

SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING

SER. C.

Avhandlingar och uppsatser.

N:o 262.

ÅRSBOK 8 (1914): N:o 3.

BEITRAG

ZUR

KENNTNIS DER TRANSPORTMECHANIK DES
GESCHIEBES UND DER LAUFENTWICKLUNG
DES REIFEN FLUSSES

VON

HANS W:SON AHLMANN

MIT EINER TAFEL.

—◆—
Pris 1 kr.

SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING

SER. C.

Avhandlingar och uppsatser.

N:o 262.

ÅRSBOK 8 (1914): N:o 3.

BEITRAG

ZUR

KENNTNIS DER TRANSPORTMECHANIK DES
GESCHIEBES UND DER LAUFENTWICKLUNG
DES REIFEN FLUSSES

VON

HANS W:SON AHLMANN

STOCKHOLM

KUNGL. BOKTRYCKERIET. P. A. NORSTEDT & SÖNER

1914

[142718]

INHALTSÜBERSICHT.

	Seite.
Allgemeine Einleitung über die Erdmorphologie als moderne Wissenschaft	5
Das Verhältnis zwischen Kraft und Tätigkeit des fließenden Wassers .	8
Die Transportmechanik des Geschiebes	16
Die Form und Laufentwicklung der korrigierten, »festen« Flüsse . . .	33
Die Form und Laufentwicklung der reifen, freien Flüsse	47
Die Prinzipien der Laufentwicklung des Flusses	48
Kurze Übersicht über den fluvialen Zyklus	53
Charakteristik des Serpentin- und Mäanderlaufes	64

Allgemeine Einleitung über die Erdmorphologie als moderne Wissenschaft.

Das Studienobjekt der morphologischen Wissenschaft sind die jetzigen *Formen* der Erdoberfläche. Will man eine allseitige und eingehende Kenntnis derselben erhalten, so hat man nicht allein die Topographie und die Formen als mehr oder weniger fertiggebildete Erscheinungen zu studieren, sondern muss auch die ursächlichen Kräfte in ihrer Tätigkeit kennen. Diese letztere Forderung stellt sich als eine unerlässliche Bedingung dar, wenn man berücksichtigt, dass die Entwicklung und allmähliche Veränderung der geographischen Formen in den meisten Fällen allzu langsam vor sich geht, um direkt beobachtet werden zu können. Die gegenwärtigen stehen mit anderen Worten als mehr oder weniger fest und geschlossen da. Ihre Entwicklung oder Phylogenese, wenn man sich so ausdrücken darf, muss sich somit auf komparative Untersuchungen, auf eine Synthese einer Menge besonderer Spezialfälle, stützen. Wenn man auch einen grossen Fonds von Beobachtungsmaterial besitzt und es so zusammenzustellen vermag, dass man eine folgerichtige Entwicklungsreihe erhält, so bleibt diese letztere doch ein totes Schema, wenn man nicht die grundlegenden Ursachen oder die treibenden Kräfte und Formen in ihrer Entstehung, d. h. die *aktuellen morphologischen Prozesse* kennt.

DAVIS hat darum in seinem grosszügigen Lehrbuch »Die beschreibende Erklärung der Landformen« (11) der Entwicklung der morphologischen Wissenschaft vielleicht ein wenig vorgegriffen, wenn er in seiner Darstellung der Zyklen von Formkomplexen oder dem Resultat, von schon mehr oder

weniger entwickelten Prozessen ausgeht, die erst studiert und kennen gelernt werden müssen.

Die Forderung der Kenntnis der aktuellen Prozesse ist indessen schwer zu erfüllen, da sie sich in vielen Fällen einem so genauen und detaillierten Studium, wie es zur Entdeckung ihres mechanisch-physikalischen Verlaufs und ihrer Entwicklung notwendig ist, entziehen. In der Morphologie begegnen wir nämlich den Kräften in ihrer umfassenden und unendlich verschiedenartigen praktischen Ausübung, die mit grossen und in der Regel unbestimmbaren Massen arbeiten und dadurch äusserst verwickelte Komplexe bilden. Die mechanischen und physikalischen Untersuchungsmethoden mit feinen und exakten Experimenten können deshalb selten zur Anwendung kommen, woraus natürlich nicht folgt, dass Laboratoriumexperimente niemals in Frage kommen können; in einzelnen Fällen sind sie ganz sicher notwendig und bilden die einzige Möglichkeit zur Erzielung eines einwandfreien Resultates. Trotz des wesentlichen Unterschiedes, der zwischen Physik und Mechanik einerseits und Geographie und Morphologie andererseits besteht, muss sich die letztere doch letzten Endes auf die ersteren stützen, wie auch die von ihr gewonnenen Gesetze, Sätze und Theorien der Grund sind, auf den die Morphologie baut.

In Anbetracht der verwickelten Natur der morphologischen Prozesse, die eine eingehende und exakte Analyse mit Unterscheidung der daran teilnehmenden Kraftelemente und einfachen Faktoren oft unmöglich machen, muss man sich auf dem jetzigen Standpunkt der Wissenschaft in der Regel mit einer direkten empirischen Beobachtung des äusseren Verlaufs der Prozesse begnügen. Diesem letzteren stehen indessen auch Schwierigkeiten entgegen, denn in der Morphologie gilt das Prinzip, dass die Wirkungen nicht gleichmässig mit der Zunahme der Kraft, sondern in geometrischer Progression steigen. Eine geringe Steigerung der Kraft hat demnach einen so grossen Effekt zur Folge und setzt so ansehnliche Massen in Bewegung, dass Detailstudien oft unmöglich ge-

macht werden. Aus diesem Grunde muss man im allgemeinen kleine und unbedeutende Untersuchungsgebiete wählen, in denen die wirkenden Kräfte so geringfügig sind, dass man den Verlauf der Prozesse in seinen Einzelheiten beobachten und die morphologische Arbeit im ganzen überblicken kann. Imponieren diese Untersuchungsgebiete somit nicht durch ihren Reichtum oder durch die Feldgrösse der darin auftretenden Formen, so haben sie doch durch die hier zu erhaltenden eingehenden Detailkenntnisse und Beiträge zu der inneren Mechanik der morphologischen Prozesse ihren Wert und besitzen dadurch sogar einen Vorzug vor geographisch ausgedehnten Studienfeldern. Die morphologisch wirksamen Kräfte arbeiten, in wie kleinem Massstabe sie auch auftreten, immer nach denselben Gesetzen; die Erscheinungen und Formen der kleinen Gebiete sind deshalb den grossen gleich, und nur der quantitative Grad ist verschieden.

Im Zusammenhang hiermit ist zu beachten, dass bei dem jetzigen Standpunkt der Morphologie für jeden einzelnen Fall sowohl die Quantität der Massen wie die Zeit der Entwicklung bestimmt werden muss; Vergleiche und komparative Schätzungen sind hier nicht berechtigt. Der Grund hierfür liegt, ausser in der grossen und in vielen Fällen unberechenbaren Steigerung der Wirkungen mit jeder Zunahme der Kraft, auch in der Schwierigkeit oder beinahe Unmöglichkeit, diese letztere zu bestimmen. Zwischen der ganzen Kraft, der *absoluten* Kraft, und dem Teil derselben, der in einem gewissen morphologischen Prozess wirkt, der *morphologisch effektiven Kraft*, besteht nämlich ein bedeutender Unterschied. Muss man sich somit in der Regel beschränken, die äussere Art der Tätigkeit der Kräfte, oder die reinen Formveränderungen im Verlauf und in der Entwicklung der Prozesse, klarzustellen, so müssen doch, wie schon erwähnt, die mechanisch-physikalische Grundanschauung sowie auch die schon gewonnenen Resultate dieser Wissenschaften die Basis sein, auf die man baut, und der Gesichtspunkt, unter welchem man die Probleme behandelt — ein Grundsatz, den PENCK in

seiner »Morphologie der Erdoberfläche« (33) auf eine grossartige Weise durchgeführt hat.

Das Verhältnis zwischen Kraft und Tätigkeit des fliessenden Wassers.

Das Wasser
als Transport-
mittel.

In dem obengenannten Werk unterscheidet PENCK zwischen Massenbewegung und Massentransport, welcher letzterer mittels eines gewissen Transportmittels und nicht, wie die erstere, ausschliesslich durch die unvermittelte Wirkung der Schwerkraft auf den Körper geschieht. In der vorliegenden Arbeit haben wir das fliessende Wasser, das zweifellos wichtigste Transportmittel der Erdoberfläche, zu behandeln. Die Schwierigkeiten, auf die wir hier stossen, sind indessen vielleicht grösser, als anderswo, da wir noch keine genügende Kenntnis von der Eigenbewegung des Wassers besitzen. Solange dieses Problem nicht gelöst ist, kann auch die Morphologie der Flüsse und alles, was damit in Zusammenhang steht, nicht vollständig überblickt und erklärt oder einer so genauen und eingehenden Behandlung, wie es wünschenswert wäre, unterzogen werden.

Die lebendige Kraft des Wassers ist proportional der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit. Wenn diese Kraft des Wassers sich in einem fliessenden Strom frei entwickeln könnte und kein Widerstand vorhanden wäre, so würde die Geschwindigkeit auf Grund der Akzeleration beständig steigen. Dies ist, wie bekannt, nicht der Fall, sondern ein grosser Teil des Kraftzuschusses wird durch den Reibungswiderstand aufgehoben. Was für den Transport oder eventuell auch für die Erosion, d. h. für die morphologisch effektive Kraft, übrig bleibt, ist somit nur ein geringer Teil der ganzen absoluten, eine Wahrheit, die schon GORDON (s. 33, S. 305) erkannt hat, indem er nachwies, dass die Quantität des Schlammes von der Geschwindigkeit unabhängig ist, aber bestimmt wird durch den Anteil der Wasserkraft, welcher nicht beim Fliessen verbraucht wird.

GILBERT hat dann diese theoretischen Sätze in der hier unten oft zitierten Abhandlung »Report on the Geology of the Henry Mountains» (21) ausführlich erörtert.

Die Friktion selbst ist, wie GILBERT (21, S. 101) sagt, eine äusserst verwickelte Sache und hat auch sehr komplizierte Erscheinungen zur Folge. Das dem benetzten Umkreis zunächst liegende Wasser wird durch Friktionen gegen den Boden so verzögert, dass in verschiedenen Partien der Flusssektion eine ungleichförmige Geschwindigkeit herbeigeführt wird. »The depth governs the velocity», sagt REVY, d. h. je weiter die Wasserpartikelchen vom Boden abliegen, umso grössere Geschwindigkeit haben sie. Nach JASMUND (25) besteht die Vertikalgeschwindigkeitskurve aus einer logarithmischen Linie mit senkrechter Achse, wo der Widerstand mit dem Quadrat des Abstandes vom Boden abnimmt. Auf der Oberfläche haben die Wasserpartikelchen nur die Reibung gegen sich selbst, oder die Viskosität, zu überwinden. Zum Transport kann, wie oben gesagt, nur die nach Überwindung der Fließfriktion übrigbleibende Kraft angewendet werden.

Das Verhältnis zwischen der morphologisch effektiven und der absoluten Kraft kennen wir nicht, eine jede quantitative Berechnung der Transportenergie, die von der Geschwindigkeit und dem Volumen des fließenden Wassers abhängt, ist also unmöglich; die einzige Möglichkeit hier, wie in den meisten anderen Gebieten der Potamologie, sind rein empirische Messungen.

Von dem Einfluss, den die Friktion auf die Bewegung des Wassers ausübt, wissen wir nichts, weil wir überhaupt nicht die Mechanik des fließenden Wassers kennen. GILBERT (21) hat indessen hervorgehoben, dass infolge der Verschiedenheit in der Geschwindigkeit Gegenströme entstehen müssen; ferner können die für den Transport und die Erosion so wichtigen Wirbel und die zuerst von HARLACHER und dann von RÜMELIN (35)* gemessene Pulsation erwähnt werden.

* RÜMELIN hat einige genaue Messungen dieser Pulsation in einem gebauten Kanal vorgenommen und gründet hierauf seine neue und einheitliche

Die
Ausdrücke,
Erosion,
Transport
und Akku-
mulation.

Was den Transport selbst betrifft, so ist er nicht weniger kompliziert als die Reibung, sondern eher ist das Gegenteil der Fall. Gewöhnlich spricht man von Erosion und Akkumulation im Zusammenhang mit Transport, ohne sich jedoch näher klargemacht zu haben, was diese drei Prozesse eigentlich bedeuten oder welche Stellung sie im Verhältnis zu einander einnehmen. PENCK sagt (33, S. 244), die Wirkungen des Massentransports seien zweifältig und beständen »in einer Wegnahme von Materialien sowie in einer Wiederablagerung derselben«. PENCK begreift also in das Wort Massentransport die Bewegung des ganzen losen Materials von seinem

Theorie der Bewegung des Wassers, die gute Anregungen zu enthalten scheint, wenn auch die direkten Untersuchungen noch zu gering an Zahl und zu unbedeutend zur Erklärung aller der mit dem Probleme zusammenhängenden Einzelheiten und Erscheinungen sind. Infolge der Bedeutung, welche RÜMELINS Theorie hat und erhalten kann, will ich dieselbe hier in äusserster Kürze referieren. Durch seine Messungen fand RÜMELIN nämlich, dass die Pulsationszeit um einen konstanten Mittelwert oszilliert und von den verschiedenen Geschwindigkeitsverteilungen im Querprofil und in der Lage des Stromstriches unabhängig ist, zu der Mittelwassertiefe und Mittelgeschwindigkeit dagegen in gesetzmässigem Verhältnis steht. Schon REYNOLDS hat in seiner grundlegenden Abhandlung über die Bewegung des Wassers (34) hervorgehoben, dass die Bewegung des Wassers, sobald die Geschwindigkeit ein gewisses Mass überschreitet, nicht ein einfaches Gleiten, sondern ein Wälzen wird. Diese kritische Geschwindigkeit ist eine so geringe, dass man es in der Potamologie ausschliesslich mit der wälzenden Bewegung zu tun hat. RÜMELIN kommt zu demselben Ergebnis, meint aber, dass nicht die ganze Wassermasse, sondern nur ein Teil derselben sich in einem wälzenden Zustand befindet, weshalb eine Ditropie oder Doppelbewegung vorhanden ist. Was den wälzenden Teil betrifft, so umfasst sie $\frac{2}{3}$ der ganzen Sektionshöhe; das oberste Drittel drückt auf diese und wird dadurch auch mitgezogen. Die Partikeln bewegen sich in ihren Bahnen, die »Wirbelkörper« in sinusartigen Kurven, den s. g. Fliesslinien. Durch die Kollision und den gegenseitigen Druck dieser Wirbelkörper aufeinander beim gleichmässigen Fliessen des Wassers entsteht abwechselnd Retardation und Akzeleration, oder mit anderen Worten Pulsation. Die Fliesslinien sind ausserdem wirbelartig, was bewirkt, dass sie sich im horizontalen Glied in »Serpentinen« bewegen (s. näher S. 61).

Zu beachten ist, dass RÜMELINS Untersuchungen wie alle seine Sätze das Dahinfließen des Wassers auf graden, gleichförmigen Strecken und mit konstanter Wassermenge betreffen. Da ferner das Wasser äusserst leicht beweglich ist, wird es durch jede Ungleichmässigkeit und Störung beeinflusst; in Flussbetten kommen deshalb sehr komplizierte Formen zustande, was indessen nicht ausschliesst, dass die von RÜMELIN aufgestellten Hauptprinzipien für die Bewegung des Wassers auch hier herrschen.

festen Ausgangspunkt während seiner Fortbewegung und bis zur seiner wiedererhaltenen stabilen Lage nach der Ablagerung ein. Nimmt man dagegen das Wort Transport als einen Ausdruck für den mechanischen Prozess, der nur in der Fortbewegung von einer Stelle zur anderen besteht, so ist es gleich Erosion und Akkumulation und bildet nicht einen Teil des einen oder anderen. Der Transport beginnt somit, wenn ein Körper aus seiner stabilen Lage gebracht oder von einem gewissen Platz erodiert wird, und die Akkumulation findet statt, wenn der Transport zu Ende ist. Diese Auffassung des Begriffes Transport als eines den anderen gleichgestellten Prozesses kommt in der Litteratur recht oft zum Vorschein. So sagt PENCK selbst, »wenn nicht die ganze disponible Kraft des fließenden Wassers zum Transport gebraucht wird, so entsteht auch Erosion«.

Im Gegensatz zu PENCK's Anwendung des Wortes Transport als einer zusammenfassenden Bezeichnung wird dafür gewöhnlich Erosion angewendet. So sagt GILBERT (21, S. 94): »States in their natural order, the three general divisions of the process of *erosion* are 1) weathering, 2) transportation and 3) corrasion.« Der erste und der letzte Prozess werden ferner unter der Bezeichnung »disintegration« vereinigt. Ein Vorteil bei dieser Wahl der Bezeichnungen ist der, dass die Korrasion nur einer Phase der Erosion, nämlich der, die im Flussbett durch das fließende Wasser stattfindet, untergeordnet wird. Die Unklarheit in der Definition und Anwendung der drei Ausdrücke — die hauptsächlich daher zu kommen scheint, dass ein die drei zusammenfassendes Wort fehlt, und dass man also eines von ihnen selbst als Kollektivum anwenden muss — wird durch Einführung von »Denudation« und »Abrasion« noch erhöht. Gewöhnlich betrachtet man sie als Synonyme von Erosion, zuweilen macht man aber, wie PENCK (33) hervorgehoben hat, einen gewissen Unterschied zwischen Denudation und Erosion und nimmt an, dass die erstere längs der Oberfläche, die andere mehr linear, z. B. in Flüssen, also gleichwertig mit Korrasion,

wirkt. — Mit Bezug auf die vorliegende Abhandlung muss der Unterschied, der in den Bezeichnungen liegt, wenn man sie als Ausdrücke für *allgemein geographische Erscheinungen*, oder als Namen für gewisse bestimmte *morphologische Prozesse* anwendet, betont werden. Ich werde deshalb hier *Erosion* für die Loslösung des Materials von seinem Platz, oder mit anderen Worten für die Veränderung von Ruhe zu Bewegung benutzen; die *Bewegung* wird in Übereinstimmung hiermit die kontinuierliche Fortbewegung, oder die Überführung vom Erosionsplatze bis zu dem Punkte, wo das Material wieder zur Ruhe kommt oder *akkumuliert* wird, umfassen. Da das lose Material in einem Fluss wiederholter Erosion und Akkumulation unterworfen ist und sich nicht in einer ständigen, ununterbrochenen Bewegung befindet, habe ich die Bezeichnung *Transport* nicht nur für die mehr oder weniger kurze Fortbewegung zwischen der Erosion und Akkumulation anwenden wollen, sondern ich gebrauche die Bezeichnung als eine Zusammenfassung des ganzen komplizierten Prozesses, dem eine lose Partikel auf ihrer Fahrt im Flussbett unterworfen ist.

Die Erosion. Die Erosion eines Körpers geschieht dadurch, dass das in Bewegung befindliche Transportmittel — in diesem Falle das Wasser — einen stärkeren Stoss ausübt als der auf den Körper wirkende Widerstand. Die Stosskraft und der Widerstand müssen somit im Erosionsaugenblicke gleich sein. Sobald der Körper dann in Bewegung gebracht ist, bedarf es zur Unterhaltung dieser Bewegung nur einer geringeren Kraft. Nach PENCK's Zusammenstellung (33, S. 284) von SUCHIER's Experimenten ist das Verhältnis zwischen der für die Bewegung erforderlichen Geschwindigkeit (v_1) bei labilem Ausgangsstadium und (v_2) bei stabiler Ausgangslage für Steine von Haselnuss-, Walnuss- und Taubeneigrösse

$$\frac{v_2}{v_1} = 1.35; 1.39; 1.45. \text{ Auch infolge dieses bedeutenden Unter-}$$

schiedes der erforderlichen Energie besteht zwischen »Erosion« und »Bewegung« eine beträchtliche Verschiedenheit.

Nachdem dann der Körper aus seiner stabilen Ausgangslage gebracht ist, hängt es von der Stärke des Stromes ab, ob das Material suspendiert im Wasser oder fortrollend längs des Bodens geführt wird. GILBERT (21, S. 100) ist der Ansicht, dass hauptsächlich die durch Friktion gegen den Boden gebildeten aufwärtsgerichteten Ströme das Material bewegen. Dies dürfte jedoch hauptsächlich für das schwebende Material gelten, denn das fortgerollte erfordert keinen von der horizontalen Hauptrichtung des Wassers abweichenden Strom.

Wie ich schon vorher erwähnt habe, wissen wir noch nicht, wie das Wasser sich bewegt, welches die Bahnen sind, in denen die Wasserpartikeln dahinfließen, oder welches die Gesetze sind, die sie bestimmen. Offenbar ist indessen, dass, wie REYNOLDS sagt (34), die Bewegung des Wassers über eine gewisse Geschwindigkeit nicht mehr ein einfaches, regelmässiges Gleiten, sondern ein kompliziertes Rollen ist. Je mehr dann die Geschwindigkeit zunimmt, umso verwickelter und unregelmässiger wird die Bewegung durch die Wirbel, die, zwischen Wasserschichten von verschiedener Geschwindigkeit gebildet, mit vertikal stehender Hauptachse stromabwärts geführt werden. Bei rasch dahinfließenden Flüssen ist die Wasserbewegung deshalb äusserst kompliziert und dürfte jedem Versuche einer genauen Untersuchung trotzen. Das suspendierte Material wird also hier auf Bahnen dahingeführt, deren Lauf und Lage wir nicht kennen; auch das Geschiebe wird unregelmässig transportiert, an einer Stelle erodiert, über eine mehr oder weniger lange Strecke bewegt, um dann in einem ruhig fließenden Wasser, einem Stauwasser u. dergl. wieder zur Ruhe zu kommen. Die Bodenkonfiguration erfährt beständige Veränderungen und ermangelt jeder bestimmten Grundform. — Bei ruhigerem Strom in reifen Flüssen sind dagegen die Verhältnisse regelmässiger, und wenn wir auch die Bahnen, denen das Geschiebe auf seinem Transport folgt,

Die
Bewegung.

nicht in allen Einzelheiten kennen, so besitzen diese Flüsse doch mit ihrem Serpentin- oder Mäanderlauf eine bestimmte, regelmässige Bodenausbildung, die bewirkt, dass wir uns eine etwas bessere Vorstellung von dem Materialtransport wie von der damit zusammenhängenden Laufentwicklung des Flusses bilden können.

In der vorliegenden Abhandlung gebe ich zunächst keine ausführliche Darstellung der Beförderung des Materials in einem gewissen Fall oder während eines gewissen Entwicklungsstadiums des Flusses, sondern ich will nur die Art der Transporttechnik selbst oder die allgemeine Form, in welcher das Geschiebe immer transportiert wird, berühren. Ausgehend von dieser generellen Regel oder Grundsatz für den Materialtransport werde ich dann den reifen Flusslauf, — sowohl den freien wie den »festen« (korrigierten) — hauptsächlich mit Rücksicht auf die Problemstellung oder die allgemeinen Gesichtspunkte, die bei der Behandlung ihrer Laufentwicklung in Betracht zu ziehen sind, in grösster Kürze behandeln.

Verhältnis
zwischen Ero-
sion und
Transport.

Bevor wir hierzu übergehen, müssen jedoch zunächst einige Worte über die Voraussetzungen für Erosion und Bewegung sowie über das Verhältnis dieser Prozesse zu der morphologisch effektiven Kraft und damit zu dem allgemeinen physischen Zustand des fließenden Wassers gesagt werden.

Eines der wichtigsten Gesetze für die Transportmechanik ist HOPKINS' Satz, dass das Gewicht der transportierten Materialpartikeln mit der sechsten Potenz der Geschwindigkeit wächst. Wie GILBERT (2) hervorgehoben hat, darf man jedoch aus diesem Gesetz nicht den Schluss ziehen, dass die ganze Last festen Materials, die ein Fluss transportiert, in einem solchen Verhältnis zur Stromgeschwindigkeit stehe, sondern vielmehr, dass die Geschwindigkeit die grösste Korngrösse, die der Fluss wälzend fortbewegen kann, sowie die grösste Korngrösse, die schwebend gehalten werden kann, bestimmt.

Wenn somit die Stromgeschwindigkeit die Qualität der

Last bestimmt, so hängt ihre Quantität von dem Volumen des Wassers ab.

Von grösster Bedeutung für die Arbeit und die Ökonomie des Flusses ist das Verhältnis zwischen der Last und der morphologisch effektiven Kraft. Wieviel von der Kraft, die sich in der Transportarbeit aktualisiert, hängt von dem Vorhandensein von Material ab. Wenn alle Kraft im Materialtransport verbraucht wird, so ist der Fluss ausgeglichen (»graded») und Korrasion kann überhaupt nicht stattfinden. Dieses vielbesprochene ausgeglichene Stadium in der Entwicklung des Flusses dürfte indessen, wie späterhin näher behandelt werden soll, nur ausnahmsweise zur Ausbildung kommen. Es ist als Name für einen allgemeinen idealen geographischen Zustand, nicht aber für die Transportmechanik selbst berechtigt, weil hier eine beständig wiederholte Umlagerung durch Erosion, Bewegung und Akkumulation stattfindet; damit folgt nämlich ein unaufhörlicher Wechsel des Energiebedarfs und der Geschwindigkeit so dass der Strom nur einen kurzen Augenblick mit Material vollbeladen ist. Ist die morphologisch effektive Kraft nicht vollständig durch den Transport in Anspruch genommen, so geschieht Korrasion, wenn sich Gelegenheit dazu darbietet. Da Korrasion nur mittels des Geschiebes geschieht — klares, materialfreies Wasser übt nur eine chemische Auslösung aus — so steigt die Korrasion direkt mit der Materialquantität, aber nur bis zu einer gewissen Grenze. Denn es ist zu bedenken, dass das transportierte Material eine so grosse Masse erreichen kann, dass es den primären oder festen Flussboden vollständig bedeckt und ihn auf diese Weise schützt. Bei der Behandlung der Morphologie und des Transportes eines Flusses ist somit zwischen dem *festen*, primären Flussbett und dem *beweglichen* oder dem durch das im Transport befindliche Material gebildeten sekundären Flussbett zu unterscheiden. Wenn schliesslich die morphologisch effektive Kraft geringer als die mitgeführte Last wird, so verliert sie einen Teil derselben, und es findet Akkumulation statt.

Aus dem HOPKINS'schen Gesetz folgt — wie auch GILBERT (21) hervorgehoben hat — dass ein Fluss mit einer gewissen Neigung und Geschwindigkeit nur eine bestimmte maximale Materialsorte führen oder für ein gewisses Material »kompetent« sein kann, was ja auch ein aus der Praxis wohlbekannter Satz ist; JASMUND sagt auch in seiner ausgezeichneten Darstellung des fließenden Gewässers (25): Einer bestimmten Stromkraft entspricht eine bestimmte Bodenbeschaffenheit, ein bestimmtes Geschiebekorn. Hiermit in Übereinstimmung steht auch die oft beobachtete Erscheinung, dass bei Flüssen, die in lockeren Ablagerungen erodieren, der Hochwasserstrand mit Steinen über eine gewisse Grösse übersät und gleichsam gepflastert ist, während das feinere Material durch die Erosion hinweggeführt worden ist. Diese Anreicherung schützt dann, gleich einer Uferbekleidung, die unterliegenden Schichten, so dass man sagen kann, der Fluss vereitelt seine Korrasion durch seine eigene Arbeit.

DAVIS (10) betont auch mit Schärfe, dass der ausgeglichene Zustand (»graded stage«) eines Flusses nicht mit einer gewissen, für alle Flüsse bestimmten Neigung zusammenhängt, sondern dass einer, der in feinem Material arbeitet, bei einer schwachen Neigung in der Nähe der Erosionsbasis vollbeladen wird, während einer, der in gröberem Material dahinfließt, dasselbe Stadium bei einer bedeutend grösseren Neigung erreicht.

Die Transportmechanik des Geschiebes.

Nach dieser einleitenden Übersicht wollen wir nun zu der Art des Transportes des Geschiebes oder, mit anderen Worten, zu dem äusseren morphologischen Verlauf der Transportmechanik übergehen.

Untersucht man den Boden eines sandführenden, nicht allzu schnell fließenden Flusses, so wird man finden, dass der Sand über den ganzen Boden hin in mehr oder weniger regelmässigen und parallel hintereinander liegenden Streifen

oder, wie sie in der Regel genannt werden, Kräuselungsmarken angehäuft ist. Diese in Flüssen allgemein vorkommenden Kräuselungsmarken unterscheiden sich bedeutend von den gewöhnlichen Wellenfurchen. Die letzteren, welche hauptsächlich an Meeres- und Seeufern ausgebildet sind, sind u. a. von DARWIN (8), FOREL (19), DE CANDOLLE (6) und KRÜMMEL (27) genau untersucht und studiert worden. Diese Untersuchungen und Resultate sind in einer Übersicht über die ganze Kräuselungsmarkenfrage von BERTOLLY (4) ausführlich referiert worden.

Die Wellenfurchen sind symmetrisch, mit gleichartig ausgebildeten flachen Seiten, und liegen in langen ungebrochenen Linien hintereinander, in der Regel rechtwinklig zur Wellenbewegung. Früher hat man angenommen, dass sie durch die auf der Wasseroberfläche sich fortpflanzenden Wogen entstanden und somit eine direkte Projektion dieser auf dem Boden seien. Diese Ansicht erweist sich jedoch sofort als irrig, wenn man die Wellenfurchen näher studiert und findet, dass der Abstand zwischen ihren Kämmen nur $\frac{1}{15}$ — $\frac{1}{20}$ der Wellenlänge ist. Durch DE CANDOLLE's ausführliche Experimente (6) ist konstatiert, dass solche Wellenfurchen sich bilden, »lorsqu'une matière visqueuse en contact avec une liquide moins visqueuse qu'elle même, éprouve un frottement oscillatoire ou intermittent». HELMHOLTZ hat in seiner Theorie der Kapillärwellen hervorgehoben, dass sich zwischen zwei Medien von verschiedener Dichte und Bewegungsgeschwindigkeit stets ein Wellensystem bildet. KRÜMMEL (27) ist jedoch der Ansicht, dass ein solches Wellensystem keine typischen Wellenfurchen hervorrufen könne, sondern dass hierzu eine stehende Welle erforderlich sei; wie eine solche entsteht, lässt sich jedoch noch nicht vollständig erklären.

Die Wellenfurchen.

Im Gegensatz zu den regelmässigen, symmetrischen, in stillstehendem Wasser ausgebildeten Wellenfurchen sind die in fließendem Wasser vorkommenden Stromfurchen unsymmetrisch, indem die stromabwärts liegende Leeseite kurz und steil, die andere, die Luvseite, dagegen lang und flach ist.

Die Stromfurchen.

Diese Form ist durch den äusserst wichtigen Umstand bedingt, dass die Stromfurchen sich in der Richtung des Stromes langsam vorwärtsbewegen. Dies geschieht dadurch, dass der Schutt an der Basis der Luvseite erodiert, über diese hingeführt und dann auf der Leeseite akkumuliert wird; FOREL (19) nennt auch die Luvseite »face d'érosion«, die Leeseite »face d'alluvion«. Sowohl die Form wie die Art der Fortschaffung und der Absetzung des Schuttes stimmt somit mit dem Delta überein.

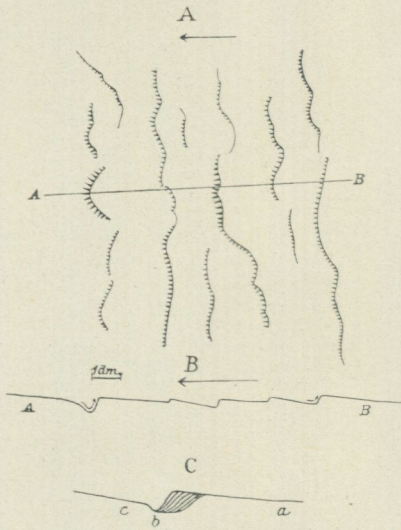


Fig. 1.

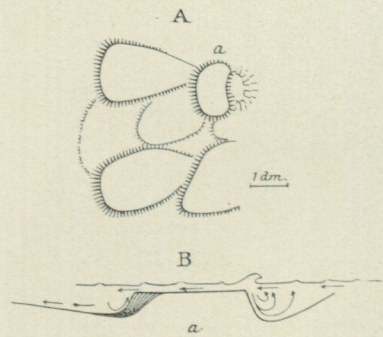


Fig. 2.

Da die von mir über die Form der fluvialen Kräuselungsmarken oder Stromfurchen gemachten Beobachtungen mit denen F. BERTOLOGY'S (4) völlig übereinstimmen, kann ich mich hier sehr kurz fassen, und nehme mit einigen Zusätzen nur das auf, was für die folgende Darstellung der Transportmechanik von besonderer Bedeutung ist.

Die Fig. 1 A gibt die Bodenkonfiguration im Indalsälff bei Ragunda an einer Stelle wieder, wo der Strom mässig war, der Boden aus homogenem, feinem Sand bestand und das Wasser so klar war, dass man alle Einzelheiten auf dem Boden bis auf 1,5 Meter Tiefe studieren konnte. Wie aus

der Figur hervorgeht, liegen die Furchen hier in gebrochenen, unregelmässigen, stromabwärts schwach konvexen Partien, welche sich jedoch in langen Reihen hintereinander mit ihrer Längsausdehnung rechtwinklig zum Strom ordnen. Die Luvseiten fallen allmählich ab und sind schwach gewölbt, gleich Schilden, die Leeseiten sind dagegen steil, etwa 2 cm hoch und oft mit einem Fall von bedeutend über 30° (Fig. 1 B), bedingt durch die schon von DARWIN (18) nachgewiesene Wirbelbildung auf der Leeseite. Diese Wirbelbildung entsteht dadurch, dass der Strom nicht längs der steilen Leeseite heruntersteigt und dem Boden folgt, sondern über dieselbe geht. Das Wasser wird dann hinter der Leeseite in Rotation versetzt. Die Wirkung dieses Wirbels gibt sich deutlich zu erkennen, indem an der Basis der Leeseite gewöhnlich eine schalenförmige Vertiefung ausgebildet ist, in welcher sich leichte Partikelchen, wie Blätter, Flöckchen u. dergl., sammeln und unter einer beständig oszillierenden oder kreisenden Bewegung liegen bleiben. Ferner haben KRÜMMEL und BERTOLLY wahrgenommen, dass Sandkörner, die nach den Rändern der Leeseite hingetrieben worden sind, nicht gleich herabfielen, sondern infolge des Gegendrucks des aufwärtsströmenden Wassers der Wirbel einen Augenblick liegen blieben.

Die allmähliche Verschiebung in der Richtung des Stromes ist infolge der verschiedenen Stärke und Angriffsmöglichkeit des Stromes indessen sehr unregelmässig; gewisse Partien bewegen sich schneller, andere langsamer; eine Linie bleibt deshalb niemals eine längere Zeit bestehen, sondern sie zerreisst, fliesst wieder zusammen u. s. w. Durch diese verschiedene Bewegungsgeschwindigkeit kann auch eine Furche eine andere, zurückgebliebene erreichen, sie bedecken und absorbieren — eine Erscheinung, die am Indalsälv oft wahrzunehmen war. Ferner kann, wie BERTOLLY nachgewiesen hat, der Strom eine solche Stärke erreichen, dass das vorherige rollende Geschiebe jetzt mehr oder weniger schwebend getragen werden kann, was die

Auflösung und das Verschwinden der Furchen zur Folge hat. — Ausser dieser Wirkung hat der Strom auch Einfluss auf die Form der Furchen. Im Indalsälff konnte man nämlich beobachten, dass die Furchen bei abnehmendem Strom regelmässiger wurden. Die getrennten Partien schlossen sich nämlich zu ungebrochenen Linien zusammen und wurden verkleinert, so dass die Leeseite nicht mehr so scharf markiert oder steil war; gleichzeitig vermehrte sich der Abstand zwischen ihren Kämmen. Bei sehr schwachem Strom gleichen sie deshalb gewöhnlichen Wellenfurchen, obschon eine äusserst langsame Verschiebung stattfindet und damit eine asymmetrische Form ausgebildet wird, indem die Leeseite im Verhältnis zu der nun beinahe horizontalen Luvseite kurz und schwach geneigt wird.

In einem kleinen Bach Arpojoki in Torne Lappmark (1), der Schutt von derselben Korngrösse wie der Indalsälff führte, aber einen sehr schnellen Lauf hatte, waren die Stromfurchen etwas anders ausgebildet. Die getrennten und nur schwach gebuchteten Partien in Fig. 1 waren hier noch schärfer geschieden, so dass die Linienordnung vollständig zerbrochen und durch kurze Platten mit vollständiger Deltaform ersetzt war (Fig. 2). Ebenso wie im Indalsälff wurde der Schutt an dem proximalen Teil der Luvseite erodiert, über dieselbe geführt, um dann über die steile, stark konvexe und 5—6 cm hohe Leeseite, die hier wohl den Namen »Halde« verdient, herabzufallen. Die Übereinstimmung mit dem gewöhnlichen Delta wurde noch grösser, als die Furchen an einzelnen Stellen in die unmittelbare Nähe der Wasseroberfläche heraufkamen, die ihre Luvseite zu einer horizontalen Fläche regelte. Diese Furchen bildeten aber durch ihre Lage ein direktes Hindernis für den Strom, welcher auch so zurückgeschlagen wurde, dass ein Wirbel entstand. Dieser wiederum grub vor dem Delta eine der vorher geschilderten vollständig gleiche Vertiefung (Fig. 2 B) aus. Der Transport der Sandkörner war darum nicht mehr so einfach und regelmässig wie vorher. Sie wurden nämlich nicht

durch einen gleichmässig dahinfließenden Strom aus ihrer stabilen Lage gebracht und direkt über die Luvseite geführt, sondern sie wurden erst emporgewirbelt und kreisten einen Augenblick frei im Wasser, um dann den steilen Rand der Luvseite zu erreichen und über ihre ebene Fläche geführt zu werden. Durch den Rückschlag des Stromes brach sich das Wasser in einer stromabwärts überfallenden Welle, so dass sich die in Bächen gewöhnliche scharf wogige Wasseroberfläche bildete. Durch den kräftigen Strom veränderte sich die Form der Furchen beständig, die eine holte die andere ein, bedeckte und absorbierte sie, die eine wurde von der Nachbarin ihres Materials beraubt, die andere bekam neuen Schutt u. s. w. Der Boden war deshalb bei der immerwährenden Vorwärtsbewegung in der Richtung des Stromes einem beständigen Wechsel unterzogen.

BERTOLOLY betont, dass die Höhe und die Form der Furchen sich mit der Korngrösse des Materials verändert. Dies muss auch der Fall sein, in Folge des oben geschilderten Einflusses, den die Stromgeschwindigkeit ausübt, denn wenn die Stromgeschwindigkeit und die Korngrösse in einem direkten Verhältnis zueinander stehen, wie HOPKINS' Gesetz es lehrt, so müssen sie auch dieselbe Einwirkung auf die morphologischen Prozesse haben. Sie sind mit anderen Worten gleichwertige Faktoren. Die Verminderung des Schuttes hat somit denselben Einfluss auf die Furchen wie eine Abnahme der Stromgeschwindigkeit; in beiden Fällen bilden sich lange, niedrige und regelmässige Furchen. Eine Zunahme der Korngrösse oder des Stromes bewirkt unregelmässige Formen, d. h. die Linienform geht in eine mehr deltaähnliche über.

BERTOLOLY hat aber, gleich den meisten anderen Autoren, die Stromfurchen zusammen mit den Wellenfurchen unter dem gemeinsamen Namen »Kräuselungsmarken« behandelt; die Furchen hat er dagegen als ein selbständiges Phänomen, als eine bestimmte abgeschlossene, speziell morphologische Erscheinung ohne engere Zusammengehörigkeit mit anderen Phänomenen und Prozessen betrachtet. BASCHIN (3) treibt diese Spezial-

sierung und Abgrenzung des Problems auf die Spitze. Er will dem Studium der Furchen und ähnlicher wellenförmigen Oberflächenformen den Namen einer besonderen Wissenschaft verleihen. Diese Absicht ist indessen vollständig unrichtig, denn man führt dadurch genetisch ganz verschiedene Erscheinungen zusammen; die Morphologie als eine kausale Wissenschaft leidet natürlich sehr durch diese künstlichen und auf äussere Eigenschaften hin klassifizierten Formen.

Die Stromfurchen als Transportkörper.

Sowohl BERTOLOLY wie andere pointieren zwar den äusserst wichtigen Umstand, dass die Furchen sich durch sukzessive Weiterschaffung ihres Schuttes von der Basis der Luvseite nach der »Halde« der Leeseite vorwärtsbewegen, sie scheinen jedoch nicht die Konsequenzen daraus gezogen zu haben, dass nämlich *die Furche die Form ist, in welcher das Geschiebe transportiert wird, und ihre Bewegung die Art, in welcher der Transport vorsichgeht*. Die Stromfurchen sind nämlich eine Erscheinung in der allgemeinen Transportmechanik, und der Unterschied zwischen ihnen und den Wellenfurchen ist bedeutend grösser als der, der in der Formverschiedenheit liegt. Sie spielen in der Morphologie vollständig verschiedene Rollen und haben eine ganz verschiedene Bedeutung. Die Wellenfurchen sind ein rein sekundäres Phänomen und tragen mit ihrer stabilen Lage nicht zur Beförderung oder Entwicklung eines Prozesses bei; die Stromfurchen dagegen sind primäre Erscheinungen, denn sie sind die *Form*, in welcher der Schutttransport vor sich geht. Deswegen sind Wellenfurchen und Stromfurchen streng von einander zu unterscheiden und nicht zusammen zu behandeln, denn sie besitzen nichts Gemeinsames, und ebensowenig dürfen sie unter dem Namen Kräuselungsmarken gehen.

Aus der vorstehenden Darstellung der Furchen geht hervor, dass eine in einem gewissen Augenblick vorhandene Furche eine abgeschlossene und abgegrenzte morphologische Bildung ist, durch welche das Geschiebe befördert wird, und die man daher als einen *Transportkörper* bezeichnen kann. Der Form und Bewegungsart nach dürfte ferner *Transport-*

delta ein passenderer Ausdruck als Stromfurche sein, denn dies Wort charakterisiert sie nach ihrer morphologischen Genesis und Funktion und ist daher wissenschaftlicher als das der Alltagssprache entnommene »Furche«. Dieser Name passt ja recht gut für die in starkem Strom vorkommenden Transportkörper, weniger dagegen für die langen, niedrigen, regelmässigen Platten, die sich bei schwachem Strom entwickeln. Die Aufstellung eines besonderen Ausdruckes für diese letzteren dürfte indessen wenig geeignet sein, da ja das Prinzip ihrer Bildung und Bewegung dasselbe wie für die anderen ist; wenn die Leeseite auch niedrig und unbedeutend ist, so *ist* sie doch ein Ablagerungsabhang oder eine Halde.

Im folgenden wird von grösseren, durch Vereinigung und Verschmelzung mehrerer primärer Transportdeltas entstandenen Transportbildungen die Rede sein; *der Name Transportkörper ist deshalb ein Kollektivbegriff für alle die beweglichen Bildungen, in welchen das Geschiebe in einem fliessenden Wasser weiterbefördert wird.* — Es ist hier noch einmal auf den schon vorher erwähnten Umstand aufmerksam zu machen, dass ein in einem gewissen Augenblick entwickeltes Transportdelta seine Form und sein Volumen nicht während der Vorwärtsverschiebung beibehält, sondern dass dasselbe beständige Veränderungen erleidet, indem es von seinen Nachbarn bald Material erhält, bald des Materiales beraubt wird, somit also bald zu-, bald abnimmt, ja sogar vollständig aufgelöst wird, um sich wieder von neuem zu bilden u. s. w. *Das Transportdelta ist somit nur die Form, in welcher der Transport vor sich geht.*

Das erste Entstehen des Transportdeltas ist noch nicht vollkommen aufgeklärt. Im folgenden werde ich näher darlegen, dass eine grosse Geschiebemasse, aus wie homogenem Material sie auch besteht, nicht kontinuierlich und beständig vorwärtsgeführt werden *kann*, sondern dass stets Stockungen und Unregelmässigkeiten entstehen müssen. —

Sobald aber eine Ungleichmässigkeit auf der Oberfläche entsteht, nimmt sie zu und bildet ein Transportdelta, das wieder andere ins Leben ruft, bis sich zuletzt ein ganzes System entwickelt. BERTOLOLY (4) betont, dass, wenn der Schutt nur ganz unbedeutend verschiedenartige Korngrössen enthält, die grösseren Körner sofort einen »Ansatzkern« für ganz minimale Sandablagerungen bilden, die bald stromabwärts wandern und schliesslich zusammenwachsen. Eine unerlässliche Bedingung ist, dass die Unebenheit, welche den Ansatzkern bildet, sehr klein ist, denn sonst entsteht ein Hindernis mit darauf folgender Wirbelbildung auf der Vorderseite und Ablagerung in stillem Wasser auf der Rückseite. DARWIN (8) erzeugte ferner typische Transportdeltas durch Anbringung äusserst unbedeutender Sandanhäufungen an einer Stelle auf einer ebenen Sandfläche, über welche er einen gleichmässigen Strom gleiten liess; aus der kleinen lokalen Ungleichmässigkeit bildete sich dann sukzessiv ein ganzes System von »Furchen«. Wahrscheinlich ist indessen eine solche primäre Ungleichmässigkeit oder ein solches Hindernis gar nicht notwendig, sondern das Transportdelta bildet sich auch auf einer ungestörten, ganz ebenen und homogenen Oberfläche durch die Pulsation des Flussstromes.

In diesem Zusammenhang ist ferner auf die Ähnlichkeit zwischen den fluvialen Transportdeltas und den äolischen Kräuselungsmarken aufmerksam zu machen. Eine vollständige Übereinstimmung kann natürlich infolge der grossen Verschiedenheit der Transportmittel — der Luft und des Wassers — nicht herrschen. Von besonderem Interesse für die spätere Darstellung ist indessen die Analogie zwischen den grösseren Transportkörpern (den Sandbänken) und den Dünen; wie die letzteren auf ihrer Oberfläche äolische Kräuselungsmarken und auch in ihrem Inneren Spuren solcher tragen (36) und somit die Summe einer Masse von Furchen bilden, so werden die Sandbänke durch einen Haufen Transportdeltas aufgebaut und bilden aus diesen Elementen eine grössere Einheit (s. weiter S. 26 u. 33 u. folg.).

Als Zusammenfassung des oben Angeführten kann man sagen, dass das Geschiebe nicht gleichmässig, kontinuierlich, über eine längere Strecke geführt wird, sondern dass es einer beständig wiederholten Erosion, Bewegung und Akkumulation ausgesetzt ist, oder mit anderen Worten, dass es einer ununterbrochenen Umlagerung im Transportkörper, und zwar zunächst im Transportdelta, unterliegt. Die Entstehung dieser Bildungen beruht in erster Linie darauf, dass eine grosse Materialmasse nicht gleichmässig, kontinuierlich, vorwärtsgeführt werden kann, sondern dass stets eine ungleichförmige Bewegung mit darauf folgenden unregelmässigen Anhäufungen auf der Oberfläche stattfindet, welche sich dann allmählich zu Systemen von Transportdeltas entwickeln. Die Bildung der ersten Ansatzkerne, zu den Transportdeltas, findet doch leichter statt, wenn das Material etwas inhomogen ist. Bei vollständig gleichartigem Material treten aber, auch kleine Anhäufungen ein, weil der Strom nicht ganz gleichmässig fliesst, sondern pulsiert. Die Form der Transportdeltas wird durch die Stromgeschwindigkeit des Wassers bestimmt, indem sich bei schwachem Strom zusammenhängende, weit von einander liegende, niedrige Linien bilden, die sich bei Zunahme des Stromes in verschiedene Partien brechen, welche sich ausbuchten und sich dann immermehr zu dichtliegenden, kurzen Platten von vollständiger Deltaform individualisieren.

Infolge dieses beständigen Wechsels von Erosion, Bewegung und Akkumulation ist die Energie und die Geschwindigkeit des Stromes eine beständig wechselnde.

Die Strom-
energie und
die Transport-
körper.

Die Erosion, die hauptsächlich an der Basis der Stützseite des Deltas stattfindet (Fig. 1 C, Punkt a), erfordert nämlich, wie vorher erwähnt, am meisten Kraft. Dadurch, dass das Material dann längs dem Boden rollt, stürzt es an der Deltahalde herab und entzieht sich somit plötzlich dem Strome, der sich nicht jäh abwärtsbeugt und dem Boden folgt, sondern über diesen vorbeifliesst. Der Schutt bleibt somit hinter dem Abladungsabhang liegen (in Fig. 1 C

beim Punkt b), und der seiner ganzen Bürde beraubte Strom erhält somit seine Energie entbunden. Diese kommt zur Anwendung, wenn der Strom den Boden an der Basis des dichtdavorliegenden Deltas erreicht (in Fig. 1 C bei Punkt c) und da wieder einer Erosion mächtig ist.

Was die Grösse des Transportdeltas betrifft, so habe ich schon vorher darauf aufmerksam gemacht, dass sie mit zu- und abnehmender Strom- und Korngrösse wechselt, und dass sie während der Bewegung des Transportdeltas beständig Veränderungen erleidet. Ebenso habe ich darauf hingewiesen, dass mehrere Transportdeltas verschmelzen und grössere Einheiten bilden können. Der Name *Transportdelta* darf jedoch nur den Transportkörpern zuerteilt werden, die sich dadurch vorwärtsbewegen, dass der Schutt in einzelnen Körnern direkt vom Erosionsplatz an der Basis der Luvseite nach dem Abladungsabhang der Leeseite geführt wird. Zufolge dieser Forderung übersteigen die Transportdeltas nicht eine gewisse durch Strom und Material bestimmte Grösse, denn über diese hinaus vermag das Material nicht kontinuierlich vorwärtsgeschafft zu werden, sondern es entstehen Stockungen und Ungleichmässigkeiten, die zur Entstehung neuer Transportkörper führen, welche somit als Elemente eine grössere Bildung zusammensetzen und aufbauen.

Diese letztere stimmt ihrer Form und Bewegungsart nach mit dem Transportdelta überein, sie besitzt aber unter ihrer aus Transportdeltas zusammengesetzten Flächenzone einen verhältnismässig festen Kern. Dieser Kern ist zwar einer schwachen Bewegung unterworfen, indem er teils dem Druck und der Friktion der beweglichen Oberflächenschicht ausgesetzt, teils mit Wasser imprägniert ist, das von der allgemeinen Strombewegung beeinflusst ist. Die Verschiebung der ganzen inneren Masse der grossen Transportkörper dürfte jedoch, trotz PESTALOZZIE'S Angabe von einem 3 m mächtigen »Geröllstrom« (33, S. 284), für den Transport von untergeordneterer Bedeutung sein als die relativ schnell

vorwärtsgeschaffte Oberflächenschicht der Transportdeltas. Die unter *aktuellem Transport* stehende Materialmasse muss deshalb nur durch das Höhenmass der Abladungsabhänge der Transportdeltas bestimmt werden; die *ganze Masse, die ein Fluss transportiert*, wird dagegen durch die »Pfüle« der grossen Einheiten, d. h. der Bänke, gemessen (s. weiter S. 37).

In dem Vorhergehenden habe ich nur Beobachtungen über die Transportdeltas in zwei Gebieten mit ungefähr gleichartigem Material berichtet. Die hier vorkommenden Er-

Weitere Be-
weise für die
Transport-
mechanik
durch Trans-
portkörper.

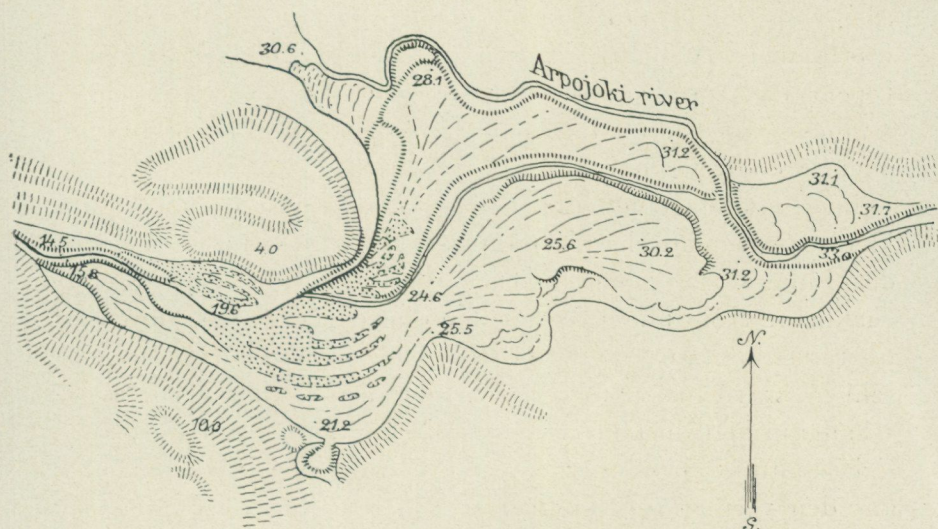


Fig 3. Das Überschwemmungsgebiet des Arpojaure—Sus.
Massstab 1 : 10.000.

scheinungen waren jedoch derart, dass man vermuten konnte, dass sie generell seien, oder dass das Geschiebe immer in Form von Transportdeltas fortgeschafft würde, und dass damit das Deltaprinzip in der Transportmechanik allgemein herrsche. Beispiele, die dies stützen, bilden u. a. das Überschwemmungsgebiet des 1905 plötzlich entwässerten kleinen Sees Arpojaure (1) in Torne Lappmark. Der mit gewaltiger Geschwindigkeit dahinstürzende Entwässerungsstrom führte

nämlich Material bis zu einer Grösse von 1—1,5 m mit sich, das sich an einem flachen Moor dicht unterhalb des Sees absetzte. Weil der Widerstand hier sehr gross war, wurde das Material ganz plötzlich gehemmt, so dass das ganze Gebiet jetzt in seiner exponierten Lage und seiner vollständigen Sterilität einer plötzlich erstarrten, im Transport stehengebliebenen Materialmasse gleicht (Fig. 3). Sowohl im ganzen wie im kleinsten Detail macht sich hier die Deltaform geltend. Die grossen Steine blieben natürlich zuerst liegen und bilden nun gewaltige Anhäufungen schräg voreinander, die sich nach unten hin in lange, fingerförmige Ausläufer aufgelöst haben (auf der Karte durch Punkte bezeichnet). Das feinere Material (Kies und Sand) breitet sich vor den Blockdeltas als grössere oder kleinere Flächern aus, die zusammengesetzt und in kleine, aber gut markierte Platten oder Deltas aufgeteilt sind.

Im Ragundagebiet (2) bot sich ferner Gelegenheit, ein kleines subaquatisches Delta, das der Haläfluss in einer Bucht des Indalsälf aufgebaut hat, und das in seiner Bildungsmechanik und Morphologie mit den obendargestellten Ansichten übereinstimmt, in allen Einzelheiten zu studieren. Alles Geschiebe wurde hier in Form von Transportdeltas vorwärts geschafft; in keinem Falle wurde beobachtet, dass die Sandkörner sich kontinuierlich über eine längere Strecke bewegten oder aus den verhältnismässig langsam vorschiebenden Transportdeltas ausbrachen. In der Hauptfurche, wo die Stromgeschwindigkeit sich auf 0,8 m in der Sekunde belief, wurden die Leeseiten der Deltas ca. 3,5 cm in der Minute vorwärts geschafft. — Im allgemeinen erreichten die Transportkörper den Abhang des Deltas und gingen in dasselbe über, mehrere wurden aber aus der tiefen Hauptfurche herausgeführt und kamen in seichtes Wasser und in unmittelbare Nähe der Wasseroberfläche hinauf, wo der Strom zu schwach war, um sie weiterbefördern zu können; sie blieben also stehen und wurden »akkumuliert«. Der Strom wurde dadurch hier gehindert und musste von der Bahn, die er einmal gehabt,

abbiegen und sich einen neuen Weg suchen, während die langsam über das sinkende Wasser emporsteigende Deltafläche aus einer Anzahl verschiedener Platten oder Deltaelemente zusammengesetzt war. — Wäre nun das Wasser stattdessen gestiegen, so hätten die festgebliebenen oder »akkumulierten« Transportdeltas wieder in Bewegung gesetzt werden können, oder sie wären von einer nachfolgenden Furche begraben worden. Steigt somit das Wasser allmählich, oder wird der eine Transportkörper aus irgendeinem Grunde von einem anderen bedeckt und begraben, so bildet sich die bekannte Stromlagerung, oder »current beddig«. Diese allgemein vorkommende Schichtenstruktur ist also ein noch weiterer Beweis für das generelle Walten des Deltaprinzips in der Transportmechanik des Geschiebes.

Das Hindernis, welches das festgebliebene und akkumulierte Transportdelta auf den Strom ausübt, lässt sich in Gebieten, wo ein Bach sich in kleinere Rinnsale verzweigt, die sich über ein ebenes und aus lockerem, leicht erodiertem Schutt bestehendes Gebiet (in der Regel eine über dem Wasser liegende Partie des Deltas) hinschlängeln, leichter als bei dem Halâfluss beobachten. Hier wird man nämlich finden, dass der Giessbach beständig seinen Lauf verändert und seine alten Betten aufgibt, um daneben neue zu erodieren, weil sein mitgeführtes Material — entweder als besondere Transportdeltas oder auch als grössere Bänke — die Stromfurche zustopft und das Wasser zwingt, einen anderen Weg zu nehmen, um vorwärts zu kommen. CREDNER (7) sagt auch von dem Fluss im Delta, »die Zahl der Mündungen, ihre Tiefe, Lage und Richtung schwankt unablässig«. Dieses Hindernis, das ein Strom durch seinen Materialtransport sich selbst aufbaut, ist ein äusserst allgemeines Phänomen und hat sowohl für die Entwicklung der Bodenkonfiguration wie des ganzen Flusslaufes und der Deltabildung eine grosse Bedeutung (s. weiter S. 62).

* * *

Die Entstehung der Bodenkonfiguration des festen Flusses.

Von grossem Wert für die Kenntnis der Transportmechanik des Geschiebes sind ENGELS' (15) Experimente über den Materialtransport und die Sedimentation in geraden, festen Flussläufen. Diese haben indessen nicht allein für korrigierte, sondern auch für freie Flüsse Interesse. ENGELS liess einen mit Sand gespeisten Wasserstrom durch eine flache und ganz gerade, zementierte Rinne hindurchlaufen, wobei das Material sich zuerst in kleine Anhäufungen schräg voneinander ordnete. Auf der Oberfläche der Lappen bildete der Sand ein regelmässiges System von rhombischen kleinen Platten, welche Lagerungsart nach ENGELS darauf beruhte, dass »das fliessende Wasser das Gleichgewichtsgefälle herzustellen sucht durch eine solche Umformung, dass ihm möglichst viel Angriffsflächen bei gleichzeitig grossem Widerstand geboten werden«. Diese Erklärung erscheint indessen ein wenig theoretisch erkünstelt und lässt eine hinreichende Motivierung vermissen; was ferner die regelmässige Fischschuppenstruktur betrifft, so scheint sie hauptsächlich Laboratoriumsexperimenten anzugehören und keine allgemein herrschende Erscheinung bei der Ablagerung des Sandes in fliessendem Wasser zu sein. — Die Darstellung der späteren Entwicklung und Differenzierung der kleinen Anhäufungen in Bänke dürfte indessen prinzipiell richtig und sehr wichtig sein, denn es kann, wie ENGELS sagt, eine regelmässige Oberflächenstruktur sich keine längere Zeit erhalten, sondern es entsteht an einer Stelle bald eine grössere Materialanhäufung, die immermehr wächst und seitwärts verschoben wird, bis sie die feste Seitenwand erreicht. Dort bleibt sie liegen und wird allmählich zu einer grossen Bank aufgebaut.

Die Ursache der ersten Anlegung der Bank ist also dieselbe wie bei den Transportdeltas, nämlich das Entstehen einer grösseren Materialanhäufung an einer Stelle, die nachher als ein Akkumulationszentrum dient. Ein solches bildet sich nur, wenn reichlich Material vorhanden ist, denn ein einzelnes Partikelchen oder eine nur unbedeutende Mate-

rialquantität kann kontinuierlich vorwärtsgetrieben werden. In der Natur kann man auch sehen, wie, in Übereinstimmung hiermit, Sandkörner in Bächen, deren Boden ausgewaschen worden ist und nur aus unbeweglichen Steinen über eine gewisse Korngrösse besteht, lange Strecken zwischen diesen hindurchrollen und erst in stillem Wasser zur Absetzung kommen. Sobald der Sand dagegen an Quantität zunimmt, bilden sich unmittelbar Transportdeltas, die in gekrümmtem Lauf zwischen den Ungleichmässigkeiten dahinschiessen.

In dem obenerwähnten Arpojokibach war dies mit grosser Deutlichkeit zu beobachten. Der Bach floss nämlich erst über Moränenboden, wo alles feine Material wegerodiert, und der Boden gleichsam mit mittelgrossen Steinen gepflastert war; die kleine hier vorkommende Sandquantität wurde kontinuierlich einen langen Weg entlang geführt. An einer Stelle berührte das Wasser aber einen Sandrücken, der die Sandlast sehr vermehrte, was zur Folge hatte, dass sofort Transportdeltas entstanden, obschon sowohl die Form des Bodens wie die Stromgeschwindigkeit dieselbe war. *Die Vorwärtsschaffung des Geschiebes mittels Transportkörper setzt somit eine gewisse minimale Materialquantität voraus.* Dieser Satz findet seine Erklärung darin, dass die Partikelchen bei grosser Menge einander hindern, einander in den Weg kommen, und eine verschiedene Geschwindigkeit besitzen, so dass Stagnation und Anhäufung eintreten muss. Es ist nämlich nicht denkbar, dass ein Strom an jeder Partie der Materialmasse gleich gute Angriffspunkte finden und somit auf alle Partikeln dieselbe Kraft ausüben und sie alle gleichmässig in geschlossener Masse vorwärtschieben könnte.

Die Ursache der ersten kleinen Materialanhäufung, d. h. der Anlage eines ersten Akkumulationszentrums, liegt somit in dem Mangel an Kontinuität bei der Fortschaffung einer Materialmasse, oder mit anderen Worten in der eigenen Quantität des Materials. Oben ist gezeigt worden, wie auch

jede kleine Ungleichmässigkeit in der Korngrösse des Materials sowie die Pulsation des Wassers die Entstehung primärer Ungleichmässigkeiten oder Akkumulationszentren befördert. Auch ist bereits auf die Rolle hingewiesen worden, welche die stehengebliebenen oder akkumulierten Transportkörper auf den Strom ausüben, indem sie ihn hindern und ihn zwingen, von der einmal eingeschlagenen Bahn abzubiegen.

Aber nicht allein die akkumulierten Transportkörper verursachen Hindernisse, sondern jede kleine Ungleichmässigkeit im Boden lenkt natürlich in gewissem Masse den Strom ab; je grösser die Unregelmässigkeiten sind, umso grössere Hindernisse üben sie aus, und umso mehr wird der Strom gezwungen, von seinem geraden Lauf abzubiegen und seitwärts von dem Hindernis seinen Weg zu nehmen. Dies kommt bei ENGELS' Experimenten klar zum Vorschein, denn hier bildete sich bald eine grosse Bank an der einen Seite, die den Strom zwang abzubiegen und seitwärts zu gehen. Schräg vor ihr wurde das mitgeführte Material dann zu einer neuen Bank angehäuft, die seinerseits den Strom ablenkte u. s. w. Da die Bänke infolge der festen Ufer nicht seitwärts ausbiegen oder sich ausbreiten konnten, nahmen sie infolge der Hindernisse, welche sie dem Strom darboten, und dessen Forderung nach freier Passage zwischen den verschiedenen Anhäufungen, nach und nach eine regelmässige Zickzacklage ein.

Die aus Bänken zusammengesetzte regelmässige Bodenkonfiguration, die ENGELS schon nach einem dreistündigen Strom erhielt, und die in hohem Grade mit den in geregelten, festen Flussläufen vorkommenden übereinstimmte, wurde also durch die eigene Transportfähigkeit des Stromes beinahe notwendigerweise als die einzige mögliche Bodensole ausgebildet. Diese festen Flussläufe mit gleichmässig laufenden, befestigten Ufern, die durch Korrektion reifer, in der Regel serpentinisierender und mäandernder Flüsse erhalten werden, sind im allgemeinen nicht Gegenstand einer grösseren

Aufmerksamkeit seitens der Geographen oder Geologen gewesen, desto mehr sind sie aber von den Ingenieuren beachtet worden, die auch ein so grosses Material von Tatsachen in Form von direkten Messungen, Berechnungen und Kartierungen herbeigeschafft haben, dass man über diese Flüsse eine genauere und gründlichere Kenntnis besitzt als über die freien. Nun kann man zwar sagen, dass ein korrigierter und von Menschen mehr oder weniger aus seiner natürlichen Form umgebildeter Fluss in erster Linie wirklich in die Interessenssphäre der Ingenieurwissenschaft fällt; hierbei ist indessen zu beachten, dass die Erscheinungen in diesen festen Flüssen relativ so einfach und wohlbekannt sind, dass es vorteilhafter ist, erst Kenntnis über sie zu suchen, um dann zu den analogen, aber bedeutend verwickelteren Problemen überzugehen, die wir bei den freien Flüssen antreffen. Infolgedessen werde ich hier zuerst eine Übersicht über die Bodenkonfiguration und die Transportmechanik in einem korrigierten, festen Flusse geben. Ausser der Bedeutung, die dies für das Verständnis des fluvialen Zyklus hat, ist es hier von Wert als Stütze und fernere Exemplifizierung meiner vorher gegebenen Darstellung von dem allgemeinen Transporte des Geschiebes.

Die Form und Laufentwicklung der korrigierten, »festen« Flüsse.

Ein fester oder gebundener Flusslauf kennzeichnet sich dadurch, dass sein loser Schutt in Bänken bald am rechten, bald am linken Ufer angehäuft liegt (Fig. 4 A). Da ferner einer jeden Bank in einer Quersektion bei reifer Entwicklung eine Depression oder ein Kolk an dem jenseitigen Ufer entspricht, so erhält der Strom einen geschlängelten Serpentinlauf, während er gleichzeitig bald in die Kolke versinkt und bald über die mehr oder weniger quergestellten und hohen Übergänge emporsteigt (Fig. 4 C). *Dieser Serpentinlauf des Stromes, dem in den festen parallelen Linien der*

Allgemeine
Charakteri-
stik.

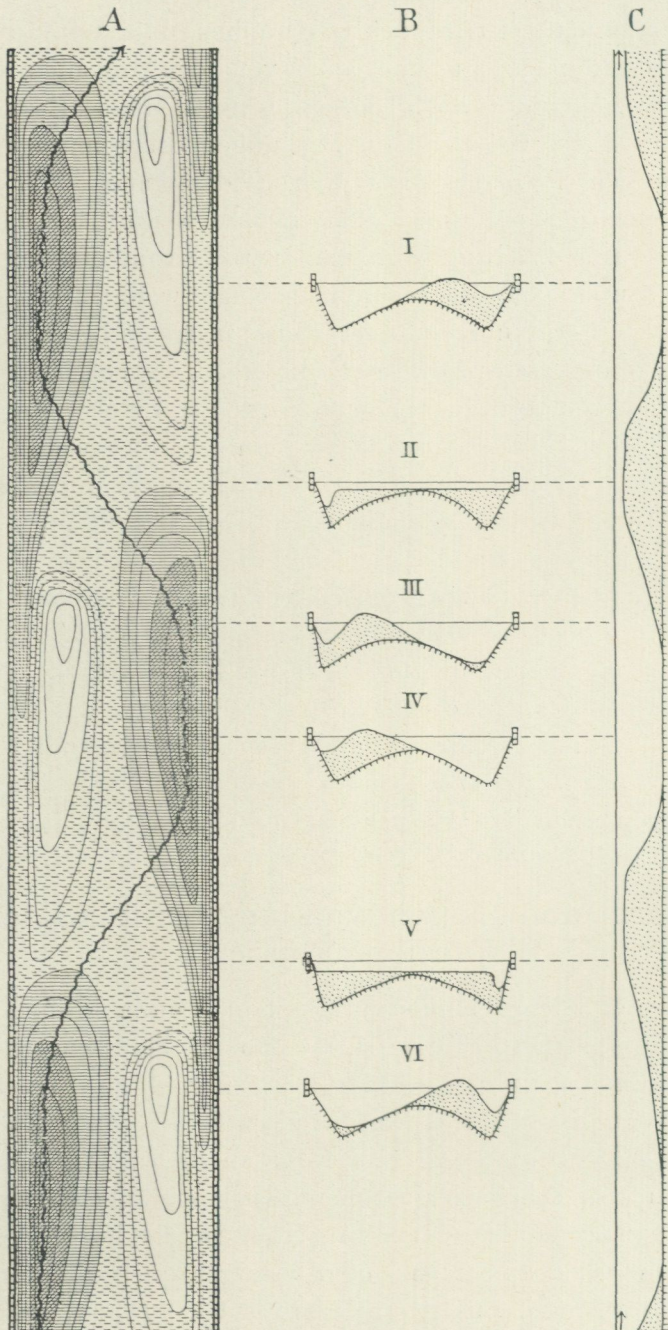


Fig. 4.

- A. Reliefplan des Strombettes eines festen Flusses.
 B. Querprofile.
 C. Längsschnitte des Talweges.

Ufer nichts entspricht, herrscht sowohl auf geraden wie auf gekrümmten Strecken. In der schematischen Fig. 4, die mit dem Oberrhein bei Strassburg übereinstimmt (nach 25, Abb. 137), sind die Verhältnisse ja äusserst regelmässig und einfach. Die Bänke liegen in gleichmässigen Abständen schräg vor einander, die eine links und die andere rechts vom Fahrweg. Sie befinden sich indessen nicht dicht am Ufer, sondern sind von demselben durch eine kleine und seichte Rinne, die Nebenrinne, welche das Querprofil doppelt macht (Fig 4 B), getrennt.

Eine so äusserst regelmässige Konfiguration, wie in Fig. 4, kommt natürlich nur in Ausnahmefällen vor. In der Regel sind die Verhältnisse bedeutend verwickelter, indem Bänke und Kolke nicht gerade vor einander, sondern verschoben und in einer komplizierten und zusammengesetzteren Form ausgebildet liegen. Der Übergang von der einen Bank zur anderen in Fig. 4 heisst ein »guter Pass«, weil er der Schifffahrt das geringste Hindernis darbietet; er ist nämlich niedrig und erleidet bei Hoch- und Niedrigwasser nur eine unbedeutende Veränderung (25). Rücken die Kolke dagegen näher aneinander, und ragt der eine über den anderen hinaus, so macht der Strom eine quere Biegung über den jetzt schräg gestellten langen Pass, der wegen seiner grossen Höhe ein »schlechter Pass« genannt wird. Im Gegensatz zu dem einfachen Profil der guten Pässe sind diese schlechten doppelt mit einer Depression beiderseits von der hohen Übergangsbank. JASMUND stellt ausser diesen beiden noch eine dritte Hauptform, nämlich die »plateauförmige«, auf, die sich dadurch kennzeichnet, dass sie nicht aus einer markierten Bank oder einem Wall mit »ausgesprochener Krone und Kuppe, sondern aus einer fast ebenen Fläche, welche von einem Ufer bis zum anderen reicht«, besteht (25, S. 180). Stromaufwärts ist diese Fläche allmählich abfallend, stromabwärts dagegen jäh; sie gleicht damit einem Delta, mit welchem sie auch ihrer Bildungsursache nach übereinstimmt. JASMUND hebt nämlich hervor, dass

in dem Bottnischen Meerbusen (zwischen A und B in Fig. 5). Vor 1867 war dieser Hauptarm unregelmässig, mit Inseln und kleineren Seitenzweigen, er wurde aber durch Ausbaggerung und Befestigung des linken Ufers so korrigiert, dass er seinen jetzigen geraden und gleich breiten Lauf erhielt. Wie aus der Karte hervorgeht, schlängelt sich jetzt der Strom, wie in allen geregelten Flussläufen, zwischen Bänken, aber nicht in einer einfachen, aus einheitlichen, durch Pässe getrennten Kolken bestehenden Bahn, sondern vielmehr in einer Rinne, die in eine ganze Reihe von kleinen Tiefzentren zerteilt ist. Die grössten und tiefsten liegen unmittelbar am Ufer, die seichtesten und kleinsten mitten im Fluss und bilden also hier einen Pass. Eine mitwirkende Ursache zu dieser zusammengesetzten Form kann möglicherweise die sein, dass der Fluss am Ufer erodieren kann und somit einen Bogen gebildet hat, so dass der Fahrweg eine grössere Länge erhalten hat, wie sie ihm eigentlich zukommt, wenn das Ufer fest ist. Dies hat wieder zur Folge gehabt, dass der schwache Strom nicht Kraft genug besessen hat, eine ganze zusammenhängende Tiefdepression auszuero dieren. Zu beachten ist ferner, dass die Karte eine vereinfachte Kopie eines Originals ist (das die »Indalsälvens Flottningsbolag« in Sundsvall gütigst zu meiner Verfügung gestellt hat), das, in dem Massstab 1 : 2 000 gezeichnet, eine Kurvenäquidistanz von nur 4 dm hat. Da ausserdem eine ungeheuer grosse Anzahl Lotungen ausgeführt worden ist, ist jede kleine Ungleichmässigkeit zum Vorschein gekommen, was vielleicht bei anderen Karten mit grösserer Äquidistanz nicht der Fall ist.

Nach dieser Übersicht über die allgemeine Bodenkonfiguration und damit auch über die *Lage* der Kolke und Bänke wollen wir auf die *Form* und *Entwicklung* der letzteren etwas näher eingehen.

Die Form und
Funktion der
Strombänke.

Schon aus der vorhergehenden Darstellung des Verschmelzens der Transportdeltas zu grösseren Einheiten kann man erwarten, dass die in festen Flussläufen vorkommenden Bänke

in Form und Bewegungsart mit den Transportdeltas übereinstimmen. Alle Beobachtungen und Tatsachen bestätigen auch, dass dies der Fall ist. Die Form ist, wie in Fig. 4, ausgezogen spindelförmig oder breit dreieckig und schildförmig, mit langer, gewölbter Luvseite und kurzer, steiler Leeseite. Ferner bewegen sich die Bänke langsam vorwärts infolge der Erosion des Schuttes an der Basis der Luvseite, des Transports über diese und der Ablagerung an der Leeseite. Weil aber die Luvseite oft sehr lang ist, kann das Material nicht kontinuierlich, Partikel auf Partikel, über die ganze Strecke geschafft werden, sondern der Transport geschieht hier stoss- oder etappenweise mittels Transportdeltas, weshalb man auch sagen kann, dass die Bänke die Summe einer grossen Menge Transportdeltas sind und eine grössere Einheit dieser darstellen. Hierdurch exemplifizieren die Bänke auch als Transportkörper das allgemeine Deltaprinzip in der Transportmechanik.

In Bezug auf die Bänke hat man jedoch das Recht, von einer Einheit zu sprechen, weil sie mehr oder weniger isoliert sind und nicht in unmittelbarer Berührung mit anderen stehen. Wenn sie auch bei Hochwasser dadurch Veränderungen erleiden, dass ihnen Schutt zugeführt oder abgenommen wird, so behalten sie doch auf ihrer Wanderung stromabwärts eine mehr oder weniger bestimmte Grösse. Die Bank ist also mehr als nur die Form, unter welcher der Transport vor sich geht, *sie ist die geschlossene Bildung, in welcher das Geschiebe in einem festen Flusslauf vorwärtstransportiert wird.* Infolgedessen ist somit nicht der Talweg selbst der Weg, auf welchem das Geschiebe vorwärtsbewegt wird, sondern er ist hauptsächlich die Rinne oder der Ablaufweg für das Wasser und den Sinkstoff, während das Geschiebe nebenan in den Bänken stromabwärts wandert.

Dass der Schutt der Bänke wirklich in Form von Transportdeltas vorwärtsbefördert wird, hat nicht während der aktuellen Bewegung direkt beobachtet werden können; es dürfte dies aber ganz zweifellos sein, teils im Hinblick auf

das, was wir von dem Transport des Schuttes im allgemeinen wissen, wonach eine kontinuierliche, einheitliche Bewegung einer grossen Materialmasse unmöglich ist, und teils zufolge der Beobachtungen an Bänken und ihnen verwandten Bildungen, die über das Wasser getreten und festgelegt sind und somit die Gelegenheit zu einem direkten, eingehenden Studium gewährt haben.

Im Ragundagebiet baut der Indalsälf bei Hochwasser verschiedene Bänke auf, die ihrer Lage nach nicht vollständig den typischen Transportbänken entsprechen, sondern auf einer grossen, hinauspringenden Landzunge liegen, wo der Strom eine grosse Krümmung macht; ihrer Form und Bildungsweise nach sind sie dagegen vollständig äquivalent. Beim Niedrigwasser zieht sich das Wasser von der Landzunge fort und lokalisiert sich in seiner tiefen Rinne, so dass die Bänke trocken liegen und gut studiert werden können. Es zeigt sich dann, dass die aus Sand bestehende Oberfläche alle die vorher geschilderten Formen der Transportdeltas besitzt.

Im allgemeinen erreichen die Transportdeltas die Leeseite der Bänke und gehen in diese über; ein Teil wird dagegen zu grösseren Bildungen zusammengeführt, die gleich Auswüchsen von der Seite hinausragen oder auf der Oberfläche liegen bleiben. Solche Auswüchse von ovaler oder schildförmiger Grundform werden oft in der Litteratur erwähnt, wo sie mit Krebscheren verglichen werden, und kommen auch auf genauen Karten vor. Auf dem ausgezeichneten Grundriss über den korrigierten Rhein unterhalb Strassburg (5, Taf. VI), wo die Bänke mit dm-Kurven gezeichnet sind, sieht man deutlich, wie ihre Oberfläche aus kleineren Deltaplatten zusammengesetzt ist, welche sich an einander vorbeischieben, während gleichzeitig ihre Leeseite nicht gerade und einfach, sondern aus mehr oder weniger langen Ausläufern zusammengesetzt ist.

Was die Lage und die Form der Bänke betrifft, so ist zunächst zu bemerken, dass, wenn der Strom regelmässig ist, und wenn keine äusseren störenden Faktoren mit hinein-

Die Bewegung der Strombänke.

spielen, die Bänke unter Beibehaltung ihres Platzes auf der einen oder anderen Seite langsam stromabwärts wandern. GREBENAU (20) sagt auch, dass die Bänke sich immer auf derselben Seite des Talwegs befinden, »ohne jemals denselben zu kreuzen«. Infolgedessen verschiebt sich der gekrümmte Lauf stromabwärts auf die Weise, dass rechte Bank immer rechte Bank und linker Kolk immer linker Kolk verbleibt; ein Wechsel geschieht nicht, sondern *das ganze Bogensystem bewegt sich als ein geschlossenes System vorwärts*. Dieser stets bewegliche Serpentinlauf des Stromes, dem in den gleichlaufenden festen Linien des Ufers nichts entspricht, stimmt somit in seiner Form mit dem Serpentinlauf des freien Flusses mit seinen konkaven und konvexen Bogen der Ufer überein.

Aus dem Obengesagten folgt, dass ein Querprofil durch den Fluss während der Vorwärtsbewegung des Stromserpentinlaufes immer zwischen zwei Grenzen schwankt, indem die grösste Tiefe bald auf der rechten und bald auf der linken Seite eines festen Kerns liegt (Fig. 4 B). Wenn man die Zeit, die eine Bank braucht, um sich um eine Bogenlänge, d. h. zu dem Platz, auf welchem die nächst davorliegende Bank auf derselben Seite in einem gewissen Augenblick sich befindet, fortzubewegen, eine *Bogenperiode* nennt, so liegt offenbar eine halbe solche Periode zwischen den Profilen I und IV, II und V, III und VI in Fig. 4 B. Die Höhe des Kerns hängt von den Übergängen ab, die sich längs einer mehr oder weniger geraden Linie mitten im Strome fortbewegen.

Was die Bewegungsgeschwindigkeit der Bänke betrifft, so hängt auch sie, wie die der Transportdeltas, von der Stromstärke und dem Wasservolumen ab. Nach einer von JASMUND veröffentlichten Karte über den Oberrhein bei Maxau (25, Abb. 98) ist die Bogenperiode hier 3—4 Jahre und die Bogenlänge 1,500—1,600 m, was somit eine jährliche Geschwindigkeit von 500—400 m ergibt. Bei Strassburg ist die Geschwindigkeit (25, S. 350) 500 m, bei Rheinau rund 700 m pro Jahr. VAN HOOFF (23) gibt für den regulierten Mer-

wede in Holland 300 m pro Jahr und 2,500—3,000 Meter Bogenlänge an, und PENCK (32) für die regulierte Donau bei Wien 100—140 m pro Jahr (700—1,000 m pro 7 Jahre). PARTIOT bringt in seiner Abhandlung über den losen Schutt der Loire (31) wichtige Angaben über die Geschwindigkeit, mit welcher die Bänke (les grèves mobiles) sich in der trocknen und wasserarmen Saison 1858—59 bewegten. Bei Loiret bewegten sich die Bänke während der Niedrigwasserperiode (Juni—November) 3,61 m pro Tag und bei Hochwasser (Nov. 1858—Mai 1859) 18,65 m pro Tag; bei Loire-et-Cher betragen die betreffenden Ziffern 1,72 und 8,43, sowie bei Indre-et-Loire 1,72 und 8,61; in dem starken Überschwemmungsjahre 1856 stieg die Geschwindigkeit bei Loiret auf 70—80 m pro Tag, eine Zahl, die exceptionell hoch sein dürfte. Die obenstehenden Angaben zeigen den ungeheuer grossen Einfluss, den die Geschwindigkeit und das Volumen des Flusses auf den Materialtransport haben, was ja auch mit dem obenerwähnten Verhältnis übereinstimmt, dass die Wirkungen im Verhältnis zur Kraft nicht in arithmetischer, sondern in geometrischer Progression steigen.

Gleichzeitig mit dieser Verschiedenheit der Bewegungsgeschwindigkeit bei Hochwasser und bei Niedrigwasser ändert sich auch die Form und Lage der Bänke. Zunächst ist zu beachten, dass das Hochwasser infolge seiner ungeheuer überlegenen Kraft in der Hauptsache die Bodenfiguration bestimmt, welche das Niedrigwasser nur in einem untergeordneten Grade zu verändern vermag (25, S. 181). Bei Hochwasser werden die Bänke bis zur Wasseroberfläche aufgebaut, um dann bei Niedrigwasser teilweise über dem Wasser zu liegen und dadurch von einem weiteren Transport verschont zu bleiben. Man kann aber nicht sagen, dass alle Bewegung aufhört, denn in der Wasserlinie und an dem unter dem Wasser befindlichen Teil der Bank geht — worauf JASMUND (25) hingewiesen hat — der Transport, obschon natürlich in bedeutend geringerem Umfang und mit geringerer Intensität als bei Hochwasser, fort. Weil sich der Strom somit

Verhältnis
zwischen
Strom-
geschwindig-
keit und
Sohlenkonfi-
guration.

bei Hochwasser zurückzieht und sich in der tiefen Rinne zwischen den Bänken lokalisiert, wird sein Lauf gekrümmter und geschlängelter als der des Hochwassers, das ja gerade über die Bänke hinfließt. Die beiden Stromstriche kreuzen sich mit anderen Worten unter einem mehr oder weniger scharfen Winkel. Nach JASMUND wird die Auflandung des Überganges um so stärker, je grösser dieser Winkel ist. »Meistens pflegen auch die Übergänge bei hohem Wasser sich zu erhöhen und bei Niedrigwasser sich auszulaufen» (25, S. 181).

Bei Hochwasser füllen sich auch die Nebenrinnen so mit Wasser, dass der Strom sich spaltet und oft Unregelmässigkeiten in der Form wie in der Lage der Bänke erzeugt. DOELL (13) sagt auch, dass es behufs Verbesserung des Fahrwassers des Rheins »unbedingt erforderlich ist, jede Nebenrinne zu schliessen». In voller Übereinstimmung mit den Verhältnissen bei den Transportdeltas können die Bänke auch dadurch verkleinert werden, dass der Strom eine solche Stärke erreicht, dass das früher rollende Geschiebe jetzt mehr oder weniger schwebend vorwärtsbefördert werden kann. PARTIOT (31) erwähnt auch, dass eine ganze Bank auf diese Weise sich auflösen und verschwinden kann. Im allgemeinen behalten die Bänke jedoch bei ihrer Fortbewegung ihre Hauptform und ihre Grösse bei, so dass man, wie oben gesagt, wirklich das Recht hat, sie als konstante Grössen und nicht allein als die Form, in welcher der Materialtransport geschieht, zu betrachten.

Bedeutend wichtiger von theoretischem Gesichtspunkt als die zufälligen und mehr lokalen Anomalien der Bänke ist die Veränderung ihrer Lage und Anzahl, die durch die Stromgeschwindigkeit bedingt ist. DOELL hat nämlich nachgewiesen, dass die Bänke mit steigender Stromstärke sich vermehren, sich verkürzen und näher aneinander rücken, um sich dann bei abnehmendem Strom zu verlängern, weiter voneinander zu trennen und sich an Zahl zu vermindern. Hiermit hängt auch die Behauptung JASMUND'S (25) zusammen, dass alle

festen Flüsse mit einer wandernden Banksohle ihren Fall entweder auf natürlichem oder auf künstlichem Wege verschärft erhalten haben. Bei Hochwasser kommen auch neue Bänke hinzu, und bei Niedrigwasser verschwinden etliche. — Die grosse Bedeutung der Stromgeschwindigkeit für die Form und Lage der Bänke stimmt vollständig mit ihrer Natur als Transportkörper und ihrer Ähnlichkeit mit den Transportdeltas überein, denn diese letzteren sind, wie oben nachgewiesen, ihrer Form und Lage nach durch die Stromgeschwindigkeit bestimmt.

Die Ursache zu diesen Veränderungen liegt zum grossen Teil in der gesteigerten Transportintensität und der daraus folgenden grösseren Erosion an der Luvseite der Bänke. Bei schwachem Strom findet nur eine unbedeutende Erosion statt. Die Bewegung ist somit langsam, und die pro Zeiteinheit von der Basis der Luvseite fortgeführte Materialquantität ist nicht gross, weshalb eine langgestreckte, flache Form entsteht. Bei stärkerem Strom steigert sich die Erosion und die Bewegung, und es wird eine grosse Materialmasse pro Zeiteinheit von der Basis der Luvseite fortgeführt. Dies hat zur Folge, dass die Neigung grösser und — da die absolute Höhe der Bänke durch die Wasseroberfläche fixiert ist — die Länge der Bänke geringer wird. Ferner ist zu beachten, dass bei verstärktem Strom Material, das früher nur vorwärtsgerollt werden konnte, jetzt möglicherweise ein Stück schwebend getragen werden kann, um dann zu fallen und damit Veranlassung zu neuen Akkumulationszentren zu geben. Da die Materialmasse des Flusses allmählich vorwärtsbefördert wird und nichts liegen bleiben und hemmen darf, so muss die Anzahl der Bänke vergrössert werden, wenn sie selbst kürzer und kleiner werden. — Noch eine Sache von Bedeutung ist die, dass ein schwacher Strom Material nur eine relativ niedrige Steigung hinaufzubewegen vermag, während ein stärkerer die Kraft besitzt, mit derselben Materialgrösse eine bedeutend steilere zu überwinden. Damit Erosion und dann Bewegung soll stattfinden können, darf die Steigung

somit nicht einen gewissen, durch die Stromgeschwindigkeit bestimmten Betrag übersteigen.

Gleichzeitig mit dem ersten Entstehen der Bänke, ihrer Einnahme einer Zickzacklage sowie dem allmählichen Anwachsen und der Ausbildung derselben geht auch die Entwicklung der zwischenliegenden Rinne oder des Talwegs vor sich. Dieser ist, wie vorher erwähnt, in Tiefzentren (Kolke) und Übergänge (Pässe) eingeteilt, eine Form, deren Entstehung man noch nicht ganz hat erklären können. Aus dem gewundenen Laufe des Talwegs folgt indessen unmittelbar, dass seine Tiefe ungleich sein muss. Der Talweg biegt nämlich vor einer Bank in einem Bogen zur Seite, wobei die entstandene Zentrifugalkraft die Stromgeschwindigkeit steigert. Da ferner das Ufer fest ist, so ist eine Erweiterung nach der Aussenseite eine Unmöglichkeit, und der Strom konzentriert sich deshalb auf Tieferosion und bildet, im Gegensatz zum Übergang, wo der Talweg gerade ist, einen Kolk (s. weiter S. 51 u. 68.). Die Breite ist auch an der ersteren Stelle bedeutend geringer als an der letzteren, und hierdurch nimmt hier — da Breite und Tiefe im umgekehrten Verhältnis zueinander stehen — die Tiefe noch mehr zu. In Übereinstimmung hiermit wird auch die Bildung eines schlechten und guten Passes erklärt, indem die Flusssektion bei dem ersteren — die schräger gestellt und deshalb länger ist — eine geringere Tiefe haben muss als der quergestellte und kurze »gute Pass«.

Als generelle Regel kann man schliesslich sagen, dass sowohl die Grundform als auch die Entwicklung des Bogenlaufes des Stromes durch dieselben Gesetze und Prinzipien bestimmt werden wie der Bogenlauf des freien Flusses (s. weiter S. 64.).

Als Zusammenfassung des Obenstehenden kann gesagt werden, dass der Strom in einem Flusse mit gleichlaufenden, festen Ufern in einem schlängelnden, aus Tiefzentren (Kolken) zusammengesetzten Bogenlauf fliesst. Die Kolke liegen abwechselnd auf der linken und auf der rechten Seite einer Bank. Dadurch, dass die Bänke, als Transportkörper, unter Beibehaltung ihres Platzes in dem Bogenlaufe, langsam

stromabwärts wandern, wird der ganze Lauf als ein geschlossenes System vorwärtsgeschoben. Die Grundform des Laufes, oder die Zickzacklage der Bänke, hängt von dem Materialtransport und dem dort herrschenden Deltaprinzip ab. Weil das Geschiebe in den Bänken transportiert wird, dient die dazwischenliegende Rinne hauptsächlich als Ablauf für das Wasser und den Sinkstoff. Die Bogenlänge des Serpentinlaufes, oder die Grösse und Anzahl der Bänke, hängt ferner von der Stromgeschwindigkeit ab, indem die Bogenlänge bei geringer Geschwindigkeit gross, bei hoher dagegen kurz ist.

Angenommen nun, dass der feste Flusslauf durch Fortnahme der Uferdämme freigemacht wird, so erodiert das Wasser unmittelbar an der Aussenseite des Kolkes, wo es im schärfsten Bogen geht. Dadurch bildet sich eine Krümmung, die sich immer mehr entwickelt, erweitert und sich zu einer wirklichen Flussserpentine oder einem Flussmäander buchtet. Während dieser Entwicklung verlängert sich der ursprüngliche Kolk, behält aber seinen Platz in der Mitte des Bogens bei. Gleichzeitig mit der Entwicklung des Kolks nach aussen wächst die entsprechende Bank, ebenfalls unter Beibehaltung ihres Platzes, zu einer Landzunge an. Da die Bogenlänge natürlich allmählich so steigt, dass die Anzahl der Krümmungen beim freien Flusse bedeutend geringer wird als beim »festen«, so werden während der Entwicklung eines Kolks zu einem Flussbogen und der damit erfolgenden Entwicklung einer Bank zu einer Landzunge die naheliegenden Partien in ihnen absorbiert. Lassen sich die Radien der letzteren nach hundertern Metern messen, so lassen sich die der ersteren nach tausenden messen. Dass eine solche Umbildung des Serpentinlaufes des Stromes in der Natur wirklich vorkommt, geht u. a. daraus hervor, dass die 1875 bei Wien zu einem geraden Lauf regulierte Donau nach WEX (39) schon 1880 fünf Bogen aufwies. Ferner bildete der Rhein, nach Korrektion seines Laufes bei Grieth, einen neuen Bogen (25, S. 163), und die Oise behielt ihren grabenen geraden Lauf

Die Entwick-
lung eines
freien Mäan-
derlaufes
durch Ent-
bindung des
»festen«.

beim Dorfe Thonrotte nicht bei, sondern nahm bald wieder ihren alten bogigen an. VUJEVIĆ (38) betont auch, dass die Theiss nach der Korrektion 1838—42 sich sofort durch Serpentinisierung zu verlängern begonnen hat, und dass »zahlreiche Durchstiche zwischen Ujluk und Tokaj, die ursprünglich geradegelegt waren, sich heute zu echten Mäandern entwickelt haben«. Der Indalsälvi hat ferner, wie Taf. I zeigt, beim ersten linken Kolk, wo das Ufer bei der Korrektion vollständig gerade gemacht wurde, einen Bogen auszuero dieren begonnen. Tatsache ist somit, dass *ein Flussserpentinlauf sich dadurch bilden kann, dass ein fester Fluss wieder frei wird*. Dies geschieht indessen sehr selten und nur auf mehr oder weniger kurzen Flussstrecken. Die meisten jetzigen Mäanderläufe und alle ursprünglichen haben, wie späterhin erörtert werden wird, eine andere Herkunft und eine ganz andere Entwicklung hinter sich.

Anlässlich des vorher relatierten Verhältnisses, dass die Bänke umso länger sind, je schwächer der Strom ist, und der Bogenlauf umso kürzer, zusammengedrückter und schärfer, je stärker der Strom ist, sagt JASMUND: »Jeder Fluss bedarf einer gewissen kleinsten Längenentwicklung« (25, S. 164). Dieser Satz kann insofern unrichtig sein, als die Grundform, die zickzackförmige Banklage, *stets* in einem Flusse mit grosser Geschiebemasse vorkommt; vollkommen richtig dagegen ist, wenn man sagt, dass jeder Überschuss an Gefälle zu einer Verschärfung des Serpentinlaufs des Stromes *beiträgt*. Der Gedanke, dass die Entwicklung des Bogenlaufs des Stromes zu einem normalen, freien Serpentinlauf bei der Befreiung der gebundenen Flüsse auf dem Streben nach einer kleinsten Längenentwicklung beruht, ist aber falsch. Der freie Fluss ist zwar, im Verhältnis zu dem beweglichen Strombett des festen Flusses, verlängert, und ihm ist eine gewisse Stabilität verliehen; die Entstehung und die Entwicklung der freien Bogen hängt aber von rein mechanisch-dynamischen Ursachen ab. Die Erosion beginnt somit deshalb

an der Aussenseite des Kolkes, weil das Wasser hier seine grösste Energie hat; sobald dann die erste Anlage zu einem Bogen gebildet ist, geht die Entwicklung vollständig unabhängig von der kleinsten Längenentwicklung, inneren Bedürfnissen u. dergl. fort (siehe weiter S. 61).

Die Form und Laufentwicklung der reifen, freien Flüsse.

Gehen wir nun zu dem freien Flusslauf über, so treffen wir hier einen bedeutend grösseren Formenreichtum mit viel komplizierteren und verwickelteren Verhältnissen an. Der feste, durch Korrektur reifer und schon weit entwickelter Flüsse erhaltene Flusslauf besitzt zwar, wie oben dargelegt, den Charakter eines Spezialfalles oder einer Ausnahme, welche jedoch durch ihre Ähnlichkeit mit dem freien Flusslauf und ihre relativ wohlbekannte Bodenkonfiguration und besonders *ihren Materialtransport* eine grosse Bedeutung für die Kenntnis der ganzen Potamologie hat. Im Gegensatz zu dem Beharrungszustand des festen Flusses durchläuft der freie Fluss den ganzen fluvialen Zyklus mit allen seinen Stadien, Formen und Erscheinungen und steht deshalb, gegenüber dem gebundenen Stillstand des festen Flusses, in einer beständigen Entwicklung.

Allgemeine
Charakteristik.

Da die arbeitende Kraft, der Strom, dieselbe ist, so müssen doch, wie vorher erwähnt, die Gesetze und Prinzipien der Ausbildung der beiden Läufe dieselben sein. Ich habe auch schon auf die Ähnlichkeit zwischen dem Bogenlauf des Stromes in dem festen Flusse und dem Serpentin- und Mäanderlauf des freien sowie auf die allmähliche Umbildung des ersteren und seinen Übergang in den letzteren, sobald er frei gemacht wird, hingewiesen.

Im Vorhergehenden ist ferner versucht worden, die Ursache und die Entstehung des Bogenlaufs des Stromes darzustellen und zu erklären. Da die ganze Entwicklung desselben innerhalb der festen Grenzen der gleichlaufenden,

befestigten Ufer liegt, ist sie natürlich bedeutend einfacher und leichter zu übersehen als die langsame Entwicklung des freien Flusses sowohl in horizontaler wie in vertikaler Richtung. Um die Möglichkeit zu besitzen, die Entstehung des Endstadiums des letzteren aus allen den durchlaufenen verschiedenen Stadien und unendlich mannigfachen Formen des fluvialen Zyklus recht zu verstehen und zu erklären, muss man aus dem vorhandenen Tatsachenmaterial erst die leitenden Prinzipien oder die einfachen Gesetze für die Entwicklung synthetisch herauszufinden versuchen. Mit den nachfolgenden Gesichtspunkten meine ich natürlich keineswegs die obestehende Forderung erfüllt zu haben. Sie sind nur Versuche, die verschiedenen Erscheinungen unter einem einheitlichen Gesichtspunkt oder als Ausflüsse ein und desselben Prinzips, ein und derselben Idee, zu vereinigen, die von der obigen Darstellung der Transportmechanik ausgehen und sich an diese anschliessen.

Die Prinzipien der Laufentwicklung des Flusses.

Der Fluss ist der Ablauf für das Wasser, das sich auf der Landfläche sammelt und infolge des Gravitationsgesetzes seinen Weg nach dem Nullpunkt, dem Meere, sucht. Im Anschluss hieran kann es zweckmässig sein, zwischen *Fluss* und *Strom* zu unterscheiden. Der erstere ist der Weg oder die Bahn für das fließende Wasser, d. h. eine topographische Erscheinung mit horizontaler und vertikaler Ausdehnung, durch Ufer und Boden eingeschlossen und durch den Strom als Kraft ausgebildet. Der Fluss besitzt also nach dieser Definition an sich kein Vermögen zur Arbeit oder Formveränderung, sondern ist nur ein Weg oder eine Funktion des Stromes. Oft werden die beiden Begriffe verwechselt, oder »Fluss« wird als Synonym für »Strom« angewendet.

Der Fluss ist aber nicht allein der Ablauf für das Wasser, sondern auch das Transportglied für den losen Schutt, den

der Strom mitführt, und der vom Flussbett korradiert wird. Auf diese beiden verschiedenen Funktionen können sich die Leitprinzipien für die Entwicklung des fluvialen Zyklus gründen.

Das Wasser hat bei seinem Herabfliessen nach dem Meere das Streben, einen so geraden und gleichmässigen Flusslauf wie möglich zu bilden, weil es in einem solchen sein Ziel am schnellsten und leichtesten erreicht. Derselbe soll gerade sein, weil dies der kürzeste Weg zwischen zwei Orten ist, gleichmässig, d. h. mit konformen und mit dem Wasservolumen übereinstimmenden Quersektionen versehen, weil das Vorwärtsfliessen auf diese Weise am regelmässigsten und schnellsten vor sich geht. Da der Fluss indessen immer erodiert und sein Bett auf diese Weise erweitert und vertieft, wird das erste Prinzip, nämlich *das Streben nach gleichförmigen oder konformen Querprofilen*, durch eine mit der Erosion gleichzeitige Akkumulation aufrechterhalten. *Erosion und Akkumulation sind also korrelative Erscheinungen.* JASMUND (25, S. 189) sagt auch: »Kolk und Kiesgrund bilden ein Ganzes»; das eine setzt, mit anderen Worten, das andere voraus, oder beide stehen in einem direkten Verhältnis zu einander. Die Richtigkeit dieses Prinzips zeigt sich überall in allen Flüssen und offenbart sich in einem Wechselspiel zwischen Tiefen und Versandungen, zwischen Kolken und Bänken. Als ein Korrolar zu diesem Prinzip ergibt sich der Satz von dem umgekehrten Verhältnis zwischen der Breite und der Tiefe des Flusses, denn es ist offenbar, dass, wenn eine gewisse, mit dem Wasservolumen übereinstimmende Quersektion herrschen soll, die Verminderung der Breite eine Vermehrung der Tiefe verursachen muss, und umgekehrt; durch direkte Messungen ist dieser Satz schon frühzeitig von MINGIN-LECREUX für die Seine und Loire (25, S. 222) bewiesen worden.

Das Verhältnis zwischen der Fluss-sektion und der Geschwindigkeit der abfliessenden Wassermenge erhellt aus der allgemeinen Geschwindigkeitsformel

Das Gesetz
der konformen
Querprofile.

$$v = c \sqrt{RJ},$$

wo, wie bekannt, v = Geschwindigkeit;

R = der hydraulische Radius oder die Sektionsarea (F) [mit der Mitteltiefe (t)], dividiert durch den benetzten Umkreis (p),

also $= \frac{F}{p}$, wobei ohne nennenswerten Fehler ferner p = Breite

(b) gesetzt werden kann;

J = der Fall der Wasseroberfläche pro Längeneinheit;

c = eine Konstante.

Löst man die Formel mit Beziehung auf J auf, so erhält man den unmittelbar evidenten Satz, dass Gefällwert und Profilgrösse in umgekehrtem Verhältnisse zu einander stehen. Das Abfliessen oder der Strom wird also umso unregelmässiger, je schneller und stärker die Sektionsarea wechselt. Dies steht ja dem Streben des Wassers nach dem Meere, oder mit anderen Worten dem Vorwärtsfliessen des Stromes, hindernd entgegen und ist mit ihm unvereinbar. Es herrscht deshalb eine beständige Arbeit, das Flussbett gleichmässig mit konformen und allmählich in einander übergehenden Querprofilen zu machen.

Da das Wasservolumen (Q) = $F \cdot v$ ist, erhält man weiter in der mit Beziehung auf J gelösten Gleichung (25, S. 226):

$$J = \left(\frac{Q^2 \cdot p}{F^3 \cdot c^2} = \frac{Q^2 \cdot p}{b^3 \cdot b^2 \cdot c^2} \right) = \frac{Q^2}{b^2 \cdot t^3 \cdot c^2},$$

woraus hervorgeht, dass der Gefällwert (J) für dasselbe Wasserquantum (Q) umgekehrt proportional der dritten Potenz der mittleren Tiefe (t), aber umgekehrt proportional der zweiten Potenz der Breite ist, weshalb somit die Tiefe einen grösseren Einfluss als die Breite hat.

JASMUND sagt, diese theoretischen Annahmen liessen sich in Wirklichkeit schwer erweisen, es sei aber eine Tatsache, dass ein schmales und tiefes Profil ein geringeres Gefälle als ein breites und seichtes erfordere. Dies muss ja auch der Fall sein, denn das erstere mit weniger benetztem Umkreis übt eine geringere Friktion auf das Wasser aus als das letztere. Ein anderer Faktor, der für den Gefällwert Be-

deutung hat, ist das Material des Flussbettes und seine verschiedenen Friktionswerte, worauf die schwerbestimmbare Konstante (c) beruht. Ein Boden mit grossen Steinen übt sonach einen bedeutend grösseren Widerstand aus als ein solcher mit kleinen Steinen, ein Sandboden einen grösseren als ein aus Lehm bestehender u. s. w., eine Tatsache, die u. a. deutlich aus S. DE GEER'S Geschwindigkeitsmessungen im Klarälv (12) hervorgeht.

In Übereinstimmung mit dem Satze von dem Verhältnis der Breite und Tiefe steht TOUTAIN-NOLTHENIUS' Nachweis, »dass die mittlere Tiefe von der Breite abhängt, die Abweichung der grössten Tiefe von der mittleren aber eine Wirkung der Krümmung ist« (25, S. 272). Dieser Satz führt uns zu dem zweiten, die Entwicklung des Flusses bestimmenden Gesetz, nämlich dem von *der Zunahme und der Konzentration der Stromenergie an den äusseren Seiten der Krümmungen und Bogen auf Grund der dort herrschenden Zentrifugalkraft*. Da die Erosions- und Transportfähigkeit in direktem Verhältnis zur Stromgeschwindigkeit steht, so werden also die morphologischen Prozesse in einer Krümmung schneller vorsichgehn als auf geraden Strecken. Dann kommt es auf die lokalen Voraussetzungen an, ob die gesteigerte Tätigkeit sich in horizontaler oder vertikaler Erosion auslösen wird (s. weiter S. 67). Da im allgemeinen keine von ihnen vollständig überwiegt, so findet im Bogen sowohl eine gesteigerte laterale wie vertikale Erosion statt. Das Profil wird dadurch übervertieft und seitwärts verschoben. — Da ferner die Zentrifugalkraft umgekehrt proportional dem Radius ist, so ist die Stromgeschwindigkeit und damit die Intensität der morphologischen Prozesse umso grösser, je schärfer der Bogen ist.

Das Gesetz
der Zentrifu-
galkraft.

Aus dem Zentrifugalgesetz folgen FARGUE'S zweiter, vierter, fünfter und sechster Satz (16, 17, 18 und 25, S. 221), nämlich: »la loi de mouille«, je schärfer die Krümmung ist, desto grösser ist die grösste Tiefe des Talweges; »la loi de l'ange«, die spezifische Krümmung ist massgebend für die mittlere Tiefe des Talweges in der gekrümmten Stromstrecke; »la loi

de la continuité», der Talweg zeigt nur dann einen stetigen Verlauf, wenn die Krümmungsverhältnisse innerhalb einer Windung stetig in einander übergehen; »la loi de la pente du fond», eine zunehmende Krümmung entspricht einer Zunahme der grössten Tiefe und umgekehrt.¹

Es ist offenbar, dass das Zentrifugalgesetz dem Prinzip von der Gleichförmigkeit der Flusssektionen zuwiderläuft, indem das Streben der letzteren nach einem gleichmässigen Lauf ohne lokale Tiefzentren oder Erweiterungen durch die Tätigkeit der Zentrifugalkraft unmöglich gemacht wird. Die beiden entgegengesetzten Gesetze können auch als Ausdrücke der vorher nachgewiesenen doppelten Funktion des Flusses, nämlich teils ein Ablauf für das auf der Landfläche gesammelte Wasser und teils ein Transportweg für losen Schutt zu sein, betrachtet werden. Das Prinzip der Gleichförmigkeit der Flusssektionen beruht nämlich — wie gesagt — auf dem Hinstreben des Wassers nach dem Nullpunkt des Landes, und die Zentrifugalkraft entsteht oft dadurch, dass die Transportkörper des Materials den Strom von seiner geradlinigen Bahn ablenken und ihm einen gekrümmten Lauf geben. — In den frühen Stadien des fluvialen Zyklus verursachen zwar eine grosse Masse äusserer Hindernisse Biegungen und Ablenkungen des Flusslaufes, so dass er einen geschlängelten, gekrümmten Lauf erhält, aber auch in einem homogenen Bett der älteren Stadien, wo derartige Hindernisse fehlen, ist ein gerader Lauf unmöglich infolge des Mangels einer gleichmässigen, kontinuierlichen Bewegung des Geschiebes. Offenbar können die Transportkörper, die eine so grosse Ablenkung des Stromes zu bewirken vermögen, dass ein Flussbogen sich bildet, nicht die kleinen Transportdeltas sein, sondern es müssen Bänke sein.

Wohl schon gleich von der ersten Anlage eines Flussbogens

¹ Nachdem die ganze Abhandlung niedergeschrieben war, habe ich die Arbeit »Zur Dynamik des Flussbettes» von G. CRUGNOLA (Zeitschr. f. Gewässerkunde, Bd. 4 und 5, Leipzig 1902—03) gelesen, deren Ergebnisse aber meine Darstellung des Flusslaufes in keiner Weise zu ändern vermögen.

an wird er allmählich durch die Tätigkeit der durch die Zentrifugalkraft gesteigerten morphologischen Prozesse weiter ausgebildet.

Kurze Übersicht über den fluvialen Zyklus.

Schon in der vorhergehenden Darstellung der Transportmechanik habe ich das Verhältnis zwischen Stromgeschwindigkeit und Transportkörpern dargelegt und in der Schilderung des Bogenlaufes des Stromes in dem festen Flusslauf an dem Prinzip der Gleichförmigkeit der Flusssektionen und dem Gesetz der Zentrifugalkraft exemplifiziert und nachgewiesen. In der folgenden Behandlung des Serpentin- und Mäanderlaufes des freien Flusses werde ich diese Sätze etwas ausführlicher behandeln.

Da der Serpentin- und Mäanderlauf dem Altersstadium angehört und darum eine Folge und ein Resultat der ganzen vorausgegangenen Entwicklung ist, muss man indessen, um seine eigenartige Ausbildung vollständig verstehen und seine Entstehung erklären zu können, von der allgemeinen Entwicklung des fluvialen Zyklus ausgehen. Ausgehend von den oben aufgestellten Prinzipien und Gesetzen für die Arbeitsweise und den Entwicklungsgang des Flusses, werde ich darum hier eine kurze Übersicht über den fluvialen Zyklus, besonders in Bezug auf das lose Material, dessen Korrasion, Akkumulation und Transport geben.

In der ersten Jugendzeit, wo der Fluss noch klein ist und mit einem schnellen Lauf den ganzen Boden eines schmalen, engen Tales ausfüllt, ist beinahe alles Geschiebe in schneller Vorwärtsbewegung begriffen. Das Material, das teils durch direkte Korrasion des primären Flussbettes und teils durch Herabgleiten des Verwitterungsmaterials von dem Talgehänge erhalten wird, ist äusserst heterogen und enthält alle Korngrössen bis zu einer bedeutenden Maximalgrösse; der Fluss ist, um mit GILBERT zu reden, eines besonders groben Materials mächtig. Infolge dieser groben Materialqualität sind wie vorher hervorgehoben, die Transportdeltas nicht so

Die Jugendzeit.

typisch und gut entwickelt, wie wenn das Material homogen und von geringerer Korngrösse ist. Das Deltaprinzip macht sich jedoch hier, wie überall anders, geltend, und ein kontinuierlicher Transport der Partikeln über lange Strecken findet nicht statt, sondern es geht eine stetige Erosion und Akkumulation mit von Zeit zu Zeit stattfindender Bewegung vor sich.

Die kleinen Flüsse Halâ und Ammerâ im Ragundagebiet (2), die in ihrem jetzigen Jugendstadium in losen, quartären Ablagerungen fliessen, besitzen reiches Material. Das grösste Material liegt an mehreren Stellen in grossen, flachen Deltas mit unregelmässigen, ziemlich hohen Halden. Auf den Deltas ist das Wasser seicht und das Profil breit, aber unterhalb oder von der Seite her sich einkeilend, liegt eine tiefere Partie, die dadurch entstanden ist, dass das von seiner Last am Deltarande befreite Wasser hier mit voller, entbundener Energie erodieren kann. Auf diese Weise steigt der Boden des Baches stufenweise empor oder zeigt ein gewaltig vergrössertes Bild der kleinen, in Fig. 1, B dargestellten Transportdeltaprofile. Bei Niedrigwasser liegen diese Deltas ziemlich fest, da der Strom ihres Materials nicht mächtig ist, werden aber langsam vorwärts geschoben durch den bedeutend stärkeren Strom des Hochwassers.

Die laterale und vertikale Korrasion ist in den ersten Stadien des Zyklus so ungleichmässig und unregelmässig, dass der Lauf des Flusses stark gebrochen und gebuchtet ist. Die ganze Topographie ist unentwickelt, und der Fluss fliesst, wie gesagt, in einem engen Tal. In der Stromfurche treten deshalb oft äussere Hindernisse in den Weg, und der Boden ist heterogen und bietet verschiedene Gelegenheiten zur Erosion dar. Aus diesem Grund sucht der Fluss sich einen Weg, wo er den geringsten Widerstand findet.

DAVIS betont richtig (11, S. 45), dass, da der Fluss niemals gerade, sondern in Krümmungen fliesst, »seitliche Erosion immer die vertikale begleiten muss«. Er nimmt jedoch an, dass in der ersten Zeit des Zyklus beinahe ausschliesslich

vertikale Erosion stattfindet, so dass der Fluss den Boden des ganzen Tales ausfüllt und eine Talsohle fehlt. Erst wenn der ausgeglichene Zustand erreicht ist, beginnt laterale Erosion und damit die Entwicklung einer Talsohle oder Aue (11, S. 53). Dies dürfte indessen nicht ganz richtig sein, denn, ausser dem Bestreben, die Gefällkurve durch vertikale Erosion zu senken, arbeitet der Strom *stetig* an einer Erweiterung des Talbodens durch laterale Erosion.

Infolge des Strebens des Flusses nach gleichwertigen Quersektionen finden, wie oben erwähnt, immer gleichzeitig mit Erosion und seitlicher Erweiterung Akkumulation oder Versandungen statt. Da der Fluss sich nun immer ausbuchtet und daraus gesteigerte Leistungsfähigkeit durch die Zentrifugalkraft in sowohl horizontaler wie vertikaler Richtung entsteht, verschiebt sich das Flussbett beständig, und es bildet sich eine Talsohle. Diese kommt in dem Masse, wie der Strom sich senkt, über dessen Oberfläche zu liegen und bildet festen Boden. — Beispiele einer gleichzeitigen stark lateralen und vertikalen Erosion liefern der Ammerå und der Halå. Der letztere (20—30 m breit) arbeitete nämlich nach der Katastrophe 1796 (2), wo sich seine Erosionsbasis plötzlich in ein paar Stunden um 30 m senkte, ein 150 m breites Tal aus. Seine Seiten bilden ferner kleine Bogen und Terrassen, so dass man gut sehen kann, wie der Strom mit seiner gewaltigen Geschwindigkeit und bei seiner heftigen Tieferosion einen schlängelnden Lauf beschrieb, d. h. serpentinisierte. Der Ammerå, dessen Erosionsbasis bei derselben Gelegenheit um ca. 13 m gesenkt wurde, grub ein 300 m breites Tal aus, das u. a. einen schönen, beinahe geschlossenen Bogen von 200 m Durchmesser enthält. Dieser ist im Verhältnis zu der geringen Breite des Flusses von 20—30 m so gross, dass er sich unter ruhigeren Verhältnissen, d. h. in einem reiferen Stadium, vielleicht nicht hätte ausbilden können. Die laterale Erosion nimmt somit ebensowie die vertikale bei Steigerung des Gefalles und der Stromge-

schwindigkeit zu und beginnt nicht in einem bestimmten Stadium.

Der Grund, weshalb man angenommen hat, dass die horizontale Erweiterung des Tales und die Ausbildung der Talsohle hauptsächlich während der Reife stattgefunden hat, kann möglicherweise darin liegen, dass die vertikale Erosion während der Entwicklung des Zyklus abnimmt, während die laterale bestehen bleibt und sich in späten Stadien stärker geltend macht und besser zum Vorschein kommt. In der Jugend verwischt die starke vertikale Erosion teilweise das, was die horizontale schafft, im Alter dagegen herrscht sie mehr oder weniger allein.

Die Senkung der Gefällkurve während der Entwicklung des Zyklus und die damit verbundene Verminderung der Stromgeschwindigkeit des Wassers hat zur Folge, dass sich die Körnergrösse des Schuttes vermindert. Das absolute Geschiebequantum ist aber mächtiger, da das Wasservolumen jetzt grösser als vorher ist.

Die Reife.

Im Jugendstadium vermochte, wie DAVIS (11) sagt, der Fluss nicht all das Material, das die Nebenflüsse mitführten, aufzunehmen und weiterzubefördern, sondern der Rest wurde auf dem Boden oder den Seiten des Tales akkumuliert. Während der Reife hat dagegen ein Ausgleich stattgefunden, und der Hauptfluss sieht sich im stande, die ganzen Lasten der Nebenflüsse zu tragen. Da diese indessen noch gross und die Nebenflüsse infolge der reichen Formenentwicklung der Landschaft zahlreich sind, ist nach DAVIS (11) die ganze Kraft des Hauptflusses dazu erforderlich, das von seinem oberen Lauf und den Nebenflüssen erhaltene Material zu befördern. Dieses sehr umstrittene ideale Stadium: »wenn also die Leistungsfähigkeit des Flusses und die Arbeit, die er zu leisten hat, aufs feinste angepasst sind» (11, S. 53), dürfte indessen nicht so oft und so regelmässig zur Entwicklung kommen, wie man es im allgemeinen annimmt; wenigstens ist es nicht richtig, dasselbe in ein bestimmtes Entwicklungsstadium im Zyklus zu verlegen, da es von den verschiedenen Flüssen zu

weit verschiedenen Zeiten erreicht wird. So setzt der Klarälv nach S. DE GEER (12) seine Tieferosion in seinem reifen Serpentin stadium fort. Ist ferner der Fluss wirklich vollbeladen und alle disponible Kraft für den Transport in Anspruch genommen, so würde ja keine Korrasion stattfinden können. DAVIS sagt jedoch, dass die hauptsächlich horizontale Arbeit des Flusses während des ausgeglichenen Zustandes beginnt und geschieht.

Durch die Erweiterung des Talbodens und die Vergrößerung der aus losem Schutt aufgebauten Aue erhält der Fluss während der fortschreitenden Entwicklung eine immer grössere Möglichkeit zur Bewegung in horizontaler Richtung. Legten die Talseiten früher schwere Hindernisse in den Weg, so sind sie jetzt so weit voneinander entfernt, dass der Fluss nur zuweilen mit ihnen in Berührung kommt.

Die gewonnene Freiheit, die dem Strom gestattet, leicht zu erodieren und sich neue Bahnen zu suchen, hat die Folge, dass der Fluss »verwildert«. Die Transportkörper von verschiedener Grösse bleiben nämlich oft zurück oder werden festgelegt und häufen sich zu Gründen an, die zu Inseln anwachsen und den Strom zwingen auszubiegen und sich neue Wege zu suchen. Hierdurch bildet sich ein reich verästelter Lauf mit Inseln, Gründen, Buckeln und kleinen Rinnsalen. Infolge dieser Zersplitterung in eine Masse Arme und Kanäle wird das Querprofil des Stromes sehr breit und die Tiefe unbedeutend. Eine Krümmung kann auch selten sich ungestört zu einer grösseren Serpentine oder einem geschlossenen Mäander entwickeln, denn sie trifft bald mit einer anderen Furche, einem teilweise aufgegebenen Bett oder einem mehr oder weniger trockengelegten Kanal zusammen, durch welchen das Wasser seinen Weg nimmt. Eine regelmässige, systematische Entwicklung des Flusslaufes findet daher in dieser Zeit kaum statt, sondern die Bahn des Stromes wird durch den geringsten Widerstand, der ihm auf dem Wege begegnet, bestimmt.

Die Verwilderung des Mittellaufes.

In der folgenden Entwicklung senkt sich die Gefällkurve,

aber sehr langsam, weil der Fluss in die Nähe der Erosionsbasis gelangt ist, und weil die schon im vorhergehenden Stadium grosse Materiallast sich so vermehrt hat, dass das primäre Flussbett vollständig bedeckt und geschützt wird. Aus diesem Grunde fliesst der Fluss in einem sekundären, beweglichen Bett, d. h. auf seiner eigenen, im Transport befindlichen Materialmasse dahin. Dieses Stadium wird, wie ich vorher bemerkt habe, zu sehr verschiedenen Zeiten erreicht und dürfte von manchen Flüssen erst lange nach Fertigbildung ihres Endstadiums im Serpentin- oder Mäanderlauf gewonnen werden.

War die Materialqualität während der Verwilderung im Verhältnis zu der des ersten Jugendstadiums relativ homogen und aus Sand und Kies zusammengesetzt, so wird sie im weiteren Fortgang der Entwicklung immer gleichmässiger und feiner. Viel Material, das vorher nur vorwärts geschoben werden konnte, ist nun so zerrieben und zerkleinert, dass es trotz der Stärkeabnahme des Stromes als Sinkstoff getragen werden kann. Das Verhältnis zwischen dem geschobenen und dem getragenen Material hat jetzt gegen früher auch eine grössere Ausgleichung erfahren.

Gleichzeitig mit der Ausbildung eines sekundären, beweglichen Flussbettes wird, wie HONSELL (22) richtig hervorgehoben hat, die Gefällkurve mehr stetig verlaufend. Ferner füllen sich die kleineren Seitenarme allmählich an, eine grössere oder kleinere Anzahl Inseln schliesst sich dadurch zu grösseren zusammen, die mit dem festen Ufer in Verbindung treten, und es bilden sich Halbinseln. Der Fluss kann deshalb nicht so schnell und leicht, wie vorher, ablenken, ausbrechen und seine Lage verändern, sondern wird *immermehr in einer Hauptfurche lokalisiert*. Noch ist jedoch sein Lauf unregelmässig und unsymmetrisch, weil die Hauptfurche von den grössten und tiefsten Ästen des Stadiums der »Verwilderung« gebildet ist oder her stammt; noch gehen deshalb auch die Krümmungen des Flusses in Windungen bald hier-, bald dorthin und weisen unregel-

mässige Tiefen, Versandungen, Aufstauungen und Wirbel auf.

Beharrt der Flusslauf aber erst einmal in einer gewissen Bahn, wo das Wasser alle seine Kraft konzentriert, dann geht seine fernere Entwicklung in der aus losem Schutt aufgebauten und aufgelockerten Talsohle schnell vor sich. Die aus der »Verwilderung« ererbten Windungen und Krümmungen erweitern und vergrössern sich nun, den vorher dargestellten Gesetzen und Prinzipien gemäss, allmählich zu regelmässigen Bogen.

Die Entwicklung des Mittellaufes zum regelmässigen Bogenlauf.

Diese Entwicklung oder Umbildung des unregelmässig gebuchteten und gekrümmten Flusslaufes beginnt und setzt sich natürlich allmählich in jeder »Urbiegung« fort. Es geschieht nicht in der Weise, dass sich eine Krümmung erst zu einem gleichmässigen, symmetrischen Bogen ausbildet und alle die anderen dann in einer Serie, wie ein durch einen einzigen Impuls erwecktes Wellensystem, nachfolgen. Sehr wichtig zu beachten ist jedoch, dass die Entwicklung eines Bogens auf die unterhalb desselben liegenden Einfluss hat. Wenn sich nämlich ein rechter Bogen erweitert und seitlich auswächst, so verschiebt sich der Strom und trifft in der Mündung seines unteren Schenkels das linke Ufer in einem immer grösseren Winkel. Die Entwicklung des einen Bogens richtet sich also nach dem anderen, und es findet eine innere Wechselwirkung statt. Die Folge hiervon ist ein schlängelnder Flusslauf, wo je ein Bogen rechts, je einer links von einer in der Fliessrichtung des Flusses befindlichen Mittellinie liegt, d. h. ein Serpentin- oder Mäanderlauf.

Diese Umbildung geschieht natürlich mit äusserst verschiedener Geschwindigkeit und im Detail auf den verschiedensten Wegen. Sie hängt nämlich ganz von der früheren Entwicklung des Flusses und dem Grad der »Verwilderung«, die der Fluss zuvor besessen hat, ab. In ihren Hauptzügen wird sie aber durch die Prinzipien der Kontinuität des Stromes oder der Gleichförmigkeit des Querprofiles sowie durch das Gesetz der Zentrifugalkraft verursacht und bestimmt.

Die Stellung
des Mäander-
problemes.

Der Serpentin- und Mäanderlauf der freien Flusses ist somit, wie auch DAVIS (10 u. 11) hervorgehoben hat, aus den vorhergegangenen Stadien entstanden oder eine Folge der ganzen früheren Entwicklung. Er ist mit anderen Worten von dem Augenblick an, wo er als Bach in den fluvialen Zyklus eingetreten ist, bis er in der Nähe der Erosionsbasis seine volle Reife erreicht hat, ein Resultat des gesetzmässigen Vorwärtsfliessens des Wassers, der Korrasion und der transportierenden Tätigkeit des Flusses. Hieraus folgt unmittelbar die Unrichtigkeit der Annahme vieler Autoren, dass zufällige Hindernisse im Flussbette, z. B. seitliche Schuttkegel, einmündende Nebenflüsse, vordringende Baumwurzeln u. s. w., den ersten Anlass zu einem regelmässigen Bogenlauf bildeten. Nachdem der Fluss dann erst einmal abgelenkt worden ist und einen Bogen gebildet hat, entstehen, meint man, infolge der wiederholten Reflexion des Stromes alle anderen Bogen in einer langen Serie. Dass man solche fehlerhafte Erklärungsgründe hat aufstellen können, liegt zum grossen Teil daran, dass man den stets vorhandenen Kausalnexus zwischen den verschiedenen Formen und Stadien eines geographischen Zyklus nicht genügend gewürdigt, sondern stattdessen den symmetrischen Bogenlauf als eine selbständige Ausbildungsform — eine besondere, von dem gewöhnlichen, unregelmässigen Lauf des Flusses getrennte, eigenartige Erscheinung — betrachtet hat. Das hat auch zu der unrichtigen Problemstellung, nämlich die *erste*, plötzliche Ursache zur Biegung des Flusses zu finden, geführt. Statt die Ursache der regelmässigen Bogen des Serpentin- und Mäanderlaufes zu sein, bilden diese lokalen Hindernisse den Ursprung der Anomalien, Störungen und Unregelmässigkeiten des Bogenlaufes.

Nach Ansicht anderer Forscher beruht der Serpentinlauf auf der Bewegung des Wassers oder der Physik des Stromes. Dies erklärt jedoch nichts, sondern verlegt das Problem nur auf eine andere Sache, denn man weiss trotz alledem noch nichts von den Gesetzen und der Art der Bewegung

des Wassers. RÜMELIN (35) glaubt mit seiner Theorie alle Schwierigkeiten, und damit auch das Mäanderproblem, gelöst zu haben. Dies muss aber als ziemlich sanguinisch und unvorsichtig erachtet werden, denn die eine bogige und geschlängelte Fließlinie verursachende abwechselnd eintretende Verzögerung und Beschleunigung der Wirbelkörper ist sicher nicht von solcher Stärke und Dauer, dass der permanente Strom und der ganze Materialtransport dadurch bestimmt werden, und ebensowenig haben die Kurven dieser Linien eine mit dem Bogen des Flusslaufes zu vergleichende Länge.

Andere Hypothesen sind vollständig metaphysisch, indem sie sagen, es liege in der »Natur des Flusses«, sich zu krümmen, und damit Punktum. HONSELL (22, S. 46) weist sehr richtig auf das Fehlerhafte der Annahme hin, dass die Ursache auf »zufälligen Widerständen oder etwa auf einer Wirkung nach Analogie des elastischen Stosses« beruhe, gibt aber dann die kategorische, nicht näher motivierte oder ausgeführte Erklärung ab, dass der Serpentinlauf »vielmehr nur als eine Form des Gleichgewichts aufzufassen ist, welches sich unter der Wechselwirkung der Abflussbedingungen hergestellt hat«. — Diese Ansicht über den Serpentin- und Mäanderlauf als eine nach langem Streben und Arbeiten erreichte Herstellung des Gleichgewichtsstadiums ist sehr gewöhnlich, aber nicht richtig oder wenigstens ein unzutreffender Ausdruck, denn der Fluss ist kein lebendes Wesen mit inneren Bedürfnissen oder Bestrebungen, die er zu erfüllen sucht, sondern er folgt nur dem ihm von dem Gravitationsgesetz gegebenen Streben, sich einen Weg nach dem niedrigsten Punkte, d. h. der Erosionsbasis, zu suchen. JASMUND's Theorie einer kleinsten Längenentwicklung ist dieser Ansicht ein wenig verwandt. Dies kommt besonders zum Vorschein, wenn sowohl JASMUND (25) wie HONSELL (22) von dem *Bedürfnis* des Flusses nach dieser oder jener Neigung sprechen, um ein gewisses Materialquantum oder eine bestimmte Materialgrösse transportieren zu können. Die Entwicklung und Konfiguration des Flusses

sowohl im einzelnen wie im grossen mit Tiefe, Breite, Lage, Materiallast u. s. w. hängt von der Kraft, d. h. dem Strom, ab. Dieser Strom wird dann nur durch physikalisch-mechanische Gesetze geregelt. Wie ich schon vorher betont habe, muss man nämlich zwischen Strom und Fluss, welch letzterer nur eine Funktion des ersteren ist, unterscheiden. So entwickelt sich z. B. ein Bogen, wenn kein Hindernis dazwischenkommt, allmählich, nachdem er nur erst angelegt und der Strom in eine gewisse Richtung gekommen ist, ohne jede Rücksicht auf geringste Längenentwicklung, Gleichgewichtsstadien oder anderes, sondern nur auf Grund des herrschenden Vorwärtsfliessens, der Zentrifugalkraft und des Prinzips der Gleichförmigkeit der Sektionsfläche.

Das Delta.

Bevor wir zu einer näheren Schilderung des Serpentin- und Mäanderlaufes übergehen, wollen wir erst einige Worte über die Weiterentwicklung des Flusses in dem Zyklus oder seine letzte Partie sagen. Sein Ende ist nämlich in den meisten Fällen kein regelmässiger Bogenlauf, sondern das *Delta*. An dem äusseren Rande dieses hört der Strom auf, und sein mitgeführtes Material wird endlich nach seinem Transport akkumuliert und kommt zur Ruhe. Innerhalb dieses in der Bildung begriffenen Deltas fliesst der Fluss in den meisten Fällen nicht in einer geschlossenen, regelmässigen Furche. Infolge der Vorwärtsbeförderung des Geschiebes in Form von Transportkörpern und ihrer oben erwähnten Anhäufung und Akkumulation zu Bänken und Gründen sowohl im Auslaufarm wie in der Mündung ist nämlich die Bahn des Stromes in voller Übereinstimmung mit den Verhältnissen bei der Verwilderung des Flusslaufes oft abgelenkt worden und der Fluss aus seinem Bette ausgebrochen. Das Delta ist auch, wie das Verwilderungsstadium, von einem System von Armen und Kanälen durchschnitten, welche zwischen grösseren und kleineren Inseln hindurchgehen. Durch die oft veränderte Richtung des Stromes werden teils schon akkumulierte Partien des Deltas erodiert, teils wird sein Anwachsen an dem Abladungsabhang ein unregelmässiges.

Oberhalb des Deltas stossen wir dagegen auf die Serpentin- und Mäander, und man kann deshalb sagen, dass der Lauf von seiner vollendeten Ausbildung umkehrt und wieder verwildert; die äusseren Partien des Deltas gehören ja auch dem jüngsten Teile des ganzen Flusses an.

Je weiter das Delta wächst, und je älter seine fertiggebildeten Partien werden, umsomehr entwickelt sich aber der Flusslauf und reift. Es findet dann ganz dieselbe Entwicklung statt wie im Mittellauf, indem die kleineren Seitenarme seicht werden, die Inseln sich zu grösseren Landgebieten zusammenschliessen und der Fluss sich in eine Furche konzentriert, deren unregelmässige Krümmungen und Windungen allmählich umgeformt und symmetrisch werden, so dass schliesslich ein Serpentin- und Mäanderlauf vorhanden ist. Da das Delta breit und ausschliesslich aus feinem, losem Material aufgebaut ist, so hat der Fluss schon von Anfang an eine grosse Bewegungsfreiheit, und die Entwicklung schreitet schnell vorwärts. Erstreckt sich also der Serpentinlauf durch seine gradweise Reife langsam flussaufwärts, so verlängert er sich auch durch den Aufbau *des Deltas* und *seine Umbildung zu einer regelmässigen Talsohle* abwärts.

Ein gutes Beispiel für eine solche allmähliche Entwicklung eines gewöhnlichen unregelmässigen Stromarmes zu typischen Bogen in einem Delta bietet ein Nebenarm (zwischen B und C in Fig. 5) der auf Taf. 1 A wiedergegebenen Hauptfurche des Indalsälvs. Eine Feldkarte von 1765 (Bild A) zeigt einen breiten und nur schwach S-förmig gebogenen Kanal. Die gestrichelten Linien begrenzen die niedrigen Versandungen, die sich schon längs der konvexen Seiten zu bilden begonnen haben; Bogen mit typischer Serpentinform finden sich indessen nicht ausgebildet. Auf der Karte vom Jahre 1855 (Bild B) ist der Stromarm durch die Akkumulation der leewärts vom Strom liegenden konvexen und die Erosion der dem Strom ausgesetzten konkaven Seiten bedeutend mehr gebogen. Ein Vergleich zwischen den beiden Stadien zeigt auch in Übereinstimmung hiermit, dass der nördliche Bogen sich ein

wenig aufwärts, der südliche bedeutend abwärts verschoben hat, während deren Breite sich gleichzeitig vermindert hat. Es herrscht jetzt eine ausgeprägte S-Form, und der Stromlauf fliesst dicht an die konkaven Ufer angedrückt.

Im Stadium 1911 (Bild C) hat der Strom schliesslich den regelmässigen, serpentinförmigen Bogenlauf erreicht. Aus zwei markierten Bogen mit ausgeprägten Kolken zusammengesetzt und durch einen seichten Übergang getrennt, gleicht die Form einem zusammengedrückten S. Ausgeprägte niedrige Landzungen bilden die konvexen Ufer, scharfe Erosionsabhänge die konkaven, an denen der Strom sehr dicht einherfliesst.

Charakteristik des Serpentin- und Mäanderlaufes.

Was nun die gradweise entstandenen Serpentin- und Mäanderläufe betrifft, so haben sie, wie bekannt, eine sehr regelmässige Form. Infolge derselben hat der Bogenlauf auch die Aufmerksamkeit in hohem Grade auf sich gelenkt und ist oft untersucht worden, wodurch er im Verhältnis zu den anderen Entwicklungsstadien des fluvialen Zyklus relativ wohlbekannt ist. Die früheren, jüngeren Stadien besitzen ebenso wenig eine bestimmte charakteristische Form, sondern jeder besondere Fall zeigt seine — stetig wechselnde — Ausbildung. Die Serpentin- und Mäanderläufe weisen dagegen sowohl in ihrer äusseren Lage wie in den inneren Stromverhältnissen und in der Bodenkonfiguration einen bestimmten Grundtypus auf.

Da der freie Bogenlauf, wie gesagt, eingehend studiert und allgemein bekannt ist, ist hier keine ausführlichere Beschreibung desselben erforderlich. Schon bei der Darstellung des festen Flusslaufes und seiner Veränderung bei der Freimachung erhielt ich ausserdem Anlass, den Serpentinlauf und seine Verschiedenheiten von dem des Stromes in dem festen Flusslaufe zu berühren. Ich will deshalb hier nur einige Tatsachen erwähnen, welche die vorher in Bezug auf den Materialtransport und die Entwicklung des Fluss-

laufes dargelegten Gesichtspunkte beleuchten. Für letzteres hat der regelmässige Bogenlauf sein besonderes Interesse, da er das Endstadium und das Resultat ist, zu welchem die bestimmenden Prinzipien und Gesetze geführt haben.

Bei der Darstellung der Entstehung und Verschmelzung des Transportdeltas zu grösseren Transportkörpern habe ich hervorgehoben, dass sich die Zickzacklage der letzteren im festen Flusslaufe allmählich dadurch gebildet hat, dass der Strom infolge der durch die Transportkörper aufgestellten Hindernisse ständig ausbiegen und auf diese Weise sein mitgeführtes Material schräg vor der dahinterliegenden Anhäufung abladen muss. Die derart gebildete Rinne zwischen den verschiedenen Bänken wird dann freigehalten und durch den Strom entwickelt. Der Serpentinlauf des Stromes in einem festen Fluss ist somit durch den Materialtransport und dessen Mechanik bedingt und beinahe a priori bestimmt. Der Bogenlauf des freien Flusses beruht, wie vorher betont, auch auf der Transporttätigkeit des Stromes.

Auf Seite 59 habe ich eine übersichtliche Darstellung von dem Prinzip der Entwicklung einer Urkrümmung zu einem regelmässigen Bogenlauf gegeben. Jede nähere Beschreibung hat den Charakter eines Spezialfalles, da die gegebene Ausgangsform die ganze Entwicklung bestimmt. In Übereinstimmung mit der falschen Ansicht, dass es zufällige Hindernisse im Laufe sind, die die Bogen verursachen, wird oft die Entwicklung des Mäanders aus einer geraden Strecke gedacht. VUJEVIĆ (38) nimmt also in seiner äusserst schematischen und mathematisch vereinfachten Darstellung eine gewisse Länge (1) an, die sich allmählich immer mehr biegt und schliesslich einen geschlossenen Mäander bildet. Ferner lässt VUJEVIĆ den einmal angelegten regelmässigen Bogen unter Beibehaltung seiner symmetrischen Kreisperipherieform sich bis zu einem geschlossenen Mäander entwickeln. Dies hiesse indessen die in der Natur vorkommende Entwicklung allzu sehr aufopfern, um eine einfache und übersichtliche Entwicklung zu bekommen. Der Bogen ist nämlich in seiner ersten Ausbil-

dungszeit nicht symmetrisch, sondern die obere (flussaufwärts gerichtete) Hälfte ist in der Regel gerader oder sogar etwas konkav, während die untere Hälfte krumm und konvex ist (s. Fig. 6). Auf diese Weise erhält also die zwischenlie-

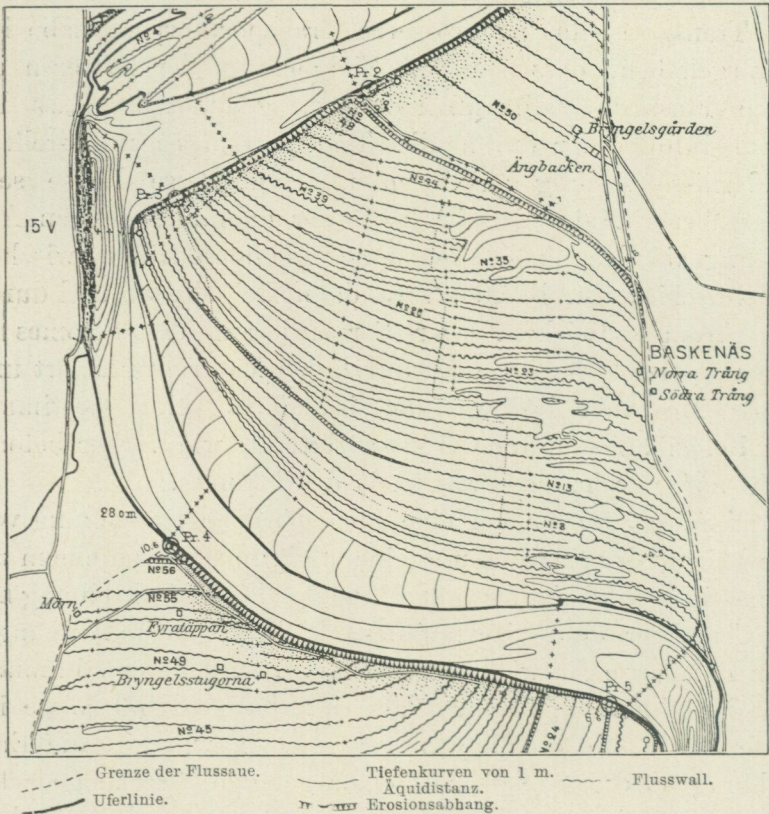


Fig. 6. Eine Serpentine des Klarälvaufes (nach S. DE GEER).
 Masstab. 1:10 000.

gende Landzunge die Form eines ungleichseitigen und krummen Dreiecks und nicht eines Kreissegments. Infolgedessen wechseln die Radien (R) in jedem Punkte der Serpentine. Beim Übergang von einer Serpentine in eine andere ist der Fluss beinahe gerade und somit $R = \infty$, dann nimmt die Biegung immermehr zu und erreicht an der Spitze ihr Minimum, wodurch die Zentrifugalkraft und damit auch die morpholo-

gisch effektive Kraft hier am grössten und am meisten gegen die äussere Seite gerichtet ist.

Von entscheidender Bedeutung für die ganze Entwicklung des Bogens ist fernerhin das Verhältnis *zwischen lateraler und vertikaler Erosion*. Schon oben habe ich darauf aufmerksam gemacht, dass diese beiden im allgemeinen gleichzeitig arbeiten, und dass die eine oder andere nicht ausschliesslich einem Stadium des fluvialen Zyklus angehört oder ein solches charakterisiert. Die Steigerung an morphologisch effektiver Kraft, die der Strom in Krümmungen erhält, wird daher sowohl in der seitlichen Erosion wie in der vertikalen ausgelöst. Zuweilen kann es jedoch vorkommen, dass die eine Erosion die Oberhand gewinnt und die andere unterdrückt. Im Ragundagebiete liegen gute Beispiele hierfür vor, indem der Fluss in einer Krümmung infolge der Feinheit des dortigen Materials eine fast ausschliesslich laterale Erosion ausübt. Die Tiefe ist deshalb auch hier sehr unbedeutend und übersteigt nicht die Tiefe der *geraden* Strecken mit derselben Breite. An einer anderen Krümmung ist dagegen die laterale Erosion durch Uferbekleidung und Moränenboden gehindert, und alle Kraft kommt deshalb für die Tieferosion zur Anwendung. Dies hat zur Folge gehabt, dass die Tiefe hier das Maximum für das ganze Ragundagebiet, nämlich 12 m, erreicht. In Übereinstimmung hiermit dürften die Kolke im Serpentinelauf des Stromes zwischen festen Ufern relativ tiefer als in dem des freien Flusses sein und ein gebundener und gehemmter Serpentinelauf grössere Übervertiefungen darbieten als ein vollkommen freier. So ist beispielsweise der Serpentinelauf des Klarälvs (12) infolge der geringen Breite des Tales so gebunden, dass die Serpentin an schwer erodierbaren Moränenboden gestossen sind und gehindert werden. Eine nennenswerte Erweiterung in horizontaler Richtung kann deshalb nicht stattfinden, wohl aber eine Tieferosion, was ja auch der Fall zu sein scheint. E. DE MARGERIE und DE LA NOÉ (30) haben derartige Bogen mit überwiegend oder ausschliesslich vertikaler Entwicklung beobachtet und nennen

Laterale und vertikale Erosion.

sie zum Unterschied von den freien, beweglichen Mäandern »Méandres encaissés«.

Im allgemeinen dürfte der Bogenlauf jedoch grössere Voraussetzungen für laterale als für vertikale Erosion haben, denn die Talsohle ist, als Endstadium des ganzen fluvialen Zyklus oder eines umgebildeten Deltalaufes, in der Regel breit und die Erosionsbasis in unmittelbarer Nähe. Infolgedessen wächst auch ein angelegter Bogen nach und nach seitlich aus und nimmt die eben angegebene Form an. Wenn die Strömung nicht heftig oder das Ufer besonders leicht erodierbar ist, findet nicht eine übertrieben starke Seitenerosion mit Unterdrückung der vertikalen statt, sondern die Tiefenverhältnisse bleiben gleichzeitig mit der Erweiterung in horizontaler Richtung bestehen. Hieraus folgt, dass die Serpentine oder der Mäander ein Tiefenzentrum oder einen Kolk in der am stärksten gekrümmten Partie des Bogens und einen Pass an dem mehr oder weniger geraden Übergang während der ganzen Entwicklung aufweisen. Das Tiefenzentrum des Kolkes liegt jedoch nicht regelmässig an der Spitze des Bogens und ein Pass nicht mitten im Übergang, sondern wie FARGUE'S (16) erster Satz lautet: die grösste Tiefe des Talweges liegt etwa um das doppelte Mass der Strombreite unterhalb der schärfsten Krümmung des Flusslaufes und die kleinste Tiefe ungefähr um dasselbe Mass unterhalb des Wechsels der Windung.

Die weitere topographische Entwicklung des Bogens, bis das Endstadium in dem geschlossenen Mäander erreicht ist, ist so oft geschildert worden, dass sie nicht relatiert zu werden braucht. Von Interesse für diesen Aufsatz ist jedoch das sowohl von BOWMAN (5) als DAVIS u. a. nachgewiesene Verhältnis, dass der Bogen der Serpentine nach Erreichung ihrer schärfsten Krümmung in einem gewissen Stadium sich wieder erweitert, so dass die Radien zunehmen und die Zentrifugalkraft abnimmt. BOWMAN (5) verlegt auch die Grenze zwischen Krümmung und Mäander in das Stadium, wo der Radius sich von seinem niedrigsten Werte aus wieder vergrössert; nach

VUJEVIĆ'S Darstellung besteht dieses Stadium aus einem symmetrischen Kreisbogen mit $R = \frac{l}{2}$. Infolge dieser Veränderung der Krümmungsradien des Bogens geht die Entwicklung im Anfang am schnellsten vor sich, um dann abzunehmen. Ihr Ende ist erreicht, wenn beide Schenkel des Mäanders sich so genähert haben, dass ein Durchbruch geschieht, der Bogen tot wird und ein neuer sich bildet.

Ausser dieser peripherischen lateralen Erosion, die den Bogen erweitert, findet wie bekannt auch eine »innere« statt, die darin besteht, dass der Strom die obere Seite der Landzunge erodiert und auf der unteren akkumuliert, und die darin resultiert, dass das ganze Bogensystem talabwärts verschoben wird. Die Folge davon ist auch, dass die obere und die untere Seite der Landzunge verschieden ausgebildet sind. Die obere ist nämlich steil und hoch, die untere dagegen sanft abfallend und von einer halbmondförmigen Akkumulationsbank aufgebaut. Diese ist nach den genauen Karten und Beschreibungen S. DE GEER'S (12) aus einem ganzen System »quergestellter Sandplatten zusammengesetzt, die eine äusserst flache, gewölbte oder platte Seite und einen jähren Abhang haben, wo der Sand in 30 Grad Neigung liegt«. Diese Sandplatten sind möglicherweise meinen vorher beschriebenen Transportdeltas äquivalent und geben somit eine weitere Stütze für die Allgemeingültigkeit meiner vorher gegebenen Darstellung der Transportmechanik des Geschiebes ab. Ihre Deltanatur hat auch S. DE GEER erwähnt, denn er betont, »dass die Ablagerung auf den Halbmondbänken schichtenweise geschieht, indem Querbänke von einigen Decimeter Mächtigkeit die eine über die andere emporwachsen«.

Infolge des Prinzips der Continuität des Stromes oder des Bestrebens des Wassers, gleichförmige Quersektionen zu schaffen, halten die Erosion und die Akkumulation im allgemeinen gleichen Schritt miteinander, und die Breite und Tiefe des Flusses wird während der Verschiebung des Bogens nach unten konstant gehalten.

Die Verhältnisse zwischen dem Bogenlaufe der festen und der freien Flüsse.

Aus dieser orientierenden Beschreibung erhellen unmittelbar die Übereinstimmungen und Abweichungen zwischen dem Bogenlauf des Stromes in einem festen Fluss und dem Serpentin- und Mäanderlauf eines freien. Die Form des Talweges stimmt überein, die Art aber, in welcher die morphologisch effektive Kraft des Stromes sich aktualisiert, ist in den beiden Fällen sehr verschieden. In dem festen Flussbett, wo seitliche Erosion unmöglich wird, löst sich die Kraft nur in Tieferosion und Transporttätigkeit aus. Die erstere resultiert in stark übervertieften Kolken, die der Sohlenkurve des Talweges einen scharf gebrochenen Verlauf verleihen; die letztere ist sehr intensiv, indem die Bänke als geschlossene Einheiten vorwärtswandern und auf diese Weise den ganzen Bogenlauf relativ schnell flussabwärts verschieben. Das ganze Oberflächenlager der Bank ist bei Hochwasser im Transport begriffen, und kein Punkt ist in Ruhe, weshalb man also den ganzen Bogenlauf des Stromes als ständig beweglich oder labil charakterisieren kann. Der freie Fluss hat sich dagegen durch seine seitliche Erosion eine feste Landzunge geschaffen, was dem ganzen Lauf eine gewisse Stabilität verleiht. Die Bank, die vollständig innerhalb des Wirkungsbereiches des Transportmittels liegt, wird nämlich im ganzen vorwärtsgeschafft, während die Landzunge nur längs den Seiten der Stromkraft ausgesetzt ist und im übrigen mit ihrer ganzen festen Masse unberührt daliegt.

Die Bahnen, denen das losgelöste Material bei seiner Vorwärtsbewegung von der oberen Seite der Landzunge her folgt, sind noch nicht näher bekannt, da direkte Beobachtungen infolge der Tiefe und des Treibens des Flusswassers beinahe unmöglich sind. Im allgemeinen scheint man anzunehmen, dass das Material eines Erosionsufers sich auf einer unterhalb liegenden Akkumulationsbank absetzt, nachdem es einen ganzen Bogen durchlaufen hat. Nach FARGUÈ's (18) und ENGELS' (14) Experimenten scheint jedoch die Geschiebebewegung quer zum Strom des Talweges sich zu vollziehen und somit von einem Erosionsufer zu der gegenüberliegenden

Akkumulationsbank hinüberzugehen. Ob dies wirklich in der Natur stattfindet, ist indessen noch nicht festgestellt, weshalb die Frage der ganzen Verschiebung des Bogensystems noch eine offene sein dürfte.

Bei dem Bericht über den Serpentinlauf des Stromes im festen Flusse betonte ich den wichtigen Umstand, dass die Anzahl der Bänke sich bei zunehmender Stromgeschwindigkeit vermehrt, und dass die Bänke sich näher aneinander schieben, so dass die Bogen kürzer werden, oder mit anderen Worten, dass der Serpentinlauf schärfer und zusammengedrückter wird. Bei dem Bogenlauf des freien Flusses hat die Stromgeschwindigkeit denselben Einfluss, denn die Bogen in einem schnell vorwärtsfliessenden Fluss sind nach VUJEVIĆ u. a. klein und scharf und bewegen sich mit relativ grosser Geschwindigkeit talabwärts, während ein langsam hingleitender Strom grosse, gut ausgebildete Mäander aufweist, die äusserst langsam vorwärtsgeschoben werden.

Dieses Verhältnis muss darauf beruhen, dass bei schnellen Flüssen die »innere« Erosion grösser als die äussere, periphere ist. Ferner ist wahrscheinlich die Tieferosion grösser als bei langsamen Flüssen, welche die Nähe der Erosionsbasis erreicht haben und deshalb ihre Gefällkurve nicht weiter senken können. Die morphologisch effektive Kraft wird, mit anderen Worten, hier hauptsächlich in lateraler Erosion aktualisiert, wobei eine bedeutende Erweiterung des Bogenlaufes stattfindet.

Dieser direkt nachgewiesene Einfluss der Stromgeschwindigkeit auf die Breite des Mäandergürtels sowie das vorher behandelte Verhältnis zwischen lateraler und vertikaler Erosion beweisen deutlich die Unrichtigkeit des JEFFERSON'schen (26) Versuchs der Feststellung einer gewissen bestimmten Relation $\left(\frac{mb}{w} = 18\right)$ bei allen Flüssen zwischen der Breite des Mäandergürtels (mb) und der Breite des Flusses (w) ohne Rücksichtnahme auf die Geschwindigkeit und das Volumen des Stromes. Ausser all den Schwierigkeiten, die in der Praxis

Die Abhängigkeit zwischen Stromgeschwindigkeit und Form des Mäandergürtels.

sich einer Messung des Mäandergürtels in den Weg stellen, und der Rücksicht, die man hierbei auf das Alter und das Entwicklungsstadium des Bogenlaufes, das Material und die Ausbildung der Talsohle, lokale Hindernisse mit dadurch bedingten Unregelmässigkeiten, verlassene und verwischte Betten und Furchen u. s. w. zu nehmen hat, ist die Annahme, dass die Flussbreite (w) eine Konstante sei, theoretisch unrichtig, denn sie ist eine Variable von Wasservolumen und Geschwindigkeit. Solange unsere Kenntnis des Verhältnisses zwischen Veränderungen der Flusssektionen, Stromgeschwindigkeit und Wasservolumen noch so mangelhaft sind wie jetzt, und solange wir die innere Entwicklungsmechanik (Transportwege des Materials, Erosion und Akkumulation u. s. w.) bei den Veränderungen der Serpentinien und Mäander noch nicht kennen, ist es überhaupt nicht gerechtfertigt, bestimmte Relationswerte zwischen der Bogenlänge oder Bogenbreite des Flusses und dem Wasservolumen, der Geschwindigkeit und der davon abhängigen Breite und Tiefe aufstellen zu wollen.

Der Mäander-
lauf als End-
stadium des
Zyklus.

Was die Art betrifft, wie der Bogenlauf des freien Flusses in seiner Entwicklung den Prinzipien der Gleichwertigkeit der Quersektionen und dem Gesetz der Zentrifugalkraft folgt, so kann man sagen, dass er einen ständig fortschreitenden Ausgleich oder Harmonie zwischen den beiden entgegengesetzten Gesetzen zeigt. Oben ist schon nachgewiesen worden, dass die Entwicklung eines Bogens anfänglich schnell vor sich geht, wenn er scharf gebogen ist, dann aber langsamer, wenn er sich erweitert und grössere Krümmungsradien erhält. Unter der Voraussetzung, dass horizontale und vertikale Erosion gleichzeitig stattfindet und die eine nicht ganz überwiegt und die andere unterdrückt, wechseln in den ersten Entwicklungsstadien stark übervertiefte Kolke schnell mit hohen Übergängen ab; die Sohlenkurve des Talweges ist also stark gebrochen, die Stromgeschwindigkeit sehr verschieden in nahe liegenden Sektionen und der Lauf unregelmässig. Je weiter die Entwicklung dann fortschreitet und die scharfe Krümmung

sich zu einem grossen Bogen erweitert, umso geringer sind die Übervertiefungen der Kolke im Verhältnis zu den Pässen. Diese letzteren werden dann auch dadurch gesenkt, dass die Bogen einen immer gleichmässigeren, kontinuierlichen Übergang ohne gerade und breite Strecken erhalten haben. Durch die Länge des Mäanders werden auch die Kolke und Pässe mehr in die Länge gezogen und liegen weiter von einander entfernt als früher, wodurch die Sohlenkurve des Talweges jetzt eine weiche, nur schwachgebogene Linie aufweist. Der Strom wird hierdurch kontinuierlicher, und sowohl Vorwärtsfliessen als auch Erosion und Transporttätigkeit werden regelmässiger und gleichmässiger. Der Gegensatz und Kampf, der während der früheren Entwicklung des fluvialen Zyklus zwischen dem Prinzip der gleichförmigen Querprofile und dem Gesetz der Zentrifugalkraft stattgefunden hat, hat sich immermehr ausgeglichen und ist damit beigelegt, dass im Mäanderlauf des Endstadiums ein inneres labiles Gleichgewicht hergestellt worden ist.

Litteraturverzeichnis.

1. AHLMANN, H. W:SON: The morphology of Arpojaure, G. F. F. Bd. 36. Stockholm 1914.
2. — — Ragundasjön. I. Morfologi, S.G.U. Ser. Ca N:o 12.
3. BASCHIN, O.: Die Entstehung wellenähnlicher Oberflächenformen. Ein Beitrag zur Kymatologie, Zeitschr. für Erdkunde. Bd. 34. Berlin 1899.
4. BERTOLLY, E.: Kräuselungen und Dünen. Münchener Geogr. Studien, 9:tes Stück. München 1900.
5. BOWMAN, I.: Deflection of the Mississippi. Science. Vol. 20. New York 1904.
6. CANDOLLE, M. C. DE: Rides formées à la surface du sable déposé au fond de l'eau et autres phénomènes analogues. Bibl. univ. de Genève 1883. Archives d. science phys. et natur. III pér. IX tome.
7. CREDNER, G. R.: Die Deltas. Petermanns Mitt., Ergänzungs-Heft 56. Gotha 1878.
8. DARWIN, G. H.: On the Formation of Ripplemark in Sand. Proc. of the Roy. Soc. of London. Vol. XXXVI und Nature Vol. XXIX.
9. DAVIS, W. M.: Baselevel, grade and peneplain. Jour. of Geol. Vol. IX. 1902.
10. — — : The Development of River Meanders. Geol. Magazine, Vol. 10. London 1903.
11. — — : Die erklärende Beschreibung der Landformen. Leipzig und Berlin 1913.
12. DE GEER, S.: Klarälfvens serpentin och flodplan. S. G. U. Årsbok 4 (1910). N:o 8. Stockholm 1911.
13. DOELL, A.: Die Regulierung geschiebeführender Wasserläufe besonders des Oberrheins. Fortschritte der Ingenieurwissenschaft. Zweite Gruppe, 6. Heft. Leipzig 1896.
14. ENGELS, H.: Das Flussbaulaboratorium der Kgl. Techn. Hochschule zu Dresden. Zeitsch. f. Bauwesen. 1900.
15. — —: Untersuchungen über die Bettausbildung gerader oder schwach gekrümmter Flussstrecken mit beweglicher Sohle. Zeitschr. f. Bauw. 1905.
16. FARGUE: Etudes sur la corrélation entre la configuration du lit et la profondeur d'eau dans la rivière à fond mobile. Ann. des ponts et chaussées. 1868.
17. — : Etudes sur la largeur du lit moyen de la Garonne. Ann. des ponts et chaussées. 1882.
18. — : Expériences relatives à l'action de l'eau courante sur un fond de sable. Ann. des ponts et chaussées. 1894.

19. FOREL, F. A.: Le Leman. Lausanne 1892.
 20. GREBENAU, H.: Der Rhein vor und nach seiner Regulierung. Durkheim a. d. H. 1870.
 21. GILBERT, G. R.: Report on the Geology of the Henry Mountains. Depart. of the Interior. U. S. Geogr. und Geol. Survey of the Rocky Mountain Region. Washington 1880.
 22. HONSELL, M.: Der natürliche Strombau des deutschen Oberrheins. Verh. d. 7. Deutsch. Geogr.-Tages zu Karlsruhe 1887. Berlin 1887.
 23. HOOF, VAN: Referat zum Binnenschiffahrts-Kongress im Haag 1894.
 24. HUMPHREYS, A. A. and ABBOT H. L.: Report upon the Physics and Hydraulics of the Mississippi River. Profess. Paper of the Corps of Eng. U. S. A. 13. Philadelphia 1861.
 25. JASMUND, R.: Die Gewässerkunde (Kap. II: Fließende Gewässer). Handbuch der Ingenieurwissenschaft. Dritter Teil. Bd. I. Leipzig 1911.
 26. JEFFERSON, M. S. W.: Limiting Width of Meander Belts. Nat. Geogr. Magaz. Washington 1902.
 27. KRÜMMEL, O.: Handbuch der Ozeanographie II. Stuttgart 1911.
 28. LAVALE, G.: Unsere natürlichen Wasserläufe, herausg. von J. Rapp. Weithelm 1883 (ref. in 15).
 29. LEONHARD, R.: Der Stromlauf der mittleren Oder. Dissertation. Breslau 1893.
 30. NOÉ, DE LA et MARGERIE, E. DE: Les formes du terrain. Paris 1888.
 31. PARTIOT: Sur les sables de la Loire. Ann. des ponts et chaussées. Memoire N:o 5, Tome I. Paris 1871.
 32. PENCK, A.: Die Donau. Vorträge des Vereines z. Verbr. naturw. Kenntnisse in Wien XXXI. Wien 1891.
 33. — : Morphologie der Erdoberfläche. Stuttgart 1894.
 34. REYNOLDS, O.: Motion of Water. Nature. Vol. XXVIII. London 1883.
 35. RÜMELIN, TH.: Wie bewegt sich fließendes Wasser? Dresden 1913.
 36. SOKOLÓW, N. A.: Die Dünen. Deutsch v. Arzrum. Berlin 1894.
 37. TOWER, W. S.: The development of Cut-off Meanders. Bull. Amer. Soc. 1904. Vol. 36.
 38. VUJEVIĆ, P.: Die Theiss, eine potamologische Studie. Geogr. Abhand., herausg. von A. Penck. Bd. 7. Leipzig 1906.
 39. WEX, S.: Fortschritte der Ausbildung des regulierten Donaubettes. 1880 (ref. in 12).
-

**Bild 1. ENTWICKLUNG EINES STROMZWEIGES
ZU DEM HAUPTARME DES INDALSÄLFDeltas**
Massstab 1:15 000

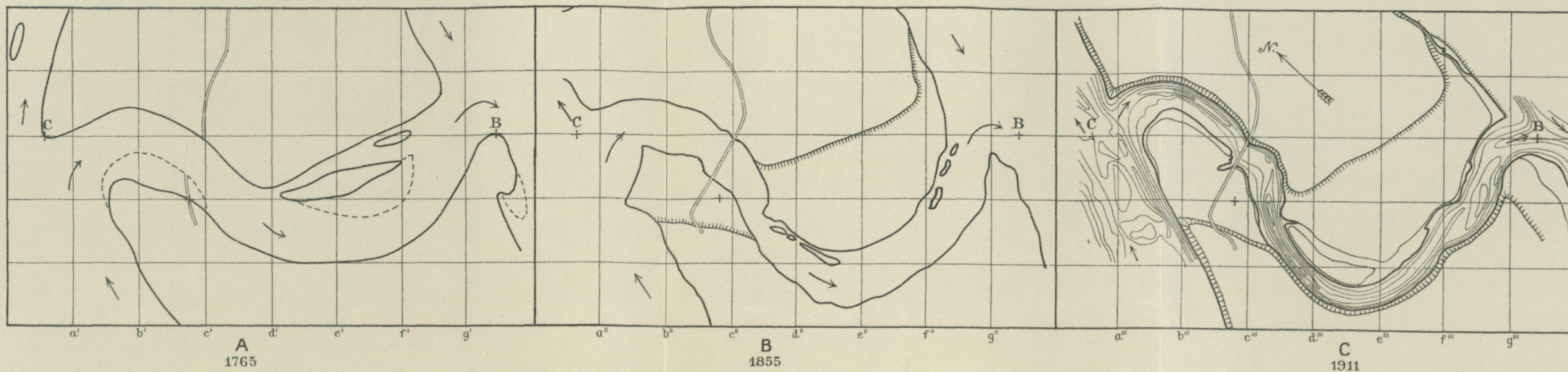


Bild 2. RELIEFPLAN DES STROMBETTES IN DEM HAUPTARME DES INDALSÄLFDeltas

— Hochwassergrenze
 - - - - - Niedrigwassergrenze
 — Tiefenkurven mit einer Äquidistanz von 0.6 m.

0 - 1.8 m.
 1.8 - 3.6 „
 3.6 - 5.4 „

Massstab 1: 7500

