

# Der Geröllquotient, ein weiterer Beitrag zur Theorie der Erosion.

Von **Gustav Stratil-Sauer.**

(Mit 2 Textabbildungen.)

In großen Linien habe ich über die Ergebnisse meiner Studien zur Theorie der Erosion anlässlich einer Fachsitzung der Geographischen Gesellschaft berichtet. Zwar habe ich verschiedene Teilfragen davon gesondert behandeln können<sup>1)</sup>; doch war es mir noch nicht möglich, den gesamten Fragenkomplex abzuschließen. Wenn hier ein weiteres Sonderproblem untersucht werden soll, so müssen wir zum besseren Verständnis eine Klärung einiger laufend verwendeter Begriffe vorausschicken.

Unter **Erosionsgeröll** verstehen wir eine Gesteinsmasse jener maximalen Größe, die das fließende Wasser bei einer entsprechenden Erosionsgeschwindigkeit eben in Bewegung setzt. Mit **Ablagerungsgeröll** dagegen wird das im Flußbett durch eine bestimmte Transportgeschwindigkeit bewegte Geröll jener maximalen Größe bezeichnet, das eben aus dem Zustand der Bewegung in den der Ruhe übergeht. Durch diese beiden Geröllarten wird jedes Normalprofil zwei- und bisweilen auch dreigeteilt. Auf der ersten Strecke, der **reinen Erosion**, können normalerweise, solange der Wasserspiegel nicht fällt, Gerölle nicht abgelagert, sondern nur in Bewegung gesetzt werden. Das trifft für den Oberstlauf, aber auch für die wenigen konvexen Stellen im Längsprofil zu. Die zweite Strecke, die des **Erosionstransportes**<sup>2)</sup>, beginnt dort, wo die schwersten Gerölle aus der Strecke der reinen Erosion sedimentiert werden, also bei einer Grenze, die mit stärkerer Wasserführung weiter abwärts wandert. Da hier aber dieselbe Fließgeschwindigkeit, welche die

- 
- 1) a) Einige Vorbemerkungen zur Theorie der Erosion. *Geologie und Bauwesen* 1950, H. 1, S. 30—43.
  - b) Die Transporterleichterung. *Geogr. Studien* (Sölich-Festschrift). Wien 1951, S. 145—166.
  - c) Die Lesedecke. *Geologie und Bauwesen* 1951, H. 3, S. 123—142.
  - d) Stellungnahme zu einigen Auffassungen über das Flußlängsprofil. *Sitzber. der Österr. Ak. d. Wiss., math.-naturw. Kl.*, 1951, Bd. 160, H. 1 und 2, S. 17—36.
  - e) Arbeit am Antlitz der Erde, Selbstregulierung im Kräftespiel des Flußlaufes. *Die Umschau* 1953, H. 11, S. 328—332.

<sup>2)</sup> Ich habe den Namen „Strecke des Erosionstransportes“ hier noch verwendet, werde aber in Zukunft den Ausdruck „Strecke des Geröll austausches“ wählen, der das Wesen dieses Flußabschnittes besser kennzeichnet.

großen Gerölle niederlegt, noch kleinere aufhebt, ist diese zweite Strecke durch das Beisammen von Erosion und Sedimentation, den Geröllaaustausch, gekennzeichnet. Die unterste, freilich nicht in jedem Flußlauf anzutreffende Strecke ist die der reinen Sedimentation. Sie prägt sich typisch in den „Dammflüssen“ aus, wo in schwacher Strömung Kleinstbestandteile absinken, ohne daß erodiert werden könnte. Zeit- und stellenweise freilich wird diese dritte Strecke durch ein Ansteigen der Erosionsgeschwindigkeit gestört.

Bei sinkendem Wasserspiegel verschiebt sich die Grenze der Strecke der reinen Erosion aufwärts, indem das Bett mit ungefügten Geröllen überstreut wird, die sich aber bei stärkerer Wasserführung leicht wieder in Bewegung setzen lassen. Die Strecke des Erosionstransportes hingegen zeigt sich mit einer zweckmäßig gefügten Lesedecke gepflastert, die von dem darüber hingleitenden Geröllstrom korrodiert wird. Hier vollzieht sich nun der Geröllaaustausch, indem die Strömung schwerere Ablagerungsgerölle ausscheidet und leichtere Erosionsgerölle aus der Lesedecke aufnimmt. Daß mit steigender Geschwindigkeit des Wassers auch größere Stücke erodiert werden, ist seit langem bekannt; doch wurde meines Wissens das unterschiedliche Verhältnis zwischen Erosions- und Ablagerungsgeröll noch nicht beachtet, obwohl es von höchster Bedeutung für die Ausbildung des Flußlängsprofiles ist. Um nicht immer umständlich von dem wechselnden Quotienten sprechen zu müssen, der sich aus dem Verhältnis zwischen Erosions- (E) und Ablagerungsgeröll (A) ergibt, bezeichnen wir das Resultat dieser Relation als Geröllquotient (K). Formelhaft stellt es sich dar durch:

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{K} \quad \text{oder} \quad K = \frac{A}{E}$$

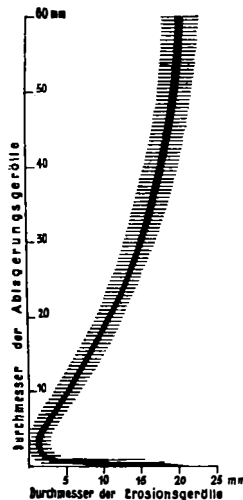


Abb. 1. Beziehungskurve zwischen Ablagerungs- und Erosionsgeröllen.

Wenn in einem Flußlauf ein Geröll von z. B. 31 mm Durchmesser abgelagert wird, so kann sich ein Erosionsgeröll von 15 mm Durchmesser in Bewegung setzen.

Das Verhältnis zwischen beiden Geröllarten gibt das Diagramm in Skizze 1 wieder. Die verschiedene Struktur der Lesedecke, ihre Konsistenz und Lagerung, die Form und Schwere der Gerölle, ferner Reibung, Temperatur und Trübung des Wassers bewirken für die Beziehungen zwischen Erosions- und Ablagerungsgeröllen beachtliche Streuungen, wie wir besonders durch Gilbert (1) und Schaffernak (5) wissen. Wir tragen dieser Streuung einigermaßen Rechnung, indem wir, hier Hjulström (3) folgend, die Resultate als breite Linie ziehen. Das Diagramm macht die Verschiedenartigkeit im Verhältnis zwischen beiden Geröllarten ersichtlich. Es zeigt, daß bei einer bestimmten Wassergeschwindigkeit, welche Gerölle von 60 mm Durchmesser ablagert, solche von 20 mm Durchmesser in Bewegung gesetzt werden können, während bei ihrem Nachlassen ein Ablagerungsgeröll von 31 mm Durchmesser einem Erosionsgeröll von 15 mm Durchmesser entspricht.

Der Größenunterschied von Erosions- und Ablagerungsgeröll auf der gleichen Stelle der Austauschstrecke beruht vor allem darin, daß das Inbewegungsetzen der Materie stets eine größere Kraft als das Inbewegunghalten erfordert. Dazu gliedert sich der Abtransport durch das verschieden schnell strömende Wasser höhenmäßig in drei Horizonte: Im untersten nahe der Flußsohle, wo die geringste Geschwindigkeit herrscht, bewegen sich die groben und schweren Gesteine mehr rollend als gleitend. Ragen sie aber aus dieser Grenzschicht heraus, so werden sie von den rascher fließenden Strömungslinien im zweiten Horizont erfaßt und so schnell befördert, daß sie den kleineren Stücken oft vorausziehen. Hier bewegen sich die Einzelbestandteile in mehr oder minder weiten parabelartigen Sprüngen, durch die sie oft ganz vom Flußbett losgelöst werden. Die interimweise Ausschaltung der abbremsenden Reibung und das schnellere Fließen des Wassers beschleunigen den Abtransport in dieser mittleren Schicht. Der dritte Horizont endlich befördert seine Bestandteile schwebend mit der Geschwindigkeit des Wassers selbst, die knapp unter der Oberfläche gewöhnlich ihr Maximum erreicht.

Ein weiterer Unterschied ergibt sich aus der wechselnden Bewegung des Wassers, das in der dünnen untersten Grenzschicht häufig laminar strömt (4), zumal wenn die Flußsohle glatt oder wenigstens ausgeglichener Struktur ist. Darüber herrscht eine turbulente Strömung mit anscheinend wirr durcheinander wirbelnden Wasserteilchen, die sich teils vertikal, teils schräg auf und ab oder selbst in besonderen Walzen gegen die Strömung bewegen. Da die Geröllbewegung diesen Strömungen folgt, spielt bei starker Turbulenz der Auftrieb eine große Rolle und verstärkt den zweiten Horizont, während sich zeitweise im Kern von Walzen neutrale Zonen ausbilden können, so daß ganz unvermittelt plötzlich sehr leichte Gerölle zur Ablagerung kommen.

Das Tempo des Abtransportes in den einzelnen Horizonten steigt und sinkt mit der Geschwindigkeit des Wassers. Dazu kommt natürlich noch, daß infolge der Konstanz des Abfließens in jedem Flußlauf die seichten Strecken hohe und die tiefen niedere Wassergeschwindig-

keiten zeigen, was bei Zerdehnung, bzw. Verkürzung des Querprofils das Verhältnis der drei Horizonte zueinander exzessiv steigert.

Der Größenunterschied zwischen Erosions- und Ablagerungsgeröll beruht also einmal darin, daß das Inbewegungsetzen mehr Kraft erfordert als das Fortbewegen, und zum anderen darin, daß die auf ihren Abtransport in schneller fließende Stromlinien reichenden Großgerölle, auf ihre Oberfläche berechnet, absolut und relativ stärkere Kraftimpulse empfangen als die Kleinbestandteile. Besonders stark ist dieses Mehr an Energie in seichtem Wasser ausgeprägt. Dem entspricht die Beobachtung, daß hochgestellte Windräder auch bei gleichem Triebwerk mehr Kraft entfalten als solche am Erdboden. Es ist daher verständlich, wenn im Zusammenhang mit der unterschiedlichen Behandlung der Erosions- und Ablagerungsgerölle ihr Quotient sich ändert, das heißt, mit stärkerer Strömung wächst und mit schwächerer sinkt. Demnach ist fürs erste zu beobachten, daß der Geröllquotient von intensiven Strömungen zu weniger intensiven abfällt. Von einer Bodengeschwindigkeit von etwa 15 cm/sec. abwärts ändern sich die Verhältnisse jedoch. Wohl nimmt die Größe der Ablagerungsgerölle weiterhin korrespondierend zum Sinken der Fließgeschwindigkeit ab, aber die Kleinstbestandteile widerstehen dem Inbewegungsetzen immer wirksamer, weil Adhäsion und Kohäsion sie besonders verfestigen. Kolloidale Tone, selbst wenn sie sich aus Einzelbestandteilen von nur 0.005 mm Durchmesser zusammensetzen, verlangen z. B. eine Erosionsgeschwindigkeit von 130 cm/sec., also die gleiche, die auch Gerölle von etwa 15 mm Durchmesser in Bewegung zu setzen vermag (3)!

Bei solchen geringen Wassergeschwindigkeiten hören daher Erosion und Geröllaustausch auf. Wohl dürfte der an der Sohle bewegte Sand korrodierend wirken, und wahrscheinlich reißen auch turbulente Strömungen kleine Partikelchen von Ton oder Lehm auf, wie kleine Strudellöcher in der Sohle beweisen (2); doch werden diese Kleinstbestandteile bald zerrieben und als Schweb abtransportiert. In Fällen von erhöhtem Wasserstand und damit von schnellerem Fließen verschieben sich die Grenzen natürlich so, daß an solchen Stellen der reinen Sedimentation die Erosion wieder einsetzen kann. Immerhin darf man den Geröllquotienten bei etwa 15 cm/sec. auslaufen lassen, da der Faktor Erosionsgeröll hier den Nullwert erreicht. Selbstverständlich ist der Transport der Gerölle häufig durch Hindernisse im Flußbett erschwert, — durch Unausgeglichenheiten in der Überstreuung oder Lesedecke, von den Hängen abgestürzte Felstrümmer, aus verschiedener Härte des Untergrundes resultierende Gesteinsbänke, wechselnd heftige Turbulenz des Wassers, das Pendeln des Stromstriches u. dgl. mehr. Die Größe der Ablagerungsgerölle stellt ein bestimmtes Limit dar. Wohl kann ein Geröll von einem geringen Gewicht unter besonderen Umständen bei höherer Wassergeschwindigkeit abgelagert werden, wohl kann es also eine provisorische Sedimentation an einer Stelle finden, wo bei gleicher Strömung normalerweise schwerere Stücke niedergelegt werden. Unmöglich aber ist seine Sedimentation bei einer geringeren

Wassergeschwindigkeit dort, wo normalerweise leichtere Gerölle abgelagert werden. Zur Illustrierung ein Beispiel: bei einer Transportgeschwindigkeit des Wassers von etwa 150 cm/sec. werden Gerölle von 30 mm Durchmesser abgelagert. Das gleiche kann unter besonderen Umständen wohl auch bei einer Transportgeschwindigkeit von 200 cm/sec., nicht aber bei einer von 100 cm/sec. erfolgen.

Eine bestimmte Transportgeschwindigkeit kann also unter erschweren Beförderungsverhältnissen wohl größere, aber nicht kleinere als die zugeordneten Geröllstücke ablagern. Auch die Erosion fördert bei einer bestimmten Geschwindigkeit nicht immer nur die größtmöglichen Stücke, sondern sie setzt am gleichen Ort auch kleinere in Bewegung, die sie z. B. in langer Arbeit erst aus dem Anstehenden oder der zementierten Lesedecke herauspräparieren mußte oder die an vormals geschützten Stellen plötzlich von den Strömungslinien getroffen werden. So stellt auch das Erosionsgeröll ein Limit dar, das wohl unter-, aber nicht überschritten werden kann. Eine bestimmte Erosionsgeschwindigkeit vermag unter Umständen kleinere, aber nie größere Gerölle als die ihr zugeordneten in Bewegung zu setzen.

Der Quotient  $K = \frac{A}{E}$  muß demnach von variabler Größe sein. Die Gesteinsstücke werden, — wenn wir vorerst den Nenner dieser Gleichung betrachten wollen, — besonders dort, wo das Wasser unmittelbar auf das Anstehende wirkt, seltener die Maximalgröße der Strömung entsprechenden Erosionsgerölls aufweisen, da Form und Volumen des in Bewegung gesetzten Materials im Anstehenden von der Textur und Struktur des Gesteins, der Wirksamkeit der chemischen und physikalischen Verwitterung sowie der Wucht der im Transport befindlichen Stücke mitbestimmt werden. Nicht viel anders ist es am Beginn der Strecke des Erosionstransportes, wenn sich die Lage dieser Stelle auch je nach der Wasserführung verändert und somit ein besonders starkes Hochwasser, das an einer tiefen Stelle des Normalprofils die schwersten Gerölle abzustößen beginnt, im Geröllaaustausch bereits Material aus der entwickelten Lesedecke aufgreifen kann. Man beobachtet nach solchen Hochwassern neben den großen Gerölln in der Lesedecke häufig „Löcher“, die bestenfalls mit einer dünnen Überstreuung „geflickt“ sind. Je weiter stromab, desto einheitlicher wird die Lesedecke in ihrer Zusammensetzung, desto kleiner und zahlreicher werden die Gerölle, so daß die Erosion dem Ende dieser zweiten Strecke zu immer reichlicheres Material vorfindet.

Die Abweichungen des Nenners in unserem Bruch  $\frac{A}{E}$  haben wir uns also im Normalprofil dementsprechend so vorzustellen, daß am Beginn der Strecke des Erosionstransportes, wo die geeigneten Gerölle zum Inbewegungsetzen oft fehlen, meist kleinere Werte als das maximale Erosionsgeröll in Rechnung zu stellen sind.

Die Streuung der Ablagerungsgerölle, natürlich stark von der Rauheit der Flußsohle abhängig, ist im Normalprofil bei starken Strömungen, also zu Beginn unserer Strecke, am größten. Wir werden

demnach die stärksten Abweichungen vom normalen Ablagerungsgeröll am Anfang der Strecke des Erosionstransportes finden. Je mehr sich die Lesedecke stromab glättet, desto leichter kann der Norm entsprochen werden, zumal da im Normalprofil der Mündung zu der Geröllstrom sich immer weniger differenziert zeigt.

Darum haben wir also im Normalprofil die stärksten Abweichungen von Nenner wie Zähler des Bruches  $\frac{A}{E}$  im Oberlauf zu erwarten, was sich im Resultat des Quotienten gegenseitig abschwächt. Je weiter stromab, desto mehr nähern sich Zähler wie Nenner der Norm. Da deshalb die Streuung im Normalprofil nicht so groß sein kann, läßt sich eine generelle Betrachtung des Geröllquotienten rechtfertigen.

Wollen wir die Werte der Geröllquotienten, bezogen auf die Bodengeschwindigkeit, aufzeichnen, so werden wir finden, daß sie erst dann richtig zum Ausdruck kommen, wenn wir sie zum Kubus erheben, soll uns der Quotient doch ein Verhältnis verschieden voluminöser Körper wiedergeben. In den obengenannten Beispielen ist der Quotient daher nicht mit  $\frac{60}{20} = 3$ , bzw.  $\frac{30}{15} = 2$ , sondern mit 27, bzw. 8 einzusetzen.

Die Größenabwandlung wird durch Skizze 2 veranschaulicht, wobei die Resultate aus bereits erörterten Gründen wiederum als Band dargestellt sind, damit wir der Streuung einigermaßen Rechnung tragen.

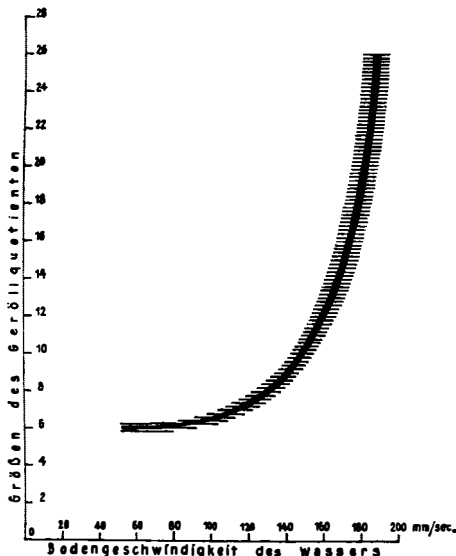


Abb. 2. Der Geröllquotient in Abhängigkeit von der Bodengeschwindigkeit des Wassers. Der Geröllquotient bei einer Bodengeschwindigkeit des Wassers von z. B. 200 cm/sec. beträgt 27, bei einer solchen von 100 cm/sec. nur 6.6, — d. h. es müssen 27, bzw. 6.6 Einheiten Gerölle erodiert werden, um volumenmäßig einem Ablagerungsgeröll zu entsprechen.

Der Geröllquotient bedeutet einen wichtigen Faktor für die Morphologie. Es ergibt sich nämlich, daß die Frage der Eintiefung und damit die der Ausgestaltung des Flußlängsprofils nicht allein, wie die Morphologie bislang allgemein lehrte, von der Erosionskraft, dem wechselnden Widerstand des Gesteins und seiner Lagerung abhängt, sondern, daß auch das Verhältnis zwischen Erosions- und Ablagerungsgeröllen hier in Rechnung zu stellen ist. Das geht aus folgender Überlegung hervor: bei einer Bodengeschwindigkeit von 100 cm/sec. z. B., wo der Geröllquotient laut Skizze 2 = 6·6 beträgt, müssen 6·6 Einheiten von Erosionsgeröll in Bewegung gesetzt werden, um dem Volumen eines Ablagerungsgerölles zu entsprechen. Bei der doppelten Bodengeschwindigkeit von 200 cm/sec. dagegen müssen zur Erzielung des gleichen Effektes schon 27 Erosionsgerölle aufgehoben werden. Es ist einsichtig, daß die Frage der Eintiefung oder Erhöhung eines Flußbettes weitgehend von diesem Verhältnis abhängt.

Für die Strecke der reinen Erosion freilich trifft das nicht zu, da sie ja weder Ablagerung noch Austausch kennt. Das gleiche gilt für die Strecke der reinen Sedimentation, die weder Erosion noch Austausch führt. Geröllaustausch tritt nur auf der Mittelstrecke, der des Erosionstransportes, auf. Ob eine Eintiefung eintritt, hängt hier wesentlich davon ab, ob dem Volumen nach die Erosions- oder die Ablagerungsgerölle überwiegen. Kleine Korrekturen erleidet die Eintiefung dabei einerseits durch die korrodierende Wirkung, die der Geröllstrom auf die in der Lesedecke zusammengefaßten Gesteine ausübt, und andererseits durch Ablagerungen aus dem Schweb, dessen schwerste Bestandteile sich bei nachlassender Turbulenz nieder senken.

Für die Strecke des Erosionstransportes liegen drei Möglichkeiten vor:

1. Ist das Volumen der Erosionsgerölle zusätzlich des Substanzverlustes durch den Abschleiß größer als das der Ablagerungsgerölle zusätzlich der sedimentierten Schwebbestandteile, so wird das Bett durch lineare Erosion tiefergelegt.

2. Bei Umkehrung dieses Verhältnisses erhöht es sich.

3. Verhalten sich beide Volumina gleich, so verändert sich die Höhe nicht. Nach der Lehrmeinung befindet sich der Fluß dann „im Gleichgewicht“. Gegen den Ausdruck an sich ist nichts einzuwenden, da die aufgezeigten Gegensätzlichkeiten in diesem Falle ja wirklich ausgewogen sind. Falsch nur sind Begründungen dieser Art, daß der Fluß sich im Gleichgewicht befinde, weil „seine Schleppkraft zur Erosion nicht mehr ausreicht“ oder weil er „den Schutt (i. e. Geröll) nicht mehr bewältigen kann“, und was man an entsprechenden Argumenten liest.

Ausscheidungen aus dem Schweb spielen bei einer lebendigen Strömung keine Rolle. Sie schlagen sich bestenfalls an den Rändern der Uferwalzen nieder, so daß sie für die Frage der Eintiefung fast bedeutungslos bleiben. Werden sie aber wirklich im Stromstrich deponiert, so daß sie als Ablagerungsgerölle zu zählen sind, so kann

die Bodengeschwindigkeit des Wassers höchstens 5 cm/sec betragen haben, wie sie für Korngrößen von 1 mm Durchmesser abwärts ermittelt wurde (3). Herrschte eine stärkere Bodengeschwindigkeit, so fände der niedergeschlagene Schweb ja keine Ruhe, sondern würde am Boden weiterbefördert werden. Wo aber so geringe Bodengeschwindigkeiten wie 5 cm/sec. auftreten, wird kein Geröll mehr erodiert oder ausgetauscht: die Strecke des Erosionstransportes ist hier zu Ende. Deshalb kann der aus niedergeschlagenem Schweb resultierende Wert (den wir in der Formel mit Sa wiedergeben) auf Eintiefungsstrecken unbeachtet bleiben, während der auf Aufschüttungsstrecken zu berücksichtigen ist.

Umgekehrt verhält es sich mit dem Abschleiß. Je lebendiger die Strömung, desto lebhafter gestaltet sich normalerweise durch die Korrosion auch die Förderung von Feinbestandteilen, die meist dem Schweb zugeführt werden. Eine bescheidene Rolle spielt die Korrosion (in den Formeln mit Ko bezeichnet) hingegen auf Aufschüttungsstrecken, wo viel Gesteinsmaterial abgelagert wird und eine geringere Bodengeschwindigkeit vorherrscht. Im Verhältnis zum sonstigen Niederschlag von festen Bestandteilen auf diesen Strecken kann sie ohne größeren Fehler vernachlässigt werden.

Wenn mit E und A die Größe und mit x und y die Anzahl der Erosions- bzw. der Ablagerungsgerölle an den verschiedenen Stellen bezeichnet wird, ergibt sich:

1. Eintiefung ist nur dann möglich, wenn  $E \cdot x + Ko > A \cdot y$ , oder (wenn 1 für y und K für  $\frac{A}{E}$  einzusetzen ist) wenn

$$x + \frac{Ko}{E} < K \text{ ist.}$$

2. Erhöhung ist nur dann möglich, wenn  $E \cdot x + Sa < A \cdot y$ , oder  $x + \frac{Sa}{E} < K$  ist.

3. Die Höhe der Flußsohle bleibt unverändert, wenn

$$E \cdot x + Ko = A \cdot y + Sa, \text{ oder wenn}$$

$$x = K + \frac{Sa - Ko}{E} \text{ ist.}$$

Wenn diese Formeln bei der Unsicherheit ihrer Faktoren auch mehr den Ausdruck einer präzisen Formulierung als einen Behelf für Berechnungen bedeuten, so eröffnen sie durch Klarstellung der Vorgänge im Flußbett doch neue Ausblicke. Sie besagen vor allem, daß der Geröllquotient und die Frage der Eintiefung bzw. der Aufschüttung miteinander in unmittelbarer Beziehung stehen. Da die Faktoren  $\frac{Ko}{E}$ ,  $\frac{Sa}{E}$  und  $\frac{Sa - Ko}{E}$  in den genannten drei Funktionen nur kleine Werte ausdrücken können, ergibt sich, daß entsprechend den unterschiedlichen Werten des Geröllquotienten bei hohen Geschwindigkeiten zahlreiche, bei geringen dagegen wenige Gerölle dem Transport übergeben werden müssen, damit beim Austausch annähernd das Gleichgewicht im Längsprofil erhalten bleibt. Bei Über-



oder Unterschreiten dieser Grenze ist Eintiefung, bzw. Aufschüttung zu erwarten.

Die relative Größe der Erosionsgerölle ändert sich entgegen der allgemeinen Annahme. Fürs erste nimmt man ja natürlich an, daß bei hohen Wassergeschwindigkeiten auch große Erosionsstücke gefördert werden. Das ist auch richtig; doch haben wir oben bereits dargelegt, warum die Erosionsgerölle bei starkem Strömen relativ — das heißt im Verhältnis zu den Ablagerungsgeröllen — klein sein müssen. Wie wir schon in früheren Arbeiten auseinandergesetzt haben, ist die Transportfrage des Gerölls im Flußbett die wichtigste, der sich alle anderen unterordnen. Der hohe Geröllquotient für die Erosionsgerölle bei großen Geschwindigkeiten bildet einen neuen Beleg dafür. Durch ihn nämlich erweisen sich die größten Erosionsgerölle als am meisten transportbegünstigt: sie haben die längste Wanderstrecke vor sich. Gerade weil bei starker Strömung die Flußsohle sehr rauh ist und dem Transport bedeutendere Hindernisse in den Weg stellt als eine mäßig überströmte glatte Lesedecke, werden relativ kleine Erosionsstücke leichter über solche Hemmnisse hinweggetragen. Zwingt dann die Örtlichkeit ein Geröll dennoch zur vorzeitigen Sedimentation, so bleibt doch, weil es eben kleiner ist, die Möglichkeit, daß es bei ansteigendem Wasserspiegel eher erneut in Bewegung gesetzt wird.

Zeigt das Wasser dagegen eine mäßige Geschwindigkeit, so werden bei niederem Geröllquotient relativ große Erosionsgerölle in Bewegung gesetzt, und das bedeutet, daß viel weniger Gerölle nötig sind, um das Volumen eines Ablagerungsgerölls auszugleichen. So hat es die Erosion bei mittleren Geschwindigkeiten leichter, der Verschotterung entgegenzuarbeiten, zumal da, je weiter flußabwärts, desto reichlicher Erosionsmaterial von passender Schwere zur Verfügung steht. Auf den Strecken der reinen Erosion muß das Wasser, nachdem mit dem ersten Ansteigen die Überstreuung abtransportiert worden ist, die Gerölle aus dem Anstehenden brechen, was oft eine lange Zeit erfordert. In den mittleren Partien vermögen nur Katastrophenhochwasser die Lesedecke zu entfernen, das Anstehende anzugreifen und eine neue Lesedecke auszubilden. Diese stellt sich jedoch weiter flußabwärts immer einheitlicher dar, und ihre Gerölle nehmen, je kleiner sie werden, an Zahl zu, so daß die Erosion dort immer leichter ein entsprechendes Material zum Inbewegungsetzen angreifen kann. Zudem lehrt uns der geringe Geröllquotient, daß es keinen starken Wechsel in den Geschwindigkeiten erfordert, um die abgelagerten Gerölle erneut aufzuheben. So kommt man zu dem paradox erscheinenden Satz, daß bei geringen Geschwindigkeiten mehr erodiert wird als bei hohen. Doch wird er einleuchtend, wenn man sich vor Augen hält, daß die Masse der Fracht flußabwärts wächst und auch abtransportiert wird, so lange der Fluß sein Bett nicht erhöht.

Auf der Strecke des Erosionstransportes, mit der wir uns hier zu beschäftigen haben, muß die Zahl der Ablagerungsgerölle im Normalprofil flußabwärts ansteigen. Bei diesem abgelagerten Material steht das Nährgebiet, — das heißt, jener Teil des Flußbettes,

dessen Geschwindigkeit hinreicht, um ein Geröll von solcher Größe zu erodieren, — in umgekehrtem Verhältnis zum Volumen der Stücke, wie bereits an anderer Stelle (c) ausgeführt wurde. Große Gerölle haben enge und kleine Gerölle weite Nährgebiete, und verständlicherweise geht damit auch ihre Anzahl Hand in Hand. Dazu kommt noch, daß die einzelnen Stücke beim Abrollen häufig zerbrechen und so die Menge der kleinen noch vermehren.

Die Ablagerungsgerölle kommen keineswegs in gleichmäßiger Verteilung zur Ruhe. Da sich ihre Größen, wie der Geröllquotient anzeigt, bei hohen Geschwindigkeiten schnell ändern, werden sie bei Schwankungen des Strömens massiert niedergelegt. Verringert sich die Bodengeschwindigkeit z. B. von 180 auf 162 cm/sec., also um 10%, so werden aus dem Geröllstrom alle Bestandteile von 40 bis 65 mm Durchmesser, also von 64—275 cm<sup>3</sup> Volumen ausgeschieden. Aus dem regelmäßigen Auftreten solcher Schwankungen erklärt sich denn auch leicht der starke Anteil sehr wechselnder Geröllgrößen auf Flußstrecken mit hohen Geschwindigkeiten. Im lebhaften Strömen werden diese Gerölle zugeschliffen, bis das nächste Hochwasser sie in erodierbarer Schwere vorfindet. Hier zeigt sich wieder die hervorragend „überlegte“ Transportmechanik. In lebhafter Strömung stören die vielen Ablagerungsgerölle ja wenig. Das Inbewegungsetzen der Sedimente erfolgt, wenn nicht exorbitante Hochwasser auftreten, keineswegs stürmisch, da der hohe Geröllquotient eine allmähliche Erosion bestimmt. Stürmisches Sedimentieren nach zögerndem Erodieren kennzeichnet Eintiefungsstrecken bei sinkender Wassergeschwindigkeit, so daß die unteren, an und für sich geröllreichen Strecken von Transportkrisen tunlichst befreit bleiben.

Verringert sich die Geschwindigkeit hingegen bei 50 cm/sec. um 10%, so werden nur Gerölle von 8—9 mm Durchmesser, das sind 5·12—7·29 cm<sup>3</sup> Volumen sedimentiert. Da außerdem auf Strecken gemäßigter Strömung die Wassergeschwindigkeit nicht so exzessiv schwankt wie weiter oberhalb, zeigen die abgelagerten Gerölle hier, wie sich ja in jedem Bachbett beobachten läßt, eine mehr einheitliche Größe. Es wirkt wie überlegt, daß der Fluß auf den an und für sich einen mächtigen Geröllstrom führenden Strecken bei Pegelschwankungen nur relativ wenig Stücke ablagert, die sich zudem über ein zerdehnt flaches Gefälle verteilen und bei geringem Geröllquotienten leicht erneut in Bewegung gesetzt werden können. Es fällt schwer, etwas Zweckdienlicheres auszudenken.

Die Länge der Wanderstrecke eines Gerölls hängt im wesentlichen davon ab, wie stark die Strömungsgeschwindigkeit im Normalprofil nachläßt und wie intensiv der Abrieb sich auswirkt; denn je mehr das Gesteinsstück sich abrollt, desto leichter und transportabler wird es. Aber auch der Geröllquotient wirkt sich auf die Länge des Wanderweges aus. Wird nämlich ein Stück dort in Bewegung gesetzt, wo dieser Quotient groß ist, so ist es transportbegünstigt und dürfte eine weite Beförderung vor sich haben. Endlich ergeben sich auch Zusammenhänge zwischen dem Quotienten und der Anzahl der Gerölle schlechthin. Nehmen wir an, daß auf der Strecke des

Erosionstransportes regelmäßig ein Ablagerungsgeröll durch entsprechende Erosionsstücke volumengleich austariert wird, so muß sich am Ende der Wanderstrecke die Zahl der Stücke entsprechend dem Geröllquotienten vermehrt haben ( $E \cdot K = A$ ). Freilich ist diese These in zweierlei Hinsicht zu korrigieren. Zum ersten wird nämlich auf Eintiefungsstrecken mehr und auf Aufschüttungsstrecken weniger Material in Bewegung gesetzt, als  $K$  anzeigt. Nehmen wir z. B. an, daß der Geröllstrom auf einer Eintiefungsstrecke durch die Erosion in einer bestimmten Zeiteinheit nach jedem Meter um  $1 \text{ cm}^3$  vermehrt wird, so beträgt die Zunahme des Volumens nach  $1 \text{ km}$  infolge Summierung  $1 \text{ m}^3$ , das heißt, der vorbeiziehende Geröllstrom ist nach  $1 \text{ km}$  um so viel mächtiger geworden. Dabei müßten die Flüsse in ihrem Geröll ersticken, wenn dieser Zuwachs nicht durch die zweite Korrektur, nämlich den Abrieb, abgebrems würde. Bei Aufschüttung ergibt unser Beispiel entsprechend eine Verringerung des Volumens.

Erosionsmaterial aus Löß, Ton oder Lehm setzt sich häufig in kurzer Zeit vollkommen in Schweb um, so daß es nicht mehr zum Ablagerungsgeröll werden kann, es sei denn, daß man den niedergeschlagenen Schweb als solches bezeichnen will; doch ist zu bedenken, daß dieser, wie erwähnt, erst jenseits der Strecke des Erosionstransportes absinkt. Das andere Extrem bilden harte Gerölle der Basalte, Obsidiane u. a. m. in Flußläufen von temporärer Wasserführung. Solches Erosionsgeröll, nur wenig abgerollt, bleibt nach seiner Sedimentierung lange liegen, bis Abschleiß, Verwitterung oder besonders starke Wasserführung es zu einer erneuten Bewegung bringen können.

Kann also im ersten Falle die Erosion ungehindert durch Löß oder Ton hindurchschneiden, so muß sie im harten Gestein das gleiche Material mehrere Male aufheben, wenn es sich nach seiner Wanderstrecke zur Ruhe gelegt hat. Deshalb wird ein Geröll in Abhängigkeit von der Widerstandsfähigkeit der Gesteinsart unter sonst gleichen Bedingungen unterschiedlich weit befördert. Material aus weicherem Gestein verteilt sich somit über weitere Strecken, während solches aus widerstandsfähigem Gestein sich auf verhältnismäßig knappen Raum zusammendrängt.

So ergibt sich — nicht zuletzt durch den Geröll austausch entsprechend dem Quotienten  $K$  — eine Anhäufung einzelner Bestandteile im harten Gestein, wie sie uns das bekannte Bild geröllreicher Flußläufe hinreichend erklärt. Wir ermessen damit auch die Bedeutung des Gerölls, das bei der Ablagerung die Sohle bedeckt und eine Eintiefung verhindert, natürlich um so wirkungsvoller, je gedrängter die Sedimentation erfolgt. Da das Zunehmen der Geröllmenge im Flußlauf weitgehend vom Geröllquotienten abhängt, muß zur Erläuterung des Prozesses darauf hingewiesen werden, daß der Faktor  $K$  sich flußabwärts immer mehr verringert und somit die Vermehrung der Geröllmenge in gewisser Weise abgebrems erscheint.

Besonders wichtig ist der Geröllquotient für die Transporterleichterung, die ich bereits an anderer Stelle (b) behandelt

haben. Durch sie erklärt sich, daß ein Fluß mit einer stromabwärts sich verringernden Kraft dennoch eine zunehmende Menge von Geröll-Last zu transportieren vermag. Wir hatten die Ergebnisse in der Formel

$$T_1 - T_2 = Te_1 - \frac{Vo_1}{K_1} + Z_1$$

zusammengefaßt, die besagt:

Die Transportkraft ( $T_2$ ) auf der Strecke 2 (Abtransport) erweist sich, da der Gefällswinkel stromabwärts abnimmt, als geringer als die Transportkraft ( $T_1$ ) auf Strecke 1 (Antransport) und befördert doch eine um den Betrag  $Vo_1$  vermehrte Geröll-Last, die aus der Erosion und Korrosion auf Strecke 1 resultiert. Das ist aber nur deshalb möglich, weil die Transporterleichterung ( $Te_1$ ) die aufzuwendende Beförderungsarbeit verringert oder der gemischtkörnige Volumenzuwachs sich um den Faktor  $K_1$  leichter befördern läßt als die geschlossene Masse  $Vo_1$ , wenn auch der neu geförderte Schweb ( $Z_1$ ) im dritten Horizont die Wassergeschwindigkeit etwas abbremst und so die Transportkraft verringert. Die Transporterleichterung  $Te_1$  kommt auf der Strecke 1 dadurch zustande, daß die Gerölle durch den Abrieb, der als Schweb leicht verfrachtet wird, kleiner und transportabler werden, daß ferner im Normalprofil die Reibung stromabwärts nachläßt und auch durch den Austausch gemäß dem entsprechenden Quotienten der Geröllstrom leichter zu befördern ist. Damit erfordert der Abtransport einer bestimmten Geröllmenge eine geringere Kraft als der Antransport.

Je höher nun der Geröllquotient ist, das heißt, je relativ kleiner die Erosionsgerölle sind, die das abgelagerte Material im Geröllstrom ersetzen, desto stärker erweist sich die damit erzielte Transporterleichterung. Der Faktor  $K'$  in der Transportgleichung ist dem Geröllquotienten  $K$  verwandt; denn der dem Geröllstrom durch die Erosion auf der Strecke des Antransportes zugeführte Abraum  $Vo$  belastet den Abtransport keineswegs als kompakte Masse, sondern nur mit kleinen, leicht beförderbaren Einzelteilchen, was der Koeffizient  $K'$  ausdrücken soll, der demnach noch größer ist als  $K$ .

Wie ich bereits kurz dargelegt habe (e) und noch ausführlich nachzuweisen hoffe, wird das Gefälle des Flusses wesentlich durch das Ausmaß der Transporterleichterung bestimmt. Wird durch diese viel Kraft eingespart — wie besonders bei starken Strömungen mit ihrem hohen Geröllquotienten — so herrschen auch große Winkelunterschiede zwischen den An- und Abtransportstrecken. Auf den Strecken mit mäßigen Strömungen ist die Transporterleichterung gering und somit der Unterschied des Geröllwinkels bei An- und Abtransport gleichfalls nur mäßig. Der nachhaltige Einfluß des Geröllquotienten durch die von ihm maßgeblich bestimmte Transporterleichterung auf die Ausgestaltung des Flußlängsprofils geht auch daraus hervor, daß die Kurve des Geröllquotienten einen dem Normalprofil ähnlichen Gang aufzeigt, das heißt, das starke Änderungen des Gefällswinkels mit solchen des Geröllquotienten korrespondieren. Es ist nicht die Aufgabe dieser

Zeilen, auf die Erstellung des Gefällswinkels im Zusammenhang mit der Transporterleichterung im einzelnen einzugehen, sondern es soll der Geröllquotient und seine Bedeutung im Prozeß der Erosion betrachtet werden. Wie sich aus dieser den neuen Begriff des Geröllquotienten einführnden Untersuchung ergibt, ist auf der Strecke des Geröll austausches die Tiefenerosion oder die Aufschotterung keineswegs damit zu erklären, daß der Fluß über eine mehr oder minder große Schleppkraft verfügt oder gar ober- oder unterhalb einer „Terminante“ fließt, sondern es hängt von der Anzahl der Ablagerungsgerölle und von ihrem Verhältnis zu den Erosionsgeröllen ab, ob sich der Fluß auf der Strecke des Erosionstransportes einschneidet oder nicht. —

Die Morphologie hat sich vorzugsweise genetischen Problemen zugewendet, und öfter hat die Geologie die Geographen darauf aufmerksam machen müssen, daß sie damit Aufgaben behandeln, die zumindest von strittiger Kompetenz sind. In der Erforschung der Zusammenhänge, die im Erosionskomplex gegeben sind, bleibt die Morphologie auf ihrem ureigensten Boden; denn die Abtragung durch das fließende Wasser stellt ja den hervorragendsten Prozeß in der Landschaftsgestaltung dar. Bezeichnenderweise herrschen gerade hier völlig unrichtige Vorstellungen, und die Voraussetzungen, die primären Fragen, sind noch ungeklärt geblieben. Wenn wir hier ein Teilproblem der Lösung näherzubringen versuchen, hoffen wir bei den Geologen Verständnis zu finden und die Geographen zur Mitarbeit anzuregen.

#### Literatur.

1. Gilbert, G. K. und Murphy, E. C., The transportation of debris by running water. U.S. Geol. Surv. Prof. P. Nr. 86, Washington 1914.
2. Glangeaud, L., Etudes quantitatives et experimentales sur l'érosion et le transport par les eaux courantes. R. Géogr. phys. 9, 1938.
3. Hjulström, F., Studies of the morphological activity of the rivers as illustrated by the River Fyris. Bull. of the Geol. Institution of the Un. Upsala, Bd. 25, 1935—1936.
4. Prandtl, L., Abriß der Strömungslehre. Braunschweig 1931, Abschn. III.
5. Schaffernak, F., Ein Beitrag zur Morphologie des Flußbettes. Mitt. d. hydrogr. Inst. a. d. T. H. in Wien, 2. Folge. Wien 1929.