naturae no.162



JOHANNES BAIER

Die Auswurfprodukte

des Ries-Impakts,

Deutschland

DOCUMENTA NATURAE Nr. 162 2007 ISBN-13: 978-3-86544-162-1 ISSN 0723-8428 ISBN-10: 3-86544-162-9 ISSN 0723-8428

Herausgeber der Zeitschrift Documenta naturae im Verlag (Publishing House) Documenta naturae - München (Munich)

Dr. Hans-Joachim Gregor, Daxerstr. 21, D-82140 Olching Dr. Heinz J. Unger, Nußbaumstraße 13, D-85435 Altenerding

Vertrieb: Dipl.-Ing. Herbert Goslowsky, Joh.-Seb.Bach-Weg 2, 85238 Petershausen, , e-mail: goslowsky@documenta-naturae.de

Die Zeitschrift erscheint in zwangloser Folge mit Themen aus den Gebieten Geologie, Paläontologie (Lagerstättenkunde, Paläophytologie, Stratigraphie usw.), Botanik, Anthropologie, Domestikationsforschung, Vor- und Frühgeschichte u.a.

Die Zeitschrift ist Mitteilungsorgan der Paläobotanisch-Biostratigraphischen Arbeitsgruppe (PBA) im Heimatmuseum Günzburg und im Naturmuseum, Im Thäle 3, D-86152 Augsburg

Die Sonderbände behandeln unterschiedliche Themen aus den Gebieten Kunst, antike Nahrungsmittel, Natur-Reiseführer oder sind Neuauflagen alter wissenschaftlicher Werke oder spezielle paläontologische Bestimmungsbände für ausgewählte Regionen.

Für die einzelnen Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich, für die Gesamtgestaltung die Herausgeber.

©copyright 2007 Documenta Verlag. Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb des Urheberrechtsgesetzes bedarf der Zustimmung des Verlages. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen jeder Art, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und für Einspeicherungen in elektronische Systeme.

Gestaltung und Layout: Juliane Gregor und Hans-Joachim Gregor

Umschlagbild (J. Baier): Ries-Luftbild, Glasfäden (Balken 50 µm) und Brockhorizont.

www.palaeo-bavarian-geological-survey.de; www. documenta-naturae.de

München 2007

Die Auswurfprodukte des

Ries-Impakts, Deutschland

JOHANNES BAIER¹



Riesglas Aufhausen (Balkenlänge 50 µm)

¹ Anschrift des Verfassers:

Dr. Johannes Baier, Jakob-Kaiser-Weg 5, 79618 Rheinfelden (Baden)

Zusammenfassung

Das Nördlinger Ries (Süddeutschland) stellt einen tertiären Impakt-Krater dar (Badenium, Mittleres Miozän), der vor ca. 14,3 - 14,5 Millionen Jahren gebildet wurde (SCHWARZ & LIPPOLT 2002, LAURENZI et al. 2003). Die vorliegende Arbeit gibt Überblick über die verschiedenen Auswurfprodukte (Suevit, einen kurzen Impaktschmelzfluss ["Roter Suevit"], Bunte Breccie, Polymikte Kristallinbreccien, Brockhorizont, Moldavite und Bentonite) des Meteoritenkraters und deren Deutung. Die unterschiedlichen Auswurfprodukte sowie deren Lagerungsverhältnisse geben Hinweise zur Kraterbildung und zum Auswurfmechanismus. Mehrere Befunde (z. B. Korngrößenverteilung, eingeregelte Komponenten, feinkörniger Basistuff, Entgasungskanäle) belegen, dass der Auswurfmechanismus des Auswurfsuevits dem eines pyroklastischen Stroms (Ignimbrit) gleicht.

Die geochemische Zusammensetzung der Riesgläser ("Flädle") belegt, dass die mesozoischen Tonschiefer des Deckgebirges das Ausgangsgestein der Suevitgläser darstellt. Die chemische Variationsbreite der Tektite, die im Moldavit-Streufeld (Süd-Böhmen, West-Mähren, Eger Graben, Lausitz [Deutschland] sowie im Waldviertel [Niederösterreich]) gefunden wurden, lassen sich durch einen Schmelzvorgang mit einer unvollständigen Mischung der oberflächennahen, tertiären Sedimente erklären. Die Herkunft der Glastuffe und Glasaschen, die Bestandteile der niederbayerischen Bentonite (Obere Süßwassermolasse, tOS, nördliches Alpenvorland) sind, werden diskutiert. Diese Komponenten stellen ebenfalls Auswurfprodukte des Ries-Impakts dar. Die Gläser entstanden durch eine impaktbedingte Aufschmelzung mesozoischer Sandsteine.

Abstract

The Ries structure (Southern Germany) is an impact crater of tertiary age (Badenian, Middle Miocene), which was formed 14,3 - 14,5 million years ago (SCHWARZ & LIPPOLT 2002, LAURENZI et al. 2003). This paper gives a short review about the latest investigation on the various ejecta (suevite, impact melt flow [red suevite], bunte breccia [multi-coloured breccia], polymict crystalline breccia, Brockhorizont, moldavites and bentonites) of this impact. The different ejecta types and their depositional features give evidences of the process of the crater formation and ejection mechanism. Several evidences (e. g. grain-size distribution, oriented clasts, fine-grained basal layer, degassing pipes) show that the ejection mechanism of fallout Suevite is similar to that of a pyroclastic flow (ignimbite).

Geochemical composition of Ries glass bombs ("Flädle") indicates that Mesozoic shales of the sedimentary cover are the source rocks of Suevite glasses. Chemical variation of tektites, which were found within moldavite strewn field (Southern Bohemia, Western Moravia, Cheb Basin, Lusatia [Germany] and Waldviertel [Lower Austria]), can be explained entirely through melting and incomplete mixing of surfical sediments of tertiary age.

The origin of vitric tuff and juvenile ash, components of Bavarian bentonites (Upper Freshwater Molasse, tOS, Northern Alpine Molasse Basin), is discussed. These components are also ejecta of the Ries impact. These glasses have a primary origin by impact-shock melting of Mesozoic sandstones.

In memoriam Dr. GÜNTHER GRAUP (1940 - 2006)



Diese Arbeit widme ich meinem väterlichen Freund, Herrn Dr. GÜNTHER GRAUP (* 13.09.1940 - † 24.04.2006), der völlig unerwartet aus dem Leben gerissen wurde. Leider konnte er seine Arbeit zu den Ries-Gläsern nicht mehr vollenden, deren Überlegungen in diese Arbeit eingeflossen sind.

Johannes Baier

Inhalt

Seite

BAIER, J. : Die Auswurfprodukte des Ries-Impakts, Deutschland......1-18

Inhalt	Seite
Zusammenfassung - Abstract	2
1. Einleitung	3
2. Die Bunten Trümmermassen	4
3. Polymikte Kristallinbreccien	5
4. Der Auswurfsuevit und seine Bestandteile	5
5. Der Kratersuevit und seine Bestandteile	8
6. Impaktschmelzfluss ("Roter Suevit")	9
7. Zur Herkunft der Moldavite, der niederbayerischen Bentonite	9
und der Brockhorizonte	
8. Diskussion	10
9. Epilog	12
Danksagung	12
Schriften	12

1. Einleitung

Die Entstehung des Rieses wurde im Laufe der Forschungsgeschichte sehr unterschiedlich gedeutet, bis sich die Impakttheorie durch die Nachweise der Hochdruckmodifikationen Coesit und Stishovit durchsetzte (vgl. WERNER 1904, KALJUVEE 1933, STUTZER 1936, DORN 1948, WEISKIRCHNER 1962, PREUSS 1964, CARLÉ 1987, KÖLBL-EBERT 2003).

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand schlug zur Zeit der Oberen Süßwassermolasse (tOS) ein von N kommender Meteorit (GRAUP 1999) im Bereich der Schwäbisch-Fränkischen Alb ein und bildete das heutige Nördlinger Ries. Aufgrund von neueren ⁴⁰Ar-³⁹Ar-Altersbestimmungen wird ein absolutes Impaktalter zwischen 14,3 und 14,5 Ma angenommen (SCHWARZ & LIPPOLT 2002, LAURENZI et al. 2003). Da jedoch bis heute keine Reste des Impaktors selbst gefunden wurden (SCHMIDT & PERNICKA 1991, 1994), lassen sich zu diesem keine Aussagen machen, wie es bei anderen Meteoritenkratern der Fall ist (u. a. PALME et al. 1979, SCHMIDT 1997, SCHMIDT et al. 1997). Die kurzzeitige impaktbedingte Druck- und Temperaturbelastung führte zu spezifischen Stoßwellenerscheinungen (Stoßwellenmetamorphose; vgl. FRENCH 1998, LANGENHORST & DEUTSCH 1998) in den Gesteinen des Einschlaggebiets (GRAUP & STÖFFLER 1974), die zum großen Teil in die Umgebung verstreut wurden. Die Verbreitung der Auswurfprodukte wurde von HÜTTNER & SCHMIDT-KALER (1999) auf der neuen Geologischen Karte des Rieses (GK 50 Ries) überarbeitet und dokumentiert.

Der innere Aufbau des Impaktkraters konnte anhand von mehreren Bohrungen (FÖRSTNER 1967, DRESSLER & GRAUP 1974, Bayerisches Geologisches Landesamt 1977) und geophysikalischen Untersuchungen (WÜNNEMANN et al. 2005, dort weiterführende Literatur) rekonstruiert und beschrieben werden. Das Kraterzentrum selbst liegt rund 1 km NNE von der Kirche der Gemeinde Klosterzimmern entfernt (GRAUP 1978).

Die paläontologischen Funde belegen, dass die impaktbedingte Zerstörung der Flora und Fauna nur ein regionales Ereignis im Bereich des Einschlaggebiets darstellte, und dass sich das Ökosystem rasch wieder erholte (BÖHME et al. 2002). Die postriesischen Seeablagerungen wurden am 25. April 2003 den "Oberrheinern" auf einer Ries-Exkursion nähergebracht (HÖFLING 2003, dort weiterführende Literatur). Die vorliegende Arbeit soll dem Leser einen kurzen Überblick über die verschiedenen Auswurfprodukte und Impaktgesteine geben. Diese lassen sich vereinfacht in vier Gruppen untergliedern: Bunte Trümmermassen, Polymikte Kristallinbreccien, Suevit sowie Impaktschmelzfluss (sogenannter "Roter Suevit") (vgl. Tab. 1). Zu diesen vier Gruppen gesellen sich noch die Moldavite, die Malmkalke der Brockhorizonte und die niederbayerischen Bentonitablagerungen der Oberen Süßwassermolasse (tOS).

Mechanisch veränd geschmolz	Mechanisch verändert und (zum Teil) aufgeschmolzen		
Bunte Trümmermassen	Polymikte Kristallinbreccien	Suevit	lmpakt - schmelz- fluss
Allochthone Bunte Schollen, Breccie Gries	Malmkalke des Brockhorizonts		Moldavite Bentonit- Gläser

Tab. 1: Vereinfachtes Schema der Impaktgesteine.

2. Die Bunten Trümmermassen

Die Bunten Trümmermassen stellen den überwiegenden Anteil der Auswurfprodukte des Impakts dar (90 bis 95 %; CHAO 1977) und bestehen im Wesentlichen aus den Ablagerungen des präriesischen Deckgebirges (HÜTTNER 1969, SCHNEIDER 1970, Hörz et al. 1983). Die asymmetrische, flächenhafte Verteilung der Bunten Trümmermassen um das Ries-Zentrum (GK 50 Ries, HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 1999) liegt im schiefen Meteoriteneinschlag selbst begründet, der aus N kam (GRAUP 1999). Mit zunehmender Entfernung vom Ries-Zentrum nimmt sowohl die mittlere Schollengröße als auch der volumenmäßige Anteil der allochthonen Schollen (größer 25 m Durchmesser) am Gesamtbestand der Bunten Trümmermassen ab. Sowohl die schlechte Sortierung der Bunten Breccie selbst (HÜTTNER 1969, SCHNEIDER 1970) als auch das Vorhandensein von größeren zusammenhängenden lassen einen komplexen nicht ballistischen Roll-Gleit-Scholleneinheiten Transportmechanismus wahrscheinlich erscheinen (CHAO 1977, SCHMIDT-KALER 1986). Hierfür sprechen auch die oftmals beschriebenen Schliff-Flächen (u. a. WAGNER 1964, HÜTTNER 1969, HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 1999), die den Kritzungen vulkanischer Schlotwände (vgl. CLOOS 1941) ähneln. Oftmals liegen die Massenkalke des oberen Malms in einer charakteristischen dichten Zerklüftung und als Griese ("Mörteltextur") vor, die auf mechanische Beanspruchung des Ausgangsgesteins zurückzuführen sind (WAGNER 1964, HÜTTNER 1969). Ebenso lassen sich Strahlenkalke (shatter cones) finden (DRESSLER et al. 1969). Die großen Unterschiede in der Zusammensetzung der einzelnen Komponentanteile sind mit den lokalen Gegebenheiten des Herkunftsgebietes verknüpft.

3. Polymikte Kristallinbreccien

Unter den Polymikten Kristallinbreccien versteht man eckige bis kantengerundete Gesteinsfragmente des kristallinen Untergrunds, die in einer feinkörnigen Grundmasse eingelagert sind. Letztere besteht ebenfalls aus Gesteinen des kristallinen Grundgebirges.

Diese Kristallinbreccien kommen entweder als kleinere Einheiten innerhalb der Bunten Trümmermassen oder als Gangfüllungen in dislozierten Schollen vor (u. a. HÜTTNER 1969, CHAO 1977, HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 1999). Die intrusive Verfüllung dieser "Gänge" erfolgte während der impaktbedingten Rückfederungsphase, in der Spalten in den Gesteinen des Einschlaggebiets aufgerissen wurden (s. Diskussion in HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 1999). Das Szenario ähnelt dem Verfüllungsmechanismus vulkanischer Eruptivgänge, wie es beispielsweise vom Schwäbischen Vulkan beschrieben wurde (vgl. CLOOS 1941). Von CHAO (1977) wurden aus dem Ronheimer Steinbruch Bschor kristalline Gangfüllungen beschrieben, die sich in Ablagerungen des Deckgebirges (Lias δ , Dogger α) befanden. Durch diese Beobachtung konnte zusätzlich belegt werden, "dass die Injektion der Polymikten Kristallinbreccien vor der Bildung der Bunten Breccie stattfand und auch das Deckgebirge erreicht hat" (HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 1999: 49).

4. Der Auswurfsuevit und seine Bestandteile

Als Suevit wird eine tuffähnliche, glashaltige polymikte Breccie mit klastischer Matrix bezeichnet, die unterschiedlich stark geschockte Komponenten enthält. Die einzelnen Vorkommen des Auswurfsuevits liegen um das Ries-Zentrum verstreut und wurden in der neuen Ries-Karte (GK 50 Ries, HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 1999) eingezeichnet.

Der Suevit besteht im Wesentlichen aus einer mehr oder weniger feinkörnigen Matrix, die rund 76 bis 84 % der einzelnen Suevitvorkommen ausmacht (ACKERMANN 1958: 161) und überwiegend aus Tonmineralen besteht (u. a. NEWSOM et al. 1986). Aus dieser Matrix wurden erstmalig terrestrische Chondren von GRAUP (1981a) beschrieben, die strukturelle Ähnlichkeiten zu meteoritischen Chondren (vgl. GOODING & KEIL 1981) aufweisen. Da die Bildung der meteoritischen und lunaren Chondren bis heute noch nicht vollständig geklärt ist, könnten diese (zumindest teilweise) über Impaktereignisse entstanden sein (vgl. WLOTZKA 1969, GRAUP 1981a, KURAT 1982, HEIDE & WLOTZKA 1995).

Die im Auswurfsuevit vorkommenden Glasbomben ("Flädle") machen rund 11 bis 18 % der einzelnen Suevitvorkommen aus (ACKERMANN 1958: 161) und sind in sich sehr homogen (STÄHLE 1972, SEE et al. 1998). Die nichtentglasten Gläser (Typ 1; vgl. VON ENGELHARDT 1967) weisen einen kristallographisch nachweisbaren Quarzanteil von ~ 13% auf (VON ENGELHARDT 1967: Tab. 3). Die umgerechneten Glasanalysen, die den nachgewiesenen Quarzanteil berücksichtigen, gleichen der chemischen Zusammensetzung von Tonschiefern (vgl. Tab. 2 und Tab. 3). Als einziges Ausgangsmaterial kommen die mesozoischen Tonschiefer des Einschlagsgebiets in Frage, die volumenmäßig den hohen primären Glasanteil innerhalb des Suevits liefen konnten (vgl. HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 1999: Abb. 2).

Zusätzlich lassen sich Quenchkristalle (vor allem Pyroxen und Plagioklas), Schlieren und Blasen in den Gläsern nachweisen. Die Plagioklasbildungen der entglasten Gläser (Typ 2 und Typ 3; vgl. VON ENGELHARDT 1967) lassen sich zwanglos durch einen erhöhten Kalkanteil (CaO-Lieferant) innerhalb des Ausgangsmaterials erklären, der dort in den mesozoischen Ablagerungen vorhanden war.

	Tone, Tonsteine,	Ton- aestein	Riesglas Typ I	Bentonit-	Tonige Sande	Sande, Sandsteine
	Tonschiefer ^(a)	(b)	(c)	(MV02) ^(d)	(d)	(a)
SiO ₂	58,9	58,10	57,83	75,14	80,35	78,7
TiO ₂	0,77	0,65	0,91	0,24	0,82	0,25
Al ₂ O ₃	16,7	15,40	17,3	14,76	10,71	4,8
Fe ₂ O ₃	2,8	6.47	1,22			1,1
FeO	3,7	0,47	4,32	2,00	4,07	0,3
MnO	0,1	-	0,12	0,04	0,08	0,01
MgO	2,6	2,44	3,19	1,09	0,76	1,2
CaO	2,2	3,11	3,95	1,09	0,97	5,5
Na ₂ O	1,6	1,30	3,35	2,60	0,38	0,5
K ₂ O	3,6	3,24	4,28	3,04	1,77	1,3
P ₂ O ₅	0,16	0,17	0,43	0,01	0,10	0,04
H ₂ O+	5.00	5,00	3,12	7,59		1,3
H ₂ O-	5,00					
CO ₂	1,3	2,63	0,43			5,0
SiO ₂ /Al ₂ O	3,52	3,8	3,3	5,1	7,5	16,6

Tab. 2: Chemische Zusammensetzung (in Gew.-%) von nichtentglasten Riesgläsern (Typ I), Bentonitglas (MV02) und Vergleichsgesteinen. - (a): aus OKRUSCH & MATTHES 2005: Tab. 23.2; (b): aus FÜCHTBAUER & MÜLLER 1970: Tab. 4-2; (c): aus VON ENGELHARDT 1967: Tab. 3; (d): aus LUFT 1983: Tab. 14 und 19.

	Sand.	Suevitglas	Misch-	Bentonit-	Tonige	Moldavite	Mergel.
	Tone		gneis	gläser	Sande		Sande
La	49,74	54,23	20,97	45,21	39,40	30,06	28,75
Ce	86,13	97,50	39,26	88,64	73,85	53,78	48,51
Nd	39,94	48,33	16,8	28,27	33,36	24,14	23,73
Sm	7,72	9,45	3,89	3,82	6,33	4,96	4,79
Eu	1,62	1,70	1,23	1,00	1,18	0,88	0,94
Gd	5,55	5,54	2,38	6,40	4,63	3,20	3,48
Tb	0,93	1,06	0,38	1,17	0,82	0,57	0,57
Но	1,27	1,00	-	2,09	0,97	0,71	0,78
Tm	0,44	0,36	0,12	0,61	0,47	0,24	0,28
Yb	3,40	2,54	0,88	4,41	3,28	1,83	2,20
Lu	0,46	0,36	0,14	0,64	0,50	0,24	0,31
Sm/Eu	4,77	5,56	3,16	3,82	5,36	5,64	5,10
La/Sm	6,44	5,74	5,39	11,84	6,22	6,06	6,00
Gd/Lu	12,07	15,39	17,00	10,00	9,26	13,33	11,23

Tab. 3: REE-Konzentrationen (in ppm) von Riesgläsern, Bentonitgläsern, Moldaviten und Gesteinen aus dem Ries Gebiet (aus LUFT 1983: Tab. 19a).

6

Die Gläser selbst weisen eine Transformationstemperatur T_g von 830 bis 850 °C auf, was auf massive Abkühlungsraten der Silikatschmelzen spricht (RAMMENSEE in GRAUP 1999: 434). Die mehr oder weniger eingeregelten Flädle (WAGNER 1965, HÖRZ 1965) waren bei der Landung soweit abgeschreckt, dass diese brüchig waren und beim Einschlag meist zerbrachen. Gefügemäßig lassen sich die Flädle mit den Fiamme mancher Ignimbrite vergleichen, obwohl die Flädle nicht planar ausgebildet sind, sondern häufig aerodynamisch verformt wurden. WAGNER (1965: 217) konnte anhand der eingeregelten Flädle des Ottinger Vorkommens zeigen, dass diese aus W (= aus der Richtung des Ries-Zentrums; d. Verf.) kamen.

1999 wurden erstmalig Strukturen von GRAUP aus dem Auswurfsuevit beschrieben, die belegen, dass während des Impakts große Mengen an Carbonatschmelzen entstanden (GRAUP 1999). Hierbei fungierten die Malmkalke des Einschlaggebiets als Carbonatquelle. Die entstandenen Schmelzen kristallisierten bei der sehr raschen Abkühlung zu Calcit aus und lassen sich im Suevit nachweisen. In den einzelnen lokalen Suevitvorkommen, die sich vom Südwesten über den Süden bis in den östlichen Bereich des Kraters erstrecken, lassen sich im Dünnschliff charakteristische Merkmale finden, die eine Nichtmischbarkeit der Silikat- und Carbonatschmelzen während des Impakts belegen. Die Carbonatgehalte können bei diesen Suevitvorkommen bis zu 50 % erreichen. In der Zwischenzeit konnte auch bei anderen terrestrischen Meteoritenkratern eine impaktbedingte Carbonatschmelzbildung nachgewiesen werden (u. a. JONES et al. 2000, CLAEYS et al. 2003).

Die kristallinen Einschlüsse in den Suevitvorkommen sind sehr vielfältig (LÖFFLER 1912, ACKERMANN 1958, DRESSLER et al. 1969, GRAUP 1978) und ermöglichen einen Einblick in den tieferen Untergrund des Ries-Gebiets. Die Gesteine weisen eine erhebliche Verwandtschaft zum Moldanubikum auf. Granite, Granodiorite, Amphibolite, Ultrabasite, Hb-Bi-PI-Gneise, Mischgneise sowie Orthogneise stellen die wichtigsten Vertreter der kristallinen Auswürflinge dar. Die variszischen Magmatite überwiegen hierbei mengenmäßig die prävariszischen Metamorphite (GRAUP 1978; vgl. Tab. 4). Innerhalb der einzelnen Suevitvorkommen beträgt der mengenmäßige Anteil der kristallinen Einschlüsse etwa 2 bis 8 % (ACKERMANN 1958: 161).

Hauptgruppen	Gesteine + seltene bis sehr seltene Gesteine	Häufigkeit [%]
Bi-Pl-Gneise	Parablastomylonit, Quarzitgneis	5,4
Cord-Sill-Gneise	Gran-Cord-Sill-Restit, Migmatit	2,1
Amphibolite	Mischgneis, Kalksilikatfels	4,6
Orthogneise	Orthoblastomylonit	5,9
Tonalite	Gabbro, Diorit	0,4
Granodiorite	Titanitfleckengesteine, basische Schollen	2,5
Granite	Aplit, Pegmatit, Gangquarz	78,7
Lamprophyre		0,4

Tab 4: Relative Häufigkeiten der kristallinen Gesteine in den Auswurfsueviten (aus GRAUP 1978).

Es soll in dieser Abhandlung nicht unerwähnt bleiben, dass neben Coesit und Stishovit, weitere Hochdruckmodifikationen im Suevit gefunden wurden, worunter sich Jadeit (JAMES 1969), Diamant (HOUGH et al. 1995, EL GORESY et al. 2001c), Siliziumcarbid (HOUGH et al. 1995), zwei Hochdruckmodifikationen des Titandioxids (α -PbO₂-Strukturtyp: EL GORESY et al. 2001b; Baddeleyit-Strukturtyp: EL

GORESY et al. 2001a), eine neue Kohlenstoffmodifikation (EL GORESY et al. 2003) sowie Kyanit (STÄHLE et al. 2004) befinden. Diese Hochdruckmodifikationen können neben experimentellen Befunden und theoretischen Studien - einen wichtigen Beitrag zum Verständnis von Phasenumwandlungen bei hohen p-T-Bedingungen liefern und möglicherweise auch Informationen zum Erdinneren geben.

Nach einer ausführlichen Suche (u. a. FRANK et al. 2005, ELSILA et al. 2005) konnten in der Zwischenzeit auch Fullerene (C_{60}) im ppb-Bereich nachgewiesen werden, die mit dem Impakt in Verbindung gebracht werden (ELSILA et al. 2005). Fullerene wurden bereits von anderen terrestrischen Meteoritenkratern beschrieben (vgl. BUSECK 2002, ELSILA et al. 2005).

Von WAGNER (1965) und NEWSOM et al. (1986) wurden aus den verschiedenen Suevitvorkommen mehr oder weniger vertikal verlaufende Entgasungskanäle beschrieben, wie sie auch bei pyroklastischen Ablagerungen anzutreffen sind (vgl. SCHMINCKE 2000). Diese Entgasungskanäle deuten auf gleichartige Abkühlbedingungen der Suevite hin, bei denen die Volatile während der frühen Abkühlungsphase entwichen. Ebenso deutet der gut sortierte, feinkörnige Basistuff - der aus mehreren Suevitvorkommen beschrieben wurde (WAGNER 1965: Otting, Aumühle; NEWSOM et al. 1990: Aufhausen) - auf einen gleichartigen Auswurfmechanismus hin, da derartige Basistuffe auch von pyroklastischen Ablagerungen bekannt sind (SCHMINCKE 2000).

5. Der Kratersuevit und seine Bestandteile

Der Kratersuevit, der sich unter den postriesischen Seeablagerungen befindet. weist einen höheren Anteil an kristallinen Einschlüssen als der auf. Die Einschlüsse entsprechen des Auswurfsuevit qualitativ denen Auswurfsuevits. Allerdings überwiegen im Kratersuevit mengenmäßig die metamorphen Gesteine mit etwa 92% (GRAUP 1977; Forschungsbohrung Nördlingen 1973). Aufgrund der Verteilungsverhältnisse (GRAUP 1977, 1978) läßt sich ableiten, dass das metamorphe Grundgebirge des Ries-Gebiets von oberflächennäheren Platten von Granit überlagert werden (vgl. GRAUP 1978: Abb. 39), wie es auch im ostbayerischen Moldanubikum der Fall ist.

Die blasenreichen Glaspartikel des Kratersuevits liegen meist zeolithisiert vor (vgl. STÄHLE & OTTEMANN 1977) und weisen keine aerodynamischen Flugformen auf (STÄHLE & OTTEMANN 1977, GRAUP 1981b), wie sie aus den Auswurfsueviten bekannt sind. Dieser Befund deutet - neben petrologischen Evidenzen - darauf hin, dass der tiefere Teil des Kratersuevits nicht hochgeschleudert wurde, sondern stets im Krater verblieben ist (GRAUP 1981a, 1981b).

In den allerobersten Partien des Kratersuevits kommen akkretionäre Lapilli relativ gehäuft vor (GRAUP 1981a, NEWSOM et al. 1990), die auf turbulente Bewegungen in der impaktbedingten wasserdampfreichen Eruptionswolke hindeutet. Da gleichartige Lapilli typische Bestandteile von pyroklastischen Ablagerungen darstellen (SCHUMACHER & SCHMINCKE 1991), lassen sich ähnliche Bildungs- und Ablagerungsbedingungen für die allerobersten Ablagerungen des Kratersuevits annehmen (GRAUP 1981a). Akkretionäre Lapilli wurden auch in den Auswurfprodukten von anderen terrestrischen Meteoritenkratern nachgewiesen (u. a. ALEGRET et al. 2005).

Die sogenannte gradierten Einheit, die sich zwischen dem Kratersuevit und den postriesischen Seeablagerungen befindet, zeichnet sich durch eine Normalgradierung aus (JANKOWSKI 1977), die für die letzte Impaktphase charakteristisch sein dürfte.

6. Impaktschmelzfluss ("Roter Suevit")

Der sogenannte Rote Suevit stellt Relikte eines Schmelzflusses dar (WEBER 1941), der durch den Impakt gebildet wurde. Bislang sind mehrere Vorkommen dieser entglasten Impaktschmelzflüsse bekannt (u. a. Polsingen, Rauhwinkel, Amerbach, Hermannsberg, Hochfeld, Heerhof; vgl. GRAUP 1999: Abb. 14), die um das Ries-Zentrum vom westlichen über den südlichen bis nordöstlichen Sektor verstreut liegen. Die vorkommenden bomben- und flädleartigen Gebilde stellen die oberflächliche Schlackenkruste des Schmelzflusses dar (WEBER 1941), die oftmals als "normale" Flädle gedeutet wurden. Beim Polsinger Vorkommen konnte gezeigt werden, dass der Schmelzfluss eine nach NO gerichtete Fließbewegung vollzog (WEBER 1941: 91), worauf u. a. die einheitlich gestreckten Blasenhohlräume hindeuten.

Die harte, blasenreiche Grundmasse des Gesteins ist zum großen Teil entglast und zeichnet sich im Dünnschliff durch einen Filz von Feldspatleisten (Sanidin), "Ballenquarzen" sowie Pyroxenkristallen aus (OBERDORFER 1905, WEBER 1941). Die rötliche Farbe des Gesteins rührt von feinverteiltem Hämatit her (OBERDORFER 1905: 37). Als Einschlüsse scheinen nur kristalline Gesteine des Grundgebirges in den Impaktschmelzen vorzukommen, die auch den Protolithen darstellen dürften.

7. Zur Herkunft der Moldavite, der niederbayerischen Bentonite und der Brockhorizonte

Lange Zeit wurden die Moldavite aufgrund ihres Ries-Alters (u. a. GENTNER et al. 1963) als mögliche Auswurfprodukte des Ries-Impakts diskutiert, wobei das Ausgangsmaterial noch spekulativ blieb. Von Bouška et al. (1973) wurden die präriesischen tertiären Ablagerungen als mögliches Ausgangsmaterial in Erwägung gezogen und diskutiert. Nachdem die präriesischen tOS-Ablagerungen als Ausgangsmaterial durch GRAUP et al. (1981) geochemisch identifiziert wurden, folgten Bestätigungen durch weitere Arbeiten (SHAW & WASSERBURG 1982, LUFT 1983, HORN et al. 1985). Neben den klassischen böhmischen und mährischen Substreufeldern (TRNKA & HOUZAR 1991, BOUŠKA 1994) wurden in den letzten Jahren weitere Vorkommen im Waldviertel (Niederösterreich), in der Region des Eger-Grabens sowie in der Lausitz entdeckt (vgl. TRNKA & HOUZAR 2002: Abb. 1).

Sowohl die vorhandenen Lechatelieritschlieren (BARNES 1969, KNOBLOCH et al. 1987) als auch die chemischen Inhomogenitäten innerhalb der einzelnen Moldaviten selbst (PHILPOTTS & PINSON 1966, MEISEL et al. 1997, VĚTVIČKA 2003) deuten auf Schmelzvorgänge während der Moldavitbildung hin. Eine Kondensation aus einem impaktbedingten Plasma (VON ENGELHARDT et al. 2005) läßt sich als Bildungsmechanismus mit den nachgewiesenen Mineraleinschlüssen (Coesit: WEISKIRCHNER 1962; Quarz: BARNES 1969; Baddeleyit: GLASS et al. 1990) nicht vereinen. MEISEL et al. (1997) konnten zeigen, dass die große chemische Variationsbreite der einzelnen Moldavite mit einer unvollständigen Mischung von mindestens drei lithographischen Ausgangskomponenten (Tonminerale, Dolomit, Quarz) erklärt werden kann. Aufgrund ihrer charakteristischen grünen Färbung, die im Wesentlichen im hohen Fe²⁺/Fe³⁺-Verhältnis begründet liegt, wurden früher die Moldavite auch als Bouteillensteine bezeichnet (u. a. NEUMANN 1850), Die niedrigen Wassergehalte, die mit rund 0,01 Gew.-% in der Größenordnung von anderen Tektiten liegen (BERAN & KOEBERL 1997), lassen sich in der Zwischenzeit begründen (MELOSH & ARTEMIEVA 2004).

Die sogenannten Brockhorizonte kommen in den mittelmiozänen Sandmergeln der tOS von Niederbayern bis in die Ostschweiz vor (SACH 1997, mit weiteren Literaturhinweisen). Es kann in der Zwischenzeit als gesichert angesehen werden, dass es sich bei den Brocken - die aus oberjurassischen Kalken bestehen - um Auswurfprodukte des Ries-Impakts handelt. Hierfür sprechen, neben der (bio- und litho-) stratigraphischen Lage (SACH 1999), die nachgewiesenen PDFs (HOFMANN & HOFMANN 1992) und shatter cones (HOFMANN 1973, 1978, SACH 1997), die auf ein Impakt hinweisen (FRENCH 1998). Nach Laborversuchen können auch die entfernten ostschweizerischen Brockhorizonte (Entfernung vom Ries-Zentrum: rund 200 km) als distale Auswurfprodukte interpretiert werden (MELOSH 1993). Die Horizonte stehen somit in zeitlicher Nähe zum Ries-Impakt und stellen einen wichtigen Leithorizont innerhalb der tOS-Ablagerungen der nordalpinen Molasse dar. Bei den Vorkommen müssen geringfügige fluviatile Umlagerungen der Malmbrocken angenommen werden, so dass sich diese Brocken nicht mehr an ihrer Einschlagstelle befinden (SCHEUENPFLUG 1980).

Trotz des Ries-Alters (vgl. STORZER & GENTNER 1970) ist bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Entstehung der niederbayerischen Bentonite bzw. die Herkunft der darin vorkommenden Gläser in der Literatur umstritten. Die SiO₂-reichen Gläser werden entweder als Auswurfprodukte des Ries-Impakts gedeutet oder mit einem vulkanischen Ursprung in Verbindung gebracht.

Die geographische Nähe zwischen den niederbayrischen Bentonitvorkommen und dem Nördlinger Ries ist augenfällig und macht - neben der Altersgleichheit - einen genetischen Zusammenhang zwischen beiden wahrscheinlich. Da der Meteorit aus N Richtung kam (GRAUP 1999) und sich die Bentonite S des Rieses befinden, stimmt zudem noch die geographische Lage des möglichen Auswurfmaterials. Die geochemische Zusammensetzung der Gläser entspricht dem eines (tonigen) Sandsteins (vgl. Tab. 2 und Tab. 3). Tonige Sandsteinablagerungen sind in den mesozoischen Sedimenten des Einschlagsgebiets in großen Mengen vorhanden (vgl. HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 1999: Abb. 2) und können zwanglos als Ausgangsgestein angenommen werden. Als weiteres Indiz für eine impaktbedingte Bildung dürfen die von ULBIG beschriebenen Ilmenitkörner in den Bentoniten gesehen werden, "die oft wie angeschmolzen wirken" (ULBIG 1999: 507). Geschmolzene Ilmenitkörner sind bereits aus den Ries-Gläsern bekannt (EL GORESY 1964, 1968) und erfordern sehr hohe Schmelztemperaturen. Da direkt-vulkanische Minerale in den niederbayerischen Bentoniten fehlen (HOFMANN 1956), scheint ein vulkanischer Ursprung - wie es beispielsweise von UNGER & NIEMEYER (1985) diskutiert wird - unwahrscheinlich.

8. Diskussion

Der von STUTZER (1936) verwendete Begriff Pseudovulkanismus hat in den letzten Jahrzehnten in der Ries-Forschung immer stärker an Bedeutung gewonnen, da erhebliche Ähnlichkeiten zwischen dem Suevit des Ries-Impakts und pyroklastischen Ablagerungen herausgearbeitet wurden (u. a. GRAUP 1981a, NEWSOM et al. 1986, 1990, BRINGEMEIER 1994). Durch die umfangreichen Untersuchungen hat der Auswurfsuevit in den letzten Jahren eine eklatante Umdeutung erfahren, die die bisherigen Modellvorstellungen (u. a. POHL et al. 1977, VON ENGELHARDT 1990, 2003, VON ENGELHARDT et al. 1995, VENNEMANN et al. 2001, KRING 2005) revidiert:

- Die Bedeutung der Volatile wurde bislang für den Impaktmechanismus unterschätzt: Die Volatile des Einschaggebiets führten während des Impakts zu

einer Explosion, die zur Ausbildung einer Eruptionssäule führte. Der Explosionsmechanismus ist dem einer phreatomagmatischen Eruption (vgl. SCHMINCKE 1977, 2000) ähnlich, da dort ebenfalls Wasser schlagartig - in einem relativ geschlossenen System - verdampft. Hierauf deuten u. a. auch die zahlreichen Flüssigkeitseinschlüsse innerhalb der Gläser hin (OBERDORFER 1905: 13). Aus der kollabierenden Eruptionssäule wurde der Suevit wie ein pyroklastischer Strom abgelagert und weist dadurch Charakteristika eines Ignimbrits auf (NEWSOM et al. 1986, 1990, BRINGEMEIER 1994).

- Im Auswurfsuevit sind erhebliche Anteile des mesozoischen Deckgebirges vorhanden, was eine komplette Umdeutung des bisher angenommenen Impaktmechanismus erfordert: Die freigesetzte, impaktbedingte (thermische) Energie löste bereits in einem kleinen Bereich der oberen Deckschichten des Einschlaggebiets eine Schmelzbildung aus und nicht erst im Kristallin (GRAUP 1999, diese Arbeit). Dieser Sachverhalt läßt sich zwanglos mit der Tatsache begründen, dass das schockbeanspruchte Volumen des Einschlaggebiets mit annähernd $(2\pi/3)$ ·r³ (r = Radius) der sich sphärisch ausbreitenden Stoßwelle anwächst. Dadurch klingt mit zunehmender Entfernung r zur Kollisionsstelle die impaktbedingte Beanspruchung des Gesteins rasch ab. Da sich die Einschlagstelle sehr heterogen zusammensetzt, müssen hierbei die unterschiedlichen physikalischen und geochemischen Eigenschaften der einzelnen Gesteinstypen bei der Interpretation berücksichtigt werden (u. a. Mineralvergesellschaftung, Volatilgehalt, Korngröße, Korngefüge, Porosität). Sehr wahrscheinlich besteht die feinkörnige Matrix des Auswurfsuevits ebenfalls zu einem erheblichen Anteil aus (thermisch) veränderten Sedimentablagerungen, was zukünftige Untersuchungen noch bestätigen müssen.
- Die Abkühlungsgeschichte der Suevitvorkommen erfolgte rascher als es bisher wurden beispielweise die **Ries-Gläser** in angenommen wurde: So Sekundenschnelle abgeschreckt, was durch die hohe Transformationstemperatur T_a belegt ist (RAMMENSEE in GRAUP 1999: 434). Ebenso belegen die von GRAUP (1999) beschriebenen carbonatischen Strukturen, dass die Carbonatschmelzen bereits bei der Druckentlastung soweit abgekühlt waren, dass diese nicht mehr decarbonatisierten, sondern zu Calcit kristallisierten (vgl. p-T-Diagramm von CaCO₃). Die im Suevit nachgewiesenen metastabilen Hochdruckmodifikationen hätten ebenfalls keine längere thermische Beanspruchung überstanden. So zersetzt sich beispielsweise Stishovit innerhalb von Minuten bei mehreren hundert Grad Celsius (DACHILLE et al. 1963).
- Es lassen sich mehrere Suevitarten unterscheiden (OBERDORFER 1905, SCHNELL 1926, WEBER 1941, GRAUP 1999), die unterschiedliche (physikalische) Eigenschaften aufweisen. So waren beispielsweise früher die durch CaCO₃ verfestigten Suevitvorkommen des SW Vorries (u. a. Aufhausen, Amerdingen, Altenbürg) als Baumaterial begehrt (OBERDORFER 1905, SCHNELL 1926).
- Durch die unterschiedlichen Suevitarten konnte zusätzlich belegt werden, dass der Meteorit aus N kam (GRAUP 1999) und nicht von WSW, wie es von STÖFFLER et al. (2002) aufgrund von unvollständigen Datensätzen und vereinfachten Annahmen modelliert wurde (so wurden beispielsweise nicht alle Schmelzflussvorkommen ("Roter Suevit") bei der Modellierung berücksichtigt, die sich um das Ries erstrecken). Zusätzlich deutet die asymmetrische Verteilung der Bunten Trümmermassen (= 90 bis 95 % der Auswurfprodukte; vgl. CHAO 1977) neben den 4 kristallinen "Strahlen" des Vorries (vgl. GRAUP 1978: Taf. 2) - auf

einen von NNW kommenden kosmischen Körper hin, wie es bereits von ILLIES (1969, 1970) angenommen wurde.

Obwohl das Ries bislang als einer der besterforschten Meteoritenkrater der Welt galt (u. a. HEIDE & WLOTZKA 1995), müssen aufgrund des hier erfolgten Erkenntniszuwachses Umdeutungen vorgenommen werden, die wiederum Neuinterpretationen zahlreicher anderer terrestrischer Impakt-Krater in den nächsten Jahrzehnten nach sich ziehen werden.

9. Epilog

In der vorliegenden Arbeit werden die Auswurfprodukte des Ries Impakts unter Berücksichtigung neuer Forschungsergebnisse beschrieben. Aufgrund von jüngeren Untersuchungen (u. a. GRAUP 1981a, 1999, NEWSOM et al. 1986, 1990, BRINGEMEIER 1994) wurde eine neue Ära in der Ries-Forschung eingeleitet, die das bisherige Ablagerungsmodell des Suevits revidiert. Der abgeleitete Auswurfmechanismus ähnelt dem einer phreatomagmatischen Eruption, was auf gleichartige physikalische Ausgangsbedingungen zurückzuführen ist.

Danksagung: Mein Dank gebührt Dr. GÜNTHER GRAUP, dem ich diesen Band widme. ELISABETH FRANK (Tübingen) sei für die kritische Durchsicht des Manuskripts gedankt.

Schriften

- ACKERMANN, W. (1958): Geologisch-petrographische Untersuchungen im Ries. -Geol. Jb., 75, 135-182; Hannover.
- ALEGRET, L., ARENILLAS, I., ARZ, J. A., DIAZ, C., GRAJALES-NISHIMURA, J. M., MELÉNDEZ, A., MOLINA, E., ROJAS, R. & SORIA, A. (2005): Cretaceous-Paleogene boundary deposits at Loa Capiro, central Cuba: Evidence for the Chicxulub impact. -Geology, 33, 721-724; Amsterdam.

BARNES, V. E. (1969): Petrology of moldavites. - Geochim. Cosmochim. Acta, 33, 1121-1134; Amsterdam.

- Bayerisches Geologisches Landesamt (Hrsg., 1977): Ergebnisse der Ries-Forschungsbohrung 1973: Struktur des Kraters und Entwicklung des Kratersees. - Geologica Bavarica, 75, 1-470; München.
- BERAN, A. & KOEBERL, C. (1997): Water in tektites and impact glasses by fouriertransformed infrared spectrometry. - Meteorit. Planet. Sci., 32, 211-216; Lawrence, Kansas.
- BÖHME, M., GREGOR, H.-J. & HEISSIG, K. (2002): The Ries and Steinheim meteorite impacts and their effect on environmental conditions in time and space. - In: BUFFETAUT, E. & KOEBERL, C. (Hrsg.): Geological and biological effects of impact events, 217-235; Berlin, Heidelberg, Springer.

BOUSKA, V. (1994): Moldavites - The czech tektites. - 69 S.; Prague, Stylizace.

BOUŠKA, V., BENADA, J., ŘANDA, Z. & KUNJIŘ, J. (1973): Geochemical evidence for the origin of moldavites. - Geochim. Cosmochim. Acta, 37, 121-131; Oxford.

BRINGEMEIER, D. (1994): Petrofabric examination of the main suevite of the Otting Quarry, Nördlinger Ries, Germany. - Meteoritics, 29, 417-422; Lawrence.

BUSECK, P. R. (2002): Geological fullerenes: review and analysis. - Earth Planet. Sci. Lett., 203, 781-792; Amsterdam. CARLÉ, W. (1987): Die Wende am Ries 1961. - Jh. Ges. Naturkde. Württ., 412, 73-98; Stuttgart.

- CHAO, E. C.-T. (1977): The Ries crater of Southern Germany, a model for large basins on planetary surfaces. Geol. Jb., A43, 3-81; Hannover.
- CLAEYS, P., HEUSCHKEL, S., LOUNEJEVA-BATURINA, E., SANCHEZ-RUBIO, G. & STÖFFLER, D. (2003): The suevite of drill hole Yucatán 6 in the Chicxulub impact crater. -Meteorit. Planet. Sci., 38, 1299-1317; Lawrence, Kansas.
- CLOOS, H. (1941): Bau und Tätigkeit von Vulkanschloten Untersuchungen an dem Schwäbischen Vulkan. Geol. Rundschau, 32, 709-800; Stuttgart.
- DACHILLE, F., ZETO, R. J. & ROY, R. (1963): Coesite and Stishovite: Stepwise reversal transformations. Science, 140, 991-993; London.
- DRESSLER, B. & GRAUP, G. (1974): Gesteinskundliche Untersuchungen am Suevit der Bohrung Wörnitzostheim I im Nördlinger Ries. - Der Aufschluß, 25/7-8 (= 24. Sonderschr.), 48-55; Heidelberg.
- DRESSLER, B., GRAUP, G. & MATZKE, K. (1969): Die Gesteine des kristallinen Grundgebirges im Nördlinger Ries. - Geologica Bavarica, 61, 201-228; München.
- DORN, P. (1948): Ein Jahrhundert Riesgeologie. Z. dt. geol. Ges., 100, 348-365; Stuttgart.
- EL GORESY, A. (1964): Die Erzmineralien in den Ries- und Bosumtwi-Gläsern und ihre genetische Deutung. Geochim. Cosmochim. Acta, 28, 1881-1891; Amsterdam.
- (1968): The opaque minerals in impactite glasses. In: FRENCH, B. M. & SHORT, N. M. (Hrsg.): Shock metamorphism of natural materials, 531-553; Baltimore, Mono Book Corp..
- EL GORESY, A., CHEN, M., DUBROVINSKI, L., GILLET, P. & GRAUP, G. (2001a): An ultradense polymorph of Rutile with seven-coordinated Titanium from the Ries crater. Science, 293, 1467-1470; London.
- EL GORESY, A., CHEN, M., GILLET, P., DUBROVINSKI, L., GRAUP, G. & AHUJA, R. (2001b): A natural shock-induced dense polymorph of rutil with α-PbO₂ structure in the suevite from the Ries crater in Germany. - Earth Planet. Sci. Lett., 192, 485-495; Amsterdam.
- EL GORESY, A., DUBROVINSKI, L. S., GILLET, P., MOSTEFAOUI, S., GRAUP, G., DRAKOPOULOS, M., SIMIONOVICI, A. S., SWAMY, V. & MASAITIS, V. L. (2003): A novel cubic, transparent and super-hard polymorph of carbon from the Ries and Popigai craters: implications to understanding dynamic-induced natural highpressure phase transformation in the carbon system. - Lun. Planet. Sci., 34, #1016; Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas.
- EL GORESY, A., GILLET, P., CHEN, M., KÜNSTLER, F., GRAUP, G. & STÄHLE, V. (2001c): In situ discovery of shock-induced graphite-diamond phase transition in gneisses from the Ries Crater, Germany. Am. Min., 86, 611-621; Lawrence, Kansas.
- ELSILA, J. E., DE LEON, N. P., PLOWS, F. L., BUSECK, P. R. & ZARE, R. N. (2005): Extracts of impact breccia samples from Sudbury, Gardnos, and Ries impact craters and the effect of aggregation on C₆₀ detection. - Geochim. Cosmochim. Acta, 69, 2891-2899; Amsterdam.
- FÖRSTNER, U. (1967): Petrographische Untersuchungen des Suevits aus den Bohrungen Deiningen und Wörnitzostheim im Ries von Nördlingen. - Contrib. Mineral. Petrol., 15, 281-301; Berlin, Heidelberg, New York.
- FRANK, O., JEHLIČKA, J., HAMPLOVÁ, V. & SVATOŠ, A. (2005): The search for fullerenes in rocks from the Ries impact crater. - Meteorit. Planet. Sci., 40, 307-314; Lawrence, Kansas.

FRENCH, B. M. (1998): Traces of catastrophe: a handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. - LPI Contribution, No. 954, 1-120; Houston.

- FÜCHTBAUER, H. & MÜLLER, G. (1970): Sedimente und Sedimentgesteine. 726 S.; Stuttgart, Schweizerbart.
- GENTNER, W., LIPPOLT, H. J. & SCHAEFFER, O. A. (1963): Argonbestimmungen an Kaliummineralien - XI: Die Kalium-Argon-Alter der Gläser des Nördlinger Rieses und der böhmisch-mährischen Tektites. - Geochim. Cosmochim. Acta, 27, 191-200; Amsterdam.
- GLASS, B. P., WASSON, J. T. & FUTRELL, D. S. (1990): A layered moldavite containing baddeleyite. Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 20th, 415-420; Houston.
- GOODING, J. L. & KEIL, K. (1981): Relative abundances of chondrule primary textural types in ordinary chondrites and their bearing on conditions of chondrule formation. - Meteoritics, 16, 17-43; Phoenix.
- GRAUP, G. (1977): Die Petrographie der kristallinen Gesteine der Forschungsbohrung Nördlingen 1973. - Geologica Bavarica, 75, 219-229; München.
- (1978): Das Kristallin im Nördlinger Ries. Petrographische Zusammensetzung und Auswurfmechanismus der kristallinen Trümmermassen, Struktur des kristallinen Untergrundes und Beziehungen zum Moldanubikum. - 190 S.; Stuttgart, Enke.
- (1981a): Terrestrial chondrules, glass spherules and accretionary lapilli from the suevite, Ries crater, Germany. Earth Planet. Sci. Lett., 55, 407-418; Amsterdam.
- (1981b): Untersuchungen zur Genese des Suevits im Nördlinger Ries. -Fortschr. Mineral., 59, Bh. 1, 56-57; Stuttgart.
- (1999): Carbonate-silicate liquid immiscibility upon impact melting: Ries Crater, Germany. Meteorit. Planet. Sci., 34, 425-438; Lawrence, Kansas.

GRAUP, G., HORN, P., KÖHLER, H. & MÜLLER-SOHNIUS, D. (1981): Source material for moldavites and bentonites. - Naturwissenschaften, 67, 616-617; Berlin.

GRAUP, G. & STÖFFLER, D. (1974): Petrologische Untersuchungen im Nördlinger Ries. - Der Aufschluß, 25/7-8 (= 24. Sonderschr.), 39-48; Heidelberg.

HEIDE, F. & WLOTZKA, F. (1995): Meteorites. - 231 S.; Berlin, Heidelberg, Springer.

- HÖFLING, R. (2003): Das Nördlinger Ries und sein Vorland aus sedimentologischpaläontologischer Sicht (Exkursion G am 25. April 2003). - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., 85, 203-239; Stuttgart.
- HOFMANN, B. & HOFMANN, F. (1992): An impactite horizont in the Upper Freshwater Molasse in Eastern Switzerland: Distal Ries ejecta? - Eclogae Geol. Helv., 85, 788-789; Basel.
- HOFMANN, F. (1956): Sedimentpetrographische und tonmineralogische Untersuchungen an Bentoniten der Schweiz und Südwestdeutschlands. - Eclogae Geol. Helv., 49, 113-133; Basel.
- (1973): Horizonte fremdartiger Auswürflinge in der ostschweizerischen Oberen Süßwassermolasse und Versuch einer Deutung ihrer Entstehung als Impaktphänomen. - Eclogae Geol. Helv., 66, 83-100; Basel.
- (1978): Spuren eines Meteoriteneinschlags in der Molasse der Ostschweiz und deren Beziehung zum Riesereignis. Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing., 44, 17-26; Basel.
- HORN, P., MÜLLER-SOHNIUS, D., KÖHLER, H. & GRAUP, G. (1985): Rb-Sr systematics of rocks related to the Ries crater, Germany. - Earth Planet. Sci. Lett., 75, 384-392; Amsterdam.

Hörz, F. (1965): Untersuchungen an Riesgläsern. - Beitr. Mineral. Petrogr., 11, 621-661; Berlin, Heidelberg.

HÖRZ, F., OSTERTAG, R. & RAINAY, D. A. (1983): Bunte Breccia of the Ries crater. -Rev. Geophys. Space Phys., 21, 1667-1725; Richmond.

- HOUGH, R. M., GILMOUR, I., PILLINGER, C. T., ARDEN, J. W., GILKES, K. W. R., YUAN, J. & MILLEDGE, H. J. (1995): Diamond and silicon carbide in impact melt rock from the Ries impact crater. Nature, 378, 41-44; London.
- HÜTTNER, R. (1969): Bunte Trümmermassen und Suevit. Geologica Bavarica, 61, 142-200; München.
- HÜTTNER, R. & SCHMIDT-KALER, H. (1999): Die Geologische Karte des Rieses 1:50000 (2., überarbeitete Auflage) Erläuterungen zu Erdgeschichte, Bau und Entstehung des Kraters sowie zu den Impaktgesteinen. - Geologica Bavarica, 104, 7-76; München.
- ILLIES, H. (1969): Nördlinger Ries, Steinheimer Becken, Pfahldorfer Becken und die Moldavite: strukturelle und dynamische Zusammenhänge einer Impact-Gruppe.
 Oberrhein. geol. Abh., 18, 1-31; Stuttgart.

(1970): Nördlinger Ries und Steinheimer Becken als Einschlagskrater eines Kometen. - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., 52, 149-168; Stuttgart.

- JAMES, O. B. (1969): Jadeite: Shock-induced formation from Oligoclase, Ries Crater, Germany. Science, 165, 1005-1008; London.
- JANKOWSKI, B. (1977): Die gradierte Einheit oberhalb des Suevits der Forschungsbohrung Nördlingen 1973. - Geologica Bavarica, 75, 155-162; München.
- JONES, A. P., CLAEYS, P. & HEUSCHKEL, S. (2000): Impact melting of carbonates from the Chicxulub Crater. - In: GILMOUR, I. & KOEBERL, C. (Hrsg.): Impacts and the early Earth, 343-361; New York, Springer.
- KALJUVEE, J. (1933): Die Großprobleme der Geologie. 162 S.; Tallinn, Wassermann.
- KNOBLOCH, V., KNOBLOCHOVÁ, Z., KUČERA, J. & TLÁSKAL, J. (1987): Lechatelierite inclusions in moldavites and lechatelierite fragments in host sediments. Proc. 2nd Inter. Conf. on Natural Glasses, Prague 1987, 267-274; Praha.
- KÖLBL-EBERT, M. (2003): From volcano to impact crater: a history of the impact hypothesis at Ries crater and Steinheim Basin from 1900 to 1970. - N. Jb. Geol. Paläont. Mh., 2003(10), 591-602; Stuttgart.
- KRING, D. A. (2005): Hypervelocity collisions into continental crust composed of sediments and an underlying crystalline basement: comparing the Ries (~24 km) and Chicxulub (~180 km) impact craters. - Chemie Erde, 65, 1-46; Amsterdam.
- KURAT, G. (1982): Impact origin of chondrules. Conf. Chond. Origins, 36; Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas.
- LANGENHORST, F. & DEUTSCH, A. (1998): Minerals in terrestrial impact structures and their characteristic features. - In: MARFUNIN, A. S. (Hrsg.): Mineral matter in space, mantle ocean floor, biosphere, environmental management, and jewelry. - Advanced Mineralogy, 3, 95-119; Berlin, Heidelberg, Springer.
- LAURENZI, M. A., BIGAZZI, G., BALESTRIERI, M. L. & BOUŠKA, V. (2003): ⁴⁰Ar/³⁹Ar laser probe dating of the Central European tektite producing impact event. - Meteorit. Planet. Sci., 38, 887-894; Lawrence, Kansas.
- LÖFFLER, R. (1912): Die Zusammensetzung des Grundgebirges im Ries. Jh. Ver. vaterl. Naturkde. Württ., 68, 107-153; Stuttgart.
- LUFT, E. (1983): Zur Bildung der Moldavite beim Ries-Impakt aus tertiären Sedimenten. 202 S.; Stuttgart, Enke.

MEISEL, T., LANGE, J.-M. & KRÄHENBÜHL, U. (1997): The chemical variation of moldavite tektites: Simple mixing of terrestrial sediments. - Meteorit. Planet. Sci., 32, 493-502; Lawrence, Kansas.

MELOSH, H. J. (1993): Blasting rocks of planets. - Nature, 363, 498-499; London.

- MELOSH, H. J. & ARTEMIEVA, N. (2004): How does tektites lose its water? Lun. Planet. Sci., 35, #1723; Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas.
- NEUMANN, C. F. (1850): Elemente der Mineralogie. 2. Aufl., 478 S.; Leipzig, Engelmann.
- NEWSOM, H. E., GRAUP, G., ISERI, D. A., GEISSMAN, J. W. & KEIL, K. (1990): The formation of the Ries crater, West Germany; Evidence of atmospheric interactions during a large cratering event. - In: SHARPTON, V. L. & WARD, P. D. (Hrsg.): Global catastrophes in Earth history. - Geol. Soc. Am. Spec. Paper, 247, 195-206; Washington.
- NEWSOM, H. E., GRAUP, G., SEWARDS, T. & KEIL, K. (1986): Fluidization and hydrothermal alteration of the suevite deposit at the Ries crater, West Germany, and implications for Mars. - Proc. 7th Lunar Planet. Sci. Conf., Part 1. - J. Geophys. Res., 91, B13, E239-E251; Washington.
- OBERDORFER, R. (1905): Die vulkanischen Tuffe des Ries bei Nördlingen. Jh. Ver. vaterl. Naturkde. Württ., 61, 1-40; Stuttgart.
- OKRUSCH, M. & MATTHES, S. (2005): Mineralogie. 7. Aufl., 526 S.; Berlin, Heidelberg, Springer.
- PALME, H., GÖBEL, E. & GRIEVE, R. A. F. (1979): The distribution of volatile and siderophile elements in the impact melt of East Clearwater (Quebec). Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th, 2465-2492; Houston.
- PHILPOTTS, J. A. & PINSON JR., W. H. (1966): New data on the chemical composition and origin of moldavites. - Geochim. Cosmochim. Acta, 30, 253-266; Amsterdam.
- POHL, J., STÖFFLER, D., GALL, H. & ERNSTSON, K. (1977): The Ries impact crater. In: RODDY, D. J., PEPIN, R. O. & MERRILL, R. B. (Hrsg.): Impact and explosion cratering, 343-404; New York, Pergamon Press.
- PREUSS, E. (1964): Das Ries und die Meteoritentheorie. Fortschr. Mineral., 41, 271-312; Stuttgart.
- SACH, V. (1997): Neue Vorkommen von Brockhorizonten in der Oberen Süßwassermolasse von Baden-Württemberg (Deutschland) - Zeugnisse der Ries-Katastrophe im Mittelmiozän. - N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 205, 323-337; Stuttgart.
- (1999): Litho- und biostratigraphische Untersuchungen in der Oberen Süßwassermolasse des Landkreises Biberach a. d. Riß (Oberschwaben). -Stuttgarter Beitr. Naturk., Ser. B 276, 1-167; Stuttgart.
- SCHEUENPFLUG, L. (1980): Neue Funde ortsfremder Weißjuragesteinen in Horizonten der südbayerischen miozänen Oberen Süßwassermolasse um Augsburg (Ein Beitrag zum Problem der REUTERschen Blöcke). - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., 62, 131-142; Stuttgart.
- SCHMIDT, G. (1997): Clues to the nature of the impacting bodies from platinum-group elements (rhenium an gold) in borehole samples from the Clearwater East crater (Canada) and the Boltysh impact crater (Ukraine). - Meterorit. Planet. Sci., 32, 761-767; Lawrence.
- SCHMIDT, G., PALME, H. & KRATZ, K.-L. (1997): Highly siderophile elements (Re, Os, Ir, Ru, Rh, Pd, Au) in impact melts from three european impact craters (Sääksjäri,

Mien, and Dellen): Clues to the nature of the impacting body. - Geochim. Cosmochim. Acta, 61(14), 2977-2987; New York.

- SCHMIDT, G. & PERNICKA, E. (1991): Geochemische Untersuchungen an Gesteinen des Nördlinger Ries mit besonderer Berücksichtigung der Forschungsbohrung Nördlingen 1973. - 45 S., DFG-Bericht, Az. PE 405/1-1; Heidelberg. - [unveröff.]
- (1994): The determination of platinum group elements (PGE) in target rocks and fall-back material of the Nördlinger Ries impact crater, Germany. Geochim. Cosmochim. Acta, 58, 5083-5090; Amsterdam.
- SCHMIDT-KALER, H. (1986): Ein ungestörtes Bankungsprofil des Malm Beta und Gamma in einer Ries-Scholle bei Wemding. - Archaeopterix, 1986, 13-17; Eichstätt.
- SCHMINCKE, H.-U. (1977): Phreatomagmatische Phasen in quartären Vulkanen der Osteifel. Geol. Jb., A39, 3-45; Hannover.
- (2000): Vulkanismus. 2. Aufl., 264 S.; Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- SCHNEIDER, W. (1970): Petrologische Untersuchungen der Bunten Breccie im Nördlinger Ries. Diss. Univ. Tübingen, 73 S.; Tübingen.
- SCHNELL, T. (1926): Der bayerische Trass und seine Entstehung. Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., 14, 222-279; Stuttgart.
- SCHUMACHER, R. & SCHMINCKE, H.-U. (1991): Internal structure and occurrence of accretionary lapilli a case study at Laacher See vulcano. Bull. Vulcanol., 53, 612-634; Berlin, Heidelberg.
- SCHWARZ, W. H. & LIPPOLT, H. J. (2002): Coeval Argon-40/Argon-39 ages of moldavites from the Bohemian and Lusatian strewn fields. - Meteorit. Planet. Sci., 37, 1757-1764; Lawrence, Kansas.
- SEE, T. H., WAGSTAFF, J., YANG, V., HÖRZ, F. & MCKAY, G. A. (1998): Compositional variation and mixing of impact melts on microscopic scales. Meteorit. Planet. Sci., 33, 937-948; Lawrence, Kansas.
- SHAW, H. F. & WASSERBURG, G. J. (1982): Age and provenance of the target materials for tektites and possible impactites as inferred from Sm-Nd and Rb-Sr systematics. - Earth Planet. Sci. Lett., 60, 155-177; Amsterdam.
- STÄHLE, V. (1972): Impact glasses from the suevite of the Nördlinger Ries. Earth Planet. Sci. Lett., 17, 275-293; Amsterdam.
- STÄHLE, V., ALTHERR, R., KOCH, M. & NASDALA, L. (2004): Shock-induced formation of kyanite (Al₂SiO₅) from sillimanite within a dense metamorphic rock from the Ries crater (Germany). Contrib. Mineral. Petrol., 148, 150-159; Berlin, Heidelberg.
- STÄHLE, V. & OTTEMANN, J. (1977): Ries-Forschungsbohrung 1973: Zeolithisierung des Gläser im Suevit und Petrographie der Beckensuevite und Gangbreccien. Geologica Bavarica, 75, 191-217; München.
- STÖFFLER, D., ARTEMIEVA, N. A. & PIERAZZO, E. (2002): Modeling the Ries-Steinheim impact event and the formation of the moldavite strewn field. Meteorit. Planet. Sci., 37, 1893-1907; Lawrence, Kansas.
- STORZER, D. & GENTNER, W. (1970): Spaltspuren-Alter von Riesgläsern, Moldaviten und Bentoniten. Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., 52, 97-111; Stuttgart.
- STUTZER, O. (1936): "Meteor Crater" (Arizona) u. Nördlinger Ries. Z. dt. geol. Ges., 88, 510-523; Stuttgart.
- TRNKA, M. & HOUZAR, S. (1991): Moravské Vltavíny. 115 S.; Brno, Muz. a vlastiv. spol..
- (2002): Moldavites: a review. Bull. Czech Geol. Survey, 77, 283-302; Praha.

ULBIG, A. (1999): Untersuchungen zur Entstehung der Bentonite in der bayerischen Oberen Süßwassermolasse. - N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 214, 497-508; Stuttgart.

- UNGER, H. & NIEMEYER, A. (1985): Die Bentonite in Ostniederbayern Entstehung, Lagerung, Verbreitung. - Geol. Jb., D71, 3-58; Hannover.
- VENNEMANN, T. W., MORLOK, A., VON ENGELHARDT, W. & KYSER, K. (2001): Stable isotope composition of impact glasses from Nördlinger Ries impact crater, Germany. Geochim. Cosmochim. Acta, 65, 1325-1336; Amsterdam.
- VĚTVIČKA, I. (2003): Inhomogeneous moldavites: the dependence of sculpture on chemical composition and glass flow structure. J. Non-Cryst. Solids, 323, 34-41; Amsterdam.
- VON ENGELHARDT, W. (1967): Chemical composition of Ries glass bombs. Geochim. Cosmochim. Acta, 31, 1677-1689; Amsterdam.
- (1990): Distribution, petrography and shock metamorphism of the ejecta of the Ries crater in Germany a review. Tectonophysics, 171, 259-273; Amsterdam.
- (2003): Struktur und frühe Morphologie des Rieskraters. Geologica Bavariva, 108, 159-200; München.
- VON ENGELHARDT, W., ARNDT, J., FECKER, B. & PANKAU, H. G. (1995): Suevite breccia from the Ries crater, Germany: Origin, cooling history and devitrification of impact glasses. - Meteoritics, 30, 279-293; Lawrence, Kansas.
- VON ENGELHARDT, W., BERTHOLD, C., WENZEL, T. & DEHNER, T. (2005): Chemistry, small-scale inhomogeneity, and formation of moldavites as condensates from sands vaporized by the Ries impact. Geochim. Cosmochim. Acta, 69, 5611-5626; Amsterdam.
- WAGNER, G. H. (1964): Kleintektonische Untersuchungen im Gebiet des Nördlinger Rieses. - Geol. Jb., 81, 519-600; Hannover.

(1965): Über Bestand und Entstehung typischer Riesgesteine. - Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 7, 199-222; Freiburg.

- WEBER, E. (1941): Geologische Untersuchungen im Ries Das Gebiet des Blattes Wemding. - Abh. Naturkde.- u. Tiergartenver. Schwaben, 3 (Geol.-paläont. R., H. 2), 1-248; Augsburg.
- WEISKIRCHNER, W. (1962): Untersuchungen und Überlegungen zur Entstehung des Rieses. Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F., 44, 17-30; Stuttgart.
- WERNER, E. (1904): Das Ries in der Schwäbisch-Fränkischen Alb. Bl. Schwäb. Albverein 16, 153-168; Stuttgart.
- WLOTZKA, F. (1969): On the formation of chondrules and metal particles by "shock melting". - In: MILLMAN, M. (Hrsg.): Astrophysics Space Sci. Lib., 12, 174-184; Dordrecht.
- WÜNNEMANN, K., MORGAN, J. V. & JÖDICKE, H. (2005): Is Ries crater typical for its size? An analysis based upon old and new geophysical data and numerical modeling. - In: KENKMANN, T., HÖRZ, F. & DEUTSCH, A. (Hrsg.): Large meteorite impacts III: Geol. Soc. America Spec. Paper, 384, 67-83; Boulder.