen wir uns heute einerseits mit dem wohl größten konfrontiert Holozänen Impaktereignis, andererseits haben wir eine enorme Erweiterung des Wissens um die Eisensilizide bezüglich Verbreitung, Fundhäufigkeit sowie Bedeutung der neu zusätzlich gefundenen Eisensilizid-Mineralvarietäten, darunter die Hapkeit, und ihrer Eigenschaften .

Wir betonen die Besonderheit der in vielen Fällen recht ungewöhnlichen Begleiterscheinungen der Titan/Khamrabaevit-, Silizium-, Zirkon- und Urankarbid- und der Calcium-Aluminium-Einschlüsse (CAIs), nicht zu vergessen die postulierten Schockeffekte in den nahezu identischen TiC- und SiC-Kristallen Formen zu den flächigen Deformationsstrukturen der aus Silikatgesteinen, insbesondere Quarz, bekannten PDFs, PFs, Knickbändern und Federstrukturen. In der Gesamtschau all dieser Funde lässt sich nun genau das schließen, was die ursprünglichen Entdecker vor 20 Jahren relativ schnell vermutet hatten, dass sowohl das große Kraterstreufeld als auch die Eisensilizide ein häufiges Phänomen eines kosmischen Ereignisses in der jüngeren Vorzeit waren . Für die gefundenen und extrem tiefgehend analysierten Eisensilizide, darunter ein FESI-Ausgrabungsfund von 8 kg Masse, muss sich der Schluss ergeben, dass es sich hier beim Chiemgau-Einschlag zusammen mit weltweit zunehmenden Einzelnachweisen extraterrestrischer Eisensilizide um eine neue Klasse von Eisensiliziden handelt Meteoriten.

Die bis heute noch von wenigen vereinzelt Seiten artikulierte Ablehnung des Impacts ohne ein einziges vorgetragenes und veröffentlichtes Gegenargument geht über die reine Ablehnung nicht hinaus.

## Danksagungen

Die erste Würdigung mit tiefer Dankbarkeit gilt der Entdeckergruppe des Chiemgaueinschlags der heimischen Forscher und Hobbyarchäologen (W. Mayer, R. Beer, G. Benske, C.

Siegl, R. Sporn, T. Bliemetsrieder), die in den ersten Jahren der Exploration trotz einiger Anfeindungen die Feldarbeiten zu den Kratern und den Eisensiliziden mit sorgfältigster Dokumentation und erheblichem persönlichen finanziellen Einsatz recht akribisch durchgeführt haben. Aus dieser Gruppe muss W. Mayer herausgehoben werden, da er ohne Zweifel der Entdecker des Chiemgaus war

Impact-Phänomen und der frühe begeisterte Förderer der Forschung. Wesentliche Unterstützung erhielt das Team durch die ersten wissenschaftlichen Analysen der Eisensilizide durch Dr. B. Raeymaekers (InfraServGendorf), der erste Nachweise für die Hauptbestandteile Gupeit und Xifengit mit den hochreinen Titankarbid als Begleitmineralien erbrachte. Gemeinsam mit ihm wurde erstmals die Hypothese eines kosmischen Ereignisses mit meteoritischen Eisensiliziden und Einschlagskratern in einem großen Streufeld aufgestellt.

Wir sprechen dem CIRT (Chiemgau Impact Research Team) ein großes Dankeschön aus, das in den folgenden Jahren bis heute so viel Engagement für alle Forschungsarbeiten gezeigt hat, mit einem besonderen Schwerpunkt auf Dr. Michael A. Rappenglück MA, Astronom und Archäoastronom, und seiner Frau Barbara Rappenglück MA, Historiker, an Hans-Peter Matheisl und Alfred Dufter für vielfältige wissenschaftliche, technische und organisatorische Beiträge und Hilfe seit 15 Jahren und länger.

Ein großes Dankeschön geht auch an alle Grundbesitzer, zu viele, um sie namentlich zu nennen, die die Suche nach den Eisensiliziden ermöglichten und in vielen Fällen aktiv an der Bergung beteiligt waren. Bei den Kommunen ist besonders die Gemeinde Grabenstätt mit ihrem mittlerweile a. D. Georg Schützinger zu nennen, für dessen Unterstützung ein großer Dank ausgesprochen wird.

Abschließend möchten wir dem gemeinnützigen „Forschungsförderverein Chiemgau Impakt eV“ danken, dessen Vorsitzender und stellvertretender Landrat Josef Konhäuser bei der Überwindung vieler Schwierigkeiten geholfen hat.

## Verweise

- [1] Ernstson, K.; Mayer, W.; Neumair, A.; Rappenglück, B.; Rappenglück, MA; Südhaus, D.; Zeller, KW Das Chiemgau-Krater-Streufeld: Hinweise auf einen holozänen Großeinschlag in Südostbayern, Deutschland. – J. Siberian Federal University, Engineering & Technology, 2010, 1, 72-103.
- [2] Rappenglück, M.; Rappenglück, B.; Ernstson, K. Kosmische Kollision in der Frühgeschichte. Der Chiemgau-Impakt: Die Erforschung eines bayerischen Meteoritenkrater-Streufelds. Z. Anomalistik 2017, 17, 235 -260.
- [3] Rappenglück, M.; Rappenglück, B.; Ernstson, K. Kosmische Kollision in der Vorgeschichte. The Chiemgau Impact: research in a Bavarian meteorite crater strewn field (2., translated from German: [https://pdfs.semanticscholar.org/0b62/4ca79c834edc46c86e1fa575c70f726608c8.pdf?\\_ga=2.133770253.2003692324.1598954865-1676338455.1598954865](https://pdfs.semanticscholar.org/0b62/4ca79c834edc46c86e1fa575c70f726608c8.pdf?_ga=2.133770253.2003692324.1598954865-1676338455.1598954865) accessed 9 Dec. 2022) .
- [4] Rappenglück, B.; Hiltl, M.; Rappenglück, M.; Ernstson, K. Der Chiemgau-Einschlag – ein Meteoriteneinschlag in der Bronze-/Eisenzeit und sein außergewöhnliches Auftreten in den archäologischen Aufzeichnungen. In Wolfschmidt, G. (Hrsg.) Himmelswelten und Kosmvisionen – Imaginationen, Weltanschauungen. Nuncius Hamburgensis. Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften, 51, 330-349, tredition Hamburg.
- [5] Ernstson, K.; Poßkekel, J. Digitales Geländemodell (DTM) Topographie kleiner Krater im holozänen Chiemgau (Deutschland) Meteoriteneinschlag-Streufeld. 11. Planetary Crater Consortium 2020 (LPI Contrib. 2251), 2020, Abstract Nr. 2019. <https://www.chiemgau-impakt.de/wp-content/uploads/2020/06/PCC-2019.pdf>, aufgerufen am 09.12.2022.

- [6] Ernstson, K. Evidence of a meteorite impact-induced tsunami in lake Chiemsee (Southeast Germany) stronged 47th Lunar and Planetary Science Conference, 2016, 1263.pdf, Abstract. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/pdf/1263.pdf>, abgerufen am 9. Dez. 2022.
- [7] Ernstson, K.; Poßekel, J. Complex Impact Cratering in a Soft Target: Evidence from Ground Penetrating Radar (GPR) for Three Structures in the Chiemgau Meteoriten Impact Streufeld, Südostdeutschland (1,3 km Durchmesser Eglsee, 250 m Durchmesser Riederting, 60 m Durchmesser Aiching) AGU Herbsttagung 2020, EP036-0005, Abstract.
- [8] Ernstson, K.; Sideris, C.; Liritzis, I.; Neumair, A. Die Signatur des Chiemgau-Meteoriteneinschlags der Ausgrabungsstätte Stötham (Südostdeutschland). *Mediterrane Archäologie und Archäometrie*, 12, 249-259.
- [9] Ernstson, K.; Hiltl, M.; Neumair, A. Mikrotektit-ähnliche Gläser aus den Nördlichen Kalkalpen (Südostdeutschland): Nachweis einer proximalen Impact-Ejekta-Herkunft. 45. Lunar and Planetary Science Conference, 2014, LPI-Beitrag Nr. 1777, pdf. 1200, Zusammenfassung.
- [10] Ernstson, K.; Mayer, W.; Neumair, A.; Sudhaus, D. Das Rätsel der Doline im Alpenvorland, Südostdeutschland: Hinweise auf stoßinduzierte Gesteinsverflüssigungsprozesse. *Zentr. EUR. J. Geowissenschaften* 2011, 3 (4), 385-397.
- [11] Shumilova, TG; Isaenko, SI; Uljaschew, VV; Makeeva, B. A.; Rappenglück, MA; Veligzhanin, AA; Ernstson, K. Rätselhafter glasartiger Kohlenstoff aus dem Alpenvorland, Südostdeutschland: Ein natürlicher Karbonisierungsprozess. *Acta Geologica Sinica (englische Ausgabe)* 2018, 92, 2179-2200.
- [12] Beer, R.; Benske, G.; Mayer, W.; Bliemetsrieder, T.; Raeymaekers, B.; Sporn, R. Beewatch und der Meteorit aus Oberbayern; Nur eine Hypothese? Präsentation Beewatch – AÖ-Impakt im Werk Gendorf am 15. Sept. 2003.
- [13] Das Chiemgau Impact Research Team (Kord Ernstson, Werner Mayer, Gerhard Benske, Michael Rappenglück und Ulrich Schüssler) Haben die Kelten 200 v. Chr. einen Kometeneinschlag gesehen? Ein neu entdecktes Feld von Einschlagskratern könnte die Stelle eines kürzlichen Kometeneinschlags markieren. *Astronomie Veröffentlicht: Donnerstag, 14. Oktober 2004*, <https://astronomy.com/news/2004/10/did-the-celts-see-a-comet-i-mpact-in-200-bc>, abgerufen am 9. Dezember 2022.
- [14] Rappenglück, MA; Ernstson, K.; Mayer, W.; Bier, R.; Benske, G.; Siegl, C.; Sporn, R.; Bliemetsrieder, T.; Schüssler, U. Das Chiemgau-Impaktereignis in der Keltenzeit: Nachweis eines Kraterstreufeldes und eines Kometenimpaktors mit präsolare Materie. 2004, [https://www.chiemgau-impakt.de/pdfs/Chiemgau\\_impact.pdf](https://www.chiemgau-impakt.de/pdfs/Chiemgau_impact.pdf), abgerufen am 10.12.2022.
- [15] Rappenglück, MA; Schüssler, U.; Mayer, W.; Ernstson, K. Sind die Eisensilizide aus dem Impact-Kraterstreufeld im Chiemgau kosmisch? 2005, *Eur. J. Mineral.* 17, Beih. 1: 108.
- [16] Rappenglück, MA Natural Iron Silicides: A Systematic Review. *Mineralien* 2022, 12 (2), 188.
- [17] Bauer, F.; Hiltl, M; Rappenglück, MA; Ernstson, K (2020): Ein acht Kilogramm schwerer Brocken und mehr: Beweise für eine neue Klasse von Eisensilizid-Meteoriten aus dem Streufeld des Chiemgau-Impakts (SO-Deutschland). *Modern Problems of Theoretical, Experimental, and Applied Mineralogy (Yushkin Readings – 7.-10. Dezember 2020, Syktyvkar, Russland)*, *Proceedings*, 359-360.
- [18] Rappenglück, MA; Bauer, F.; Ernstson, K.; Hiltl, M. Meteoriteneinschlag im Mikrometermaßstab: Eisensilizid, Karbid und CAI-Mineralie aus dem Chiemgau-Impaktereignis (Deutschland). *Probleme und Perspektiven der modernen Mineralogie (Yushkin Memorial Seminar–2014) Tagungsband des mineralogischen Seminars mit internationaler Beteiligung Syktyvkar, Republik Komi, Russland 19.–22. Mai 2014.*
- [19] Bauer, F.; Hiltl, M.; Rappenglück, MA; Neumair, A.; Ernstson, K. Fe<sub>2</sub>Si (Hapkeit) aus dem Untergrund im Alpenvorland (Südostdeutschland): Ist es mit einem Impact verbunden? 76. Jahrestagung der Meteoritical Society 2013. 5056. pdf, Zusammenfassung.
- [20] Anand, M.; Taylor, LA; Nazaraov, MA; Shu, J.; Mao, H.-K.; Hemley, RJ Neues Mondmineral HAPKEITE: Produkt der stoßinduzierten Dampfphasenabscheidung im Regolith? *Mond- und Planetenwissenschaft XXXIV*. 2003, 1818.pdf, Zusammenfassung.
- [21] Anand, M.; Taylor, LA; Nazarov, MA; Shu, J.; Mao HK; Hemley, RJ Weltraumverwitterung auf luftlosen Planetenkörpern: Hinweise aus dem Mondmineral Hapkeit. *PNAS* 2005, 101, 6847-6851.
- [22] ICSD-Datenbank Fe<sub>2</sub>Si [100094] 2931.
- [23] Kudielka, H. Die Kristallstruktur von Fe<sub>2</sub>Si, ihre Verwandtschaft zu den Ordnungsstrukturen des  $\gamma$ -(Fe, Si)-Mischkristalls und zur Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Struktur Z. *Kristall.-Crystr. Matte*. 1977, 145, 177–189.
- [24] Schüssler, U. Zur Herkunft der Xifengit- und Gupeit-Ferrosilizide. <http://www.chiemgau-impact.com/mineralogy/>. abgerufen am 12. Dez. 2022.
- [25] Ivanova, MA; Petajew, MI; MacPherson, GJ; Nazarov, M. A.; Taylor, LA; Wood, JA Der erste bekannte natürliche Calcium-Aluminat-Auftreten reiche Einschluss aus Calciummonoaluminat In A aus dem CH-Chondriten Nordwestafrika 470 Meteorit. *Planet. Wissenschaft*. 2002, 37 (10), 1337–1345.
- [26] Sweeny Smith, SA; Connolly Jr. HC; Mac.; Rossmann G. R.; Beckett JR; Ebel DS; Schrader DL; Initial Analysis of a Refractory Inclusion Rich in CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> from NWA 1934: Cracked Egg 41st Lunar and Planetary Science Conference 2010, 1877.pdf, Zusammenfassung.
- [27] Chima; Kampf, AR; Connolly Jr., HC; Beckett, JR; Rossmann, GR; Sweeney Smith, SA, Schrader, DL. Krotit, CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, ein neues feuerfestes Mineral aus dem Meteoriten NWA 1934. *Amerikanischer Mineralogie* 2011, 96, 709-715.
- [28] Weiß, LF; Liebling, J.; Moser, DE; Cayron, C.; Barker, IR; Dunlop, J.; Tait, KT Baddeleyit als weit verbreiteter und empfindlicher Indikator für Meteoritenbeschuss in Planetenkrusten. *Geologie* 2018, 46 (8), 719-722.
- [29] Gleason, AE; Bolme, Kalifornien; Galtier, E.; Lee, HJ; Granados, E.; Dolan, DH; Seagle, CT; Ao, T.; Ali, S.; Lazicki, A.; Schnell, D.; Celliers, P.; Mao, WL Kompressionsgefrierkinetik von Wasser zu Eis VII. *Phys. Rev. Lett.* 2017, 119, 025701.
- [30] Nakamura, KG; Matsuda, A.; Kondo, K. Liquid Solid  $\gamma$  Phase Transition of Benzene under Shock Compression Studied by Time Resolved Nonlinear Raman Spectroscopy AIP Conference Proceedings 2006, 845, 1341.
- [31] Pölschau, MH; Kenkmann, T. Feather Merkmale: Ein stoßarmer Druckanzeiger aus Quarz. *Journal of Geophysical Research* 2011, 116, B02201, doi: 10.1029/2010JB007803.

- [32] Stefano CJ; Hackney SA; Kampf, AR Das Vorkommen von Eisensiliziden in einem Fulgurit: Implikationen für die Entstehung von Fulgurit *The Canadian Mineralogist* 2020, 58 (1), 115-123.
- [33] Yanev, Y.; Benderew, A.; Zotov, N.; Ilieva, I.; Iljew, T.; Georgiev, S. Tektite oder Meteorit aus der Koshava-Gipsmine, Nordwestbulgarien. *Bulgarische Geologische Gesellschaft, Nationale Konferenz mit internationaler Beteiligung „GEOSCIENCES 2015“* 2015, 81-82.
- [34] Moggi Cecchi, V.; Caporali, S.; Pratesi, G. (2015) Ein neu entdeckter anomaler Ureilit mit chondritischen Einschlüssen. 78. Ann. Treffen mit *Meteoritical Soc.* 2015, Zusammenfassung Nr. 1856.
- [35] Smith, CL; Downes, H.; Jones, AP Metall- und Sulfidphasen in interstitiellen Adern in „dimicten“ Ureiliten – Einblicke in die Geschichte und Petrogenese des Ureilit-Mutterkörpers. *Lunar and Planetary Science XXXIX* (2008), 1669.pdf, Zusammenfassung.
- [36] Szöyr, Gy.; Elekes, Z.; Rózsa, P.; Uzonyi, I.; Simulak, J.; Kuss Á. Z. Magnetkugelchen: Kosmischer Staub oder Spuren eines Meteoriteneinschlags? *Nukl. Instrument. Methoden in Phys.* Auflösung Abschnitt B 2001, 181, 557-562.
- [37] Kroate, TK; Jadhav, M.; Lebsack, E.; Bernatowicz, TJ Ein einzigartiger Supernova-Graphit: gleichzeitige Kondensation aller kohlenstoffhaltigen Dinge. 42. *Lunar and Planetary Science Conference* (2011), 1533. pdf, Zusammenfassung.
- [38] Lin, C.; Hollister, L.S.; MacPherson, GJ; Bindi, L.; Mac.; Andronicos, CL; Steinhardt, PJ Hinweise auf Kreuzschnitte und Redoxreaktionen in Chatyrka-Meteoriten enthüllen metallische Al-Mineralen, die im Weltraum gebildet wurden. *Sci Rep* 2017, 7, 1637, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01445-5>, aufgerufen am 13. Dez. 2022.
- [39] Batovrin, S.; Lipovsky, B.; Gulbin, Y.; Pushkarev, Y.; Shukolyukov, YA Lunar Constraints on the origins of iron silicid spherules in ultrahigh temperature distal impact ejecta. *Meteoritics & Planetary Science* 2021, 56, Nr 7, 1369–1405.
- [40] Darga, R.; Wierer, JF (2009). *Wanderungen in die Erdgeschichte: Bd. 27. Auf den Spuren des Inn-Chiemsee-Gletschers - Exkursionen.* 2009, München: Pfeil.
- [41] Doppler, G.; Geiß, E.; Kroemer, E.; & Traidl, R. (2011). Antwort auf „Der Fall von Phaethon: Eine griechisch-römische Geomythe bewahrt die Erinnerung an einen Meteoriteneinschlag in Bayern (Südostdeutschland)“ von Rappenglück et al. (*Antike* 84). *Antike*, 85 (327), 274-277.
- [42] Reimold, WU Pressemitteilung. – Naturkundemuseum Berlin, 21.11.2006; und Stellungnahme in einer TV-Dokumentation (10.10.2007): Der Chiemgau-Impakt, *Faszination Wissen*, BR.
- [43] Kenkmann T.; Artemieva N.; Poelchau M. Das Carancas-Ereignis am 15. September 2007: Meteoritenfall, Einschlagsbedingungen und Kratereigenschaften. 39. Mond- und Planetenwissenschaftskonferenz. 2008, Zusammenfassung Nr. 1094.
- [44] Ernstson, K. Chiemgau-Impakt: Schockmetamorphose (diaplektisches Glas) im #001-Krater, dem Krater von Carancas (Peru), und die Frage der Bildung sehr kleiner Hypervelocity-Impaktkrater. 2012, <http://www.chiemgau-impact.com/2012/12/chiemgau-impact-shock-metamorphism-diaplectic-minerals-in-the-001-crater-the-carancas-peru-crater-and-the-> Frage der Bildung sehr kleiner Hypervelocity-Impact-Krater, abgerufen am 13. Dez. 2022.
- [45] Fehr, KT; Hochleitner, R.; Hölzl, S.; Geiß, E.; Pohl, J.; Faßbinder, J. Ferrosilizium-Pseudometeorite aus dem Raum Burghausen, Bayern. *Der Aufschluß* 2004, 55, 297-303.
- [46] Eichhorn, R.; Geiß, E.; Loth, R. Nicht von dieser Welt – Bayerns Meteorit. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg, Deutschland, 2012, 126 Seiten.
- [47] Deloule, E.; Chaussidon, M.; Glas, BP; Koeberl, U-Pb-Isotopenstudie von Reliktzirkoneinschlüssen, die aus Tektiten vom Muong Nong-Typ gewonnen wurden. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2001, 65, 1833–1838.
- [48] Kamo, SL; Lana, C.; Morgan, JV U-Pb-Alter von geschockten Zirkonkörnern verbinden distale K-Pg-Grenzstellen in Spanien und Italien mit dem Chicxulub-Einschlag. *Planet Erde. Wissenschaft. Briefe* 2011, 310, 401-408.
- [49] Prasad MS; Khedekar VD Impact-Mikrokrater-Morphologie auf australasiatischen Mikrotektiten. *Meteoritics & Planetary Science* 2003, 38: 1351– 1357.