

Physikalische Betrachtungen an einem Pseudo-Geröllartefakt

von Kurt Dies, Bad Homburg v. d. H.

mit Tafeln XI–XII

1. Einführung

Die Entwicklung des Menschen ist eng mit der Entwicklung seiner Werkzeuge verknüpft. Es ist eine Erfahrungssache, daß mit dem Alter der Werkzeuge ihre Urtümlichkeit zunimmt; andererseits ist aber urtümlich nicht gleich alt zu setzen. Dieses gilt besonders für Geröllgeräte, die, soweit man das heute erkennen kann, häufig am Anfang des Werkzeuggebrauchs stehen, aber sich – wenn auch in kleiner werdenden Anteilen – bis in rezente Primitivkulturen fortsetzen. Gerade bei den Geröllgeräten ist rasch der Punkt erreicht, wo man nur noch schwer zwischen natürlicher Entstehung und gewollter Fertigung durch den Menschen entscheiden kann. Im Falle von Zweifel muß man die natürliche Entstehung mit Sicherheit ausschließen können. Dieses ist nur möglich, indem man den Überschuß an Merkmalen wertet, die auf eine künstliche Entstehung hindeuten, gegenüber den Kennzeichen, die für Naturbruch und Artefakt gleichartig sein können.

In dem nachfolgenden Beitrag wird über ein natürlich zerbrochenes Geröll aus einem schotterartigen Komplex bei Münzenberg (Wetteraukreis) berichtet, das durch geologische Kräfte in drei Teile zerlegt wurde und in situ wieder verkittete, ohne daß eine wesentliche Verschiebung der Bruchstücke stattfand. Das Besondere an diesem Fund ist darin zu sehen, daß die Bruchstücke in ihren Umrißlinien eine erhebliche Ähnlichkeit mit Typen der Artefaktliste von H. Krüger (1959, 1973) aufweisen, wie sie für Artefakte vom Münzenberger Typ aufgestellt wurden, die auch K. Dies in seiner statistischen Beurteilung des Fundkomplexes übernommen hat (1973). Wir haben deshalb diesen Naturbruch als Pseudo-Artefakt bezeichnet und sehen seine Bedeutung darin, daß man an diesen Bruchstücken – besonders an den Bruchflächen – die Auswirkungen eines sicheren Naturbruches untersuchen kann. Dadurch wird es möglich, für echte Artefakte bessere Unterscheidungskriterien herauszuarbeiten, als das bisher möglich war. Ein besonderer Wert dieses Stückes ist auch darin zu sehen, daß die Bruchfläche noch nicht durch Windschliff verändert ist und dadurch vergleichende Oberflächenaufnahmen mit dem Raster-Elektronenmikroskop (REM) an Artefaktoberflächen möglich werden. Der Beitrag befaßt sich ferner mit den physikalischen Grundlagen der Bruchvorgänge, die bei Pseudo-Artefakten und Artefakten zu gleichartigen oder ähnlichen Erscheinungen führen können. Hinsichtlich des untersuchten Werkstoffes, beschränken sich die Ausführungen ausschließlich auf Gerölle aus Quarzit, insbesondere Ordoviz-Quarzit, wie sie in der Umgebung von Münzenberg in der Wetterau anstehen.

2. Fundort und Fundsituation

Anläßlich der 17. Tagung der Deutschen Quartärvereinigung im September 1974 wurde von H. Krüger u. a. ein Aufschluß am Geländepunkt „Rechts“ 34 83700, „Hoch“ 55 90660 des topographischen Blattes (1:25 000) 5518 Butzbach erstellt. Das Lößprofil wurde von G. Bibus (1974) beschrieben; danach liegt an der Basis eines 2. fossilen pseudovergleyten B_t-Horizontes, ein wahrscheinlich solifluidal umgelagerter Rest eines Terrassenkörpers, der eine Zweiteilung, mit einem zwischengeschalteten Lehmstreifen, erken-

nen läßt (Taf. XI). Das Liegende besteht aus tertiärem Sand. Die hangenden Lößpakete gehören mindestens der Rißeiszeit an. Das Alter des 2. fossilen Bodenhorizontes ist noch unsicher, da nicht feststeht, daß solche Böden sich nur in den Interglazialen gebildet haben. Der an der Basis dieses Bodens liegende Schotterkomplex, aus dem das Fundstück stammt, muß deshalb als rißzeitlich oder älter eingestuft werden. Die petrographische Analyse der Steine zeigt nach Tabelle 1 Unterschiede zwischen dem etwa 0,35 m

Tabelle 1

Steine		Oberer Schotterhorizont Schichten 1 bis 3		Unterer Schotterhorizont Schichten 5 bis 10	
		Anzahl n	Prozent	Anzahl n	Prozent
Quarze	eckig	85	24,3	67	6,25
	rund	51	14,6	638	59,50
Gerölle aus	Quarzit	10	2,9	102	9,50
	Ordoviz-Quarzit (intakt)	9	2,6	98	9,14
	Ordoviz-Quarzit (defekt)	2	0,6	17	1,60
Basalt		5	1,4	nicht festgestellt	
Schiefer (feine Splitter)		66	18,9	27	2,5
Eisen-Konkretionen		98	28,0	99	9,2
Sonstige		24	6,9	24	2,23
Summe		350	100,2	1072	99,92

Petrographische Gesteinsanalyse der beiden Schotter-Horizonte des Aufschlusses Deuqua II bei Münzenberg

dicke oberen Schotterhorizont und der 1,05 m starken liegenden Schotterschicht. Entsprechend den Anteilen an Basalt, Schiefer und Eisenkonkretionen ist der Gesteinskörper als pleistozän einzustufen. Die Frische der Basalte, die nur geringe Spuren von Verwitterung tragen, schließt ein höheres Alter der Ablagerung mit großer Wahrscheinlichkeit aus. Der Verwitterungszustand der Basalte entspricht etwa dem, den man in der weiteren Umgebung in Ablagerungen der vorletzten Eiszeit findet. In Ablagerungen der drittletzten Eiszeit sind die Basalte häufig ganz oder doch sehr stark verwittert (Andres 1967). In beiden Horizonten überwiegt der Anteil der Quarze den der Gerölle. Quarzitgerölle, insbesondere die Ordovizgerölle, sind in den unteren Schichten häufiger als in dem oberen Horizont. Der Anteil an zerbrochenen Geröllen liegt zwischen 7,8 % und 9,5 %. Etwa 0,5 m über dem liegenden tertiären Sand fand sich ein in 3 Teile zerbrochenes Ordovizquarzit-Geröll, das wieder in situ verkittete und Anlaß zu den nachfolgenden Betrachtungen gab.

3. Morphologie des Pseudo-Artefaktes

Bei dem durch geologische Kräfte zerbrochenen, wohlgerundeten, triangulären Geröll (l = 79 mm; h = 64 mm; d = 44 mm) handelt es sich um einen typischen Ordoviz-Quarzit aus dem aquitanen Konglomerat von Münzenberg (Huckriede 1960). Gegenüber den tertiären Süßwasser-Quarziten, die gleichfalls in dieser Gegend anstehen, sind die Kristallite der Ordovizquarzite fest miteinander verwachsen und das gesamte Gefüge ist mehr oder weniger stark von dunklen Adern durchzogen (Bild 1). In Bild 2 sind die

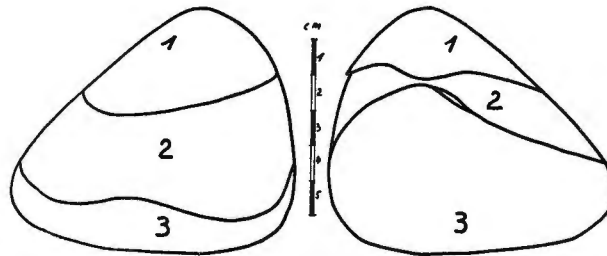


Bild 1. Natürlich zerbrochenes und wieder in situ verkittetes Ordoviz-Geröll (Pseudo-Artefakt).

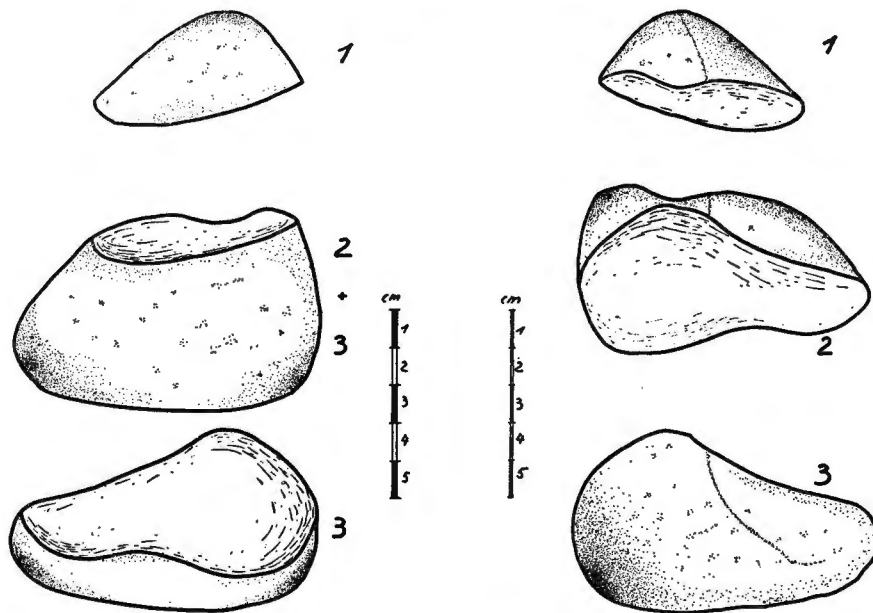


Bild 2. Abgedeckte Vorder- und Rückansicht des Pseudo-Artefaktes.

einzelnen Bruchstücke, wegen der Verkittung, mit den Mitteln der darstellenden Geometrie abgedeckt und mit den Ziffern 1 bis 3 gekennzeichnet. Teil 1 ist als eine abgesprengte Kappe anzusprechen, bei der die Durchstoßungslinie der Bruchfläche mit der Gerölloberfläche ebenso geschwungen ist, wie bei einem Geröllgerät des Typs 3 nach der Klassifikation von H. Krüger, das dieser als Hohlschaber beschrieben hat (1970). Der Vergleich der beiden Stücke läßt die sehr starke äußere Übereinstimmung der Umrißlinien erkennen und zeigt gleichzeitig die Notwendigkeit von zusätzlichen Merkmalen, um ein so entstandenes Stück als Artefakt zu kennzeichnen. Teil 2 ist ein schmales, aber verschieden dickes, Zwischenstück mit zwei Spaltflächen. Rein äußerlich hat es eine gewisse Ähnlichkeit mit den citrusförmigen „pebble wedges“, der sogenannten „Heidelberger“ Kultur, die deshalb einer sehr sorgfältigen Überprüfung hinsichtlich der intentionellen Herstellung bedürfen. Teil 3 dagegen, wäre als ein „Diagonal-Gerät“ entsprechend Typ 7 der Liste nach H. Krüger anzusprechen. Alle drei Teile des natürlich zerbrochenen Gerölls weisen, einzeln oder zusammengefügt, eine erhebliche Ähnlichkeit mit Fundgegenständen der Münzenberger Geröllindustrie auf, so daß man – um sie als Artefakt anzusprechen – überschießende Merkmale verlangen muß, die auf eine menschliche Bearbeitung schließen lassen.

4. Physikalische Betrachtungen

4.1 Elastische Kräfte bei Druckbeanspruchung

Für den Bruch eines Gegenstandes, hier das Geröll, sind Spannungen verantwortlich, die von äußeren oder inneren Kräften hervorgerufen werden. Im physikalischen Sinne bedeutet Bruch die Schaffung neuer Oberflächen. Hierzu ist Arbeit zu leisten gegen die atomaren Bindungskräfte, also Energie notwendig. Im Falle des Quarzites – also eines nichtleitfähigen anorganischen Stoffes – kommt vor allem die Überwindung der heteropolaren Bindungskräfte infrage. Die Energie, die zur Schaffung der neuen Oberflächen dient, kann u. a. mechanische Energie sein, die ihrerseits wieder durch ruhende Kräfte oder bewegte Kräfte, wie z. B. Schlag hervorgerufen wird. Ganz allgemein erzeugen Kräfte, die auf einen Körper wirken, in diesem Spannungen und zwar nach der Gleichung $\sigma = \frac{P}{F}$ (kp/mm²), wobei P gleich der wirkenden Kraft ist und F die Fläche des beanspruchten Querschnittes bedeutet. Ein Bruch tritt nur nach Überschreitung einer kritischen Spannung – der Bruchspannung – ein. Diese für die Überwindung der molekularen Kohäsionskräfte notwendige Spannung σ_m beträgt entsprechend der Orowanschen Regel $\sigma_m \approx 0,1 E$. Der Elastizitätsmodul E ergibt sich, wie weiter unten gezeigt wird, aus dem Hook'schen Gesetz. Danach ergäben sich bei Quarziten mit idealem Kristallaufbau Werte zwischen 500 kp/mm² und 1000 kp/mm²; jedoch liegen die tatsächlich an den Realkristallen gefundenen Werte um eine Größenordnung kleiner, nämlich bei etwa 30–90 kp/mm² für Druck und ca. 3–10 kp/mm² für Zug. Die Ursache dieses großen Unterschiedes zwischen der realen und der idealen Festigkeit, ist in den Fehlstellen der Real-Kristalle zu suchen. Die wirklichen Bruchspannungen für Zug-, Druck- oder Schubbeanspruchung werden deshalb für die einzelnen Werkstoffe mit Prüfmaschinen ermittelt, Tabelle 2 (Speth 1972).

Tabelle 2

Werkstoff	Spez. Gewicht (g/cm ³)	Zugfestigkeit (kp/mm ²)	Druckfestigkeit (kp/mm ²)	E-Modul (x 10 ⁹ kp/mm ²)	Poisson-Zahl
Kiesel- schiefer	$\bar{x} = 2,59$ (6) R = 2,52–2,67	$\bar{x} = 0,63$ (4) R = 0,46–0,77	$\bar{x} = 33,5$ (7) R = 17,93–69,6	$\bar{x} = 6,9$ (44) R = 2,2–12,7	$\bar{x} = 0,16$ (23) R = 0,001–0,34
Obsidian	$\bar{x} = 2,37$ (9) R = 2,25–2,5	$\bar{x} =$ nicht angegeben. R = „ „	$\bar{x} =$ nicht angegeben. R = 4,2–15,5	$\bar{x} = 7$ (5) R = 6,65–7,32	$\bar{x} = 0,15$ (4) R = 0,08–0,19
Quarzit	$\bar{x} = 2,63$ (8) R = 2,51–2,75	$\bar{x} =$ nicht angegeben. R = 0,99–2,99	$\bar{x} = 30,82$ (19) R = 13,65–64,11	$\bar{x} = 7,44$ (16) R = 5,98–11,11	$\bar{x} = 0,15$ (22) R = 0,07–0,30
Basalt	$\bar{x} = 2,84$ (11) R = 2,64–2,97	$\bar{x} =$ nicht angegeben. R = 0,99–2,99	$\bar{x} = 28,42$ (7) R = 19,82–36,56	$\bar{x} = 8,39$ (21) R = 6,22–11,88	$\bar{x} = 0,23$ (13) R = 0,18–0,29

Zusammenstellung von mechanischen und elastischen Werten verschiedener Gesteine (nach Speth 1972)

Neben den von außen wirkenden Spannungen, gibt es aber in vielen Gegenständen auch innere Spannungen, die sogenannten Eigenspannungen. Diese können z. B. durch verschiedenartiges Verhalten der einzelnen Kristallite unter äußeren Einflüssen hervorgerufen werden. Unter die Eigenspannungen rechnet man auch die Wärmespannungen, die z. B. durch unterschiedliche Erwärmung eines Körpers hervorgerufen werden. Erhitzt sich beispielsweise ein kugeliges Geröll von 10 cm Durchmesser unter starker Sonneneinstrahlung auf 60° C und wird es dann plötzlich – vielleicht durch einen kalten Gewitterschauer – in der Oberfläche um 50° C auf 10° C abgekühlt, so möchte sich diese kältere Außenhaut entsprechend ihrem Wärmeausdehnungsverhalten zusammenziehen, wird aber von dem wärmeren Kern daran gehindert. Aus dieser verhinderten Zusammenziehung entsteht eine Zugspannung in der Außenschicht, die bei genügender Höhe, zu einem Bruch einer dünnen Oberflächenschicht führen kann.

Die für einen solchen Eigenspannungsbruch notwendigen Kräfte errechnen sich nach den Regeln der Elastizitäts-Theorie; hier insbesondere nach dem Hook'schen Gesetz. Dieses besagt, daß bei der Belastung eines Körpers durch eine Kraft P, die dadurch bewirkte Längenänderung ε , der Spannung $\sigma = \frac{P}{F}$ proportional ist; diesen Proportionalitätsfaktor bezeichnet man mit E und nennt ihn Elastizitätsmodul. Für Quarzit hat er die Größenordnung von rund 7000 kp/mm². Die oben erwähnte Wärmespannung der abgekühlten Quarzitkugel von 100 mm Durchmesser, ergibt sich danach:

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon \text{ (kp/mm}^2\text{)} \\ \varepsilon &= d \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \Delta T & \alpha &= \text{Wärmeausdehnungskoeff.} \\ & & \alpha &= 10 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \\ \sigma &= 7000 \cdot 3,14 \cdot 10^{-5} \cdot 50; \\ \sigma &= + 11 \text{ kp/mm}^2 \end{aligned}$$

Danach treten bei den angenommenen Bedingungen in der Quarzitkugel Zugspannungen auf, die die Bruchfestigkeit von Quarzit für Zug, etwa 3-9 kp/mm², überschreiten; wir müssen demnach unter diesen Bedingungen mit Rissen oder gar mit dem Abplatzen einer dünnen Oberflächenschicht rechnen. Die oben behandelten Gesetzmäßigkeiten kommen auch bei vielen anderen Arten der physikalischen Verwitterung

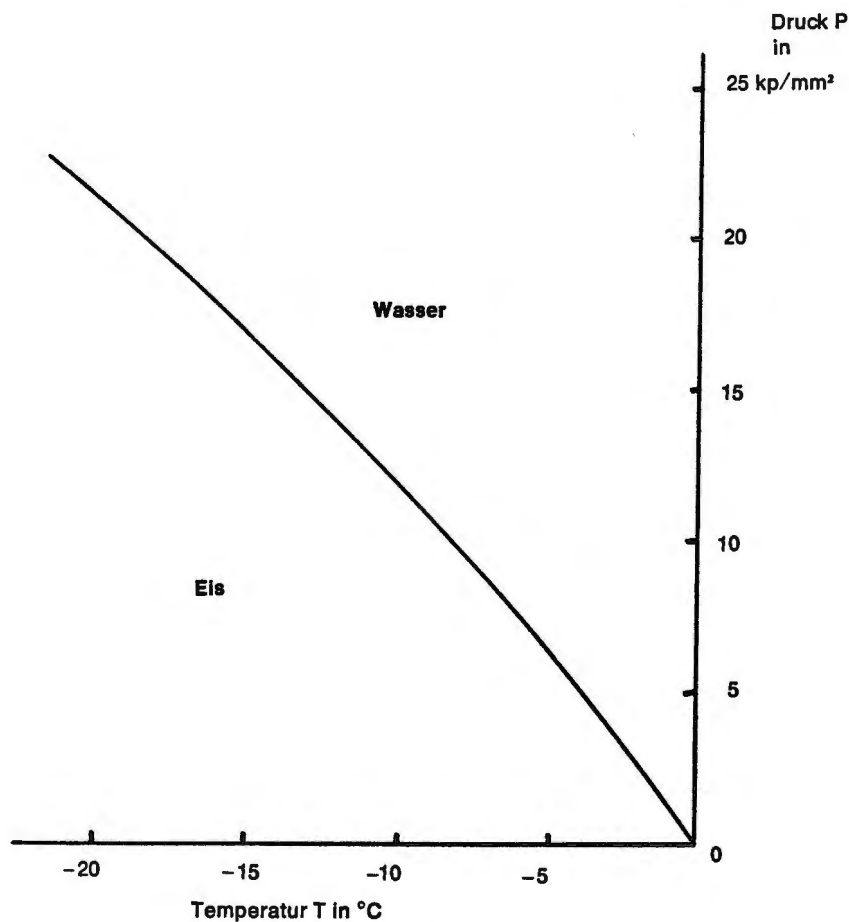


Bild 3. P-T-Zustandsdiagramm für Eis (nach C. W. Correns).

zung zur Geltung. Immer dann, wenn in Spalten oder feine Risse des Gesteins ein Medium eindringt, das ein anderes Ausdehnungsverhalten als der Quarzit aufweist, kommt es zu Spannungen und möglicherweise zu Brüchen. Vor allem ist hierbei an die Frostsprengung durch Eis, an die Hydratbildung und die Salzsprengung zu denken. Diese Vorgänge können besonders dann, wenn sie noch mit Eigenspannungen zusammentreffen, den Bruch von Gesteinen bewirken. Ähnlich wirken noch der Quellungsdruck von Tonmineralien, wie z. B. Montmorillonit und schließlich noch die osmotische Sprengwirkung von Pflanzenwurzeln.

Im periglazialen Raum von Münzenberg interessiert besonders die Wirkung der Frostsprengung. Wasser dehnt sich beim Erstarren zu Eis aus. Das Eis kann je nach Temperatur ganz erhebliche Kräfte, auf einen es allseitig umschließenden Körper, ausüben. Diese Kräfte kann man dem P-T-Zustandsdiagramm, Bild 3, entnehmen, bei dem die Trennungslinie zwischen dem flüssigen und festen Zustand nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Druck abhängig ist. Danach kann ausfrierendes Wasser, wenn es allseitig im Gestein eingeschlossen ist, Spannungen bis zu 22 kp/mm² ausüben, die erheblich über der Zugfestigkeit von Quarzit, nämlich rund 3–9 kp/mm², liegen. Durch diese Kräfte kann es zu einer Sprengung oder Abschuppung von Gestein kommen. Sehr wesentlich erscheint aber auch der Frost-Wechsel. In aller Regel nimmt bei wechselnder Beanspruchung die zur Bruchbildung notwendige Spannung ab. Bei mehrfacher Wechselbeanspruchung durch Frost, genügen daher schon recht kleine Kräfte, um einen Bruch herbeizuführen. Beim Frostwechsel spielt auch der Porenraum des Gesteins eine große Rolle. Bei Sandsteinen mit etwa 25 % Porenraum, genügt beispielsweise ein dreimaliges Gefrieren, um einen Anriß zu erzeugen, während ein dichteres Gestein, mit nur 5 % Porenraum, etwa 45 Frostwechsel für den ersten Anriß benötigt.

Als weitere Ursache für Naturbruch kommen die Hydratbildung und die Salzsprengung infrage. Bei der Bildung von wasserhaltigem Gips (CaSO₄·xH₂O) aus Anhydrit, tritt eine Aufquellung von rd. 62 % ein, die eine Spannung von etwa 11 kp/mm² hervorrufen kann. Wesentlich geringer ist die Wirkung der Salzsprengung, beispielsweise bei der Ausscheidung von Alaun aus übersättigten Lösungen; hierbei liegt die Sprengkraft bei nur 1,3 kp/mm². Unter 1 kp/mm² liegen dann der Quellungsdruck von Montmorillonit – einem Tonmineral – und die osmotische Sprengwirkung von Pflanzenwurzeln.

4.2 Bruchbeanspruchung bei statischer Belastung (Hertz'sche Gleichungen)

Bei den bisherigen Überlegungen haben wir uns mehr auf indirekte Wirkungen von physikalischen Größen auf die Bruchmöglichkeiten von Gesteinen beschränkt, und wir wollen nunmehr die Verhältnisse bei direkter Einwirkung von mechanischen Kräften betrachten. Man unterscheidet zwei Gruppen von Kräfteinwirkungen, nämlich ruhende Kräfte und schlagartige Kräfte, und man findet so den Übergang von den natürlichen Ursachen des Bruches, zu der gewollten menschlichen Beanspruchung durch Schlag bei der Werkzeugherstellung. Das Gewicht der hangenden Gesteinsmasse, die auf die Gerölle wirkt, ist beispielsweise eine der möglichen ruhenden Druckkräfte. Nimmt man z. B. eine überlagernde Schicht von 15 m Löß mit einem spezifischen Gewicht $\gamma = 2 \text{ g/cm}^3$ an, so ergibt sich ein spezifischer Druck von 0,03 kp/mm². Man erkennt sofort, daß dieser Druck des Hangenden nicht ausreicht, um einen Bruch der Gerölle durch ruhende Belastung infolge des Erddruckes herbeizuführen.

Nehmen wir jedoch an, daß sich zwei Geröllkugeln mit je 100 mm Durchmesser in vertikaler Richtung berühren und von 15 m Löß überlagert werden, so wirkt auf die Berührungsfläche der beiden Kugeln eine Kraft von 236 kp, und die dabei entstehenden elastischen Verformungen, Flächenpressungen und Spannungen, lassen sich nach den Gesetzen der Mechanik, durch die Hertz'schen Gleichungen berechnen:

$$\text{Radius der kreisförmigen Druckfläche } a = \sqrt[3]{1,5(1-\mu^2) P r/E}$$

$$\text{Größter Druck in der Druckfläche } p_0 = -\frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{1,5 P E^2}{r^2 (1 - \mu^2)^2}} \text{ (kp/mm}^2\text{)}$$

Für den Fall, daß eine Kugel auf eine ebene Fläche drückt, gelten die obigen Formeln sinngemäß in gleicher Weise. Für das genannte Beispiel mit zwei Kugeln von 50 mm Radius ergeben sich folgende Werte:

$$a = 1,13 \sqrt[3]{P \cdot r / E} \quad \text{wobei: } \frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = 25 \text{ mm}$$

$$p_0 = 0,37 \cdot \sqrt[3]{P \cdot E^2 / r^2} \quad P = 236 \text{ kp}$$

$$\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad E = 7000 \text{ kp/mm}^2$$

$$\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \text{Querzahl} = \mu = 0,17 \text{ (Quarzit)}$$

$$a = 1,07 \text{ mm}$$

$$p_0 = -97,9 \text{ kp/mm}^2 \quad \text{Druckfestigkeit von}$$

$$\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \text{Ordoviz-Quarzit } \sigma = 32 \text{ kp/mm}^2$$

Für Kugel auf Ebene:

$$a = 1,34 \text{ mm} \quad r = r_1 = 50 \text{ mm}$$

$$p_0 = -61,65 \text{ kp/mm}^2$$

Daraus ersieht man, daß bei Vergrößerung des Radius einer Kugel gegen Unendlich, die elastische Berührungsfäche größer wird, wogegen die Druckspannung abnimmt. In beiden Fällen übersteigt jedoch die errechnete Spannung p_0 die durch Versuch an einem Ordovizquarzit-Geröll ermittelte Druckfestigkeit von rd. 32 kp/mm². Unter den angenommenen Belastungsverhältnissen würde also in jedem Fall ein Bruch eingetreten sein.

4.3 Beanspruchung bei dynamischer Belastung (Schlag)

Nehmen wir nunmehr statt ruhendem Druck eine Schlagbeanspruchung, so sind die wirkenden Kräfte ganz anderer Natur. Bei schlagartiger Beanspruchung wird die kinetische Energie des Schlags in Schallenergie umgewandelt, d. h. im Falle des Quarzites in Ultraschallenergie. In der kurzen Berührungszeit der beiden Schlagkörper, wird eine hochfrequente Stoßwelle in den zu schlagenden Körper eingeleitet. In einem allseitig unendlich ausgedehnten Körper sind 2 Grundarten elastischer Wellen möglich: 1. Longitudinal- oder Dichtewellen, 2. Transversal- oder Schubwellen. In begrenzten Körpern (pebbles) ist die Art der anregbaren Wellen noch von der Gestalt des betreffenden Körpers abhängig. Für Quarzit liegt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle bei etwa 5000 m/s und bei der für die Bruchvorgänge maßgeblichen Transversalwelle bei rd. 3500 m/s. Das Fortschreiten des Bruches vollzieht sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 1500 m/s. Auf die Wellennatur der Energie-Einleitung beim Schlag, sind auch einige Besonderheiten beim Bruchvorgang zu beobachten: da die Wellen an Grenzflächen reflektiert, an Hindernissen und Fehlstellen gebeugt werden, können sie mit der Primärwelle interferieren, so daß insbesondere bei Quarziten Schüppchen auf der Bruchoberfläche entstehen, die in ihrer Häufung sehr charakteristisch für eine Schlagbeanspruchung sind. Ferner sind auch das wellenförmige Aussehen der Oberfläche, die sogenannten „Wallner-Linien“ und lanzettförmige Brüche hierauf zurückzuführen.

4.4 Bruchkörper bei ruhender und dynamischer Beanspruchung

Bei einem Körper, der so groß ist, daß die Randeinflüsse keine Rolle spielen, liegt die Bruchfläche an den Orten, an denen die maximale Normalspannung die Bruchspannung des betreffenden Werkstoffes übersteigt. Die zu erwartende Form des Bruchkörpers läßt sich experimentell z. B. mit den Mitteln der Spannungsoptik, aber auch rechnerisch mit den Hertz'schen Gleichungen ermitteln. Im Falle des Hertz'schen Kugeldruckversuches, bilden sich infolge der Spannungsverteilung kreisförmige Anrisse unterhalb der

Oberfläche, die sich zu einem Kegelstumpfmantel, dem sogenannten Hertz'schen Kegelbruch erweitern. Der beginnende Bruch beeinflußt seinerseits wieder die Ausbildung der Spannungsfelder, so daß in der Praxis meist ein paraboloidförmiger Druckkörper entsteht. Trifft die mit etwa 1500 m/s fortschreitende Bruchfront auf Fehlstellen, so können hiervon wellenförmige Beanspruchungen ausgehen, die sich mit Schallgeschwindigkeit fortpflanzen und Anlaß zu Sekundärbrüchen sein können.

Beim Schlag überlagert sich – im Moment der Berührung – die Wellenbeanspruchung der statischen Druckkraft, so daß die äußere Form des Stoßkörpers von dem Bruchkörper bei ruhender Belastung abweicht. Die sehr komplexe Beanspruchung durch Stoß, ist am Beispiel eines isotropen Körpers – Glas – von F. Kerkhof (1970) eingehend beschrieben worden. Obwohl die grundsätzlichen Gesetzmäßigkeiten erkannt sind, bedarf es doch zusätzlicher Experimente, um das tatsächliche Bruchverhalten verstehen zu können. Im Falle des Quarzites kommt noch hinzu, daß wir es nicht mit einem isotropen Körper zu tun haben, sondern wegen des konglomeratischen Aufbaues aus einzelnen Kristallkörnern, nur mit einem quasi-isotropen Werkstoff. Die Schwierigkeiten bei der Vorausbestimmung des Bruchverlaufes bei Schlagbeanspruchung ist darin zu sehen, daß es neben der für den Bruchverlauf hauptsächlich bestimmenden Transversalwelle, noch zahlreiche andere gibt. Erwähnt wurde bereits die Longitudinalwelle, zu der noch als Oberflächenwellen die Rayleigh- und Love-Wellen kommen. Bei der Reflexion an und beim Durchgang durch Grenzflächen finden zudem noch Umwandlungen von einer Wellenart in andere statt. Für die Bruchauslösung ist dabei die Umwandlung von Druckkomponenten in Zugkomponenten von besonderer Wichtigkeit, da bei sprödbrechenden Körpern die zulässigen Zugspannungen etwa eine Größenordnung niedriger sind als die entsprechenden Druckspannungen. Im Initialstadium des Schlages, bildet sich ähnlich wie bei ruhender Belastung, die Herz'sche Kegelstumpffläche aus; bei geschlagenen Werkzeugen macht sie sich als „Schlagmarke“ oder „Bulbus“ bemerkbar. Das Auftreten von Schlagmarken ist demnach kein eindeutiger Hinweis für die Entstehung durch Schlag; sie sind hier jedoch viel häufiger als bei ruhender Druckbelastung. Der beim Schlag an Abschlägen häufig zu beobachtende Muschelbruch, ist durch die Reflexion und Umwandlung der Stoßwellen an den Geröllflächen und Fehlstellen nur ein verzerrter Teilausschnitt aus dem idealen Stoßkörper.

4.5 Raster-Elektronen-Mikroskopische (REM) Aufnahmen von Artefakten und Naturbruch aus Ordoviz-Quarzit

Auf der Suche nach Unterscheidungsmerkmalen zwischen Artefakten und Naturbruch, wurden auch Oberflächenuntersuchungen an einem rezent geschlagenen Artefakt (Dies 1973), einem paläolithischen Werkzeug des Typs 16 nach Krüger (1970) und dem oben beschriebenen Naturbruchstück, mittels dem REM ausgeführt. Die Untersuchungen wurden von der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Darmstadt durchgeführt, unter Verwendung von mit Aluminium bedampften Proben. Einen Teil der Aufnahmen mit einer Vergrößerung von 855:1 geben die Fotos Taf. XII, 1–3 wieder. Aus diesen Bildern und auch aus den hier nicht wiedergegebenen Übersichtsaufnahmen geht hervor, daß die Oberflächen des rezenten Artefaktes und des Paläolith-Werkzeuges weitgehend übereinstimmen. Beide Bruchflächen sind rau und zerklüftet und zeigen an einzelnen Quarzkörnern die für den Stoß typischen wellenförmigen Brüche. Die Werkzeugoberfläche weist darüber hinaus noch lanzettförmige Brüche, wie sie F. Kerkhof (1970) eingehend beschrieben hat. Die in den Bildern wiedergegebenen Brucherscheinungen sind nicht selten; auf einen mm² kommt bei den vorliegenden Untersuchungen 1 Bruchereignis der beschriebenen Art. Es scheint, daß die Orientierung der Quarzitkristalle eine noch nicht näher erforschte Rolle spielt. Auch der Naturbruch weist ähnliche – wenn auch schwächer ausgeprägte – stufenförmige Brüche in vereinzelt Körnern auf, (Taf. XII, 3). Die Häufigkeit eines solchen Bruchaussehens ist allerdings eine Größenordnung geringer als bei den Artefakten. Die Tatsache, daß auch Naturbruch – der durch ruhende Kräfte entstanden

sein muß – ab und an gleichfalls Merkmale einer Wellenbeanspruchung erkennen läßt, ist zunächst überraschend, läßt sich aber durch die oben erwähnte Möglichkeit der Auslösung von Sekundärwellen an Fehlstellen oder Hindernissen erklären. Danach sind die Unterschiede im Mikrobereich zwischen Artefakt und Naturbruch mehr quantitativer als qualitativer Art. Im Makrobereich ist dieser Unterschied wesentlich deutlicher ausgeprägt. Hier zeigen die Artefakte gegenüber Naturbruch eine um 2 Größenordnungen häufigere Ausbildung von Schüppchen mit einer Fläche zwischen 1 und 5 mm², die auf Beugungen der Stoßwelle an Hindernissen oder Fehlstellen hindeutet. Durch das Fehlen von grundsätzlichen Unterschieden in der Bruchausbildung von Quarzit-Artefakten und Naturbruch, ist es deshalb wichtig, auch andere Unterscheidungskriterien für die Beurteilung heranzuziehen.

5. Einige Unterscheidungsprinzipien zwischen Artefakten und Naturbruch

Für die Beurteilung, ob wir es in einem Gesteinskomplex mit Naturbruch oder Artefakten zu tun haben, ist es auch wichtig zu wissen, mit welchem Anteil an Naturbruch man in einem bestimmten Schotterkörper zu rechnen hat. Zu diesem Zweck wurden einige pleistozäne Schotter (Dies 1973, Krüger 1959, 1973) auf ihren Anteil an Naturbruch untersucht und festgestellt, daß in diesen speziellen Fällen der Naturbruchanteil zwischen 4 % und 18 % schwankt, Tabelle 3, der Mittelwert liegt bei etwa 10 %. Übersteigt,

Tabelle 3

Aufschlüsse	Gerölle insges. n	Ordoviz-Gerölle		Gerölle defekt	
		Gerölle intakt n	%	n	%
Leihgestern Probe 2a/Sch. III	48	46	95,8	2	4,2
Leihgestern Probe 3/Sch. IV	110	101	91,82	9	8,2
Eilo-Grabung 1970 aus Zahlentafel 1	968	426	44,0	542	56,0
Deuqua II obere Sch. 1 bis 3	11	9	81,8	2	18,2
Deuqua II untere Sch. 5 bis 10	115	98	85,2	17	14,8
Ohlenberg-Grabung 1969 obere + untere Schicht.	2270	2106	92,8	164	7,2

Anteile von intakten und defekten Ordoviz-Geröllen verschiedener Aufschlüsse um Münzenberg

bei ähnlichen Schotterlagen, der Bruchanteil diesen Mittelwert signifikant, so kann man entweder auf eine stark veränderte natürliche Ursache schließen, oder – wenn das unwahrscheinlich ist – darin eine zusätzliche menschliche Tätigkeit erblicken.

Nachdem wir gesehen haben, daß die Brucherscheinungen an Artefakten und natürlich zerbrochenen Geröllen, mehr graduelle als prinzipielle Unterschiede aufweisen, ist es notwendig, auch andere Unterscheidungsmerkmale für die Betrachtungen heranzuziehen. Eine Auswahl solcher Unterschiede ist in Ta-

Tabelle 4

Naturbruch Naturspiele	Indifferente Geräte (Pseudo-Artefakte)	Werkzeuge
Zweckfrei	Indifferent	Zweckbestimmt
1. Funktionsfrei	Pseudo-Artefakte	1. Funktion
2. Unregelmäßig	Vorformen	2. Regelmäßigkeit
3. Zufallsbedingte Form	Halbzeug	3. Wiederholbarkeit in Serien
4. Fundsituation	Fehlstücke	4. Fundsituation
4.1 Geologisch (Moränen)	Abfall	4.1 Geologisch
	„Chreolithen“	4.2 Archäologisch

Unterschiedsmerkmale zwischen Naturbruch und Artefakten

belle 4 zusammengestellt. Da ein Werkzeug hauptsächlich für einen bestimmten Verwendungszweck gefertigt wurde, muß man die Funktion an erste Stelle setzen, obwohl gerade diese uns heute nicht immer hinreichend erkennbar wird. Weitere wichtige Artefaktkennzeichen sind Wiederholbarkeit in Serien und Gleichmäßigkeit der Herstellung. Einen guten Hinweis für die artefizielle Herstellung sind gelegentlich die archäologische und geologische Fundsituation. All diese Hinweise für echte Geräte fehlen den Naturspielen und dem Naturbruch gänzlich. Häufig schließen geologische „Fundstellen“, wie z. B. Moränen, die Möglichkeit von artefiziellen Funden mit großer Wahrscheinlichkeit aus. Zwischen diesen Extremen nehmen diejenigen Fundstücke eine Sonderstellung ein, die rein äußerlich eine werkzeugähnliche Form aufweisen, deren artefizielle Herstellung aber erst noch durch zusätzliche Kriterien erwiesen werden muß – diese Stücke möchten wir als Pseudo-Artefakte bezeichnen. Weiterhin wird man in diese Zwischen-Gruppe einen Teil derjenigen Abschlüge, Abfälle, Halbzeuge, Vorformen und Fehlstücke einreihen müssen, der hinsichtlich seiner Genese keine ausreichenden und gesicherten Merkmale aufweist. Schließlich gehören in diese Gruppe auch diejenigen Steine, die zwar vom Menschen benutzt sein können, ohne daß das beweisbar wäre, die sogenannten „Chreolithen“.

6. Zusammenfassung

Anhand eines natürlich zerbrochenen Gerölls aus Ordoviz-Quarzit mit artefaktähnlichen Bruchflächen, werden die physikalischen Bruchursachen im speziellen Fall und auch allgemein erläutert. Bei ruhender Beanspruchung wird der Einfluß von äußeren und inneren Kräften (Eigenspannungen) an Hand des Hook'schen Gesetzes beschrieben. Bei der Schlagbeanspruchung wird auf die Wellennatur der Energieeinleitung hingewiesen. Hierbei kommt es an Oberflächen, Fehlstellen u. a. zu Reflexionen, Beugungen und Interferenzen, die im makroskopischen Bereich zu einer Schüppchenbildung bei Quarziten führen, während im mikroskopischen Bereich an einzelnen Quarzkörnern, Lanzettbrüche und „Wallner-Linien“-artige Strukturen erkennbar werden. Bei Artefakten wurden diese Erscheinungen mit dem Raster-Elektronenmikroskop (REM) nachgewiesen und um etwa eine Größenordnung häufiger als beim Naturbruch gefunden. Die Unterschiede in physikalischer Hinsicht, sind zwischen Artefakten und Naturbruch, mehr gradueller als prinzipieller Natur, so daß es wichtig erscheint, weitere Unterscheidungskriterien zur Bestimmung echter Artefakte heranzuziehen. Auf solche zusätzliche Unterscheidungsmerkmale wird hingewiesen.

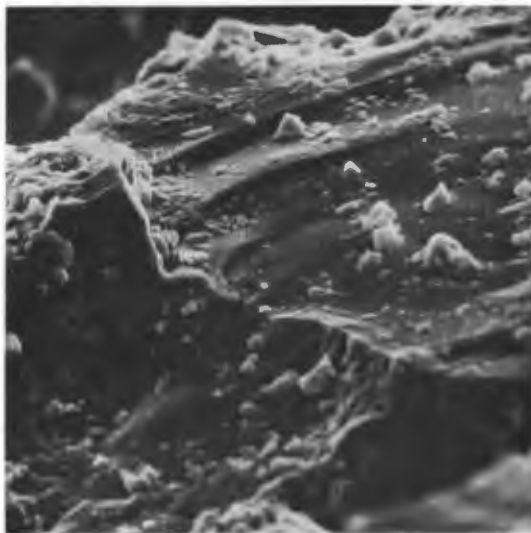
Literatur

- Andres, W., Morphologische Untersuchungen im Limburger Becken und in der Idsteiner Senke. Rhein-Mainische Forschungen, Heft 61, 1967.
- Bibus, E., in: Das Eiszeitalter im Rhein-Main-Gebiet. Rhein-Mainische Forschungen, Heft 78, 1974.
- Dies, K., Fundberichte aus Hessen, 13, 1973, 59–64.
- Huckriede, R., Neues Jahrb. Geol. Paläontol., 111, 1960, 234 ff.
- Kerkhof, F., Bruchvorgänge in Gläsern, Frankfurt am Main, 1970.
- Krüger, H., Eiszeitalter u. Gegenwart, 10, 1959, 165 ff.
- Fundberichte aus Hessen, 13, 1973, 1–58.
- Frühe Menschheit und Umwelt. Festschrift A. Rust Tl. 1. Fundamenta A 2 (1970), 22 ff.
- Speth, J. D., American Antiquity, 37, 1972, 34–60.



Aufschluß Deuqua II am Friedhof bei Münzenberg (Wetterau).
Zweigeteilte Schotter, darüber 2. fossiler B_tHorizont.

(Fot. Dies aus: Fundberichte aus Hessen, 13, 1973 [1975], H. Krüger, 47, Abb. 17.)



1. REM-Aufnahme der Bruchfläche eines rezent geschlagenen Ordoviz-Gerölles (aus: Die Naturwissenschaften, 62, 1975).

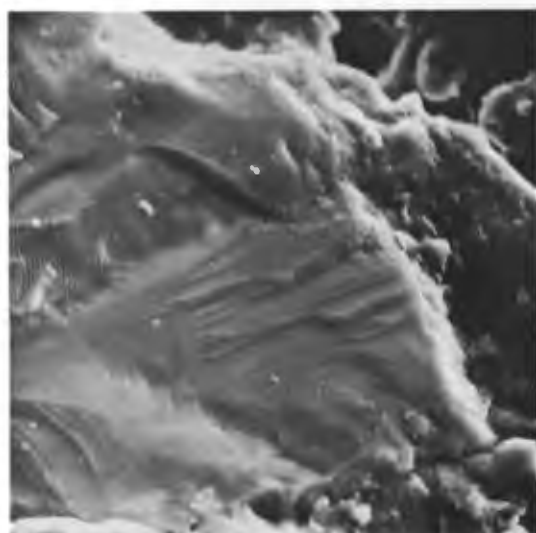
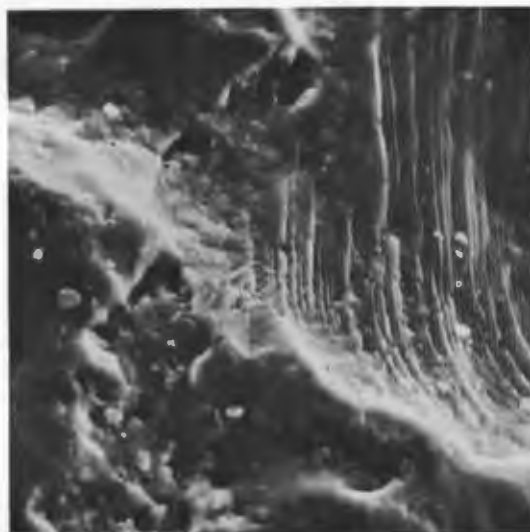
855:1

MPAD 29407/2

2. REM-Aufnahme der Schlagfläche eines paläolithischen Artefaktes von Leihgestern (Typ 16).

855:1

MPAD 29466/1



3. REM-Aufnahme der Bruchfläche von Teil 3 des Pseudo-Artefaktes.

855:1

MPAD 29465/3