Schock-Effekte (Schockmetamorphose) in Gesteinen aus dem Impakthorizont am Tüttensee (Ejekta, Bunte Breccie)

Shock effects (shock metamorphism) in rocks from the impact layer (ejecta, Bunte Breccia) at Lake Tüttensee (Chiemgau impact event)

Abstract. - Numerous excavation pits have been performed in the surroundings of Lake Tüttensee that is proposed to have formed as a 400 m-diameter meteorite crater in the Chiemgau impact event. The excavation pits have revealed the existence of a more or less continuous ejecta blanket around the lake, and the peculiarities of the layer have already been http://www.chiemgau-impakt.de/ATT00007.pdf, http://www.chiemgaudescribed impakt.de/Seiten%201-10.pdf und http://www.chiemgau-impakt.de/Seiten%2011-26.pdf. Now, samples from Quaternary crystalline and sedimentary Alpine cobbles were selectively taken from this ejecta layer in order to systematically analyze them for shock effects, for the time being under the optical microscope only. The study of thin sections from 31 rock samples taken from 7 different excavations establishes a rich inventory of mineral deformations that with reasonable certainty or with great likeliness have originated from shock load. The shock effects are moderate and comprise planar deformation features (PDFs) in quartz, extreme and abundant kinking in mica, and regularly occurring multiple sets of microtwinning in calcite. For comparison, these characteristic deformations are also shown for minerals in impact rocks from other impact structures (Figs. 1-4), and the possible origin from static, tectonic deformation in high-grade regional metamorphism is also discussed. With regard to the relatively small impact crater, the frequency of occurrence of the presumed shock deformations, although of moderate intensity, is conspicuous. Therefore, the special target conditions, that is hard and dense cobbles and boulders in an uncemented soft matrix, are discussed to have enabled a focusing of shock intensity as has earlier been considered for the Coconino sandstone (Kieffer 1971) and for a shocked conglomerate (Ernstson et al. 2001; also see http://impact-structures.com/spain/shocked.htm).

Beim Aufprall eines Großmeteoriten (Asteroid, Komet) auf die Erdoberfläche gehören die sich in das Projektil und in den Untergrund ausbreitenden Schockwellen (Stoßwellen) zu den wichtigsten Abläufen bei diesem geologisch so markanten Prozeß. Die in den Impaktor laufenden Schockwellen bringen bei den mit den enormen Drücken verknüpften extremen Temperaturen diesen zum Verdampfen: mit einem grob vergleichbaren Volumen des Untergrundgesteines geschieht dasselbe. Bei fortschreitenden Schockwellen nehmen Energie, Druck und Temperatur ab, so daß mit radial zunehmender Distanz die Gesteine nur noch schmelzen und schließlich nur noch zertrümmert werden. Neben der makroskopischen Erzeugung Schmelz- und Trümmergesteinen können die Schockwellen auch im mikroskopischen Bereich der Gesteine und Minerale enorme Veränderungen anrichten, wovon viele als diagnostisch für eine Schockbeanspruchung und für ein Impaktereignis angesehen werden. Ein besonders aussagekräftiger Schockindikator ist das Mineral Quarz, für das sehr viele diesbezügliche Untersuchungen vorliegen (Stöffler 1972, Stöffler & Langenhorst 1994, Grieve et al. 1996, und viele andere). Eine besondere Klasse von Schockdeformationen im Quarz stellen die sog. planaren Deformationsstrukturen (PDFs. Abkürzung für das englische planar deformation features) dar. Dabei handelt es sich um sehr engständige (Abstand < 1 um bis zur Größenordnung von 10 µm) und sehr schmale (Bruchteile von µm) isotrope Lamellen, die nach den kristallographischen Richtungen des Kristalls ausgerichtet sind. Isotrop bedeutet optisch isotrop, d.h. die feinen Lamellen verhalten sich optisch wie ein Glas. Die Lamellen können homogen, aber auch mit feinsten Einschlüssen dekoriert sein. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand können sich PDFs nur unter Schockbeanspruchung und nicht bei vulkanischen und tektonischen geologischen Prozessen bilden. Die Mindestdrücke für die Bildung von PDFs in Quarz liegen bei 5 - 10 GPa (= 50 - 100 kbar).

Abb. 1 zeigt ein Quarzkorn aus einem Suevit des Nördlinger Ries-Kraters mit einer Schar typischer PDFs.

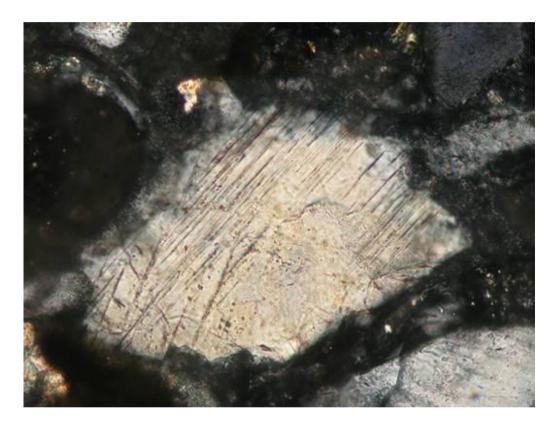


Abb. 1. PDFs in einem Quarz aus dem Suevit des Nördlinger Ries-Kraters. Dünnschliffaufnahme, xx Polarisatoren; Bildbreite 460 µm.

Fig. 1. PDFs in quartz from a suevite, Nördlinger Ries impact structure (Germany). Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 460 µm wide.

Ein charakteristisches Merkmal von PDFs ist, daß sie in Form multipler Scharen auftreten können (Abb. 2), und es wird angenommen, daß die Anzahl der Scharen in einem Korn grob mit der Höhe des Schockdrucks zusammenhängt.

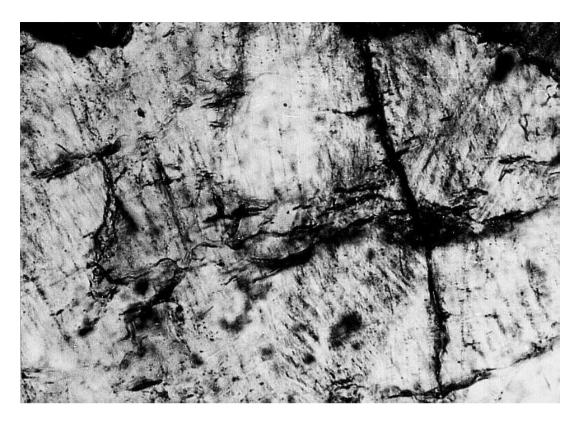


Abb. 2. Multiple Scharen von PDFs in einem Quarzkorn aus einer stark geschockten polymikten Breccie aus der Azuara-Impaktstruktur in Spanien. Dünnschliffaufnahme, xx Polarisatoren; Bildbreite 140 µm.

Fig. 2. Multiple sets of PDFs in quartz from a strongly shocked polymictic breccia, Azuara impact structure (Spain). Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 140 μm wide.

Die weitaus meisten Untersuchungen über PDFs liegen für Gesteine eines kristallinen Untergrundes (aus z.B. Graniten und Gneisen) vor. und wenig ist bisher über derartige Effekte in Sedimentgesteinen berichtet worden. Diese unterscheiden sich von den Kristallingesteinen im allgemeinen durch einen höheren Porenraum, der beim Impakt auch noch mit Wasser gefüllt sein kann, was für die Schockausbreitung von Bedeutung ist. Allgemein wird angenommen, daß die PDF-Schockeffekte in Sedimentgesteinen weniger ausgeprägt sind, und es scheint, daß in Quarz in Sedimentgesteinen andere kristallographische Richtungen als in Kristallingesteinen bevorzugt werden. Daß sich Sedimentgesteine offenbar anders verhalten, zeigt auch das Nördlinger Ries. Zum einen steht fest, daß in den Auswurfmassen der Bunten Breccie kaum Schockeffekte zu beobachten sind. Darüber hinaus haben eigene Untersuchungen ein bemerkenswertes Resultat erbracht. Es wurden Quarzsandsteinproben des Keuper entnommen, und zwar aus den Bunten Trümmermassen aus dem inneren Bereich der Impaktstruktur (Steinbruch Limberg), und mikroskopische Untersuchungen an mehreren Dünnschliffen vorgenommen. Abgesehen wenigen unregelmäßigen Brüchen von wurde keine Schockbeanspruchung und nicht ein einziges Quarzkorn mit PDFs gefunden.

Wir gehen hier deshalb etwas ausführlicher auf diese Konstellationen ein, um die im Zusammenhang mit dem Chiemgau-Impakt gefundenen Schockeffekte im Rahmen bisheriger Kenntnisse und Erkenntnisse besser beurteilen zu können. Wie unschwer zu sehen ist, haben die vom Chiemgau-Impakt betroffenen Gesteine eine Art

Mittelstellung zwischen den Kristallin- und den Sedimentgesteinen. Aus Moränenund Schottermaterial aufgebaut, hat das Einschlaggebiet eindeutig sedimentären Charakter, bei dem teilweise sogar das Wasser (sowohl im großvolumigen http://www.chiemgau-Porenraum der Gesteine [siehe dazu impact.com/gravimetrie.html] als auch in Form der Chiemsee-Ausläufer) eine große Rolle gespielt haben sollte. Andererseits haben wir es aber auch mit einer großen Menge von Kristallingesteinen zu tun, die einen hohen Anteil an den alpinen Geröllen innerhalb der Sedimentablagerungen besitzen. Schockeffekte aus einem solchen lockeren sedimentären Aufschlaggebiet mit Kristallingeröllen sind unseres Wissens bisher nicht beschrieben worden. Als Vergleich kann man noch die vielen und deutlichen Schockeffekte in den dichten Quarzitgeröllen aus den unverfestigten Ejekta der Azuara-Impaktstruktur (Pelarda-Formation) in Spanien (Ernstson & Claudin 1990, Ernstson et al. 2002, Claudin & Ernstson, in prep.) heranziehen. Im Fall der Gerölle aus leicht metamorph überprägten Sedimenten der Azuara-Ejekta spielt sicherlich auch die fehlende Porosität eine wichtige Rolle, wenn ein Vergleich zu den Schockeffekten in Kristallingesteinen herangezogen wird. Aber die ungewöhnlich reichlichen Schockeffekte in der Pelarda-Formation können auch eine Folge von Fokussierungseffekten durch Interferenz und Reverberationen der Schockwellen innerhalb der grob kugeligen Gerölle sein, so wie es Kieffer (1971) (in einem allerdings anderen Maßstab) für die Schockeffekte in den Sandkörnern des Coconino-Sandsteins des Meteorkraters in Arizona beschrieben hat.

Damit kommen wir zum Chiemgau-Impakt und seinen Schockeffekten, bei denen ebenfalls die besondere Konstellation geschockter Gerölle in einer unverfestigten Matrix eine besondere Rolle gespielt haben könnte. Bisher waren Schockeffekte (darunter multiple Scharen von PDFs in Quarz) eher als Nebenprodukt bei der generellen petrographischen Untersuchung von Geröllen aus einem Krater im Norden der Streuellipse (Krater 004) und aus dem Ringwall des Tüttensee-Kraters aufgefallen (siehe http://chiemgau-impakt.de/mineral.html und http://chiemgauimpakt.de/tuettensee.html#Anchor-Makroskopisch-58339). Inzwischen zahlreiche Schürfe im Umfeld des Tüttensees niedergebracht, die auf eine mehr oder weniger zusammenhängende Schicht von Auswurfmassen (Impakt-Horizont) um den See herum hinweisen. Die Besonderheiten dieses Horizontes mit seinen impakttypischen Merkmalen sind bereits beschrieben worden: http://www.chiemgauimpakt.de/ATT00007.pdf. http://www.chiemgau-impakt.de/Seiten%201-10.pdf http://www.chiemgau-impakt.de/Seiten%2011-26.pdf. Gezielt wurden Proben aus dieser Schicht entnommen, die systematisch auf Schockeffekte analysiert wurden, wobei vorerst allein Untersuchungen am optischen Mikroskop vorliegen. Nach Durchsicht von Dünnschliffen aus 31 Gesteinsproben aus 7 Schürfen reichhaltiges verschiedenen steht fest, daß ein Inventar Mineralveränderungen die mit Sicherheit oder besteht. sehr aroßer Wahrscheinlichkeit auf Schockeinwirkung zurückzuführen sind. Zum einen werden in vielen Schliffen planare Deformationsstrukturen in Quarz nachgewiesen, darunter mehrfach multiple Scharen von PDFs in einem Korn. In einem Schliff aus einem Quarzit weisen in größeren Bereichen sämtliche Quarzkörner zumindest eine Schar von PDFs auf. Feldspäte mit multiplen leiterähnlichen Systemen aus planaren Deformationsstrukturen, in dieser Form aus anderen Impaktstrukturen beschrieben (z.B. French & Short 1968, French 1998), sind häufig, desgleichen multiple Scharen engständiger Deformationslamellen sowie Knickbänder in Quarz. Bei letztgenannten planaren Strukturen ist natürlich auch die Frage nach einer tektonischen Einwirkung bei hochgradiger Regionalmetamorphose im alpinen Ausgangsgestein zu stellen.

Eine andere Deformation in Gesteinen des Tüttensee-Impakthorizontes betrifft die in den Kristallin- und Sedimentgeröllen häufigen Glimmerminerale. Ein typischer Schockeffekt moderater Intensität sind sogenannte Knickbänder, die bei druckinduzierten Stauchungen des Korns (Schockdrücke > 1 GPa = 10 kbar; Hörz [1970]) durch Gleitungen und Rotationen im Kristallgitter entstehen. Die abgeknickten, rotierten Zonen erzeugen unter dem Polarisationsmikroskop ein Streifenmuster (Abb. 3).

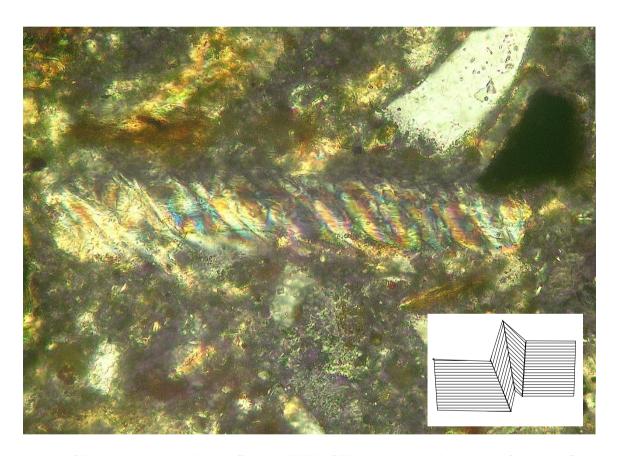


Abb. 3. Glimmer mit vielen Knickbändern ("NW - SE" verlaufend). Aus einem Suevit (grüner Suevit von Chassenon) der Rochechouart-Impaktstruktur (Frankreich; siehe auch hier: http://www.impaktstrukturen.de/france/rouchechouart.htm). Dünnschliffaufnahme, xx Polarisatoren, Bildbreite 210 µm. Unten rechts eingefügt: schematische Knickbandgeometrie.

Fig. 3. Mica exhibiting lots of kinkbands ("NW - SE" trending). From a suevite (greenish Chassenon suevite), Rochechouart impact structure (France; also see here: http://impact-structures.com/france/rouchechouart.htm). Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 210 µm wide. Inserted down to the right: schematic kink-band geometry.

Knickbänder in Glimmern können auch bei statischer Deformation entstehen und tektonisch stark beanspruchten sind vielfach von Gesteinen Regionalmetamorphose und aus Druckexperimenten beschrieben worden, wobei im allgemeinen statische Drücke von einigen Kilobar angenommen bzw. aufgewendet wurden. Nach einer vergleichenden Untersuchung von Hörz (1970) an tektonisch, experimentell statisch und schock-deformierten Gesteinen zeigen sich jedoch signifikante Unterschiede. die sich im allgemeinen bei dvnamischer Schockdeformation in einer erhöhten Knickbandhäufigkeit, einhergehend mit einer geringeren Bandbreite, sowie in einer deutlich größeren Unsymmetrie bei den Knickwinkeln äußern. Eine eindeutig schock-diagnostische Eigenschaft kann den Knickbändern in Glimmern aber nicht zugeschrieben werden, was auch für die Gesteine aus dem Impakthorizont am Tüttensee gilt. Dennoch läßt sich feststellen. daß die Glimmer in den Tüttenseeproben ungewöhnlich stark geknickt sind, wobei gerade die Merkmale einer dynamischen Schockbeanspruchung, Knickband-Häufigkeit, die sehr geringe Breite der Bänder und ihre ausgesprochene Unsymmetrie hervorstechen. Es werden Schliffe von Gesteinen aus den Schürfen am Tüttensee angetroffen, in denen praktisch alle Glimmer eine intensive Knickbänderung aufweisen.

Knickbänder und andere Deformationsbänder werden auch in Quarz und Feldspat von geschockten Gesteinen verschiedener Impaktstrukturen beschrieben (z.B. Bunch 1968, Carter 1968), können aber auch einen (quasi)statischen Ursprung (tektonische Deformation der Regionalmetamorphose) haben. Einige Schliffe aus den Geröllen der Tüttensee-Schürfe zeigen extreme Häufigkeit und Intensität solcher - im weitesten Sinne - planarer Strukturen. Im Quarz treten sie zusammen mit PDFs auf und mögen ebenfalls eine Schockgenese haben. Um einen tektonischen Ursprung auszuschließen, müssen weitergehende Untersuchungen folgen.

Anders als silikatische Gesteine mit Quarzen, Feldspäten, Glimmern und anderen schockempfindlichen Mineralen, sind karbonatische Gesteine (Kalksteine, Dolomite) als Schockindikatoren weniger gut geeignet. Es gibt eine Reihe von Untersuchungen zu Schockwirkungen in Calciten (Borus 1975, Metzler et al. 1988, Heuschkel et al. 2001, Burkhard & Girardin 2006, und andere), die vor allem mit speziellen Analysetechniken (Raman-Spektroskopie, Elektronenspinresonanz, REM) aufgezeigt werden. Z.B. liegen solche Untersuchungen auch für Kalksteine aus den Impaktstrukturen von Ries und Steinheimer Becken vor. Untersuchungen mit dem optischen Mikroskop beschränken sich auf das Erkennen von ungewöhnlichen mechanischen Deformationen, z.B. Ähnlichkeiten mit planaren Strukturen in silikatischen Mineralen (multiple Scharen planarer Elemente, Knickbänderung, planare Brüche), oder Zwillingsbildungen im Mikrobereich (Fig. 4). Vor allem Zwillingsbildungen im Mikrobereich mit Lamellierungen. die an das Mikroskops Auflösungsvermögen des optischen heranreichen, werden auf Schockwirkung bei mäßigem Druck zurückgeführt (Metzler et al. 1988).

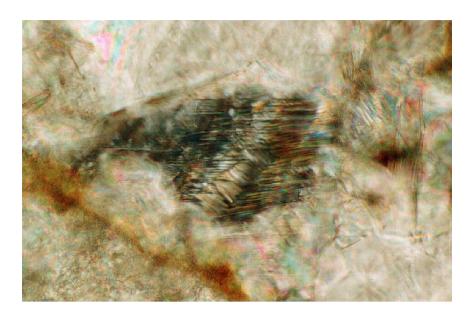


Abb. 4. Mikrozwillinge und Knickbänderung in einem Calcitkristall. Aus einer geschockten polymikten Gangbreccie, Azuara-Impaktstruktur (Spanien). Dünnschliffaufnahme, Bildbreite 200 μm. Foto: G. Mayer.

Fig. 4. Microtwins and kink-banding in a calcite crystal. From a shocked dike breccia, Azuara impact structure (Spain). Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 200 μm wide. Photo G. Mayer.

Demgemäß werden in den Schliffen karbonatischer Gerölle aus dem Tüttensee-Impakthorizont intensive Deformationen in Calcit mit multiplen Scharen (bis zu fünf) planarer Strukturen beobachtet. Die Mikrodeformationen treten nicht nur in Einzelkörnern auf sondern werden durchgehend über ganze Kornaggregate hinweg beobachtet. Eine Entstehung durch Schockeinwirkung wird für sehr wahrscheinlich gehalten.

Zusammenfasssend ist festzuhalten: Die mit rein optischer Mikroskopie an Gesteinen des Tüttensee-Impakthorizontes (sehr wahrscheinlich Ejekta) nachgewiesenen Deformationen in Quarz, Feldspäten, Glimmern und Calcit besitzen Formen und Intensitäten, die auf einen Schockursprung hinweisen. Es wird betont, daß diese als Schockeffekte gedeuteten Deformationen nicht Singularitäten darstellen, sondern reichlich und verbreitet auftreten. Es handelt sich um moderate Schockeffekte, da höhere Stufen der Stoßwellenmetamorphose (z.B. diaplektische Gläser, Schockschmelze) bisher nicht nachgewiesen wurden.

Während die PDFs in Quarz als schockdiagnostisch gelten, ist bei den anderen Deformationen ein tektonischer Ursprung nicht völlig von der Hand zu weisen, wenngleich die beobachteten Knickbänder, Mikroverzwilligungen und sonstige Deformationsbänder zum üblichen und vielfach beschriebenen Inventar von Impaktstrukturen gehören.

Für einen vergleichsweise kleinen Impaktkrater (ca. 400 m Durchmesser), bei dem nur ein verhältnismäßig geringes Volumen die für Schockeffekte notwendigen Drücke erfahren haben sollte, ist trotz des Fehlens hochgradiger Schockmetamorphose das reichhaltige Inventar in den Geröllen des Tüttensee-Impakthorizontes auffällig. Als

Grund dafür mag die besondere Konstellation des Einschlaggebietes herhalten. nämlich die reichlichen dichten alpinen Gerölle (dichte Quarzite, Kalk- und Dolomitsteine, Granite, Gneise etc.) in einer unzementierten, vielfach lockeren und weichen Matrix. Beim Durchgang von Schockwellen kann diese Lagerung aufgrund der starken Impedanzunterschiede bei Geröllen und Matrix (Impedanz bedeutet das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit des Gesteins) (konstruktive Fokussierungseffekten innerhalb der Gerölle Interferenz. Mehrfachreflexionen, Reverberationen) mit einer Energiekonzentration und deutlich erhöhten Schock-Spitzendrücken geführt haben. Hier wird deshalb noch einmal das eingangs erwähnte, vergleichbare Modell angeführt, das Kieffer (1971) für Schockkonzentrationen in Quarzkörnern des Coconino-Sandsteins des Arizona-Kraters vorgeschlagen hat und das Ernstson et al. (2001) auf die Schockdeformation von Konglomeraten übertragen haben.

In der anschließenden Folge von Dünnschliffaufnahmen werden eine ganze Reihe der zuvor erörterten Deformationen aus den Geröllen des Impakthorizontes am Tüttensee vorgestellt. Sämtliche Aufnahmen wurden bei gekreuzten Polarisatoren gemacht.



Abb. 5. Eine Schar von PDFs in Quarz; Quarzglimmerschiefer, Schurf 10; Bildbreite 480 µm.

Fig. 5. A set of PDFs in quartz from quartzose mica schist. Excavation pit No. 10. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 480 µm wide.

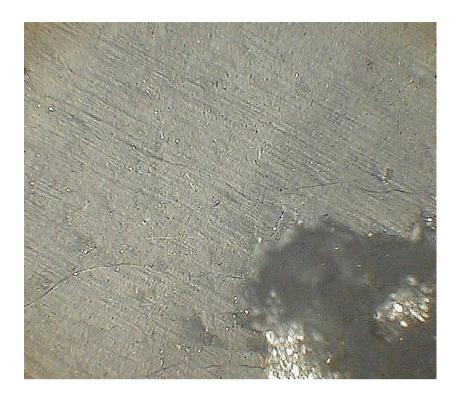


Abb. 6. Wie Abb. 5. Schurf 21. Glimmerquarzit, Bildbreite 400 µm.

Fig. 6. As in Fig. 5. Mica quartzite, excavation pit No. 21. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is $400 \mu m$ wide.

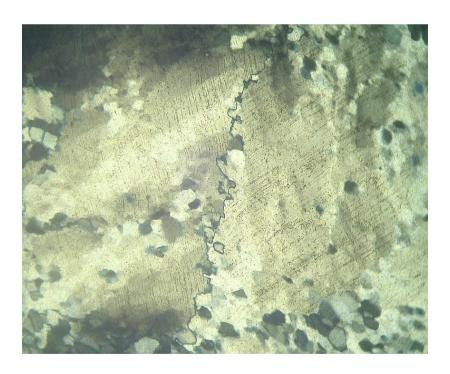


Abb. 7. Jeweils eine Schar von PDFs in aneinandergrenzen Quarzkörnern. Quarzit, Schurf 11, Bildbreite 410 μm .

Fig. 7. A set of PDFs in each of two adjacent quartz grains. Quartzite, excavation pit No. 11. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 410 µm wide.

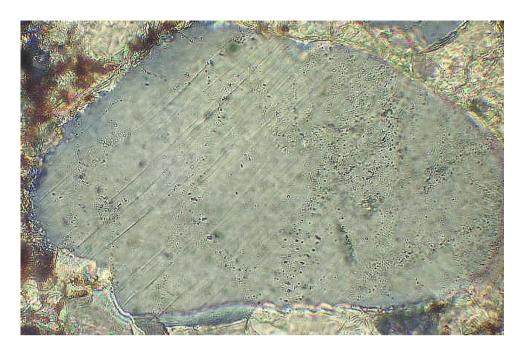


Abb. 8. PDFs in Quarz. Karbonatisch gebundener Sandstein, Schurf 5. Bildbreite 560 µm.

Fig. 8. PDFs in quartz. Carbonaceous sandstone, excavation pit No. 5. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 480 μm wide.



Abb. 9. Multiple Scharen planarer Strukturen in einem Quarzkorn. Quarzit, Schurf 11. Bildbreite $1200~\mu m$.

Fig. 9. Multiple sets of planar deformation structures in quartz. Quartzite, excavation pit No. 11. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is $1200 \ \mu m$ wide.

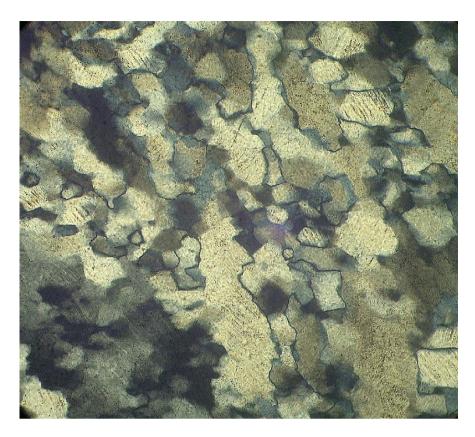


Abb. 10. In diesem Aggregat kleiner Quarze weist praktisch jedes Korn PDFs auf. Quarzit, Schurf 11. Bildbreite 280 µm.

Fig. 10. Practically each grain in this quartz aggregate exhibits PDFs. Quartzite, excavation pit No. 11. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 280 µm wide.



Abb. 11. Deutliche Knickbänderung in einem Glimmer etwa senkrecht zur Basis {001}. Gneis aus Schurf 10; Bildbreite 650 μm.

Fig. 11. Distinct kink-banding in mica at high angles to cleavage. Gneiss, excavation pit No. 10. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 650 µm wide.

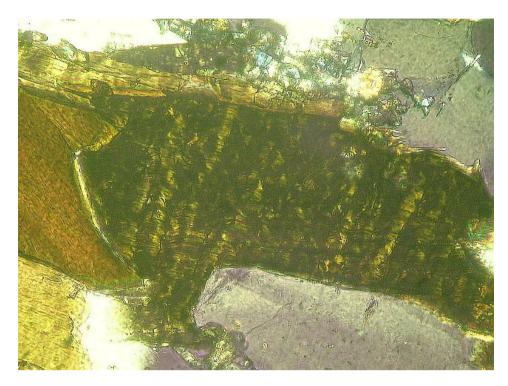


Abb. 12. Ähnlich wie Abb. 11. Gneis aus Schurf 10.

Fig. 12. Similar as in Fig. 11. Gneiss from excavation pit No. 10.

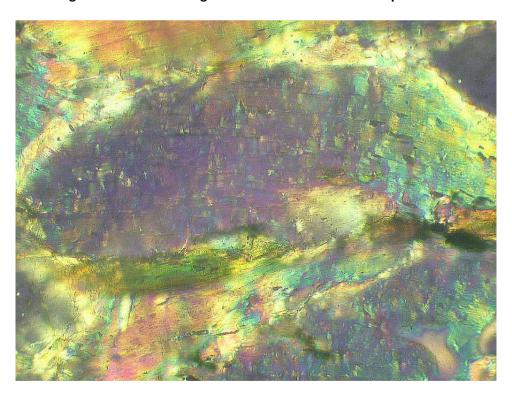


Abb. 13. Hellglimmer mit zahllosen, stark unregelmäßigen Knickbändern. Glimmerquarzit; Schurf 11. Bildbreite 200 µm.

Fig. 13. Light mica (muscovite) exhibiting numerous strongly irregular kink bands. Mica quartzite, excavation pit No. 11. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 200 µm wide.



Abb 14. Zwei Scharen dichter Knickbänderung ("NNW - SSE" und "NNE - SSW") in einem Biotit. Gneis aus Schurf 10, Bildbreite ca. 1 mm.

Fig. 14. Two sets of dense kink-banding ("NNW - SSE" and "NNE - SSW" trending) in biotite. Gneiss, excavation pit No. 10. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is about 1mm wide.



Abb. 15. Dichte Knickbänderung leicht unterschiedlicher Orientierung in einem Biotit. Die durchschnittliche Knickbandbreite liegt bei nur 10-20 µm. Gneis, Schurf 10; Bildbreite 1,4 mm.

Fig. 15. Dense kink-banding of slightly varying orientation in biotite. The kink-band width is only 10-20 μ m on average. Gneiss, excavation pit No. 11. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 1.4 mm wide.

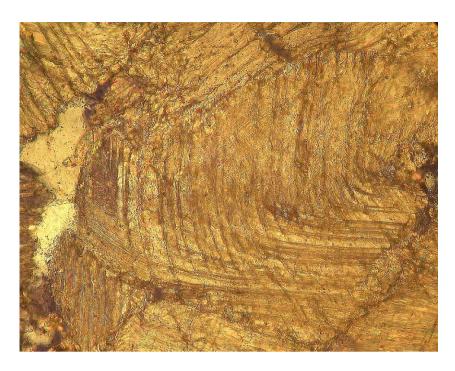


Abb. 16. Fünf Scharen engständiger, z.T gebogener Deformationsstrukturen in einem Calcit.. Der Abstand der Mikrozwillinge (z.B. "SW - NE") beträgt teilweise nur 2 μm. Calcitgängchen in Quarzit; Schurf 21, Bildbreite 480 μm.

Fig. 16. Five sets of closely spaced and partly curved deformation features in a calcite. The spacing of the microtwins (e.g., "SW - NE" trending) is in part 2 μm only. Calcite dikelet in quartzite, excavation pit No. 21. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is 480 μm wide.

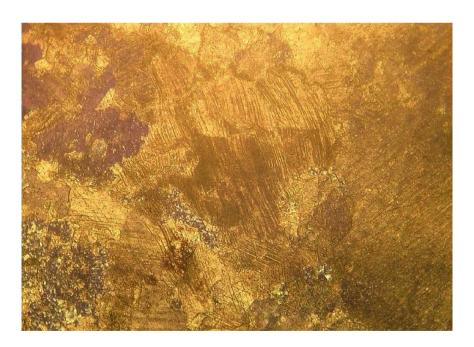


Abb. 17. Stark deformierter Calcit mit multiplen Scharen von Mikrozwillingen sowie einigen Knickbändern. Calcitgang in Quarzit, Schurf Stefanutti, Bildbreite ca. 1 mm.

Fig. 17. Strongly deformed calcite exhibiting multiple sets of microtwins and a few kink bands. Calcite dikelet in quartzite, Stefanutti excavation pit. Photomicrograph, crossed polarizers; the field is about 1 mm wide.

Literatur References

Borus, E. 1975. Stoßwelleneffekte in Weißjura-Kalken des Nördlinger Rieskraters. Doctoral Thesis, Univ. Tübingen, 81 pp.

Bunch, T. E. 1968. Some characteristics of selected minerals from craters. In: French, B. M. and Short, N. M. (eds.), *Shock Metamorphism of Natural Materials*. Mono Book Corp., Baltimore, 413-432.

Burkhard, M. & Girardin, C. 2006. Calcite twinning around the Nördlingen Ries impact crater (25 km diameter). GSA Philadelphia Annual Meeting (22 25 October 2006). http://gsa.confex.com/gsa/2006AM/finalprogram/abstract_111125.htm.

Carter, N. L. 1968. Dynamic deformation of quartz. In: French, B. M. and Short, N. M. (eds.), *Shock Metamorphism of Natural Materials*. Mono Book Corp., Baltimore, 453-474.

Claudin, F. & Ernstson, K. (2006, in prep.). The Pelarda Formation (Iberian Chain, Ne Spain): depositional features, age and origin.

Ernstson, K. and Claudín, F. 1990. Pelarda Formation (Eastern Iberian Chains, NE Spain): Ejecta of the Azuara impact structure. *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.*, **1990**: 581-599.

Ernstson, K., Rampino, M. R., and Hiltl, M. 2001c. 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. & 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.

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.

French, B. M. and Short, N. M. (eds.) 1968. *Shock Metamorphism of Natural Materials*. Mono Book Corp., Baltimore, 644 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.

Heuschkel, S., Schmitt, R.T. and Stöffler, D. 2001. Raman microspectrometry on experimentally shocked calcite and naturally shocked limestones from the Ries crater. Meteoritics & Planetary Science, vol. 36, Supplement, p.A79.

Hörz, F. 1970. Static and dynamic origin of kink bands in micas. *J. Geophys. Res.*, **75**, 965-977.

Kieffer, S. W. 1971. Shock metamorphism of the Coconino Sandstone at Meteor Crater, Arizona.J. Geophys. Res., 76, 5449-5473.

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.

Stöffler, D. 1972. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes, I. Behavior of minerals under shock compression. *Fortschr. Mineral.*, **49**: 50-113.

Stöffler, D. and Langenhorst, F. 1994. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observation and theory. *Meteoritics*, **29**, 155 181.