

Zeitschrift:	Jahresbericht der Geographischen Gesellschaft von Bern
Herausgeber:	Geographische Gesellschaft Bern
Band:	42 (1953-1954)
Artikel:	Hydrologische Untersuchungen im Gebiete der Valle Onsernone (Kanton Tessin) : mit besonderer Berücksichtigung des Kolkphänomens
Autor:	Kistler, Emil-Henri
Kapitel:	II: Hydrometrie und Morphogenie des Flussbettes zwischen Russo und Chiosso
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-323661

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

II. Teil

Hydrometrie und Morphogenie des Flussbettes zwischen Russo und Chiosso

Einleitende Gedanken

Die hydrologischen und morphogenetischen Probleme, die ein Flusstal des Mittellandes zu bieten vermag, sind reichhaltig. Um wie Vieles komplizierter, ja komplexer müssen diejenigen eines Gebirgsflusses sein, dessen Flussbett und Wasserführung ständigen grossen Schwankungen unterworfen sind und deren Ausmasse sehr oft nur empirisch sichergestellt werden können, da die Spielregeln der Hydraulik in solchen Fällen meistens zu versagen pflegen. Die folgenden kritischen Beobachtungen sollen die Problematik unterstreichen, die sich bei längerem Studium eines solchen Flusslaufs in morphologischer wie hydrologischer Hinsicht ergeben.

Die meisten Faktoren, die die Ausbildung und Veränderung eines Flussbettes bewirken, sind in vielfacher Kombination miteinander verknüpft: Wassermenge, Rauhigkeit der Flussohle und der Einzugsgebiete; Gefälle, Grösse und Form des Querprofils; Grösse, Form, Menge und Anordnung des Geschiebes, die sehr auffälligen und deshalb auch eingehender zu betrachtenden Kolkbildungen sollen in der Folge auch einen wesentlichen Platz im zweiten Teil der Arbeit einnehmen. Wir werden im Laufe der Betrachtungen zur Erkenntnis kommen, dass sich die Abflussverhältnisse eines Gebirgsflusses nicht ohne weiteres in mathematische Formeln zwängen lassen, wie dies bei einem Mittelrandfluss oder bei einem kanalisierten Lauf möglich ist. Die Hydraulik, d. h. die praktisch angewendete Hydrologie beim Bau von Stauwehren und andern Flussbauten, muss sich in dieser Beziehung noch manchen Abstrich gestatten lassen, bis die hydrologische Erforschung vieler Gebirgsflüsse soweit gediehen ist, dass greifbare und vor allem sichere Ergebnisse vorliegen. Dabei sollen aber die wasserbautechnischen Erfahrungen in der Hydraulik nicht negiert werden, sondern die Laboratoriumsversuche müssen in einem natürlichen Gebirgsfluss empirisch angewendet und mit den notwendigen Kautelen versehen werden, bis die Hydrologie genügend Material für eine mathematische Bearbeitung, soweit sie überhaupt in Frage kommt, gesammelt hat.

A. Das Kolkphänomen

I. Begriffsbildung

Kolke sind typische Erosionsformen des fliessenden Wassers, die sowohl im Meere wie in Flüssen entstehen können. Dort sind sie meist ausgewählte Stellen der Brandungsrinne, hier aber ist ihre Genesis sehr weitgehend an die Flussbettgestaltung gebunden. Auf Grund der Erscheinungsformen können wir die Flusskolke wie folgt typisieren:

1. Bei einem mäandrierenden Fluss (Unterlauf) sind diese beckenartigen Vertiefungen und Ausweitungen auf die Gegend der Prallhänge konzentriert, wo die erodierende Kraft des Wassers am grössten ist, also im Stromstrich.
2. In einem Gebirgsfluss sind diese Erscheinungen ebenfalls vorhanden. Ihre Entstehung beruht aber auf der Existenz von Wasserfällen, Klüften und Bruchbildungen.
3. Eine andere Ausbildungsform sind die sogenannten Potholes oder Strudellocher, wie sie AENGEBY in skandinavischen Stromschnellen nachgewiesen hat. Sie sind eine Erosionssonderform innerhalb der Schnelle selbst, und ihre Entstehungsmöglichkeit hängt weitgehend von der Wasserführung, der Form und dem Gesteinsmaterial der Schwelle ab. Ihr Aussehen hat grosse Aehnlichkeiten mit den bekannten Gletschermühlen, was möglicherweise auf eine gleichartige Entstehungsgeschichte schliessen lässt.

II. Die Kolkbildungen des Isorno

I. Talanlage

Der Isorno durchströmt auf seinem Talweg von den Bagni di Craveggia bis zu seinem Austritt aus dem Gebirge eine tiefe Schlucht. Daher kommt es praktisch nicht zu den typischen Mäanderbildungen, ganz abgesehen davon, dass die Wassergeschwindigkeit viel zu gross ist. Und doch haben wir auf eine grosse Zahl gut ausgebildeter Kolke hinzuweisen. Sie sind auf die relativ kurze Flussstrecke zwischen Russo und Loco beschränkt, und der ganze Oberlauf, wie auch derjenige des Ribo in der Valle di Vergeletto, weist keine derartigen Erscheinungen auf. Diese lokale Beschränktheit deutet ohne Zweifel auf eine morphologische wie auch genetische Sonderausbildung hin.

Wie bereits an anderer Stelle schon angedeutet wurde, verdankt die Isornoschlucht ihre Entstehung primär einer tiefgreifenden, tektonischen Störung.

Darüber hinaus konnte sich die erodierende Kraft des Wassers parallel dem Schichtverlauf voll auswirken, was dann sekundär die Schaffung eines typisch asymmetrischen Querprofils zur Folge hatte.

Tieft sich allgemein (im Speziellen gilt das auch für den Isorno) ein Wasserlauf in den schräggestellten Schichten im Streichen ein, so hat er die Tendenz, während der Tiefenwanderung auf der Schichtlehne in der Richtung des Fallens abzuleiten, also die Talachse nach dieser Richtung hin zu verlegen; dies kann unter Umständen zur Bildung von Epigenesen führen. Trotz dieser Talachsenverlegung erfolgt ein Tiefernagen durch die Pultfläche hinab. Ist dann ein schräger Schichtkomplex durch solchen Tiefenriss seiner Stütze beraubt, so kann die obere Partie als Schichtschliff abgleiten. An den Schichtköpfen der Gegenseite handelt es sich um ein «stückweises Abbrechen» und damit die Ausbildung eines asymmetrischen Querprofils, welches, in allerdings abgeschwächtem Masse, auch in der Valle di Vergeletto und im Oberlauf des Isorno zur Geltung kommt.

2. Ursachen der Kolkbildung im allgemeinen

Im Abschnitt I, al. 3 sind die Gründe programmatisch dargelegt, die zur Bildung der Kolke geführt haben: Klüfte und Verwerfungen kleineren Ausmaßes, die zur Bildung kleinerer und grösserer Wasserfälle und Stromschnellen führten. Der höchste Wasserfall erreicht ungefähr zehn Meter, der niedrigste zirka 0,80 m! Beide haben Anlass zu Bildung von Kolken gegeben, deren flächenmässige Ausdehnung allerdings verschieden ist. Ein anderer, sehr gut ausgebildeter Kolk liegt senkrecht unter dem Ponte Vecchio am Wege von Russo nach Oviga. Seine Lage zwischen senkrechten Felswänden, übrigens ganz ähnlich wie beim Kolk «Wanda» südlich Chiosso, verdankt ihre Entstehung einem Wasserfall, der interglazial tätig, sich im Laufe der Jahrtausende durch Rückwärtserosion totgelaufen hat, d. h. an Stelle der Schwelle ist eine Schlucht getreten. Wir sehen also schon anhand der wenigen Beispiele, dass die Genesis der Kolke sehr komplexer Natur ist; hinzu kommen die verschiedenen Klüfte, weil sich in ihnen das Geschiebe ablagert, das zur Bildung eines abgeplästerten Kolkbodens führt, ohne das die typischen Tosbecken niemals im heutigen Ausmaße hätten entstehen können. Diese mehr allgemeinen Ausführungen werden im Abschnitt «Die Kolke als Einzelerscheinungen» detailliert behandelt werden. Die kleinen Seen, die die düstere Isorno-Schlucht etwas beleben, praktisch aber ihrer fast völligen Unzugänglichkeit wegen kaum von Bedeutung sind, wurden erst durch den Kraftwerkbau im Maggiatal aus Jahrtausende währenden Dornröschenschlaf erweckt, werden doch ihre Wasser ebenfalls in weisse Kohle umgewandelt werden!

3. Arbeits- und Messmethoden

Um einigermassen sichere und brauchbare Unterlagen zu haben, mussten die Kolke mehrmals ausgelotet werden. Es wurden daher Fixpunkte beidseitig des Flusses an geeigneten Stellen in die Felsen eingelassen (Abbildung 5). Mit einem graduierten Drahtkabel wurden Profil- und Messpunkte festgehalten, denn nur auf diese Weise konnten die nachfolgenden Messungen einen praktischen Wert haben. Die Lotungen erfolgten anfänglich von einem Schlauchboote aus. Beim Niederwasserstand des Sommers 1950 konnte eine Anzahl direkter Profilmessungen ausgeführt werden. Im Herbst und Winter wurde ein einfaches Floss zu Hilfe genommen, und endlich stand uns 1951 ein kleines Ruderboot zur Verfügung, welches mit viel Mühe in den Canon hinuntergelotst werden konnte.

Die Tiefenbestimmungen selbst konnten bei Niederwasser und einer nicht allzu starken Strömung mit einer in Zentimeter geteilten Messlatte ausgeführt werden. Bei grossen Tiefen und hohen Wasserständen wurden Gewichte von 5—15 kg mit graduiertem Hanfseil benützt. Im Jahre 1951 wurde eine vom Eidgenössischen Amt für Wasserwirtschaft zur Verfügung gestellte 26 kg schwere Eisenkugel sowie ein graduiertes Gummikabel verwendet.

Um die Wasserstandshöhen einer genauen und regelmässigen Beobachtung zu unterziehen, wurde für jeden Kolk an einer günstigen Stelle ein einnivellierter Nullpunkt festgelegt. Damit wurde auch eine Vergleichsmöglichkeit mit den Werten der Limnigraphenstation Russo geschaffen.

(Siehe Tafel 1.)

Zusammenstellung der Pegelnullpunkte

Kolk	«Wanda»	486,90 m ü. M.
Kolk	2	497,35 m ü. M.
Kolk	3	ohne Angabe
Kolk	4	505,00 m ü. M.
Kolk	5	ohne Angabe
Kolk	6	508,75 m ü. M.

Da in den Kolken 5 und 6 die Veränderungen in der dreijährigen Beobachtungsperiode kaum feststellbar waren, wurden sie 1951/52 vernachlässigt.

4. Allgemeine Charakteristik der studierten Flusstrecke

Die in Frage kommende Laufstrecke des Isorno liegt zwischen den Koten 505 (resp. 508,75) und 488,6; ihre Länge beträgt zirka 260 Meter, das durchschnittliche Gefälle zirka 7,5%. Sie wird in fünf Becken zergliedert (Kolke), welche durch kürzere Laufstrecken mit Schnellen oder Wasserfällen unterbrochen wird. Ausserdem sind in den folgenden Ausführungen noch zwei Kolke erwähnt, die leider auf dem Situationsplan 1:250 nicht mehr aufgenommen werden konnten (Kolk 5 und 6). Diese haben wir in der Richtung des Gefälles bezeichnet mit: Kolk 6, Kolk 5 (beide ausserhalb der Situation), Kolk 4, Kolk 3, Kolk 2, Kolk 1 und Kolk «Wanda». Der Name des letzteren ist nicht frei erfunden, sondern wird von der einheimischen Bevölkerung verwendet. Kolk 6 ist mit Kolk 5 durch ein schmales Rinnsal verbunden, welches nur bei höherem Wasserstande überflutet ist und sich dann als zirka 40 cm hohe Schnelle auswirkt. Der anschliessende Kolk 5 ist durch eine breite, anstehende Schwelle von Kolk 4 getrennt. Der flussaufwärts gelegene Teil dieser Schwelle führt zur Bildung einer grossen Schnelle, während die untere Partie einen zirka 2 Meter hohen Wasserfall hervorruft, der bei Hochwasser sehr mächtig wird (siehe Abbildung 6). Der anschliessende Kolk 4 ist mit Kolk 3 in doppelter Weise verbunden: Auf der Nordseite des Talweges liegt eine schmale Rinne mit kleinen Schnellen und Wasserfällen; auf der Südseite fliesst ein Teil des Wassers unter den Blöcken des zwischen Kolk 4 und Kolk 3 auf der Südflanke des Tales niedergegangenen rezenten Bergsturzes durch. In ähnlicher Weise vermitteln eine Anzahl Schnellen über anstehende Rippen und grössere Blöcke den Uebergang von Kolk 3 zu Kolk 2. Eine anstehende Schwelle mit nachfolgendem zirka 3 Meter hohen Wasserfall führt die Wassermassen des Isorno vom relativ kleinen und unbedeutenden Kolk 2 in den prächtigen Kolk 1 (siehe Abbildung 3). Kolk 1 steht seinerseits über eine 7—8 Meter breite anstehende Schwelle, auf welcher heute die Wasserfassung ruht, und einem zirka 10 Meter hohen Wasserfall mit dem untersten der von uns untersuchten Kolke («Wanda») in Verbindung (siehe Abbildung 1).

5. Morphogenesis der Kolke

a) Kolk 6

Er ist mit der Pegel-Kote 508,75 der höchstelegene der ganzen Reihe und auch am leichtesten zugänglich. Seine maximalen Ausdehnungen betragen 27 resp. 12 Meter; die grösste sicher festgestellte Tiefe misst 2,80 m; diese liegt zirka 4 Meter unterhalb der Schnelle, welche ihn flussaufwärts begrenzt. Das linke

Ufer wird durch mehr oder weniger steile Gneisfelsen begrenzt, deren Schichtfläche gegen das Wasser gerichtet ist. Ungefähr in der Mitte des linken Ufers verläuft eine deutliche Kluft und zirka 10 m weiter flussaufwärts eine zweite, ebenso ausgeprägte. Das dazwischen liegende Gesteinspaket ist horizontal in einzelne Teilkomponenten zergliedert. Dadurch konnte das Wasser im Laufe der Zeit Miniaturstufen auswaschen, die einzige Möglichkeit, um überhaupt auf dieser Seite in den hinteren Kolkteil zu gelangen. Das rechte Ufer ist wesentlich flacher und stark nach Süden zurückspringend, dadurch eine kleine Abrasionsterrasse bildend. Die ganze Anlage des Kolkes ist ein Kesselbruch «en miniature», in welchen der eigentliche Kolk sich eingetieft hat. Auffallend sind die bereits zitierten Klüfte. Im Anstehenden sind sie teilweise verklemmt, dafür im Kolkboden umso schöner sichtbar. Hier konzentrieren sich auch die grössten Untiefen. Ihre Auffüllung mit Geschiebematerial ist nicht nur natürlich, sondern notwendig für die Austiefung des Kolkbodens. Durch horizontale Wasserwalzen stets in Bewegung gehalten, reiben sie die Klüfte ständig weiter aus; das Wasser allein wäre dazu niemals imstande. Einen Beweis dafür liefert der zirka 20m hohe Wasserfall bei Piano delle Cascine in der Valle di Vergeletto. Der Höhe des Falles entsprechend sollte ein tiefes Tosbecken vorhanden sein. Doch finden wir nur eine sehr flache Wanne im Anstehenden ohne eine wesentliche Geschiebekomponente; dies zeigt deutlich, wie gross der Anteil des letzteren an der Gestaltung eines Kolkes ist. Allerdings muss noch gesagt sein, dass die Wassermenge der Valle Quaranta normalerweise wesentlich geringer ist, als diejenige des Isorno. Die grosse Fallhöhe kompensiert aber die geringere Wassermenge, und das Fehlen des Geschiebes beweist zur Genüge ihre Wirksamkeit in der Ausgestaltung der Kolkböden.

Der untere Abschluss des Kolkes 6 wird durch eine riesige Blockmasse gebildet, welche sichtbar auf Anstehendem ruht. Eine verhältnismässig schmale Rinne gestattet den Durchfluss der Wassermassen nach dem benachbarten Kolk 5. Eine einmalige Sehenswürdigkeit bildet das Strudelloch in der linken Uferwand, ungefähr 2,5 Meter über dem Niederwasserspiegel. Damit haben wir einen Anhaltspunkt über die Höhe des niedrigsten Hochwassers. Der schon früher postulierte Vergleich mit den Gletschermühlen*) scheint sich in diesem Einzelfall zu bestätigen, fand sich doch am Grunde des Schlundes ein etwa faustgrosser, beinahe kugelrunder Stein. Dass das Loch nicht tiefer ist, hängt weitgehend von zwei Umständen ab: Erstens ist die Wassermenge viel zu labil, und zweitens ist das Gestein zu hart, wobei aber der erstgenannte Umstand das grössere Gewicht hat.

Die Geschiebeführung macht sich nicht nur auf dem Kolkboden bemerkbar, wenn ihr **dörtiger** Anteil auch ausschlaggebend ist. Je nach der Konfiguration der Ufer und ihrer nächsten Umgebung sind die extraaquaten Ablagerungen ein mehr oder weniger getreues Abbild der jahreszeitlichen Wasserführung.

*) siehe J. Brunhes, L'érosion tourbillonnaire

Die Abrasionsterrasse des rechten Ufers mit ihrer leichten, flusswärts gerichteten Neigung bietet bei Hochwasser die Möglichkeit für Ablagerung von Alluvionen, die aber vom zurückfliessenden Wasser meist restlos wieder weggeschwemmt werden. Dieses Geschiebe kann in dem Fall als Indiz für einen Hochwasserstand nicht in Frage kommen, wohl aber etwa grosse Baumstämme, die sich irgendwo festgeklemmt haben. Für die Ablagerung von Alluvionen wesentlich günstiger gestaltet sich die Ausbildung des linken Ufers am flussabwärts gelegenen Kolkende. Die grossen Blöcke wirken als ideale Geschiebefänger.

In der unteren Kolkhälfte fällt eine Schwelle auf; eine querliegende Rippe aus anstehendem Gestein führt zur Anhäufung von Geschiebemassen. Diese Schwelle bewirkt aber auch die Bildung von Unterwasserwellen, die beim Niedergang auf der Leeseite eine verstärkte Erosion und damit eine Auskolkung zur Folge haben. Eine ähnliche Wirkung haben auch Wirbel, die in der Nähe von Hindernissen auftreten. Bei rückläufiger Fliessrichtung in der Nähe des Ufers und gleichzeitiger Querschnittsverbreitung kommt es dann zur Ablagerung von Alluvionen.

Beim Geschiebe lässt sich einwandfrei eine dachziegelartige Ablagerung nachweisen, eine Abpflästerung des Flussbettes mit überfaustgrossen Geröllen, die sich mit ihrer Längsachse in die Richtung der stärksten Strömung einstellen. Kies und Sand sind zwischen diese groben Partikel eingelagert. Wesentliche Veränderungen in der Geschiebeablagerung konnten in der Beobachtungsperiode nicht nachgewiesen werden. Grosso modo lässt sich über diesen Kolk wie auch für die andern folgendes aussagen:

Eine primäre Tiefenzone liegt unter oder in unmittelbarer Nähe der Stromschnelle. Ihr Wert dürfte direkt unter der Schwelle grösser sein, konnte aber wegen der starken Strömung nicht sichergestellt werden. Eine sekundäre Tiefenregion liegt meistens in mehr oder weniger ausgeprägter Form vor anstehenden Riegeln oder grossen Blöcken, die vom Hochwasser in ihrer Lage kaum verändert werden. Je nach der Wasser- und Geschiebeführung verfallen diese Untiefen leicht einer Aufschotterung, sind also labil. Untiefen, die im Bereich von Klüften liegen, sind grossen Schwankungen unterworfen und nur durch häufige Messungen zu sichern.

b) Kolk 5

Seine Längsachse liegt, wie diejenige seines Vorgängers, in der allgemeinen Talaxe. Er ist ebenfalls zwischen zwei grosse Klüfte gebettet, wobei besonders die untere wesentlich zu seiner Bildung beigetragen hat. Das typische Merkmal, der Wasserfall, fehlt, und doch ist es zu einer gut ausgebildeten Vertiefungswanne gekommen.

Bei niederm Wasserstand kann man eine Rippe anstehenden Gesteins, die ungefähr in der Längsachse des Kolkes verläuft, feststellen. Beidseitig derselben liegt je eine Rinne. Beide vereinigen sich am unteren Kolkende in einem zirka 2 Meter tiefen Loch. Diese Stelle liegt genau auf der Kluft. Der Boden des Beckens ist an dieser Stelle gegen W leicht eingesunken, was zur Bildung der genannten Untiefe beigetragen hat. Hier haben wir es mit einer tektonisch vorgebildeten Vertiefungswanne zu tun.

Das linke Ufer von Kolk 5 ist von riesigen Blöcken eingesäumt. Das steilgerichtete Anstehende beginnt erst zirka 10—15 m landeinwärts. Dasselbe ist vom rechten Ufer zu sagen, nur dass es flacher ist und die Blöcke, mit Ausnahme eines einzigen, wesentlich kleiner sind.

Zwei riesige Blöcke verengen den Kolkeingang, so dass es in ihrem Stromschatten zur Ablagerung von Alluvionen kommt; auf dem rechten Ufer eine Halbinsel, auf dem linken eine Insel (Kiesbank) bildend. Da die allgemeine Fliessrichtung gegen das linke Ufer gerichtet ist, werden hier Alluvionen bei Hochwasser viel leichter zerstört als auf dem gegenüberliegenden Ufer. Während Form und Umfang der Ablagerung des rechten Ufers vor und nach dem Maihochwasser 1951 beinahe unverändert waren, ist die grosse Insel auf dem linksseitigen Ufer in zwei unbedeutende Teilinselchen aufgelöst worden. Hingegen lässt sich einwandfrei feststellen, dass eine neue Insel am linken Ufer im Herbst 1951 im Entstehen war. Es erfolgt auch hier die Akkumulation in der Periode vom Herbst- bis zum Frühlingswochwasser.

An diesem Kolk ohne Wasserfall können wir feststellen, dass es dann zu Alluvialbildung kommt, wenn der Rinnenquerschnitt sich plötzlich erweitert, und die Fliessgeschwindigkeit merklich kleiner wird. Unterhalb des schmalen Durchganges von Kolk 6 zu Kolk 5 lassen sich irgendwelche Geschiebe auf der anstehenden Rippe aus naheliegenden Gründen nicht nachweisen. Dieselben finden sich erst an der unteren Kolkrandschwelle am Uebergang zu Kolk 4.

c) Kolk 4

Dieser Kolk ist einer der typischsten der ganzen Serie. Seine allgemeine Richtung verläuft von West nach Ost, ist aber leicht mondsichel förmig konvex nach Süden gekrümmmt, ein Umstand, der für die Gesamtausbildung des Kolkes von entscheidender Bedeutung ist.

Flussaufwärts ist er durch eine anstehende Schwelle mit einem Wasserfall von zirka 2 m Höhe begrenzt, talabwärts durch einen rezenten Bergsturz (siehe Abbildung 6). Die nördliche Uferpartie ist, wenn wir vom haushohen Block (Pkt. 513,2) absehen, relativ flach gestaltet. Dieses Ufer wird bei jedem Hochwasser regelmässig überschwemmt. Dabei schaut der Block nur mit seiner allerobersten Partie aus dem kochenden Strudel heraus.

Das südliche Ufer ist steil bis senkrecht (Schichtköpfe!). Der Kolk erleidet durch eine, in seiner mittleren Partie zutage tretende Schwelle eine Zweiteilung (siehe Abbildung 6). Das Gefälle zwischen dem oberen und unteren Kolkteil beträgt zirka 0,6%.

Nach den Tiefenverhältnissen beurteilt ist, der obere Teil der eigentliche Kolk, während die untere Partie eine Wanne mit sekundären Tiefen darstellt. Der obere Kolkteil weist drei beckenartige Löcher auf: Das eine, der eigentliche Kolkraum mit 2,80 m Tiefe, liegt ungefähr 2 m in Richtung vom Wasserfall weg, weil der Absturz des Wassers kein senkrechter ist. Die beiden andern gliedern sich einer Kluft ein, die den oberen Kolkteil vor dem grossen Block auf dem rechtseitigen Ufer in seiner ganzen Ausdehnung durchsetzt. Diese Untiefen weisen Werte von 3,00 resp. 2,00 m auf. Wir bemerken noch, dass die Kluft zu gewissen Zeiten mehrere solche Vertiefungen aufzuweisen hat. Generell erscheinen dieselben alle Jahre, bleiben sogar über längere Zeiträume konstant, aber ihre Tiefe ist periodischen Schwankungen unterworfen, konform den stets wechselnden Wasser- und damit auch Geschiebemassen. Eigentümlicherweise ist die Kluft nicht etwa mit grobem Gerölle ausgefüllt, sondern mit feinstem Geschiebe ausgepolstert, wie Sondierungen einwandfrei erwiesen haben. Die Hochwasser vermögen das grobe Material mühelos aus diesen Löchern hervorzuwirbeln, um damit weiter unten den Kolkraum auszufüllen. Die feineren Massen werden dann durch schwächere Nachströmungen in die Vertiefungen eingeschwemmt.

Die tiefsten Stellen des unteren Kolkraumes liegen vor den grossen Abschlussblöcken des Bergsturzes und im Stromstrich am rechten Ufer. Diese Untiefen sind durch die Wirbelbildung, rückläufige Fliessbewegung des Wassers und teilweise auch durch Stauwirkung der grossen Blöcke bedingt. Damit haben sich auch die wesentlichsten Faktoren für die Genesis dieses typischen Kolkes klar herauskristallisiert: Tektonik, Morphologie und Hydrologie.

Entscheidende Bedeutung kommt den Lockermassen zu, die in diesem, für die Wasserfassung wichtigsten Kolke, zur Ablagerung gelangen. Ihre generelle Anordnung ist die folgende:

(Siehe Tafel 3)

1. Auf dem linken Ufer zwischen Block Pt. 513.2 und dem Kolkausgang Pt. 505.8 (auf der Situation irrtümlicherweise mit 515.8 angegeben). (Siehe Abbildung 6).
2. Die Schuttinsel (Kiesbank) am rechten Ufer war im oberen und mittleren Teil des Kolkes nur im Herbst 1949 vorhanden, seither nie mehr.
3. Unbedeutende Ablagerung in den Bergsturztrümmern und hinter dem grossen Block auf dem rechten Ufer (Pt. 508.2).

Vom Flusse transportierte Blöcke konnten in diesem Kolk nicht konstatiert werden.

Ueber den Zustand und die Anordnung der Lockermassen gibt Tafel 3 erschöpfend Auskunft. Die eingetragenen Umrisse beziehen sich immer auf denselben Wasserstand, um reelle Vergleichsmöglichkeiten zu haben.

Die grosse Kiesbank auf dem rechten Ufer ist bis zum Winter 1951/52 auf ein kleines unbedeutendes Reststück abgetragen worden, resp. überhaupt nicht mehr zur Ablagerung gekommen. Der Grund liegt in einer Veränderung des allgemeinen Stromstriches. Im Laufe des Winters 1950 stürzte am rechten Ufer ein mehrere Kubikmeter grosser Block (Pt. 508.2) aus der steilen Talflanke heraus. Die ersten Folgen waren eine Profilverengung und damit eine Vergrösserung der Stromgeschwindigkeit. Dadurch konnte es im Laufe des Frühjahrs und Sommers 1950 zu der erwähnten Abtragung der Kiesbank kommen, ohne dass sie sich bis zum Abschluss der Beobachtungen wieder regeneriert hätte. Daraus ist ohne weiteres ersichtlich, dass eine geringfügige Störung im allgemeinen Strömungsverlauf das lokale Bild von Grund auf verändern kann, und dass ein gesetzmässiger Zusammenhang auf lange Sicht praktisch an den Tücken der Natur scheitern muss. Temporär ist es durchaus möglich, Gesetzmässigkeiten, wenn auch empirisch, festzuhalten, aber für die Praxis gelten nur auf lange Beobachtungsdauer sich stützende, sichere Resultate.

Die geringsten Veränderungen konnten am grossen Kiesberg des linken Ufers festgestellt werden. Nach jedem Hochwasser bot sich grosso modo dasselbe Bild. Schätzungen ergaben stets einen Wert von 180—200 m³. Das Mass der Ungenauigkeit darf als relativ klein bezeichnet werden. Während eines Hochwassers mit der Kote 510 oder 511 erfährt der Kiesberg in der Vertikalen eine beträchtliche Erweiterung. Schuld daran ist die Orographie des Kolkausganges. Die plötzliche Querschnittsverengung in den Bergsturztrümmern bewirkt eine Stauung und damit zwangsläufig den Absatz von Geröllen. In diesem Sinne wirkt sich auch der grosse Block Pt. 513,2 aus. Beim Rückgang des Hochwassers auf ein Mittelwasser nimmt die Strömungsintensität merklich zu, so dass ein Abtrag der obersten Partien erfolgt. Dieser Abtrag geht so lange weiter, bis die Schleppkraft des Wassers für die Grössenordnung dieses Geschiebes ungünstig geworden ist. Genauere Angaben darüber folgen im Kapitel über Geschiebetrieb und Geschiebefracht.

d) Kolk 3

(Siehe Abbildung 4)

Dieser Kolk ist ost- und westwärts durch Laufstücke mit grösserem Gefälle begrenzt und schliesst unmittelbar an den erwähnten rezenten Bergsturz an.

An dieser Stelle liegt ebenfalls eine ausgeprägte Kluft, die wesentlich zur Auslösung des Sturzes beigetragen hat. Die Längsachse des Kolkes ist leicht gegen E-N-E abgedreht. Das linke Ufer wird durch anstehende Gneisfelsen gebildet. Am rechten liegen zahlreiche grössere Blöcke auf einer kleinen «Abrasions-terrasse» (Abb. 4 und 5).

Dieser Kolk 3 weist eine schmale Rinne in einem erweiterten Becken auf. Die grössten gemessenen Tiefen betragen 1,45 m; er ist im Grunde genommen nichts anderes als ein durch die grossen Blöcke bedingtes Staubecken (in Abb. 5 durch ein Brett miteinander verbunden). Der grösste Teil des Wassers fliesst im schmalen Rinnal hart an der linken Felswand. Ein nicht zu unterschätzender Anteil aber strömt, für das Auge unsichtbar, unter den Felstrümmern des Bergsturzes durch. Die Alluvionen treffen wir vornehmlich am rechten, flachen Ufer an. Sie liegen zwischen den zahlreichen, oft mehrere Kubikmeter grossen Blöcken, die bei Hochwasser als Damm wirken und damit den wandernden Geröllelen den Weg abschneiden. Wesentliche qualitative und quantitative Veränderungen konnten nie nachgewiesen werden. Einzig beim Hochwasser vom August 1951 erfolgte am Kolkende eine talwärts gerichtete Verschiebung des linksufrigen grossen Blockes um ca. 2,80 m durch Hinterkolkung (vergl. Abb. 4 und 5). Schuld daran waren auch die Sprengungen im Flussbett hart unterhalb des Kolkes 3, die einen völlig anders gestalteten Abflussmodus zur Folge hatten. Diese Sprengungen haben die Beobachtungen für die Kolke 3, 2, 1 und «Wanda» ab Sommer 1951 leider endgültig verunmöglicht.

Die grosse Zahl gewaltiger Blöcke, welche das ganze Flussbett, mit Ausnahme der Kolkböden selbst, durchsetzen, drängt dem Beobachter unweigerlich die Frage nach deren Herkunft auf. Ihre Formgestaltung schliesst einen weiten Wassertransport wegen der ausserordentlichen Heterogenität des Flussbettes von vornherein aus. Viele dieser Blöcke haben gerundete Kanten oder oft ovale Form. Diese sonst rein fluviatile Formgestaltung röhrt nicht vom Transport her, sondern von der reibenden Wirkung der Hochwasser. Eine andere Herkunft könnten unter Umständen hochgelegene Hangmoränen sein. Da sie aber in so spärlicher Zahl auftreten und ihre Komponenten nirgends nur entfernt die erwähnte Grösse erreichen, fällt diese Möglichkeit ebenfalls dahin. Es bleibt also nur das übrig, was wir im Kapitel I dieses Abschnittes bei der Talbildung schon gesagt haben: Es ist das Material, welches von den Schichtköpfen der rechten Talflanke herunterstürzt!

Wenn grosse Blöcke «fortbewegt» werden, so darf man sich unter dieser Bewegung etwa nicht eine Distanzerweiterung im hergebrachten Sinn vorstellen, denn die Gestaltung des Flussbettes erlaubt eine solche Bewegung gar nicht. Es handelt sich vielmehr um einen «an Ort» sich abspielenden Vorgang, eine Hinterkolkung, die, wenn sie weit genug fort geschritten ist, den Block beim

nächsten Hochwasser zum Ueberkippen oder Hinunterrutschen veranlasst. Diese Erscheinung ist in andern Hochgebirgsflüssen ebenfalls festgestellt worden und hat mit einem Transport im eigentlichen Sinn nichts zu tun.

e) Kolk 2

Der an sich sehr kleine Kolk 2 liegt zwischen zwei ausgeprägten Klüften, wobei der Kolkboden gegen E leicht eingefallen ist. Dieser Umstand führte an seinem flussaufwärts gelegenen Ende zur Bildung einer Schnellenserie, während der Kolk talabwärts durch einen zirka 3 Meter hohen Wasserfall abgeschlossen ist.

Die grössten Tiefen des Kolkes liegen im Wesentlichen in einer Rinne und sind nirgends grösser denn 1,60 m. Lockermassen von irgendwelcher Bedeutung sind nicht nachzuweisen, abgesehen vom einzigen unbedeutenden Vorkommen im toten Winkel auf dem N-Ufer. Die verbindende Schwelle aus anstehendem Gestein bleibt, ihrer glatten Oberfläche wegen, stets geschiebefrei. Veränderungen hinsichtlich der Lockermassen haben während der Beobachtungsdauer nicht stattgefunden.

(Siehe tekt. Karte Tafel 1.)

f) Kolk 1

Die bisher betrachteten Kolke waren mehr oder weniger flache Wannen, welche in tektonisch bedingten Untiefen eingebettet liegen und die unter sich durch starke Unterwasserströmungen verbunden sind. Erst der Kolk 1 und Kolk «Wanda» stellen jene typischen Vertiefungswannen mit einem Wasserfall, Tosbecken und flussabwärts ansteigendem Kolkboden dar (siehe Abb. 3).

Kolk 1 wird von zwei anstehenden Schwellen begrenzt und liegt dazu in einer breiten Kluft, die sich an den beiden Talfanken weit hinauf verfolgen lässt. Er stellt ein typisches Strudelbecken dar, hat aber mit einem Pothole nicht die entfernteste Aehnlichkeit, weil ja letzterer nach AENGEBY stets als trichterförmiger Schlund ausgebildet ist. Sowohl seine Lage (schwer zugänglich), wie auch die Wirbelbildung und starke Strömung verhinderten eine systematische Auslotung. Mit Hilfe eines Ruderbootes, welches durch fünf Seile verstrebt, einigermassen stationär gehalten werden konnte, gelang es, eine Reihe von Tiefenmessungen durchzuführen. Die ausgeloteten Punkte sind hinsichtlich ihrer Lage nur approximativ in die Situation eingetragen worden.

Bemerkenswert ist weiter die deutliche Querrinnenbildung unmittelbar vor der unteren abgrenzenden Schwelle. Ihre Entstehung ist auf die dort vorhandene

Kluft einerseits und die liegenden Wasserwalzen andererseits zurückzuführen, die zusammen mit dem Wasserfall das mitgerissene Geröll ständig in kreisförmiger Bewegung hält und damit auch zum Abrieb unter sich und den Kolkboden selbst Anlass gibt. Die durchschnittliche Tiefe des Kolkes betrug (heute existiert er nicht mehr) 3,40—4,00 m in der Richtung zwischen Wasserfall und Ausfluss gegen «Wanda». Ein kleineres alluviales Vorkommen liegt im toten Winkel an der Südseite, wurde aber durch das Augusthochwasser 1951 wesentlich intensiviert. Seither hat sich durch den Bau der Wasserfassung die Lage grundlegend verändert, und der Kolk selbst ist heute ein integrierender Bestandteil derselben geworden.

g) Kolk «Wanda»

Dieser grösste und bestausgebildete Kolk ist ebenfalls in die allgemeine W—E Erstreckung des Tales ausgerichtet und im Westen durch einen imposanten, zirka 10 Meter hohen Wasserfall begrenzt. Der heutige Ausgang liegt in einem grossen Kessel, der durch seitlich niedergestürztes Material aufgefüllt und in einer Verengung mit anschliessendem Gefällsbruch endigt. Der eigentliche Kolk liegt in einer oben zirka 10 Meter breiten Schlucht, die sich nach unten, ungefähr in der Richtung des Schichtfallens, auf 6 Meter verjüngt (siehe Abb. 1). Dadurch ergibt sich eine überhängende rechtsufrige Felswand. Der nördliche Kolkrand besteht aus senkrechten Gneiswänden. Der Kolk weist im Einflussbereich des Wasserfalls einen mächtigen, nach Süden stark ausgeweiteten Strudeltrichter auf, der zum Teil in einer wenig sichtbaren Kluft liegt. Direkt nach dem Engpass erfährt der Kolk eine beckenartige Erweiterung mit scharf abgegrenzten, rechtwinklig zueinander stehenden Wänden (Saigersprung).

Besonders zu erwähnen ist der im oberen Kolkteil bei der Verengung nachgewiesene subaqueate Gefällsbruch von zirka 7 Metern! Genaue Anhaltspunkte konnten nicht ermittelt werden, aber das ständige Abgleiten der Lotkugel lässt auf eine relativ glatte Oberfläche schliessen, was wohl wiederum nur bei einem grossen Block der Fall sein kann. Eine normale, aus Alluvionen bestehende Kolkböschung wird niemals ein derartiges Gefälle aufweisen! Auch spricht der relativ kurze Kolkraum für diese Hypothese. Leider wurde beim Bau der Fassung nach der Umleitung des Isorno keine Tiefenbohrung durchgeführt, wie anfänglich versprochen worden war, so dass (ohne das Verschulden des Verfassers) heute nichts Sichereres darüber ausgesagt werden kann. Die Erfahrungen bei den übrigen Kolken hat aber Anlass zu der geäusserten Hypothese gegeben.

Aus technischen Gründen konnten an der schmalsten Stelle keine Messprofile gelegt werden. Die angegebenen Punkte wurden von einem Ruderboot aus ermittelt. Ein beträchtliches Abtreiben der Eisenkugel, was eine Fälschung der Messwerte zur Folge gehabt hätte, konnte in keinem Falle beobachtet werden.

Konform dem allgemeinen Kolkhabitus ist der untere Teil desselben mit Alluvionen ausgefüllt, die aber nur am rechten Ufer als Kiesbank aus dem Wasser auftauchen. Diese Kiesansammlung war im Laufe der Jahre den grössten Schwankungen unterworfen. Zunehmende Wassermassen drängen den Fluss merklich auf das Nordufer. Damit ergibt sich eine stärkere Auskolkung auf der Wasserseite der Kiesbank, eine Erscheinung, die auch bei Tieflandflüssen auftritt. Je grösser die Auskolkung seitlich sich manifestiert, desto mächtiger wird die Geröllablagerung auf dem gegenüberliegenden Uferstreifen. Dies macht sich auch in der Gestaltung der Kolkböschung geltend. In Bezug auf die Lockermassen lässt sich ungefähr dasselbe wie bei Kolk 4 aussagen: Eine Verengung des Querschnittes mit darauffolgender Erweiterung bedingt eine Abnahme der Schleppkraft des Wassers bei Mittelwasser und daher des Geschiebes. Eine zusätzliche Komponente in dieser Richtung bietet die Querschnittsverengung am Ausgang des Kolkes und damit einen Stau bei Hochwasser. Der Bau der Wasserfassung hat seit Herbst 1951 die Lage derart verändert, dass anfänglich am Erfolg der bisherigen Beobachtungen gezweifelt wurde, weil dadurch die Messreihe jäh abgebrochen wurde. Zum Glück haben sich diese Befürchtungen nur zum geringeren Teil bewahrheitet.

Anhand der Ablagerungsverhältnisse in diesem grossen Kolk lässt sich folgendes sicherstellen: Je länger ein Kolk ist, desto früher werden flussaufwärts die Geschiebemassen im tieferen Wasser abgelagert, so dass sich flussabwärts nur wenig mächtige Bänke bilden können. Diese verschwinden aber bei einem mittleren Hochwasser und bauen sich erst bei abnehmendem Wasserstande wieder langsam auf.

(Siehe Tafel 4.)

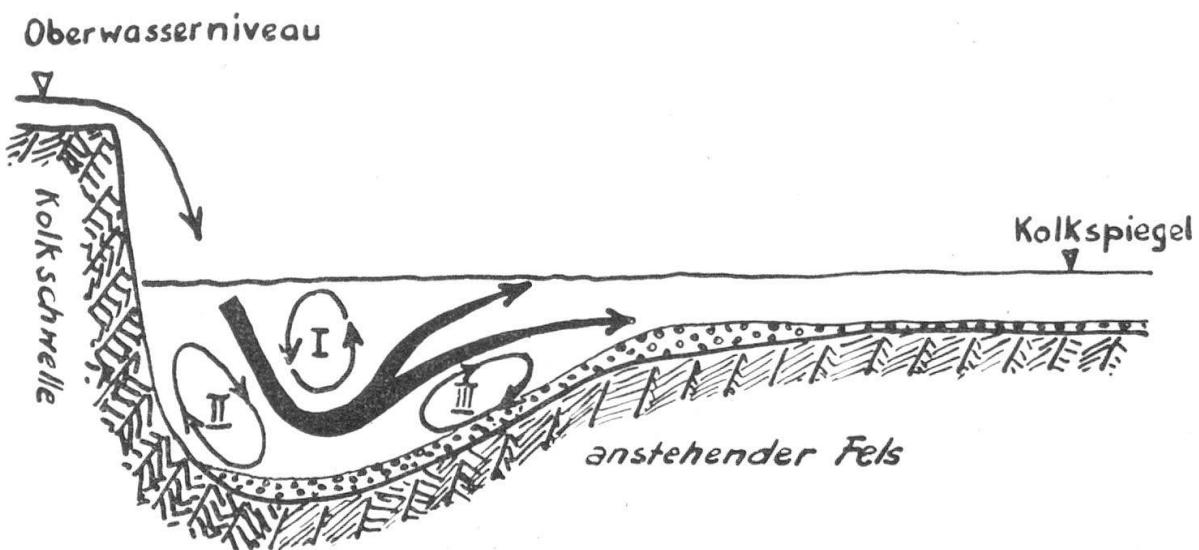
6. Kolkerfahrungen und Berechnungsmethoden für die Kolktiefe

Alle Kolke weisen, falls ihr Bett nicht durch anstehende Rippen gestört ist, ein typisches Längenprofil auf (siehe Abb. auf der folgenden Seite!).

Je nach der Form der festen Schwelle und ihrer Neigung nimmt der Kolk verschiedenen Charakter an: Bei senkrechtem Abfall Kesselform (Wanda), bei geneigter Ausbildung Wannenform (Kolk 4). Gleichzeitig erfolgt eine Anreicherung des Grobmaterials auf dem Kolkboden und damit die Ausbildung einer natürlichen Pflästerungsschicht. Das vorhandene Geschiebe wird durch die Energie des Wassers hochgewirbelt und gelangt teilweise in zerkleinertem Zustande über die Kolkböschung hinaus, teilweise gleitet es wieder auf den Kolkboden zurück, wo es erneut hochgewirbelt wird. Es bildet sich ein fortwährender Kreislauf des Geschiebes, der zu seinem unweigerlichen Abrieb führt.

Dieser Vorgang spielt sich bei normalem Mittelwasser ab. Bei Hochwasser wird ein grosser Teil des Materials weggeführt, das sich dann eben zu den erwähnten Akkumulationen anhäuft, um dann beim nächsten Hochwasser ein Stück weiter transportiert zu werden. Der Ablauf des Geschiebetriebes ist demzufolge kein kontinuierlicher, sondern verläuft synchron mit den jeweiligen Hochwässern. Da die Kolkböschung wegen der Stetigkeit der Korngrösse immer dieselbe Neigung besitzt, der eigentliche Kolk aber seine Tiefe und damit auch seine lineare Ausweitung flussabwärts beständig ändert, können wir einen mutmasslichen Rückschluss auf die verantwortliche Wassermenge ziehen.

Kolkausbildung bei reinem Ueberströmen in natürlichen Flussläufen



Die obenstehende Figur versinnbildlicht in klarer Weise die Entstehung eines Kolkes sowie die verschiedenartige Gestaltung der Wasserwalzen, die zu einem Abrieb des Geschiebes und zu einer Rückwärtsverlegung der Schwelle führen. Die Wasserwalze I ist direkt für die Tieferlegung des Kolkes verantwortlich, Walze II bewirkt die Hinterkolkung der Schwelle selbst und Walze III ist massgebend für die Rückfracht des Geschiebes in den Kolkboden. Verschiedene Autoren vernachlässigen die Wirkung des Geschiebes für die direkte Kolkbildung, meiner Ansicht nach zu Unrecht, denn die Beobachtung an viel grösseren Wasserfällen hat beim Fehlen des Geschiebes die Inferiorität in der Auskolkung weitgehend bestätigt. Die natürlichen Faktoren der Kolkbildung können folgendermassen zusammengefasst werden:

1. Maximale Durchflussmenge.
2. Geschiebeverhältnisse des Flusses.
3. Breite und Gefälle der abwärts liegenden Flusstrecke.
4. Rückstau im Unterwasser.
5. Untergrundverhältnisse.
6. Periodische Wechselerscheinungen.
7. Tektonik.

Ein einziges ausserordentliches Hochwasser hat bedeutendere Folgen als mehrere normale Hochwasser zusammen. Diese Tatsache hat das seltene Hochwasser vom 8.August 1951 klar bewiesen, hatte es doch die umwälzendsten Veränderungen in der ganzen Beobachtungsperiode gebracht. Normale Hochwasser haben andererseits eine ausgleichende Wirkung. Schade ist nur, dass wegen der Bauarbeiten eine eventuelle Rückbildung nicht nachgewiesen werden konnte.

Da das Gesamtspiegelgefälle einer abgegrenzten Flusstrecke für alle Hochwasserstände angenähert konstant bleibt, muss die Hochwassergefahr direkt mit der Menge zunehmen, weil die grössere Menge bei gleichbleibendem Gefälle mit grösserer Geschwindigkeit abfliesst. Da aber das Gefälle an der Schwelle konzentriert ist, wird die Wirksamkeit der grösseren Menge noch erhöht. Der Kolkraum muss sich deshalb bei Vermehrung der Durchflussmenge erweitern. Auch der Grad der Verunreinigung ist nicht minder wichtig. Die Zerstörungskraft durch rotierende Wasserwalzen im Verein mit dem Geschiebe haben wir bereits kennen gelernt.

Die Energiemenge wächst bei gleichem Wasserspiegelgefälle mit abnehmender mittlerer Abflussgeschwindigkeit. Daraus resultiert: Bei kleinem Gefälle unterhalb des Falles sind daher tiefere Auskolkungen zu erwarten, als bei bedeutendem Gefälle. Diese Annahme hat sich an allen Objekten bestätigt. Kleine Flussbreite, und damit Rückstauung bei Hochwasser, hat den gleichen Einfluss wie ein geringes Gefälle. Für den Wassergeschwindigkeit ist das Gefälle des Wasserspiegels und nicht dasjenige der Sohle massgebend. Dieser Umstand macht sich bei Erweiterungen und Verengungen des Bachbettes geltend: Eine Erweiterung des Querschnittes bedingt eine Gefällsverstärkung, diese eine lokale Zunahme der Wassergeschwindigkeit und damit auch eine verstärkte Ausräumung (vor allem bei Hochwasser); eine Verengung hat Stau zur Folge und dieser wiederum eine Gefällsverminderung. Daraus resultiert eine lokale Geschwindigkeitsreduktion mit einer starken Geschiebeablagerung. Bei all diesen Ueberlegungen darf man die orographische Konfiguration des entsprechenden Flussabschnittes nicht ausser Acht lassen.

Der Ort der grössten Kolktiefe befindet sich bei senkrechtem Wasserabfall zunächst der Schwelle. Bei schiefer Ausbildung derselben und einem gestreck-

teren Kolkraum liegt die grösste Tiefe am weitesten von der Schwelle entfernt (siehe Kolk 6 und Kolk 5). Es existiert auch eine auffällige Konstanz in der örtlichen Alluvialbildung, die je nach Abflussintensität und Jahreszeit quantitativ verschieden sein kann. Im allgemeinen erfolgt die Akkumulation zwischen dem Herbst- und dem Frühjahrshochwasser des folgenden Jahres, während die Verhältnisse im Laufe des Sommers meist stabil bleiben.

Berechnungsmethoden für die Kolktiefe

Die mathematische Erfassung der Kolktiefe wurde logischerweise am Ueberlauf von Stauwehren studiert, wo durch das niederstürzende Wasser ebenfalls kolkartige Vertiefungen entstehen, die für das Mauerwerk oft eine grosse Gefahr bedeuten. Die Grundlagen, die für die Schaffung einer Formel nötig sind und die in vielen Modellversuchen entwickelt wurden, können nicht bedingungslos auf jungfräuliche Wasserläufe übertragen werden, da das meist heterogene Flussbett folgende Faktoren negiert:

1. Regelmässiger Querschnitt und
2. konstante Wassermenge, die durch ein bewegliches Wehr ohne weiteres erreicht werden kann.

Das Zusammenwirken der verantwortlichen Faktoren: Wassermenge, Geschiebe und Fallhöhe hat für künstliche Rinnen zur Aufstellung von Formeln geführt, die aber in der Praxis an natürlichen Wasserläufen mit stets wechselnden Profilen und Wassermengen höchstens *cum grano salis* angewendet werden dürfen. Dass in dieser Beziehung äusserste Zurückhaltung zu üben ist, beweist das Auseinanderklaffen der Ansichten über die Wirksamkeit des Geschiebes bei der Kolkbildung. SCHOKLITSCH*) und andere Autoren behandeln es als «quantité négligeable», während EGGENBERGER*) und andere im Geschiebetrieb einen wesentlichen Faktor erblicken.

Im Folgenden seien die bekanntesten mathematischen Formulierungen einer kritischen Anwendungsprobe auf den Isorno unterworfen.

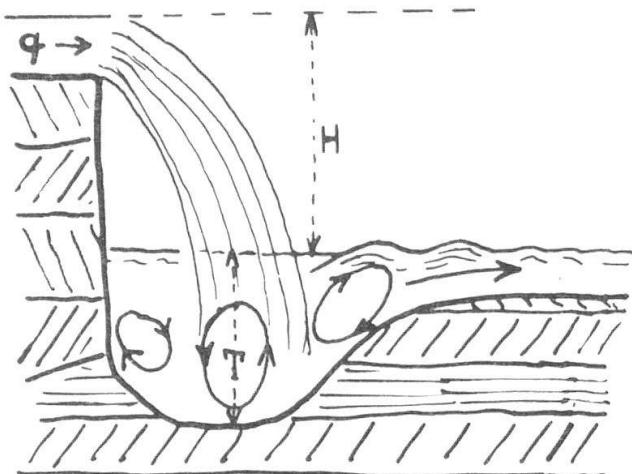
Die Kolktiefe ist nach SCHOKLITSCH und VERONESE*) proportional einer Potenz der Wassermenge q pro Meter Absturzbreite und der Absturzhöhe h und umgekehrt proportional einer Potenz des massgebenden Geschiebedurchmessers d . Entgegen seiner grundsätzlichen Haltung bezieht SCHOKLITSCH das Geschiebe in seiner Formel trotzdem mit ein. Das Resultat seiner Versuchsergebnisse lautet:

$$T = \frac{4,75}{d^{0,3}} \cdot H^{0,2} \cdot q^{0,57} \quad 1)$$

*) Siehe Literaturnachweis

Nach der nebenstehenden Skizze bedeuten:

- T = Maximale Kolktiefe in Meter.
- H = Absturzhöhe in Meter.
- q = Wassermenge in $m^3/sec.$
- d = Massgebender Korn-durchmesser der Sohle bei 90% in Millimeter.



EGGENBERGER gibt dafür folgende Formulierung:

$$T = w \cdot \frac{h^\alpha \cdot q^\beta}{d^\gamma} \quad 2)$$

wobei für $\alpha = 0,5$ $\beta = 0,6$ $\gamma = 0,4$ $w = 22,88$ zu setzen ist.

Für q wählte der Verfasser einen Wert, der die Abflusspitzen ausschliesst, da sie nur ganz kurze Zeit andauern und keine bleibenden Veränderungen in der Kolkstruktur hinterlassen. Die Minima kommen aus Similegründen ebenfalls nicht in Betracht. Das Resultat ist ein Mittelwasser, welches zeitlich die entscheidende Kontinuität aufweist. Seine Größenordnung beträgt für den Isorno $4,3 - 5,0 m^3 sec^{-1}$. Unterhalb dieser Werte ist ein wirksamer Geschiebetrieb im eigentlichen Sinne nicht festzustellen, da der sich ständig bewegende Sand zwischen den groben Partikeln nicht als Geschiebe bezeichnet werden kann und sein Bewegungsablauf scheinbar nach ganz andern Gesetzmässigkeiten vor sich geht.

Aus unbekannten Gründen haben die Urheber der obigen Formeln die Neigung der vorderen Schwellenwand nirgends berücksichtigt. Es scheint mir aber doch, dass dieser Faktor einen Einfluss auf die Reibung des Wassers auf der Unterlage ausübt und somit nicht ohne weiteres vernachlässigt werden darf. Unter Berücksichtigung der Schwellenneigung ist der Verfasser zu folgenden, von den Originalfassungen abweichenden Formulierungen gekommen, die aber vorläufig nur für den Isorno Gültigkeit besitzen, deren Anwendbarkeit aber auch auf andere Gebirgsflüsse und auf anderes Gestein ausgedehnt werden sollte.

Formel 1) modifiziert lautet nun folgendermassen:

$$T = \frac{4,75}{d_{90}^{0,3}} \cdot H^{0,2} \cdot q^{0,57} \cdot (\cos e - r) \quad 3)$$

Dabei bedeutet e = Schwellenneigung gegenüber der Vertikalen
 r = Rauhigkeitsbeiwert für Kristallin (Gneis).

Formel 2) verändert sich nun ebenfalls. Die neue Formulierung lautet:

$$T = w \cdot \left(\frac{h \cdot q}{d} \right) + \left(\cos e + \frac{r}{0,6} \right) \quad 4)$$

Setzen wir für $d_{90} = 54$
 $H = 10$
 $q = 4,6$ (Durchschnittswert)
 $e = 15^\circ$
 $r = 0,08$ ein, so ergeben sich folgende Kolktiefen,
 angewendet auf den Wasserfall des Kolkes «Wanda»:

nach SCHOKLITSCH	18,80 m
nach EGGENBERGER	15,20 m
nach VERFASSER	16,60 m
ausgelotete Tiefe	16,20 m *)

Die resultierenden Differenzen aus 3) und 4) dürfen aus den bereits erwähnten Gründen nicht tragisch genommen werden. Dass aus einer grossen Fallhöhe, selbst wenn die Wassermenge beträchtlich ist, nicht immer eine entsprechend intensive Kolktiefe resultiert, zeigen die Verhältnisse des Rheinfalls: Einer mittleren Abflussmasse von $1200 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ und einer Fallhöhe von 30 m entspricht eine maximale Kolktiefe von 16,00 m! Geringes Geschiebematerial und schwache Neigung der Schwellenwand, d. h. grosses e , geben der obigen Formelentwicklung durchaus recht. Es wäre wünschenswert, wenn die neue Formulierung anderweitig im Kristallin auf ihre Anwendbarkeit geprüft würde. Andererseits darf an dieser Stelle ruhig behauptet werden, dass die mathematischen Berechnungsmethoden nach SCHOKLITSCH und EGGENBERGER (mit den einschränkenden Kautelen versehen) für die Praxis hinreichend und genügend sind und dass es dem Verfasser nur daran gelegen war, ihre Brauchbarkeit in einem einigermassen kontrollierbaren Gebirgsfluss zu erproben.

7. Eintiefungschronologie des Isorno

Das Längsprofil eines Tales ist im Idealzustand eine konkave Linie, die im Oberlauf am stärksten, im Mittellauf schwächer geneigt ist und sich im Unterlauf asymptotisch der Horizontalen nähert (Normalgefälleskurve). Die

*) Diese Messung ist mit einem approximativen Fehler von $\pm 5\%$ zu verstehen.

meisten Täler jedoch (das gilt im Besonderen auch für den Isorno) weisen kein solch ausgeglichenes Gefälle auf, sondern lassen stufenförmige Gefällsknicke erkennen.

An früherer Stelle haben wir andeutungsweise die Bemerkung gemacht, dass eine Gefällsstufe nicht immer unbedingt einer Eintiefungsfolge parallel gehen muss, was ANNAHEIM als zwingend erachtet. Dass eine tatsächliche Folge vorhanden ist, lässt sich anhand einer Fortsetzung des Niveaus, wenn auch reliktisch, flussabwärts nachweisen. Demzufolge gehören Schnellen in den seltensten Fällen primär zu einem solchen Eintiefungssystem, sondern gelten als Uebergangsglied zwischen zwei Eintiefungsfolgen. Als wesentlicher Faktor gelten nur die eigentlichen Wasserfälle und auch nur dann, wenn sich ihr Oberkantenniveau weiter unten ebenfalls nachweisen lässt. Wird eine Stufe durch grosse Schuttakkumulationen bedingt, so liegt eine Eintiefungsfolge nur dann vor, wenn parallel dazu auch das Niveau des Anstehenden einen Gefällsbruch aufweist. Der Flussabschnitt südlich von Mosogno gibt der ANNAHEIM'SCHEN Hypothese durchaus recht, und wir wollen versuchen, die Ursache dieser Stufenbildung zu ergründen.

Es sei die grundsätzliche Feststellung vorausgeschickt, dass primär weder orographische noch wesentlich ins Gewicht fallende petrographische Faktoren eine Rolle spielen. Letztere haben erst im oberen Abschnitt der Valle di Vergeletto (Piano delle Cascine) eine gewisse Bedeutung, da das Gestein teilweise mit Kalk und Calcit durchsetzt ist, was die Bildung einer Sukzession von Eintiefungsfolgen verursacht hat. Ebenso kann eine unterschiedliche Wasserführung von Hauptfluss und Nebenbach nur dann die Ursache für eine Eintiefung sein, wenn durch die plötzliche Einmündung eines besonders wasserreichen Nebenbaches sich an dieser Stelle eine verstärkte Tiefenerosion einstellt. Da dies aber nirgends der Fall ist, bleibt schliesslich nur noch das Argument einer tektonischen Ursache übrig, welche sich in der Folge auch als wesentlicher Faktor herauskristallisiert hat.

Die Flussstrecke zwischen Kolk «Wanda» und Kolk 6 ist bekanntlich durch verschiedene Gefällsstufen gekennzeichnet, wobei dem Beobachter die auffälligen Verflachungen beidseitig der Schlucht des Kolkes «Wanda» zu ihrer Weiterverfolgung flussaufwärts verleiten. Dabei ergibt sich die verblüffende Tatsache, dass der Boden von Kolk 6 einst mit der Oberkante des Kolkes «Wanda» zusammenhing. Das Gefälle betrug im Mittel 1,7%, also wesentlich weniger als das rezente Wasserspiegelgefälle. Grössere und kleinere Verwerfungen haben im Laufe der Erdgeschichte den Tallauf des Isorno quer durchsetzt, wobei die horizontalen und vertikalen Verschiebungen zu einer Knickung der sonst ziemlich ebenmässigen Talsohle führten. Diese Krustenbewegungen «en miniature» lassen sich einerseits am besten im Bereiche der Kolke 3—1 und

«Wanda» verfolgen, wo sie Anlass zur Bildung von Wasserfällen gegeben haben; andererseits liegen sie zeitlich-geologisch z. T. ziemlich weit auseinander, so dass der Fluss jedes Mal Zeit genug hatte, Niveauunterschiede auszugleichen und sein Bett zu konsolidieren. Die Unterschiede zwischen Kolk 2 und Kolk 3 erscheinen als fazielle Variation innerhalb ein- und desselben Vorganges. Ihr Niveauunterschied ist auch entsprechend klein.

Auf Grund der Zahl und Fazies der einzelnen Kolke lassen sich im Ganzen fünf Eintiefungsfolgen nachweisen, wobei eine Haupteintiefung und vier sekundär eingeschachtelte zu unterscheiden sind (siehe Eintiefungsfolgen Seite 65). Die Haupteintiefung liegt zwischen 512,00 m und 486,00 m, überwindet also eine Höhendifferenz von 26 m, die in einem imposanten Wasserfall geendigt haben muss (E-Ausgang der «Wanda»-Schlucht). In diese Eintiefung gliedern sich die vier übrigen ein. Während das Gesamtgefälle vor der Bildung der Schlucht 1,7% betrug, ist es heute als Folge der Unterteilung auf zirka 4,6% gestiegen. Auf Grund der Querprofile lassen sich zusammenfassend für die bezeichnete Laufstrecke folgende Eintiefungsfolgen ableiten:

Eintiefungsfolgen des Isorno bei Mosogno

<i>Eintiefungsfolge</i>	<i>Niveauhöhe</i>
I	512,0 — 507,0 m
II	507,0 — 504,0 m
III	504,0 — 497,0 m
IV	497,0 — 494,0 m
V	494,0 — 486,0 m

Das Fehlen irgendwelcher Ueberreste der Folge IV und V im Canon beweist, dass die Entstehung desselben zeitlich früher erfolgte als die Folgen III und IV. Zur Zeit des allgemeinen Niveaus 497,0 m musste sich durch eine Blattverschiebung ein Riss im Horst «Wanda» (bei gleichzeitiger Kippung nach N) gebildet haben. Die Kluft weitete sich aber nur bis zu der Stelle, wo die Schwelle des Kolkes 1 liegt, und gleichzeitig senkte sich aber auch der Riegel selbst. Dies führte zur Entstehung eines neuen Wasserfalles. Das Niveau 494,0 m hatte seine Fortsetzung bis über den östlichen Kolkausgang hinaus. Dann musste ein Einbruch des grossen Kessels östlich des rezenten Ausganges des Canon erfolgt sein, so dass am Ostabsturz des Niveaus II (beim Wort Wanda, Tekt. Karte) ein hoher Wasserfall mit Oberkante bei zirka 494,00 entstanden sein muss. Dieser Fall wurde dann z. T. durch Evorsion bis zu seinem heutigen Standort zurückverlegt (vergleiche Abb. 2). Die Klamm scheint also sowohl *tektonischer* wie *fluvialtaler Provenienz* zu sein.

B. Die Geschiebeführung, ihre Ursache und Wirkung

I. Geschiebeführung und Geschiebetrieb

1. Allgemeine Gesichtspunkte

Eines der schwierigsten Probleme der Hydrologie ist die Erforschung all derjenigen Umstände, welche die Ausbildung eines Flussbettes bedingen. Die Schwierigkeit liegt in der Tatsache begründet, dass die meisten Faktoren in vielfacher Kombination miteinander verknüpft sind und dass die Veränderung eines oder mehrerer Faktoren automatisch die Umgestaltung der übrigen nach sich zieht.

2. Kornzusammensetzung und Lagerung der Geschiebe

Von grosser Wichtigkeit ist eine möglichst exakte Bestimmung des massgebenden Korndurchmessers. Dazu ist auch die Kenntnis der Zusammensetzung des Flussohlenmaterials notwendig. Im Zusammenhang mit den Projektierungsarbeiten für die Wasserfassung des Isorno wurden im Oktober 1950 von W. LIECHTI Untersuchungen über das Sohlengeschiebe und die Kornzusammensetzung beim Kolk «Wanda» durchgeführt, dessen Ergebnisse in freundlicher Weise für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurden. Vorwegzunehmen ist der wichtige Umstand, dass die Kornzusammensetzung, Form und Lagerung des Geschiebes sowohl am Entnahmestandort, wie auch weiter oben im Kolk 4, grosso modo dieselben sind. Ausgenommen ist die andeutungsweise Ausbildung einer Deckschicht im Bereich von Kolk 4.

Das zum Zwecke der Korngrößenbestimmung untersuchte Sohlengeschiebe (eigentliche Deckschicht fehlt) wurde der in Abbildung 1 wiedergegebenen Kiesbank entnommen.

Um Einblick in die Kornverteilung der Geschiebe an der Oberfläche der Kiesbank zu erhalten, wurden innerhalb einer 10 m^2 messenden Fläche rund 914 kg Geschiebe gesammelt und untersucht. Die Ergebnisse sind auf den beiden folgenden Seiten zusammengestellt.

Auffallend ist die Verteilung der Gewichte auf die verschiedenen Kornfraktionen: 87,2% des Totalgewichtes von 913,95 kg des ausgesiebten Materials liegt zwischen 32,5 und 135 mm. Grössere Geschiebe nehmen auffallend wenig Raum ein. Fraktionen von 193—227 mm z. B. nur 3%! Den grössten Anteil hat die Fraktion 50—71,8 mm mit 31,5%.

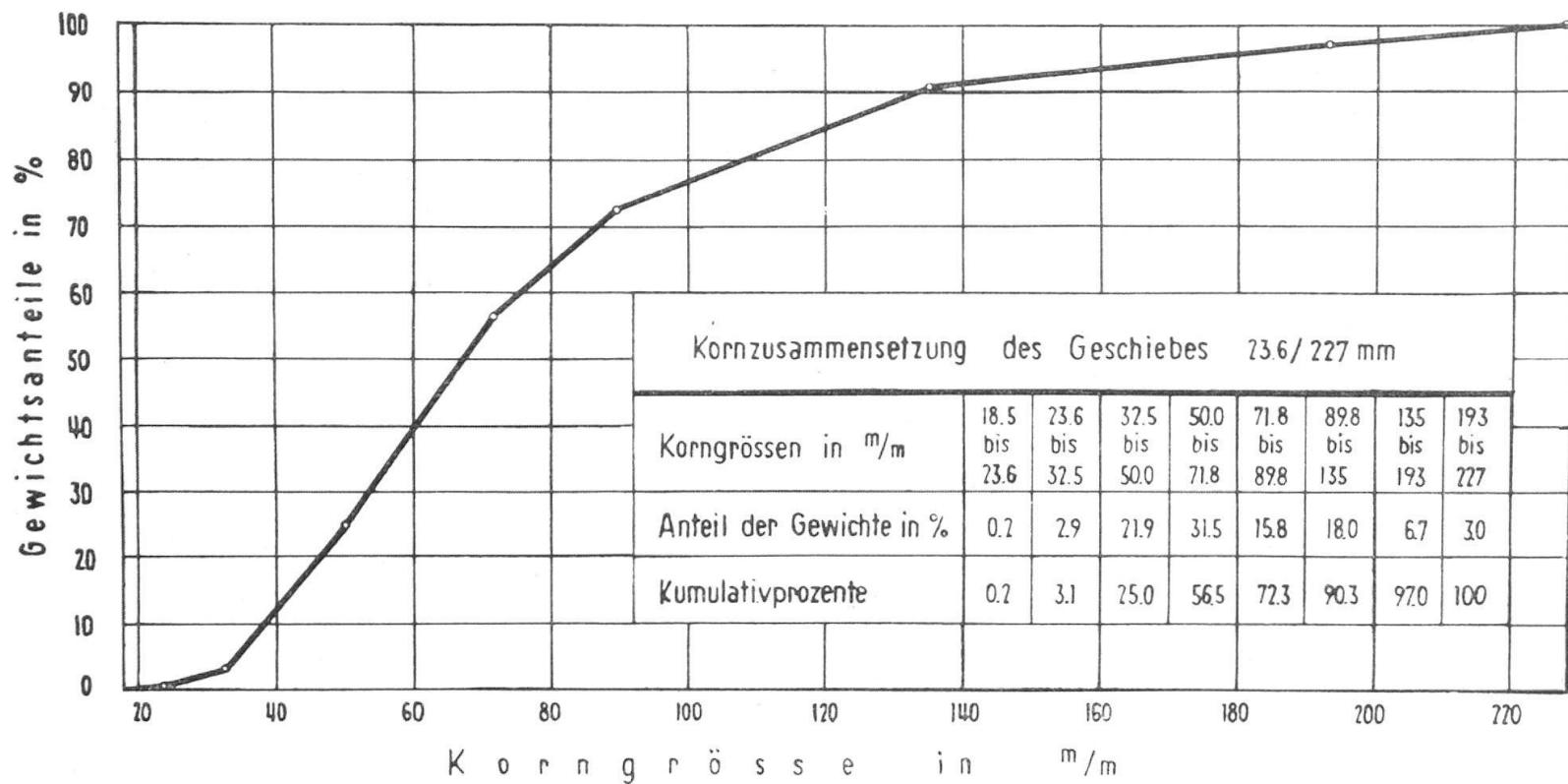
Zur Ermittlung der Kornzusammensetzung der unteren Schichten der Kiesbank wurde zirka 1 m^3 Material im Gesamtgewicht von 2183 kg ausgehoben und in naturfeuchtem Zustande gesiebt. Der Wassergehalt betrug rund 2,45 Gew.%. Die Gesamtergebnisse sind auf Seite 47 und 48 zusammengestellt.

*Aussiebkurve des Geschiebes 23.6/227 mm auf der Kiesbank am rechten Ufer des Isorno
rund 100 m unterhalb der Wasserfassung*

(Die Geschiebe wurden an der Oberfläche der Kiesbank, innerhalb einer Fläche von 10 m² gesammelt, eine sogenannte „Deckschicht“ auf der Kiesbank ist nicht vorhanden.)

(Untersuchung durchgeführt am 23. und 24. 10. 50)

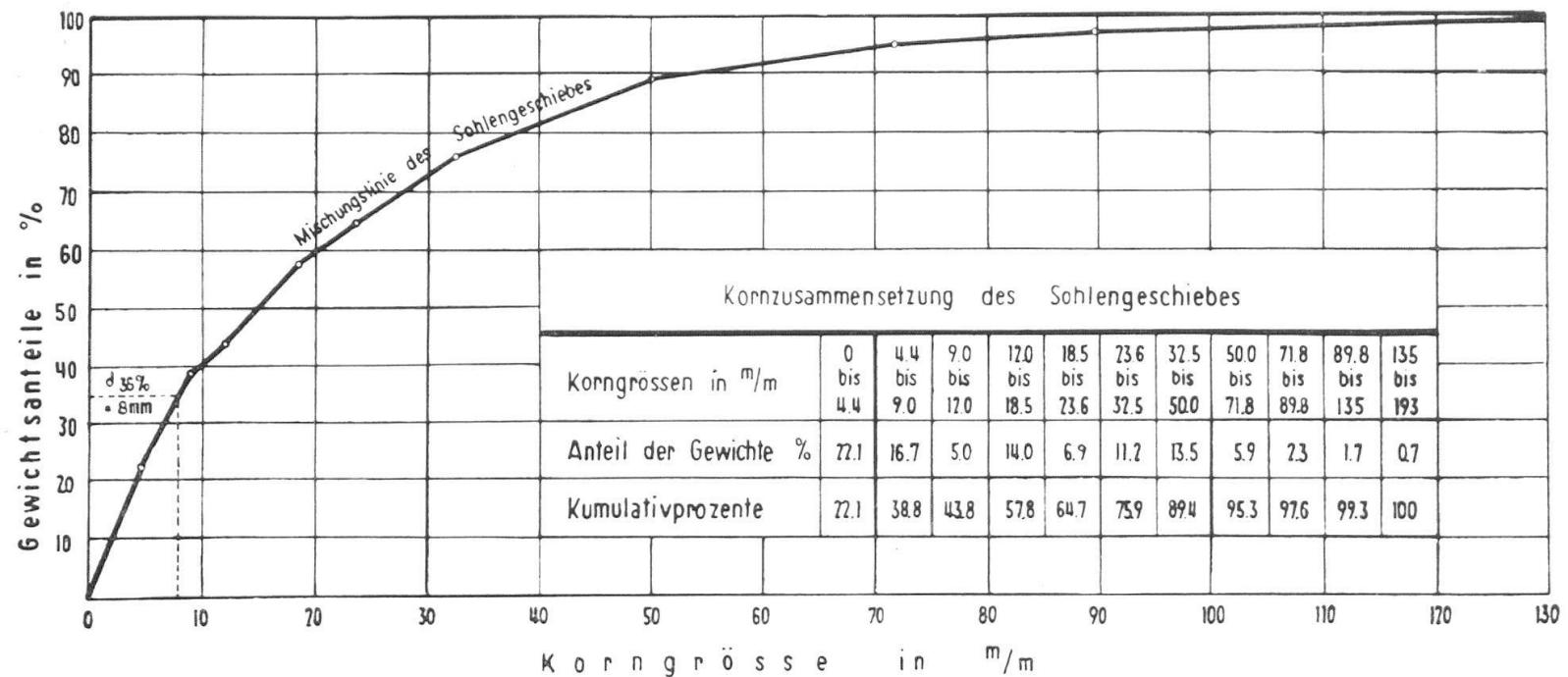
Ausgesiebte Geschiebemenge: 913.95 kg



*Kornzusammensetzung des Sohlengeschiebes auf der Kiesbank am rechten Ufer des Isorno
ca. 100 m unterhalb der Wasserfassung*

(Untersuchung durchgeführt vom 23. — 30. 10. 50)

Ausgesiebte Geschiebemenge: 2182.05 kg



Die Zusammensetzung des Sohlengeschiebes beginnt bei einer viel kleineren Kornfraktion, als dies an der Oberfläche der Kiesbank der Fall ist. Dabei hat die Fraktion 0,0—4,4 mm mit 22,1 Gew.% den grössten Anteil. Diese Tatsache kann auch bei klarem Wasser auf den Kalkböden von blossem Auge wahrgenommen werden. Dieses feine Material ist zwischen gröberes eingelagert (4,4—50 mm), welches rund 67% des gesamten Sohlenmaterials ausmacht. Fraktionen von der Größenordnung 230 mm und mehr konnten weniger häufig festgestellt werden.

Uebersicht der Korngrössen in den verschiedenen Schichten

TABELLE 4

Korngrössen in Millimetern	0 bis 4.4	4.4 bis 9	9 bis 12	12 bis 18.5	18.5 bis 23.6	23.6 bis 32.4	32.4 bis 50.0	50.0 bis 71.8	71.8 bis 89.8	89.8 bis 135	135 bis 193
<i>Oberfläche.</i> Deckschicht in Gew. %	—	—	—	—	0.2	2.9	21.9	31.5	15.8	18.0	6.7
<i>Sohle</i> Unterschicht in Gew. %	22.1	16.7	5.0	14.0	6.0	11.2	13.5	5.9	2.3	1.7	0.7
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Die untere Schicht steht im Gegensatz zu der als Deckschicht bezeichneten groben obersten Schicht. Diese ist auf den Kiesbänken nicht etwa in dem Sinn gröber als die untere Schicht, dass pro Raumeinheit mehr grobe Gerölle vorhanden sind, sondern es fehlen zwischen den groben Partikeln zum Teil die feineren. Die Deckschicht macht also einen lockereren Eindruck als die untere Schicht, in welcher aber pro Raumeinheit ebensoviele grobe Gerölle enthalten sind wie in der Deckschicht. Diese Schicht lässt sich nur auf der Schuttinsel des Kolkes «Wanda» genügend sicher nachweisen.

Die Deckschicht auf der Kiesbank bildet sich, wenn letztere beim Zurückgehen des Hochwassers aus dem Wasser auftaucht. Es entsteht dabei über der Kiesbank eine heftige Querströmung mit grossem lokalen Gefälle, welches das feine Material auswascht. Dieses Auswaschen und der Forttransport des feinen Materials in den angrenzenden Kolk erfolgt aber sehr wahrscheinlich nicht mehr nach dem Gesetz der Geschiebewegung.

3. Bewegungsrichtung des Geschiebes

Auf der Kiesbank wechseln Stellen mit gröberer und feinerer Oberfläche. Scheinbar besteht der ganze obere Teil der Schuttinsel in Kolk 4 wie auf der Kiesbank in Kolk «Wanda» gegen die tiefste Auskolkung zu (also flussaufwärts) aus weniger grobem Material als der flussabwärts gelegene Teil. Das ist aber nur an der Oberfläche der Fall. Die grossen Abflussmengen transportieren gröberes Geschiebe als die kleineren. Bei letzteren wird über die tiefer gelegene Ecke noch Geschiebe, allerdings feineres, transportiert, wenn auf den mehr flussaufwärts und höher gelegenen Partien der Insel schon kein Transport mehr stattfindet. Das Geschiebe wird nicht in der Längsrichtung der Kiesbank, sondern schräg darüber bewegt. Geht die Abflussmenge noch mehr zurück, so lagert sich an besagter Ecke auch das feinere Geschiebe über dem gröberen ab. Diese schiefe Strömung geht aus der charakteristischen Schrägstellung der Gerölle am oberen Teil der Insel hervor. Am unteren Ende der Kiesbank bildet sich beim Auftauchen derselben totes Wasser oder sogar eine horizontale Wasserwalze, in welcher sich viel Schwebestoff ablagert.

4. Geschiebeformen

Die Charakterisierung des Geschiebes nach seiner Form geschieht mit der von TH. ZINGG eingeführten Methode. An jedem Gerölle wurden die drei Hauptdurchmesser a , b , c im Sinne eines dreiachsigem Ellipsoides gemessen, wobei a der grösste, b der mittlere und c der kleinste Durchmesser ist. Zwecks Ausschaltung der absoluten Grössen wurden die Achsenverhältnisse berechnet. Allgemein werden folgende Formentypen unterschieden:

TABELLE 5

Verhältniszahlen		Art der Gerölle
$\frac{b}{a} > 0,66$	$\frac{c}{b} < 0,5$	sehr flache Gerölle
$\frac{b}{a} > 0,66$	$\frac{c}{b} < 0,66$	flache Gerölle
$\frac{b}{a} > 0,66$	$\frac{c}{b} > 0,66$	isometrische Gerölle
$\frac{b}{a} < 0,66$	$\frac{c}{b} > 0,66$	stengelige Gerölle
$\frac{b}{a} < 0,66$	$\frac{c}{b} < 0,66$	flachstengelige Gerölle

TABELLE 6

WASSERFASSUNG ISORNO

*Ausmass und Form der grössten Geschiebe im Flussbett ober- und unterhalb
der Wasserfassung*

\emptyset = Hauptdurchmesser: a = grösster b = mittlerer c = kleinster

1. Sehr flache Geschiebe: $\frac{b}{a} > 0.66$ $\frac{c}{b} < 0.5$

\emptyset a	\emptyset b	\emptyset c	$\frac{b}{a}$	$\frac{c}{b}$	Gesteinsart	Rundung
40.5 cm	36.5 cm	16.0 cm	0.90	0.44	Gneis	kantengerundet
49.3 cm	41.5 cm	18.9 cm	0.84	0.46	Gneis	kantengerundet
48.6 cm	37.5 cm	19.3 cm	0.77	0.51	Gneis	kantengerundet
36.0 cm	34.0 cm	16.6 cm	0.94	0.49	Gneis	kantengerundet
44.2 cm	35.6 cm	15.8 cm	0.80	0.44	Gneis	kantengerundet
55.0 cm	44.0 cm	17.0 cm	0.80	0.39	Gneis	kantengerundet
77.0 cm	52.0 cm	23.0 cm	0.68	0.44	Gneis	kantengerundet

2. Flache Geschiebe: $\frac{b}{a} > 0.66$ $\frac{c}{b} < 0.66$

\emptyset a	\emptyset b	\emptyset c	$\frac{b}{a}$	$\frac{c}{b}$	Gesteinsart	Rundung
49.9 cm	43.0 cm	27.0 cm	0.88	0.63	Gneis	angerundet
35.5 cm	29.6 cm	18.8 cm	0.83	0.63	Gneis	angerundet
39.0 cm	37.8 cm	22.3 cm	0.97	0.59	Gneis	angerundet
30.2 cm	26.6 cm	16.4 cm	0.88	0.62	Gneis	gut gerundet
44.0 cm	41.9 cm	22.4 cm	0.95	0.53	Gneis	angerundet

3. Isometrische Geschiebe: $\frac{b}{a} < 0.66$ $\frac{c}{b} > 0.66$

\emptyset a	\emptyset b	\emptyset c	$\frac{b}{a}$	$\frac{c}{b}$	Gesteinsart	Rundung
30.0 cm	28.0 cm	24.0 cm	0.93	0.86	Gneis	gut gerundet
36.7 cm	27.2 cm	19.0 cm	0.74	0.70	Gneis	gut gerundet
50.4 cm	38.1 cm	26.4 cm	0.76	0.69	Gneis	gut gerundet
72.0 cm	40.0 cm	45.0 cm	0.67	0.94	Gneis	gut gerundet
36.0 cm	30.0 cm	26.0 cm	0.83	0.87	Gneis	gut gerundet
51.0 cm	39.0 cm	32.0 cm	0.76	0.82	Gneis	gut gerundet

4. Stengelige Geschiebe: $\frac{b}{a} < 0.66$ $\frac{c}{b} > 0.66$

\varnothing a	\varnothing b	\varnothing c	$\frac{b}{a}$	$\frac{c}{b}$	Gesteinsart	Rundung
35.0 cm	20.0 cm	14.0 cm	0.57	0.70	Gneis	angerundet

5. Flachstengelige Geschiebe: $\frac{b}{a} < 0.66$ $\frac{c}{b} < 0.66$

\varnothing a	\varnothing b	\varnothing c	$\frac{b}{a}$	$\frac{c}{b}$	Gesteinsart	Rundung
47.0 cm	30.5 cm	16.6 cm	0.65	0.61	Gneis	angerundet
56.0 cm	32.0 cm	18.5 cm	0.57	0.58	Gneis	angerundet
44.6 cm	22.2 cm	14.0 cm	0.50	0.63	Gneis	angerundet

Die durch Messung von 179 Geschieben erhaltenen Massverhältnisse sind die folgenden:

61% der Geschiebe sind flach und sehr flach
 12% sind isometrisch
 27% sind stengelig bis flachstengelig

Der auf der Mischungslinie des Sohlengeschiebes dargestellte massgebende Korndurchmesser von 8 mm ist derjenige, welcher von 35 Gewichtsprozenten des massgebenden Gemisches unterschritten wird. Er hängt von der Mischung der vorhandenen Sohle und von der Mischung und Grösse des Zuschubes ab. Die Erfassung des Sohlengeschiebes ist für eine Berechnung des Geschiebetriebes, d. h. des Grenzwertes, bei dem gerade noch Material des massgebenden Durchmessers in Bewegung gerät, sehr wichtig. Im folgenden Abschnitt wollen wir versuchen, den Geschiebetrieb des Isorno für die untersuchte Laufstrecke approximativ in Zahlen auszudrücken. Diese sollen mit dem nötigen Vorbehalt aufgenommen werden, da direkte Geschiebemessungen, wie z. B. an der Aare, hier am Isorno nicht durchgeführt werden konnten.

5. Der Geschiebetrieb

Das feste Material kann von einem Flusse in verschiedener Form verfrachtet werden: Abfuhrung der gelösten Stoffe, Transport feiner Schwebestoffe, Fortrollen von grobem Material auf der Sohle. Die Bewegungen sind vielgestaltig: je nach Form und Grösse der Steine erfolgt ein Rollen oder Schieben. Nach allen bisherigen Betrachtungen taucht die sehr wichtige Frage auf: «Wann befindet sich ein Gewässer im Gleichgewichtszustand?» In der Praxis lautet die lapidare Antwort: «Wenn sich das Bett im Laufe der Zeit weder erhöht noch vertieft». Nun ist es ja eine altbekannte Tatsache, dass sich dieser Idealzustand an der Erosionsbasis niemals einstellen wird, solange Höhendifferenzen überhaupt bestehen. Mit wieviel grösserem Recht besteht diese Wahrheit aber für einen Gebirgsfluss, wo sich nur ein temporärer Gleichgewichtszustand einstellen kann. Solche Zustände kann man hin und wieder im Isorno erleben. Diese Perioden sind jahreszeitlich eng zusammengefasst: Eine kurze Epoche in ausnehmend trockenen Sommern, wo das Niederwasser während längerer Zeit anhält und in kalten Wintern. Solche Beobachtungen lassen sich auf fast ebenen Laufstrecken und dann besonders in wenig tiefen Kolken anstellen, weil Messproben besonders dort mit Erfolg durchgeführt werden können.

Im Sommer 1951 wurden im Kolk 4 während 14 Tagen täglich zwei Mal vier Kontrollotungen durchgeführt. Die erhaltenen Werte wurden dabei immer auf das Niveau des ersten Tages reduziert, um gleichwertige Ergebnisse zu erzielen. Die gewonnenen Resultate sind in der Tabelle 7 zusammengestellt. Die Ziffern ein- und derselben Kolonne geben stets die Abweichungen gegenüber dem Vortag an. Wo das Ergebnis wegen allzu geringen Niveaudifferenzen unsicher ist, wurde ein Fragezeichen gesetzt. Das Resultat der Messungen ist eindeutig: trotz der beachtenswerten Abflussmengen am 20./21. August ($31 \text{ m}^3/\text{sec}$) blieb der Zustand des Kolkes, wenigstens im Bereich des gewählten Profils, einigermassen konstant.

Die intensivste Ausräumung auf der Wasserseite der Unterwasserbank konnte nur im Augenblick des Abflauens des temporären Hochwassers festgestellt werden. Schon anderntags erfolgte wieder eine leichte Aufschotterung bei einer Abflussmenge von zirka $6 \text{ m}^3/\text{sec}$. Vier Tage nach dem Hochwasser war der ursprüngliche Zustand grosso modo wieder erreicht. Es ergibt sich das folgende beachtenswerte Ergebnis: Der Geschiebetrieb beginnt bei zirka $6 \text{ m}^3/\text{sec}$ für Korngrössen $dm \geq 0,01 \text{ m}$.

TABELLE 7

Kontrollmessungen Kolk 4, vom 10.—25. August 1951

Werte in cm / Niveau 504,52 m (reduziert).

Tag	N	Kontroll- punkt 1	Kontroll- punkt 2	Kontroll- punkt 3	Kontroll- punkt 4
10		+ — 0.0	+ — 0.0	+ — 0.0	+ — 0.0
11		+ 1.0	+ 1.5	— 0.8	—
12		— 1.0	— 1.0	—	—
13	x	—	—	—	—
14		—	—	—	—
15	x	+ 0.5	—	—	— 1.0
16	x	—	—	—	—
17		—	—	—	—
18		—	—	+ 1.4	—
19		—	—	—	—
20/21	N = 5,3 cm!	(Messungen aus techn. Gründen eingestellt.)			
22		+ 4.6	+ 4.0	+ 4.0	+ 3.2
23		— 3.5	— 3.0	— 2.6	— 1.8
24		— 1.5	— 1.6	— 0.8	— 0.5
25		—	—	— 0.5	—
Total		+ 0.1	— 0.1	+ 0.7	— 0.1

N = Niederschlag + Tiefenzunahme — Tiefenabnahme

In Bezug auf die Oberflächengestaltung des Geschiebes macht SUCHIER 31) einen Unterschied zwischen der Beweglichkeit beschlickter und reingewaschener Geschiebe. Erstere sind fest gelagert und weisen eine verminderte Angriffsfläche auf. Eine Entfernung des Schlammes bewirkt einen nach oben wirkenden Seitendruck des Wassers, da das eindringende Wasser nicht mehr allseitig ausweichen kann. Dieser dynamische Auftrieb hebt den Stein, und derselbe wird dann von der Strömung fortgerissen. Dieser Auftrieb gilt naturgemäß nur für leichtere Gerölle. Schwere Geschiebestücke, welche der ansaugenden Wirkung schnell bewegter Wasserschichten widerstehen, werden entweder nur geschoben, gerollt oder bleiben liegen. Der Isorno folgt diesen Gesetzmäßigkeiten nur sehr bedingt, denn sein Flussbett ist nicht verschlammt, wie dasjenige von Mittelland- und Tieflandflüssen. Aehnlichen Gedankengängen folgt auch PARDE 22) wenn er schreibt: «Et des boues impalpables de 1 Millième de millimètre, capables d'être charriées à l'état désagrégé par n'importe quel courant, pour ainsi dire, ne seraient arrachées au fond que moyennant des vitesses de 1,50—4,00 m/sec, alors qu'il faudrait pour des cailloux

de 4 cm 2,40—2,80 m/sec.» Eine verschlammte Flussohle scheint demnach dem Wasser einen viel grösseren Widerstand entgegen zu setzen als eine saubere.

Die Hochwasser bringen das meiste Geschiebe. Beim Nachlassen der Wasser wird zuerst das grobe Geschiebe liegen gelassen, dann erst das feinere Material. Die Ausscheidung des Materials allein auf Grund von Strömungen ist bei Gebirgsflüssen wegen zu schnellen Abfallens der Hochflut nicht möglich. Hindernisse aller Art müssen noch aufbauend mitwirken. Hochwasser haben neben der Aufrauhung des Flussbettes eine ebenso ausgleichende Wirkung; Niederwasser bewirken nach BRETON eine Herstellung des Gleichgewichtsprofils (*profil d'équilibre*). Anhaltendes Mittelwasser veranlasst eine intensive Aufrauhung des Bettes, da das feine Material ständig entfernt wird. Es ist auch der Hauptförderer der Auskolkung und Unterspülung der Seitenhänge.

Je feiner eine Geschiebemischung ist, umso leichter wird sie im allgemeinen in Bewegung geraten. Das Verhalten der einzelnen Geschiebe hängt aber nicht nur von ihrer eigenen Grösse und von den hydraulischen Bedingungen ab, sondern auch von der Art der sie umgebenden Sohle. Wir können zwei Fälle unterscheiden:

1. Das Sohlengemisch ist gröber, als das oben hineinlaufende Geschiebe. Die Mischung der Sohle ist aber derart, dass bei einer bestimmten Abflussmenge ohne Zufuhr von feinerem Material ein sich aus der Sohle nährender Geschiebetrieb möglich ist. In diesem Falle, ohne Zufuhr, ist die Sohlenmischung allein für die Grösse des Geschiebetriebes massgebend. Der entsprechende Korndurchmesser muss aus dem Sohlengemisch abgeleitet werden.
2. Nun werde dem Flussbett von oben feineres Material zugeführt. Von diesem kann die gleiche Abflussmenge ein grösseres Quantum transportieren als vom Sohlengeschiebe. In diesem zweiten Falle ist dann die Mischung des feineren zugeführten Geschiebes allein für die Grösse des möglichen Geschiebetriebes massgebend, und der massgebliche Durchmesser ist aus ihr abzuleiten. Wenn die zugeführten feineren Geschiebe das Transportvermögen des Flusses nicht sättigen, so wird die gröbere Sohle angegriffen und liefert einen Teil des laufenden Geschiebes. Dann ist offenbar ein Korndurchmesser massgebend, welcher zwischen den beiden schon genannten liegt.

Diese Zusammenhänge gelten auch bei einer teilweisen Abpflästerung der Sohle. Bei der in Betracht gezogenen Abflussmenge wird also nur ein Teil des Sohlengeschiebes bewegt werden; die grösseren Geschiebe dagegen werden in Ruhe bleiben. Der Geschiebetrieb ist demnach nicht voll entwickelt. Bei diesen Verhältnissen würde ein längeres Ausbleiben der Zufuhr von oben eine Vergrößerung der Sohle und hernach den Stillstand der Geschiebeführung zur Folge haben. Eine Zufuhr von oben ergänzt die Sohle wieder und diese ist imstande, Geschiebe abzugeben. Bei einer totalen Abpflästerung der Sohle mit

grobem Material ist der Geschiebetrieb dieser Korngrösse gleich Null. Dabei spielt die Deckschicht eine schützende Rolle. Mit wachsender Abflussmenge wird die Zusammensetzung des laufenden Geschiebes immer gröber und die grossen Steine, welche sonst die untere Schicht schützen, nehmen immer mehr an der allgemeinen Bewegung teil.

a. Formelmässige Erfassung des Geschiebetriebes

Beim Versuch, den Geschiebetrieb zahlenmässig zu erfassen, kommt es vor allem darauf an, den Grenzzustand im Fluss festzulegen, bei dessen Ueberschreitung das Geschiebe in Bewegung gerät. Die nachstehend angeführten Formeln beruhen auf Versuchen in einem gleichmässigen Sohlenprofil. Deshalb lassen sich die gewonnenen Ergebnisse nicht ohne weiteres auf einen Gebirgsfluss anwenden, jedenfalls nicht ohne die notwendige Interpretationsvorsicht. Nach MEYER-PETER gilt:

$$\frac{q^{2/3} \cdot Je}{d} = \frac{a + b \cdot g^{2/3}}{d} \quad 1)$$

Es bedeuten:

- q = Wassermenge in m^3/sec pro Meter Flussbreite.
- g = Geschiebetrieb in kg/sec pro Meter Flussbreite.
- Je = Energieliniengefälle.
- d = Massgebender Korndurchmesser des Geschiebes.
- a, b = Konstanten, vom spez. Gewicht des Geschiebes abhängig
(für Isorno 2,6), daher $a = 17$, $b = 0,4$.

Der Geschiebetrieb ist also abhängig von der Wassermenge, dem Gefälle und dem massgebenden Korndurchmesser. Aus der obigen Formel lässt sich der Geschiebetrieb g berechnen.

Eine andere bekannte Darstellung ist diejenige von SCHOKLITSCH 29). Er hat folgende empirische Formeln entwickelt:

$$q_0 = \frac{0,00001944}{J^{4/3}} \cdot d \quad 2)$$

$$g = \frac{700}{d^{0,5}} \cdot J^{1,5} \cdot (q - q_0) \quad 3)$$

q bedeutet den Abfluss, q_0 den Grenzabfluss, beide in m^3/sec pro Breitennmeter des Bettes. Im Laufe der Jahre hat der genannte Verfasser noch weitere, zum Teil vereinfachte Berechnungsmethoden entwickelt, die der Vollständigkeit halber angeführt sein sollen.

Es gelten auch:

$$q_0 = 0,0684 \left(\frac{d^{1,5}}{J} \right) \text{ m}^2 \text{ sec} \quad 4)$$

oder

$$q_0 = 0,6 \left(\frac{d^{1,5}}{J^{1,166..}} \right) \text{ m}^2 \text{ sec} \quad 5)$$

daraus folgt:

$$Q = q_0 + B_m (\text{m}^3/\text{sec}) \quad 6)$$

Bei Korngemischen wird in die Gleichung (5) als Kornabmessung d jene eingesetzt, die das Gemisch so teilt, dass 40% des Gewichtes der Körner feiner sind. Bei Korngemischen kommt dem errechneten Grenzdurchfluss q_0 nur die Bedeutung einer Rechnungshilfsgrösse zu, denn bei solchen Gemischen kann von einem eigentlichen «Grenz»-durchfluss nicht gesprochen werden. Der feinste Sand läuft ja nahezu das ganze Jahr zwischen den gröberen Geschieben durch. Bei steigenden Durchflüssen geraten dann immer gröbere Körner in Bewegung, bis endlich das ganze Gemisch läuft. Für den totalen Geschiebetrieb beim Durchfluss Q erhalten wir nach SCHOKLITSCH:

$$G = 2500 J^{1,5} (Q - 0,6 \cdot B \cdot \frac{d^{1,5}}{J^{1,166..}}) \text{ kg/sec} \quad 7)$$

In Bezug auf die Korngrösse gilt das bereits bei Formel (4) genannte. Formeln (5), (6) und (7) wollen wir nun auf den Isorno (Kolk 4) anwenden und uns dabei bewusst sein, dass verschiedene Faktoren, wie z. B. Blöcke, Schwellen usw. nicht berücksichtigt werden können.

Der ausgewählte Querschnitt innerhalb des Kolkes 4 besitzt eine Fläche von angenähert 24 m^2 , eine Breite von 22 m und die benetzte Profillinie misst $24,5 \text{ m}$. Damit ergibt sich auch die für die Breite eines rechteckförmigen Querschnittes massgebende Masszahl von $24,5 \text{ m}$. Durch Einsetzen von $d = 0,056 \text{ (m)}$ und $J = 0,01$ in Formel (4) erhalten wir für den Grenzdurchfluss folgende Werte:

$$q_0 = 0,0684 \cdot 5^{1,5} = 0,760 \text{ m}^2 \text{ sec}$$

Multipliziert man diesen Wert mit der Masszahl der Breite des Querschnittes, so ergibt sich:

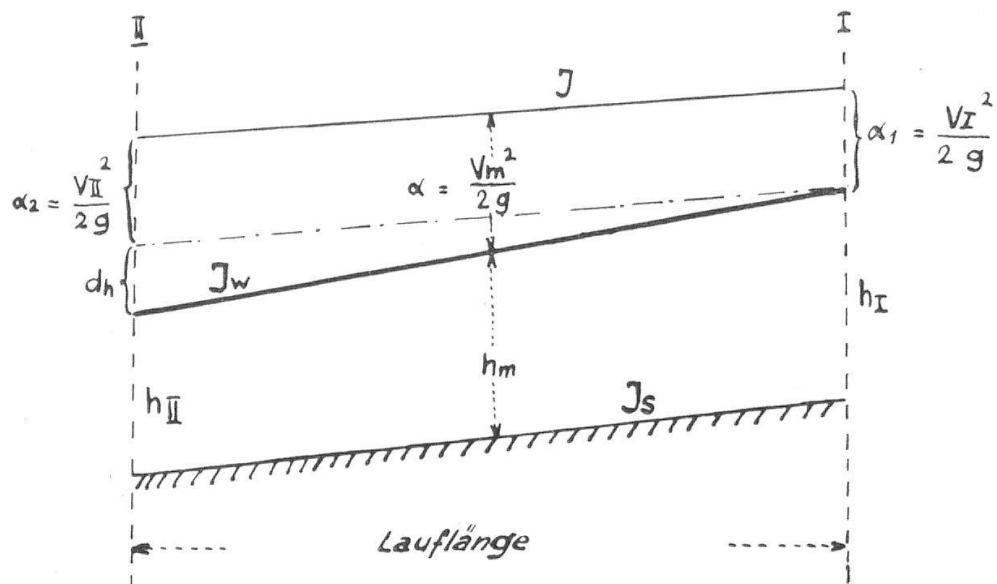
$$Q = 16,720 \text{ m}^3/\text{sec}$$

Dieser Wert liegt noch immer wesentlich unter demjenigen der Aare bei Meiringen. Es ist klar, dass wir die Verhältnisse der Aare nur mittelbar mit denjenigen des Isorno vergleichen dürfen, weil die beiden Flusscharaktere ganz verschieden sind: dort ein mehr oder weniger homogenes Bett, hier ein typischer Wildbach. Direkte Beobachtungen ergaben eine kritische Abflussmenge von $6 \text{ m}^3/\text{sec}$ für $d = 0,01$, d. h. feinen Kies, ein Wert, der prinzipiell sich nur unwesentlich vom errechneten Ergebnis unterscheidet, weil dort für d der Betrag von 0,056 eingesetzt ist. Weil aber dieses Ergebnis nur für einen bestimmten Querschnitt und ein normales Sohlengefüge Gültigkeit hat, kann man obiges Resultat nicht implizit auf die gesamte Flusstrecke anwenden, wie man dies ohne grosse Gefahr für ein homogenes Flussbett tun darf. Es wird auch kaum möglich sein, eine allgemein gültige Gesetzmässigkeit für die Gesamtflusstrecke herzuleiten, auch dann nicht, wenn man versuchsweise die Teilresultate über die ganze Laufstrecke integrieren würde. Die Teilquerschnitte ergeben jedes Mal eine andere Durchflussgeschwindigkeit und damit auch andere Werte für den Geschiebetrieb.

b. Grenzwertbestimmungen für den Geschiebetrieb

An anderer Stelle dieser Arbeit ist schon der Hinweis auf einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen dem Sohlengefälle, dem Wasserspiegelgefälle und der Neigung der Energielinie gegeben worden. Dabei spielt das Wasserspiegelgefälle die entscheidende Rolle und nicht etwa das Sohlengefälle, wie man auf den ersten Anhieb meinen könnte. Dieses Ergebnis darf, mit den notwendigen Kautelen, ohne weiteres praktisch angewendet werden. Bei der Interpretation des Resultates soll nur ein Gedanke wegleitend sein: «Die Gültigkeit erstreckt sich bloss auf die ausgewählte Stelle des Flusses. Für jedes andere Laufstück setzt das Prozedere wieder von neuem ein.» Damit ist der wissenschaftlichen Genauigkeit innerhalb der möglichen Grenzen Genüge getan ohne einem Komplex der Stichhaltigkeit oder Nichtstichhaltigkeit eines Resultates anheimzufallen, der sich unweigerlich dann einstellt, wenn der Geltungsbereich zu weit gefasst oder verallgemeinert wird.

Zusammenhang zwischen Sohlengefälle, Wasserspiegelgefälle und Energielinie
(nach Meyer-Peter und Eggenberger)



α wurde konstant zu 1,1 angenommen

V_m mittlere Geschwindigkeit

h_m mittlere Tiefe

J_s Sohlenneigung

J_w mittlere Wasserspiegelneigung

J mittlere Energielinienneigung

Für J ergibt sich folgende Formulierung:

$$J = J_w - a \cdot \left[\frac{V_m^2}{g \cdot h_m} \cdot (J_w - J_s) \right]$$

Für das spezifische Gewicht 2,68 ergibt sich das folgende empirische Geschiebetriebsgesetz:

$$q^{0,66..} \cdot J = a \cdot d + b \cdot g^{0,66..} \quad 8)$$

Es bedeuten:

q = l/sec/m Flussbreite.

g = kg/sec/m Flussbreite.

J = tg der Neigung oder Gefälle der Energielinie.

d = Korngrösse in mm.

a = Konstante (= 17).

b = Konstante (= 0,4)

$$g = \frac{(q^{0,66..} \cdot J - a \cdot d)^{1,5}}{b} \text{ kg} \cdot \quad 9)$$

- Solange $q^{0,66..} \cdot J < a \cdot d$: Kein Geschiebetrieb
 $q^{0,66..} \cdot J = a \cdot d$: Grenzzustand
 $q^{0,66..} \cdot J > a \cdot d$: einsetzender Geschiebetrieb

Man erhält also bei gegebenem Gefälle J und gegebener Geschiebegrösse d für jede Wassermenge eine ganz bestimmte Geschiebemenge g . Für $Q = 4,7$ und $d = 0,01$ erhalten wir gemäss Formel (7) folgendes Resultat:

$$G = 66,0 \text{ kg/sec}$$

oder auf den Meter Querschnittsbreite einen spezifischen Geschiebetrieb g von $2,7 \text{ kg/sec/m}$. Da leider keine genügenden Kontrollmöglichkeiten mit Hilfe direkter Messung bestehen, erübrigt sich ein diesbezüglicher Kommentar; doch darf darauf hingewiesen werden, dass die jährlichen Ablagerungen der Maggia im Delta, umgerechnet auf den Isorno, mit dem obigen Resultat relativ gut übereinstimmen.

EINSTEIN 9) bezeichnet den Geschiebetrieb als einen Vorgang mit ausgesprochenen periodischen Schwankungen und betrachtet ihn als mathematisches Wahrscheinlichkeitsproblem. Das Verhalten des einzelnen Steines im bewegten Wasser ist nicht nur von den hydraulischen Bedingungen beeinflusst, sondern auch wesentlich von der Art der ihn umgebenden Sohle. Formelmässig lässt sich aus den Arbeiten ersehen, dass das gleichzeitige Einwerfen einer grösseren Anzahl von Steinen in einen eng begrenzten Raum eine Störung des normalen Ablaufes der Transportvorgänge bedeutet. Auf die Natur projiziert würde das heissen, dass plötzlich in Bewegung gesetzte Schutthalden oder Teile davon, bei ihrem Eindringen ins Bachbett eine Störung des normalen Ablaufes der Geschiebe bewirken, was in den meisten Fällen einem Murgang gleichkommt.

C. Die Geschiebefracht

Die Geschiebemenge, die innerhalb eines längeren Zeitabschnittes durch einen Querschnitt läuft, wird als **Geschiebefracht** bezeichnet. Die quantitative Erfassung der geförderten Materialien ist von grösster Wichtigkeit, auch wenn das Ergebnis nur eine Annäherungslösung sein kann.

Das grösste Hochwasser der Maggia seit 1934 ereignete sich am 5./6. August 1949. Die Kontrollberechnungen von GIANELLA ergaben einen maximalen

Abfluss von 3400 m³/sec d. h. 3,7 m³/sec/km². «Wenn nun in einem Einzugsgebiete von rund 920 km² derartige Abflüsse sich zwei Mal im Laufe eines Vierteljahrhunderts ereignen, so dürfte es empfehlenswert sein, für die Teil-einzugsgebiete der Nebenflüsse Hochwassermengen einzusetzen, die etwa das Doppelte der oben erwähnten Zahlen ausmachen, bei ganz kleinen Einzugsgebieten noch mehr!» (Spreitenbach: 40 m³/sec/km².)

In seiner Mitteilung No. 34 (1939) über Deltaaufnahmen hat das Amt für Wasserwirtschaft folgende Zahlen bekanntgegeben:

TABELLE 8

Flusslauf	Durchschnittliche jährliche Ablagerung	Ablagerung pro Jahr und km ² des Einzugsgebietes
Aare	155 000 m ³	280 m ³
Linth	126 000 m ³	227 m ³
Rhein	3 566 000 m ³	513 m ³
Maggia	508 000 m ³	549 m ³

In der Rekordzahl der Maggia ist die Geschiebefracht der Rovana mit eingeschlossen, d. h. die ungeheuren Massen, die die Frana von Campo liefert. Für die letztere dürfen wir ruhig 180 000 m³ jährlich veranschlagen.

Wenn man diesen ausserordentlichen Beitrag der Frana von der gesamten Ablagerung im Delta abzählt, so gelangt man zu einem sozusagen normalisierten Betrag von 508 000 — 180 000 = 328 000 m³, entsprechen einem spezifischen Jahresmittel von 357 m³/km²/Jahr, eine Zahl, die sich durchaus mit den mittleren Ablagerungen anderer Flussgebiete vergleichen lässt, die ähnliche geologische Verhältnisse aufweisen. Setzt man eine gleichmässige Verteilung des Abtrages auf das ganze Einzugsgebiet der Maggia voraus, so lassen sich die vermutlichen jährlichen Geschiebefrachten der Hauptzuflüsse der Maggia folgendermassen bestimmen:

Isorno:	44 300 m ³
Melezza:	49 000 m ³
Rovana:	218 000 m ³ (38 000 + 180 000)
Bavona:	41 000 m ³
Maggia:	67 500 m ³ (Brontallo)

Der Theorie über die Schleppkraft entsprechend sollte die Menge der Sinkstoffe proportional mit den Wassermengen anwachsen. Dass aber die Formel für die Schleppkraft (nach DUBOYS) für Wildbäche nicht gilt, soll folgende Tabelle zeigen:

TABELLE 9

Isorno: Teilbeträge für verschiedene Abflussmengen (approximativ).

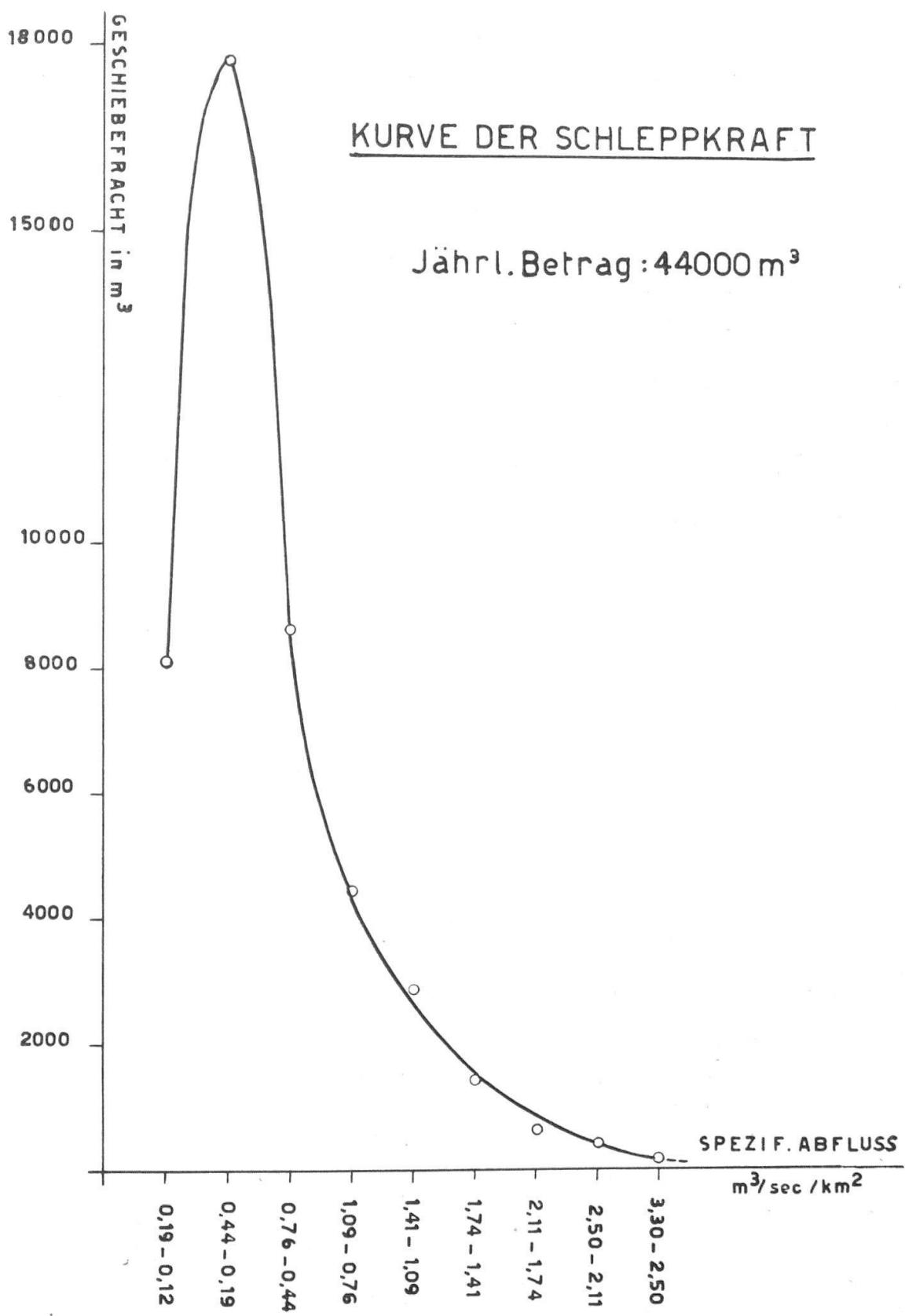
Spezifischer Abfluss	Geschiebefracht
$\text{m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ km}^{-2}$	m^3
3.26 — 2.50	70
2.50 — 2.11	380
2.11 — 1.74	600
1.74 — 1.41	1310
1.41 — 1.09	2940
1.09 — 0.76	4400
0.76 — 0.44	8620
0.44 — 0.19	17850
0.19 — 0.12	8130
<hr/>	
Total	44300 m^3/Jahr

Eine wenig bekannte, oder zum mindesten wenig erörterte Zahl ist der spez. Abfluss in alpinen Verhältnissen, bei welchem die Geschiebeführung eintritt*). Er beträgt im Mittel 120 $\text{l/sec}/\text{km}^2$ oder $14,3 \text{ m}^3/\text{sec}$, wobei die Korngrösse entsprechend heraufgesetzt wird. Die Korngrösse ist also eine Ermessensfrage. Je nach der Grenzziehung variiert auch die kritische Abflussmenge, wie der Vergleich dieses Wertes mit demjenigen auf Seite 58 klar zeigt.

Eine überschlagsmässige Kontrolle der Resultate in der Mitteilung No. 33 des Amtes für Wasserwirtschaft hat diese Zahl bestätigt und auch der Wert für den Isorno, der auf Seite 58 angeführt ist ($16,7 \text{ m}^3/\text{sec}$), stimmt unerwarteterweise gut mit dem obigen Resultat überein.

*) Vgl. AMMANN, Vorarlberger Illwerke

ISORNO



D. Rückblickender Abschluss der formelmässigen Erfassung des Geschiebetriebes

Den Modellversuchen mit einheitlichen Korngrössen verdankt man die Ermittlung und die Bestätigung der Formeln für den Geschiebetrieb in der Natur. Dabei spielt die massgebende Korngrösse d die Rolle der Vermittlerin in der Uebertragung der Versuchsresultate auf die Wirklichkeit. Die Schweizerische Bauzeitung äussert sich in Nummer 3, Jahrgang 1949 über die Anwendbarkeit der Formel in folgendem Sinne: « . . . dass Versuche über den Geschiebetrieb nur dann zu einem brauchbaren Resultat führen können, wenn sie auf Grund der Bedingung durchgeführt werden, dass Normalabfluss, also Parallelität von Sohle und Wasserspiegel und damit auch der Energielinie, besteht und dass die Sohle sich geschiebetechnisch im Gleichgewicht befindet.»

Da nun die wilden Gewässer der Seitentäler der Maggia, und zu ihnen gehört zweifellos auch der Isorno, die oben erwähnten Bedingungen der Versuche nicht erfüllen, muss nach GIANELLA der massgebenden Korngrösse die Rolle der Vermittlerin abgesprochen werden. Diese Schlussfolgerung ist durchaus angebracht, wenn die Formel den Gesamtcharakter des Flussbettes darstellen soll, nicht aber, wenn sie nur für lokal beschränkte Abschnitte angewendet wird. Die gewählte Korngrösse soll nur für einen eng begrenzten Bezirk des Flusslaufes Gültigkeit haben (Wasserfassung etc.), und sie soll auch nur in diesem Sinne verstanden und angewendet werden.

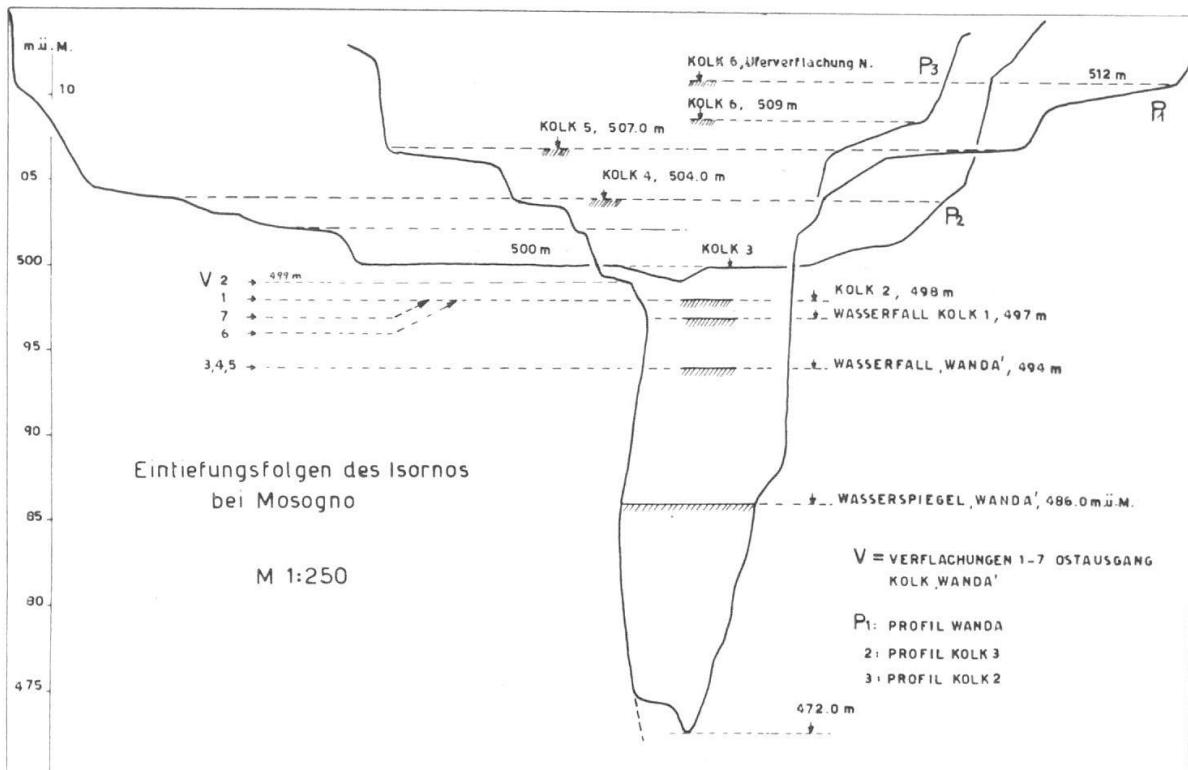
Ueber das grösste Längenmass der geförderten Körner gibt eine ältere, jedoch vielfach bestätigte Formel (CHEZY*) Auskunft. Diese Formel hat sich überraschenderweise im Isorno ausnehmend gut bestätigt. Sie ist nicht im Sinne eines Grenzwertes aufzufassen, sondern als Optimum dessen, was der Fluss in einem bestimmten, eng begrenzten Abschnitt, zu fördern imstande ist.

Bezeichnet man mit J das Sohlengefälle, mit t die Wassertiefe und mit n einen Rauhigkeitsbeiwert (0,04 für wilde Gewässer im Naturzustand), so lautet die Formel für das grösste Längenausmass der geförderten Körner:

$$L = \frac{J \cdot t}{n}$$

Naturgemäß findet sie Anwendung für Flüsse, die ihr Bett im eigenen Schutt und Geschiebe ausgebildet haben. Da der Isorno seinen Lauf nur über relativ kurze Strecken nach den obigen Bedingungen gestaltet hat, haben wir als Grundlage der Berechnung einen für diesen Zweck gut geeigneten Kolk ausgewählt (Kolk 4).

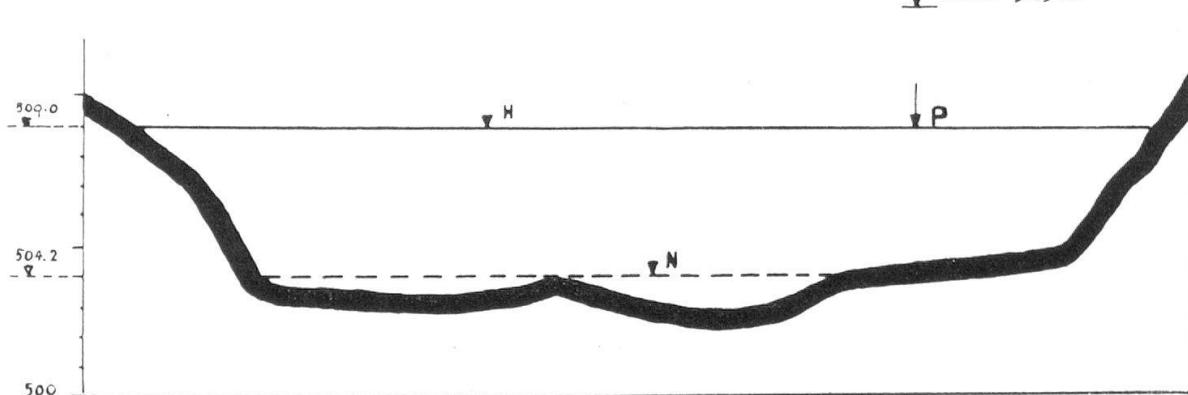
*) Diese Formel wird heutzutage aus unverständlichen Gründen selten mehr gebraucht.



Kolk 4: Hochwasserprofil vom 8. 8. 1951

1 : 330

Pkt. 513.2



H = Max. Hochwasser bei $435,9 \text{ m}^3/\text{sec}$

N = Niederwasser bei $1,2 \text{ m}^3/\text{sec}$

P = Pegelstand beobachtet: 5,2 m

Ausgehend vom katastrophalen Hochwasser am 8. 8. 1951 lässt sich die maximale Wassertiefe im Kolk 4 mit etwa 5 m festsetzen. Die mittlere Flussbreite beträgt nach der Situation 1 : 250 zirka 36,25 m. Einem parabolischen Profil von entsprechender Breite und Tiefe würden also folgende Größen entsprechen:

$$\begin{aligned}
 \text{Querschnitt} \quad F &= \frac{2}{3} \cdot 5 \cdot 36,25 = 120,8 \text{ m}^2 \\
 \text{Benetzter Umfang} \quad U &= 42,5 \text{ m} \\
 \text{Profilradius} \quad R &= \frac{F}{U} = \frac{120,8}{42,5} = 2,84 \text{ m} \\
 \text{Konstante} \quad K &= 18
 \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich die Geschwindigkeit nach STRICKLER:

$$\begin{aligned}
 V &= K \cdot R^{2/3} \cdot J^{0,5} \\
 &= 18 \cdot 2,84^{2/3} \cdot 0,01^{0,5} = 3,61 \text{ m/sec}
 \end{aligned}$$

und der maximale Abfluss:

$$Q_m = 120,8 \cdot 3,61 = 435,9 \text{ m}^3/\text{sec}$$

entsprechend einem spezifischen Abfluss von:

$$\frac{435,9}{119} = 3,7 \text{ m}^3/\text{sec km}^2$$

Der geschätzte Wert des maximalen Abflusses vom 8. 8. 1951 (der Limnigraph wurde damals überschwemmt) mit zirka $300 \text{ m}^3/\text{sec}$ wurde demnach zu tief angenommen, wenn die Genauigkeit der obigen Berechnungen als hinreichend taxiert werden darf. Eine Tatsache hat sich jedenfalls klar herausgeschält: Die grossen Hochwasser sind stets zu niedrig eingesetzt worden, weil man sich nur auf Vermutungen stützte.

Nach der Faustregel von CHEZY beträgt das grösste Längenmass der Geschiebekörper, die vom Hochwasser bewegt werden können:

$$L = \frac{J \cdot t}{n} = \frac{0,01 \cdot 5}{0,04} = 1,25 \text{ m}$$

Die grössten Blöcke im Bett des Kolkes 4 haben Ausmasse von $3,8 \cdot 2,1 \cdot 1,3 \text{ m}$ und sind von diesem grössten, je festgestellten Hochwasser nicht im geringsten bewegt worden und haben auch bis zum Sommer 1953 ihre Lage nicht verändert. Das mathematische Ergebnis dürfte in diesem Falle mit den Realitäten übereinstimmen.

In der Gegend des Kolkes 3 sind nach dem erwähnten Hochwasser grosse Blöcke verschoben worden. Block X hatte eine grösste Länge von $4,65 \text{ m}$ und ist um ca. $2,80 \text{ m}$ verschoben worden (siehe Abb. 4 und 5). Für Kolk 3 ergibt sich ein auf 5% vergrössertes Gefälle, also bedeutend mehr als in Kolk 4. Dabei ist auch die plötzliche Querschnitterweiterung unterhalb des Bergsturzes in Rechnung zu stellen, was eine erhöhte Geschwindigkeit zur Folge hatte. Nach der Formel von CHEZY erhält man für Kolk 3:

$$L = \frac{0,05 \cdot 4}{0,04} = 5 \text{ m}$$

Trotz verminderter Tiefe (wegen vergrössertem Querschnitt) stimmt auch hier die Beobachtung mit dem errechneten Resultat gut überein. Man sieht aber auch, dass das Ausmass der Bewegung solcher Giganten im Grunde genommen recht bescheiden ist im Vergleich zur enormen Wassermenge. Die kurze Dauer des Hochwassers und die heterogene Gestaltung des Flussbettes erklären solch geringe Lageverschiebungen von selbst. Im übrigen erfolgt die Bewegung, wie an früherer Stelle dieser Arbeit dargelegt wurde, meist als Nachrutschen durch Hinterkolkung, bis der Block sich im Geschiebe eingräbt. Es ist deshalb auch gänzlich ausgeschlossen, dass solch grosse Brocken je bis zur Erosionsbasis verfrachtet werden können, wenn man bedenkt, wie spärlich die wirksamen Hochwasser aufzutreten pflegen.

Die Skepsis, die der Verfasser anfänglich bei der Bewertung der mathematischen Formulierungen an den Tag legte, wurden im Laufe der Beobachtungszeit zum Teil gegenstandslos, weil sich herausstellte, dass ihre sinngemässe Anwendung unter Beachtung der notwendigen Kautelen doch zu hinreichend brauchbaren Ergebnissen führt.