

## Experimentgestützte Untersuchung zum Abrieb von Tektiten und anderen Gläsern im Zuge fluviatilen Transportes über lange Strecken

Von MICHAEL HURTIG

### Zusammenfassung

Durch ein Experiment mittels Abriebtrommel und durch theoretische Berechnungen auf Grundlage des Sternberg'schen Gesetzes konnte gezeigt werden, dass Tektite, wie beispielsweise Moldavite, und andere Gläser als Gerölle in Flüssen über lange Strecken transportiert werden können. Im Experiment wurden die verwendeten Tektite in etwa 1,5-mal so stark abgerieben wie die Quarze. Für Obsidian/Quarz belief sich diese Verhältniszahl auf rund 2,5. Ein Vergleich der allgemeinen Härtewerte der entsprechenden Probengruppen zeigt, dass diese experimentell ermittelten Werte durchaus realistisch sind. Unter Berücksichtigung der Masseverluste durch Zertrümmerung erhöhten sich die Quotienten auf ca. 1,6 (Tektite/Quarz) und 5,1 (Obsidian/Quarz). Die Zertrümmerung ist allerdings stark von probenspezifischen Eigenschaften und vom Zufall während des jeweiligen Transportprozesses abhängig. Die Ergebnisse sind daher, im Gegensatz zu denen bezüglich des reinen Abriebs, nicht allgemeingültig. Speziell für Tektite ist ein vollständiger Abrieb beziehungsweise eine übermäßig starke Zertrümmerung unter günstigen Bedingungen, wie für die Altelbe/-moldau aufgezeigt (Reduzierungsziffer  $c_{\text{TektElbe/Moldau}}^* = 0,0016 \text{ km}^{-1}$ ), auch nach mehreren hundert Kilometern Flusstransport nicht zu erwarten. Dadurch wird bezüglich der Lausitzer Moldavite, welche ausschließlich in fluviatilen Sedimenten der Altelbe (Schotter der Senftenberger und der Bautzener Elbe sowie deren glaziale Umlagerungen) in Ostsachsen und Südostbrandenburg (Deutschland) gefunden werden können, eine Herleitung aus Südböhmen zusätzlich bekräftigt.

### Abstract

#### Experimental study on the abrasion of tektites and other glasses in the course of fluvial transport over long distances

An abrasion mill experiment and theoretical calculations using Sternberg's law have shown that tektites, such as moldavites, and other glasses can be transported as pebbles over long distances in rivers. In the experiment, tektites were abraded about 1.5 times as much as quartz. For obsidian/quartz this ratio was approximately 2.5. A comparison of general hardness values of the corresponding sample groups shows that these experimentally determined values are quite realistic. Taking account of mass losses due to fragmentation, the quotients increased to about 1.6 (tektites/quartz) and 5.1 (obsidian/quartz). However, fragmentation is greatly dependent on sample-specific properties and randomness in the respective transport processes. The results are therefore, unlike those relating only to abrasion, not universally valid. Especially for tektites, complete abrasion or excessive fragmentation is not expected under favorable conditions even after several hundred kilometers of fluvial transport, as demonstrated for the ancient

Elbe/Vltava River (mass reduction coefficient  $c_{\text{TekElbe/Vltava}}^* = 0.0016 \text{ km}^{-1}$ ). This reaffirms a derivation from South Bohemia for Lusatian moldavites, which are exclusively found in fluvial sediments of the ancient Elbe River (gravels of the Senftenberg and Bautzen Elbe River and their glacially reworked deposits) in East Saxony and South-East Brandenburg (Germany).

**Keywords:** Abrasion, Sternberg's law, tektite, moldavite, Lusatian moldavites, glasses, fluvial transport, Senftenberg Elbe River.

## 1 Einleitung

Tektite sind  $\text{SiO}_2$ -reiche Gläser (60–85 Gew.-%  $\text{SiO}_2$ ) mit geringem Wassergehalt (< 0,02 Gew.-%), die auf einen kosmischen Einschlag auf der Erde zurückzuführen sind. Sie bestehen aus aufgeschmolzenem und im Zuge eines ballistischen Fluges zu Glas erstarrtem Erdoberflächenmaterial, welches in sogenannten Streufeldern niederging (HURTIG 2017 und darin genannte Literatur). Aufgrund voneinander unabhängiger Einschlagsereignisse unterscheidet man das

Nordamerikanische Streufeld (Bezeichnung der Tektite: Bediasite und Georgiite; Alter: 35,4 Ma), das Mitteleuropäische Streufeld (Moldavite/Vltaviny; 14,8 Ma), das Streufeld der Elfenbeinküste (Ivoirite; 1,1 Ma), das Australasiatische Streufeld (u. a. Indochinite, Philippinite, Billitonite, Javanite und Australite; 0,8 Ma) und das Zentralamerikanische Streufeld (Belzeite; 0,8 Ma?; Abb. 1). Tek-

<sup>1</sup> SCHMIEDER et al. 2018

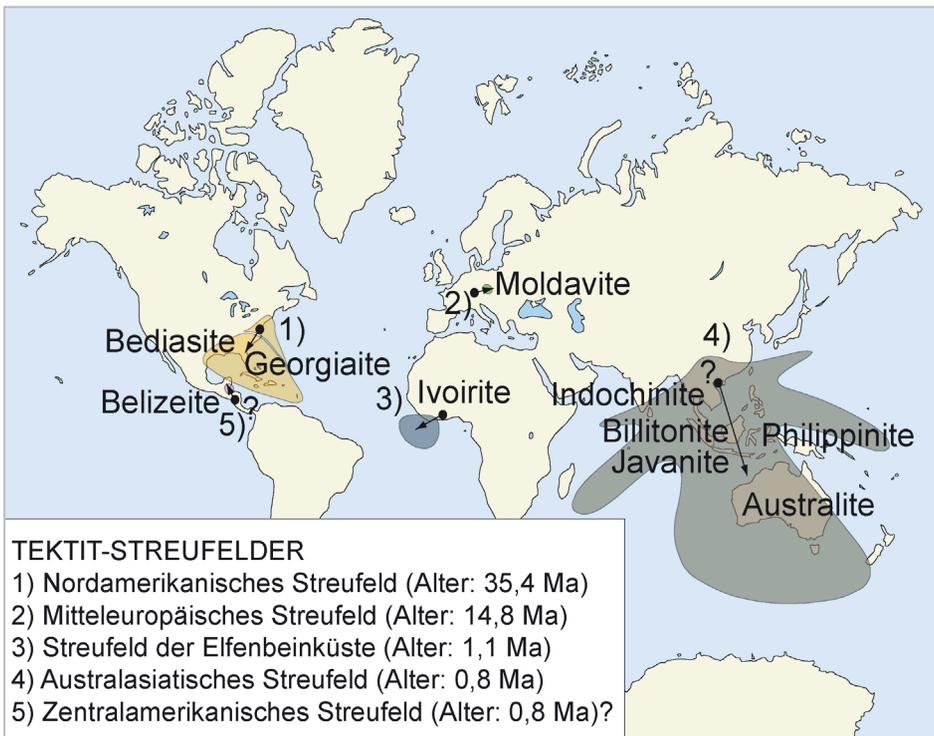


Abb. 1: Geographische Darstellung der fünf (bisher) weltweit bekannten Tektit-Streufelder mit Bezeichnungen der Tektite; Karte stark vereinfacht aus HURTIG (2014, S. 57) nach Vorlagen von MCCALL (2001), McNAMARA & BEVAN (2001), LANGE (2005) und WHYMARK (2013).

tite und andere erdoberflächennah abgelagerte oder anstehende Gläser, wie Obsidian (vulkanisches Glas), unterliegen seit ihrer Entstehung destruktiven Korrosions- und Umlagerungsprozessen. Obwohl speziell die Tektite als chemisch äußerst verwitterungsresistent gelten (BARKATT et al. 1984), gehen die Meinungen zu ihrer mechanischen Beständigkeit weit auseinander. Einige Autoren sprechen sich dafür aus, dass Moldavite als Vertreter der Tektite nur einige zehn Kilometer durch Flüsse transportiert werden können, bevor ein vollständiger Abrieb erfolgt (ŽÁK 2009, BRACHANIEC 2018a, b). Dem steht beispielsweise die durch HURTIG (2017) objektiv hinreichend begründete Annahme entgegen, dass die Lausitzer Moldavite durch fluvia-

tilen Transport aus Südböhmen hergeleitet wurden und somit Transportstrecken von mehreren hundert Kilometern überstanden haben (Abb. 2). Diesbezüglich führten bereits BUCHNER & SCHMIEDER (2009) an, dass Böhmisches und Lausitzer Moldavite mehrfach durch Flüsse umgelagert wurden.

Unter natürlichen Bedingungen kann das Abriebverhalten von Tektiten und anderen Materialien nicht oder nur unter erheblichem Aufwand beobachtet werden. Es ist allerdings bekannt, dass Sedimente in Flüssen schiebend-gleitend, rollend, springend (Boden- bzw. Geschiebefracht) oder schwimmend, schwebend (Suspensionsfracht) transportiert werden (PROTHERO & SCHWAB 1996). Die moldavitführenden Sedimente der Altelbe

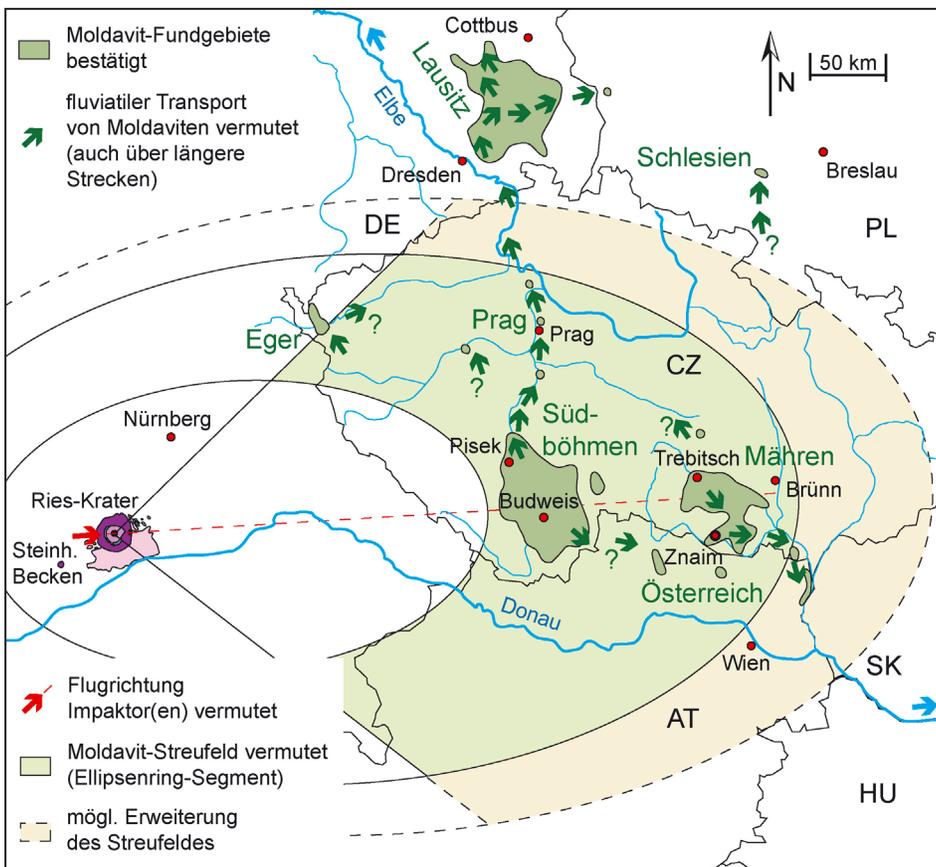


Abb. 2: Das Mitteleuropäische Tektit-Streufeld. Das Lausitzer Moldavit-Fundgebiet, das Schlesische Moldavit-Fundgebiet sowie Teile des Nordwestböhmisches und des Österreichischen Moldavit-Fundgebietes liegen außerhalb des ursprünglichen Streufeldes und können nur durch fluvialen Transport von Moldaviten über längere Strecken entstanden sein; Karte stark vereinfacht aus HURTIG (2017, S. 179) mit Darstellung des Ries-Kraters nach Vorlagen von MATTMÜLLER (1994) und HÜTTNER & SCHMIDT-KALER (2015).

in der Lausitz sind größtenteils dem Ablagemilieu in einem verflochtenen Flusssystem zuzuordnen und bestehen überwiegend aus der Bodenfracht (LANGE 1995, LANGE et al. 2015). Auf Grundlage eines Experimentes soll in der vorliegenden Arbeit der fluvial bedingte Abrieb von verschiedenen Tektiten, Obsidianen, künstlichen Gläsern und von diversen Mineralen (und Gesteinen) untersucht werden. Es gibt zwei Hauptgruppen von Experimenten, die hierzu geeignet sind. Zum einen sind das Experimente mittels künstlicher Gerinne (flumes), zum anderen Experimente mittels sogenannter Abriebtrommeln (abrasion mills). Ein mehrere zehn (bis mehrere hundert) Meter langes oder ein in sich geschlossenes hydraulisches Gerinne würde zwar die Transport- und Ablagerungsbedingungen in natürlichen Fließgewässern am besten nachbilden, hat aber neben einem großen technischen (und finanziellen) Aufwand den entscheidenden Nachteil, dass weder die Transportstrecke noch die Transportgeschwindigkeit einzelner Sedimentkomponenten (Gerölle) gemessen beziehungsweise berechnet werden kann (MIKOŠ 1993). Da diese physikalischen Größen aber für die Beurteilung von festgestellten, abriebbedingten Masseverlusten und für theoretische Berechnungen im Zusammenhang mit dem Abrieb unabdingbar sind, kann folglich nur eine Abriebtrommel zum Einsatz kommen. Hierbei ist die Versuchsanordnung so zu wählen, dass sich das eingefüllte Sediment im zugegebenen Wasser rollend bis kaskadierend bewegt (MIKOŠ 1993; Abb. 3). Die durch BRACHA-

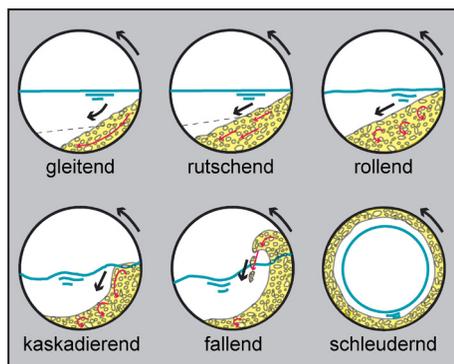


Abb. 3: Bewegungsarten von Sedimenten in Abriebtrommeln; Grafik verändert nach MIKOŠ (1993).

NIEC (2018a, b) in diesem Zusammenhang durchgeführten Experimente an Tektiten (Moldaviten) erfüllen diese Bedingungen nicht und liefern daher keine realistischen Ergebnisse<sup>2</sup>.

## 2 Material und Methodik

Als Abriebtrommel kam ein Betonmischer Rapid des Herstellers ATIKA, Typ RA mit Baujahr 1995 (max. Füllung 140 l; Mischtrommel  $n = 28$  U/min;  $U_{\text{innen}} = 188,5$  cm;  $r = 30$  cm; Abb. 4) zum Einsatz. Dieser wurde mit insgesamt 9 l Sand, 16 l Sand-Kies-

<sup>2</sup> BRACHANIEC (2018a, b) verwendete für seine Experimente einen Freifallmischer LPM-20 der Firma Glass GmbH & Co. KG. Dieser Mischer für kleine Chargen hat einen Radius von nur 15 cm, eine Höhe von 40 cm und ist aus Sicht des Autors nicht zur Nachahmung von Sedimenttransport in Flüssen geeignet. Aufgrund der geringen Abmessungen wird bei entsprechender Befüllung mit Sand-Kies-Gemischen kein rollender Sedimenttransport simuliert. Das Gerät gleicht bei gegebener Versuchsanordnung eher einem Mahlwerk. Weiterhin ging BRACHANIEC (2018a, b) in seinen Ausführungen nicht auf das Sternberg'sche Gesetz (siehe Kapitel 4 Diskussion) ein, untersuchte keine Kontroll-Probengruppe (Quarz) und verwendete unrealistische sowie für den Ausgang der Versuche ungünstige Mischungsverhältnisse der Proben (einzelne kleine Moldavite vs. grobkörniges Sediment; davon 10 bis 22 % mit Korndurchmessern  $> 8$  cm). Den gleichen Experimentaufbau legte er seiner aktuellen Forschungsarbeit zugrunde (BRACHANIEC 2019).



Abb. 4: Für das Experiment als Abriebtrommel genutzter Betonmischer Rapid des Herstellers ATIKA.



Abb. 5: Für das Experiment verwendete Sedimentproben. (a) 16 l Sand-Kies-Gemisch (b) 9 l Sand (c) Betonmischer befüllt mit insgesamt 25 l Sand-Kies-Gemisch + 10 l Wasser. Das Sediment bewegt sich überwiegend rollend bis kaskadierend (vergl. Abb. 3). Die Mischflügel in der Trommel sorgen neben einer zusätzlichen Durchmischung des Sedimentes dafür, dass Teile dessens in springende, der Saltation vergleichbare Bewegungen versetzt werden.

Gemisch (entnommen aus dem anstehenden Schotterkörper im Kiestagebau Laußnitz I bei Ottendorf-Okrilla<sup>3</sup>; Anteil Feinsand/Silt/Ton < 10 %; größte Gerölle: 71,9 x 30,3 x 19,4 mm und 56,6 x 41,3 x 40,4 mm) sowie 10 l Wasser befüllt (Abb. 5). An Proben wurden 2 Lausitzer Moldavite, 4 Südböhmische Moldavite, 2 Australite, 6 Indochinite, 5 scharfkantige

<sup>3</sup> Für das Experiment wurde ein Sediment gewählt, von dem bekannt ist, dass es tektit-/moldavitführend ist. Zudem war es für den Autor wichtig, dass es andere Komponenten (hier: [Elb-]Achate) besitzt, die konkreten Herkunftsgebieten zugeordnet werden können und somit Aussagen über erfolgte Transportstrecken zulassen (Kontrollebene).

Obsidiane, 2 vorgetrommelte Obsidiane, 4 künstliche Gläser und 7 (Mineral-)Gerölle mit hohem Wiedererkennungswert (1 Feuerstein, 2 [Elb-]Achate, 1 Rauchquarz, 1 Amethyst, 1 Bergkristall und 1 Feldspat) hinzugegeben. Die Proben wurden im Vorfeld fotografiert, vermessen, gewogen und anhand einiger Merkmale beschrieben (Abb. 6, Tab. 1). Im Ruhezustand des Mixers konnte ein wassergesättigtes Sedimentpaket mit einer maximalen Höhe von 22 cm, bedeckt mit einer Wassersäule von 3 cm, bestimmt werden. Im Rahmen des Mischvorganges erfolgte eine Verdichtung des Sedimentkörpers (nach

1 h Laufzeit: Sed.-Höhe<sub>max</sub> = 20 cm, H<sub>2</sub>O-Säule = 5 cm). Der Innenradius der Mischtrommel über dem Sediment betrug somit ca. 10 cm. Ein Testlauf des Experimentes wurde am 11.07.2018 mit 1 h Laufzeit und Zwischenuntersuchung der Proben durchgeführt. Im Zeitraum vom 12.07.2018 bis zum

15.07.2018 wurde der befüllte Mischer für weitere 46 h 35 min in Betrieb genommen. Danach erfolgte die abschließende Untersuchung der Proben (Abb. 7, Tab. 1). Die Transportstrecken des Sedimentes und somit auch der Proben wurden näherungsweise über die Multiplikation der Drehzahl mit der Laufzeit und dem



Abb. 6: Die Proben vor dem Experiment. 1-2: Lausitzer Moldavite; 3-6: Südböhmische Moldavite; 7-8: Australite; 9-14: Indochinite; 15-19: scharfkantige Obsidiane; 20-21: vorgetrommelte Obsidiane; 22-25: künstliche Gläser; 26: Feuerstein; 27-28: (Elb-)Achat; 29: Rauchquarz; 30: Amethyst; 31: Bergkristall; 32: Feldspat.

Innenumfang der Trommel an der Basis ( $U_B = U_{\text{innen}} = 188,5 \text{ cm}$ ) beziehungsweise am Top des Sedimentpaketes ( $U_T = 60,8 \text{ cm}$ ) berechnet. Nach 1 h Laufzeit legte das Sediment folglich eine Strecke von rund 1,0 km (Top) bis 3,1 km (Basis) und im Durchschnitt (Mitte der Sedimentsäule; ausreichende Durchmischung lag

vor) von rund 2,1 km zurück. Für die gesamte Dauer des Experimentes (47 h 35 min) ergab sich demnach eine durchschnittliche Transportstrecke von rund 100,5 km (Top: 48,6 km; Basis: 150,7 km).



Abb. 7: Die Proben nach dem Experiment mit einer durchschnittlichen Transportstrecke von rund 100,5 km. 1–2: Lausitzer Moldavite; 3–6: Südböhmische Moldavite; 7–8: Australite; 9–14: Indochinite; 15–19: scharfkantige Obsidiane; 20–21: vorgetrommelte Obsidiane; 22–25: künstliche Gläser; 26: Feuerstein; 27–28: (Elb-)Achate; 29: Rauchquarz; 30: Amethyst; 31: Bergkristall; 32: Feldspat nicht mehr feststellbar.

Tab. 1: Ausführliche Probanden.

Nr.	Bezeichnung	Fundgebiet (-stelle)	Ergänzende Beschreibung	Abmessungen (mm)	Masse (g)	Masse (g) nach 1 h (Ø 2,1 km)	Abmessungen (mm) nach 47,5 h (Ø 100,5 km)	Masse (g) nach 47,5 h (Ø 100,5 km)	Masseverlust (%) nach 47,5 h (Ø 100,5 km)
1	Moldavit	Lausitz (Ott.-Okr.)	abgebrochen, Grübchen	16,2 x 12,4 x 4,8	1,19	1,19	15,9 x 12,3 x 4,7	1,17	1,7
2	Moldavit	Lausitz (Ott.-Okr.)	abgebrochen, Grübchen	16,2 x 12,7 x 5,3	1,07	1,07	15,9 x 12,6 x 5,2	1,05	1,9
3	Moldavit	S-Böhmen (Chlum)	kl. Abplatzungen, skulpturiert	24,6 x 14,0 x 11,3	2,63	2,63	24,2 x 13,2 x 10,7	2,55 + 0,01 (1 Stk.)	2,7 (+Zertr. 3,0)
4	Moldavit	S-Böhmen (Chlum)	kl. Abplatzungen, skulpturiert	24,8 x 12,6 x 7,9	2,38	2,38	24,5 x 12,2 x 7,9	2,29 + 0,02 (1 Stk.)	2,9 (+Zertr. 3,8)
5	Moldavit	S-Böhmen (Slavče)	gr. Abplatzungen	31,1 x 15,4 x 8,4	4,29	4,28	30,0 x 15,0 x 8,4	4,15	3,3
6	Moldavit	S-Böhmen (Slavče)	gr. Abplatzungen, interne Blase	20,7 x 16,9 x 10,3	4,10	4,10	20,6 x 16,6 x 9,8	4,01	2,2
7	Australit	WA (Nullarbor Plain)	Kern	18,7 x 17,2 x 14,9	5,23	5,23	18,6 x 17,0 x 14,9	5,13	1,9
8	Australit	WA (Nullarbor Plain)	halber Kern	30,9 x 26,4 x 22,2	19,65	19,65	30,6 x 26,1 x 22,2	19,28	1,9
9	Indochinit	China?	Bruchstück	22,4 x 21,9 x 14,3	8,52	8,52	22,1 x 21,7 x 13,9	8,34	2,1
10	Indochinit	China?	Tropfen	55,9 x 18,8 x 17,0	17,02	17,02	53,7 x 18,6 x 16,3	16,65	2,2
11	Indochinit	China?	kl. Abplatzungen	26,2 x 19,5 x 16,7	9,55	9,55	26,2 x 18,8 x 16,2	9,36	2,0
12	Indochinit	Thailand?	gr. Abplatzungen, flach	47,0 x 41,0 x 9,4	15,14	15,08	46,0 x 35,4 x 9,3	14,49 + 0,03 (5 Stk.)	4,1 (+Zertr. 4,3)
13	Indochinit	China?	abgebrochen, kl. Tropfen	30,1 x 17,6 x 14,4	7,43	7,43	29,5 x 17,4 x 14,0	7,30	1,7
14	Indochinit	China?	feine Grübchen	21,3 x 17,6 x 16,9	6,92	6,91	21,2 x 17,3 x 16,6	6,78	2,0
15	Obsidian	Lipari („Rocche R.“)	scharfkantig, flach, lagig	46,9 x 34,2 x 12,3	15,45	15,35	45,1 x 30,5 x 11,5	14,39 + 0,09 (1 Stk.)	6,3 (+Zertr. 6,9)
16	Obsidian	Lipari („Rocche R.“)	scharfkantig, länglich	53,9 x 23,2 x 12,4	13,98	13,89	– (zerbrochen)	9,61 + 3,61 (3 Stk.)	5,4 (+Zertr. 31,3!)

Nr.	Bezeichnung	Fundgebiet (-stelle)	Ergänzende Beschreibung	Abmessungen (mm)	Masse (g)	Masse (g) nach 1 h (Ø 2,1 km)	Abmessungen (mm) nach 47,5 h (Ø 100,5 km)	Masse (g) nach 47,5 h (Ø 100,5 km)	Masseverlust (%) nach 47,5 h (Ø 100,5 km)
17	Obsidian	Lipari („Rocche R.“)	scharfkantig, blockig	36,8 x 29,6 x 20,9	20,65	20,58	36,5 x 27,4 x 20,2	19,98	3,2
18	Obsidian	Lipari („Rocche R.“)	scharfkantig, deutliche Lage	29,7 x 14,8 x 10,9	4,26	4,24	27,3 x 13,9 x 10,9	4,09	4
19	Obsidian	Lipari („Rocche R.“)	scharfkantig, deutliche Lage	25,3 x 14,0 x 10,1	3,22	3,20	23,7 x 13,5 x 9,7	3,10	3,7
20	Obsidian	? (ggf. Arizona)	vorgetrommelt	35,7 x 29,7 x 25,8	30,02	30,00	35,6 x 29,6 x 25,4	29,54	1,6
21	Obsidian	? (ggf. Arizona)	vorgetrommelt	30,2 x 25,7 x 20,2	17,57	17,57	30,0 x 25,7 x 20,1	17,29	1,6
22	künstl. Glas	Bauschutt (Ott.-Okr.)	scharfkantig, blockig, interne Blasen	59,9 x 55,8 x 32,5	104,1	103,3	52,2 x 51,6 x 32,0 (12 Stk.)	93,87 + 0,52 (+ Zertr. 9,8)	9,3
23	künstl. Glas	Bauschutt (Ott.-Okr.)	scharfkantig	39,6 x 26,4 x 18,1	18,55	18,52	37,9 x 24,9 x 17,3 (2 Stk.)	17,71 + 0,08 (+ Zertr. 4,5)	4,1
24	künstl. Glas	Bauschutt (Ott.-Okr.)	scharfkantige interne Blasen	31,7 x 25,6 x 18,2	16,34	16,27	31,6 x 24,2 x 17,4 (3 Stk.)	15,57 + 0,16 (+ Zertr. 4,7)	3,7
25	künstl. Glas	Bauschutt (Ott.-Okr.)	scharfkantig, blasig-schaumig	31,4 x 25,8 x 13,5	8,08	7,92	– (zerbrochen)	4,90 + 2,51 (3 Stk.)	8,3
26	Feuerstein	(Königs Wusterh.)	Ellipsoid	33,1 x 26,1 x 15,8	20,19	20,19	33,1 x 26,1 x 15,7	20,12	0,3
27	(Elb-)Achat	Lausitz (Ott.-Okr.)		35,4 x 27,1 x 22,3	21,31	21,52 (+ H2O!)	35,3 x 27,1 x 22,3	21,22	0,4
28	(Elb-)Achat	Lausitz (Ott.-Okr.)	verwittert	39,9 x 25,1 x 15,6	23,33	23,33	39,8 x 25,1 x 15,5	23,07	1,1
29	Rauchquarz	Lausitz (Ott.-Okr.)		22,1 x 17,4 x 14,4	7,73	7,73	22,1 x 17,4 x 14,3	7,62	1,4
30	Amethyst	Lausitz (Ott.-Okr.)	Kristallspitze	18,8 x 15,3 x 11,5	3,60	3,60	18,6 x 15,3 x 11,5	3,55	1,4
31	Bergkristall	Lausitz (Ott.-Okr.)		20,3 x 17,3 x 11,4	5,21	5,21	20,1 x 17,3 x 11,4	5,12	1,7
32	Feldspat	Lausitz (Ott.-Okr.)	rhomboedrisch	17,5 x 16,2 x 9,5	2,71	2,75 (+ H2O!)	– (zerbrochen)	nicht identifizierbar	? (nicht feststellbar)

### 3 Ergebnisse

Nach 1 h Laufzeit ( $s_{01h} \sim 2,1$  km) konnte bei den Tektiten lediglich an 3 von 14 Proben ein sehr geringer Masseverlust ( $MV \sim 0,2\text{--}0,4\%$ ) festgestellt werden. Alle scharfkantigen Obsidiane zeigten geringfügig höhere MV ( $0,3\text{--}0,6\%$ ). Bei den vorgetrommelten Obsidianen konnte hingegen nur bei 1 von 2 Proben ein äußerst geringer MV ( $0,1\%$ ) nachgewiesen werden. Einen größeren Schwankungsbereich lieferten die künstlichen Gläser ( $0,2\text{--}2,0\%$ ). Bei den (Mineral-)Geröllen konnte kein MV belegt werden. Im Gegenteil, ein Achat und der Feldspat waren schwerer, als vor dem Experiment (Grund: Wassereinlagerung und Wiegung vor ausreichender Trocknung). Nach 47 h 35 min ( $s_{047,35h} \sim 100,5$  km) zeigten alle Proben MV. Der Schwankungsbereich des abriebedingten MV lag bei den 14 Tektiten zwischen 1,7 und 4,1 % (zuzüglich Zertrümmerung: bis 4,3 %;  $MV_{\text{OTekAbr}} \sim 2,3\%$ ;  $MV_{\text{OTekAbr+Zertr}} \sim 2,4\%$ ). Die Werte der 7 Obsidiane lagen zwischen 1,6 und 6,3 % (zzgl. Zertr.: bis 31,3 %;  $MV_{\text{OObsAbr}} \sim 3,7\%$ ;  $MV_{\text{OObsAbr+Zertr}} \sim 7,5\%$ ), die der 4 künstlichen Gläser zwischen 3,7 und 9,3 % (zzgl. Zertr.: bis 39,6 %;  $MV_{\text{OGlaAbr}} \sim 6,4\%$ ;  $MV_{\text{OGlaAbr+Zertr}} \sim 14,7\%$ ) und die der (Mineral-)Gerölle zwischen 1,4 und 1,7 % ( $MV_{\text{OQzAbr}} \sim 1,5\%$ ) bezüglich der 3 Quarze sowie zwischen 0,3 und 1,1 % ( $MV_{\text{OA/FAbr}} \sim 0,6\%$ ) bezüglich der 2 Achate und des Feuersteins. Der Abrieb (unabhängig vom Material) war an scharfkantigen, frisch gebrochenen oder deutlich skulpturierten Proben besonders stark. Der Feldspat unterlag einer stärkeren Zertrümmerung und konnte nach dem Experiment nicht mehr zweifelsfrei identifiziert werden.

### 4 Diskussion

Die experimentell ermittelten MV durch Abrieb liegen im untersten Bereich der zu erwartenden Werte, sind aber anhand der Probengruppe Quarz durchaus mit Werten aus ähnlichen Experimenten zu vergleichen (SHAW & KELLERHALS 1982, MIKOŠ 1993). Auf Grundlage des Sternberg'schen Gesetzes ( $G_x = G_0 \cdot e^{-cx}$ ) können theoretische Berechnun-

gen zum fluviatil bedingten Abrieb durchgeführt werden (BENDEL 1944).  $G_0$  und  $G_x$  entsprechen dabei der Masse (oder auch dem Korndurchmesser) der Geschiebefracht an einer Nullstelle und nach  $x$  km Flusstransport. Die materialabhängige Abriebsziffer  $c$  (auch: spezifischer Abrieb, Abriebrate oder Abriebskoeffizient) wird in einschlägiger Literatur für diverse Minerale und Gesteine angegeben. Aufgrund unterschiedlicher Versuchsaufbauten oder gegebener Bedingungen variieren die Werte allerdings sehr stark, so beispielsweise für die Gruppe Quarz, Quarzit und Chert von 0,0001 bis  $0,1 \text{ km}^{-1}$  (KODAMA 1994, MALCHEREK 2007, CHATANANTAVET et al. 2007). Dabei ist festzustellen, dass Laborversuche teilweise um Größenordnungen niedrigere  $c$ -Werte ergeben als Feldstudien. Zu letzteren ist anzumerken, dass diese nicht auf Messungen an einer klar definierten Sedimentprobe basieren, sondern auf Beobachtungen zum Sediment allgemein. Die Geschiebefracht an der Nullstelle entspricht dabei nicht der Geschiebefracht nach  $x$  km Flusstransport. Neben dem fluviatil bedingten Abrieb gibt es weitere Faktoren, die zu einer Verfeinerung (in Ausnahmefällen auch zu einer Vergröberung) des Sedimentes flussabwärts beitragen. Die wichtigsten sind der selektive Transport, die physikalische (Zertrümmerung, Absplittierung) und chemische Verwitterung (Lösung, Oxidation, Hydrolyse) und die Sedimentzufuhr aus Nebenflüssen oder durch Bankerosion (MIKOŠ 1993). Wird das Sternberg'sche Gesetz auf Feldstudien angewendet, sind die Auswirkungen dieser Faktoren praktisch gesehen im Wert der Abriebsziffer  $c$  enthalten. Das spiegelt sich in höheren (bezogen auf den reinen Abrieb verfälschten) Werten wider. Ein weiterer Grund für die starken Variationen ist, dass der fluviatil bedingte Abrieb von verschiedenen Eigenschaften des Sedimentes und der Sedimentumgebung, von der Dauer des Transportes sowie von der Transportstrecke abhängig ist.

Die nachfolgenden Parameter wurden anhand unterschiedlicher Experimente durch diverse Autoren beschrieben (MIKOŠ 1993 und darin genannte Literatur). Der wichtigste Parameter ist hierbei der Einfluss der Masse und der Größe (Korndurchmesser) der Sedimentkomponenten. Rein kiesige Sedimente

werden vergleichsweise schnell abgerieben und abgerundet. Komponenten der Sandfraktion werden hingegen nur sehr langsam oder gar nicht abgerieben und bleiben lange kantig. Der Abrieb einzelner (auch größerer) Gerölle ist in sandigem Sediment um Größenordnungen kleiner als in kiesigem Sediment. Weitere wichtige Parameter, die auf den Abrieb oder direkt auf die Abriebziffer  $c$  Auswirkungen haben, sind die petrografische Zusammensetzung des Sedimentes beziehungsweise die Art der im Einzelnen zu betrachtenden Minerale/Gesteine (unterschiedliche Beständigkeit aufgrund unterschiedlicher Härte, Zähigkeit, Spaltbarkeit, interner Risse usw.), die Form und Rundheit der Sedimentkomponenten, die Beschaffenheit des Flussbettes (Untergrund sandig, kiesig oder sogar aus Festgestein) sowie die Transportgeschwindigkeit und -art. Zwar gab es vielerlei Bestrebungen durch verschiedene Wissenschaftler, einzelne dieser Parameter in das Sternberg'sche Gesetz einzubeziehen oder auf andere Art und Weise zu berücksichtigen, doch existiert bis heute keine Formel oder numerische Simulation, die all diese Parameter beinhaltet. Experimentell ermittelte Werte müssen somit immer in Hinblick auf spezielle Rahmenbedingungen interpretiert werden. Der Verständlichkeit halber wird daher in den folgenden Ausführungen das Sternberg'sche Gesetz weiterhin nur in seiner Grundform verwendet.

Die Frage ist also, wie die in diesem Experiment ermittelten MV durch Abrieb zu inter-

pretieren sind. Hier muss gesagt werden, dass diese Werte wegen der aufgezeigten Komplexität nicht eins zu eins auf Transportbedingungen in einem natürlichen Flusssystem umgesetzt werden können. Um die Ergebnisse dennoch vergleichbar und aussagekräftig zu machen, wurden zunächst die  $c$ -Werte der einzelnen Probengruppen durch Umstellung des Sternberg'schen Gesetzes berechnet ( $c_{\text{Probengruppe}} = -\ln[G_x/G_0]/100,5 \text{ km}$ ; wobei  $G_x/G_0$  durch  $[100\% - MV_{\text{ProbengruppeAbr}}]/100\%$  ersetzt werden kann). Der ermittelte  $c$ -Wert für Tektite beträgt  $0,00023 \text{ km}^{-1}$ , der für Obsidian  $0,00038 \text{ km}^{-1}$ . Von besonderer Bedeutung ist der  $c$ -Wert von Quarz ( $c_{\text{Qz}} = 0,00015 \text{ km}^{-1}$ ), da dieser als Vergleichswert zu in der Literatur angegebenen Werten herangezogen werden kann (weitere Ergebnisse siehe Tab. 2). Setzt man nun die  $c$ -Werte der einzelnen Probengruppen ins Verhältnis zum  $c$ -Wert der Probengruppe Quarz ( $c_{\text{Probengruppe}}/c_{\text{Qz}}$ ), erhält man einen Quotienten. Dieser gibt an, wie stark das jeweilige Material im Vergleich zu Quarz im Experiment abgerieben wurde. Die Tektite wurden demnach  $\sim 1,5$ -mal so stark abgerieben wie Quarz. Für Obsidian beläuft sich diese Verhältniszahl auf  $\sim 2,5$  und für die hier beprobten künstlichen Gläser auf  $\sim 4,4$ . Auch die von Daubr e bereits im Jahr 1879 veröffentlichten  $c$ -Werte für Obsidian ( $0,0003 \text{ km}^{-1}$ ) und Quarz ( $0,0001 \text{ km}^{-1}$ ) liefern ein zum hier vorliegenden Experiment ähnliches Verhältnis mit einem Wert von 3 (Mik os 1993). Da für alle Proben im Experiment die

Tab. 2: Im Rahmen dieser Arbeit experimentell ermittelte Abriebziffern  $c$  (einschließlich der Verhältnisse zu  $c_{\text{Qz}}$ ) und allgemeine Härtewerte der einzelnen Probengruppen. Quellen: <sup>I</sup> = URL-1; <sup>II</sup> = ALIYU (2016); <sup>III</sup> = URL-2; <sup>IV</sup> = URL-3; <sup>V</sup> = BOUKA (1994); <sup>VI</sup> = ERICSON et al. (1975); <sup>VII</sup> = URL-4; <sup>VIII</sup> = HUSSAIN & ALI (2010).

Probengruppe	Abriebziffer $c$ ( $\text{km}^{-1}$ )	Verh�altnis $c_{\text{Probengruppe}}/c_{\text{Qz}}$	Mohs-H�arte	Vickers-H�arte (Mikroh�arte)
Achate/ Feuerstein	0,00006	$\sim 0,7$	6,5–7 <sup>I</sup>	? / grauer Feuerstein: $\sim 1140^{\text{II}}$
Quarz	0,00015	1	7	1120 <sup>III</sup>
Tektite	0,00023	$\sim 1,5$	$\sim 6\text{--}7^{\text{IV}}$ (Moldavite: 6,5–6,9) <sup>V</sup>	Moldavite: $\sim 1060$ (916–1211) <sup>V</sup>
Obsidian	0,00038	$\sim 2,5$	5,5–7 <sup>VI</sup>	$\sim 700$ (485–870) <sup>VI</sup>
künstliches Glas	0,00066	$\sim 4,4$	5–6 <sup>II</sup>	Normalglas: $\sim 560$ (481–641) <sup>VIII</sup>
Feldspat	–	–	6–6,5	?

gleichen Bedingungen vorlagen, sollten diese Abriebverhältnisse zueinander stimmig sein. Dass diese Annahme realistisch ist, lässt sich über einen Vergleich der Härten (nach Mohs und Vickers) grob abschätzen (Tab. 2). Quarz ist mit einer Härte von 7 (nach Mohs) / 1120 (nach Vickers) geringfügig härter als Tektite (~ 6–7; Moldavite: 6,5–6,9 / Moldavite: ~ 1060 [916–1211]) und deutlich härter als Obsidian (5,5–7 / ~ 700 [485–870]) und künstliches (Normal-)Glas (5–6 / ~ 560 [481–641])<sup>4</sup>.

Im folgenden Abschnitt soll aufgezeigt werden, wie sich die experimentell ermittelten Werte zu Werten aus Feldstudien verhalten. Als Beispiel für einen natürlichen Fluss wird die Elbe herangezogen, um gleichzeitig die in der Einleitung genannte Theorie der Herleitung der Lausitzer Moldavite aus Südböhmen aus Sicht des fluviatilen Abriebs auf den Prüfstand zu stellen. Für die heutige Elbe wurde eine allgemeine Abriebrate von  $0,001 \text{ km}^{-1}$  ermittelt, die „als relativ sicher angesehen werden“ (VOLLMER et al. 2014, S. 59) kann. Diese Angaben beziehen sich allerdings nur auf den deutschen Teil der Elbe. Da sich das Flusssystem, einschließlich der zufließenden Moldau (entspricht dem eigentlichen Hauptstrom; HURTIG 2017, S. 175), im Gebiet der Tschechischen Republik nicht grundlegend ändert (ausgenommen hiervon sind die Oberläufe in den Quellregionen), kann eine entsprechende Abriebrate auch für diesen Bereich angenommen werden. Unter der Annahme, dass  $c_{\text{Elbe}} = c_{\text{QzElbe}}$  ist, zeigt sich, dass dieser Wert dem 6,7-fachen des experimentellen Wertes entspricht. Grund hierfür können die zu Beginn dieses Kapitels erwähnten Faktoren für Unterschiede zwischen Laborversuchen und Feldstudien sein.

An dieser Stelle müssen zusätzlich die genannten Parameter, die den Abrieb und die Abriebziffer  $c$  direkt beeinflussen, im Hinblick auf mögliche Fehlerquellen im Experiment betrachtet werden. Die Massen (und Größen) der Proben wurden vor ( $G_0$ ) und nach dem Experiment ( $G_x$ ) gemessen. Die Proben wurden so gewählt, dass sie hinsichtlich ihrer Form und Rundheit eine repräsentative Bandbreite abdecken. Die Verwendung natürlicher beziehungsweise unregelmäßig gebrochener Proben liefert zudem besser auf

die Natur übertragbare Ergebnisse, als es bei Nutzung standardisierter Proben (Würfel mit gleicher Kantenlänge) der Fall wäre. Größere Fehlerquellen sind hier also auszuschließen. Für den Versuch wurde ein quarzreiches Sand-Kies-Gemisch mit relativ gut gerundeten Komponenten verwendet. Da die meisten Tektite (weltweit) nach ihrem Fall durch fluviale Prozesse in vergleichbare Sedimente ein- beziehungsweise umgelagert wurden, ist dieser Parameter grundsätzlich als realistisch anzusehen. Auch die moldavitführenden Schichten am Nordrand des Südböhmischen Moldavit-Fundgebietes, welche die potentiellen Ausgangssedimente der moldavitführenden Schichten in der Lausitz darstellen (siehe Abb. 2), sind überwiegend sandig-kiesig und haben Quarz als Hauptbestandteil. Die erhaltenen Quarzgerölle sind mitunter geringfügig größer und meist (jedoch nicht immer) eckiger als im verwendeten Sediment. Bei Nutzung eines entsprechenden Sedimentes aus Südböhmen hätte dies in erster Linie Auswirkungen auf den Abrieb der Sedimentkomponenten selbst gehabt, hätte aber möglicherweise auch zu einem höheren Abrieb der Proben beigetragen. Ob das allerdings eine echte Fehlerquelle ist, lässt sich an dieser Stelle (ohne erneutes Experiment) nicht beurteilen. Prinzipiell kann jedes (tektitführende) Sediment das Ausgangssediment für einen (nachfolgenden) langen Flusstransport darstellen. Die Beschaffenheit eines natürlichen Flussbettes ließ sich im Experiment nicht nachahmen. Eine Auswertung zum Einfluss dieses Parameters kann somit nicht vorgenommen werden. Die Fließgeschwindigkeit der Altelbe, welche die moldavitführenden Sedimente in der Lausitz absetzte, muss entsprechend dem Hjulström-Diagramm mindestens  $1 \text{ m/s}$  betragen haben (GENSKE 2014, LANGE et al. 2015). Im Experiment betrug die gerätebedingte Transportgeschwindigkeit durchschnittlich  $\sim 0,59 \text{ m/s}$ . Diese ist jedoch nach dem Experimentaufbau nicht mit der Fließgeschwindigkeit des Wassers, sondern mit der Rollgeschwindigkeit der Proben gleichzusetzen. In realen Fließgewässern entspricht eine Rollgeschwindigkeit von  $\sim 1,5 \text{ m/s}$  in etwa einer Fließgeschwindigkeit des Wassers von  $\sim 2 \text{ m/s}$  unmittelbar über dem Sediment und von  $\sim 4 \text{ m/s}$  im

<sup>4</sup> Quellenangaben siehe Beschriftung Tab. 2

Hauptstrom, was nahe an die höchsten in der Natur auftretenden Geschwindigkeiten herankommt (KUENEN 1956). Die Geschwindigkeit wirkt sich zwar auf den Abrieb aus, hat allerdings einen viel geringeren Einfluss, als man zunächst vermuten mag. Die Experimente von KUENEN (1956) ergaben, dass sich bei einer Steigerung der Rollgeschwindigkeit von  $\sim 0,5$  m/s auf  $\sim 1,5$  m/s der Abrieb nur um rund ein Fünftel erhöht. Unter Annahme einer Rollgeschwindigkeit von  $1,5$  m/s würde sich der  $MV_{0QzAbr}$ , bezogen auf die experimentellen Werte der vorliegenden Arbeit, deshalb theoretisch auf maximal  $\sim 1,7\%$  erhöhen (entspricht  $c_{Qz} = 0,00017$  km<sup>-1</sup>). Einen sehr viel größeren Einfluss auf die abriebbedingten MV hat die Transportstrecke. Im Experiment lag der Schwankungsbereich gerätebedingt zwischen  $48,6$  und  $150,7$  km. Hätten sich nun einzelne Proben während der gesamten Dauer des Experimentes ( $47$  h  $35$  min) überwiegend im Top- oder Basisbereich des Sedimentpaketes befunden, hätte dies rein rechnerisch, auf Grundlage des Sternberg'schen Gesetzes, im Extremfall zu einer Verdopplung oder zu einer Verringerung um ein Drittel der Abriebraten geführt. Dem wurde aber durch die in der Mischtrommel angebrachten Mischflügel vorgebeugt, die für eine ständige zusätzliche Durchmischung des Sedimentes und folglich für eine Verhinderung der Fraktionierung des Sedimentpaketes aufgrund von Gewichts- und Zentrifugalkraft sorgten. Die den Berechnungen zugrunde gelegte durch-

schnittliche Transportstrecke von  $100,5$  km kann daher für alle Proben angenommen werden. Die größten und nahezu unmöglich abschätzbaren Fehlerquellen, weshalb die experimentellen c-Werte dieser Arbeit womöglich zu niedrig sind (Hinweis: Die c-Verhältnisse bleiben hiervon unberührt.), beziehen sich auf die Transportart und den Abrieb im ruhenden Sediment. Das Experiment basiert auf einem rollenden Transport der Proben. Die Durchmischung des Sedimentes aufgrund der Mischflügel hatte den Nebeneffekt, dass einzelne Sedimentkomponenten und somit auch die zugegebenen Proben zumindest zeitweise in eine springende Bewegung (Saltation) versetzt wurden. Diese Transportart wirkt sich deutlich vermindert auf den Abrieb aus, da dieser dann nur zum Zeitpunkt des Zusammenstoßes mit anderen Sedimentkomponenten erfolgt. Im Gegensatz dazu findet bei rein rollenden Bewegungen der Abrieb dauerhaft statt. Durch den genannten Effekt wurden letztlich die natürlichen Transportbedingungen bezüglich der Bodenfracht in einem hochenergetischen Flusssystem besser nachgeahmt. Der Abrieb im ruhenden Sediment konnte hingegen durch das Experiment nicht simuliert werden, so dass hierzu keine Aussagen getroffen werden können. SHAW & KELLERHALS (1982) zeigten auf, dass der Abrieb im ruhenden Sediment bis zu  $90\%$  des gesamten Abriebs in Flüssen ausmachen kann. Bedingung hierfür ist jedoch, dass sich die entsprechen Proben (für längere Zeit) an der Oberfläche des

Tab. 3: Im Rahmen dieser Arbeit experimentell ermittelte Reduzierungsziffern  $c^*_{Abr+Zertr}$  (einschließlich der Verhältnisse zu  $c^*_{Qz}$ ) der einzelnen Probengruppen.

Probengruppe	Reduzierungsziffer $c^*_{Abr+Zertr}$ (km <sup>-1</sup> )	Verhältnis $c^*_{Probengruppe}/c^*_{Qz}$
Achate/Feuerstein	0,00006	$\sim 0,7$
Quarz	0,00015	1
Tektite	0,00024	$\sim 1,6$
Obsidian	0,00076	$\sim 5,1$
künstliches Glas	0,00158	$\sim 10,5$
Feldspat	-	-

Kiesbettes befinden und nicht verschüttet sind. Begünstigend für geringe MV ist der sogenannte Massenkorntransport, welcher auch im Rahmen des Experimentes beobachtet werden konnte. Dabei wird nicht jedes Korn (Geröll) für sich allein transportiert, sondern steht in Wechselwirkung mit den umgebenden Komponenten (weitere Sedimentkörner + Wasser). Beim Transport solcher wassergesättigter Massen können feine Sedimentbestandteile (im Experiment Sand/Silt/Ton) schützend auf größere Gerölle (Tektite, Gläser und weitere Bestandteile der Kiesfraktion) wirken, indem sie diese einbetten. Massenkorntransport kann in realen Flüssen unter anderem bei Flutereignissen mit sehr hohen Fließgeschwindigkeiten des Wassers beobachtet werden.

Auch die bis zu 40 Meter mächtigen, moldavitführenden Sedimente in der Lausitz (Schotter der Senftenberger und der Bautzener Elbe; letztere mit deutlich geringerer Mächtigkeit) können nur durch (wiederholte) Hochwasser aus Böhmen eingespült wor-

den sein. Das steht nicht im Widerspruch dazu, dass ihr Ablagerungsmilieu dem eines verflochtenen Flusssystemes entspricht. Die Altelbe, welche diese Sedimente absetzte, hatte flusstypbedingt (zumindest für den



Abb. 8: Bisher schwerster, bekannt gewordener Lausitzer Moldavit (73,81 g); gefunden 1990 in der Kiesgrube bei Ottendorf-Okrilla durch H. Włodarczyk; Abb. aus HURTIG (2017). Eine fluviatile Herleitung aus Südböhmen (Transportstrecke ~ 400 km) ist nach den vorliegenden Untersuchungen zum Abrieb problemlos möglich.



Abb. 9: Typische, nur geringfügig abgeriebene (Elb-)Achate und verkieselte Bruchstücke orthokoner Cephalopoden („Geradhörner“) aus den moldavitführenden Schottern der Altelbe in der Lausitz. Links: aus der Kiesgrube bei Ottendorf-Okrilla; rechts: aus dem Ton- und Kiestagebau bei Plieskendorf/Calau (1–6 & 9–12: vollständige Achatmandeln; 7: natürlich zerbrochener Achat; 8: gesägter und polierter Achat; 13–16: „Geradhörner“).

Sedimentationsraum) ein höheres Gefälle und folglich auch eine höhere durchschnittliche Fließgeschwindigkeit des Wassers als die heutige, eher mäandrierende Elbe. Die Geschwindigkeit hat allerdings, wie weiter oben aufgeführt, nur einen untergeordneten Einfluss auf den Abrieb und begünstigt zudem bei hohen Werten (u. a. bei Flutereignissen) einen abriebvermindernden Massentransport. Stärker von der Geschwindigkeit abhängig ist die physikalische Verwitterung (Zertrümmerung, Absplitterung) von Sedimentkomponenten. Diese tritt probenabhängig (insbesondere aufgrund relativ geringer Härte, guter Spaltbarkeit oder interner Risse) überwiegend in der Anfangsphase von fluvialen Transportprozessen auf (MIKOŠ 1993). Im weiteren Transportverlauf ist die physikalische Verwitterung nicht vorhersagbar (zufälliges Auftreffen auf ein Hindernis unter entsprechend hoher Krafteinwirkung auf die Probe) und kann deshalb allgemeingültig nicht zufriedenstellend berechnet oder abgeschätzt werden. Da bei Feldstudien die MV aus physikalischer (und chemischer) Verwitterung ohnehin in den  $c$ -Werten eingerechnet sind, stellt sich die Frage, ob sich die für die heutige Elbe ermittelte, allgemeine Abriebrate von  $0,001 \text{ km}^{-1}$  auf die Altelbe (einschließlich der Altmoldau) übertragen lässt. Überprüft werden soll das anhand der Probengruppe Tektite. Hierfür müssen zunächst, unter Berücksichtigung der experimentell ermittelten MV durch Zertrümmerung (Hinweis: Die chemische Verwitterung konnte im Rahmen des Experimentes nicht untersucht werden.), die  $c$ -Werte neu berechnet werden. Da nun nicht mehr nur der reine Abrieb eine Rolle spielt, wird im Folgenden von einer (Masse-)Reduzierungsziffer  $c^*_{\text{Abr+Zertr}}$  gesprochen (siehe auch MIKOŠ 1993: weight [mass] reduction coefficient). Der auf Grundlage des Experimentes ermittelte  $c^*$ -Wert für Tektite beläuft sich auf  $0,00024 \text{ km}^{-1}$  ( $c^*_{\text{Obs}} = 0,00076 \text{ km}^{-1}$ ; weitere Ergebnisse siehe Tab. 3). Der  $c^*$ -Wert von Quarz bleibt unverändert zum ursprünglichen  $c$ -Wert, da im Experiment keine Zertrümmerung bei den Quarzproben festgestellt wurde ( $c^*_{\text{Qz}} = c_{\text{Qz}} = 0,00015 \text{ km}^{-1}$ ). Durch das Verhältnis von  $c^*_{\text{Tek}}/c^*_{\text{Qz}} = 1,6$  würde sich für in der Altelbe/-moldau transportierte Tektite ( $c^*_{\text{TekElbe/Moldau}} = 0,0016 \text{ km}^{-1}$ ) der  $MV_{\text{ØTekAbr+ZertrElbe/Moldau}}$  nach

10 km auf 1,6 % (50 km: 7,7 %; 100 km: 14,8 %; 200 km: 27,4 %; 300 km: 38,1 %; 400 km: 47,3 %; 500 km: 55,1 %) belaufen. Diese MV-Werte sind gut mit Geländebeobachtungen zu Lausitzer Moldaviten und deren Fundschichten vereinbar, wobei der jeweilige Anteil durch reinen Abrieb und durch physikalische (oder auch chemische) Verwitterung aus genannten Gründen für jeden Moldavit variabel ist und nicht genau bestimmt werden kann. Die zurückgelegten Transportstrecken von Südböhmen (Umgebung von Moldautain und Pisek) bis nach Ottendorf-Okrilla beziehungsweise bis nach Calau belaufen sich auf rund 400–500 km. Die durchschnittliche Masse der Moldavite am Nordrand des Südböhmischen Moldavit-Substreufeldes liegt zwischen 7 und 10 g, die der Lausitzer Moldavite bei  $\sim 4,1 \text{ g}$  (HURTIG 2017). Selbst der bisher schwerste Lausitzer Moldavit aus Ottendorf-Okrilla ( $m = 73,81 \text{ g}$ ; Abb. 8) kann, unter Annahme eines  $MV_{\text{ØTekAbr+ZertrElbe/Moldau}}$  von 47,3 % für eine Wegstrecke von rund 400 km, problemlos aus Südböhmen hergeleitet werden ( $G_0 \sim 140 \text{ g}$ ; Hinweis: Unter günstigen Transportbedingungen mit geringerem Abrieb kann  $G_0$  für diesen Moldavit auch kleiner gewesen sein)<sup>5</sup>.

Auch die in den Altelbeschottern der Lausitz häufigen (Elb-)Achate oder auch die nur selten zu findenden Steinkerne orthokoner Cephalopoden („Geradhörner“) sprechen für moderate Abriebraten der Altelbe/-moldau. So können in Ottendorf-Okrilla und sogar in den entsprechenden Sedimenten in Brandenburg mitunter vollständige ( $\sim 0,5$ – $10 \text{ cm}$  große) Achatmandeln oder gut ausgebildete, verkieselte „Geradhorn-Bruchstücke“ gefunden werden, die offenbar kaum abgerieben wurden (Abb. 9). Die Liefergebiete der Achate befinden sich überwiegend im Riesengebirgsvorland, die der „Geradhörner“ sind im (Südwest-)Prager Raum zu vermuten (HURTIG 2017). Somit sind für derartige Funde in der Lausitz gesicherte Transportstrecken von rund 380–480 km (Achate) beziehungsweise von rund 250–350 km (Orthoceraten) gegeben. Bei den 2 (Elb-)Achat-Proben lag der experimentell ermittelte  $MV_{\text{ØAAbr}}$  (Hinweis: Eine

<sup>5</sup> Aus Südböhmen sind Moldavite mit einer maximalen Masse von über 170 g bekannt (HURTIG 2017, S. 139).

Zertrümmerung wurde im Experiment bei den Achatproben nicht festgestellt.) nach der Transportstrecke von ~ 100,5 km bei ~ 0,75 %. Bezogen auf die Altelbe ergibt sich, analog zu den Überlegungen hinsichtlich der Tektite, ein  $MV_{\text{OAAbrElbe}}$  von 17,3 % nach 380 km (480 km: 21,3 %;  $c_{\text{AElbe}} = 0,0005 \text{ km}^{-1}$ ). Schaut man sich entsprechende Lausitzer (Elb-)Achate an, sind derartige Werte als realistisch anzusehen. Ein um Größenordnungen höherer Abrieb wäre mit den Funden der Achate, der Moldavite und auch der genannten „Geradhörner“ (im Rahmen dieser Arbeit nicht beprobt) innerhalb der Lausitzer Altelbeschotter nicht vereinbar.

## 5 Fazit

Nach den vorliegenden Untersuchungen kann gesagt werden, dass Tektite und auch andere Gläser durchaus mehrere hundert Kilometer Flusstransport überstehen können, wobei Obsidiane und künstliche Gläser stärker abgerieben (oder auch zertrümmert) werden. Das bekräftigt erneut die Theorie, dass die Lausitzer Moldavite durch Vorläufer der Elbe (Labe) und der Moldau (Vltava) aus Südböhmen hergeleitet wurden (BOUŠKA & PAČESOVÁ 1992, BOUŠKA 1994, HURTIG 2017).

## Danksagung

Ich bedanke mich besonders bei Sven Lauber (Dürrröhrsdorf) für konstruktive Hinweise zum Aufbau des Experimentes und für dessen praktische Umsetzung. Bei Prof. Dr. Jan-Michael Lange (Senckenberg Naturhistorische Sammlungen Dresden), Priv.-Doz. Dr. Elmar Buchner (Hochschule für angewandte Wissenschaften Neu-Ulm), Dr. Martin Schmieder (Lunar and Planetary Institute Houston, USA) und Dr. Olaf Tietz (Senckenberg Museum für Naturkunde Görlitz) bedanke ich mich für die kritische und gewissenhafte Durchsicht des Typoskriptes und die damit verbundenen Anregungen. Schließlich gilt mein Dank Adam Stewart (Chesterfield, UK) für das Korrekturlesen des Abstracts.

## Literatur

- ALIYU, M. M. (2016): The Origin and Properties of Flint in the Upper Cretaceous Chalk. – Doktorarbeit an der Universität von Leeds: XV + 267 S.
- BARKATT, A., M. S. BOULOS, A. BARKATT, W. SOUSANPOUR, M. A. BOROOMAND, P. B. MACEDO & J. A. O'KEEFE (1984): The chemical durability of tektites – A laboratory study and correlation with long-term corrosion behavior. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* **48**, 2: 361–371
- BENDEL, L. (1944): *Ingenieurgeologie. Erster Teil.* – Springer Verlag; Wien: 832 S.
- BOUŠKA, V. (1994): Moldavites. The Czech Tektites. – *Stylizace*; Praha: 72 S.
- BOUŠKA, V. & M. PAČESOVÁ (1992): Moldavittreuefelder. – *Fundgrube* **28**, 3: 98–106
- BRACHANIEC, T. (2018a): An experimental model for the tektite fluvial transport based on the most distal Polish moldavite occurrences. – *Meteoritics & Planetary Science* **53**, 3: 505–513
- BRACHANIEC, T. (2018b): Variations in fluvial reworking of Polish moldavites induced by hydrogeological change. – *Carnets de Geologie* **18**, 10: 225–232
- BRACHANIEC, T. (2019): Susceptibility of various tektite types to fluvial abrasion. – *Geological Quarterly* **63**, 1: 150–161
- BUCHNER, E. & M. SCHMIEDER (2009): Multiple fluvial reworking of impact ejecta – A case study from the Ries crater, southern Germany. – *Meteoritics & Planetary Science* **44**, 7: 1051–1060
- CHATANANTAVET, P., G. PARKER, E. LAJEUNESSE, P. PLANTON & P. VALLA (2007): Physically-based model of downstream fining in bedrock streams with side input and verification with field data. – In: DOHMEN-JANSSEN, C. M. & S. J. M. H. HULSCHER (eds): *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2007*; Enschede: 571–579
- ERICSON, J. E., A. MAKISHIMA, J. D. MACKANZIE & R. BERGER (1975): Chemical and physical properties of obsidian: a naturally occurring glass. – *Journal of Non-Crystalline Solids* **17**: 129–142
- GENSKE, D. D. (2014): *Ingenieurgeologie. Grundlagen und Anwendung*, 2. Auflage. – Springer Spektrum, Springer Verlag; Berlin und Heidelberg: XXI + 613 S.
- HÜTTNER, R. & H. SCHMIDT-KALER (2015): Meteoritenkrater Nördlinger Ries, 3. Auflage. – *Wanderungen in die Erdgeschichte* **10**: 144 S.

- HURTIG, M. (2014): Wie gläserne Untertassen: Tektite aus Westaustralien. – *Lapis* **39**, 10: 54–63
- HURTIG, M. (2017): Moldavite und ihre Fundschichten in der Lausitz und in angrenzenden Gebieten. – Veröffentlichungen des Museums der Westlausitz Kamenz **Sonderheft**: 234 S.
- HUSSAIN, F. & A. ALI (2010): Elastic and Plastic Properties of Soda Lime Glass by Micro-Indentation. – *Key Engineering Materials* **442**: 294–300
- KODAMA, Y. (1994): Experimental study of abrasion in producing downstream fining in gravel-bed rivers. – *Journal of Sedimentary Research* **64**, 1a: 76–85
- KUENEN, P. H. (1956): Experimental abrasion of pebbles. 2. rolling by current. – *Journal of Geology* **64**: 336–368
- LANGE, J.-M. (1995): Lausitzer Moldavite und ihre Fundschichten. – Schriftenreihe für Geowissenschaften **3**; Berlin: 134 S.
- LANGE, J.-M. (2005): Tektite. Zeugnisse der Katastrophe. Entstehung und Verbreitung. – In: CZOBEK, J. & F. KOCH (Hrsg.): Zielscheibe Erde. Meteorite Tektite Moldavite. – Veröffentlichungen des Museums der Westlausitz Kamenz **Ausstellungskatalog**: 48–65
- LANGE, J.-M., B. GAITZSCH & C. BREITKREUZ (2015): Der frühe Elbstrom – Architektur und Rekonstruktion des Senftenberger Laufes. Fallstudie Ottendorf-Okrilla. – Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins. Geologische Exkursionen in Sachsen und Brandenburg und weitere wissenschaftliche Beiträge N.F. **97**: 301–320
- MALCHEREK, A. (2007): Sedimenttransport und Morphodynamik. – Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Wasserwesen; München: 184 S.
- MATTMÜLLER, C. R. (1994): Ries und Steinheimer Becken. Geologischer Führer und Einführung in die Meteoritenkunde. – Enke Verlag; Stuttgart: 152 S.
- McCALL, J. (2001): Tektites in the Geological Record: Showers of Glass from the Sky. – *The Geological Society*; London: VIII + 256 S.
- McNAMARA, K. & A. BEVAN (2001): Tektites, 3rd (revised and enlarged) edition. – Western Australian Museum; Perth: 38 S.
- MIKOŠ, M. (1993): Fluvial abrasion of gravel sediments. – Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich **123**; Zürich: 322 S.
- PROTHERO, D. R. & F. SCHWAB (1996): Sedimentary Geology. An Introduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy. – Freeman and Company; New York: XVI + 575 S.
- SCHMIEDER, M., T. KENNEDY, F. JOURDAN, E. BUCHNER & W. U. REIMOLD (2018): A high-precision  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age for the Nördlinger Ries impact crater, Germany, and implications for the accurate dating of terrestrial impact events. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* **220**: 146–157
- SHAW, J. & R. KELLERHALS (1982): The composition of recent alluvial gravels in Alberta river beds. – Alberta Research Council, Bulletin **41**: 151 S.
- URL-1: <http://www.steine-und-minerale.de/atlas.php?f=2&l=A&name=Achat>; <http://www.steine-und-minerale.de/atlas.php?f=3&l=F&name=Feuerstein> (07.07.2019)
- URL-2: [https://www.chemie.de/lexikon/H%C3%A4rte.html#H.C3.A4rtepr.C3.BCfung\\_und\\_H.C3.A4rteskalen](https://www.chemie.de/lexikon/H%C3%A4rte.html#H.C3.A4rtepr.C3.BCfung_und_H.C3.A4rteskalen) (07.07.2019)
- URL-3: <http://www.jsg.utexas.edu/npl/outreach/tektites/> (07.07.2019)
- URL-4: [https://abrisatechnologies.com/specs/Soda-Lime%20Float%20Glass%20Spec%20Sheet%2012\\_10.pdf](https://abrisatechnologies.com/specs/Soda-Lime%20Float%20Glass%20Spec%20Sheet%2012_10.pdf) (07.07.2019)
- VOLLMER, S., D. GRÄTZ, S. SCHRIEVER, K. KRÖTZ, F. KÖNIG, C. SVENSON, M. PROMNY, N. BUSCH & M. HATZ (2014): Sedimenttransport und Flussbettentwicklung der Binnenelbe. – KLIWAS Schriftenreihe **67**; Koblenz: 100 S.
- WHYMARK, A. (2013): Beyer: The Exploits of an Anthropologist in Space Science. A Semicentennial Update on Tektites. – Lecture presented at the University of the Philippines on 26th June 2013 (Powerpoint-Präsentation): 48 S.
- ŽÁK, K. (2009): Studie transportu šterku v říčním toku s využitím metalurgické strusky jako stopovače: přínos pro poznání fluvialní redistribuce vltavínů. – *Bulletin mineralogicko-petrologického oddělení Národního muzea v Praze* **17**, 1: 79–90

**Anschrift des Verfassers**

Diplom-Mineraloge  
Michael Hurtig  
Canitz-Christina 1  
02627 Kubschütz  
E-Mail : [lausitzer.moldavite@gmx.de](mailto:lausitzer.moldavite@gmx.de)

---

Manuskripteingang	1.4.2019
Manuskriptannahme	30.7.2019
Erschienen	24.10.2019

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Naturforschende Gesellschaft der Oberlausitz](#)

Jahr/Year: 2019

Band/Volume: [27](#)

Autor(en)/Author(s): Hurtig Michael

Artikel/Article: [Experimentgestützte Untersuchung zum Abrieb von Tektiten und anderen Gläsern im Zuge fluviatilen Transportes über lange Strecken 143-160](#)