

Kombinierte Interpretation  
petrophysikalischer Eigenschaften von  
Impaktiten und Postimpaktiten

-

Combined interpretation of  
petrophysical properties of  
impactites and postimpactites

Dem Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin  
vorgelegte Habilitationsschrift

von

Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Sibylle I. Mayr

# Vorwort

Die von mir hiermit vorgelegte schriftliche Habilitationsleistung setzt sich aus einer Monographie und 5 Publikationen in peer-reviewed Zeitschriften und einem Konferenzbeitrag zusammen. Die Monographie stellt eine bewertende Zusammenfassung meines Anteils an den publizierten Forschungsergebnissen dar.

Folgende Publikationen liegen der Arbeit zugrunde (mein Anteil ist abgeschätzt in % angegeben.):

1. Popov, Y., Romushkevich, R., Bayuk, I., Korobkov, D., Mayr, S., Burkhardt, H., and Wilhelm, H. (2004). *Physical Properties of Rocks from the Upper Part of the Yaxcopoil-1 Drill-hole (Chicxulub Crater)*. *Meteoritics & Planetary Science* 39, 799-812. (ca. 20%)
2. Mayr, S., Burkhardt, H., Popov, Y., and Wittmann, A. (2007). *Estimation of hydraulic permeability considering the micro morphology of rocks of the borehole YAXCOPOIL-1 (Impact crater Chicxulub, Mexico)*. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 97, 385-399. (ca. 75%)
3. Mayr, S. I., Wittmann, A., Burkhardt, H., Popov, Y., Romushkevich, R., Bayuk, I., Heidinger, P., and Wilhelm, H. (2008). *Integrated Interpretation of Physical Properties of Rocks of the Borehole YAXCOPOIL-1 (Chicxulub impact structure)*. *J. Geophys. Res.*, v. 113, 21 p. B07201. (ca. 75%)
4. Mayr, S., Burkhardt, H., Popov, Y., Romushkevich, R., Miklashevskiy, D., Gorobtsov, D., Heidinger, P., and Wilhelm, H. (2009). *Physical rock properties of the Eyreville core, Chesapeake Bay impact structure*. in *GSA Special Paper 458*, 137-163. (ca. 75%)
5. Popov, Y., Mayr, S.\*, Romushkevich, R., Burkhardt, H., and Wilhelm, H. (2014). *Petrophysical Properties of Impactites taken from four Meteoritic Impact Structures*. *Meteoritics & Planetary Science* 49 896-920. (\*corresponding Author) - (ca. 50%)
6. Mayr, S. and Popov, Y. (2015). *Petrophysical characteristics of impactites*. In *Bridging the Gap III: Impact Cratering in Nature, Experiments, and Modeling*; Abstract no. 1017, pages 1-2. (Konferenzbeitrag, ca. 98%)

Weitere Publikationen zum Thema mit meiner Beteiligung:

1. Wilhelm, H., Popov, Y., Burkhardt, H., Šafanda, J., Cermák, V., Heidinger, P., Korobkov, D., Romushkevich, R., and Mayr, S. (2005). *Heterogeneity effects in thermal borehole measurements*. *J. Geophys. Eng.* 2 No 4, 357-363.
2. Heidinger, P., Wilhelm, H., Popov, Y., Šafanda, J., Burkhardt, H., and Mayr, S. (2009). *First results of geothermal investigations, Chesapeake Bay impact structure, Eyreville boreholes*. in *GSA Special Paper 458*, 931-940.
3. Popov, Y., Romushkevich, R., Korobkov, D., Mayr, S., Bayuk, I., Burkhardt, H., and Wilhelm, H. (2011). *Thermal properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Impact Crater Chicxulub, Mexico)*. *Geophysical Journal International*, 184, 729-745.

Die neun Publikationen sind zur Begutachtung der Arbeit als CD beigefügt.

# Zusammenfassung

Viele der bis dato auf der Erde bekannten 188 Meteoriteneinschlagskrater wurden im Rahmen von Erdölexplorationsen entdeckt. Manche dieser Impaktkrater werden mit Massensterben in Verbindung gebracht, wie z.B. die Impaktstruktur Chicxulub (Yukatan, Mexiko); andere führen zu hydraulischen Anomalien, wie z.B. die Impaktstruktur Chesapeake (Virginia, USA). Neben geophysikalischen Feldmessungen dienen Tiefbohrungen der Erforschung dieser Strukturen.

Ziel der in dieser Habilitationsschrift vorgestellten Arbeiten waren zum Einen die Erarbeitung und Bereitstellung von Informationen für Modellierungen (z.B. Temperaturfeld, hydraulische Messungen, seismische Messungen etc.) sowie zum Anderen die vergleichende Interpretation der physikalischen Eigenschaften der Gesteine, die durch den Einschlag verändert wurden oder entstanden sind (Impaktite). Die Planung und Durchführung der umfangreichen, ergänzenden, gesteinsphysikalischen Messungen an Gesteinen aus den Bohrungen Yaxopoil-1 (Impaktstruktur Chicxulub) und Eyreville (Impaktstruktur Chesapeake) und die Interpretation der Daten unter unterschiedlichen Gesichtspunkten, in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit Geothermikern, Impaktforschern, Geologen und Mineralogen, waren wesentlicher Bestandteil der Arbeiten. Die untersuchten Proben umfassen sowohl Postimpaktite als auch allochthone Impaktbrekzien (Suevite und Lithische Brekzien) und Impaktschmelzgesteine sowie die autochthonen bzw. parautochthonen geschockten oder *en bloc* verschobenen Gesteine des getroffenen Bereiches (*shocked and displaced target rocks*).

Grundlage meiner Arbeiten waren Messungen an Halbkernen, die in kurzen Abständen von durchgängigen Bohrkernen entnommen wurden. Diese Messungen an den dicht gesampelten Proben wurden durch die Gruppe Popov durchgeführt und umfassen für mechanisch stabile Proben die konnektive Porosität (Verhältnis Porenraum/Gesamtvolumen) sowie die Dichte des vakuumtrockenen und des vollgesättigten Gesteins und daraus sich ergebend auch die Dichte des festen Anteils des Gesteines sowie die thermischen Eigenschaften des trockenen bzw. gesättigten Gesteins. Eine erste Gruppierung der Daten aufgrund der geologischen Ansprache des Feldgeologen der Kerne war erfolgt.

Diese Datenbasis habe ich um die unterschiedlichsten, zumeist nicht destruktiven, gesteinsphysikalischen Messungen ergänzt. Hierzu wurden von den bereits untersuchten Halbkernen möglichst repräsentative Proben ausgewählt. Messungen der P- und S-Wellengeschwindigkeiten  $v_p$  und  $v_s$  erfolgten möglichst unter den gleichen Bedingungen (trocken und vollgesättigt, Richtung der Messung bezüglich der Schichtung, kein bzw. geringer axialer Druck), aber auch teilweise sättigungs- und druckabhängig (Mayr et al., 2008, 2009). Messungen der Permeabilität, inneren Oberfläche, der elektrischen Eigenschaften, von NMR-Relaxationszeiten, der Porenradienverteilung mittel Quecksilberinjektionsmessungen sowie weitere optische Analysen erweitern die Datensätze (insbesondere Mayr et al., 2007, 2008).

Für die Bohrung Yaxopoil-1 (Chicxulub) lag ein wesentlicher Schwerpunkt auf der Abschätzung der Permeabilität aus der inneren Oberfläche, der elektrischen Eigenschaften, der Porosität, der NMR-Relaxationszeiten und der Porenradienverteilung. Dies beinhaltete auch die Beurteilung der inneren Oberfläche hinsichtlich der verschiedenen Gesteinstypen (Mayr et al., 2007). Für die Bohrung Yaxopoil-1 wurden aus den ergänzenden Messungen und den Messungen an den dicht gesampelten Proben quasi-kontinuierliche Logs der P-Wellengeschwindigkeiten und der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Hierbei wurden die unterschiedlichen Einflüsse der Struktur und Textur (Porosität, Kornkontakte, Mikrofossilien) sowie der Mineralogie auf die physikalischen Eigenschaften berücksichtigt (Mayr et al., 2008).

Für die Bohrung Eyreville (Chesapeake) wurden zur Ergänzung der verfügbaren Datenbasis für mechanisch instabile Proben (schlecht konsolidierte Ton- und Sandsteine aus dem oberen Bereich der Bohrung) die Porosität und die Dichten bestimmt. Für die Messung der P- und S-Wellengeschwindigkeiten wurden im Gegensatz zur Bohrung Yaxopoil-1 nicht nur exemplarisch Proben ausgewählt, sondern es wurde an möglichst vielen Proben gemessen. Die mangelnde Stabilität der Halbkerns war ein sehr einschränkende Faktor, weswegen nur für Granite an allen Proben gemessen werden konnte. Für diese wurde ergänzend auch die Sättigungs- und Druckabhängigkeit der Geschwindigkeiten bestimmt (Mayr et al., 2009).

Die Untersuchungen der unterschiedlichen Gesteinstypen (Kalke, Dolomite, Anhydrite sowie Suevite und Lithische Brekzien und *lower suevite*) aus der Bohrung Yaxopoil-1 (Chicxulub) ergaben, dass alle physikalischen Eigenschaften naturgemäß mit der Porosität korrelieren. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der gesteinsbildenden Mineralien lassen die beiden gesteinsphysikalischen Parameter Dichte und Wärmeleitfähigkeit eine Unterscheidung zwischen vornehmlich kalkhaltigen, dolomit- bzw. anhydrithaltigen Typen zu. Für höher poröse Gesteine ( $\phi > 15\%$ ) kommt bei der Wärmeleitfähigkeit verstärkt der Einfluss der Struktur und Textur zum Tragen (insbesondere bei den Sueviten und lithischen Brekzien). Bei den elastischen Geschwindigkeiten hingegen ist keine Gruppierung hinsichtlich der Mineralogie möglich und es dominiert der Einfluss von Textur und Struktur (Mikrorisse). Aufgrund der vorgenannten Punkte wurden unterschiedliche Korrelationen zur Bestimmung von quasi-kontinuierlichen  $v_p$ -Logs aus den dicht gemessenen Daten verwendet. Die Interpretation der elastischen Eigenschaften, insbesondere der sättigungsabhängigen  $v_p$  und  $v_s$ -Messungen, sind hinsichtlich der Mikrorissdichte in Übereinstimmung mit der Interpretation hinsichtlich der Orientierung von Megablöcken.

Für die elektrischen Eigenschaften kann für alle Gesteinstypen der gleiche Zusammenhang verwendet werden, wohingegen bei der inneren Oberfläche zwischen verschiedenen Gesteinstypen unterschieden werden muss: den tertiären Kalksteinen, den Sueviten und lithischen Brekzien der obersten 5 Einheiten (ohne *lower suevites*), den *lower suevites*, den kreidezeitlichen Anhydriten, sowie den Dolomiten. Es zeigen sich für die Suevite und lithischen Brekzien zusätzliche Einflüsse durch hydrothermale Wässer nach dem Impakt. Dementsprechend wurden für die unterschiedlichen Gruppen unterschiedliche Modelle zur Permeabilitätsabschätzung verwendet. Die tertiären Kalksteinproben zeichnen sich durch hohe Porositäten ( $0.08 < \phi < 0.35$ ) und relativ geringe Permeabilitäten zwischen  $10^{-14} \text{ m}^2$  und  $10^{-19} \text{ m}^2$  aus. Die abgeschätzten Werte für die Suevite und

lithischen Brekzien (ohne *lower suevite*) zwischen  $10^{-18} \text{ m}^2$  und  $10^{-15} \text{ m}^2$  liegen in der selben Größenordnung wie die der postimpakt-Kalksteine (Typ 1). Für die niederporösen *lower suevite*, kreidezeitlichen Anhydrite und Dolomite, werden dagegen sehr geringe Permeabilitäten zwischen  $10^{-15} \text{ m}^2$  und  $10^{-23} \text{ m}^2$  abgeschätzt. Für die Suevite und lithischen Brekzien (ohne *lower suevite*) und in den postimpakt-Kalksteinen besteht die Möglichkeit eines konvektiven Beitrags zum Wärmetransport (Mayr et al., 2007).

Bei den Gesteinen aus der Bohrung Eyreville (Chesapeake) zeigten die umfangreichen Messungen, dass die Parameter Dichte und Wärmeleitfähigkeit keine deutliche Gruppierung zulassen, wogegen sich die unterschiedlichen elastischen Eigenschaften von insbesondere Kalk und Quarz deutlich in den Geschwindigkeiten (Postimpaktite und den Exmore Brekzien) zeigen. Zu diesen Unterschieden kommt noch der Einfluss von Textur und Struktur, dies auch bei den Graniten, Schiefen und Pegmatiten (*targets rocks*) sowie den Sueviten und lithischen Brekzien. Eine die Messdaten ergänzende Bestimmung von Logs aus Korrelationen war aufgrund der unterschiedlichen Einflüsse nicht möglich. Die sättigungs- und druckabhängigen Messungen von  $v_p$  an allen Granitproben ermöglichen eine Zonierung der granitischen Megablöcke.

Bei beiden Bohrungen bestätigen die Analysen der sättigungs- und druckabhängigen P- und S-Wellengeschwindigkeiten den zusätzlichen Einfluss von Mikrorissen im Gestein. D.h. diese Art von Messungen liefern weitere Informationen zur Interpretation der Daten hinsichtlich z.B. der impaktinduzierten Zerstörung der Gesteine. Auch zeigen sich bei beiden Bohrungen Unterschiede in der inneren Oberfläche. Dies ist auf Unterschiede vor allem im Tongehalt zurückzuführen. Die Analyse der Temperaturmessungen in beiden Bohrungen ergab, dass diese - bedingt durch deutliche Unterschiede der Wärmeleitfähigkeit - sehr sensitiv auf Änderungen in der Lithologie reagieren können. Sowohl die innere Oberfläche als auch Temperaturmessungen im Bohrloch können daher als zusätzliche Parameter zur Bestimmung von lithologischen Grenzen genutzt werden.

Nachdem in Mayr et al. (2007, 2008, 2009) die physikalischen Eigenschaften von Postimpaktiten und Impaktiten der beiden untersuchten Krater betrachtet wurden, wurden in Popov et al. (2014); Mayr and Popov (2015) die Besonderheiten der physikalischen Eigenschaften der Impaktite mit Ergebnissen aus ähnlichen früheren Arbeiten an zwei weiteren Einschlagskratern verglichen. In Popov et al. (2014) wird zunächst zwischen Impakt Brekzien (inklusive der Impaktschmelzgesteine) und den geschockten und verschobenen Gesteinen des getroffenen Bereiches (*target rocks*) unterschieden. In Mayr and Popov (2015) wird noch innerhalb der ersten Gruppe zwischen den Impaktbrekzien (Suevite und Lithische Brekzien) und den Impaktschmelzgesteinen unterschieden. Die Arbeiten bestätigen, dass die physikalischen Eigenschaften den Einfluss des Meteoriteneinschlages wiedergeben und genutzt werden können, um zwischen den unterschiedlichen Lithologien zu unterscheiden und die Effekte des Meteoriteneinschlages auf die betroffenen Gesteine zu untersuchen. Hierbei beeinflusst die Porosität die Charakteristika von Impaktiten (wie auch von Postimpaktiten) am meisten. Unter Porosität ist hier sowohl die mittels Labormessungen quantifizierbare Porosität gemeint, als auch die Form der Poren (z.B. Risse, geschlossener Porenraum). In den Impaktbrekzien wird eine durch den Impakt bedingte Erhöhung der Porosität beobachtet, wogegen die Impaktschmelzgesteine offensichtlich niederporösere Gesteine sind. Somit können

die gesteinsphysikalischen Eigenschaften als Indikator und Abgrenzung z.B. zwischen Impaktbrekzien und Impaktschmelzgesteinen dienen. Signifikant ist aber auch der Einfluss der Mineralogie des *targets* auf die Impaktbrekzien (Suevite und Lithische Brekzien) und der Impaktschmelzgesteine.

Die physikalischen Eigenschaften der *target rocks* werden durch drei Faktoren beeinflusst, zum einen (1) die Lithologie (d.h. Mineralogie), dann durch (2) die geologischen Vorgänge vor dem Impact sowie durch (3) Effekte, die durch den Impact selbst hervorgerufen wurden (Schock-Metamorphose). Die physikalischen Eigenschaften der *target rocks* korrelieren mit dem Grad der Schock-Metamorphose. Dies ist hauptsächlich in der impaktbedingten Erhöhung der Porosität begründet. Des Weiteren wird eine Verringerung der seismischen Geschwindigkeiten in den *target rocks* aufgrund der erhöhten Mikrorissigkeit und weniger aufgrund einer Erhöhung der Porosität beobachtet. Hierdurch helfen die physikalischen Eigenschaften bei der Interpretation der Eigenschaften der *target rocks* hinsichtlich der Schockmetamorphose oder des Ursprungs und der Orientierung von Megablöcken. Aufgrund Ihrer Entstehungsgeschichte sind die Impaktite in einem Krater generell heterogen verteilt. Der beobachtete Grad der Zerstörung ist abhängig von der Skala (Feld, Bohrloch, Probe), dieses trifft auch auf die untersuchten physikalischen Eigenschaften zu (Mayr et al., 2008, 2009; Popov et al., 2014; Mayr and Popov, 2015).

Bei der Interpretation der physikalischen Eigenschaften von Impaktiten waren zwei Punkte wesentlich. Zum Einen war es die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Gesteinsphysikern, theoretischen Geophysikern, Geologen und Mineralogen. Zum Anderen ermöglichte die gute Datenbasis, nicht nur einzelne Proben (Probenskala) zu betrachten, sondern auch impaktinduzierte Änderungen der petrophysikalischen Eigenschaften in anderen Skalen (Bohrloch und Feldskala) zu erfassen.

Die in dieser Habilitationsschrift vorgestellten Arbeiten unterstützen nicht nur die petrophysikalische und lithologische Interpretation der beiden Impactstrukturen Chicxulub und Chesapeake, sondern sie liefern darüber hinaus Beiträge zur Charakterisierung einer großen Bandbreite von Gesteinen wie Karbonaten, Tonen und Plutoniten. Insbesondere jedoch liefern sie einen umfangreichen Beitrag zum besseren Verständnis der physikalischen Eigenschaften von Impaktiten und hierdurch zu einer besseren Interpretierbarkeit der im Umfeld von Impactstrukturen gewonnenen Feld-, Bohrloch- und Labordaten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Foreword</b>	<b>ii</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Summary</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Methodische Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1 Impaktite . . . . .	4
2.2 Gesteinsphysikalische Eigenschaften und Zusammenhänge . . . . .	5
2.3 Skalenabhängigkeit und Übertragbarkeit . . . . .	6
<b>3 Experimentelle Methoden und Messungen</b>	<b>7</b>
3.1 Probennahme und Messlogistik . . . . .	7
3.2 Hintergrundinformationen . . . . .	7
3.3 Sättigung; Porosität und Dichte; thermische Eigenschaften . . . . .	8
3.4 Geschwindigkeiten elastischer Wellen . . . . .	9
3.5 Messungen für die Abschätzung der Permeabilität und weitere Interpretationen . . . . .	10
<b>4 Impaktstruktur Chicxulub</b>	<b>11</b>
4.1 Lage und Entstehung der Impaktstruktur Chicxulub . . . . .	12
4.2 Die Bohrung Yax-1 (Chicxulub) . . . . .	12
4.3 Verwendete Lithostratigraphie . . . . .	13
4.4 Physikalische Eigenschaften und deren Gruppierung . . . . .	14
4.5 Übertragbarkeit der im Labor bestimmten elastischen Eigenschaften . . . . .	16
4.6 Quasikontinuierliche Logs: elastische und elektrische Eigenschaften . . . . .	18
4.6.1 Logs: Elastische Eigenschaften . . . . .	18
4.6.2 Logs: Elektrische Eigenschaften . . . . .	19

<b>5 Chicxulub: Permeabilität</b>	<b>21</b>
5.1 Anwendungsgebiete der Permeabilität . . . . .	21
5.2 Verwendete Modelle zur Abschätzung der Permeabilität . . . . .	21
5.3 Gruppierung der inneren Oberfläche . . . . .	22
5.4 Vergleich der verschiedenen Modelle und gemessene Werte . . . . .	22
5.5 Abgeschätzte hydraulische Permeabilitäten in Yax-1 . . . . .	25
5.6 Schlussfolgerung für die Modellierung des Temperaturfeldes . . . . .	26
<b>6 Chicxulub: Kombinierte Interpretation der einzelnen Tiefenbereiche</b>	<b>27</b>
6.1 Tertiäre postimpakt-Kalksteine (404 m - 794 m) . . . . .	27
6.2 Suevitishe Impaktite (794.43 m - 894.94 m) . . . . .	27
6.3 Cretaceous Megablocks (895 m - 1511 m) . . . . .	30
<b>7 Impaktstruktur Chesapeake</b>	<b>32</b>
7.1 Lage und Entstehung der Impaktstruktur Chesapeake . . . . .	33
7.2 Die Bohrungen Eyreville A & B (Chesapeake) . . . . .	33
7.3 Physikalische Eigenschaften und deren Gruppierung . . . . .	33
<b>8 Chesapeake: Kombinierte Interpretation der einzelnen Tiefenbereiche</b>	<b>37</b>
8.1 Postimpakt-Sedimente (oberhalb von 440 m) . . . . .	37
8.2 Exmore-Brekzien und Sedimentblöcke (440 m - 1096 m) . . . . .	37
8.3 Granitische Megablöcke (1096 m - 1371 m) . . . . .	38
8.4 Sedimenten und lithischen Blöcken (1371 m - 1397 m) . . . . .	40
8.5 Suevite und polymikte lithische Impaktbrekzien (1397 m -1551 m) . . . . .	40
8.6 Schiefer, Granite und Pegmatite (below 1551 m) . . . . .	40
<b>9 Besonderheiten von Impaktiten</b>	<b>42</b>
9.1 Puchezh-Katunki und Ries: <i>shocked and displaced target rocks</i> . . . . .	43
9.2 Chicxulub und Chesapeake: <i>shocked and displaced target rocks</i> . . . . .	43
9.3 Alle Strukturen: <i>Suevitic Breccia and Melt rocks</i> . . . . .	44
9.4 Alle Impaktite . . . . .	46



<b>10 Schlussfolgerungen</b>	<b>47</b>
10.1 Interpretation aller Daten . . . . .	47
10.2 Praktische Schlussfolgerungen . . . . .	48
10.3 Impaktite . . . . .	49
10.4 Anwendung und Ausblick . . . . .	50
<b>Danksagung</b>	<b>51</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>52</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>58</b>