

Volker J. Sach und Johannes Baier

**Neue Untersuchungen
an Strahlenkalken und Shatter-Cones
in Sediment- und Kristallingesteinen
(Ries-Impakt und Steinheim-Impakt,
Deutschland)**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Umschlag

Aufschluss im Steinbruch Aumühle bei Oettingen, Nördlinger Ries.
Rötlich-braun gefärbte Bunte Brekzie mit gewölbter Oberfläche,
unmittelbar überlagert von grau gefärbten Suevit-Ablagerungen.

Einsatz vorne: Strahlenkalk aus dem Steinheimer Becken.
Lesefund vom südlichen Abhang des Galgenbergs.

Einsatz hinten links: Shatter-Cone-Objekt aus dem Nördlinger Ries.
Fundstück aus dem Hornblende-Fleckenkersantit-Gang des Steinbruchs Wengenhausen.

Einsatz hinten rechts: Strahlenkalk aus dem Ravensburger Brockhorizont
(Kleintobel 2, Obere Süßwassermolasse).

Copyright © 2017 by Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München

Druckvorstufe: Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München
Druck: PBTisk a.s., Příbram I – Balonka

Printed in the European Union

ISBN 978-3-89937-229-8

Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Wolfratshauer Straße 27, 81379 München
Tel.: +49 89 742827-0 – Fax: +49 89 7242772 – E-Mail: info@pfeil-verlag.de – www.pfeil-verlag.de

Neue Untersuchungen an Strahlenkalken und Shatter-Cones in Sediment- und Kristallingesteinen (Ries-Impakt und Steinheim-Impakt, Deutschland)

Volker J. Sach und Johannes Baier

Wilhelm von Branco (1844–1928) und Eberhard Fraas (1862–1915)
in memoriam
(den Erstbeschreibern von Strahlenkalken aus dem Steinheimer Becken)

Zusammenfassung

Shatter-Cones stellen die bisher einzig sicheren makroskopischen Belege für die Wirkungen von Impakt- bzw. Stoßwellenmetamorphose dar und werden deshalb weltweit zur Entdeckung und zum Nachweis von Impaktkratern herangezogen.

Im Rahmen unserer Untersuchungen haben wir Shatter-Cones untersucht, die während des Ries-Impaktes gebildet wurden und aus oberjurassischen Kalken bestehen. Diese Shatter-Cones (bzw. »Strahlenkalk«) wurden in verschiedenen Abständen zum Ries-Impakt-Zentrum gefunden. Die Fundstellen dieser Shatter-Cones liegen auf einem Shatter-Cone-führenden »Auswurfstrahl«, der sich vom Ries-Zentrum in südsüdwestlicher Richtung über eine Strecke von etwa 180 km erstreckt. Unsere Untersuchungsergebnisse lassen sich mit der empirischen Formel $V = 0,1133D + 12,137$ beschreiben, in der »D« den Abstand (in Kilometern) zum Ries-Zentrum darstellt und »V« den sogenannten »V-Winkel« (in °) der korrespondierenden Shatter-Cones bedeutet. Der lineare Zusammenhang wird durch das Bestimmtheitsmaß »R²« von 0,9565 unterstützt.

Zusätzlich kann entlang des Shatter-Cone-führenden Ries-Auswurfstrahls festgestellt werden, dass mit zunehmender Auswurfslänge auch der Anteil an stratigraphisch älterem Ejekta-Material (mittel- und unterjurassische bis obertriassische Gesteine) zunimmt.

Schlüsselwörter: Shatter-Cones, Strahlenkalk, Stoßwellenmetamorphose, V-Winkel, Ries-Impakt, Steinheim-Impakt, Ries-Ejekta, Impakthorizont, Nordalpines Molassebecken, Mittel-Miozän.

Summary

Recent studies on Strahlenkalk-objects and Shatter Cones in sedimentary and crystallin rocks (Ries impact and Steinheim impact, Germany). Shatter cones are considered so far as the only macroscopic evidence for the effects of impact- resp. shock metamorphism and therefore can be used for discovery and verification of impact craters worldwide. We carried out investigations on shatter cones of Ries impact, which were formed within Upper Jurassic limestones. These shatter cones (resp. "Strahlenkalk") have been found at different distances to Ries impact center. The locations of the investigated shatter cones are laying on a shatter cone-bearing ray of Upper Jurassic limestones, extending from the Ries impact crater to a distance of about 180 km south-southwest of impact crater center. Our results can be described by the empirical relationship $V = 0.1133D + 12.137$, where D is the distance of shatter cone location to Ries impact center in km and V is the angle between striations ("V angle") of corresponding shatter cone in degree. The linear correlation is supported with the value of $R^2 = 0.9565$.

Furthermore it can be stated that with increasing distance to Ries impact center the percentage of stratigraphic older ejecta material (Middle Jurassic, Lower Jurassic and Upper Triassic rocks) also increase along the shatter cone-bearing ray of the Nördlinger Ries.

Key words: Shatter Cones, Strahlenkalk, shock metamorphism, V-angle, Ries impact, Steinheim impact, Ries ejecta, impact horizon, North Alpine Foreland Basin, Middle Miocene.

Inhalt

Zusammenfassung/Summary	1
1. Einleitung	3
2. Geologische Situation und Shatter-Cone-Fundorte	4
2.1 Nördlinger Ries (Impaktkrater)	5
2.1.1 Steinbruch Wengenhäusen	6
2.1.2 Steinbruch Aumühle	6
2.2 Steinheimer Becken (Impaktkrater)	6
2.2.1 Zentralhügel	7
2.2.2 Sontheim (»Hohe Beet«)	8
2.2.3 Galgenberg	8
2.3 Biberacher und Ravensburger Brockhorizont	8
2.3.1 Hochgeländ bei Biberach an der Riß	10
2.3.2 Kleintobel bei Ravensburg	11
2.4 Ziemetshausener Brockhorizont	11
2.5 Bernhardzeller Blockhorizont	12
3. Strahlenkalk- bzw. Shatter-Cone-Proben (Fundobjekte)	12
3.1 Proben aus dem Nördlinger Ries	13
3.2 Proben aus dem Steinheimer Becken	14
3.3 Proben aus dem Biberacher und Ravensburger Brockhorizont	20
3.4 Proben aus dem Ziemetshausener Brockhorizont	22
3.5 Proben aus dem Bernhardzeller Blockhorizont	22
4. Diskussion	24
4.1 V-Winkel der Shatter-Cone-Proben	24
4.2 Distanzen der Shatter-Cone-Fundorte zum Ries-Impaktkrater	28
4.3 Shatter-Cone-Bildungsbereich und Abstände zum Ries-Impaktor	30
4.4 Größe des Ries-Impaktors	31
4.5 Ursprüngliche stratigraphische Position im Einschlaggebiet des Nördlinger Rieses	32
5. Wesentliche Untersuchungsergebnisse	33
6. Dank	34
7. Schriftenverzeichnis	34

1. Einleitung

Shatter-Cones weisen stoßwellenmetamorphe kegelförmige Scherbrüche auf, die sich durch charakteristische, divergierende Bruchmarkierungen auszeichnen (Abb. 1). Im Jahre 1905 wurden von BRANCO & FRAAS (1905) erstmalig diese markanten Bruchmarkierungen aus dem Steinheimer Becken beschrieben und mit einem kryptovulkanischen Ursprung in Verbindung gebracht. In dieser Arbeit (Abb. 2) wurden auch die ersten fotografischen Abbildungen derartiger Bruchstrukturen in oberjurassischen Kalken veröffentlicht, die große Beachtung fanden und auch als »Strahlenkalk« bekannt wurden. Weniger beachtet wurde jedoch die Tatsache, dass in dieser Arbeit auch Strahlenkalk beschrieben wurden, die aus den älteren Schichten des Einschlaggebiets stammen. So werden beispielsweise vom südlichen Klosterberg Geoden aus der mitteljurassischen Opalinuston-Formation aufgeführt, die ebenfalls Strahlenkalkbildungen zeigen: »Als bezeichnende Belegstücke wurden in den Opalinusthonen verkieste *Ammonites opalinus* sowie zerpreßte Belemniten und die charakteristischen Geoden (letztere mit der S. 36, 37, Fig. 7, 8 erwähnten Strahlenkalkbildung), in den Weißjura-Mergeln aber kleine verknitterte *Belemnites hastatus* gefunden« (BRANCO & FRAAS 1905: 19). Dennoch finden sich in der Literatur immer wieder Textpassagen, die Shatter-Cones aus den älteren Schichten des Steinheimer Beckens erwähnen (u. a. KRANZ et al. 1924; BUCHER 1963; GROSCOPF & REIFF 1966, 1969; REIFF 1977). Es soll in dieser Arbeit nicht unerwähnt bleiben, dass aus dem Steinheimer Becken auch erstmalig subparallele Schockbrüche (»subparallel shock fractures«; Taf. 4, Fig. 2, 3) beschrieben wurden, die mit dem Impakt in Verbindung gebracht wurden (REIFF 1979a, 1979b). Ebenso lassen sich im Bereich der beiden Krater impaktbedingte Brekzien finden (u. a. HÜTTNER 1969, BORUS 1975, BAIER & SCHERZINGER 2010; Taf. 4, Fig. 4, 3).

Im Falle des nahegelegenen Nördlinger Rieses wurden Shatter-Cones erst ab den 1960er Jahren nachgewiesen. Dabei wurden zunächst nur Shatter-Cone-artige Strukturen in oberjurassischen



Abb. 1. Charakteristisch ausgebildete Shatter-Cone-Strukturen in oberjurassischem Kalkgestein (Strahlenkalk) aus dem Impakt-Krater Steinheimer Becken. Größe des Handstücks: 25 × 14 × 10 Zentimeter. Fundobjekt vom südlichen Abhang des Galgenbergs (Coll. BAIER 2000).

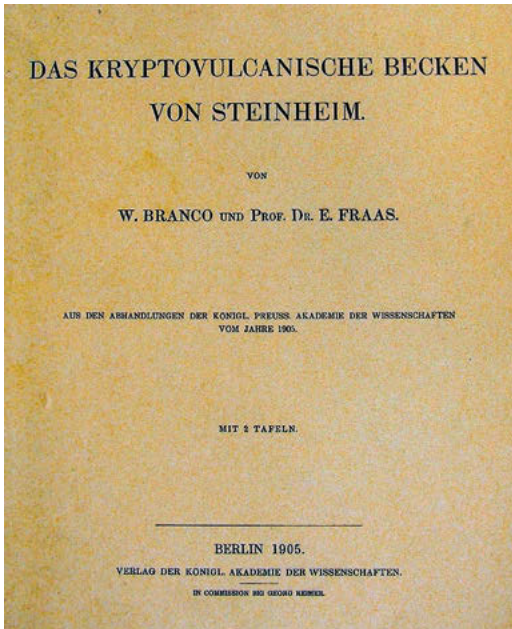


Abb. 2. Titelblatt der ersten Veröffentlichung über Strahlenkalke aus dem Steinheimer Becken durch W. BRANCO und E. FRAAS (1905).

Kalken des Nördlinger Rieses gefunden, die nicht so gut ausgebildet waren, wie sie bereits zuvor aus dem Steinheimer Becken bekannt waren (DRESSLER et al. 1969, HÜTTNER 1969). Im Jahre 1967 wurde der erste Shatter-Cone in einer Kristallinbrekzie (Hornblende-Fleckenkersantit) etwa 700 m SE Mönchsdeggingen von GÜNTHER GRAUP (1940–2006) gefunden (GRAUP & STÖFFLER 1974: 43). Danach folgten weitere Shatter-Cone-Funde in den Kristallinbrekzien, die sich unter anderem innerhalb des Bohrprofils Nördlingen 1973 befanden (HÜTTNER 1977, VON ENGELHARDT & GRAUP 1977, CHAO 1977b).

In den folgenden Jahrzehnten wurden auch innerhalb der nordalpinen Oberen Süßwassermolasse (OSM bzw. tOS) weitere Fundstellen von Shatter-Cones entdeckt, die sich in Südwestdeutschland (SACH 1997, 1999, 2014a, 2016) und in der Ostschweiz (HOFMANN, F. 1973, 1978; HOFMANN, B. A. 2008) befinden und mit dem Ries-Impakt in Verbindung gebracht werden.

In der Zwischenzeit gelten Shatter-Cones als eindeutige makroskopische Belege für einen Impakt (u. a. FRENCH 1998, MCCALL 2009, FRENCH & KOEBERL 2010, BARATOUX & REIMOLD 2016) und wurden an zahlreichen terrestrischen Impaktkratern nachgewiesen.

Ebenso konnten auch erste Shatter-Cones in Meteoriten nachgewiesen werden (MCHONE et al. 2012, FERRIÈRE et al. 2013). Für die stoßwellenmetamorphe Bildung der Shatter-Cones werden Drücke von 2–30 GPa angenommen (u. a. FRENCH 1998, BARATOUX & REIMOLD 2016).

Nachdem im Nördlinger Ries, Steinheimer Becken und in der Oberen Süßwassermolasse Südwestdeutschlands in jüngster Zeit weiteres Shatter-Cone-Material gefunden wurde, möchte die vorliegende Abhandlung die süddeutschen und schweizerischen Shatter-Cone-Funde unter verschiedenen Aspekten näher untersuchen und eine Systematik herausarbeiten. Hierzu wurden die Shatter-Cones, die in oberjurassischen Kalken ausgebildet sind, erneut untersucht und miteinander in Verbindung gebracht. Ebenso wurden Shatter-Cones aus dem Nördlinger Ries untersucht, die sich in feinkörnigen Hornblende-Fleckenkersantiten und gröberen Graniten ausbildeten und folglich aus dem kristallinen Grundgebirge stammen.

Darüber hinaus wurden diverse Shatter-Cones aus dem Steinheimer Becken mit in die Untersuchungen und Auswertungen aufgenommen, da dort ein, gegenüber dem Ries-Impakt, signifikant kleinerer Impakt erfolgte, der außerdem in einen sehr ähnlichen geologischen Untergrund (mit Oberjura-Gesteinen nahe an der ehemaligen Geländeoberfläche) einschlug wie der größere Impaktor im Nördlinger Ries.

2. Geologische Situation und Shatter-Cone-Fundorte

Im Folgenden werden die regionalgeologischen Verhältnisse und die wichtigsten Aufschlussdaten der in vorliegender Arbeit untersuchten und ausgewerteten Shatter-Cone-Fundstellen kurz dargestellt. Für weitere, detailliertere Informationen betreffend der hier relevanten Impaktkrater und Molassefundstellen (siehe Abb. 3) in Süddeutschland sowie in der Ostschweiz sei auf die angegebene Literatur verwiesen.



Abb. 3. Schematische Übersichtskarte mit den beiden Impaktkratern Nördlinger Ries und Steinheimer Becken sowie den Shatter-Cone-Fundgebieten (rote Kreissignatur) in der Molasse Südwestdeutschlands und der Ostschweiz. Eingezeichnet ist auch der Fundort (rote Sternsignatur) eines Reuterschen Blockes nordnordwestlich von Ravensburg (siehe SACH 2014b). Kilometerangaben an den beiden Auswurfstrahlen: jeweils Distanz vom Zentrum des Ries-Kraters bis zu den Brockhorizont-Vorkommen bei Ziemetshausen, Biberach an der Riß, Ravensburg und St. Gallen (Bernhardzell).

2.1 Nördlinger Ries (Impaktkrater)

Das Nördlinger Ries stellt einen tertiären Impaktkrater mit einem Durchmesser von etwa 24 Kilometer dar, der sich im Grenzgebiet des Schwäbisch-Fränkischen Juras befindet (GEYER et al. 2011) und während des Mittel-Miozäns vor rund 14,6 Ma (SCHWARZ & LIPPOLT 2014) ausgesprengt wurde. Das getroffene Einschlagsgebiet setzte sich im Wesentlichen aus einer geschichteten Sequenz von

tertiären und mesozoischen Sedimenten zusammen, die das kristalline Grundgebirge überlagerten (GALL et al. 1977, HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 1999). Sowohl innerhalb als auch außerhalb des Nördlinger Rieses lassen sich verschiedene Gesteinstypen finden, die unterschiedliche Stufen einer Stoßwellenmetamorphose durchlaufen haben (vgl. BAIER 2007, 2009, 2013a). 1999 konnte erstmalig durch GRAUP (1999) gezeigt werden, dass während des Ries-Impaktes die Druck- und Temperaturbedingungen so hoch waren, dass sogar ein großes Volumen der oberflächennahen oberjurassischen Kalke aufgeschmolzen wurde, welches einen wesentlichen Bestandteil bei der Suevit-Bildung ausmachen. Das Rieskrater-Museum in Nördlingen liefert anhand von zahlreichen Exponaten und Informationstafeln einen Überblick über die vielseitige Bedeutung des Impaktkraters (PÖSGES & SCHIEBER 2000).

2.1.1 Steinbruch Wengenhausen

Ehemaliger Steinbruch (»Ries-Geotop«) bei Wengenhausen, nördlich des Arenbaches, etwa 3 Kilometer nordwestlich der Ortschaft Wallerstein. TK 25 Blatt 7028 Unterschneidheim. – Gauss-Krüger-Koordinaten: R³⁶07315, H⁵⁴20335. Topographische Höhe: etwa 436 Meter ü. NN. Distanz zum Kraterzentrum: etwa 7 Kilometer. Literatur: CHAO 1977a; GRAUP 1977, 1978; HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 2003.

An der nördlichen Abbauwand des ehemaligen Steinbruches bei Wengenhausen sind in Folge des Impakt-Ereignisses stark beanspruchte, zerrüttete und dislozierte Gesteine (Granit, Gneis, Amphibolit) aus dem tieferen, kristallinen Untergrund des Rieses aufgeschlossen. In diese Gesteine sind gangartig feinkörnige »polymikte Kristallinbrekzien« eingedrungen. Ein heute noch zugänglicher Hornblende-Fleckenkersantit-Gang lieferte zahlreiche Shatter-Cones mit teilweise recht feinen Lineationen. Das primäre Ausgangsgestein dieses Gangs wurde bereits durch GRAUP (1977, 1978) ausführlich petrographisch untersucht und beschrieben, so dass auf diese Arbeiten verwiesen werden kann.

2.1.2 Steinbruch Aumühle

Steinbruch (»Ries-Geotop«) etwa 2,5 Kilometer nordöstlich der Stadt Oettingen i. Bay., etwa 150 Meter nördlich des Steppbachs. TK 25 Blatt 7029 Oettingen. – Gauss-Krüger-Koordinaten: R⁴²99800, H⁵⁴26780. Topographische Höhe: etwa 446 Meter ü. NN. Distanz zum Kraterzentrum: etwa 9 Kilometer. Literatur: SCHNEIDER 1970, CHAO 1977a, HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 2003, PÖSGES 2016.

Im Eingangsbereich des nahe am nordöstlichen Ries-Kratertrand liegenden Steinbruchs sind Gesteine der Bunten Brekzie und Suevit gemeinsam und im direkten Kontakt aufgeschlossen. Suevit wurde hier sehr rasch auf der Bunten Brekzie abgelagert, was durch die sehr unruhige Oberfläche der Bunten Brekzie angezeigt wird. Aus der Bunten Brekzie des Steinbruchs Aumühle sind »Riesbelemniten« und »Riesammoniten« seit längerem bekannt. Abbildung 4 zeigt ein dort im Mai 2017 gefundenes Bruchstück eines Rostrums des großwüchsigen Belemniten *Megateuthis aalensis* (Voltz) (syn. *M. gigantea*) mit typischen, durch die Stoßwelle verursachten Bruchstrukturen. Auf einer Seite des Rostrums sind außerdem aufgewachsene Austernschalen zu erkennen. Dieses Fundobjekt wurde innerhalb der Bunten Brekzie noch im Verband mit rötlich-braunem Kalkgestein des Mittleren Juras angetroffen. Ebenfalls in jüngster Zeit konnten im Steinbruch Aumühle, also im Ries-Krater selbst, sogar Funde sehr gut ausgebildeter Strahlenkalke (Oberjura-Kalkgesteine mit Shatter-Cone-Strukturen) gefunden werden (PÖSGES 2016). Darüber hinaus fanden sich im unmittelbar auf der Bunten Brekzie lagernden Suevit-Horizont einige Granitbrocken, deren Bruchflächen ebenfalls deutliche Shatter-Cones aufweisen.

2.2 Steinheimer Becken (Impaktkrater)

Das kleinere Steinheimer Becken befindet sich auf der Ostalb (Baden-Württemberg) rund 40 km südwestlich vom Ries-Zentrum entfernt und weist einen Durchmesser von rund 3,5 km auf. Das Becken selbst stellt ebenfalls einen mittelmiozänen Impaktkrater dar, der jedoch mit dem Steinhirt-Klosterberg eine zentrale Erhebung (»central uplift«) aufweist (GROSCHOPF & REIFF 1966, 1970),



Abb. 4. Durch die Stoßwelle des Ries-Impakts zerbrochenes Rostrum des Belemniten *Megateuthis aalensis*, eingebettet in Kalkgestein des Mittleren Juras. Länge (Rostrum): etwa 25 Zentimeter. Fundobjekt aus der Bunten Brekzie des Steinbruchs Aumühle im Nördlinger Ries (Coll. SACH 2017).

was beim benachbarten und größeren Impaktkrater Nördlinger Ries nicht gegeben ist. Die für das Steinheimer Becken charakteristischen Strahlenkalke wurden 1905 erstmals näher beschrieben (BRANCO & FRAAS 1905) und zählen bis heute weltweit zu den am besten ausgebildeten Objekten ihrer Art. Durch den Nachweis von planaren Elementen konnte später, im Jahr 1966, die Entstehung durch einen Impakt bestätigt werden (GROSCOPF & REIFF 1966). 2009 wurde ein neu konzipierter Geologischer Lehrpfad im Steinheimer Becken eröffnet, der an verschiedenen Stationen dem Besucher die geologischen und paläontologischen Besonderheiten des Impaktkraters näher erläutern soll (BAIER & SCHERZINGER 2010; BAIER 2012, 2013b). Höchstwahrscheinlich ist das Steinheimer Becken zeitgleich mit dem Ries entstanden, bewiesen ist diese Gleichaltrigkeit bis heute jedoch nicht. Ein Asteroid, der das Nördlinger Ries aussprengte, könnte im Schwerkräftfeld der Erde zerbrochen sein. Ein kleineres Bruchstück dieses Asteroids hätte dann das Steinheimer Becken erzeugt. Ebenfalls wäre denkbar, dass der Nördlingen-Asteroid bereits im Weltall von einem kleineren Himmelskörper begleitet wurde.

2.2.1 Zentralhügel

Aufschlüsse bzw. Bohrung auf der zentralen Erhebung ("Steinhirt" und "Klosterberg") des Steinheimer Beckens zwischen den beiden Ortschaften Steinheim am Albuch im Norden und Sontheim im Süden. TK 25 Blatt 7326 Heidenheim an der Brenz. – Gauss-Krüger-Koordinaten: R³⁵78410, H⁵³94674. Topographische Höhe: etwa 567 Meter ü. NN. Keine oder nur sehr geringe Distanz zum Kraterzentrum. Literatur: KRANZ et al. 1924; GROSCOPF & REIFF 1970, 1971; HEIZMANN & REIFF 2002; SCHMIEDER & BUCHNER 2013.

Auf der zentralen Erhebung des Steinheimer Beckens waren im Laufe der Zeit mehrere Aufschlüsse zugänglich, an denen Shatter-Cones sowohl in Oberjurakalken (»Strahlenkalke«) als auch in mittelmiozänen Gesteinen (Konkretionen innerhalb der Opalinuston-Formation; Sandsteine aus der Eisensandstein-Formation) gefunden wurden. Eine frühe Erwähnung von Strahlenkegeln in Opalinuston-Geoden geben diesbezüglich KRANZ et al. (1924: 56–57). Bei der tiefsten Bohrstelle Nr. 23 (GROSCHOPF & REIFF 1971) von insgesamt 10 Forschungsbohrungen auf dem Zentralhügel des Steinheimer Beckens konnten 1970 in einer Teufe von 589 Meter sogar Shatter-Cones in einem unterjurassischen Sandstein der Angulatensandstein-Formation angetroffen werden. Dies belegt ein Bohrkern aus diesen Schichten, welcher derzeit im Meteorkrater-Museum in Sontheim aufbewahrt wird bzw. ausgestellt ist.

2.2.2 Sontheim (»Hohe Beet«)

Lesefunde auf einer Ackerfläche etwa 500 Meter südöstlich der Ortschaft Sontheim am südlichen Kraterrand des Steinheimer Beckens, im Bereich der Flur »Hohe Beet« unmittelbar nordöstlich des Burgstalls. TK 25 Blatt 7326 Heidenheim an der Brenz. – Gauss-Krüger-Koordinaten: R³⁵79095, H⁵³93620. Topographische Höhe: etwa 533 Meter ü. NN. Distanz zum Kraterzentrum: etwa 1,3 Kilometer. Literatur: KRANZ et al. 1924, GROSCHOPF & REIFF 1970, BAIER & SCHERZINGER 2010, SCHMIEDER & BUCHNER 2013 .

2016 konnten von den beiden Autoren dieser Arbeit zahlreiche Lesefunde von Strahlenkalken (Taf. 2, Fig. 1–8 und Taf. 3) sowie Kalkbrocken mit subparallelen Schockbrüchen (sensu REIFF 1979a, 1979b; Taf. 4, Fig. 2, 3) auf einem abgeernteten Feld aufgesammelt werden, das sich etwa 500 Meter südöstlich der Ortschaft Sontheim befindet. In diesem Bereich steht die primäre Rückfallbrekzie oberflächennah an (GROSCHOPF & REIFF 1970, REIFF 1979b). Die Fundstelle befindet sich in unmittelbarer Nähe des südlichen Kraterrands. Diese Strahlenkalke sind aufgrund des sehr ähnlichen Gesteinsmaterials (Oberjurakalke), ihrer unterschiedlichen Erhaltungszustände (grobe bis sehr feine Shatter-Cone-Lineationen, teilweise auf mehreren Gesteinsflächen) sowie ihre Häufigkeit gut geeignet, um direkte Vergleiche mit den Shatter-Cones aus dem Nördlinger Ries vorzunehmen.

2.2.3 Galgenberg

Temporärer Aufschluss und Lesefunde am südlichen Abhang der Galgenbergs nahe der Straße L 1168 von Steinheim am Albuch nach Heidenheim an der Brenz. TK 25 Blatt 7326 Heidenheim an der Brenz. – Gauss-Krüger-Koordinaten: R³⁵79900, H⁵³94850. Topographische Höhe: etwa 531 m ü. NN. Distanz zum Kraterzentrum: etwa 1,3 Kilometer. Literatur: KRANZ et al. 1924, REIFF 1979b.

Eine weitere Strahlenkalk-Fundstelle im Steinheimer Becken befand sich am südlichen Abhang des Galgenbergs an der heutigen Straße L 1168. Hier konnten im Jahre 2000 von einem der beiden Autoren (J.B.) an einem temporären Straßenaufschluss Strahlenkalke gesammelt werden. An dieser temporären Fundstelle konnte auch ein Fossilrest der Ammoniten-Gattung *Aulacostephanus* (aus der *Eudoxus*-Gruppe), noch im Verband mit dem mikritischen, Shatter-Cone-führenden Oberjurakalk, angetroffen werden (Abb. 5). Auf den benachbarten Äckern, die sich in südlicher Richtung zum Knill-Hang erstrecken, lassen sich noch heute vereinzelt Strahlenkalke und Kalkstücke mit subparallelen Schockbrüchen in der primären Rückfallbrekzie finden, die dort oberflächennah ansteht.

2.3 Biberacher und Ravensburger Brockhorizont

In Baden-Württemberg (Raum Oberschwaben), genauer in den Landkreisen Biberach und Ravensburg, sind bisher zwei Aufschlussgebiete des sogenannten Brockhorizontes in der mittelmiozänen Oberen Süßwassermolasse bekannt, der mit dem katastrophalen Nördlinger-Ries-Impakt in direktem Zusammenhang steht (u. a. GALL & MÜLLER 1975; HEISSIG 1986, 1989; SACH 1997, 1999; SCHEUENPFLUG 1980; SEEHUBER 2009). Der Brockhorizont enthält zahlreiche ortsfremde Gesteinskomponenten, vor allem kantige Oberjura-Kalkbrocken, darunter auch eindeutige Strahlenkalke



Abb. 5. Ammonit der Gattung *Aulacostephanus* (aus der *Eudoxus*-Gruppe) in mikritischem Kalkgestein des Oberen Juras. Durchmesser des Ammoniten etwa 5 Zentimeter. Fundobjekt aus dem Steinheimer Becken, vom temporären Aufschluss am südlichen Abhang des Galgenbergs (Coll. BAIER 2000).

mit Shatter-Cone-Strukturen, die durch den Einschlag des Ries-Meteoriten und dem danach verursachten Massenauswurf von Gesteinsmaterial über sehr weite Distanzen bis hin zu ihrem heutigen Fundort geschleudert wurden. Die betreffenden Aufschlussgebiete befinden sich zum einen im Bereich des sogenannten »Hochgeländs«, einer Hochfläche südsüdöstlich der Stadt Biberach an der Riß, und zum anderen in einem zur Schussen hin entwässernden Bachtobel (der sogenannte »Kleintobel«) bei Ravensburg. Diese Vorkommen des Brockhorizontes (Impakthorizont, siehe Abb. 6) und die zahlreichen Ries-Fernauswürflinge von dort wurden seit den Jahren 1996 (»Biberacher Brockhorizont« bei etwa 600–610 Meter ü.NN) und 2011 (»Ravensburger Brockhorizont« bei etwa 449 Meter ü.NN) von einem der beiden Autoren (V.J.S.) entdeckt und gedeutet. Die unterschiedlichen topographischen Höhenlagen dieser Brockhorizont-Vorkommen weisen – mit über 150 Meter Höhendifferenz auf einer Strecke von etwa 30 Kilometer – auf ein nur geringes Gefälle der Geländeoberfläche der betreffenden Landschaft während des Mittel-Miozäns in Richtung Südwesten hin. Das Einfallen des Brockhorizontes beträgt hier, von NNO nach SSW, etwa 0,3 Grad, was einem Gefälle von etwa 0,5 Prozent entspricht (SACH 2014).



Abb. 6. Ortsfremde, kantige Kalkbrocken des Oberen Juras (Durchmesser bis etwa 10 Zentimeter), noch eingebettet im fluviatilen Feinsediment (Quarzglimmersande) des Ravensburger Brockhorizontes. Aufschluss der Oberen Süßwassermolasse im Kleintobel.

Dieser Befund fügt sich problemlos ein in das etablierte Ablagerungsmodell der mittelmiozänen Oberen Süßwassermolasse Südwestdeutschlands mit vorwiegend nach Südwesten gerichteter Schrägschichtung der fluviatilen Feinsedimente (beckenachbiale Glimmersandschüttung) und einem daraus resultierenden Hauptentwässerungssystem der ehemaligen Flusslandschaft in gleicher Richtung (LEMCKE et al. 1953, HOFMANN 1955).

2.3.1 Hochgeländ bei Biberach an der Riß

a) Aufschluss des Biberacher Brockhorizontes im Wannenwaldtobel etwa 2 Kilometer südwestlich der Ortschaft Fischbach. TK 25 Blatt 7925 Ochsenhausen. – Gauss-Krüger-Koordinaten: R³⁶62250, H⁵²21750. Topographische Höhe: etwa 603,5 m ü. NN. b) Aufschluss des Biberacher Brockhorizontes im Tobel Oelhalde-Süd etwa 400 Meter südöstlich der Ortschaft Wettenberg. TK 25 Blatt 7924 Biberach an der Riß. – Gauss-Krüger-Koordinaten: R³⁶61950, H⁵³22525. Topographische Höhe: etwa 606 m ü. NN. Distanz zum Ries-Zentrum (a+b): etwa 110 Kilometer. Literatur: SACH 1997, 1999, 2004, 2014, 2016.

Im Wannenwaldtobel ist eine bis zu 20 Zentimeter mächtige Lage (»Wannenwaldtobel 1«) des Biberacher Brockhorizontes auf etwa zehn Meter Länge aufgeschlossen. Der Impakthorizont zeigt sich hier mit wellenförmiger, schwach nach Westen einfallender Oberfläche. Kantige Oberjura-Kalkbrocken fanden sich bisher von Kirschkergröße bis zum Block mit den Maßen 20 × 18 × 15 Zentimeter. Etwa 900 Einzelobjekte konnten geborgen und hierbei eine Lagerungsdichte von etwa 25–30 kg/m² ermittelt werden. Unter den Brockhorizont-Komponenten konnte ein Strahlenkalk (Taf. 6, Fig. 1) mit Shatter-Cone-Strukturen auf zwei Gesteinsflächen, die spitzwinklig aufeinanderstoßen, eindeutig identifiziert werden. Vom Wannenwaldtobel liegen außerdem mehrere Gesteinsbrocken mit strahlenkalkähnlicher Oberflächenstruktur vor.

An der nordwestlichen Wand des Tobels Oelhalde-Süd befinden sich zwei Sedimentlagen des Biberacher Brockhorizontes mit unterschiedlicher topographischer Höhe (605,3 und 606,7 Meter

ü. NN). Die beiden Vorkommen sind in Ost-West-Richtung angeschnitten, etwa 5 Meter lang und bis zu 40 Zentimeter mächtig. In der unteren Lage konnten bisher etwa 100 Oberjura-Kalkbrocken mit bis zu 6 Zentimeter Durchmesser gefunden werden, darunter ein eindeutiger Strahlenkalk (Taf. 6, Fig. 2), der auf seiner »Rückseite« wahrscheinlich weitere, allerdings stark abgerollte Negativabdrücke von Shatter-Cone-Strukturen zeigt. Aus der oberen Brockhorizont-Lage konnte bisher nur ein kleines Oberjura-Kalkstück (Durchmesser: etwa 2 Zentimeter) geborgen werden. Im benachbarten Tobel Oelhalde-Nord, wo der betreffende Impakthorizont bei etwa 604–608 Meter ü. NN ebenfalls an mehreren Stellen aufgeschlossen ist, fand sich im November 2016 der bisher größte Oberjura-Kalkbrocken (Riffschutt-Fazies) aus dem Biberacher Brockhorizont mit den Maßen 31 × 22 × 20 Zentimeter und einem Gewicht von 14,5 Kilogramm (Taf. 7, Fig. 1). Die Aufschlüsse im Tobel Oelhalde-Nord lieferten bis heute aber keine Strahlenkalk-Objekte bzw. Shatter-Cones.

2.3.2 Kleintobel bei Ravensburg

Aufschluss des Ravensburger Brockhorizontes im Bachtobel etwa 500 Meter nordöstlich der Ortschaft Kleintobel/Berg westlich von Weingarten, etwa 220 Meter nordöstlich der Einmündung des südöstlichen Seitentobels bei Kleintobel. TK 25 Blatt 8123 Weingarten. – Gauss-Krüger-Koordinaten: R³⁵44907, H⁵²96301. Topographische Höhe: etwa 449,3 Meter ü. NN. Distanz zum Ries-Zentrum: etwa 140 Kilometer. Literatur: SACH 2014, 2016.

Im Kleintobel bei Ravensburg und Weingarten konnte von einem der beiden Autoren (V.J.S.) im Jahr 2011 ein weiteres Brockhorizont-Vorkommen (»Kleintobel 2«) mit kantigen Oberjura-Kalkbrocken sowie mit dunkel gefärbten Mitteljura- und Unterjura-Komponenten lokalisiert werden. Dieser Aufschluss des Ravensburger Brockhorizontes befindet sich an der nordwestlichen Tobelwand etwa 6 Meter oberhalb der Tobelbasis. Die aufgesammelten Jura-Komponenten (etwa 2300 Bruchstücke von Malm-, Dogger- und Lias-Gesteinen) haben Kantenlängen von etwa 1–29 Zentimeter. Im untersuchten Brockhorizont-Bereich betrug die Lagerungsdichte ortsfremder Jura-Gesteine etwa 20–25 kg/m². Der bisher größte Gesteinsbrocken aus dem Ravensburger Brockhorizont, ein annähernd quaderförmiges Oberjurakalk-Bruchstück (Taf. 7, Fig. 3), hat die Maße von 29 × 14 × 13 Zentimeter und ein Gewicht von 7,4 Kilogramm. Er weist an seiner Oberfläche grobe, Shatter-Cone-ähnliche Strukturen auf. Außerdem konnten im Ravensburger Brockhorizont bisher 6 eindeutige Strahlenkalke bzw. Shatter-Cones in situ geborgen werden (Taf. 6, Fig. 3–6 zeigt 4 dieser Fundstücke).

2.4 Ziemetshausener Brockhorizont

Brockhorizont in einer ehemaligen, zum Straßenbau angelegten Sandgrube am Südrand der B 300, etwa 1,5 Kilometer WSW der Kirche von Ziemetshausen (Landkreis Günzburg), etwa 30 Kilometer WSW von Augsburg. TK 25 Blatt 7729 Ziemetshausen. – Gauss-Krüger-Koordinaten: R⁴³89851, H⁵³50994. Topographische Höhe: etwa 510 Meter ü. NN. Distanz zum Ries-Zentrum: etwa 66 Kilometer. Literatur: SCHEUENPFLUG 1980, HEISSIG 1989.

Ein bereits im Jahr 2005 geborgenes Fundobjekt aus einer ehemaligen, heute nicht mehr zugänglichen Sandgrube bei Ziemetshausen stellt den ersten bisher bekannten Strahlenkalk aus dem Ries-Brockhorizont der Oberen Süßwassermolasse (höhere »Fluviatile Untere Serie«) in Bayern dar. Dieses Fundstück (Größe: 8,8 × 7,5 × 6,3 Zentimeter; Gewicht: 413 Gramm; siehe Taf. 5, Fig. a–d), ein durch fluviatile Abrollung stark zugerundeter und nach seiner Bergung in zwei Teile zerbrochener Oberjura-Kalkbrocken mit heller Verwitterungsrinde, zeigt auf den frischen Bruchflächen deutliche Shatter-Cones (Kegelstrukturen auf Positivseite und auf zugehöriger Negativseite) mit feinen Lineationen. Der betreffende Oberjura-Kalkbrocken konnte am 5. Oktober 2005 von Herrn P. BOCKSTALLER (Schopfheim) im Ziemetshausener Brockhorizont (»Ziemetshausen 1b«) in situ, also noch im Sediment liegend, angetroffen werden. Erst aber im Frühjahr 2006, nachdem der Kalkbrocken durch Frosteinwirkung in zwei Teile zerbrach, entdeckte dann der Sohn von Herrn BOCKSTALLER, JULIAN, die Shatter-Cone-Strukturen auf den beiden frischen Gesteinsbruchflächen. Nach SCHEUENPFLUG (1980: 136) fanden sich in der heute aufgelassenen Sandgrube bei Ziemetshausen ortsfremde Oberjurablöcke bis zu einer Größe von 120 × 78 × 40 Zentimeter.

2.5 Bernhardzeller Blockhorizont

Hauptaufschluss des »Bernhardzeller Blockhorizonts« am linken Ufer der Sitter bei Bernhardzell, etwa 6,5 Kilometer NNW von St. Gallen, zwischen Bernhardzell und der ehemaligen Burg Rabenstein. LK1074, Bischofszell, Geologischer Atlas der Schweiz 1:25000. – Gauss-Krüger-Koordinaten: R³⁵25498, H⁵²60223. Topographische Höhe: etwa 510 Meter ü. NN. Distanz zum Ries-Zentrum: etwa 180 Kilometer. Literatur: HOFMANN, F. 1973, 1978; HOFMANN, B. A. 2008.

Auch in der Oberen Süßwassermolasse der Ostschweiz, im nördlichen Kanton St. Gallen, sind Schichten aufgeschlossen, die mit dem Ries-Ereignis zu korrelieren sind. So konnte im Jahr 1945 in der Gegend von Bernhardzell ein sogenannter »Malmkalk-Blockhorizont« (Äquivalent des süddeutschen Brockhorizontes) entdeckt werden, der aber zunächst als vulkanischer Horizont gedeutet wurde (BÜCHI & HOFMANN 1945). Er ist dort an mehreren Stellen aufgeschlossen, zum einen an der Uferböschung der Sitter und zum anderen an einem Abhang des Tiefenbachtobels. Der Impakthorizont führt kantige Oberjura-Kalkbrocken mit Durchmessern bis etwa 25 Zentimeter und auch Strahlenkalk bzw. Shatter-Cones (HOFMANN, F. 1973, 1978; HOFMANN, B. A. 2008). Unter den sechs bisher publizierten, eindeutigen Shatter-Cones befindet sich ein sehr gut ausgebildeter Strahlenkalk, der zwei Bruchflächen mit feinen Shatter-Cone-Lineationen zeigt. Der Bernhardzeller Blockhorizont ist rund 180 Kilometer vom Nördlinger-Ries-Zentrum entfernt und wird lithostratigraphisch an die Basis der Öhninger Schichten innerhalb der Oberen Süßwassermolasse gestellt (BÜCHI 1958, HOFMANN 1973). In diesem Impakthorizont konnten auch Quarze nachgewiesen werden, die planare Elemente, sog. PDFs, aufweisen (HOFMANN & HOFMANN 1992).

3. Strahlenkalk- bzw. Shatter-Cone-Proben (Fundobjekte)

Für Vergleiche von Strahlenkalen bzw. Shatter-Cones aus dem Nördlinger Ries, Steinheimer Becken sowie aus der Oberen Süßwassermolasse in Baden-Württemberg, Bayern und in der Ostschweiz wurden an insgesamt 65 Fundobjekten jeweils der auf die Ebene projizierte Winkel der Shatter-Cone-Lineationen, der sogenannte V-Winkel (SAGY et al. 2002; siehe Abb. 7), gemessen. Nach Reinigung der Oberflächen dieser Fundobjekte, insbesondere bei den Strahlenkalen aus der Molasse, wurden die Winkelmessungen mit Hilfe digitaler Fotoaufnahmen vorgenommen, welche möglichst senkrecht zu den Gesteinsoberflächen mit Shatter-Cone-Strukturen gemacht wurden. In einigen Fällen wurden die Winkelmessungen auch anhand winkeltreu vergrößerter Abbildungen aus Fachpublikationen (HOFMANN 2008, SCHMIEDER & BUCHNER 2013, PÖSGES 2016) ermittelt. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Messungen sind in den Tabellen 1–3 aufgelistet.

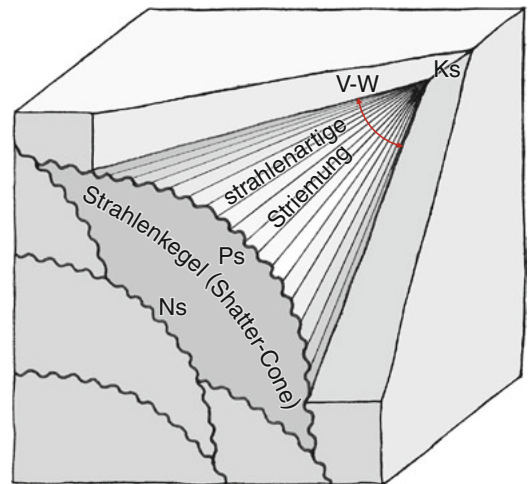


Abb. 7. Modell eines durch Stoßwellen-Metamorphose in Festgestein entstandenen Strahlenkegels (Shatter-Cone). Ks = Kegelspitze; Ps = Positivseite (konvexe Oberfläche); Ns = Negativseite (konkave Oberfläche); V-W = V-Winkel. Verändert nach GIBSON & SPRAY (1998: Abb. 5a).

3.1 Proben aus dem Nördlinger Ries

Für die Untersuchungen, insbesondere zur Bestimmung der mittleren V-Winkel, wurden von zwei Shatter-Cone-Fundstellen (Steinbrüche Wengenhausen und Aumühle) innerhalb des Nördlinger-Ries-Kraters insgesamt 22 Proben bearbeitet.

Tabelle 1. Shatter-Cone-Proben aus dem Nördlinger Ries. Abkürzungen: Sh.-C. = Shatter-Cones; B.B. = Bunte Brekzie.

Probe	Fundort	Gesteinsmaterial	Erhaltung Sh.-C.	Anzahl Sh.-C.	V-Winkel: Ø (min./max.)
WH-1	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (2 Flächen)	16	23° (14°–32°)
WH-2	Wengenhausen	Kersantit-Gang	fein (5 Flächen)	30	22° (15°–30°)
WH-3	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (2 Flächen)	9	22° (18°–28°)
WH-4	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (1 Fläche)	8	23° (19°–29°)
WH-5	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (1 Fläche)	6	23° (20°–28°)
WH-6	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (1 Fläche)	8	23° (17°–29°)
WH-7	Wengenhausen	Kersantit-Gang	fein (2 Flächen)	13	23° (18°–30°)
WH-8	Wengenhausen	Kersantit-Gang	fein (1 Fläche)	5	23° (21°–25°)
WH-9	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (1 Fläche)	5	22° (20°–27°)
WH-10	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (1 Fläche)	6	22° (18°–25°)
WH-11	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (1 Fläche)	3	22° (19°–25°)
WH-12	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (1 Fläche)	5	22° (18°–25°)
WH-13	Wengenhausen	Kersantit-Gang	fein (1 Fläche)	8	22° (18°–24°)
WH-14	Wengenhausen	Kersantit-Gang	fein (1 Fläche)	4	22° (20°–25°)
WH-15	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (1 Fläche)	3	23° (20°–25°)
WH-16	Wengenhausen	Kersantit-Gang	grob (1 Fläche)	1	22° (22°)
AM-1	Aumühle	Granit aus Suevit	grob (2 Flächen)	13	24° (18°–28°)
AM-2	Aumühle	Granit aus Suevit	grob (1 Fläche)	10	23° (18°–28°)
AM-3	Aumühle	Granit aus Suevit	grob (1 Fläche)	9	23° (17°–28°)
AM-4	Aumühle	Oberjura-Kalk aus B.B.	fein (1 Fläche)	15	19° (15°–24°)
AM-5	Aumühle	Oberjura-Kalk aus B.B.	fein (1 Fläche)	11	18° (14°–23°)
AM-6	Aumühle	Oberjura-Kalk aus B.B.	fein (1 Fläche)	15	18° (13°–23°)

Aus dem aufgelassenen Steinbruch Wengenhausen stammen 16 Shatter-Cone-Proben (WH-1 bis WH-16), die von P. BOCKSTALLER (Schopfheim) und einem der beiden Autoren (V.J.S.) im Jahre 2016 gesammelt werden konnten. Diese Shatter-Cones fanden sich in einem feinkörnigen Gang aus Hornblende-Fleckenkersantit, der im tieferen Untergrund des Nördlinger Rieses in anstehende granitoide Kristallingesteine eingedrungen ist. Erst infolge des Ries-Impaktes wurden diese Kristallingesteine mit dem betreffenden Kersantit-Gang (und den darin befindlichen Shatter-Cone-Strukturen) bis nahe an die heutige Geländeoberfläche disloziiert. Die Ausbildung bzw. der Erhaltungszustand der Shatter-Cone-Strukturen ist bei 11 (WH-1, WH-3 bis WH-6, WH-9 bis WH-12, WH-15, WH-16) Fundobjekten aus Wengenhausen eher grob. Nur bei Streiflicht zeigen sich deutliche, spitzwinklig zusammenlaufende Lineationen. Die anderen fünf Fundobjekte (WH-2, WH-7, WH-8, WH-13, WH-14) zeigen hingegen zahlreiche, gut erhaltene Shatter-Cone-Strukturen mit feinen Lineationen. An drei Fundobjekten (WH-1, WH-3, WH-7) können zwei Gesteinsflächen mit Shatter-Cone-Strukturen beobachtet werden. Ein weiterer Kersantit-Brocken (WH-2) mit einer Größe von etwa 20 × 15 × 10 Zentimeter liegt vor, der sogar fünf Shatter-Cone-Flächen aufweist, sowohl mit konvexen Positivseiten als auch mit konkaven Negativseiten von Strahlenkegeln. Die mittleren V-Winkel der insgesamt 16 Shatter-Cone-Proben aus dem kristallinen Kersantit-Gang bei Wengenhausen liegen eng beieinander bei 22°–23°, der Gesamtdurchschnitt beträgt 22° bei 130 gemessenen Winkeln.

Sechs weitere Shatter-Cone-Proben (AM-1 bis AM-6) stammen aus dem Steinbruch Aumühle bei Oettingen, die ebenfalls von P. BOCKSTALLER gefunden wurden. Es handelt sich zum einen

um drei granitoide Kristallingesteinsbrocken (zerrütteter Granit) aus dem Suevit-Vorkommen des Steinbruchs. Diese Gesteinsproben zeigen feine bis grobe Shatter-Cone-Lineationen auf 1–2 Gesteinsbruchfläche/n. Die größte Probe (AM-2) hat Kantenlängen von etwa $12 \times 7 \times 3$ Zentimeter. Die mittleren V-Winkel der drei Shatter-Cone-Proben (AM-1 bis AM-3) aus dem Suevit des Steinbruchs Aumühle liegen bei 23° – 24° , der Gesamtdurchschnitt beträgt 23° bei 32 gemessenen Winkeln. Zum anderen handelt es sich um drei Oberjura-Strahlenkalke aus der Bunten Brekzie, die im selben Steinbruch unmittelbar im Liegenden des Suevit-Horizontes aufgeschlossen war. Diese eindeutigen Strahlenkalke aus dem Ries (PÖSGES 2016: Abb. 1) sind ähnlich gut erhalten wie Strahlenkalk-Proben aus dem Steinheimer Becken und haben Kantenlängen von etwa 3–8 Zentimeter. Sie zeigen feine Shatter-Cone-Lineationen jeweils auf einer Gesteinsbruchfläche. Die mittleren V-Winkel der drei Shatter-Cone-Proben (AM-4 bis AM-6) aus der Bunten Brekzie des Steinbruchs Aumühle liegen bei 18° – 19° , der Gesamtdurchschnitt beträgt 18° bei 41 gemessenen Winkeln. Somit weisen die drei Strahlenkalke aus der Bunten Brekzie deutlich geringere mittlere V-Winkel auf als die Shatter-Cone-Proben aus Kristallingesteinen (Kersantit und Granit) des Nördlinger Rieses.

Materialverbleib: Coll. P. BOCKSTALLER (Schopfheim), Coll. V. J. SACH (Sigmaringen) und Zentrum für Rieskrater- und Impaktforschung Nördlingen (ZERIN).

3.2 Proben aus dem Steinheimer Becken

Aus dem Steinheimer Becken wurden im Rahmen vorliegender Arbeit insgesamt 28 Proben von zwei Shatter-Cone-Fundorten (Zentralhügel-Komplex und Flur »Hohe Beet«) bearbeitet.

Tabelle 2. Shatter-Cone-Proben aus dem Steinheimer Becken. Sh.-C. = Shatter-Cones; Opalinuston-Knolle (Opalinuston-Formation), Eisensandstein (Eisensandstein-Formation), Angulatensandstein (Angulatensandstein-Formation).

Probe	Fundort	Gesteinsmaterial	Erhaltung Sh.-C.	Anzahl Sh.-C.	V-Winkel: Ø (min./max.)
SH-1	Zentralhügel	Opalinuston-Knolle	fein (3 Flächen)	27	32° (21° – 47°)
SH-2	Zentralhügel	Opalinuston-Knolle	fein (1 Fläche)	6	32° (25° – 45°)
SH-3	Zentralhügel	Opalinuston-Knolle	grob (1 Fläche)	7	31° (22° – 42°)

Tafel 1

Shatter-Cone-Fundobjekte aus dem Nördlinger Ries

- Fig. 1.** Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe AM-4, Maße: $4,2 \times 2,7$ Zentimeter (B×H), Coll. BOCKSTALLER 2009, Fundobjekt aus der Bunten Brekzie, Steinbruch Aumühle.
- Fig. 2.** Granitbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe AM-2, Maße: $4,5 \times 6,0$ Zentimeter (B×H), Coll. BOCKSTALLER 2008, Fundobjekt aus Suevit-Horizont, Steinbruch Aumühle.
- Fig. 3.** Granitbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe AM-3, Maße: $4,2 \times 4,6$ Zentimeter (B×H), Coll. BOCKSTALLER 2008, Fundobjekt aus Suevit-Horizont, Steinbruch Aumühle.
- Fig. 4.** Kersantitbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe WH-1, Maße: $10,5 \times 6,5$ Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Hornblende-Fleckenkersantit-Gang, Steinbruch Wengenhausen.
- Fig. 5.** Kersantitbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe WH-8, Maße: $3,8 \times 6,5$ Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Hornblende-Fleckenkersantit-Gang, Steinbruch Wengenhausen.
- Fig. 6.** Kersantitbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe WH-6, Maße: $4,5 \times 7,5$ Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Hornblende-Fleckenkersantit-Gang, Steinbruch Wengenhausen.
- Fig. 7.** Kersantitbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe WH-2, Maße: $9,0 \times 16,5$ Zentimeter (B×H), Coll. BOCKSTALLER 2016, Hornblende-Fleckenkersantit-Gang, Steinbruch Wengenhausen.
- Fig. 8.** Kersantitbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe WH-7, Maße: $7,0 \times 5,0$ Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Hornblende-Fleckenkersantit-Gang, Steinbruch Wengenhausen.

B = Breite (maximal); H = Höhe (maximal).



SH-4	Zentralhügel	Opalinuston-Knolle	grob (1 Fläche)	7	31° (20°–38°)
SH-5	Zentralhügel	Opalinuston-Knolle	grob (1 Fläche)	3	24° (23°–24°)
SH-6	Zentralhügel	Opalinuston-Knolle	grob (1 Fläche)	8	32° (25°–36°)
SH-7	Zentralhügel	Opalinuston-Knolle	grob (1 Fläche)	3	31° (21°–39°)
SH-8	Zentralhügel	Opalinuston-Knolle	grob (1 Fläche)	3	31° (28°–33°)
SH-9	Zentralhügel	Opalinuston-Knolle	grob (1 Fläche)	2	32° (30°–33°)
SH-10	Zentralhügel	Opalinuston-Knolle	grob (1 Fläche)	2	31° (29°–32°)
SH-11	Zentralhügel	Eisensandstein	grob (1 Fläche)	8	31° (20°–42°)
SH-12	Zentralhügel	Eisensandstein	grob (1 Fläche)	1	34° (34°)
SH-13	Zentralhügel	Angulatensandstein	grob (2 Flächen)	6	15° (12°–16°)
HB-1	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein/grob (2 Flächen)	35	22° (15°–33°)
HB-2	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein/grob (2 Flächen)	76	22° (15°–32°)
HB-3	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein/grob (2 Flächen)	64	20° (14°–31°)
HB-4	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein/grob (2 Flächen)	55	21° (15°–29°)
HB-5	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein/grob (2 Flächen)	59	21° (13°–30°)
HB-6	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	grob (1 Fläche)	37	21° (15°–28°)
HB-7	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein (1 Fläche)	30	21° (15°–30°)
HB-8	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein (1 Fläche)	32	22° (14°–30°)
HB-9	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein (1 Fläche)	60	21° (14°–29°)
HB-10	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	grob (2 Flächen)	18	18° (12°–26°)
HB-11	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein/grob (3 Flächen)	92	20° (13°–28°)
HB-12	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein (2 Flächen)	65	19° (13°–30°)
HB-13	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	grob (2 Flächen)	52	20° (13°–29°)
HB-14	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein/grob (2 Flächen)	64	19° (15°–29°)
HB-15	Hohe Beet	Oberjura-Kalk	fein/grob (3 Flächen)	75	20° (12°–27°)

Vom Zentralhügel des Steinheimer Beckens stammen folgende 13 Shatter-Cone-Proben, die – meist anhand fotografischer Abbildungen aus der Literatur – zur Bestimmung der mittleren V-Winkel vermessen wurden:

Tafel 2

Shatter-Cone-Fundobjekte aus dem Steinheimer Becken

- Fig. 1.** Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe HB-11, Maße: 5,3 × 5,7 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Lesefund im Bereich der Flur »Hohe Beet« bei Sontheim.
- Fig. 2.** Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe HB-7, Maße: 3,8 × 3,2 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Lesefund im Bereich der Flur »Hohe Beet« bei Sontheim.
- Fig. 3.** Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe HB-4, Maße: 4,1 × 3,2 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Lesefund im Bereich der Flur »Hohe Beet« bei Sontheim.
- Fig. 4.** Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe HB-3, Maße: 4,8 × 4,0 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Lesefund im Bereich der Flur »Hohe Beet« bei Sontheim.
- Fig. 5.** Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe HB-15, Maße: 8,3 × 4,6 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Lesefund im Bereich der Flur »Hohe Beet« bei Sontheim.
- Fig. 6.** Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe HB-5, Maße: 3,4 × 4,2 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Lesefund im Bereich der Flur »Hohe Beet« bei Sontheim.
- Fig. 7.** Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones mit Lineationen in gegenläufiger Richtung), Maße: 14 × 18 Zentimeter (B×H), Coll. BAIER 2000, Lesefund vom südlichen Abhang des Galgenbergs.
- Fig. 8.** Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe HB-12, Maße: 3,7 × 6,0 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Lesefund im Bereich der Flur »Hohe Beet« bei Sontheim.
- Fig. 9.** Opalinuston-Konkretion mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe SH-1, Maße: 3,6 × 2,7 Zentimeter (B×H), Coll. BOCKSTALLER 2015, Opalinuston-Formation, Zentralhügel des Steinheimer Becken (temporärer Aufschluss).
- Fig. 10.** Angulatensandstein mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe SH-13, Maße: etwa 5,0 × 6,0 Zentimeter (B×H), Angulatensandstein-Formation, Coll. Meteorkrater-Museum Sontheim 1970, Zentralhügel des Steinheimer Becken (Kernprobe der Bohrung 23 aus 589 Meter Teufe).

B = Breite (maximal); H = Höhe (maximal).



1. Shatter-Cones in konkretionären Opalinuston-Knollen mit karbonatischem und/oder sideritischem Bindemittel aus dem Mittleren Jura (Opalinuston-Formation). Ein Einzelfund (SH-1) von Herrn P. BOCKSTALLER, der uns freundlicherweise Bildmaterial seines Fundobjekts mit Strahlenkegeln auf drei Gesteinsbruchflächen zur Verfügung stellte, sowie neun Fundobjekte (SH-2 bis SH-10) aus der Literatur (SCHMIEDER & BUCHNER 2013: Abb. 6) mit jeweils nur einer Shatter-Cone-Fläche. Die mittleren V-Winkel dieser Proben liegen nach den Vermessungen der Autoren bei 24° (Wert mit Vorbehalt: sehr grobe Shatter-Cone-Lineationen) und 31°–32°, der Gesamtdurchschnitt beträgt 31° bei 68 gemessenen Winkeln.

Materialverbleib: Coll. P. BOCKSTALLER (Schopfheim) und Coll. E. BUCHNER (Hochschule Neu-Ulm).

2. Shatter-Cones in Sandstein aus der mitteljurassischen Eisensandstein-Formation. Zwei Fundobjekte (SH-11, SH-12) aus der Literatur (SCHMIEDER & BUCHNER 2013: Abb. 4) zeigen sehr grobe Strahlenkegel jeweils auf einer Gesteinsbruchfläche. Die mittleren V-Winkel dieser beiden Proben liegen nach den Vermessungen der Autoren bei 31°–34°, der Gesamtdurchschnitt beträgt 32° bei 9 gemessenen Winkeln.

Materialverbleib: Zentrum für Rieskrater- und Impaktforschung Nördlingen (ZERIN).

3. Shatter-Cones in Sandstein aus der unterjurassischen Angulatensandstein-Formation. Ein Fundobjekt (SH-13), das bei der Bohrung Nr. 23 im Jahre 1970 in einer Teufe von 589 Meter angetroffen wurde. Das betreffende Bohrkernstück zeigt grobe Shatter-Cone-Strukturen auf zwei nahezu senkrecht zueinander orientierten Bruchflächen. Der mittlere V-Winkel dieser Probe liegt nach den Vermessungen der Autoren bei etwa 15° bei 6 gemessenen Winkeln, allerdings mit gewissem Vorbehalt, da nur sehr grobe Shatter-Cone-Lineationen gemessen werden konnten.

Materialverbleib: Meteorkrater-Museum in Sontheim.

Weitere 15 Shatter-Cone-Proben (Oberjura-Strahlenkalke) stammen nahe vom südlichen Kraterand des Steinheimer Beckens. Diese Strahlenkalk-Proben (HB-1 bis HB-15) dienen insbesondere als Vergleichsobjekte zu den aus dem Brockhorizont der Oberen Süßwassermolasse Südwestdeutschlands und der Ostschweiz stammenden Proben (weit ausgeworfene, distal vom Ries-Kraterzentrum gefundene Strahlenkalke). Die Strahlenkalk-Proben aus dem Steinheimer Becken haben unterschiedliche Erhaltungszustände, vor allem wegen unterschiedlich starker Kalklösungsprozesse im Bodenhorizont. Daher zeigen sie unterschiedlich deutliche, sehr fein bis grob ausgebildete Strahlenkegel auf bis zu drei Gesteinsbruchflächen. Die mittleren V-Winkel der 15 Proben liegen bei 18°–22°, der Gesamtdurchschnitt beträgt 20° bei 814 gemessenen Winkeln.

Materialverbleib: Coll. J. BAIER (Tübingen) und Coll. V. J. SACH (Sigmaringen).

Tafel 3

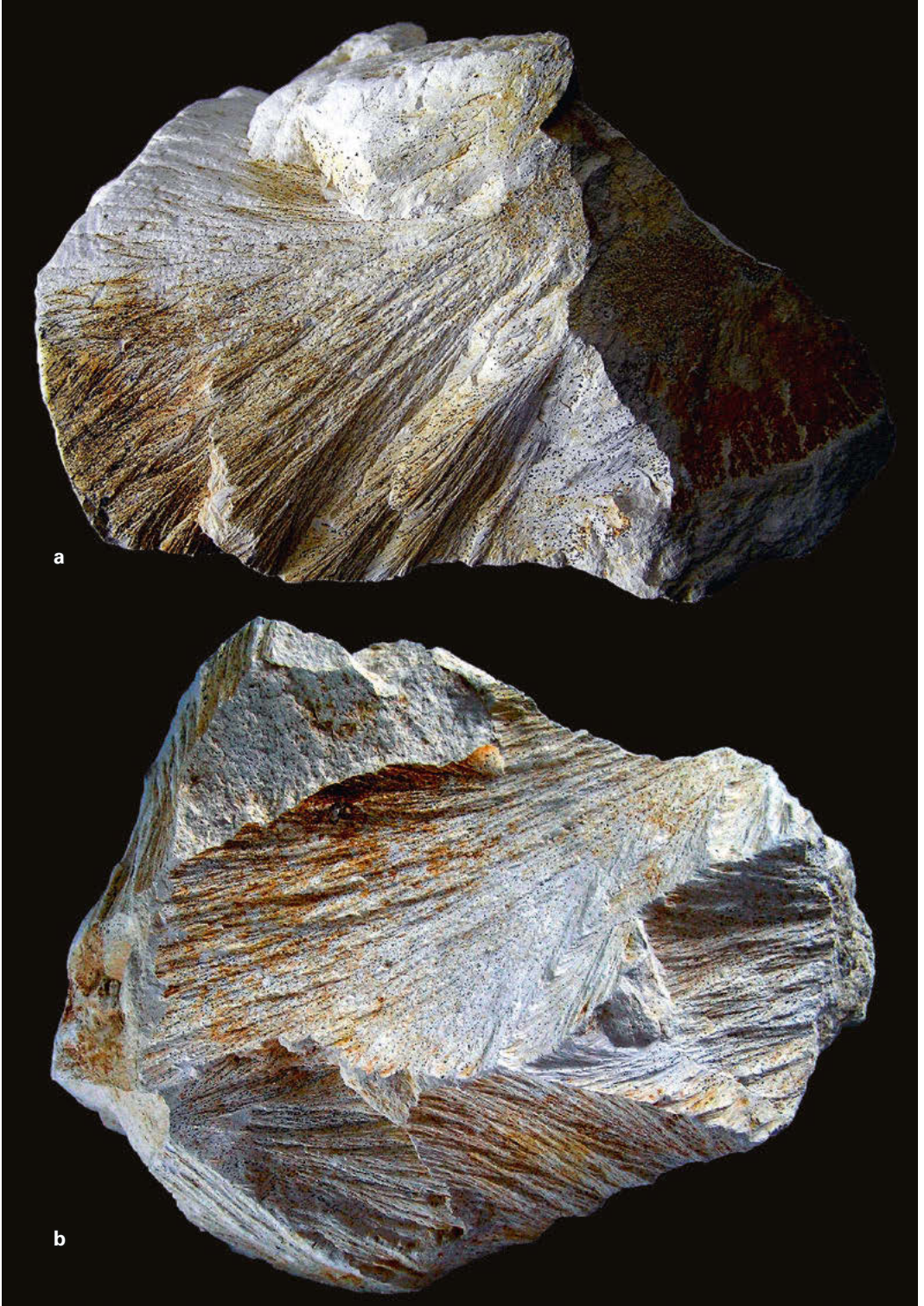
Shatter-Cone-Fundobjekt aus dem Steinheimer Becken

Fig. a. Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), konvexe Positivseite, Maße: 22 × 17 Zentimeter (B×H), Coll. BAIER 2000, Lesefund vom südlichen Abhang des Galgenbergs.

Fig. b. Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), konkave Negativseiten, Maße: 22 × 17 Zentimeter (B×H), Coll. BAIER 2000, Lesefund vom südlichen Abhang des Galgenbergs.

B = Breite (maximal); H = Höhe (maximal).





3.3 Proben aus dem Biberacher und Ravensburger Brockhorizont

Die Menge der aus dem Biberacher und Ravensburger Brockhorizont entnommenen ortsfremden Gesteinsbrocken (Ejekta) ist zwar recht groß (insgesamt wurde bisher etwa 130 Kilogramm Gesteinsmaterial bzw. etwa 3300 Einzelobjekte gesammelt), nach Reinigung und Untersuchung der Oberflächen dieser Fundobjekte kamen jedoch lediglich acht eindeutige Strahlenkalk bzw. Gesteine mit Shatter-Cone-Strukturen zum Vorschein. Diese Shatter-Cone-Proben (Biberacher Brockhorizont: BC-1 und BC-2, Ravensburger Brockhorizont: RV-1 bis RV-6) konnten von einem der beiden Autoren (V.J.S.) im Zeitraum von 1996 bis 2014 gefunden werden.

Die Ausbildung bzw. der Erhaltungszustand der Shatter-Cone-Strukturen ist bei fünf (BC-1, RV-2, RV-3, RV-5, RV-6) der acht Fundobjekte eher grob, mit meist unvollständigen und wohl durch fluviatilen Transport zugerundeten Strahlenkegel. Nur bei Streiflicht zeigen sich deutliche, spitzwinklig zusammenlaufende Lineationen. Die anderen drei Fundobjekte (BC-2, RV-1, RV-4) hingegen zeigen zumindest teilweise recht gut erhaltene Shatter-Cone-Strukturen mit sehr feinen Lineationen. Strahlenkalk RV-A aus dem Ravensburger Brockhorizont zeigt die weitaus beste Struktur bei größter Fläche. Sein Erhaltungszustand ist dem von gut erhaltenen Strahlenkalken aus dem Steinheimer Becken sehr ähnlich. An fünf Fundobjekten (BC-2, RV-2, RV-3, RV-5, RV-6) können zwei oder mehrere winklig aufeinander stoßende Gesteinsflächen mit Shatter-Cone-Strukturen beobachtet werden. Außerdem sind an zwei Oberjura-Kalkstücken jeweils sogar eine konvexe Positivseite und eine – gegenüberliegende – konkave Negativseite der Strahlenkegel erkennbar. Zwei Fundobjekte (RV-5, RV-6) aus dem Ravensburger Brockhorizont bestehen nicht aus dem typischen Oberjura-Kalkgestein mit heller Verwitterungsrinde, sondern stellen materialmäßig seltenere Brockhorizont-Komponenten dar. Hierbei handelt es sich einerseits um einen rötlich gefärbten, knolligen Mergelstein mit Shatter-Cone-Strukturen auf zwei nahezu senkrecht aufeinanderstoßenden Gesteinsflächen (Probe RV-6). Und andererseits um ein relativ dunkles, im bergfrischen Zustand graubraun gefärbtes Kalkgestein mit zahlreichen Molluskenresten. Das zuletzt genannte Fundobjekt (RV-5) zeigt grobe Shatter-Cone-Strukturen auf allen vier Gesteinshauptflächen, die jeweils durch scharfe Grate miteinander verbunden sind. Aufgrund der nahezu symmetrischen, im Profil rautenförmigen Anordnung der Gesteinsflächen, -grate und Oberflächenstriemung handelt es sich zweifellos um einen Strahlenkalk mit sich gegenüber stehenden Kegelspitzen (»Doppelkegel«), also um eine besondere Shatter-Cone-Ausbildung, wie sie beispielsweise auch aus dem Steinheimer Becken bekannt ist (vgl. HEIZMANN & REIFF 2002: Abb. 68).

Als wesentliches Ergebnis der V-Winkel-Bestimmungen kann festgestellt werden, dass die beiden Fundobjekte aus dem Biberacher Brockhorizont signifikant geringere mittlere V-Winkel (23° – 25° ,

Tafel 4



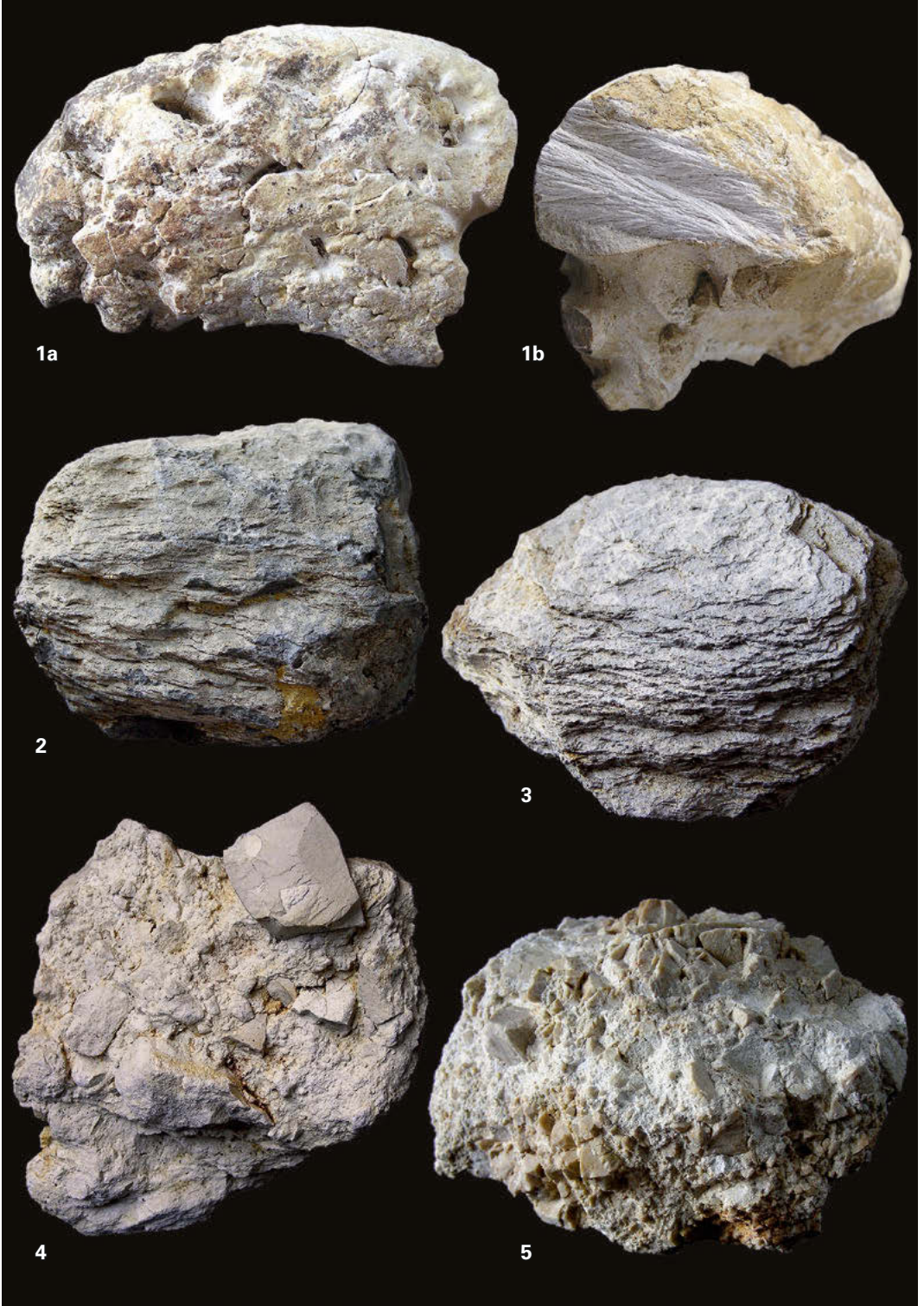
Gesteinsobjekte aus dem Steinheimer Becken

- Fig. 1a.** Fossilrest eines oberjurassischen Ammoniten, Steinkern aus Oberjurakalk, Maße: 8 × 5 Zentimeter (B×H), Coll. BAIER 2016, Lesefund im Bereich der Flur »Hohe Beet« bei Sontheim.
- Fig. 1b.** Querbruchfläche des Ammoniten-Steinkerns mit Shatter-Cone-Strukturen, Maße: 5 × 5 Zentimeter (H×T).
- Fig. 2.** Oberjura-Kalkmergelbrocken mit subparallelen Schockbrüchen, Maße: 9 × 8 Zentimeter (B×H), Coll. BAIER 2016, Lesefund im Bereich der Flur »Hohe Beet« bei Sontheim.
- Fig. 3.** Oberjura-Kalkmergelbrocken mit subparallelen Schockbrüchen, Maße: 10 × 8 Zentimeter (B×H), Coll. BAIER 2016, Lesefund im Bereich der Flur »Hohe Beet« bei Sontheim.
- Fig. 4.** Impaktbedingte Brekzie aus zertrümmertem und wieder verbackenem Massenkalk des Oberen Jura, Maße: 10 × 9 Zentimeter (B×H), Coll. BAIER 2009, Aufschluss am nördlichen Abhang des Burgstalls bei Sontheim.

Gesteinsobjekt aus dem Nördlinger Ries

- Fig. 5.** Impaktbedingter Massenkalk-Gries (mit Übergang von »dichter Zerklüftung« zu »Mörteltextur«), Maße: 13 × 10 Zentimeter (B×H), Coll. BAIER 2001, Aufschluss im Bereich der Anhöhe zwischen Iggenhausen und Katzenstein.

B = Breite (maximal); H = Höhe (maximal); T = Tiefe (maximal).



Gesamtdurchschnitt: 24° bei 41 gemessenen Winkeln) aufweisen als die sechs Fundobjekte aus dem Ravensburger Brockhorizont mit nahezu konstanten mittleren V-Winkeln von 28° bzw. 29° (Gesamtdurchschnitt: 28° bei 65 gemessenen Winkeln).

Sämtliche Shatter-Cones aus dem Biberacher und Ravensburger Brockhorizont zeigen an ihren Gesteinsoberflächen anhaftendes Feinsediment (vor allem Quarz-Körnchen und Muskovit-Schüppchen) der Oberen Süßwassermolasse. Es sind dies Reste des Brockhorizont-Sediments, in dem die betreffenden Fundobjekte über Millionen von Jahren eingelagert waren.

Materialverbleib: Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart (SMNS).

3.4 Probe aus dem Ziemetshausener Brockhorizont

An den frischen Gesteinsbruchflächen des bereits in Kapitel 2.4 beschriebenen Ziemetshausener Strahlenkalk-Objektes (Probe ZH-1) konnte ein mittlerer V-Winkel von 20° bei 22 gemessenen Winkeln bestimmt werden.

Materialverbleib: Coll. P. BOCKSTALLER, Schopfheim.

3.5 Proben aus dem Bernhardzeller Blockhorizont

Von Strahlenkalken bzw. strahlenkalkähnlichen Gesteinsbrocken aus einem »Malmkalk-Blockhorizont« (= Brockhorizont) der Oberen Süßwassermolasse bei Bernhardzell in der Ostschweiz berichtet, wie in Kapitel 2.5 bereits erwähnt, FRANZ HOFMANN (1973: 87–88, 1978: 20–22). Ein direkter Bezug zum Ries-Impakt wird angenommen, wobei die betreffenden Fundstücke als Fern-Ejekta (»Langstreckengeschosse«) mit einer Flugweite von etwa 180 Kilometer gedeutet werden. Viele Jahre später publiziert BEDA A. HOFMANN (2008), Sohn des oben genannten Autors (F.H.), eine Abhandlung über die sechs bis dahin bekannten Shatter-Cones aus dem Impakthorizont bei Bernhardzell. Die mittleren V-Winkel dieser Proben (BZ-1 bis BZ-6) liegen nach den Vermessungen der Autoren (anhand der Abbildungen 1–6 von HOFMANN 2008) bei 31°–34°, der Gesamtdurchschnitt beträgt 32° bei 81 gemessenen Winkeln. Die Shatter-Cones von Bernhardzell (Ostschweiz) weisen somit deutlich größere mittlere V-Winkel auf, als die entsprechenden Molasse-Fundobjekte aus Baden-Württemberg und Bayern. Fünf der Proben (BZ-1, BZ-3 bis BZ-6) aus dem Bernhardzeller Blockhorizont zeigen recht grobe Shatter-Cones nur auf einer Gesteinsfläche. Die Probe BZ-2 stellt dagegen einen sehr gut erhaltener Strahlenkalk dar mit feinen Shatter-Cone-Lineationen auf zwei annähernd parallel verlaufenden Bruchflächen.

Materialverbleib: Naturhistorisches Museum der Burgergemeinde Bern (NMBE).

Tafel 5



Strahlenkalk (Shatter-Cone-Fundobjekt) aus dem Ziemetshausener Brockhorizont

- Fig. a.** Oberjura-Kalkbrocken (stark zugerundet und in 2 Teile zerbrochen), Probe ZH-1, Maße: 8,8 × 7,5 × 6,3 Zentimeter (B×H×T), Gewicht: 413 Gramm, Coll. BOCKSTALLER 2005, ehemalige Sandgrube bei Ziemetshausen, Brockhorizont bei etwa 510 m ü. NN.
- Fig. b.** Bruchfläche des Oberjura-Kalkbrockens mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe ZH-1, Maße: 6,3 × 7,5 Zentimeter (B×H).
- Fig. c.** Konkave Negativseite der Strahlenkegel (Shatter-Cones), Probe ZH-1, Bildausschnitt: 2,5 × 3,5 Zentimeter (B×H).
- Fig. d.** Konvexe Positivseite der Strahlenkegel (Shatter-Cones), Probe ZH-1, Bildausschnitt: 2,5 × 3,5 Zentimeter (B×H).

B = Breite (maximal); H = Höhe (maximal); T = Tiefe (maximal).



Tabelle 3. Shatter-Cone-Proben aus dem Impakthorizont (Brockhorizont bzw. Blockhorizont) der Oberen Süßwassermolasse in Südwestdeutschland und in der Ostschweiz. Sh.-C. = Shatter-Cones; Gesteinsmaterial: Ries-Ejekta aus dem OSM-Brockhorizont

Probe	Fundort	Gesteinsmaterial	Erhaltung Sh.-C.	Anzahl Sh.-C.	V-Winkel: Ø (min./max.)
ZH-1	Ziemetshausen	Oberjura-Kalk	fein (1 Fläche)	22	20° (16°–28°)
BC-1	Biberach/Riß	Oberjura-Kalk	grob (1 Fläche)	14	25° (18°–31°)
BC-2	Biberach/Riß	Oberjura-Kalk	fein (2 Flächen)	27	23° (18°–28°)
RV-1	Ravensburg	Oberjura-Kalk	fein (1 Fläche)	18	28° (24°–30°)
RV-2	Ravensburg	Oberjura-Kalk	grob (2 Flächen)	10	29° (22°–33°)
RV-3	Ravensburg	Oberjura-Kalk	grob (2 Flächen)	16	28° (22°–35°)
RV-4	Ravensburg	Oberjura-Kalk	fein (1 Fläche)	8	28° (25°–35°)
RV-5	Ravensburg	Jura-Kalk	grob (4 Flächen)	6	28° (26°–30°)
RV-6	Ravensburg	Mergelstein	grob (2 Flächen)	7	28° (24°–32°)
BZ-1	Bernhardzell	Oberjura-Kalk	grob (1 Fläche)	2	33° (32°–33°)
BZ-2	Bernhardzell	Oberjura-Kalk	fein (2 Flächen)	30	34° (25°–41°)
BZ-3	Bernhardzell	Oberjura-Kalk	grob (1 Fläche)	13	32° (24°–40°)
BZ-4	Bernhardzell	Oberjura-Kalk	grob (1 Fläche)	6	31° (29°–32°)
BZ-5	Bernhardzell	Oberjura-Kalk	grob (1 Fläche)	14	32° (25°–42°)
BZ-6	Bernhardzell	Oberjura-Kalk	grob (1 Fläche)	16	33° (25°–38°)

4. Diskussion

4.1 Mittlere V-Winkel der Shatter-Cone-Proben

Anhand der Shatter-Cone-Proben aus der Oberen Süßwassermolasse (Ries-Fernejekta), kann festgestellt werden, dass hierbei der Ziemetshausener Strahlenkalk (ZH-1) den kleinsten mittleren V-Winkel (20°) aufweist und die beiden Fundobjekte (BC-1, BC-2) aus dem Biberacher Brockhorizont signifikant geringere mittlere V-Winkel (23°–25°) aufweisen als die 6 Fundobjekte (RV-1 bis RV-6) aus dem Ravensburger Brockhorizont mit nahezu konstanten mittleren V-Winkeln von 28° bzw. 29°. Beim Vergleich mit den V-Winkeln der Shatter-Cones von Bernhardzell (Ostschweiz) zeigt sich, dass diese Proben (BZ-1 bis BZ-6) mit Abstand die größten mittleren V-Winkel (31°–34°) aufweisen. Deutlich zeichnet sich hier also eine Abhängigkeit bzw. Zunahme der Größe der mittleren V-Winkel mit zunehmender Distanz der Shatter-Cone-Fundorte vom Kraterzentrum des

Tafel 6

Strahlenkalke (Shatter-Cone-Fundobjekte) aus dem Biberacher Brockhorizont

Fig. 1. Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe BC-2 (bzw. SMNS: MIN36501), Maße: 4,3 × 3,0 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2008, Wannenwaldtobel 1, Brockhorizont bei 603,5 m ü. NN.

Fig. 2. Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe BC-1 (bzw. SMNS: MIN36500), Maße: 4,9 × 3,6 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 1996, Tobel Oelhalde-Süd, Brockhorizont bei 605,3 m ü. NN.

Strahlenkalke (Shatter-Cone-Fundobjekte) aus dem Ravensburger Brockhorizont

Fig. 3. Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe RV-1 (bzw. SMNS: MIN36502), Maße: 8,0 × 6,0 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2011, Kleintobel 2, Brockhorizont bei etwa 449,3 m ü. NN.

Fig. 4. Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe RV-4 (bzw. SMNS: MIN36506), Maße: 6,0 × 4,5 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2014 Kleintobel 2, Brockhorizont bei ca. 449,3 m ü. NN.

Fig. 5. Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe RV-2 (bzw. SMNS: MIN36503), Maße: 6,0 × 4,0 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2012, Kleintobel 2, Brockhorizont bei ca. 449,3 m ü. NN.

Fig. 6. Oberjura-Kalkbrocken mit Strahlenkegeln (Shatter-Cones), Probe RV-3 (bzw. SMNS: MIN36504), Maße: 5,0 × 3,0 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2012, Kleintobel 2, Brockhorizont bei ca. 449,3 m ü. NN.

B = Breite (maximal); H = Höhe (maximal); SMNS = Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart.



Nördlinger Rieses ab. Da das Gestein dieser Molasse-Fundobjekte fast ausschließlich aus homogenen, mikritischen Oberjura-Kalken besteht, ist ein weiterer Vergleich mit den materialmäßig entsprechen Oberjura-Strahlenkalken aus den Impaktkratern Nördlinger Ries und Steinheimer Becken von besonderer Bedeutung. So zeigt sich einerseits, dass die 3 Strahlenkalke (AM-1 bis AM-3) aus dem Ries noch deutlich geringere mittlere V-Winkel (18° – 19°) haben als sämtliche Proben aus dem Molassebecken. Und andererseits, dass die 15 Vergleichsproben (HB-1 bis HB-15) aus dem Steinheimer Becken mit mittleren V-Winkeln von 18° – 22° ähnliche Werte haben wie die Ziemetshausener Probe (ZH-1) aus der Molasse und die 3 untersuchten Strahlenkalke (AM-1 bis AM-3) aus dem Nördlinger Ries, wenngleich die drei zuletzt genannten Proben durchschnittlich gesehen deutlich kleinere mittlere V-Winkel (Gesamtdurchschnitt bei 18°) aufweisen als die entsprechenden Proben (Gesamtdurchschnitt bei 20°) aus dem Steinheimer Becken. Die von HOFMANN & GNOS (2006) an 6 Strahlenkalken vom Zentralhügel des Steinheimer Beckens gemessenen mittleren V-Winkel (12° – 25°) haben dagegen einen etwas größeren Streubereich als unsere Proben HB-1 bis HB-15 und liegen mit einem gesamtdurchschnittlichen V-Winkel von 17° bei 93 gemessenen Winkeln größtmäßig sogar noch etwas unterhalb der 3 Strahlenkalk-Proben (AM-1 bis AM-3) aus dem Nördlinger Ries. Ob die leicht abweichenden Ergebnisse der beiden Messreihen an Strahlenkalken aus dem Steinheimer Becken durch unterschiedliche Fundorte im Steinheimer Becken (vorliegende Arbeit: Proben vom südlichen Kraterand, HOFMANN & GNOS 2006: Proben vom Zentralhügel), unterschiedliche Vermessungstechniken oder durch die unterschiedliche Anzahl vermessener Proben bedingt ist, bleibt ungewiss.

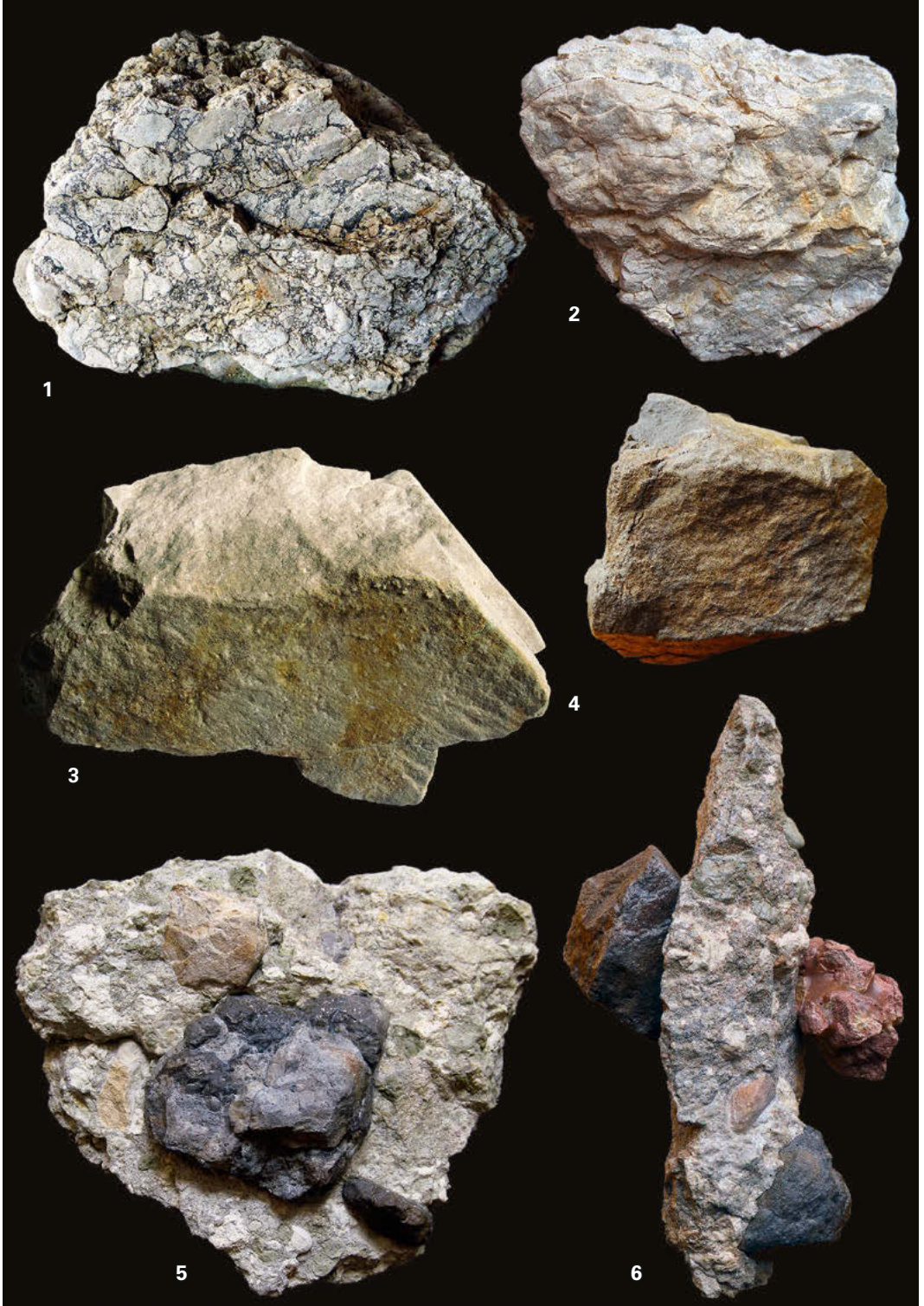
Vergleicht man schließlich noch die mittleren V-Winkel der Shatter-Cones in Gesteinen, die nicht aus dem Oberen Jura stammen bzw. keine Oberjurakalke sind, so zeigen sich für die beiden Impaktkrater folgende Tendenzen. Die insgesamt 19 Shatter-Cone-Proben aus zwei unterschiedlichen Kristallingesteinen (Hornblende-Fleckenkersantit, WH-1 bis WH-16, und Granit, AM-1 bis AM-3) des Nördlinger Rieses haben nahezu identische mittlere V-Winkel von 22° – 24° , wobei ihre Gesamtdurchschnitte eng beieinander liegen bei 22° (Hornblende-Fleckenkersantit) und 23° (Granit). Sie weisen also etwas höhere mittlere V-Winkel auf als die 3 Strahlenkalk-Proben (AM-1 bis AM-3) aus dem Nördlinger Ries. Als wesentliche Ursache hierfür dürfte die gröbere Beschaffenheit der beiden Kristallingesteine gegenüber den sehr feinkörnigen, mikritischen Oberjura-Kalkgesteinen verantwortlich sein. Die 10 Shatter-Cone-Proben (SH-1 bis SH-10) aus dem mitteljurassischen Opalinuston (Opalinuston-Formation) vom Zentralhügel des Steinheimer

Tafel 7

Ries-Fernejekta: Gesteine des Oberen, Mittleren und Unteren Jura aus dem Biberacher und Ravensburger Brockhorizont

- Fig. 1.** Größter bisher aufgefundener Gesteinsbrocken (Oberjura-Kalkgestein) aus dem Biberacher Brockhorizont, Maße: $31 \times 21 \times 20$ Zentimeter (B×H×T), Gewicht: 14,5 Kilogramm, Coll. SCHRECK & SACH 2016, Tobel Oelhalde-Nord 1, Brockhorizont bei etwa 608 m ü. NN.
- Fig. 2.** Oberjura-Kalkbrocken aus dem Biberacher Brockhorizont, Maße: $20 \times 18 \times 15$ Zentimeter (B×H×T), Gewicht: 5,4 Kilogramm, Coll. SACH 1996, Wannenwaldtobel 1, Brockhorizont bei 603,5 m ü. NN.
- Fig. 3.** Größter bisher aufgefundener Gesteinsbrocken (Oberjura-Kalkgestein) aus dem Ravensburger Brockhorizont, Maße: $29 \times 14 \times 13$ Zentimeter (B×H×T), Gewicht: 7,4 Kilogramm, Coll. SACH 2014, Kleintobel 2, Brockhorizont bei etwa 449,3 m ü. NN.
- Fig. 4.** Mitteljura-Gesteinsbrocken (Kalksandstein) aus dem Ravensburger Brockhorizont, Maße: 9×7 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Kleintobel 2, Brockhorizont bei etwa 449,3 m ü. NN.
- Fig. 5.** Verfestigtes Sedimentstück des Ravensburger Brockhorizontes mit kantigen, dunkel gefärbten Gesteinskomponenten aus dem Unteren Jura (»Lias-Auswürflinge«), Maße (Sedimentstück): etwa 16×13 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2012, Kleintobel 2, Brockhorizont bei etwa 449,3 m ü. NN.
- Fig. 6.** Verfestigtes Sedimentstück des Ravensburger Brockhorizontes mit Gesteinskomponenten aus dem Unteren, Mittleren und Oberen Jura (»Lias-, Dogger- und Malm-Auswürflinge«), Maße (Sedimentstück): etwa 7×14 Zentimeter (B×H), Coll. SACH 2016, Kleintobel 2, Brockhorizont bei etwa 449,3 m ü. NN.

B = Breite (maximal); H = Höhe (maximal); T = Tiefe (maximal).



Becken haben mittlere V-Winkel von 24° und 31° – 32° (Gesamtdurchschnitt bei 31°) und weisen somit durchschnittlich deutlich höhere V-Winkel-Werte auf gegenüber den Proben (Shatter-Cones in Kristallin- und Kalkgesteinen) aus dem Nördlinger Ries. Erwähnenswert hierzu sind außerdem noch die beiden Shatter-Cone-Proben (SH-11, SH-12) aus dem mittelljurassischen Eisensandstein (Eisensandstein-Formation) sowie die Bohrprobe mit Shatter-Cones (SH-13) aus dem feinkörnigeren unterjurassischen Angulatensandstein (Angulatensandstein-Formation) vom Zentralhügel des Steinheimer Becken. Alle drei Proben zeigen nur sehr grobe Shatter-Cone-Lineationen. Ihre mittleren V-Winkel liegen bei 31° – 34° (Eisensandstein) und 15° (Angulatensandstein), die aber aufgrund der sehr grob ausgebildeten Lineationen nur unter gewissem Vorbehalt mit in die V-Winkel-Vergleiche einbezogen wurden.

Die oben diskutierten Werte bezüglich der Größe des durchschnittlichen V-Winkels an Shatter-Cone-Proben aus dem Nördlinger Ries, Steinheimer Becken sowie aus der Oberen Süßwassermolasse in Süddeutschland und der Ostschweiz lassen grundsätzlich folgende Aussagen zu:

1. Die Strahlenkalk-Proben aus dem Nördlinger Ries und dem Steinheimer Becken weisen durchschnittlich die kleinsten mittleren V-Winkel auf.
2. Die Strahlenkalke aus dem Ziemetshausener und Biberacher Brockhorizont ergaben größere mittlere V-Winkel wie die Strahlenkalk-Proben aus dem Nördlinger Ries. Die Proben aus dem Ravensburger Brockhorizont und Bernhardzeller Blockhorizont haben sehr viel größere mittlere V-Winkel wie die Strahlenkalk-Proben aus dem Nördlinger Ries und Steinheimer Becken.
3. Je weiter die Brockhorizont-Vorkommen vom Nördlinger Ries bzw. Steinheimer Becken entfernt sind, desto größer sind die mittleren V-Winkel der dort gefundenen Shatter-Cones: Ziemetshausener Brockhorizont (Ries-Distanz: ~ 66 Kilometer, mittlerer V-Winkel: 20°), Biberacher Brockhorizont (Ries-Distanz: ~ 110 Kilometer, mittlerer V-Winkel: 23° – 25°), Ravensburger Brockhorizont (Ries-Distanz: ~ 140 Kilometer, mittlerer V-Winkel: 28° – 29°) und Blockhorizont bei Bernhardzell (Ries-Distanz: ~ 180 Kilometer, mittlerer V-Winkel: 31° – 34°).

4.2 Distanzen der Shatter-Cone-Fundorte zum Ries-Impaktkrater

Für die folgenden Betrachtungen wurde die von GRAUP (1978) ermittelte Stelle rund 1 Kilometer nordnordöstlich der Kirche von Klosterzimmern als Zentrum des Ries-Kraters herangezogen und als hypothetischen Ursprungsort verwendet. Darüber hinaus wurde als zusätzliche Vereinfachung allen oberjurassischen Shatter-Cones die gleiche ursprüngliche Lage im Einschlaggebiet zugewiesen.

Die untersuchten Shatter-Cones liegen auf einem Shatter-Cone-führenden »Auswurfstrahl«, der sich vom Ries-Zentrum in südwestlicher Richtung über eine Strecke von etwa 180 Kilometer erstreckt (siehe Abb. 3). Zusätzlich wird ein Shatter-Cone-Fund aus Ziemetshausen (Bayern) mit aufgeführt, der rund 66 Kilometer südlich des Ries-Zentrums gefunden wurde. Dieser Fund ist – nach Kenntnis der Verfasser – der erste Shatter-Cone-Fund, der im bayerischen Teil des Molassebeckens (südlich der Donau) gemacht wurde. In Tabelle 3 werden die Shatter-Cones aus dem Molassebecken aufgeführt und mit den Daten aus der Literatur bekannter Funde ergänzt.

Abbildung 8 zeigt eine graphische Darstellung der Ergebnisse, in der die gemittelten V-Winkel der einzelnen Shatter-Cones mit den korrespondierenden Auswurfentfernungen aufgetragen sind. Zusätzlich wurden zwei senkrecht verlaufende, gestrichelte Linien eingefügt, welche die Ränder des Ries-Primärkraters und der heute noch erkennbaren Kraterstruktur andeuten. In dieser graphischen Darstellung lassen sich zwei Bereiche unterscheiden. Es zeigt sich, dass sich die mittleren V-Winkel der Shatter-Cones, die innerhalb des Kraterrands gefunden wurden, kaum unterscheiden. Im Falle der außerhalb des Kraterrands gefundenen Shatter-Cones lässt sich hingegen ein linearer Zusammenhang erkennen, der durch die Formel $V = 0,1133D + 12,137$ beschrieben werden kann, wobei D den Abstand (in Kilometer) zum Ries-Zentrum und V den sogenannten »V-Winkel« (in $^\circ$) der korrespondierenden Shatter-Cones bedeuten. Das ermittelte Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9565 unterstreicht die Aussage, dass es sich um einen linearen

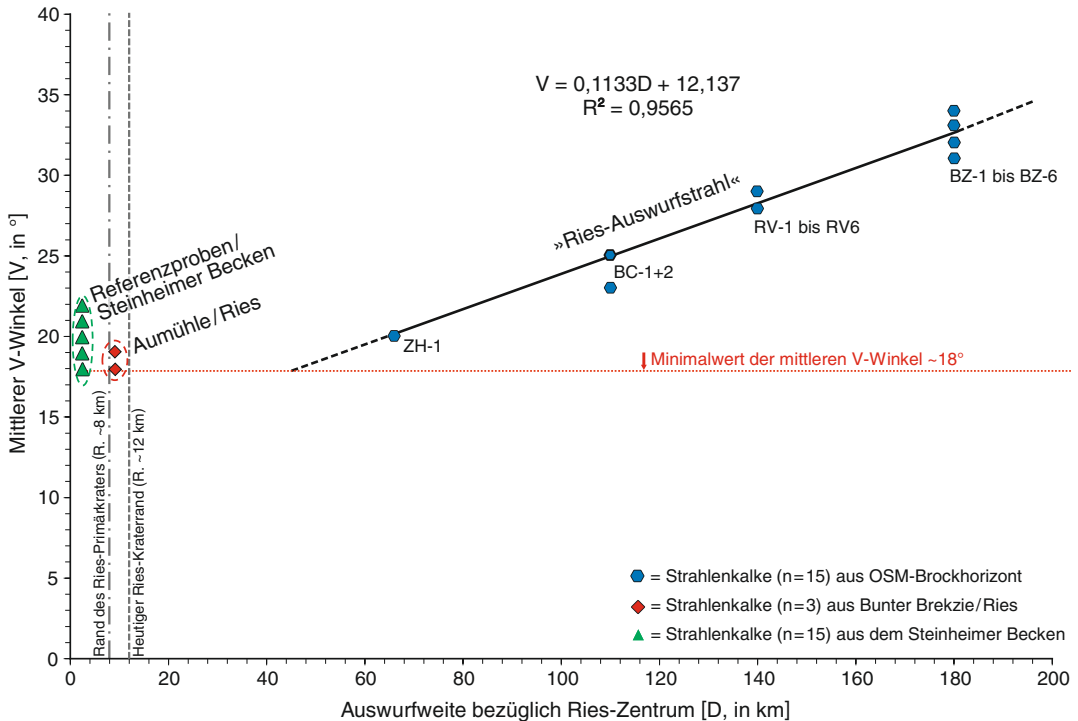


Abb. 8. Diagramm zu den Auswurfweiten und mittleren V-Winkeln von Strahlenkalken aus dem Nördlinger Ries und Steinheimer Becken. Der minimale mittlere V-Winkel der Proben liegt bei etwa 18° . Bei den ursprünglich aus dem Ries stammenden Molasse-Strahlenkalken wird ein linearer Zusammenhang (empirische Formel: $V = 0,1133D + 12,137$, Bestimmtheitsmaß: $R^2 = 0,9565$) angenommen.

Zusammenhang innerhalb des Messbereiches (bis zu 180 Kilometer Auswurfedistanz) handelt. Aufgrund dieses Zusammenhanges lässt sich (wie bereits Kapitel 4.1 aufzeigt) für diese Shatter-Cones ableiten, dass mit zunehmender Impakt-bedingter Energie, welcher die oberjurassischen Ausgangsgesteine ausgesetzt waren, sich der ausbildende V-Winkel vergrößert. Eine Zunahme des V-Winkels mit zunehmendem Abstand zum Kraterzentrum wurde für das Ries bereits von HOFMANN & GNOS (2006) erkannt, sowie auch bei anderen Impaktkratern außerhalb Deutschlands, beispielsweise beim Vredefort-Krater im Norden der südafrikanischen Provinz Freistaat (SAGY et al. 2004: Abb. 17).

Der teilweise sehr weite ballistische Transport der Trümmernmassen aus dem Ries wurde wohl begünstigt durch die Gestalt des instabilen, nur bis kurze Zeit nach dem Impakt vorhandenen Ries-Primärkraters (Begrenzung heute noch sichtbar durch den Inneren Kratering) mit einem Verhältnis »Tiefe zu Durchmesser« von etwa 1:4 (Tiefe etwa 4 Kilometer, Durchmesser etwa 16 Kilometer, vgl. PÖSGES & SCHIEBER 2000: 44). Bezüglich des in vorliegender Arbeit untersuchten »Ries-Auswurfstrahls« (sensu SACH 2014a) in südsüdwestlicher Richtung findet sich im OSM-Brockhorizont des nordalpinen Molassebeckens bis zu einer Distanz von etwa 100 Kilometer vom Ries entfernt fast ausschließlich Fern-Ejekta unterschiedlicher Kalkgesteine des Oberen Juras. Erst ab einer Entfernung von etwa 140 Kilometer kommen im Ravensburger Brockhorizont zusätzlich auch Auswürflinge aus dem Mittleren und Unteren Juras vor, und noch weiter entfernt vom Ries, im Bernhardzeller Blockhorizont, dann außerdem sogar sehr weit ausgeworfene Komponenten der Oberen Trias (Keuper-Mergel und Arkosen vom Typus des Stubensandsteins (Löwenstein-Formation), siehe HOFMANN 1973: 96, HOFMANN 1978: 19). Diese entlang des »Ries-Auswurfstrahls« zu beobachtende »selektive, stratigraphische Sortierung« des Ejekta-Materials aus dem Oberen

Jura bis zum Keuper zeigt tendenziell auf, dass mit zunehmender Auswurfweite (bzw. primär gesehen mit steigender Auswurfenergie) auch zunehmend ältere, lithostratigraphisch tiefer liegende Gesteine als Brockhorizont-Komponenten (Reste der ehemaligen Schuttdecke) auffindbar sind.

Desweiteren kann anhand des Ejekta-Materials im Brockhorizont auch festgestellt werden, dass die maximale Größe der ortsfremden Komponenten, vorwiegend oberjurassische Kalkgesteinsbrocken, mit zunehmendem Abstand zum Ries-Krater immer mehr abnimmt. Hierzu kann bezüglich der in vorliegender Arbeit behandelten Brockhorizont-Vorkommen folgende Datenreihe genannt werden: Ziemetshausener Brockhorizont: Ries-Distanz ~66 km, Ejekta-Durchmesser bis 120 cm (s. Kapitel 2.4); Biberacher Brockhorizont: Ries-Distanz ~110 km, Ejekta-Durchmesser bis 31 cm; Ravensburger Brockhorizont: Ries-Distanz ~140 km, Ejekta-Durchmesser bis 29 cm; Bernhardzeller Blockhorizont: Ries-Distanz ~180 km, Ejekta-Durchmesser bis 25 cm (HOFMANN 1978: 19). Diese tendenzielle Größenabnahme des Ejekta-Materials mit zunehmendem Abstand zum Rieskrater zeigt sich hier, entlang des »Ries-Auswurfstrahls«, zwar in deutlicher Weise, sie bestätigt allerdings nur die Tatsache, dass sehr große Impakt-Auswürflinge aufgrund ihrer Trägheit und größeren Luftreibung ballistisch nicht so weit transportiert werden können wie kleinere Auswürflinge. Ganz vereinzelt und unter besonderen Bedingungen (hohe Auswurfgeschwindigkeiten) können jedoch auch sehr große Gesteinsbrocken weit ausgeworfen werden, wie beispielsweise die etwa 150 Kilometer ost-südöstlich des Nördlinger Rieses gefundene Malmkalk-Trümmermasse bei Niedertrennbach in Niederbayern zeigt (HEROLD 1969).

Ein weiterer Gesichtspunkt bezüglich des ausgeworfenen Ejekta-Materials soll in diesem Zusammenhang ebenfalls kurz diskutiert werden. Falls es zutrifft (siehe Kapitel 2.2), dass die beiden Impakte im Nördlinger Ries und Steinheimer Becken nahezu zeitgleich waren, könnte es Vermischungen beider Auswurfwolken (Ejekta-Material) durch die enormen Druckwellenfronten gegeben haben. Wenn sich beispielsweise der weniger starke Steinheim-Impakt etwas früher (Millisekunden bis Sekunden) ereignete als der Ries-Impakt, befanden sich also zunächst nur Steinheim-Auswürflinge auf ihren linearen, radial vom Zentrum verlaufenden Flugbahnen, und dies rund um den Einschlagpunkt. In diesem Fall ist vorstellbar, dass die Steinheimer Auswürflinge (inklusive Strahlenkalke) dann von der etwas verzögerten, aber gewaltigen Druckwelle des Ries-Impakts erfasst wurden. Demzufolge kann ein Teil der Auswürflinge aus dem Steinheimer Becken durch den zusätzlichen Energieschub der Nördlinger Druckwelle bis weit ins Vorland des frisch entstandenen Kraters ballistisch transportiert worden sein. Es ist also nicht völlig auszuschließen, dass Ejekta-Material des Steinheim-Impakts auch im Brockhorizont der Oberen Süßwassermolasse in Südwestdeutschland eingelagert ist.

Der oben beschriebene lineare Zusammenhang bezüglich der Shatter-Cones entlang des »Ries-Auswurfstrahls« trifft hingegen wohl nicht für die im Krater verbliebenen Strahlenkalke zu. In diesen Fällen scheint ein minimaler mittlerer V-Winkel von etwa 18° (Streuung zwischen 18° und 22°) erreicht zu sein, der vom Gefüge (insbesondere von der Partikelgröße) des oberjurassischen Muttergesteins abhängig ist. Hinzu kommt bei diesen, aus den Kraterbereichen selbst stammenden Shatter-Cones die Tatsache, dass die hypothetisch angenommene Auswurfedistanz vom Kraterzentrum so fehlerbehaftet ist, dass diese Korrelation zwangsläufig hinterfragt werden muss.

4.3 Shatter-Cone-Bildungsbereich und Abstände zum Ries-Impaktor

Wie in vorangegangenen Kapiteln aufgezeigt, nimmt die Größe der mittleren V-Winkel der entlang des »Ries-Auswurfstrahls« gefundenen Shatter-Cones (hier nahezu ausschließlich Strahlenkalke) mit zunehmender Entfernung vom Ries-Einschlagzentrum immer mehr zu. Da sich die Shatter-Cone-Strukturen (V-Winkel) nicht während oder nach dem ballistischen Transport des Ejekta-Materials gebildet haben, sondern in Sekundenbruchteilen vor dem Massenauswurf, also noch im anstehenden, autochthonen Oberjura-Gestein, kann aufgrund der unterschiedlichen, mit zunehmender Distanz zum Ries stetig größer werdenden V-Winkel davon ausgegangen werden, dass es einen mehr oder weniger ausgedehnten Shatter-Cone-Bildungsbereich mit unterschied-

SSW bis S

NNO bis N

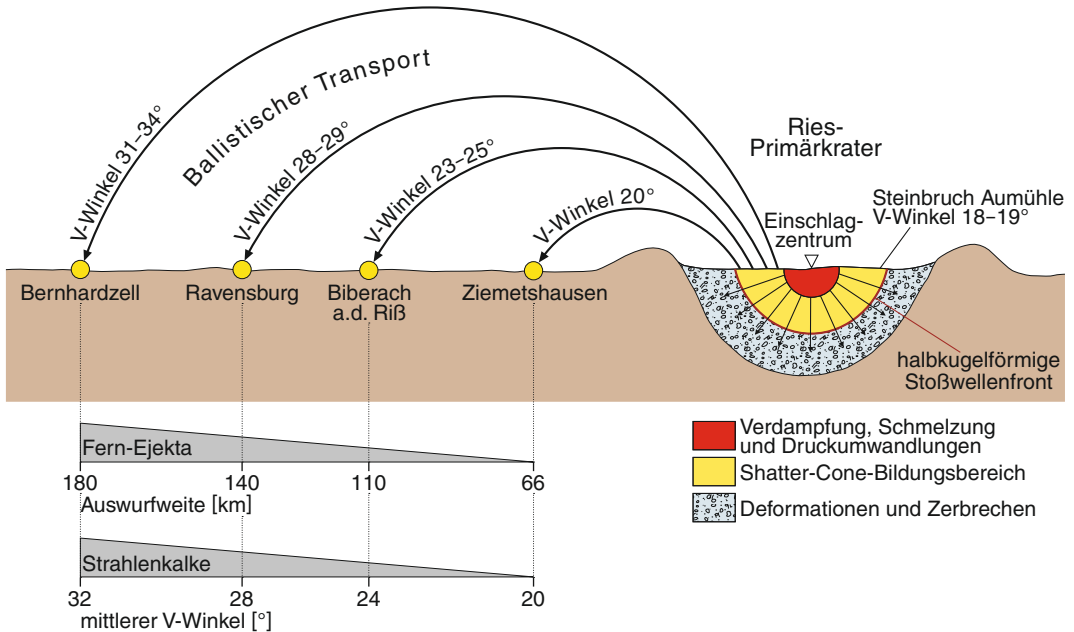


Abb. 9. Schematisches Bild zum Ries-Impakt (frühes Stadium während der Aussprengung des Ries-Primärkraters): Bildungsbereich, ballistischer Transport, Auswurfweiten und mittlere V-Winkel der Strahlenkalk-Fernejekta aus dem Brockhorizont der Oberen Süßwassermolasse in Süddeutschland und in der Ostschweiz (Fundobjekte aus dem Molassebecken).

lichen lateralen und vertikalen Abständen zum Ries-Impaktor gab (siehe Abb. 9). Je näher der Startpunkt der Ries-Ejekta zum Kraterzentrum lag, desto höher waren auch die Startenergien bzw. -geschwindigkeiten. Die etwa 180 Kilometer weit ausgeworfenen Shatter-Cones aus dem Bernhardzeller Blockhorizont stammen wohl aus einer südsüdwestlich des eindringenden Impaktors gelegenen, aber impaktornahen Position des Shatter-Cone-Bildungsbereiches, die Shatter-Cones aus dem Ravensburger, Biberacher und Ziemetshausener Brockhorizont sukzessive aus lateral (südsüdwestlich bis südlich) immer weiter vom Ries-Impaktor entfernten Positionen innerhalb des Shatter-Cone-Bildungsbereiches. Auf oben erläuteter Grundlage kann die aufgezeigte lineare Größenzunahme der Shatter-Cone-Winkel entlang des »Ries-Auswurfstrahls« plausibel erklärt werden.

Auf Kilometerangaben bezüglich der Abstände des ehemaligen Shatter-Cone-Bildungsbereiches zum Ries-Impaktor wird in vorliegender Arbeit bewusst verzichtet, mangels genauer Kenntnisse der spezifischen Eigenschaften des Impaktors und des betroffenen Oberjura-Kalkgesteins. Daher kann der Bildungsbereich der Shatter-Cones des »Ries-Auswurfstrahls« geographisch gesehen vorerst lediglich auf das Teilgebiet des Nördlinger Rieses zwischen dem südsüdwestlichen Abschnitt des kristallinen Inneren Kraterings (nahe östlich der Stadt Nördlingen) und dem Kraterzentrum bei Klosterzimmern eingeschränkt werden.

4.4 Größe des Ries-Impaktors

Nachdem in den beiden vorangegangenen Kapiteln die Shatter-Cones des Nördlinger Rieses, die in oberjurassischen Kalken ausgebildet wurden, in Bezug auf deren Auswurfweite diskutiert wurden, soll nun ein Vergleich mit den Shatter-Cones des Steineimer Beckens vorgenommen

werden. Der Vergleich bietet sich aus zweierlei Hinsicht an: Zum einen weist das nahegelegene Einschlaggebiet des Steinheimer Impakts eine ähnliche stratigraphisch gegliederte Schichtenabfolge wie im Nördlinger Ries auf. Zum anderen weist der kleinere Durchmesser des Steinheimer Beckens mit etwa 3,8 Kilometer (Ries-Durchmesser: etwa 24 Kilometer) auf einen kleineren Impaktor hin. Um einen direkten Vergleich zwischen den Shatter-Cones, die aus dem Steinheimer Becken und dem Nördlinger Ries stammen, vornehmen zu können, wurden nur die Shatter-Cones herangezogen, die in oberjurassischen Kalken gebildet wurden. Hierdurch lässt sich als Vereinfachung wieder annehmen, dass die stoßwellenmetamorph überprägten Gesteine aus der gleichen Tiefe des jeweiligen Einschlaggebiets stammen.

Die Auswertung der 15 Steinheimer Strahlenkalk-Proben wird in Tabelle 2 zusammengefasst. Aus diesen Daten wird ersichtlich, dass der Mittelwert der Steinheimer Strahlenkalk-Proben bei rund 20° liegt und sich die Einzelwerte aller V-Winkel über einen Streubereich von etwa 12° bis 33° erstrecken. Zieht man nun als Vergleich die Daten aus dem vorherigen Kapitel heran, so zeigt sich, dass sowohl der Mittelwert als auch die Streuung der individuellen V-Winkel der Ries- und Steinheim-Proben sich so ähnlich sind, dass sich hieraus keine Rückschlüsse auf die Größe des Ries-Impaktors selbst bzw. beider Impaktoren ziehen lassen. Vielmehr muss diese Übereinstimmung mit gesteinspezifischen Größen in Verbindung gebracht werden, wobei sicherlich das Gefüge des Ausgangsgesteins ein wesentlicher Faktor ist.

4.5 Ursprüngliche stratigraphische Position im Einschlaggebiet des Nördlinger Rieses

Das präriesische Einschlaggebiet des Ries-Impaktors weist im Wesentlichen einen lagenförmigen Schichtenaufbau auf, der eine stratigraphische Zuordnung der ausgeworfenen Gesteine erleichtert (BAIER 2009). Hierdurch lässt sich ableiten, in welcher Tiefe das ausgeworfene Material ursprünglich anstand. Im Falle des Nördlinger Rieses wurde das kristalline Grundgebirge des späteren Einschlagsgebiets von rund 600 Meter sedimentärem Deckgebirge überlagert (vgl. HÜTTNER & SCHMIDT-KALER 1999). Legt man diese minimale Tiefe für das kristalline Grundgebirge zugrunde, so darf für die Shatter-Cone-Bildung im Ries-Primärkrater vereinfacht angenommen werden, dass die stoßwellenmetamorph-überprägten Hornblende-Fleckenkersantite und Granite rund 600 Meter tiefer als die Shatter-Cone-führenden oberjurassischen Kalke (Strahlenkalke) anstanden. Aus Tabelle 1 wird ersichtlich, dass im Falle der feinkörnigen Hornblende-Fleckenkersantite (WH-1 bis WH-16) der gesamtmittlere V-Winkel bei 22° liegt, wobei die individuellen V-Winkel von 14° bis 32° streuen. Bei den drei grobkörnigeren Graniten (AM-1 bis AM-3) aus dem Suevit des Steinbruchs Aumühle liegt der gesamtmittlere V-Winkel bei 23° (17° – 28°). Somit liegen die V-Winkel dieser Shatter-Cones, die eine silikatische Matrix aufweisen, nahezu im gleichen Größenbereich. Von diesen Werten unterscheiden sich die Shatter-Cones aus der Bunten Brekzie des Steinbruchs Aumühle, die in oberjurassischen Kalken ausgebildet wurden. Letztere weisen einen gesamtmittleren V-Winkel von rund 18° (13° – 24°) auf. Dieser signifikante Unterschied lässt sich ebenfalls auf die gesteinspezifischen Größen des kristallinen Ausgangsgesteins zurückführen, vor allem aber auf den heterogenen Mineralbestand sowie auf die mechanischen Eigenschaften des Ausgangsgesteins.

Auch im Falle des Steinheimer Beckens sind Shatter-Cones bekannt, die aus dem stratigraphisch tiefer liegenden Untergrund des Einschlaggebiets stammen. Im Rahmen vorliegender Arbeit wurden mehrere dieser Funde untersucht (10 Fundobjekte aus der Opalinuston-Formation, 2 Fundobjekte aus der Eisensandstein-Formation sowie 1 Fundobjekt aus der Angulatensandstein-Formation), die größtenteils bereits in der Literatur publiziert bzw. abgebildet wurden. Auch bei diesen Fundobjekten ist kein Trend zwischen den jeweiligen mittleren V-Winkeln zu erkennen, den man mit zunehmender Tiefe des Ausgangsgesteins in Verbindung bringen könnte. Die Variationsbreite der mittleren V-Winkel dürfte auch in diesen Fällen sehr wahrscheinlich mit der unterschiedlichen Beschaffenheit der Ausgangsgesteine in direktem Zusammenhang stehen.

5. Wesentliche Untersuchungsergebnisse

In der vorliegenden Studie wurden 65 Shatter-Cones bezüglich ihrer V-Winkel untersucht, die während des Ries-Impakts und des Steinheimer Impakts gebildet wurden. Bei der Bewertung der ermittelten V-Winkel der Shatter-Cones wurden sowohl die Auswurfweiten als auch die ursprünglichen Tiefenlagen der Muttergesteine berücksichtigt. Ebenso wurde eine Unterscheidung zwischen karbonatischer und silikatischer Matrix bei der Betrachtung vorgenommen. Aus dem umfangreichen Datensatz lassen sich mehrere Rückschlüsse ziehen:

1. Zum einen lässt sich ein linearer Zusammenhang für den V-Winkel der Shatter-Cones nachweisen, die aus dem Ries-Krater ausgeworfen wurden. Der Zusammenhang kann mit der Formel $V = 0,1133D + 12,137$ beschrieben werden, wobei D den Abstand zum Ries-Zentrum (in Kilometer) und V den sogenannten »mittleren V-Winkel« (in °) der korrespondierenden Shatter-Cones bedeuten. Obwohl bei der Zusammenstellung der Daten starke Vereinfachungen bezüglich der Auswurfweiten der Shatter-Cone-Objekte als auch der ursprünglichen Tiefe des Muttergesteins vorgenommen wurden (vgl. Kapitel 4.2 und 4.5), weist das ermittelte Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9565 einen sehr hohen Wert auf, der den linearen Zusammenhang zwischen der Auswurfweite und dem korrespondierenden V-Winkel unterstreicht. Mit zunehmender Auswurfdistanz (bis etwa 180 Kilometer) vergrößert sich der mittlere V-Winkel von rund 18° auf einen Wert von rund 32°. Einen signifikanten gesteinspezifischen Einfluss kann bei diesem Datensatz auf die Shatter-Cone-Bildung ausgeschlossen werden, da sämtliche Shatter-Cone-Objekte feinkörnige, oberjurassische Kalke als Matrix aufweisen. Zukünftige Shatter-Cone-Funde, vor allem weitere aus der Oberen Süßwassermolasse Bayerns, wären wünschenswert, um den oben beschriebenen Zusammenhang mit weiteren Daten zu bestätigen.
2. Im Falle der innerhalb des Ries-Kraterrands gefundenen Shatter-Cones, deren Matrix ebenfalls aus oberjurassischem Kalkgestein (relativ geringer Abstand zur ehemaligen Geländeoberfläche) besteht, gibt es keine wesentlichen Größenunterschiede bezüglich des mittleren V-Winkels. Der ermittelte minimale Wert von rund 18° scheint in diesem Falle eine gesteinspezifische Größe zu sein, da dieser auch bei den Shatter-Cones (oberflächennahe, oberjurassische Strahlenkalke) aus dem nahegelegenen Steinheimer Becken ermittelt wurde. Im Falle des Steinheimer Impakts wurde eine deutlich niedrigere Impakt-bedingte Energie im Vergleich zum Nördlinger-Ries-Impakt freigesetzt, was sich aus dem Durchmesser des Impaktkraters ableiten lässt. Demnach wären kleinere mittlere V-Winkel im Falle der Steinheimer Fundobjekte zu erwarten, wenn kein gesteinspezifischer Grund vorläge, der das Minimum des V-Winkels bestimmt.
3. Die vorgenommene Untersuchung der Shatter-Cones, die aus den tieferen Schichten der beiden Einschlaggebiete stammen, legt nahe, dass auch die gesteinspezifischen Charakteristika einen signifikanten Einfluss auf die Größe des V-Winkels haben. Dieser Aspekt wird zusätzlich dadurch gestärkt, dass sich kein deutlicher Trend bei den ermittelten V-Winkeln zeigt, wenn nur die ursprüngliche Tiefenposition der unterschiedlichen Muttergesteine berücksichtigt wird. Die Daten unterstreichen die nahe liegende Vermutung, dass im Falle der grobkörnigeren silikatischen Gesteine der V-Winkel größer ist, was im Wesentlichen mit der Mineralkorngröße und Härte des betreffenden Gesteinsmaterials zu begründen ist.

6. Dank

Unser Dank für Diskussionen, Anregungen und Hinweise zum Thema »Impaktkrater, Shatter-Cones und Fern-Ejekta«, mündlich, schriftlich oder indirekt durch Fachpublikationen, möchten wir folgenden Personen aussprechen: Herrn Prof. Dr. Kurt HEISSIG (München), Herrn Dr. ELMAR P. J. HEIZMANN (Erdmannhausen), Herrn Dr. BEDA A. HOFMANN (Bern) und Frau Diplom-Geologin GISELA PÖSGES (Rieskrater-Museum Nördlingen). Für die Durchsicht des Rohmanuskriptes und für Verbesserungsvorschläge bedanken wir uns bei Herrn Dr. FRIEDRICH PFEIL (München). Weiterer Dank für die sorgfältige Anfertigung und Überarbeitung von Grafiken geht an Herrn Dr. HUBERT HILPERT (Pfeil-Verlag) und auch an Herrn Diplom-Ingenieur ARMIN SCHERZINGER (Immendingen-Hattingen), der uns bei der Bestimmung eines oberjurassischen Ammoniten half. Ein herzlicher Dank gilt zuletzt auch Herrn PETER BOCKSTALLER (Schopfheim), der uns freundlicherweise Fotos und Daten seines Shatter-Cone-Materials aus dem Nördlinger Ries, Steinheimer Becken und aus dem Ziemetshausener Brockhorizont zur Verfügung stellte.

7. Schriftenverzeichnis

- BAIER, J. (2007): Die Auswurfprodukte des Ries-Impakts, Deutschland. – *Documenta naturae* 162: 1–18; München.
- (2009): Zur Herkunft und Bedeutung der Ries-Auswurfprodukte für den Impakt-Mechanismus. – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.* 91: 9–29; Stuttgart.
- (2012): Der Steinheimer Schneckensand – eine miozäne Fossilagerstätte von Weltformat. – *Fossilien* 2012 (6): 368–371; Wiebelsheim.
- (2013a): Die Bedeutung von Wasser während der Suevit-Bildung (Ries-Impakt, Deutschland). – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.* 94: 55–69; Stuttgart.
- (2013b): Der Geologische Lehrpfad im Steinheimer Becken – eine kosmische Spurensuche. – *Fossilien* 2013 (4): 228–232; Wiebelsheim.
- BAIER, J. & SCHERZINGER, A. (2010): Der neue Geologische Lehrpfad im Steinheimer Impakt-Krater. – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.* 92: 9–24; Stuttgart.
- BARATOUX, D. & REIMOLD, W. U. (2016): The current state of knowledge about shatter cones: Introduction to the special issue. – *Meteorit. Planet. Sci.*, 51: 1389–1434; Hoboken.
- BORUS, E. (1975): Stoßwelleneffekte in Weißjura-Kalken des Nördlinger Rieskraters. – Dissertation, Eberhard-Karls-Universität Tübingen; Tübingen.
- BRANCO, W. & FRAAS, E. (1905): Das kryptovulkanische Becken von Steinheim. – *Abh. königl. Preuss. Akad. Wissenschaften*; Berlin (Reimer).
- BUCHER, W. H. (1963): Cryptoexplosion structures caused from without or from within the Earth? (“Astroblemes” or “Geoblemes”?). – *Am. J. Sci.*, 261: 597–649; New Haven.
- CHAO, E. C.-T. (1977a): The Ries Crater of Southern Germany, a Model for large Basins on Planetary Surfaces. – *Geol. Jb.*, A43: 3–81; Hannover.
- (1977b): Preliminary interpretation of the 1973 Ries research deep drill core and new Ries cratering model. – *Geologica bavarica*, 75: 421–441; München.
- DRESSLER, B., GRAUP, G. & MATZKE, K. (1969): Die Gesteine des kristallinen Grundgebirges im Nördlinger Ries. – *Geologica bavarica*, 61: 201–228; München.
- ENGELHARDT, W. v. & GRAUP, G. (1977): Stoßwellenmetamorphose im Kristallin der Forschungsbohrung Nördlingen 1973. – *Geologica bavarica*, 75: 255–271; München
- FERRIÈRE, L., BRANDSTÄTTER, F. & KOEBERL, C. (2013): Finding shatter cones in meteorites from the Natural History Museum Vienna collection (abstract #5193). 76th Annual Meeting of the Meteoritical Society; Edmonton, Alberta.
- 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.
- FRENCH, B. M. & KOEBERL, C. (2010): The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. – *Earth-Science Reviews*, 98: 123–170; Amsterdam.
- GALL, H., HÜTTNER, R. & MÜLLER, D., mit Beiträgen von DEHM, R., GRAUP, G. & POHL, J. (1977): Erläuterungen zur Geologischen Karte des Rieses 1 : 50 000. – *Geologica bavarica*, 76: 1–191; München.
- GALL, H. & MÜLLER, D. (1975): Reutersche Blöcke – außeralpine Fremdgesteine unterschiedlicher Herkunft in jungtertiären und quartären Sedimenten Südbayerns. – *Mitt. Bayer. Staatstlg. Paläont. hist. Geol.*, 15: 207–228; München.

- GEYER, M., NITSCH, E. & SIMON, T. (Hrsg., 2011): Geologie von Baden-Württemberg (5. Aufl.). – Stuttgart (Schweizerbart).
- GRAUP, G. (1977): Kristallines Grundgebirge. – In: GALL, H., HÜTTNER, R. & MÜLLER, D. (1977): Erläuterungen zur Geologischen Karte des Rieses 1:50 000. – *Geologica bavarica*, 76: 20–27; München
- (1978): Das Kristallin im Nördlinger Ries. Petrographische Zusammensetzung und Auswurfmechanismus der kristallinen Trümmermassen, Struktur des kristallinen Untergrunds und Beziehung zum Moldanubikum. – Stuttgart (Enke).
- GRAUP, G. (1999): Carbonate-silicate liquid immiscibility upon impact melting: Ries Crater, Germany. – *Meteorit. Planet. Sci.*, 34: 425–438; Lawrence, Kansas.
- GRAUP, G. & STÖFFLER, D. (1974): Petrologische Befunde im Nördlinger Ries. – *Der Aufschluss*, 24. Sonderband: 39–48; Heidelberg.
- GROSCHOFF, P. & REIFF, W. (1966): Ergebnisse neuerer Untersuchungen im Steinheimer Becken (Württemberg). – *Jh. Ver. vaterl. Naturkde. Württemberg*, 121: 155–168; Stuttgart.
- GROSCHOFF, P. & REIFF, W. (1970): Die zentrale Erhebung »Steinhirt-Klosterberg« im Steinheimer Becken (Schwäbische Alb). – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.* 52: 169–174; Stuttgart.
- GROSCHOFF, P. & REIFF, W. (1971): Vorläufige Ergebnisse der Forschungsbohrungen 1970 im Steinheimer Becken (Schwäbische Alb). – *Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg*, 13: 223–226; Freiburg.
- HEISSIG, K. (1986): No effect of the Ries impact event on the local mammal fauna. – *Modern Geol.*, 10: 171–179; London.
- (1989): Neue Ergebnisse zur Stratigraphie der Mittleren Serie der Oberen Süßwassermolasse Bayerns. – *Geologica Bavarica*, 94: 239–257; München.
- HEIZMANN, E. P. J. & REIFF, W. (2002): Der Steinheimer Meteorokrater. – München (Pfeil).
- HEROLD, R. (1969): Eine Malmkalk-Trümmermasse in der Oberen Süßwassermolasse Niederbayerns. – *Geologica bavarica*, 61: 413–427; München.
- HOFMANN, B. A. (2008): Shatter cones aus dem Blockhorizont an der Sitter bei Bernhardzell. – *Ber. d. St. Gallischen Naturwiss. Ges.*, 91: 77–86; St. Gallen.
- HOFMANN, B. A. & GNOS, E. (2006): New finds of shatter cones in distal Ries ejecta, Bernhardzell, eastern Switzerland. – In: *Meteoritics and Planetary Science*, 41 (Suppl.), A78; Hoboken.
- HOFMANN, B. A. & HOFMANN, F. (1992): An impactite horizon in the Upper Freshwater Molasse in eastern Switzerland – Distal Ries ejecta? – *Eclogae geol. Helv.*, 85: 787–789; Basel.
- HOFMANN, F. (1955): Neue geologische Untersuchungen in der Molasse der Nordostschweiz. – *Eclogae geol. Helv.* 48: 99–124; 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 und deren Beziehung zum Riesereignis. – *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing.*, 44/107: 17–27; Basel.
- HÜTTNER, H. (1969): Bunte Trümmermassen und Suevit. – *Geologica bavarica*, 61: 142–200; München.
- (1977): Makroskopische Beobachtungen zur Deformation des Kristallins in der Forschungsbohrung Nördlingen 1973. – *Geologica bavarica*, 75: 273–283; München
- HÜTTNER, H. & SCHMIDT-KALER, H. (1999): Die Geologische Karte des Rieses 1:50 000 (2., überarbeitete Auflage). – *Geologica bavarica*, 104: 7–76; München
- HÜTTNER, H. & SCHMIDT-KALER, H. (2003): Meteoritenkrater Nördlinger Ries (2. Auflage). – *Wanderungen in der Erdgeschichte*, 10: 1–144; München
- KRANZ, W., BERZ, K. C. & BERCKHEMER, F. (1924): Begleitworte zur Geognostischen Spezialkarte von Württemberg. Atlasblatt Heidenheim mit der Umgebung von Heidenheim, Steinheim a.A., Weissenstein, Eybach, Urspring-Lonsee, Dettingen-Heuchlingen, Gerstetten. – 2. Aufl., 142 S., 22 Abb.; Stuttgart.
- LEMCKE, K., ENGELHARDT, W. v. & FÜCHTBAUER, H. (1953): Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen im Westteil der ungefalteten Molasse des süddeutschen Alpenvorlandes. – *Beih. Geol. Jb.* 11: 1–110; Hannover.
- MCCALL, G. J. H. (2009): Half a century of progress on terrestrial impact structures: A review. – *Earth-Science Reviews*, 92: 99–116; Amsterdam.
- MCHONE, J. F., SHOEMAKER, C., KILLGORE, M. & KILLGORE, K. (2012): Shatter cones in meteorites (abstract #5393). 75th Annual Meeting of the Meteoritical Society; Cairns, Australia.

- PÖSGES, G. (2016): First description of genuine shatter cones in Upper Jurassic Limestone clasts from the Bunte Breccia impactites of the Ries crater (abstract #6252). – 79th annual meeting of the Meteoritical Society; Hoboken.
- PÖSGES, G. & SCHIEBER, M. (2000): Das Rieskrater-Museum Nördlingen. – München (Pfeil).
- REIFF, W. (1977): The Steinheim Basin – an impact structure. – In: RODDY, D. J., PEPIN, R. O. & MERRILL, R. B. (eds.): Impact and Explosion Cratering, 309–320; New York.
- (1979a): Subparallel shock fractures; An impact-specific deformation. – *Meteoritics*, 14: 524–525; Hoboken.
 - (1979b): Guidebook to the Steinheim Basin Impact Crater. – Stuttgart (Geol. Landesamt Baden-Württemberg).
- SACH, V. J. (1997): Neue Vorkommen von Brockhorizonten in der Oberen Süßwassermolasse von Baden-Württemberg (Deutschland) – Zeugnisse der Rieskatastrophe im Mittelmiozän. – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 205 (3): 323–337; Stuttgart.
- (1999): Litho- und biostratigraphische Untersuchungen in der Oberen Süßwassermolasse des Landkreises Biberach an der Riss (Oberschwaben). – *Stuttgarter Beitr. Naturk. B*, 276: 1–167; Stuttgart.
 - (2004): Nördlinger Ries und Biberacher Brockhorizont – Spuren einer kosmischen Katastrophe in Oberschwaben. – *Oberschwaben Naturnah (Z. Bund f. Naturschutz Oberschwaben)*: 42–45; Bad Wurzach.
 - (2014a): Strahlenkalke (Shatter-Cones) aus dem Brockhorizont der Oberen Süßwassermolasse in Oberschwaben (Südwestdeutschland) – Fernauswürflinge des Nördlinger-Ries-Impaktes. – München (Pfeil).
 - (2014b): Ein Reuterscher Block aus dem Staigertobel bei Weingarten – Fernejekta des Nördlinger-Ries-Impaktes im Mittel-Miozän. – *Oberschwaben Naturnah*: 32–37; Bad Wurzach.
 - (2016): Fossilienkatalog der Miozän-Molasse in Südwestdeutschland (Obere Süßwassermolasse, Brackwassermolasse, Obere Meeresmolasse, Untere Süßwassermolasse). – *Documenta naturae*, SB 70, 2. Auflage, 115 S.; München [auch als Online-Version im »Oberschwaben-Portal«].
- SAGY, A., FINEBERG, J. & RECHES, Z. (2004): Shatter cones: Branched, rapid fractures formed by shock impact. *J. Geophys. Res.* 109: B10209; Hoboken.
- 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.
- SCHMIEDER, M. & BUCHNER, E. (2013): Strahlenkegel in Opalinuston-Konkretionen des Steinheimer Beckens (Baden-Württemberg). – *Z. Dt. Ges. Geowiss (German J. Geosci.)*, 164 (3): 503–513; Stuttgart.
- SCHNEIDER, W. (1970): Petrologische Untersuchungen der Bunten Breccie im Nördlinger Ries. – Dissertation, Eberhard Karls Universität Tübingen; Tübingen.
- SCHWARZ, W. H. & LIPPOLT, H. J. (2014): ⁴⁰Ar/³⁹Ar step-heating of impact glasses from the Nördlinger Ries impact crater – Implications on excess argon in impact melts and tektites. – *Meteorit. Planet. Sci.*, 49: 1023–1036; Hoboken.
- SEEHUBER, U. (2009): Litho- und biostratigraphische Untersuchungen in der Oberen Süßwassermolasse in der Umgebung von Kirchheim in Schwaben. – *Documenta naturae*, 175: 1–355; München.

Abbildungsnachweise

Digitalfotos auf Tafel 1 (Fig. 1–3), Tafel 2 (Fig. 9) und Tafel 5 (Fig. a–d): Peter BOCKSTALLER, Schopfheim.
Abbildung 9: Grafik überarbeitet von Herrn Dr. HUBERT HILPERT (Pfeil-Verlag).
Alle anderen Digitalfotos und Abbildungen wurden von den beiden Autoren angefertigt.

Kurzbiografien der Autoren

Dr. VOLKER J. SACH, 1966 in Ochsenhausen (Baden-Württemberg) geboren, studierte Geologie/Paläontologie an der Universität Erlangen-Nürnberg, 1993 Diplom. 1999 Promotion am Institut und Museum für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen. Von 1996 bis 2001 war er am Staatlichen Museum für Naturkunde in Stuttgart beschäftigt, zunächst als Volontär und anschließend als wissenschaftlicher Angestellter im Rahmen eines DFG-Projektes. Danach Werkverträge mit mehreren naturkundlichen Museen in Süddeutschland. Seit 2004 ist er bei der Archäologischen Denkmalpflege des Regierungspräsidiums Stuttgart (2004–2014: RP Tübingen) tätig. Das geowissenschaftliche Interesse gilt insbesondere den Molasse-Ablagerungen (Schwerpunkt: Obere Süßwassermolasse und Brackwassermolasse) in Südwestdeutschland, den beiden Impaktkratern Nördlinger Ries und Steinheimer Becken, fossilen Klein- und Großsäugetieren sowie der Faunenentwicklung während der Miozän-Zeit. Vorliegende Arbeit dient als erweiterte Neufassung der beim Pfeil-Verlag bereits 2014 erschienen Broschüre über Strahlenkalk-Funde aus dem Brockhorizont der Oberen Süßwassermolasse in Oberschwaben.

Anschrift: In der Talwiese 2, D-72488 Sigmaringen; E-Mail: vsach@gmx.de

Dr. JOHANNES BAIER, 1972 in München geboren, studierte Chemie an der Universität Ulm. 1999 Diplom. 2001 Promotion. Von 2001 bis 2004 war er Postdoktorand am Institut für Geowissenschaften der Eberhard Karls Universität Tübingen (Arbeitsbereich: allgemeine und physikalisch-chemische Mineralogie). Er ist als Entwicklungsingenieur in der Industrie tätig. Sein geowissenschaftliches Interesse gilt dem Ries-Impakt, der südwestdeutschen Geologie sowie Goethes geowissenschaftlichen Studien.

Anschrift: Steinäckerstraße 58, D-72074 Tübingen; E-Mail: baier-johannes@web.de

Aus der Erdgeschichte Deutschlands sind mit dem Nördlinger Ries und mit dem benachbarten Steinheimer Becken nur zwei größere Impaktkrater bekannt. Wahrscheinlich gehen beide sogar auf ein und dasselbe kosmische Ereignis vor etwa 14,6 Millionen Jahren zurück. Infolge dieser Impakt-Ereignisse wurden gewaltige Mengen an Gesteinstrümmern aus den Kratern gesprengt, ballistisch – über Flugbahnen – transportiert und bis über 180 Kilometer vom Zentrum des Nördlinger-Ries-Kraters entfernt abgelagert. Einzelne Gesteinstrümmern dieser mittelmiozänen Schuttdecke findet man heute noch im Brockhorizont der Oberen Süßwassermolasse, der nur in Süddeutschland und in der Ostschweiz gebietsweise aufgeschlossen ist. Die in vorliegender Broschüre beschriebenen und abgebildeten Shatter-Cone-Gesteine (vor allem Strahlenkalke) stammen aus dem Brockhorizont und aus den beiden oben genannten Impaktkratern. Eine detaillierte Untersuchung dieser Fundobjekte erbrachte neue Erkenntnisse, insbesondere betreffend der Winkelgröße der Shatter-Cone-Lineationen in Abhängigkeit von der Auswurfweite des Ejekta-Materials. Darüber hinaus konnte ein gesteinspezifischer Einfluss auf die Winkelgröße belegt werden.

