

Der holozäne Tüttensee-Meteoritenkrater in Südostdeutschland

Chiemgau Impact Research Team (CIRT)*

- 1 Einführung
- 2 Der Tüttensee – Topographie und Gesteine des Einschlaggebietes (Target)
- 3 Die geologische Situation
 - Die Tüttensee-Ejektalage*
- 4 Geophysikalische Untersuchungen
 - Gravimetrie*
 - Messungen der magnetischen Bodenssuszeptibilität*
- 5 Schockmetamorphose
 - Schock im Tüttensee-Ringwall*
 - Schock in der Bunten Brekzie der Tüttensee-Ejektalage*
- 6 Zusammenfassung und die Entstehung des Tüttensee-Kraters
 - Zusammenfassung*
 - Die Entstehung des Kraters*
- 7 Diskussion
 - Das konkurrierende Glazialmodell*
- 8 Schlussfolgerungen

Literatur

Zusammenfassung. Der im Durchmesser etwa 400 m große Tüttensee in Südostdeutschland ist der größte Krater innerhalb des Streufeldes, das sich beim Chiemgau-Impakt - möglicherweise im 6. oder 5. Jh. vor Chr. - gebildet hat. Der Krater ist in überwiegend quartärem Moränen- und Fluvioglazial-Material angelegt und von einem 8 m hohen Ringwall und einer ausgedehnten Decke aus Auswurfmassen umgeben. Die bis zu 1 m mächtige Ejektalage ist eine polymikte Brekzie, die heftig zertrümmerte Gerölle aus alpinem Gesteinsmaterial enthält. Sie ist zudem reich an organischem Material (Holz, Holzkohle, Tierknochen und -zähne). Extrem korrodierte und tief zerfressene Karbonat- und Silikatklasten in der Brekzie deuten auf Karbonat-Schmelzen/Dekarbonisierung und/oder Lösung durch Salpetersäure. Die Ejektalage hat im Liegenden einen fossilen Bodenhorizont konserviert, der ebenfalls reichlich frisches organisches Material enthält. Eine Gravimetrie-Kampagne zeigt eine Zone relativ positiver Schwereanomalien um den Tüttensee herum auf, die durch Schockverdichtung des extrem porösen Untergrundmaterials erklärt wird. Moderate, dennoch reichlich Schockeffekte zeigen sich in Gesteinen vom Ringwall und in Klasten der Ejektaschicht. Alle beobachteten Merkmale können zwanglos durch einen Impaktprozess erklärt werden, aber sie sind absolut unverträglich mit einer Bildung der Tüttenseestruktur durch Prozesse der Eiszeit.

Abstract. The 400 m-diameter Lake Tüttensee in southeast Germany is the largest crater in the strewn field of meteorite craters that formed in the Holocene Chiemgau impact event possibly in the 6th or 5th century BC. The crater was excavated from a Quaternary target of predominantly moraine and fluvioglacial material and is surrounded by an 8 m-height rim wall and an extensive ejecta blanket. The up to 1 m thick ejecta layer is a polymictic breccia containing heavily fractured cobbles and boulders of Alpine lithologies and is rich in organic material like wood, charcoal, animal bones and teeth. Extremely corroded silicate and carbonate clasts in the breccia point to carbonate melting/decarbonization and/or dissolution by nitric acid. The ejecta layer has conserved an underlying fossil soil rich in organic material, too. A gravity survey reveals a zone of relatively positive anomalies around Lake Tüttensee interpreted by impact shock densification of the highly porous target rocks. Abundant, although moderate, shock metamorphism is observed to occur in clasts from the rim wall and the ejecta layer. An impact cratering process is able to explain all observed

features that are completely inconsistent with a formation of Lake Tüttensee by glacial processes.

Resumen. El lago Tüttensee, de 400 m de diámetro, sito en el sureste de Alemania, es el mayor de los cráteres que conforman el campo de cráteres del evento de impacto de Chiemgau acaecido durante el holoceno (posiblemente entre los siglos 6 y 5 AC). El cráter fue excavado en un objetivo cuaternario de litología predominantemente morrénica y fluvioglacial, y está rodeado por una pared de unos 8 m. de altura y un extenso manto de eyecta. La capa de eyecta, de un espesor superior a 1 m, consiste en una brecha polimítica que contiene cantos y bloques intensamente fracturados – de litologías Alpinas – y que además es rica en material orgánico tal como madera, carbón vegetal, huesos y dientes de animales. Los clastos de naturaleza carbonatada y silicatada, intensamente corroídos, presentes en la brecha, apuntan hacia una fusión/decarbonización del carbonato y/o una disolución por ácido nítrico. Los estudios gravimétricos revelan una zona de anomalías relativamente positivas alrededor del lago Tüttensee, que se interpretan como debidas a la densificación de las rocas altamente porosas del objetivo por el choque de impacto. Abundante, aunque moderado, metamorfismo de choque, puede observarse en los clastos de la pared del cráter y de la capa de eyecta. Mientras que un proceso de craterización por impacto es capaz de explicar todos los rasgos observados, los mismos son totalmente inconsistentes con la formación por procesos glaciares del lago Tüttensee.

1 Einführung

Der im Durchmesser 400 m messende Tüttensee in der Nähe des Chiemsees in Bayern (Südostdeutschland) stellt den bislang größten Meteoritenkrater des durch den holozänen „Chiemgau Impakt“ entstandenen Streufeldes dar (CIRT 2004, 2005, Rappenglück et al., 2004, 2005). Das Ereignis wurde und wird nach wie vor kontrovers diskutiert (CIRT 2006 a, b; Hoffmann et al. 2004 a, b, c, 2005 a, b, 2006 a, b; Raeymaekers & Schryvers 2004; Raeymaekers 2005; Rösler et al. 2004, 2005 a, b, 2006 a, b; Schryvers & Rösler 2004; Ernstson 2005; Fehr et al. 2004, 2005; Schryvers & Raeymaekers 2005; Schüssler 2005 a, b; Schüssler et al. 2005; Doppler & Geiss 2005; Reimold et al. 2006; Rappenglück & Rappenglück 2006).

Das Streufeld besteht aus über 80 Einzelkratern von jeweils über 3 m Durchmesser und erstreckt sich über ein Areal von ungefähr 60 km x 30 km Ausdehnung. Verglichen mit anderen Impakt-Streufeldern (Wabar, Henbury, Macha, Morasko, Sikhote Alin und andere; Hodge [1994], Krinov [1963], Gurov & Gurova [1998] sind die am Boden vorhandenen Hinweise auf einen Impakt ungewöhnlich beeindruckend (zwar ist das Gibeon Meteoriten-Streufeld mit einer Fläche von 390 x 120 km sehr viel größer, aber ohne Krater). Sie haben dazu geführt, den Einschlag eines zerfallenden Kometen als Erklärungsmodell zu entwickeln (Rappenglück et al. 2004).

Radiokarbondatierungen und archäologische Funde lassen den Schluss zu, dass sich der Impakt nach 2500 v. Chr. und vor der römische Besetzung um 15 v. Chr. ereignete, möglicherweise im 6. oder 5. Jahrhundert v. Chr. (Rappenglück & Rappenglück 2006).

Nach der Entdeckung des Streufeldes im Chiemgau wurde der Erforschung des Tüttensee-Kraters und seiner Umgebung viel Arbeit gewidmet, die geologische Feldarbeit, geophysikalische Messungen und petrographische Analysen umfasste. In deutscher Sprache verfasste und mit englischsprachigen Zusammenfassungen und

Bildunterschriften versehene Berichte über diese Forschungen sind regelmäßig im Internet veröffentlicht worden ([web 1, 2, 3, 4, 5]). Hier geben wir eine Zusammenfassung dieser verschiedenen Beiträge und gehen auch auf die Kritik an dem Modell eines Impakts ein.

2 Der Tüttensee – Topographie und Gesteine des Einschlaggebietes (Target)

Der Tüttensee liegt einige Kilometer südöstlich des Chiemsees und nördlich der Alpenvorberge (Abb. 1). Der Durchmesser des Sees (Abb. 2) beträgt ungefähr 400 m, die Tiefe, laut offizieller Daten, im Durchschnitt 17 m. Eine Gravimetriemessung auf dem zugefrorenen See (Ernstson 2005; s. a. unten) legt die Annahme nahe, dass zwar die Wassertiefe 17 m entspricht, eine Gesamttiefe von etwa 30 m, die auch noch eine dicke Schicht organischen Materials umfasst, jedoch realistischer zu sein scheint.

Der See ist von einem Ringwall umschlossen, der im Nordosten in eine eiszeitliche Moräne übergeht (Abb. 2). Noch vor ungefähr hundert Jahren umschloss der 8 m hohe Ringwall (Abb. 3, Abb. 4) den See komplett, während er heute drei künstliche Durchbrüche aufweist (Abb. 5). Die Wallkrone misst im Durchmesser ungefähr 500 m und gibt damit die Größe des vermuteten Meteoritenkraters wieder. Außer den erwähnten künstlichen Durchbrüchen haben Wall und Kratergelände vermutlich schon seit römischer Zeit erhebliche morphologische Veränderungen erfahren.



Abb. 1. Der Tüttensee im Alpenvorland nahe dem Chiemsee. Satellitenbild: Google Earth.
Koordinaten des Tüttensees 47°50'48" N; 12°34'05" E.

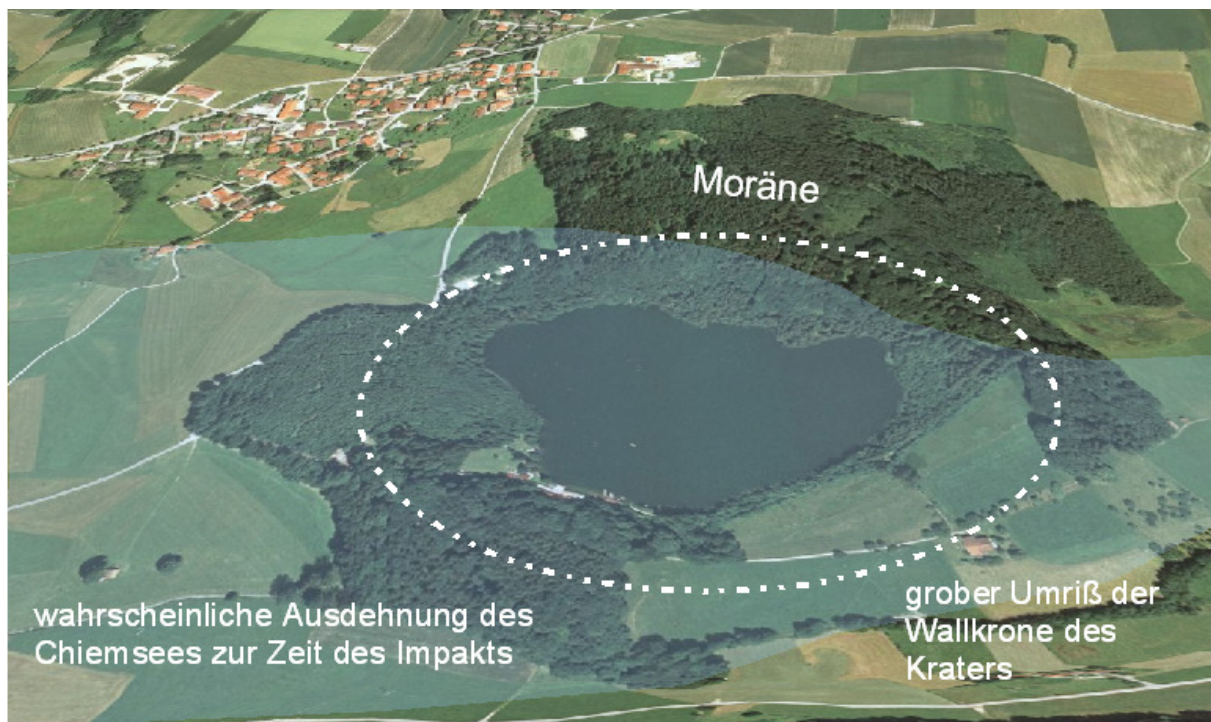


Abb. 2. Schräger Blick auf den Tüttensee (überhöht). Die transparente Einblendung zeigt die wahrscheinliche Ausdehnung des Chiemsees. Satellitenbild: Google Earth.



Abb. 3. Blick auf den Tüttensee-Ringwall (Pfeile) von Süden.



Abb. 4. Blick auf den 8 m hohen Tüttensee-Ringwall während einer Gravimetrie-Kampagne auf dem zugefrorenen See.



Abb. 5. Einer der drei künstlichen Durchbrüche des Tüttensee-Ringwalls.

Der Krater ist in überwiegend quartärem Moränen- und Fluvioglazial-Material angelegt (Abb. 6). Gerölle und Blöcke bis zu einer Größe von 20 cm sind mit Sand und Ton vermischt. Die Komponenten repräsentieren alpines Material in Form von Sedimenten (überwiegend Kalk- und Sandsteine), Magmatiten (überwiegend Granitoide) und Metamorphiten (überwiegend Quarzite, Gneise, Amphibolite, Serpentinite und Schiefer). Gelegentlich kommen größere Blöcke zementierter Konglomerate (Nagelfluh) vor. Holozäne Schotter, Löss und lehmige Böden können lokal Bestandteil der obersten Schichten sein. Die lithologische Vielfalt des

betroffenen Gebiets trägt dazu bei, dass an den in Mitleidenschaft gezogenen Gesteinen eine bemerkenswerte Vielfalt impactspezifischer Phänomene beobachtet werden kann.



Abb. 6. Typische Gesteine des quartären Untergrundes des Einschlaggebietes, aufgeschlossen in einer Baugrube wenige Kilometer nördlich des Tüttensees. Die eigenartige geogene, mit braunem Gesteinsmaterial gefüllte schusselförmige Vertiefung, die die Grubenwand angeschnitten hat, müsste weiter untersucht werden, da sie möglicherweise mit dem Impact zu tun hat und eine Sekundärkraterbildung darstellt.

Es ist eine Besonderheit des vom Impact betroffenen Gebietes, dass der Impaktor, der den Tüttensee geformt hat, wahrscheinlich in eine Bucht des zur damaligen Zeit wesentlich größeren Chiemsees krachte. Dieser Umstand führte bezüglich des Prozesses der Kraterbildung, der Kratermorphologie und der Impactgesteine möglicherweise zu anderen Ausprägungen als sie sonst bekannt sind. Auch Seetone des Chiemsees müssen zu der Vielfalt des Impactgesteins beigetragen haben.

3 Die geologische Situation

Geologische Untersuchungen des Tüttensee-Kraters müssen sich wegen der Wasserfläche des Sees und dem Schilfbewuchs an seinen Ufern auf den Rand und die Umgebung beschränken. Die Untersuchung des Ringwalls beschränkt sich meist auf die Aufschlüsse der künstlichen Durchbrüche, die generell wenig Einblick in Struktur und Material (quartäres Moränen- und Schottermaterial) ermöglichen. Von den Durchbrüchen und vor allem aus einigen zusätzlichen, oberflächlichen Schürfen am Ringwall sammelten wir eine große Anzahl an Geröllen und Blöcken, die aufgrund ungewöhnlicher Deformationen und eigenartiger Gefüge, wie sie genauer von Rappenglück et al. (2004) und im Internet [6] beschrieben werden, die Aufmerksamkeit auf sich zogen.



Abb. 7. Ungewöhnlich verformte Gerölle vom Tüttensee-Ringwall. Die heftig zerbrochenen, jedoch kohärenten Klasten, die einer unverfestigten, weichen Gesteinsmatrix entnommen wurden, beweisen eine Hochdruck-Kurzzeit-Deformation, wie sie typisch für ein Imaktgeschehen ist. Eine Verformung durch alpine Tektonik, wie sie Doppler & Geiß (2005) annehmen, kann absolut ausgeschlossen werden, da die Gerölle in dieser Form nicht den geringsten Transport überlebt hätten. Die Verfärbung des Gesteins im Bild unten links deutet auf Erhitzung.



Abb. 8. Schürfe im Umfeld des Tüttensees. Der Pfeil markiert den Wald, in dem die Messungen der magnetischen Bodensuseptibilität durchgeführt wurden. Satellitenbild: Google Earth.

Die Tüttensee-Ejektalage

Die eindrucksvollsten geologischen Erkenntnisse zum Impakt-Kraterbildungsprozeß lieferten jedoch über 20 Schürfen rund um den Tüttensee (Abb. 8). Von Abweichungen abgesehen, zeigen sie im allgemeinen eine vierschichtige Abfolge aus autochthonem Gestein, fossilem Boden, einer Ejektalage und einem subrezenten bis rezenten kiesigen Boden (Abb. 9). Interessanterweise ist im holozänen Macha-Meteoritenkraterstreufeld in Jakutien die Impakt-Ejektalage des Kraters Nr. 2 ganz ähnlich aufgebaut (Gurov & Gurova 1998; Abb. 10).

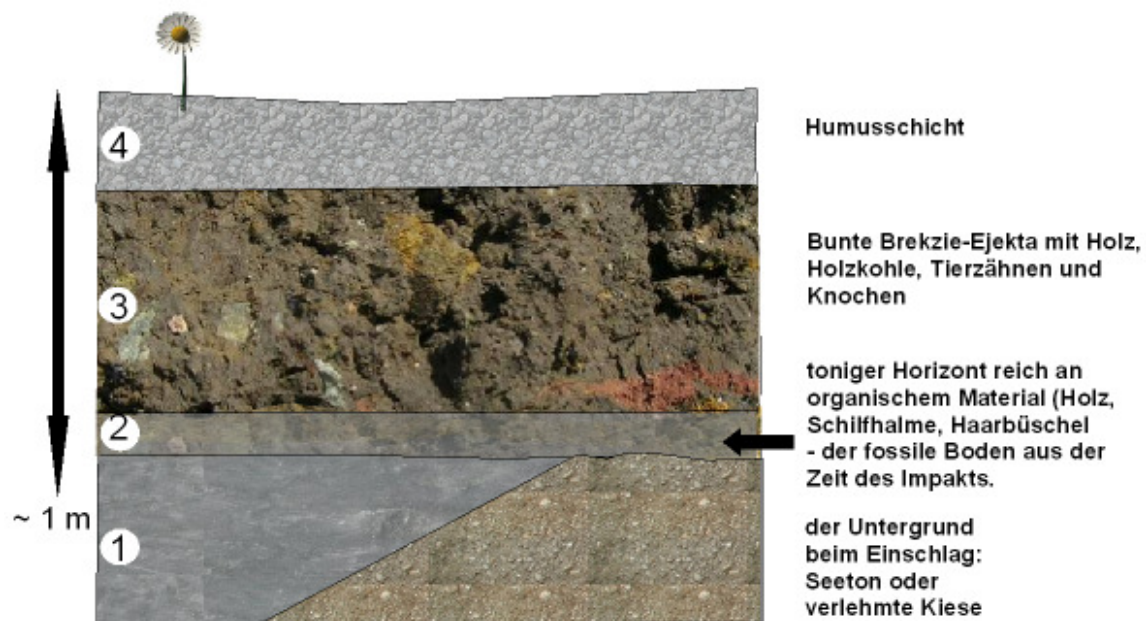


Abb. 9. Schematischer Schnitt durch die Ablagerungen mit dem Ejekta-Horizont im Umfeld des Tüttensees.

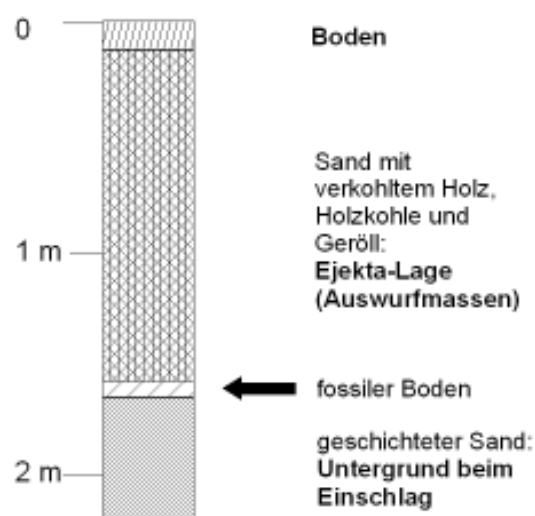


Abb. 10. Zum Vergleich: Schnitt durch den Ejekta-Horizont des Macha-Kraters Nr. 2. Verändert aus Gurov & Gurova (1998). Die Ähnlichkeit mit der Tüttensee-Ejektalage (Abb. 9) ist augenfällig.

Im Detail treffen wir am Tüttensee etwa folgende Situation an:

- 1 In (je nach topographischer Situation) 1 - 2 m Tiefe ein ungestörtes pleistozänes oder holozänes Gestein, das entweder einen reinen Seeton des früher deutlich größeren Chiemsees oder wohlbekannte verlehmtte Schotter mit gutgerundeten Geröllen alpiner Lithologie darstellt.
- 2 Darüber einen dezimeter-mächtigen Horizont, der einen fossilen Boden über Seeton bzw. verlehmtten Schottern darstellt. In diesem Bodenhorizont findet sich hervorragend erhaltenes organisches Material in Form von Holzresten, frischen Schilfhalmern und Haarbüschen von Tier oder/und Mensch. Eingedrückt in diesen fossilen Horizont sind stark zertrümmerte, aber dennoch kohärente Klasten aus Quarzit, Kalksteinen, Dolostein und Kristallingesteinen.



Abb. 11. Schurf Nr. 5: Einzelne Klasten stecken in dem fossilen Bodenhorizont über dem autochthonen Target-Gestein (Seeton; siehe die Extra-Vertiefung rechts unten). Die größeren Klasten haben Abmessungen von etwa 20 cm.



Abb. 12. Hervorragend konserviert: Schilf und Haarbüschel von der Basis der Ejekta-Lage.



Abb. 13. Ein heftig fragmentierter, jedoch zusammenhaltender Quarzit-Block von der Basis der Ejekta-Lage.

- 3 Über diesem fossilen Bodenhorizont folgt eine bis zu einem Meter mächtige polymikte Brekzie, die in Teilen dieselbe Fazies hat wie die Bunte Brekzie im Nördlinger Ries-Krater (Pohl et al. 1977) (Abb. 15). Die Bunte Brekzie am Tüttensee enthält bunte, scharfkantig gebrochene Gesteinsfragmente eines kompletten Korngrößenspektrums aus der gesamten alpinen Lithologie. Die Bunte Brekzie enthält organisches Material in Form von fragmentiertem Holz (Abb. 16), reichlich Holzkohle (Abb. 15), Knochen und Knochenfragmenten (Abb. 17) und gut erhaltenen Zähnen (Abb. 17). Die Bunte Brekzie vom Tüttensee enthält brekziierte Klasten mit Vergriesungserscheinungen und Mörteltextur, mit der Besonderheit, dass die Klasten trotz stärkster Zertrümmerung kohärent in der tonigen Matrix angetroffen werden (Abb. 18), genauso wie die zertrümmerten Klasten, die im darunter liegenden fossilen Boden zu finden sind.

Radiokarbondatierungen (CEDAD 2006) von Holz und einem Holzkohlefragment aus zwei verschiedenen Schürfen ergaben Daten um 2500 v. Chr. (in Abhängigkeit von der Kalibrierungskurve), d.h., geologisch gesprochen, ein eindeutig holozänes Alter.



Abb. 14. Polymikte Impact-Brekzie des Tüttensee-Ejekta-Horizontes.

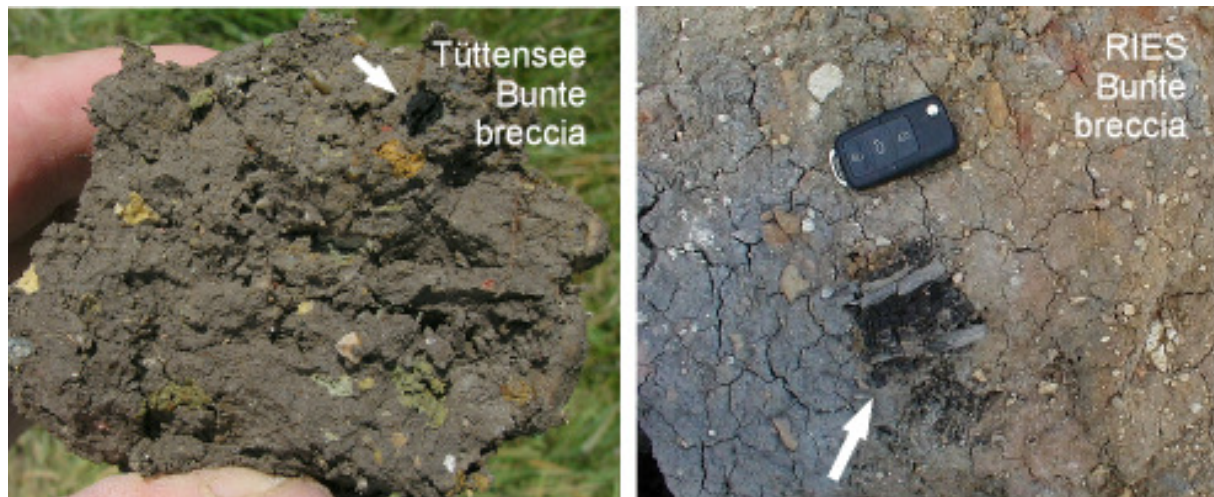


Abb. 15. Gegenüberstellung der Bunten Brekzie des Tüttensees und einer Komponente der Bunten Brekzie aus dem Ries-Krater. Die Pfeile markieren jeweils Holzkohlefragmente in den Brekzien.



Abb. 16. In der Bunten Brekzie vom Tüttensee eingeschlossenes Holz.



Abb. 17. Knochen und Zähne in der Bunten Brekzie vom Tüttensee.



Abb. 18. Völlig zertrümmerte aber zusammenhaltende Klasten (links ein Kalkstein, rechts ein Quarzit) in der Bunten Brekzie vom Tüttensee.



Abb. 19. Tiefgreifend korrodierte Klasten aus der Tüttensee-Ejektalage. Oben links und unten rechts ein Kalkstein, oben rechts ein Sandstein und unten links ein Amphibolit, der mit der bloßen Hand zerdrückt und pulverisiert werden konnte.

Klasten jeglicher Lithologie (also auch silikatische Gesteine wie Sandsteine oder Amphibolite) in der Tüttensee-Brekzie zeigen eine extrem tiefgreifende Korrosion bis hin zu residualen Gesteinsskeletten (Abb. 19).

- 4 Die Tüttensee-Bunte Brekzie wird überlagert entweder von einer frischen, vermutlich holozänen Kieslage mit unversehrten Geröllen sowie einem rezenten Bodenhorizont oder unmittelbar vom rezenten Boden.

4 Geophysikalische Untersuchungen

Gravimetrie

Um mehr über die Kraterstruktur zu erfahren, wurde am Tüttensee eine Gravimetriekampagne durchgeführt. Die Messungen geschahen im Winter 2005 auf dem zugefrorenen See und an weiteren Messpunkten in der Umgebung, so dass

eine Bouguer-Karte des Areals erstellt werden konnte (Ernstson 2005). Abb. 20 gibt die Bouguer-Restfeldkarte wieder. Sie zeigt eine ungefähr kreisförmige Anomalie, die maximal $-0,8$ mGal erreicht und überwiegend mit der geringen Dichte des Wassers und des organischen Materials im See in Zusammenhang gebracht werden kann.

Überraschend ist der Nachweis eines Ringes relativ positiver Anomalien um die negative Anomalie des Tüttensees herum (Abb. 20). Die positiven Anomalien werden durch eine im Durchmesser ca. 1000 m messende flache Linse leicht erhöhter Dichte modelliert (Abb. 21). Die Dichteerhöhung lässt sich mit dem von starken Erdbeben (z.B. Lee & Albaisa 1974, Montgomery et al. 2003) bekannten Modell einer Bodenverflüssigung und anschließenden Verdichtung erklären (Ernstson 2005). Darüber hinaus könnte die Nachströmbewegung hinter der Impakt-Schockfront zu einer Kompaktion der lockeren, hochporösen und wassergesättigten Gesteine des Einschlaggebietes beigetragen haben.

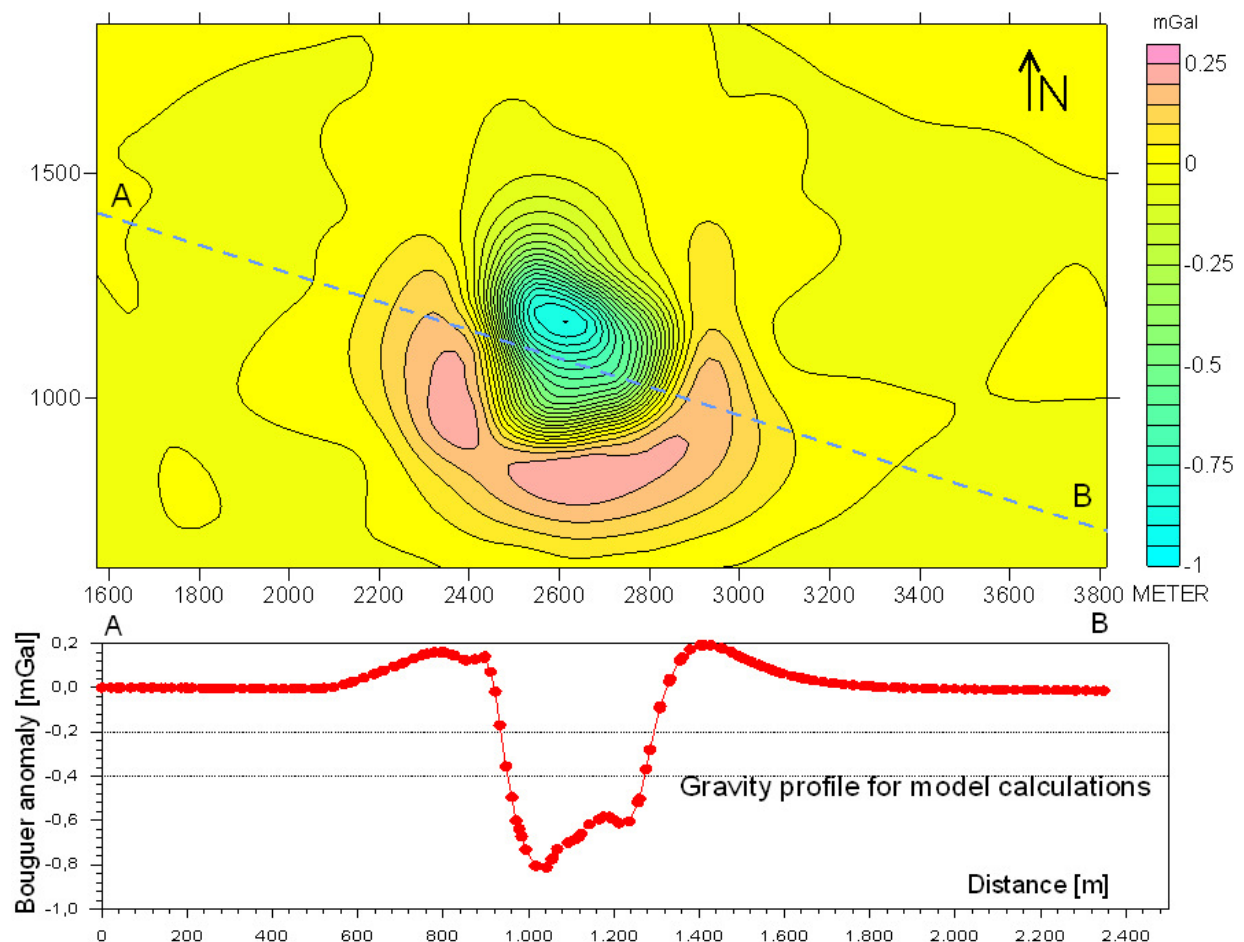


Abb. 20. Gravimetrie: Bouguer-Restfeldkarte für Tüttensee und Umgebung. Für Modellrechnungen wurde ein Schwerprofil A - B entnommen.

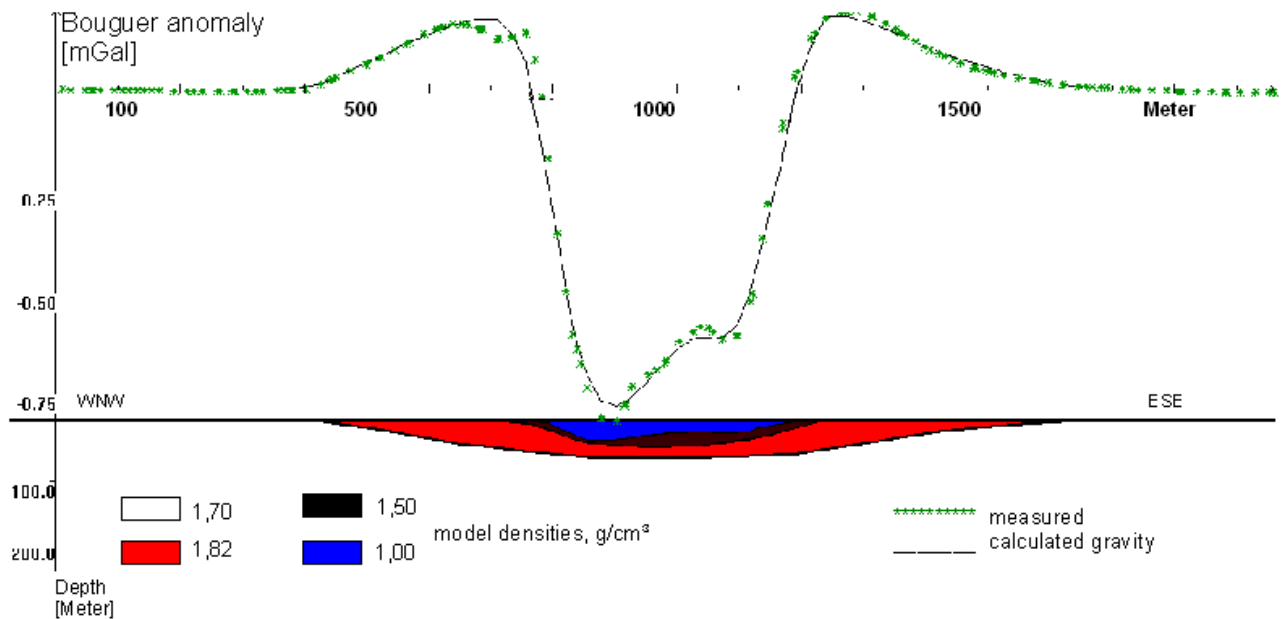


Abb. 21. 2,5-D-Modellrechnung und ein Dichtemodell für die Schwereanomalie des Tüttensee-Kraters. Nicht überhöht. Man beachte die Linse erhöhter Dichte (in roter Farbe).

Messungen der magnetischen Bodensuszeptibilität

Durch Ergebnisse, die bei Messungen der magnetischen Suszeptibilität des Bodens im nördlichen Teil des Chiemgau Impakt-Streifens in der Gegend von Burghausen erzielt worden waren (Hoffmann et al. 2004), wurden wir veranlasst, in einem Wald nahe dem Tüttensee (s. Abb. 8) eigene Bodensuszeptibilitätsmessungen vorzunehmen. In großen, ungestörten Waldgebieten waren Hoffmann et al. (2004) auf eine anomale magnetische Signatur des Bodens gestoßen, die mehr oder weniger regelmäßig in 10 - 20 cm Tiefe einen deutlichen Anstieg der magnetischen Suszeptibilität zeigt und von erhöhten Werten der magnetischen Suszeptibilität, wie sie in Industrieregionen sonst in den obersten Zentimetern des Bodens gemessen werden (s. auch Magiera et al. 2006), zu unterscheiden ist. Hoffmann et al. (2004) schließen industrielle Kontamination ebenso aus wie einen geogenen Ursprung dieser magnetischen Anomalie, vermeiden es aber, ein drittes Erklärungsmodell zu diskutieren.

Interessanterweise fanden wir eine entsprechende, sogar noch ausgeprägtere Anomalie der magnetischen Suszeptibilität in Bodenprofilen, die wir nahe des Tüttensees untersucht haben. Die Messungen ergaben zum Teil deutliche Spitzen für eine Tiefe von 15 - 35 cm (Abb. 22). Ein möglicher Zusammenhang mit dem Chiemgau Impakt ist denkbar, doch sind weitere Messungen und detaillierte Untersuchungen des betreffenden Horizontes erforderlich.

CHIEMGAU IMPACT SOIL MAGNETIC SUSCEPTIBILITY MEASUREMENTS

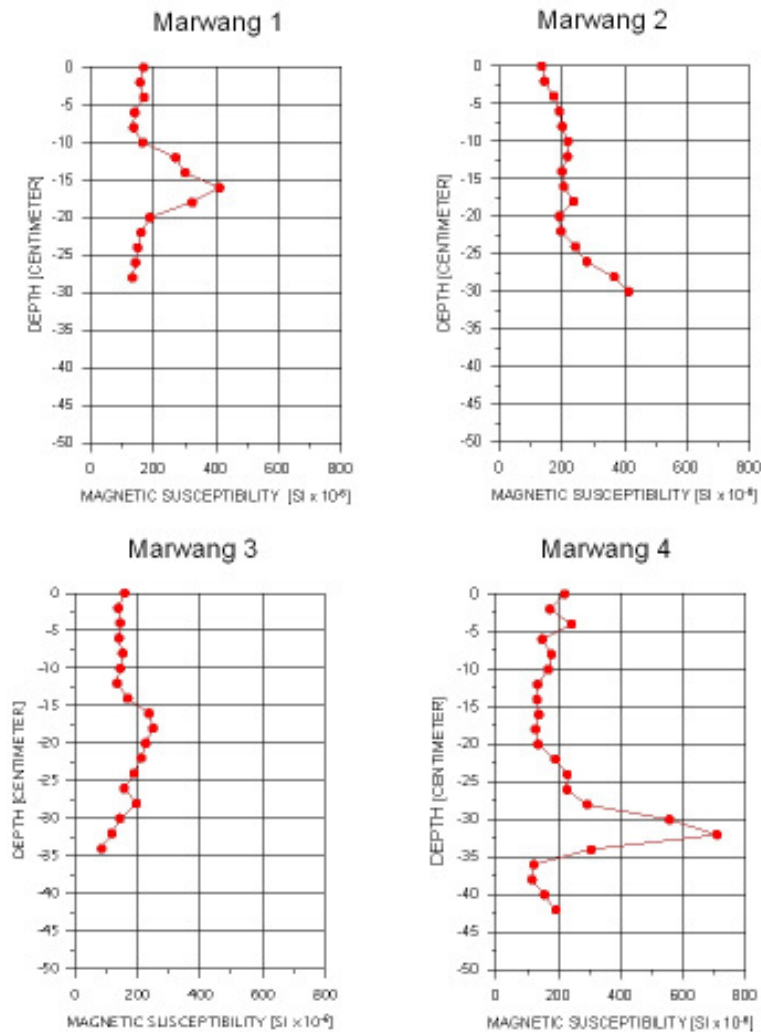


Abb. 22. Bodenmagnetische Suszeptibilitätsprofile aus einem Wald in der Nähe des Tüttensees (siehe Abb. 8).

5 Schockmetamorphose

Schock im Tüttensee-Ringwall

Schockmetamorphose von Gestein gilt nach allgemeiner Auffassung als Beleg für einen Meteoriteneinschlag (French 1998, und andere).

In Abhängigkeit von ihrer Intensität hinterlassen Schockwellen in einem Mineral sehr unterschiedliche Spuren. Zu den wichtigsten gehören sog. planare Deformationsstrukturen (PDFs). Abb. 23 (links) zeigt die Dünnschliffaufnahme solcher PDFs in Quarz. Unter dem Mikroskop sind mindestens fünf Scharen mit unterschiedlicher Orientierung erkennbar. Diese speziellen Strukturen sind sehr

engständige parallele, optisch isotrope Lamellen, die nach den kristallographischen Richtungen im Quarzkorn ausgerichtet sind.

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand (z.B. Stöffler & Langenhorst 1994) können multiple Scharen engständiger isotroper Lamellen nur durch extreme Schockdrücke entstehen. PDFs in Quarz konnten in verschiedenen Proben vom Tüttensee-Ringwall und aus der Bunten Brekzie der Tüttensee-Ejektalage nachgewiesen werden (s. im Detail web [3, 4]).

Einen anderen Schockeffekt, allerdings von geringerer Intensität, zeigt die Abb. 23 (rechts). In der Dünnschliffaufnahme sehen wir multiple Scharen planarer Brüche (PFs), die nach den kristallographischen Richtungen im Quarzkorn ausgerichtet sind. Normalerweise zeigt Quarz keine derartige Spaltbarkeit, und nur in seltenen Fällen kann Quarz unter extremen tektonischen Drücken in den stärksten Phasen der Regionalmetamorphose planare Brüche erfahren. Bei Impaktstrukturen dagegen gehören durch Schock erzeugte planare Brüche zum regulären Inventar.

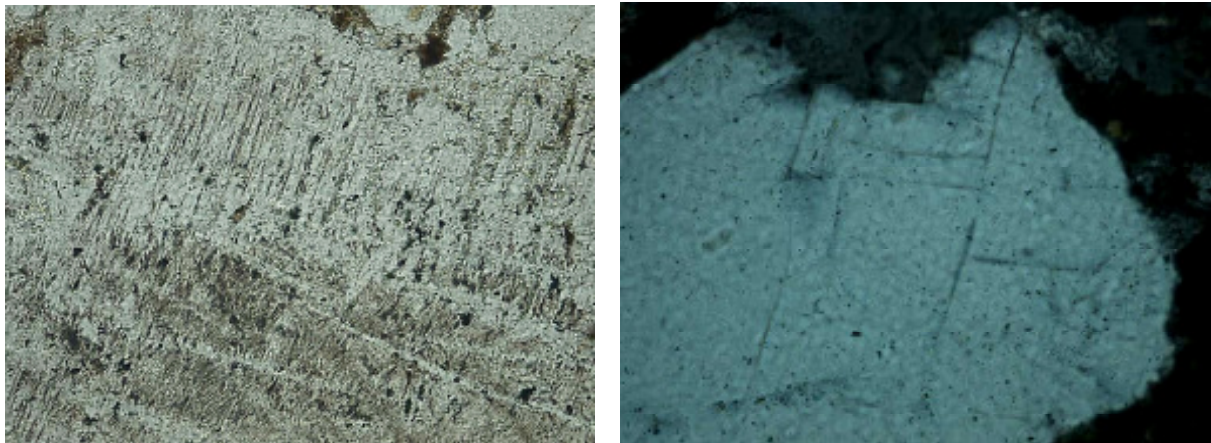


Abb. 23. Schockeffekte in Gesteinen des Tüttensee-Ringwalls. Dünnschliff-Aufnahmen, gekreuzte Polarisatoren; Bildbreiten ca. 500 µm. Links: Fünf Scharen planarer Deformationsstrukturen (PDFs) in Quarz. Das Bild lässt nicht alle Scharen erkennen, die aber bei Rotation des Dünnschliffes auf dem Mikroskopisch sichtbar werden. Rechts: Scharen planarer Brüche (PFs; Spaltbarkeit) in Quarz.

Schock in der Bunten Brekzie der Tüttensee-Ejektalage

Während Klasten vom Tüttensee-Ringwall nur vereinzelt auf Schockmetamorphose untersucht worden sind, wurden Proben der Bunten Brekzie vom Tüttensee systematisch auf Schockeffekte hin überprüft. Dafür wurden aus dieser Ejektalage ausgewählte Proben quartärer kristalliner und sedimentärer alpiner Gerölle entnommen.

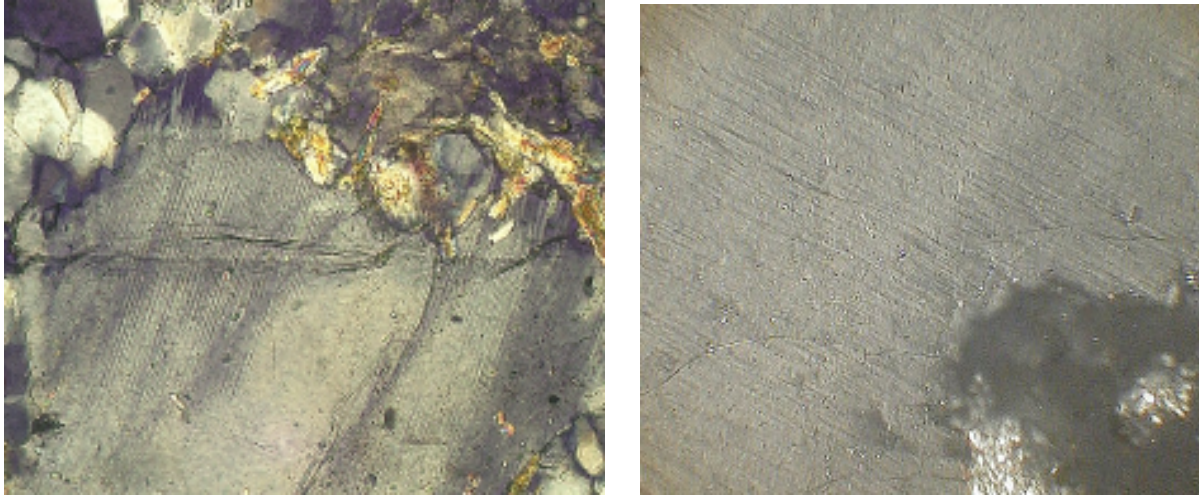


Abb. 24. PDFs in Quarz aus der Bunten Brekzie der Tüttensee-Ejektalage. Links: Quarzglimmerschiefer, Schurf Nr. 10. Rechts: Glimmerquarzit, Schurf Nr. 21. Dünnschliffaufnahmen, gekreuzte Polarisatoren; Bildbreiten 380 µm und 400 µm.

Die Untersuchung von Dünnschliffen von 31 Gesteinsproben, die aus 7 verschiedenen Schürfen stammen, ergab eine Fülle von Mineral-Deformationen (web [4]), die nach aller vernünftigen Überlegung bzw. mit sehr großer Wahrscheinlichkeit durch Schockbelastung entstanden sind. Die Schockeffekte sind moderat und umfassen planare Deformationsstrukturen (PDFs) in Quarz (Abb. 24), häufige und extreme Knickbänderung in Glimmer (Abb. 25) (s. z.B. Hörz 1970, French 1998), und regelmäßig auftretende multiple Scharen von Mikrozwillingen in Calcit (Abb. 26) (s. a. z.B. Metzler u.a. 1988). Angesichts dessen, dass der Impaktkrater vergleichsweise klein ist, ist die Häufigkeit der mutmaßlichen Schockverformungen, auch wenn sie nur mäßig ausgeprägt sind, auffällig. Aus diesem Grunde wird erwogen, dass die speziellen Bedingungen in der Gegend des Impakts, d.h. harte und dichte Gerölle in einer unverfestigten weichen Matrix, eine Fokussierung der Schockintensität ermöglicht hat, so wie sie schon früher für den Coconino-Sandstein (Kieffer 1971) und für ein geschocktes Konglomerat (Ernstson u.a. 2001; s. a. web [7]) in Betracht gezogen worden ist.

Ganz abgesehen von den erheblichen makroskopischen Hochdruck-/Kurzzeit-Deformationen, sprechen die mikroskopischen Schockdeformationen in Gestein vom Tüttensee eindeutig dafür, dass diese Struktur durch einen Impakt entstanden sein muss. Mit einer Entstehung durch Toteis (Doppler & Geiss 2005) sind diese petrographischen Beobachtungen nicht zu erklären.

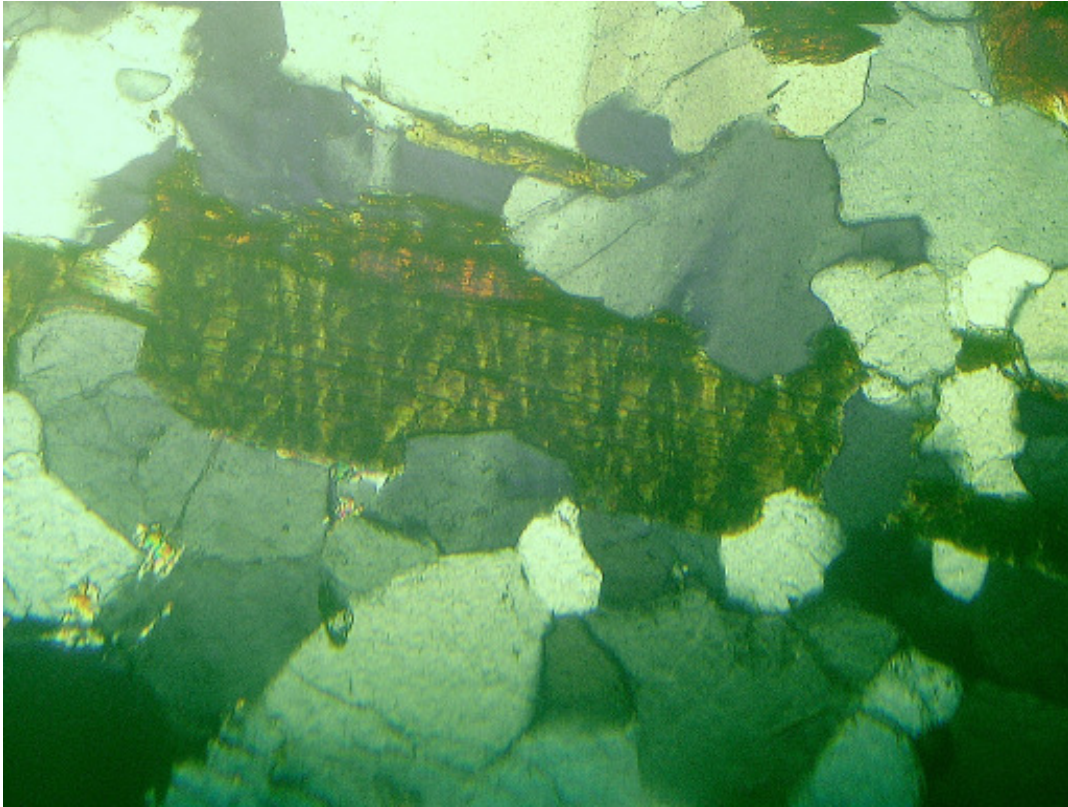


Abb. 24. Zwei Scharen engständiger Knickbänderung ("NNW - SSE" and "NNE - SSW") in Biotit. Gneis, Schurf Nr. 10. Dünnschliffaufnahme, gekreuzte Polarisatoren; Bildbreiten ca. 1 mm.

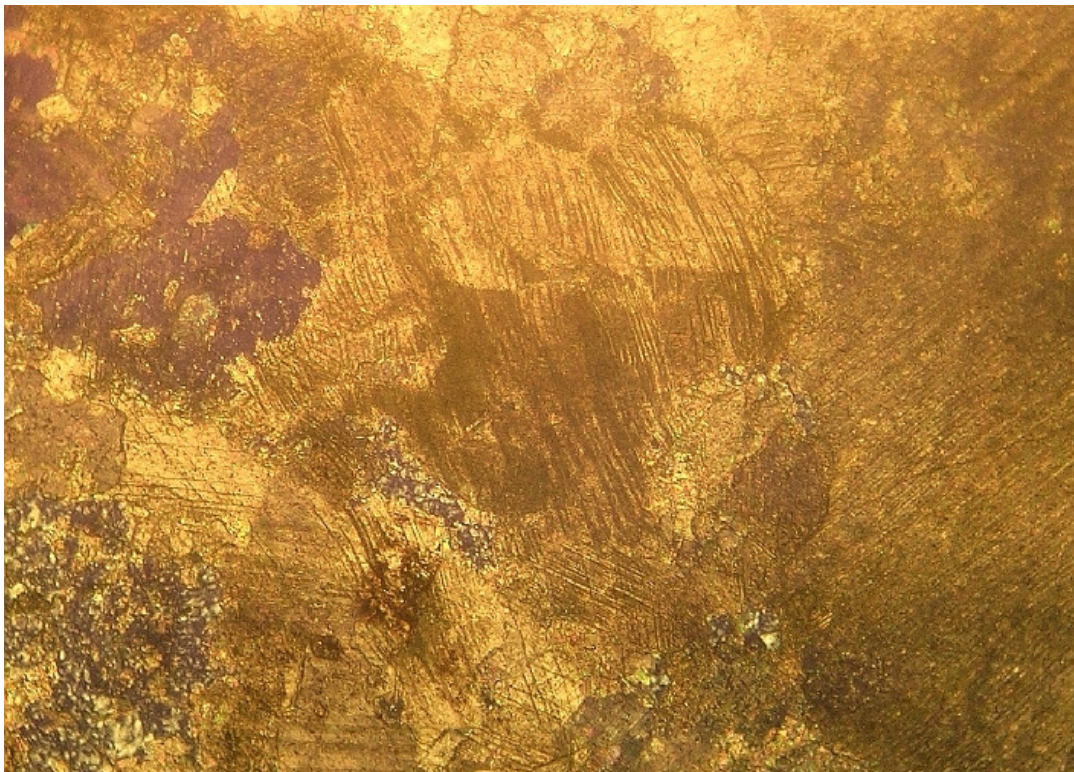


Abb. 25. Extrem deformierter Calcit mit multiplen Scharen von Mikrozwillingen und einigen Knickbändern. Calcit-Gängchen in Quarzit, Stefanutti-Schurf in Grabenstätt. Dünnschliffaufnahme, gekreuzte Polarisatoren; Bildbreite ca. 1 mm.

6 Zusammenfassung und die Entstehung des Tüttensee-Kraters

Zusammenfassend stellen wir fest:

- Der Tüttensee wird von einem ursprünglich kompletten und geschlossenen Ringwall umgeben.
- Der Ringwall enthält viele stark deformierte Gerölle, die auf eine Kurzzeit-/Hochdruck-Belastung hinweisen, wie sie für den Prozess der Entstehung eines Impaktkraters typisch ist.
- Klasten von Tüttensee-Ringwall zeigen klare Hinweise auf Schockmetamorphose in Form multipler Scharen planarer Deformationsstrukturen (PDFs) in Quarz, für deren Entstehung ein Schockdruck in einer Größenordnung von 10 GPa (100 kbar) oder mehr erforderlich gewesen sein muss.
- Der Tüttensee-Ringwall wird umgeben von einer Decke polymikter Brekzie, die teilweise der Bunten Brekzie der Impaktstruktur Nördlinger Ries ähnlich ist. Die Bunte Brekzie vom Tüttensee enthält brekzierte Klasten mit Vergriesungserscheinungen und Mörteltextur mit der Besonderheit, dass die Klasten trotz stärkster Zertrümmerung kohärent in der tonigen Matrix angetroffen werden. Die Bunte Brekzie enthält reichlich organisches Material wie Holz und Holzkohle sowie Tierknochen und Zähne.
- Die Brekzie liegt über einem fossilen Boden, der ebenfalls reich ist an organischem Material (Holz, exzellent erhaltene Schilfhalme, Büschel menschlicher oder/und tierischer Haare). Einzelne, häufig zertrümmerte, aber dennoch kohärente Klasten kompetenter Gesteine stecken in dem fossilen Boden.
- Klasten aus der Schicht der Bunten Brekzie zeigen häufig, wenn auch in mäßiger Ausprägung, Schockmetamorphose wie PDFs in Quarz, sehr starke Knickbänderung in Glimmer und intensive Mikroverzwillingung in Calcit.
- Klasten jeglicher Lithologie (also auch silikatische Gesteine wie Sandsteine oder Amphibolite) in der Tüttensee-Brekzie zeigen eine extrem tiefgreifende Korrosion bis hin zu residualen Gesteinsskeletten.
- Die Tüttensee-Bunte Brekzie wird überlagert entweder von einer frischen, vermutlich holozänen Kieslage mit unversehrten Geröllen sowie einem rezenten Bodenhorizont oder unmittelbar vom rezenten Boden.
- Radiokarbondatierungen von organischem Material aus der polymikten Brekzie (CEDAD 2006) belegen, dass die Brekzienlage jünger ist als 2500 v. Chr. und folglich aus keinem glazialen Prozess stammen kann.

Die Entstehung des Kraters

Die geologische Situation, so wie sie hier vorgestellt wurde, kann zwanglos durch wohlbekannte Vorgänge bei der Entstehung eines Impaktkraters (Melosh 1989) erklärt werden. Zur Zeit des Impaktes vor ca. 2500 Jahren besteht das Target aus dem Seeton des Chiemsees und lehmigen pleistozänen oder/und holozänen verlehnten Kiesbänken mit einem (nunmehr fossilen) Boden mit organischem Material (Holz, Schilf, Haarbüschel vielleicht aus einem Vogelnest). In der Kontakt- und Kompressionsphase laufen Schockwellen in das Projektil (das verdampft) und in die Untergrundgesteine, die schockmetamorph verändert werden. Der hohe Druck der Impaktexplosion, Schockwellen und die durch Schock initiierte Nachströmbewegung kompaktieren unverfestigte, hochporöse und wassergesättigte Gesteine des Target, was zu einer Verdichtung und der nunmehr zu beobachtenden auffälligen Zone positiver Schwereanomalien um den Tüttensee herum führt.

Bei der Exkavation des beim Impakt sich bildenden Tüttensee-Kraters werden Ejekta ausgeschleudert, die den Ringwall des Tüttensees formen, eine Decke aus zertrümmertem Auswurfmaterial über dem damaligen Bodenhorizont ausbreiten und, da der Vorgang rapide, katastrophenartig erfolgt, das organische Material unter Sauerstoffabschluss plombieren und bis heute in dem hervorragenden Zustand erhalten haben.

Die zerbrochenen und heftigst zerdrückten jedoch kohärenten Klasten innerhalb der weichen tonigen Brekzienmatrix, wie sie aber auch vom Tüttensee-Ringwall entnommen wurden, können durch den enormen Umschließungsdruck bei Exkavation und Landung der Ejekta erklärt werden, wie es von vielen anderen Impaktstrukturen (z.B. Ries in Deutschland, Azuara/Rubielos de la Cérda in Spanien [Claudin et al. 2001, Ernstson et al. 2002]) gut bekannt ist.

Die tiefreichende skelettartige Korrosion vieler Klasten wird durch Dekarbonisierung/Schmelzen und/oder Salpetersäure-Lösung von Karbonatgesteinen (Kalksteine, Dolomitsteine) und durch Salpetersäure-Lösung silikatischer Gesteine erklärt. Eine Produktion großer Mengen von Salpetersäure (und anderen Säuren) in der Explosionswolke großer Impakte ist wiederholt postuliert worden (Lewis et al. 1982, Prinn & Fegly 1987, Zahnle 1990, Maruoca & Koeberl 2003, und andere). Wir meinen, dass die tiefgreifend korrodierten Karbonat- und Silikatklaster aus dem Tüttenseegebiet der erste direkte Nachweis für diesen Prozess in irdischen Impakten sein könnte.

Schließlich haben jüngere Überflutungen die Bunte Brekzie des Tüttensees mit Kieslagen unversehrter Gerölle überdeckt; andernfalls hat sich der rezente Boden unmittelbar über dem Brekzienhorizont gebildet.

Bislang ungeklärt ist die mögliche Veränderung des Ringwalls und der Ejektaschicht unmittelbar nach dem Impakt. Echolotungen/Sonarmessungen auf dem Chiemsee erbrachten deutliche Hinweise auf runde, einen Wall aufweisende Strukturen, deren Durchmesser 100 - 200 m beträgt und die beim Chiemgau Impakt durch den Einschlag gesonderter Projektile entstanden sein könnten. Von diesen vermuteten Impakten ausgelöste, tsunamiartige Flutwellen könnten sich über den gerade entstandenen Tüttenseekrater und die Ejekta-Lage ergossen haben und verantwortlich sein für die Entstehung zusätzlicher Erosions- und Sedimentationsstrukturen. In den zwischen Tüttensee und Chiemsee gelegenen

Schürfen (s. Abb. 8), besonders in dem Schurf in Grabenstätt, gibt es Hinweise auf solche Vorgänge, die jedoch genauerer Untersuchung bedürfen.

7 Diskussion

In der Impaktforschung dienen nach derzeitigem Kenntnisstand (z.B. French 1998, Norton 2002) folgende Kriterien der Identifizierung von Impaktstrukturen:

- die Beobachtung des Impakts
- der Fund von Fragmenten des Impaktors oder geochemischer Signaturen des Projektils
- die Kratermorphologie
- geologische Merkmale (z.B. Brekzien, Brekziengänge, Deformationen durch kurzzeitigen hohen Druck, exotische Horizonte im Gestein)
- geophysikalische Anomalien
- Schockmetamorphose im Gestein und in Mineralen (planare Deformationsstrukturen, diaplektisches Glas, Shattercones im Gestein)

Bislang sind keine authentischen Berichte über das Ereignis bekannt, auch wenn es möglicherweise in alten Traditionen widergespiegelt wird (Rappenglück & Rappenglück 2006). Fragmente des Tüttensee-Impaktors wurden bisher nicht gefunden, doch mögen sie unter dem Wasser des Tüttensees und einer dicken organischen Schicht begraben sein. Das gleiche gilt für eine geochemische Signatur.

Der Ringwall, der ursprünglich den See komplett umschlossen hat, ist morphologisch gesehen verdächtig. Aber auch wenn seine Form für eine eiszeitliche Moräne recht untypisch ist, so ist doch Morphologie wenig aussagekräftig, wenn es um einen möglichen Impaktkrater geht.

Die postglaziale polymikte Brekzie (Bunte Brekzie), die die Tüttensee-Struktur wie eine Decke umgibt, zeigt alle Kriterien einer Impakt-Brekzie und, berücksichtigt man die Ablagerungsmerkmale, ebenso alle einer Impakt-Ejektalage. Vernünftigerweise ist kein „normaler“ geologischer Prozess vorstellbar, der im Holozän diese ausgedehnte besondere polymikte Brekzie erzeugt haben könnte. Es fehlen sämtliche erforderlichen Vorbedingungen (Relief, Quelle des Materials) für einen allenfalls in Betracht kommenden großen Erdrutsch oder Felssturz. Die Entstehung durch einen Impakt und als Ejekta scheint die einzig logische Erklärung zu sein. Die zahlreichen starken Deformationen, die an Geröllen aus dem Tüttensee-Ringwall zu beobachten sind, weisen auf *in situ* erfolgte Hochdruck-/Kurzzeit-Belastung hin und untermauern ebenfalls einen kraterbildenden Impaktprozess. Selbst Nichtgeologen sind überzeugt, dass diese zerbrochenen Klasten einen fluvio-glazialen Transport aus den Alpen niemals hätten überleben können. Doch genau ein solcher Transport muss angenommen werden, wenn die Deformationen ihren Ursprung in alpiner Tektonik hätten, wie es von Doppler & Geiss vorgeschlagen wird (2005).

Auch wenn geophysikalische Anomalien in Impaktstrukturen sehr kennzeichnend sein können (z.B. die ausgeprägte Schwereanomalie der Chicxulub Impaktstruktur [Hildebrand et al. 1995] oder die ausgedehnten geomagnetischen Anomalien über der zentralen Suevitlage des Rieskraters [Pohl et al. 1977]), reichen sie doch nicht aus, um einen möglichen endogenetischen Ursprung der Strukturen auszuschließen. Bedenkt man, dass Schwereanomalien kleinerer Impaktstrukturen generell negativ

sind, weil durch Gesteinsbrekzierung, Aushub und Mikrobrüche die Dichte reduziert wird (s. z.B. Innes 1961, Ernstson 1984), so ist die Zone relativ positiver Anomalien rund um den Tüttensee bemerkenswert, weil sie auf Gesteinsverdichtungen hinzuweist. Eine solche Verdichtung ist als Kompaktion durch den Impaktschock leicht erklärbar und in etwa der Bodenverflüssigung und anschließender -verdichtung vergleichbar, die von großen Erdbeben bekannt ist. In der Umgebung einer Toteismoräne hingegen ist eine solche erhöhte Dichte ziemlich schwierig zu erklären.

Abgesehen von der direkten Beobachtung eines Impakts und vom Fund von Projektilresten, wird Schockmetamorphose von Gesteinen, die einer verdächtigen Struktur entstammen, schon für sich allein genommen allgemein als unzweifelhafte Bestätigung eines Impakts betrachtet (French 1998, Langenhorst & Stöffler 1994, Grieve et al. 1996, u.a.). Dementsprechend muss allein schon der Nachweis von Schockeffekten in Gesteinen vom Tüttensee-Ringwall und in der Lage der Bunten Brekzie als Beleg für einen Impakt gelten.

Das konkurrierende Glazialmodell

Der Prozess der Anerkennung neuer irdischer Impaktstrukturen war fast immer begleitet von nachdrücklicher Ablehnung durch lokale und regionale Geologen. In vielen Fällen folgten langandauernde, heftige Kontroversen. Wir erinnern, neben anderen, an die Fälle des Nördlinger Ries-Kraters (Dehm 1969), die Impaktstrukturen von Vredefort (z.B. Nicolaysen & Reimold 1985) und Sudbury (Pye et al. 1984) und den spanischen multiplen Azuara-Impakt (Ernstson et al. 2001, 2002; Aurell 1994, Cortés et al. 2002). Im allgemeinen wird das Argument bemüht, die regionale geologische Situation sei angeblich unvereinbar mit einer Impaktgenese der zur Diskussion stehenden Struktur. Obwohl die Kollision eines Himmelskörpers mit der Erde bezogen auf die betroffene Region ein rein statistisches Ereignis ist, werden regionale Geologen nicht müde, die Karte der regionalen geologischen Verhältnisse auszuspielen.

So geschieht es auch bei dem als Impaktkrater betrachteten Tüttensee. In diesem Fall wird als Argument der regionalen Geologie die Lage des Tüttensees in der quartären Eiszeitlandschaft des Voralpenlandes ins Feld geführt, und die kraterähnliche Struktur wird, wie auch schon immer in der Vergangenheit, als Toteismoräne bezeichnet (Doppler & Geiss 2005). Außer einer flüchtigen Erkundung des Tüttenseegebiets (Doppler & Geiss 2005) liefern die Autoren keinerlei substantiellen Beleg für eine Genese durch glaziale Prozesse, was im Detail von CIRT (2005) diskutiert wurde. Auch das Argument von Schieber (2006, schriftliche Mitteilung), er habe ein typisches fluvio-gaziales Gefüge in einem der künstlichen Durchbrüche des Ringwalles beobachtet, ist in keiner Weise zwingend. Wir fragen uns, ob er in einem sehr kleinen Aufschluss wirklich eindeutig eine fluvio-glaziale Ablagerung von einer Ablagerung unterscheiden kann, die von einer Chiemsee-Unterwasser-Exkavation herrührt und möglicherweise nach dem eigentlichen Impakt noch durch tsunamiantige Erosions- und Sedimentationsvorgänge überprägt worden ist.

Um die Theorie des Chiemgau Impakts zu widerlegen und die Hypothese der glazialen Entstehung zu untermauern, werden von den Gegnern Bodenbildungsprozesse und Auflösung durch saure Böden als Argumente genannt, um die Deformationen und die tiefreichende Korrosion bis hin zu tiefreichender, skelettartiger Korrosion der Gesteine aus der Impaktschicht zu erklären. (Geiss 2006, Fernseh- und Radiointerviews). Hier erinnern wir daran, dass die zur Diskussion

stehenden Klasten Teil eines Gesteins sind, nämlich der Impakt-Brekzie, und weder in einem rezenten noch in einem fossilen Boden vorkommen. Falls die Kritiker beabsichtigen, Frostsprengung als Ursache der brekzierten Klasten anzuführen, verweisen wir schon vorsorglich auf den Umstand, dass Frost sich um 2000 v. Chr. und später wohl kaum bis in eine Tiefe von 1,50 m auswirkte. Außerdem zeigen die Abb. 14 und 15, dass die scharfkantigen Fragmente in der Brekzie offensichtlich keine Gegenstücke haben, wie sie bei einer durch Frost verursachten Zerlegung zu erwarten wären.

In einer neuen Stellungnahme von Kritikern des Chiemgau Impakts (Reimold et al. 2006) wird wieder das Argument einer Entstehung durch glaziale Prozesse herangezogen. Dabei werden die umfangreichen auf einen Impakt hinweisenden Ergebnisse, die in einer Reihe früherer Publikationen vorgelegt worden sind (siehe CIRT 2006 und die dortige Übersicht) komplett ignoriert und unterschlagen. Stattdessen argumentieren Reimold et al. (2006) (Zitat) „Overwhelming scientific evidence suggests that the larger structures referred by CIRT, in particular the largest one, Tüttensee, are kettle holes.“

Wir fragen uns, ob es sich hier um einen neuen Stil der wissenschaftlichen Diskussion handelt, der Tatsachen, Dokumente, Analysen, detaillierte Beschreibungen etc. durch die einfache und völlig unbegründete Behauptung ersetzt, dass „überwältigende Gewissheit“ bestehe.

8 Schlussfolgerungen

Wenn wir die Ergebnisse unserer Untersuchungen am Tüttensee den Argumenten der Kritiker des vorgeschlagenen Impaktszenarios gegenüberstellen, kommen wir zu dem Schluss, dass alles dafür spricht, den Tüttensee tatsächlich als einen nachgewiesenen Impaktkrater zu betrachten, und dass die Gegenargumente, die auf einem glazialen Ursprung aufbauen, wenig fundiert (Doppler & Geiss 2005), wenn nicht gar völlig substanzlos (Reimold et al. 2006) sind.

Die Anerkennung des Tüttensees als belegter Meteoritenimpaktkrater unterstützt die These eines großen Kraterstrefeldes (Rappenglück et al. 2004), das, wie wir annehmen, durch den Chiemgau Impakt geformt wurde. Außerdem verschafft sie der Arbeit jener Autoren (Fehr et al. 2005, Hoffmann et al. 2004 c, 2005 a, b, 2006 a, b, Rösler et al. 2005 a, b, 2006 a), die die zahlreichen kraterähnlichen Strukturen im nördlichen Teil des Streufeldes als nur möglicherweise impakt-bezogen betrachten, eine breitere Argumentationsbasis.

Danksagung. – Unsere Arbeit wäre ohne die aktive und immaterielle Unterstützung zahlloser Personen unmöglich. Herzlichen Dank an alle!

Literatur

Aurell, M. (1994): *Discusión sobre algunas de las evidencias presentadas a favor del impacto meteorítico de Azuara*. In: Extinción y registro fósil (E. Molina, ed.). Cuadernos interdisciplinarios. 5: 59-74. Seminario Interdisciplinar de la Universidad de Zaragoza. Zaragoza.

CEDAD (2006): Results of Radiocarbon Dating of samples LTL1582A and LTL1583A. - Report by Centro di Datazione e Diagnostica, Università degli Studi di Lecce.

CIRT, Chiemgau Impact Research Team (2004): Did the Celts see a cometary impact 200 B.C.? <http://www.astronomy.com/asy/default.aspx?c=a&id=2519>

CIRT, Chiemgau Impact Research Team (2005): Kommentar zu: Der Tüttensee im Chiemgau - Toteiskessel statt Impaktkrater, von Gerhard Doppler und Erwin Geiss (Bayerisches Geologisches Landesamt). <http://www.chiemgau-impact.com/kommentar.html>

CIRT, Chiemgau Impact Research Team (2006 a): On the origin of the xifengite and gupeite ferrosilicides. - http://www.chiemgau-impact.com/neu_min.html.

CIRT, Chiemgau Impact Research Team (2006 b): Erwiderung zur Presseerklärung des Naturkunde-Museums, Berlin (Dr. Gesine Steiner), vom 21.11.2006. <http://www.chiemgau-impakt.de/erwiderung.html>.

Claudin, K., Ernstson, K., Rampino, M.R., and Anguita, F. (2001): Striae, polish, imprints, rotated fractures, and related features in the Puerto Mínguez impact ejecta (NE Spain). *Abstracts, 6th ESF IMPACT workshop, Impact Markers in the Stratigraphic record*, pp 15-16.

Cortés, A.L., Díaz-Martínez, E., Sanz-Rubio, E., Martínez-Frías, J. & Fernández, C. (2002): Cosmic impact versus terrestrial origin of the Azuara structure (Spain): A review. *Meteoritics Planet. Sci.* 37: 875-894.

Dehm, R. (1969): Geschichte der Riesforschung. - *Geologica Bavarica*, 61, 25-35.

Doppler, G. & Geiss, E. (2005): Der Tüttensee im Chiemgau – Toteiskessel statt Impaktkrater. http://www.geologie2.bayern.de/app/media/user-files/1118154325830_tuettensee.pdf

Ernstson, K. (1984): A gravity-derived model for the Steinheim impact crater. - *Geol. Rundschau*, 73, 483-498.

Ernstson, K., Rampino, M. R., and Hiltl, M. (2001): Cratered cobbles in Triassic Buntsandstein conglomerates in northeastern Spain: An indicator of shock deformation in the vicinity of large impacts. *Geology*, **29**: 11-14.

Ernstson, K., Claudin, F., Schüssler, U., Anguita, F. and Ernstson, T. (2001): Impact melt rocks, shock metamorphism, and structural features in the Rubielos de la

- Cérida structure, Spain: evidence for a companion to the Azuara impact structure, in: *Impact markers in the stratigraphic record, 6th ESF-IMPACT workshop Granada, abstract book*: 23-24.
- Ernstson, K., Claudin, F., Schüssler, U. & Hradil, K. (2002): The mid-Tertiary Azuara and Rubielos de la Cérida paired impact structures (Spain). *Treballs del Museu de Geologia de Barcelona*. 11: 5-65
- Ernstson, K. (2005): Gravimetrische Untersuchungen bei Grabenstätt: Anzeichen für einen Impaktursprung des Tüttensee-Kraters erhärtet. <http://www.chiemgau-impact.com/gravimetrie.html> .
- Fehr, K.T., Hochleitner, R., Hölzl, S., Geiss, E., Pohl, J., Faßbinder, J. (2004): Ferrosilizium-Pseudometeorite aus dem Raum Burghausen, Bayern. *Der Aufschluß* 55, S. 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. (1998): *Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*. LPI Contribution No. 954, Lunar and Planetary Institute, Houston. 120 pp.
- Grieve, R.A.F., Langenhorst, F. and Stöffler D. (1996): Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: II. Significance in geoscience. *Meteoritics & Planet Sci*, **31**: 6-35
- Gurov, E.P. & Gurova, E.P. (1998): The group of Macha craters in western Yakutia. - *Planet. Space Sci.*, 46, 323-328.
- Hildebrand, A.R., Pilkington, M., Connors, M., Ortizaleman, C. and Chavez, R.E. (1995): Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gravity gradients and cenotes. *Nature*, 376(6539): 415-417.
- Hodge, P. (1994): *Meteor craters and impact structures*. Cambridge University Press, 124 pp.
- Hoffmann et al. (2004 a): Evidence for an impact strewn field in SE Bavaria. Paneth-Kolloquium, Nördlingen.
- Hoffmann, V., Rösler, W., Schibler, I. (2004 b): Anomalous magnetic signature of top soils in Burghausen area, SE Germany. *Geophys. Res. Abstracts*, 6, 05041.
- Hoffmann V., Rösler W. and Raeymaekers B. (2004 c). Is the anomalous magnetic signature of soil profiles from SE due to an impact stray field? Abstract, IX Castle Meeting, Javorina, Slovakia.
- Hoffmann, V., Rösler, W., Patzelt, A., Raeymaekers, B., van Espen, P. (2005 a): Characterization of a small crater-like structure in southeast Bavaria, Germany. *Meteoritics and Planetary Science*, 40, p. A129.

- Hoffmann V., Rösler W., Patzelt A. and Raeymaekers B. (2005 b). Characterisation of a small crater-like structure in SE Bavaria, Germany. Abstract Int. Met. Soc. Conf., Gatlinburg.
- Hoffmann V., Rösler W., Patzelt A. and Raeymaekers B. (2006 a.): Are the local/regional geophysical anomalies and material findings (FeSi components and diamond/fullerene containing carbon spherules) in SE Bavaria/Germany due to an impact? Abstract NIPR Antarct. Meteor. Conf., Tokyo.
- Hoffmann, V., Tori, M., Funaki, M. (2006 b): Peculiar magnetic signature of Fe-silicide phases and diamond/fullerene containing carbon spherules. Abstract, 10th Castle Meeting on New Trends in Geomagnetism., Travaux Géophysique, XX.
- Hörz, F. (1970): Static and dynamic origin of kink bands in micas. J. Geophys. Res., 75, 965- 977.
- Innes, M.J.S. (1961): The use of gravity methods to study the underground structure and impact energy of meteorite craters. - J. Geophys. Res., 66, 95-117.
- Kieffer, S. W. (197): Shock metamorphism of the Coconino Sandstone at Meteor Crater, Arizona. J. Geophys. Res., 76, 5449-5473.
- Krinov, E.L. (1963): In: The solar system, vol. IV, pp. 183-187, 189-207, 208- 234, University of Chicago Press.
- Lee, K.L., and A. Albaisa. (1974): Earthquake induced settlements in saturated sands. - J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 100(4), 387-406.
- Lewis, J.S., Hampton Watkins, G., Hartman, H., and Prinn, R.G. (1982): Chemical consequences of major impact events on Earth, *in* Silver, L.T., and Schultz, P.H., eds., Geological implications of impacts of large asteroids and comets on the Earth: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 190, p. 215–221.
- Maruoka, T. & Koeberl, (2003): Acid-neutralizing scenario after the Cretaceous-Tertiary impact event. Geology, v. 31; no. 6; p. 489-492.
- Melosh, H.J. (1989): *Impact cratering. A geologic process*. Oxford Univ. Press, Oxford, 245 pp.
- Metzler, A., Ostertag, R., Redeker, H.-J. and Stöffler, D. (1988): Composition of crystalline basement and shock metamorphism of crystalline and sedimentary target rocks at the Haughton impact crater, Devon Island, Canada. *Meteoritics*, **23**: 197-207.
- Montgomery, D.R., Greenberg, H.M., and Daniel T. Smith, D.T. (2003): Streamflow response to the Nisqually earthquake. - Earth Planet. Sci. Let., 209, 19-28.
- Nicolaysen, L. O. & Reimold, W. U. (1985): Shock Deformation, Shatter Cones, and Pseudotachylite at Vredefort: a Review of Major Unsolved Problems and Current Efforts to Resolve Them. LUNAR AND PLANETARY SCIENCE XVI, PP. 618-619. Abstract.
- Norton, O.R. (2002): *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. 354 pp., Cambridge University Press.

Pohl, J., Stöffler, D., Gall, H. and Ernstson, K. (1977): The Ries impact crater. In: *Impact and Explosion Cratering* (D.J. Roddy, R.O. Pepin, R.B. Merrill, eds.), Pergamon Press, New York, 343 - 404.

Prinn, R.G., and Fegley, B. Jr. (1987): Bolide impacts, acid rain, and biospheric traumas at the Cretaceous-Tertiary boundary: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 83, p. 1–15.

Pye, E.G., Naldrett, A.J., Giblin, P.E. (eds.) (1984). *The Geology and Ore Deposits of the Sudbury Structure*. - Ontario Geological Survey Special Volume 1. Ministry of Natural Resources, Ontario, 603 pp.

Raeymaekers, B. (2005): A Prospective Biomonitoring Campaign with Honey Bees in a District of Upper-Bavaria (Germany). - *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 116, No. 1-3. (May 2006), pp. 233-243.

Raeymaekers, B. & Schryvers, D. (2004): Iron silicides and other metallic species in the SE Bavarian strewn field). *Paneth-Kolloquium Nördlingen*.

Rappenglück et al. (2004): The Chiemgau impact event in the Celtic Period: evidence of a crater strewnfield and a cometary impactor containing presolar matter. <http://www.chiemgau-impact.com/>

Rappenglück et al. (2005): Sind die Eisensilizide aus dem Impakt-Kraterstreufeld im Chiemgau kosmisch? - *Eur. J. Mineral.* 17, Beih. 1: 108.

Rappenglück, B. und M. (2006): Does the myth of Phaethon reflect an impact? – Revising the fall of Phaethon and considering a possible relation to the Chiemgau Impact. *Mediterranean Archaeology & Archaeometry (MAA)*, Vol.6, No.3 (2006), in press.

Reimold et al. (2006): Vermeintlicher Einschlag eines Kometen im Chiemgau entbehrt wissenschaftlicher Grundlage. <http://download.naturkundemuseum-berlin.de/presse/Chiemgau.pdf>.

Rösler et al. (2004): Puzzling new carbon materials in forest soils: carbonaceous graphitic spherules (CGS) with diamonds. *Paneth-Kolloquium, Nördlingen*.

Rösler W., Hoffmann V., Raeymaekers B., Schryvers D., Popp J. (2005 a). Diamonds in carbon spherules - evidence for an impact? Abstract Int. Met. Soc. Conf., Gatlinburg.

Rösler, W., Hoffmann, V., Raeymaekers, B., Schryvers, D., Popp, J. (2005 b): Diamonds in carbon spherules - evidence for a cosmic impact?. *Meteoritics and Planetary Science*, 40, p. A129.

Rösler et al. (2006 a): Characterisation of a small craterlike structure in SE Bavaria, Germany. *European Space Agency First International Conference on Impact Cratering in the Solar System*. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 812 May, 2006.

Rösler W., Hoffmann V., Raeymaekers B., Yang Z., Schryvers N. and Tarcea N. (2006 b): Carbon spherules with diamonds in soils. Abstract, 1st Inter. Conf. Impacts, Noordwijk.

Schryvers, D. & Rössler, W. (2004): Diamond identification by TEM in carbonaceous graphitic sperules. Paneth-Kolloquium, Nördlingen.

Schryvers, D. and Raeymakers, B. (2005): EM characterisation of a potential meteorite sample, proceeding of EMC 2004, Vol. II, p. 859-860 (ed. D. Schryvers, J.P. Timmermans, G. Van Tendeloo).

Schüssler (2005 a): Petrographie und Geochemie von mechanisch und thermisch geschockten Geröllen aus dem nördlichen Bereich des Impakt-Areals. <http://www.chiemgau-impact.com/petrographie.html>.

Schüssler (2005 b): New analyses - new photomicrographs: xifengite, gupeiite and titanium carbide. <http://www.chiemgau-impact.com/analysis.html>.

Schüssler et al. (2005): Das Impakt-Kraterstreufeld im Chiemgau. - Eur. J. Mineral. 17, Beih. 1: 124.

Zahnle, K.J. (1990): Atmospheric chemistry by large impacts, in Sharpton, V.L., and Ward, P.D., eds., Global catastrophes in Earth history: An interdisciplinary conference on impacts, volcanism, and mass mortality: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 247, p. 271–288.

web 1 <http://www.chiemgau-impakt.de/Seiten%201-10.pdf>

web 2 <http://www.chiemgau-impakt.de/Seiten%2011-26.pdf>

web 3 <http://www.chiemgau-impakt.de/ATT00007.pdf>

web 4 <http://www.chiemgau-impact.com/ATT00007.pdf>

web 5 <http://www.chiemgau-impact.com/gravimetrie.html>

web 6 <http://www.chiemgau-impact.com/makro.html>

web 7 <http://impact-structures.com/spain/shocked.htm>

* Das *Chiemgau Impact Research Team (CIRT)*: R. Behr, G., Benske, T. Bliemetsrieder, K. Ernstson, T. Ernstson, H.-P. Matheisl, W. Mayer, E. Neugebauer, B. Rappenglück, M.A. Rappenglück, U. Schüssler, R. Sporn