

Die Flußmäander als Gleichgewichtsform der Erosion

Von W. WUNDT¹, Freiburg i. Br.

Wer kennt sie nicht, die merkwürdigen Flußschlingen, die man nach dem Vorbild eines kleinasiatischen Flüßchens *Mäander* genannt hat? In weit ausholenden Serpentinen durchfließt der Mississippi die Ebenen seines Unterlaufes, in zahlreichen Windungen durchzieht die Mosel das Rheinische Schiefergebirge, in ganz kleinen Mäandern schlängeln sich unsere Bäche durch den Wiesengrund. So bekannt diese Erscheinung, so gering ist unsere Kenntnis von ihren *geophysikalischen Ursachen*. Vom Standpunkt der Mechanik aus soll hier ein Beitrag zur Erklärung dieser auffälligen Formen geleistet werden!

Wir bringen die Mäander in Zusammenhang mit dem Begriff der *Erosion*, der Ausnagung des Bodens durch Bäche und Flüsse. Die Erosion sucht das Flußbett teils zu vertiefen (*Tiefenerosion*), teils seitwärts zu verbreitern (*Seitenerosion*). Bei beiden Arten wird das Vorhandensein eines Bachbetts bereits vorausgesetzt. Aber der Regen, der die Flüsse in letzter Linie speist, wirkt ja flächenhaft, hat also das Bestreben, die Erdoberfläche als *Ganzes* abzuspülen. Erst wenn sich die kleinen aus dem Regen stammenden Wasseradern zusammenschließen, bekommen sie die Kraft, auch in die Tiefe zu wirken und Bachbetten zu bilden. Man unterscheidet daher neben der Tiefen- und Seitenerosion, die man als *lineare Erosion* zusammenfaßt, eine vorausgehende *Flächenerosion*². Von wesentlichem Einfluß für das Überwiegen der einen oder anderen Art ist die *Pflanzenbedeckung*, denn sie wirkt als Schutz gegen die flächenhafte Abtragung und verweist die erodierende Kraft auf die nächste Umgebung der Flußbetten. Die Trockenzonen und die Polarzonen, die von Vegetation entblößt sind, geben daher der Flächenerosion viel breiteren Raum als die humiden Erdgürtel, wo sich die Erosion im wesentlichen auf die Erweiterung und Umgestaltung der vorhandenen Wasserrinnen beschränkt³.

Mit der Erosion ist die *Akkumulation* (Aufschüttung) unmittelbar verknüpft. Man könnte annehmen, daß das vom Fluß mitgenommene Material ins Meer hinausbefördert werde und uns daher in diesem Zusammenhange nicht berühre. Das trifft aber nicht zu! Nur ein sehr kleiner Teil des im Gebirge abgeschwemm-

ten Erdreichs erreicht das Meer; die Hauptmasse wird schon in den Talstrecken des Gebirges und in dessen Vorland abgelagert. Man glaubte früher, dem Oberlauf der Flüsse vorwiegender Erosion, dem Mittellauf Gleichgewicht und dem Unterlauf vorwiegender Akkumulation zuschreiben zu dürfen. Aber diese Auffassung muß einer exakteren Betrachtung weichen! Der Rhein z. B. hat gewissermaßen drei Unterläufe (besser Erosionsbasen), den Bodensee, die Oberrheinische Tiefebene und schließlich sein Mündungsgebiet in Holland. Ferner müßten bei einer dauernden Abtragung im Quellgebiet, einer dauernden Aufschüttung im Mündungsgebiet längst eine Ausehnung der Gebirge eingetreten sein. Aber die Geologie zeigt mindestens für den letzten Abschnitt der Erdgeschichte das gerade Gegen teil: die großen Faltengebirge sind im späteren Tertiär erst *entstanden* und die gleichzeitig wirkende Abtragung war offenbar nicht stark genug, um mit der Hebung des Landes Schritt zu halten. Wir erkennen also in der Erosion einen *Wettlauf* der tektonischen Hebung und Faltung mit der gleichzeitigen Abtragung. Nehmen wir z. B. die Oberrheinebene mit den begleitenden Gebirgen Schwarzwald und Vogesen. Während sich der Rheingraben senkte oder wenigstens in gleicher Höhe blieb, wurden die alten Landoberflächen an seinen Rändern emporgehoben und ihre Abdachungen nach außen hin zum schwäbischen bzw. lothringischen Stufenland umgestaltet. Die Erosion wurde dadurch auf beiden Seiten des Schwarzwalds und der Vogesen, besonders aber gegen den Rhein hin, stark belebt; die dem Rhein direkt zuströmenden Flüsse bildeten am Rande des Gebirges tiefe Kerb rinnen, während das losgelöste Material in der zwischen liegenden Ebene abgelagert wurde. Aber nicht überall konnte die Erosion mit der Hebung gleichen Schritt halten. So zeigen der Neckar bei Heidelberg, die Dreisam bei Freiburg beim Austritt aus dem Gebirge Stromschnellen, die beweisen, daß die Hebung etwas rascher erfolgte als die Eintiefung¹, auch die Schuttablagerungen in den Schlingen bei Mauer und im Zartener Becken weisen darauf hin, daß die Überschreitung des Gebirgsrandes durch die randliche Hebung behindert wurde².

¹ Universität Freiburg i. Br.

² H. KUROK, *Die Gefahren der Bodenerosion und ihre Bekämpfung*. Mitt. d. Reichsverb. d. Deutsch. Wass.wirtsch. Nr. 45 (1938).

³ H. MORTENSEN, *Sechzig Jahre moderne geographische Morphologie*. Jb. Akad. d. Wiss. Göttingen, 1943/44.

1 G. WAGNER, *Einführung in die Erd- und Landschaftsgeschichte* (1931). (Neue Auflage im Druck).

2 J. L. WILSER, *Beziehungen des Flußverlaufes und der Gefällskurve des Neckars usw.* Sitzber. Akad. Heidelberg, 1937.

Erosion und Akkumulation zeigen also ein örtlich und zeitlich rasch wechselndes Bild. Typische Kennzeichen vorwiegender *Ausnagung* sind enge Kerbtäler und Klammen, die mit Steilstrecken der Flüsse verbunden sind; das Hauptfeld für die Tätigkeit der *Aufschüttung* sind die großen Schuttkegel, die sich vom Gebirgsrand in die Ebenen hinaus erstrecken. Auf ihnen breitet sich ein unregelmäßiges Netz von Wasseradern aus, die sog. «verwilderten» Flüsse, zu denen auch der Rhein in seinem Uruzustand oberhalb des Bodensees und unterhalb von Basel gehört

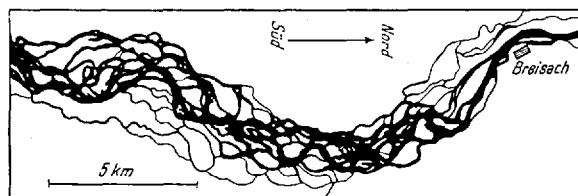


Abb. 1. Verwildelter Fluß (Rhein oberhalb Breisach).

(Abb. 1). — Ein ähnliches Gebiet vorwiegender Aufschüttung finden wir bei der Mündungsphase der Flüsse ins Meer. Hier kommen aber noch eine Reihe anderer Faktoren in Betracht, wie Ebbe und Flut und Niveauänderungen des Meeres, die an der Gestaltung der Flußbetten mitwirken und die Materialverfrachtung sehr unregelmäßig gestalten. Aber die Deltabildung ist der Bildung der Schuttkegel ganz analog: der Fluß ist nicht in der Lage, seine Schwebstoffe völlig ins Meer hinauszuschaffen und lagert sie im eigenen Bett ab. Die daraus folgende Verstopfung zwingt den Strom — genau wie bei den verwilderten Flüssen — zu periodischen Verlegungen des Laufes (Hoangho!).

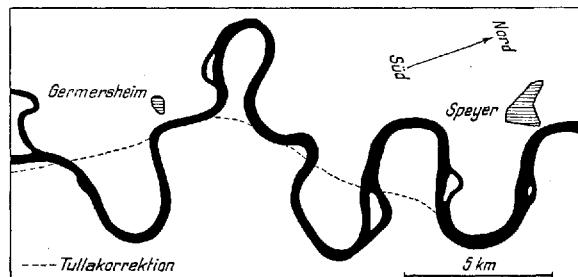


Abb. 2. Ebenenmäander des Rheins unterhalb Straßburg.

Das Hauptbild für die Formung unserer Flußbetten wird also durch den Wettstreit von Erosion und Akkumulation gegeben, wobei oft gewaltsame Umänderungen eintreten. Aber auch bei diesem Kampf gibt es Strecken, in denen eine gewisse Ruhe oder relatives Gleichgewicht herrschen; das sind die Stellen mit *Mäanderbildung*. Nehmen wir als Beispiel den Rhein unterhalb von Basel! Schon in der Strecke bis Breisach zeigt der verwilderte Strom (vor der Tullakorrektion) die deutliche Neigung zu kleinen Mäandern, aber die Selbstverstopfung und häufige Lauf-

verlegung läßt es hier nicht zur Ausbildung richtiger Schlingen kommen (Abb. 1). Erst unterhalb Straßburg, wo eine starke Gefällsminderung eintritt, kommt ein Gleichgewicht zustande, das sich in schönen Schlingen kennzeichnet (Abb. 2). Mäander an großen Flüssen der Ebene (sog. Wiesenmäander) sind in Deutschland infolge der Korrekturen jetzt wenig mehr zu sehen, wohl aber in Frankreich, dessen Flüsse künstlichen Einwirkungen weniger unterworfen wurden. — Schon ausgebildete Mäander finden wir auch vielfach im *Gebirgslauf* der Flüsse; Abb. 3 zeigt solche für die Semois, einen Nebenfluß der Maas in den Ardennen. Die eingeschnittenen oder *Gebirgsmäander* werden zunächst als Erbstück aus einer früheren Erdperiode erklärt, als der Fluß schon mit seinen Wiesenmäandern, aber noch kein Gebirge vorhanden war. Die Flüsse, die ein Gebirge quer durchströmen, sind im allgemeinen *antezedente* Flüsse, sind älter als das Gebirge und haben dessen Bildung, die auf allmäßlicher *Hebung*

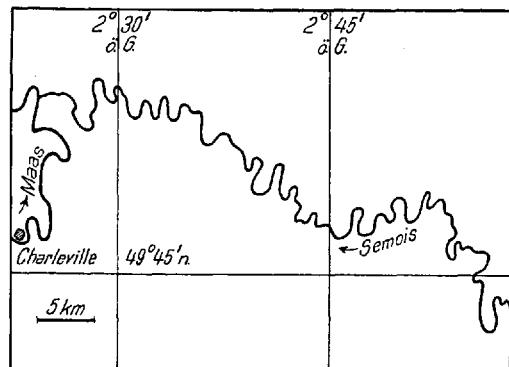


Abb. 3. Gebirgsmäander der Semois (Ardennen).

beruht, miterlebt; dabei haben sie die vorhandenen Mäander übernommen, aber auch Eigenschaften entwickelt, die den Wiesenmäandern fehlen (ausgesprochene Prall- und Gleithänge, Umlaufberge u. ä.)¹ Für die grundsätzliche Auffassung der Mäander als Gleichgewichtsform kommt diese Abwandlung aber erst in zweiter Linie in Betracht. — Von der Auffassung, daß sich ein Fluß durch den Anprall seiner Wassermassen auf ein Gebirge einen «Durchbruch» erzwingen könne, ist man längst abgekommen; ein solcher Vorgang könnte nur eine Aufstauung oder eine Ablenkung des Flusses zur Folge haben. Der Neckar war sicher schon vorhanden, ehe er durch den Odenwald «durchbrach»; die Landschaft stieg vielmehr in Verbindung mit der Bildung des Rheingrabens um den Neckar in die Höhe und er hatte gerade so viel Zeit, sich einzutiefen, daß er sein Bett nicht verlassen mußte. Nicht immer gelang es ihm aber, mit der Hebung gleichen Schritt zu halten, wie die obenerwähnten Stromschnellen bei Heidelberg zeigen¹.

Verfolgen wir nun die Wechselwirkung des Regens und der von ihm gebildeten Flüsse mit dem Boden vom

¹ G. WAGNER, I.c.

Standpunkt der Mechanik aus¹! Jede Kraft, die auf einen Körper einzuwirken sucht, ruft eine gleich große, ihr entgegengesetzte Trägheitskraft hervor (*actio*→*reactio*). Hiebei tritt das *Prinzip des kleinsten Zwangs* in Funktion, das wir bei GRIMSEHL-TOMASCHEK² so formuliert finden: «Jeder Vorgang, der durch eine äußere Einwirkung oder einen anderen primären Vorgang in einem System hervorgerufen wird, ist so gerichtet, daß er die Änderung des Systems durch die äußere Einwirkung oder den Primärvorgang zu verhindern sucht». Wenn also der Regen und die Flüsse die Erdoberfläche zu beeinflussen suchen, entsteht eine Sekundärkraft, die die Flußwirkung abzuschwächen sucht: die Erdoberfläche wehrt sich gewissermaßen gegen die aufgezwungene Änderung, setzt ihr ihre Trägheitskraft entgegen und sucht sie so zu lenken, daß möglichst wenig gewaltsame Eingriffe entstehen. — Eingangs wurde schon zwischen Flächenerosion und linearer Erosion unterschieden. Der Regen entscheidet sich bei entblößtem Boden für die flächenhafte, beim Vorhandensein einer Pflanzendecke für die lineare Erosion. Hier tritt das genannte Prinzip in der Form des *kleinsten Widerstandes* auf. Als «Ziel» der niedergehenden Wassermassen kann man bezeichnen: Erreichung des Meeresniveaus mit möglichst geringer Behinderung, denn sie suchen vor jedem Hindernis auszuweichen; als «Ziel» der Reaktionskräfte erscheint das Bestreben, den Boden möglichst intakt zu erhalten. Gegenseitige Einwirkungen sind zwar unvermeidlich, aber sie suchen sich auf ein *Minimum* einzustellen (daher auch Bezeichnung: Prinzip der *kleinsten Wirkung*). Ist dann das Studium der linearen Erosion erreicht, so handelt es sich für den Fluß um Tiefenerosion oder um Seitenerosion. Natürlich wird die Seitenerosion bevorzugt, denn einmal sind die obersten Schichten (unterhalb der Pflanzendecke) lockerer (es handelt sich meist um eigene Aufschüttungen), ferner kommt bei der Tiefenerosion zu der Lockerungsarbeit noch die Hebungswirkung hinzu. *Tiefenerosion* tritt also nur ein, wenn ein *Überschub* an kinetischer Energie vorhanden ist; bei starkem Gefäll, bei Hochwasser, bei Zusammendrängung auf engem Raum. Sobald sich diese Faktoren abschwächen, so hört die Tiefenerosion auf und es bleibt neben der später zu besprechenden *Wärmeentwicklung* nur die *Seitenerosion* übrig. Dabei ist zu beachten, daß bei jedem Wasserlauf zeitlich differenziert werden muß. Der gleiche Fluß, der bei Hochwasser in die Tiefe erodiert, schleicht sich bei Niederwasser als schmales Rinnsal durch seine eigenen Ablagerungen hindurch, wobei schließlich auch die Seitenerosion zum Erlahmen kommt. Dieses Bild der wechselnden Eintiefung und Aufschüttung zeigt der

Fluß besonders auf den «verwilderten» Strecken: bei Hochwasser reißt er eine tiefe Rinne, nimmt Laufverlegungen vor, lagert aber das mitgenommene Material sehr bald wieder ab (Vermehrungen, Überschwemmungen). Erst wenn sich mit fallendem Wasser die Vorgänge beruhigt haben, kann an Stellen mit geringerem Gefälle ein gewisser Gleichgewichtszustand eintreten: das ist das *Mäanderstadium*.

Man könnte annehmen — und das ist lange Zeit hindurch geschehen — daß die *Gerade* als kürzeste Verbindungslinie zweier Punkte der einfachste Weg wäre, die herabstürzenden Wassermassen in die tiefere Lage zu schaffen. Aber das trifft eben nur für ganz feste Unterlagen bzw. völlig geröllfreie Wasserläufe zu. Am ehesten sind diese Voraussetzungen noch auf hartem Gestein (Basalt) oder bei Eishängen verwirklicht, wo die Wasserrinnen, genügendes Gefäß vorausgesetzt, tatsächlich nur wenig von der Geraden abweichen. Aber das Bild ändert sich sofort, wenn der Fluß erodiert, und er muß erodieren, wenn der Boden einigermaßen nachgiebig ist. Bei der geraden Richtung entstehen dann Eintiefungen, aus denen das losgelöste Material vom Fluß selbst herausgeschafft werden muß, und er ist dann genötigt, die Schuttmassen an anderen Stellen des Betttes wieder abzulagern. Daraus entsteht eine unregelmäßige Folge von Kolken und Aufschüttungen im Flußbett; der Fluß sucht letzteren auszuweichen und fängt an, zu mäandrieren, obwohl er ursprünglich die gerade Richtung hatte. Diese Erfahrung ist bei der künstlichen Geradlegung kleiner Wasserläufe mannigfach gemacht worden. Gibt man größeren Flüssen eine gestreckte Richtung, so suchen sie *innerhalb* des korrigierten Betttes neue Mäander anzulegen und die Ausdehnung auf die alten großen Mäander wird nur durch die starken Uferbauten verhindert. Ein anderes Mittel, mit dem sich der Fluß gegen die aufgezwungene Geradlegung wehrt, sind wandernde Sandbänke, die sich abwechselnd rechts und links von der Bettmitte bilden, von hinten her abgebaut und an der Vorderseite regeneriert werden. Für den Rhein in der Gegend von Karlsruhe sind sie von REHBOCK genau beschrieben worden. Das Hin- und Herpendeln des Stromstrichs — ein leichtes Mäandern — erweist sich als die natürliche Gegenwehr des Flusses gegen die Geradlegung. Ist die Bildung von wechselnden Sandbänken kein genügendes Mittel gegen unregelmäßige Eintiefung des Flusses, dann greifen die Strombauverwaltungen zur Pflasterung des Strombettes mit rohen Blöcken, die ein Weitergreifen der Tiefenerosion verhindern. — Man kann hier allgemein die Frage aufwerfen: In welchem Umfang sind *Geradlegung von Flüssen* vom wirtschaftlichen Standpunkt aus *zweckmäßig*? (vgl. MARQUARDT¹). — In dieser Form ist die Frage *unvollständig gestellt*. Es gibt kein Zuviel oder Zuwenig an Mäandern, wenn nicht gleich-

¹ W. WUNDT, *Gefällskurve und Mäanderbildung als Folge des Prinzips des kleinsten Zwangs*. Deutsche Wasserwirtsch. 36, 115 (1941).

² GRIMSEHLs *Lehrbuch der Physik*, bearb. von R. TOMASCHEK, I (1938), S. 566.

¹ E. MARQUARDT, *Formgesetzliches über unsere Flüsse. Die Bau-technik* (1933), S. 81.

zeitig die Festigkeit des Bettes in Betracht gezogen wird. Im natürlichen Zustand legt der Fluß seine Mäander so an, daß sich Erosion und Akkumulation ungefähr das Gleichgewicht halten und wenn am Untergrund und der Art der Einfassung nichts geändert wird, ist es zweckmäßig, dem Fluß seine Mäander einfach zu belassen. Wenn man aber die Ufer durch Dämme verstärkt und das Flußbett durch Steinpackungen befestigt, kann man die Mäander wesentlich abkürzen und den restlichen Trieb zum Mäandern befriedigt der Fluß durch die Anlage von Sandbänken. Eine völlige Geradlegung würde der Fluß nur bei einem ausbetonierten Bett, ähnlich wie bei Werkkanälen, hinnehmen. Solche Anlagen würden aber die Hochwassermengen nicht aufnehmen können und viel zu teuer kommen. Man wird daher immer einen gewissen von der Festigkeit der Einbauten abhängigen Mittelweg einschlagen müssen. — Gesichtspunkte anderer Art, wie der beschleunigte Ablauf der Hochwasser, eine eventuelle Schädigung der Grundwasserstände usw. sind bei diesen Überlegungen noch nicht berücksichtigt, von der Wirkung auf das Landschaftsbild und von der Rücksicht auf den Naturschutz ganz zu schweigen.

Die Veränderungen der Mäander lassen sich bis zu einem gewissen Grade auch mathematisch erfassen (Abb. 4a). Wir ersetzen einen Mäanderbogen annähernd durch einen Kreisbogen mit dem Radius r und dem Zentriwinkel 2α . An einem beliebigen Punkt des Kreisbogens wirkt die Zentrifugalkraft mv^2/r , wobei m die Wasserführung und v die Geschwindigkeit bedeuten. Die Arbeit A der Seitenerosion, die auf der ganzen Erstreckung des Kreisbogens geleistet wird, erhält man durch Multiplikation der Zentrifugalkraft mit der Bogenlänge $2r\alpha$. Ferner ist, wenn die Endpunkte des Kreisbogens festgehalten werden, die Geschwindigkeit umgekehrt proportional der Länge des Kreisbogens, also $v = c/2r\alpha$ (c bedeutet eine Konstante). Es wird somit

$$A = \frac{m c^2 2r\alpha}{r 4 r^2 \alpha^2}$$

$$A = \frac{c^2 m}{2 r^2 \alpha} \quad (1)$$

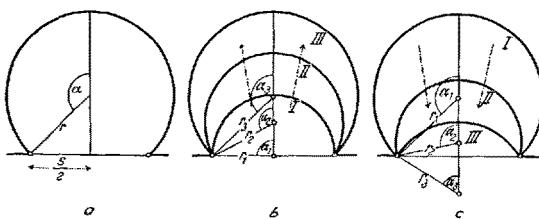


Abb. 4.

Diese Formel enthält zwei unabhängige Veränderliche A und m , von denen A annähernd der allgemeinen Bodenneigung proportional ist und die Wasserführung m , die örtlich und zeitlich wechselt. Diesen

stehen zwei abhängige Veränderliche r und α gegenüber, deren Verhalten wir eben prüfen wollen.

Lassen wir A und damit die Bodenneigung unverändert, lassen aber die Wassermenge m wachsen, so muß sich das so äußern, daß im Nenner $r^2\alpha$ im gleichen Verhältnis wächst ($r^2\alpha$ ist die Fläche des zum Zentriwinkel 2α gehörigen Sektors). Vergleichen wir verschiedene Flüsse miteinander, so ist der Erfahrung kein Grund zu entnehmen, daß sich α , d. h. die Form der Mäander ändert, vielmehr schwankt nur die Größe, d. h. das r der Mäander. Es muß also bei unverändertem A (gleicher Bodenneigung) dem stärkeren Fluß (größeres m) auch der größere Mäander entsprechen. Dies stimmt weithin mit der Erfahrung überein, auch damit, daß jeder Fluß bei Hochwasser die Außenufer in den Windungen annagt. Genauer gesagt muß nach der Formel r^2 mit m , also r mit \sqrt{m} (also langsamer als m) anwachsen. Dabei sind für m die (mittleren) Hochwassermengen zu nehmen, da nur diese gestaltend auf das Flußbett einwirken.

Als Beispiel sei angeführt, daß die Radien für die (Ebenen-)Mäander der Pegnitz bei Nürnberg durchschnittlich 0,2 km, für den mittleren Rhein etwa 1,5 km, für den unteren Mississippi rund 4,5 km betragen. Hieraus ergibt sich als ein zu forderndes Verhältnis für $m_1:m_2:m_3 = r_1^2:r_2^2:r_3^2 = 0,04:2,25:20,3$, was mit dem Verhältnis der mittleren Hochwasserführungen $57 \text{ m}^3/\text{s}$; $3000 \text{ m}^3/\text{s}$; $30000 \text{ m}^3/\text{s}$ gut übereinstimmt. Genauere Untersuchungen der Mäandergrößen im Zusammenhang mit den Hochwassermengen wären sehr zu wünschen.

Nimmt bei unveränderter Bodenneigung m ab, dann bewegen wir uns beim gleichen Fluß zeitlich in den Niederwasserbereich; auf lange Zeiten hinaus betrachtet aber in Perioden, wo die Wasserführung aus klimatischen Gründen oder durch Verkleinerung des Einzugsgebiets geschränkt ist. Wie RUDZKI¹ im Anschluß an OLDHAM berichtet, suchen manche Flüsse beim Rückgang des Wasserstandes ihre Windungen abzukürzen: der Strom fließt bei niedrigem Wasserstand rascher im Seichtwasser des konkaven Ufers als im tiefen Kanal des konvexen Ufers. — Flüsse, die in Tälern mit ehemals größerer Wasserführung laufen, sind sog. Kümmerflüsse, die nachträglich wieder kleinere Windungen anzulegen suchen. So versucht die Maas, die in der Gegend von Toul ihren einstigen Zustrom von der oberen Mosel her eingebüßt hat, die zu groß gewordenen alten Windungen da und dort abzuknicken. — Maßgebend für die Größe der Mäander ist, wie gesagt, nicht die mittlere, sondern die Hochwasserführung. Ein Beispiel hiefür bietet die Radolfzeller Aach, die bedeutenden unterirdischen Zuflüsse von der oberen Donau her aufnimmt. Dieser Zustrom erfaßt aber in der Hauptsache nur das Niedrig- und das Mittelwasser der Donau, während der Großteil der

¹ M. P. RUDZKI, *Physik der Erde* (1911), S. 492.

Hochwassermengen im Donaubett selbst abfließt. Infolgedessen ist die mittlere Wasserführung der Aach recht hoch, während die Hochwassermengen relativ klein sind. Diesen Umständen entspricht, nach Rechnung und Erfahrung übereinstimmend, eine sehr bescheidene Größe der Aachmäander.

Lassen wir uns A und damit die allgemeine Abdachung, auf der sich der Fluß bewegt, kleiner werden, dann begeben wir uns in die Verhältnisse, die bei der *Hebung einer Landschaft* rings um den schon vorhandenen Fluß eintreten. Da sich m aus *dieser Ursache* heraus nicht ändert, muß das Kleinwerden von A durch ein Größerwerden von r und α ausgeglichen werden. Der Effekt ist derselbe wie bei Vergrößerung von m : die *Mäander weiten sich* bei Verringerung des Gefälles *aus*. Daß die Flußwindungen bei Gebirgsmäandern besonders schön herausmodelliert werden, ist bekannt; es spielt dabei mit, daß Gebirgshebung im allgemeinen ein stetigerer und länger dauernder Vorgang ist als die Änderung der Wassermenge und daß die Umgestaltung der Mäander hier viel stärker behindert ist als bei den Wiesenmäandern.

Lassen wir endlich A auf Grund verstärkten Allgemeingefälls *zunehmen*, so begeben wir uns *an den Rand* eines in Hebung befindlichen Gebirges, z. B. an die Westabdachung des Schwarzwaldes. Die Zunahme von A muß auf der rechten Seite der Gleichung durch eine Verkleinerung von r und α kompensiert werden. Damit wird aus dem Mäander *I* in Abb. 4c zunächst der Mäander *II* und dann der Mäander *III*, allerdings mit der Ausnahme, daß von *II* auf *III* α zwar abnimmt, r aber wieder etwas wächst. Das Zusammenziehen der Mäander findet also lange, ehe die gerade Richtung erreicht wird, eine Hemmung, die es zur völligen Streckung gar nicht kommen läßt. Wir werden diese Grenzlage gleich nachher noch von anderer Seite untersuchen! — Zweifellos ist aber, daß Zunahme von A , nach Erfahrung und Rechnung übereinstimmend, eine Auflösung der großen Mäander und in gewissem Grade eine Streckung des Flußlaufes zur Folge hat. Beispiele: Teilweise Streckung des Mittelrheinlaufs zwischen Bingen und Bonn im Zusammenhang mit der Gefällssteigerung¹, Mangel an Mäandern bei den schwedischen Flüssen als Folge der postglazialen Hebung². Man kann auch nach dem Vorgang G. WAGNERS bei den Gebirgsmäandern die *Neigung der Gleithänge* als ein *Maß für das Verhältnis der Tiefen- zur Seitenerosion* ansehen. Aber wir kommen zu einer einheitlichen Betrachtung der Erosion zurück, wenn wir die *Tiefenerosion* als eine *zeitlich summierte Seitenerosion* auffassen. Auch in den Steiltälern großer Flüsse deutet das Wechseln des Stromstrichs überall das Mäandern an und sogar die Klammen der Gebirgs-

bäche zeigen eine ununterbrochene Folge von Wasserrütteln und seitlichen Kolken. Halten wir in Abb. 4b die Endpunkte der Ausgangsstrecke und die Bodensteigung fest, so ist nach Formel (1) die Arbeit der Zentrifugalkraft beim Geradverlauf gleich 0, weil $r = \infty$ ist. Bei der Ausbildung von Windungen nimmt r zunächst ab, wodurch diese Arbeit, d. h. die Seitenerosion, immer stärker in Erscheinung tritt. Aber von einer bestimmten Stelle ab muß A wieder abnehmen, da ja r von neuem und schließlich ins Unendliche wächst, also A wieder gleich 0 wird.

Das zwischen den beiden Nullwerten liegende *Maximum*, die Stelle, wo die Seitenerosion ihren Höchstwert erreicht, wollen wir bestimmen! Ist die Entfernung der Endpunkte s , so folgt aus der Abbildung $\sin(180^\circ - \alpha) = \frac{s^2}{r}$; $r = \frac{s}{2 \sin \alpha}$. Die Geschwindigkeit des Wassers auf der gekrümmten Strecke ist wie bei der früheren Betrachtung $v = \frac{c}{2r\alpha}$. Setzen wir diese Werte in die Formel (1) $A = \frac{c^2 m}{2r^2 \alpha}$ ein, so erhalten wir

$$A = \frac{2c^2 m}{s^2} \cdot \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha} \quad (2)$$

Soll A einen Extremwert annehmen, so muß $\frac{dA}{d\alpha} = 0$ werden. Wir erhalten, da c , m und s als konstant anzusehen sind:

$$\frac{2\alpha \sin \alpha \cos \alpha - \sin^2 \alpha}{\alpha^2} = 0$$

$$\frac{\sin \alpha}{\alpha^2} (2\alpha \cos \alpha - \sin \alpha) = 0$$

Die Nullsetzung des ersten Faktors $\frac{\sin \alpha}{\alpha^2}$ ergibt $\alpha = 0^\circ$ bzw. $\alpha = 180^\circ$, was den *Kleinwert* der Seitenerosion entspricht (für $r = \infty$ wird sie gleich Null). — Die Nullsetzung des zweiten Faktors ergibt

$$2\alpha \cos \alpha - \sin \alpha = 0$$

$$2\alpha - \tan \alpha = 0$$

Diese transzendente Gleichung wird annähernd durch den Wert $\alpha = 67^\circ$

befriedigt. Bei $\alpha = 67^\circ$ erreicht die Arbeit der Seitenerosion ihren *Höchstwert* und die Tiefenerosion ihren

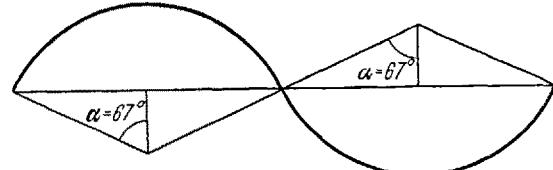


Abb. 5.

Kleinwert, da sich ja die Gesamterosion als Ausfluß der Fallenergie aus diesen beiden Bestandteilen zusammensetzt. Solange es sich also um einen Wettstreit der beiden Arten von Erosion handelt, muß der Mäander dieser flachen Form zustreben (Abb. 5). Ein solcher Wettstreit findet beim verwilderten Fluß statt (Abb. 1). In der Tat finden wir hier ein *Ausweichen*

¹ D. GURLITT, *Das Mittelrheintal*. Forsch. z. Deutsch. Landeskunde Bd. 46 (1949).

² F. HJULSTRÖM, *Studien über das Mäanderproblem*. Geogr. Ann. (Stockholm 1942).

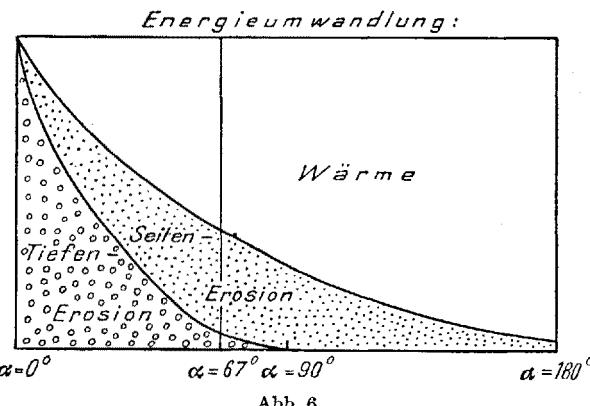
von der geraden Linie gegen den Typ $\alpha = 67^\circ$ des Mäanders; er zeigt das Bestreben des Flusses an, möglichst wenig in die Tiefe zu erodieren.

Warum findet aber beim ausgebildeten Mäander eine viel stärkere Annäherung an den Volkkreis statt? Die Erklärung finden wir darin, daß neben der Tiefen- und Seitenerosion ein dritter Partner in der Energieform auftritt, das ist die *Wärmeentwicklung*. Nur ein verschwindend kleiner Teil der Fallenergie des Wassers wird in mechanische Arbeit umgewandelt. Nimmt man die mittlere Regenhöhe der Landflächen zu 67 cm pro Jahr, die Durchschnittshöhe, aus der der Niederschlag stammt, zu 2000 m, die Landflächen zu 149 Millionen km², so wäre die hieraus zur Verfügung stehende Energie

$$149 \cdot 10^{14} \cdot 6,7 \cdot 2000 \text{ mkg} = 0,02 \cdot 10^{22} \text{ mkg} = 0,046 \cdot 10^{22} \text{ gcal}$$

wobei aus 427 mkg je 1000 gcal hervorgehen. Die kinetische Energie der Flüsse dagegen beträgt aber bei einer mittleren Abflußhöhe von 25 cm pro Jahr und 800 m durchschnittlicher Landerhebung nur etwa $0,007 \cdot 10^{22}$ gcal und ein noch viel kleinerer Teil wäre als Wasserkraft ausnutzbar. Tatsächlich erreichen die großen Ströme der Erde mit ganz sanfter Strömung das Meer, so daß an den Mündungen so gut wie alle Energie «vernichtet», d. h. in Wärme übergeführt ist. Diese Umwandlung der Fallenergie in Wärme findet bei der Reibung am Untergrunde und in den eigenen Wirbeln des Flusses statt; das Bestreben, die höheren Energieformen (Strahlung, mechanische Energie) in niedrigere (Wärme) umzuwandeln, ist durchlaufend und ein Ausfluß des zweiten *Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie*, der besagt, daß die *Entropie* einem Maximum zustrebt. — Man trifft vielfach die Meinung, in der Natur herrsche das Ziel, durch stürzende Wassermassen und gewaltsame Eingriffe möglichst viel zu vernichten. Gerade das Gegenteil ist richtig! Die Flüsse haben vielmehr die Tendenz, den Hindernissen auszuweichen, um sie herumzufließen und den Untergrund möglichst wenig anzugreifen. Wenn trotzdem Exzesse vorkommen, so ist das so zu erklären, daß den Flüssen in Wolkenbrüchen und Katastrophenhochwassern eine Abweichung von der normalen Tendenz *aufgezwungen* wird. — Wir können uns dies am Verhalten des Ingenieurs klarmachen. Er sucht in den Werkkanälen die Fallenergie des Flusses, die sich in den Wirbeln des natürlichen Bettes nutzlos verzehrt, bis zu einer bestimmten Stelle aufzusparen, wo sie durch die Turbinen mechanische Arbeit verrichten kann, eine Arbeit, die sonst der «Vernichtung» anheimfallen würde. Der Ingenieur ist also hier bestrebt, den sanften Weg der Natur durch gewaltsame, aber gelenkte Vorgänge zu ersetzen und dadurch auszunützen. Dies ist der häufigste Eingriff in die Natur. Allerdings kann auch der entgegengesetzte Fall eintreten. Wenn in Wildbächen Einbauten gemacht, bei

Wasserabstürzen Tosbecken angelegt werden, so versucht man die erodierende Kraft des Wassers zu hemmen und die Fallenergie in Wärme aufzulösen. Geht so das Bestreben des *Ingenieurs* bald in dieser, bald in jener Richtung, so ist doch unverkennbar, daß die Flüsse von sich aus die gewaltigen Wege nur einschlagen, wenn sie ihnen durch die Sonnenenergie mit lokaler Konzentrierung von Niederschlagsmassen *aufgezwungen* werden. Auf Grund dieser allgemeinen Überlegungen läßt sich nun erklären, warum die Mäander die kleinen Zentriwinkel unter 67° meiden, nicht aber die großen, die diesen Wert übersteigen. Wenn wir die Umwandlung der Fallenergie in Tiefenerosion, Seitenerosion und Wärme bei den verschiedenen Zentriwinkeln von 0 bis 180° graphisch darstellen, so dürfte sich ein Verhalten nach Abb. 6 er-



Energieumwandlung:

Abb. 6.

geben. Bei $\alpha = 0^\circ$ entfällt der Großteil der Umwandlung auf Tiefenerosion; aber diese wird mit wachsendem α rasch abnehmen, nach dem Beispiel anderer Naturvorgänge in Form einer fallenden Exponentialkurve. Die Seitenerosion, die an ihre Stelle tritt, klingt ebenfalls nach einer Exponentialkurve ab. Aber letztere fällt viel langsamer; dies wird u. a. dadurch belegt, daß Geröllentwicklung sich nur in den Steilstrecken der Flüsse findet, während sich Schwebstoffe auch in den Flachstrecken und den Windungen halten. Infolgedessen muß das Band für die Seitenerosion an einer bestimmten Stelle, die wir mit dem Zentriwinkel 67° identifizieren, eine größte Breite erreichen. Bei weiter wachsendem α nimmt also nicht die Tiefenerosion wieder zu, wie es nach der ursprünglichen Formel (1) bzw. (2) geschlossen werden könnte, sondern der Anteil der Wärme, während die Tiefenerosion zur Bedeutungslosigkeit herabsinkt. Da die Natur grundsätzlich den niederen Formen der Energie zustrebt (von der mechanischen Arbeit zur Wärmeentwicklung übergeht), so ist der Ausdehnung der Mäander über 67° hinaus keine Grenze gesetzt. Das für diesen Winkel berechnete Maximum an Seitenerosion wirkt also nur dann als *Hindernis gegen weitere Streckung* der Mäander, wenn man von den großen α herkommt, als Hindernis, das erst bei starker Gefällsteigerung und

damit Ermöglichung von Tiefenerosion überwunden wird.

An dieser Stelle möge eine grundsätzliche Bemerkung Platz finden! Der Fluß und die Erdoberfläche sind hier wiederholt so eingeführt, als ob sie *handelnd* wären: der Fluß ist bestrebt, etwas zu tun, die Erdoberfläche wehrt sich dagegen usw. Dies ist nur als sprachliche Ausdrucksweise zu verstehen. Es gibt *Primärvorgänge* in der Natur (hier die fallenden Wassermassen), die dann *Sekundärvorgänge* (die Reaktion der Erdoberfläche) hervorrufen; rein äußerlich sind die beiden Vorgänge durch Zeitintervalle voneinander geschieden. Aber man kann dieses Nacheinander am besten als *Zielstrebigkeit beschreiben*. Mit mystischen oder metaphysischen Kräften hat dies nichts zu tun; MACH¹ ist auf diese Seite des Problems ausführlich eingegangen. Der Fluß, der sich zur Seitenerosion statt zur Tiefenerosion «entschließt» und die Erde, die sich gegen seine Eingriffe «verteidigt», sind also nichts anderes als ein *sprachliches Bild*, das uns dem Verständnis für diese Vorgänge näherbringen soll.

Als roter Faden zieht sich durch unsere Betrachtungen das *Prinzip des kleinsten Zwanges*: die stürzenden Wassermassen suchen an der Erdoberfläche gewisse Veränderungen hervorzubringen und diese will sich gegen die aufgezwungenen Änderungen wehren. Dies kommt auch in einer Reihe von *Einzelerscheinungen* zum Ausdruck. Bekannt ist die *dachziegelartige* Lagerung der Geschiebe in den Flußbetten — wenn man sich *andere* Lagen vorstellt, erkennt man, daß der Untergrund auf jene Weise dem strömenden Wasser eine möglichst geringe Angriffsfläche bildet. Bekannt ist weiter, daß die *Gerölle* im Oberlauf der Flüsse sehr grob sind und dann allmählich kleiner werden; sie werden aber auch auf Zwischenstrecken, die stärkeres Gefälle haben, wieder größer (vgl. MORTENSEN² und WAGNER³). Die Gerölle sind also die Schutzvorrichtung des Grundes gegenüber dem angreifenden Wasser, die sich in ihrer Stärke nach dem

Gefälle und der primären Kraft des Flusses richtet. Ihre Größe stellt sich so ein, daß sie nur bei Hochwasser fortbewegt werden können. Wir erkennen die Bedeutung des Wortes von EXNER¹: «Die Erosion hat die Tendenz, sich selbst zu vernichten!» — Auch in den Mäandern, die ja in der Hauptsache ein Gleichgewicht zwischen Erosion und Akkumulation darstellen, finden noch Ausgleichsbewegungen zwischen den verschiedenen Teilen statt. Beim Übergang vom rechts zum linksgerichteten Bogen entsteht zwangsläufig eine geradlinige Strecke, die anderen Erosionsbedingungen gehorcht als die Windungen selbst. Die Erfahrung lehrt, daß bei Hochwasser an der Außenseite der Windungen erodiert, an der Innenseite aufgeschüttet wird, außerdem erhöht sich aber das Bett etwas in den Geradstrecken. Nach dem, was wir über die Vorgänge in geradlinigen Strecken *im allgemeinen* hörten, scheint dies paradox! Aber die Mäander sind eben als *Ganzes* aufzufassen und da die Seitenerosion in den Windungen bei weitem vorherrscht, andererseits das Gesamtgefälle nicht gesteigert werden kann, bleibt einem Teil des Gerölles nichts anderes übrig, als sich in einer schiefliegenden Schwelle in die Geradstrecken einzulagern. Bei Niedrigwasser wird diese Schwelle wieder etwas abgetragen und das Material in die Kolke zurückbefördert (PARDE²).

Summary

In addition to the descriptive morphology of meanders, explanations of these forms in terms of mechanics can be given. The principle of least compulsion proves itself to be an important aid in this regard. Alterations are forced upon the surface of the earth by the downpouring masses of water, but the reactive forces tend to reduce them to a minimum. This is accomplished through the replacement of depth erosion, which occurs under conditions of heavy fall, by lateral erosion. The river therefore tends to deviate from a straight line and to form windings. In this connection the part played by the accumulation of deposits and by the development of warmth as accessory phenomena of erosion is discussed.

¹ E. MACH, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* (9. Aufl., 1933).

² H. MORTENSEN, l. c.

³ G. WAGNER, l. c.

¹ F. M. EXNER, *Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen*. Sitz.ber. Akad. d. Wiss. Wien 134, 182 (1925),

² M. PARDE, *Fleuves et Rivieres*, 2e éd. (Paris 1947), S. 214.