

Flußmorphologische Studie zum Mäanderproblem

I. Zeller¹

Vorbemerkungen des Verfassers

Am Mäanderproblem wird seit Jahrzehnten gearbeitet. Leider sind die Fortschritte im Wissen nicht diesem Aufwand entsprechend, sodaß man versucht sein kann, vieles, was heute darüber erscheint, als längst bekannt abzutun, oder aber zum großen Haufen ungeklärter Probleme zu legen. Der Wunsch der Flußbaupraxis, mehr über flußmorphologische Vorgänge zu wissen und die seit vielen Jahren anhaltende «Stagnation» in der Kenntnis der Gerinnebildungsprozesse, veranlaßte den Verfasser, sich die Mühe zu nehmen, eine große Zahl der bis heute erschienenen Arbeiten durchzusehen, daraus das Wesentliche zu sammeln und zu einem Ganzen zusammenzufügen, unter Berücksichtigung der heutigen Kenntnisse der Gerinnehydraulik und der eigenen Erfahrung auf dem Gebiet des Flußbaues. Hierbei wurden theoretische Betrachtungen bewußt weggelassen und eine Konfrontation mit den verschiedenen Hypothesen über die physikalischen Vorgänge, die zur Entstehung der Flußmäander führen, vermieden. Da das Problem der Flußmäander nicht geson-

dert von der Gesamtheit der flußmorphologischen Erscheinungsformen und der hydraulischen Vorgänge behandelt werden sollte, wird einleitend ein kurzer Überblick vermittelt, der aber nur dasjenige wiedergibt, was zum leichteren Verständnis der nachfolgenden Kapitel dienen mag. Hierbei werden die verschiedenen Flußformen in erster Linie als hydraulisches Phänomen betrachtet, weshalb gewogenermaßen weitgehend auf die vielfältigen Folgen der geologischen, klimatischen und anderer Faktoren verzichtet werden muß. Als Ausgangsbasis werden deshalb Alluvionsflüsse verwendet. Wenn dennoch natürliche Flußläufe, die ja der Gesamtheit der oben erwähnten Einflüsse unterworfen sind, als Beispiele herangezogen werden, so deshalb, um zu zeigen, daß tatsächlich die hydraulischen Vorgänge entscheidend an der Gerinnebildung beteiligt sind.

Hinsichtlich der verwendeten Fachausdrücke werden möglichst diejenigen der Flußmorphologie benützt, welche z. T. von denjenigen der Geomorphologie abweichen oder denen eine etwas andere Definition zugrunde liegen kann.

I. EINLEITUNG

1. Allgemeine Charakterisierung der Flußformen

Viele Möglichkeiten einer Charakterisierung stehen offen. Beurteilt man z. B. die Größe eines Gewässers, so könnte man die Wahl treffen zwischen:

Bach, Fluß, Strom

Da jedoch, hydraulisch gesehen, zwischen diesen drei Typen in erster Annäherung keine Unterschiede bestehen^{2*}, ist diese Beschreibungsart unzureichend und gibt keinen Einblick in die durch den Fließmechanismus bedingte Gerinneart. Deshalb soll vor allem die Gerinneform (Gerinnegeometrie) näher studiert werden, und zwar beschränkt auf ausgewählte Talabschnitte mit Schwergewicht auf kleine und große Flüsse. Die in diesem Zusammenhang nachfolgend benützte Einteilung lautet:

- gerade
- gewunden
- verzweigt

Diese Unterteilung nimmt allerdings wenig Rücksicht auf die tatsächlichen Vorgänge, sondern ist vor allem visuell bedingt. Sie ist jedoch seit langem im Gebrauch (siehe Lane [36], Leopold [41]).

— *Gerade Gerinne*: Wir definieren Gerinne als gerade, wenn sie gesamthaft gesehen einen gestreckten Verlauf nehmen und als solches einen sehr kleinen Windungsgrad aufweisen.³

Lange gerade Gerinne treten in Natur selten auf. Die meisten zeigen irgendwelche mehr oder weniger stark ausgeprägte Krümmungen. Es scheint, daß sich Gerinne nur gerade erhalten, wenn die Strömungsgeschwindigkeit (Turbulenz) klein ist, resp. wenn das fließende Wasser die das Gerinne bildenden Sedimente kaum oder nicht zu bewegen vermag. In den andern Fällen müssen gerade Gerinne als instabile Flußformen angesehen werden, die bei der kleinsten Störung des Abfluvorganges in eine andere Zustandsform übergeführt werden.

* Anmerkungen siehe S. 204.

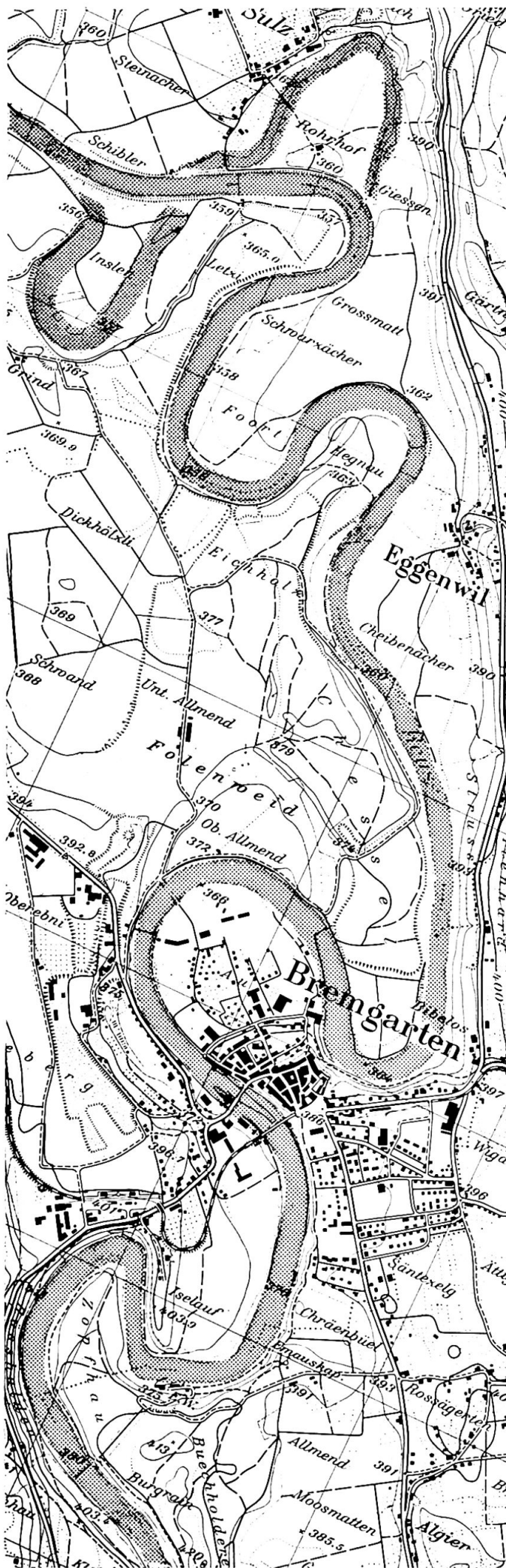
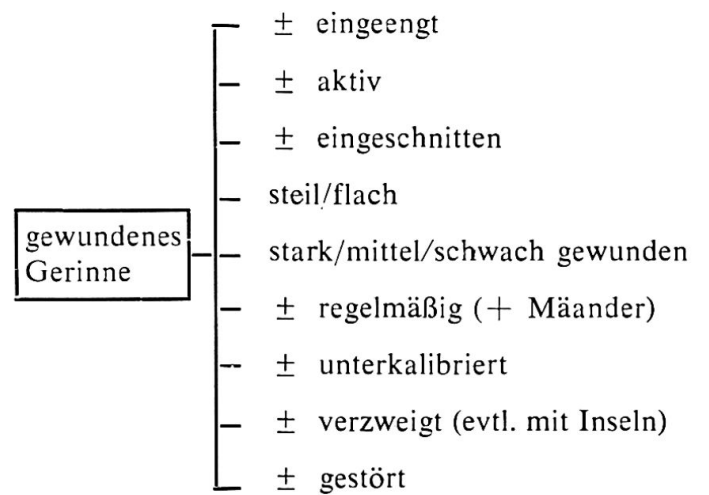


Fig. 1 Mäander der Reuß bei Bremgarten/AG, Landeskarte der Schweiz 1 : 25 000, Blatt 1090 (veröffentlicht mit Bewilligung der Eidg. Landestopographie).

— *Gewundene Gerinne*: Solche Gerinne zeigen eine mehr oder weniger stark gewundene Gerinneaxe («hoher» Windungsgrad) von unregelmäßigem oder regelmäßigem Charakter. Unter letzteren sind die Flußmäander einzureihen. In der Regel unterscheidet man verschiedene Typen. Man kennt, abgesehen vom vollständig entwickelten Typ (in Alluvionen), den *eingegengten* oder eingeschränkten Typ, der sich z. B. wegen mangelnder Talbreite nur ungenügend in die Breite entwickeln kann, dann den *ingeschnittenen* Typ, der seine ursprüngliche Form auch nach schluchtartiger Eintiefung bewahrt hat. Des weiteren hat der *aktive* Typ die Eigenschaft, seine Lage und unter Umständen seine Form ständig zu ändern, den Krümmungsradius zu vergrößern usw., wogegen der *inaktive* Typ an Ort verbleibt und seine Gestalt beibehält. Ein besonderes Phänomen stellen die «*unterkalibrierten*» Flüsse (underfit oder undercalibrated rivers) dar, die ihren Verlauf in einem viel zu weiten Tal nehmen, d. h. einem Tal, das in früheren Zeiten durch einen wesentlich größeren Fluß geschaffen wurde (z. B. Relikttäler). Diese letztere Unterscheidungsart ist in den meisten Fällen für eine hydraulische Beurteilung unwesentlich, für die Charakterisierung eines Gerinnes jedoch wertvoll. Zur Erleichterung des Überblickes diene nachfolgendes Schema:



Die oben genannten Unterscheidungen können mit wenigen Ausnahmen gleichzeitig für die Beschreibung eines Flusses benötigt werden. Es könnte z. B. heißen:

«mittelstark gewundener, nicht verzweigter, inaktiver, eingeschnittener Mäanderfluß».

Fig. 2 Verzweigter Flußlauf der Engstligen zwischen Oey und Kriesbaum (veröffentlicht mit Be-
willigung der Eidg. Landestopographie).

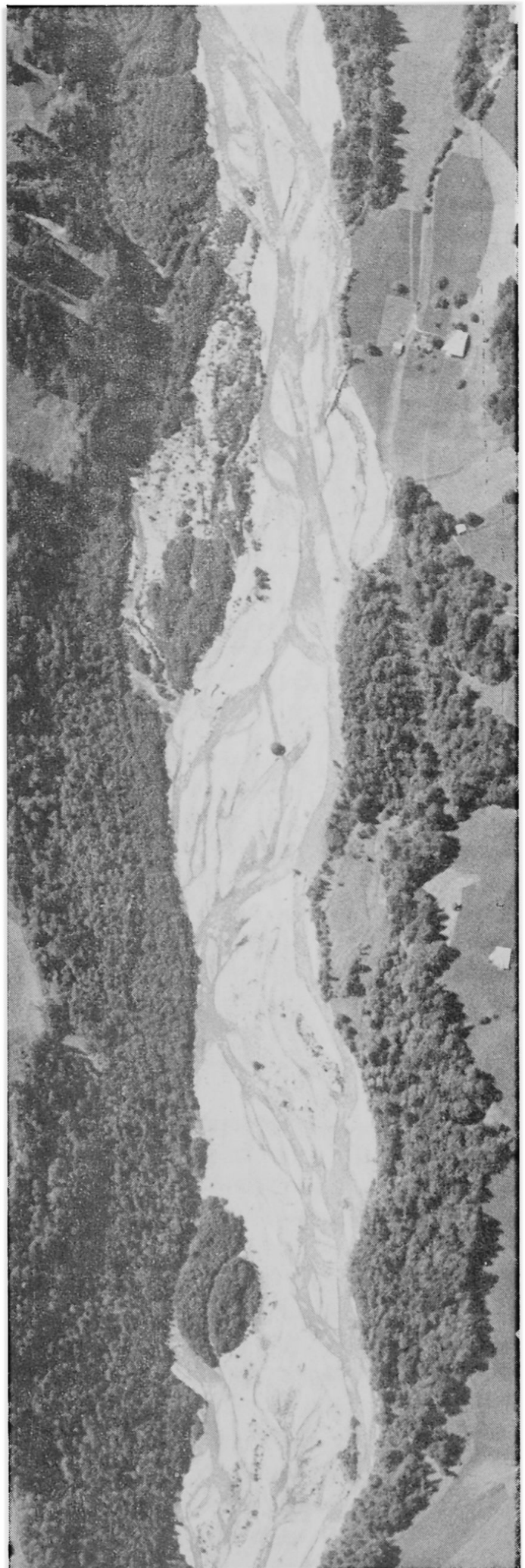
In vorerwähntem Schema findet sich der Ausdruck «verzweigt». Dies ist eine Übergangs- und Spezialform zwischen reinem Mäandern und Verzweigen. Diese Bezeichnung sollte aber nur dort Verwendung finden, wo in einem verzweigten Gerinnesystem ein einziges *Hauptgerinne* besteht, welches gewunden ist. Weiter findet sich der Ausdruck «gestört». Dies bedeutet, daß die natürliche Entwicklung des Flußlaufes durch geologische oder andere Ursachen gehemmt wird. Als Beispiele können dienen: Ein ins Tal hinausragender Felsporn, der einem Mäanderfluß einen speziellen Verlauf aufzwingt, oder Flußverbauungen, welche die natürliche Entwicklung hemmen oder gänzlich stoppen.

— *Verzweigte Gerinne*: Dieser Flußtyp ist charakterisiert durch eine Anzahl nebeneinander verlaufender Flußarme, welche sich zusammenfinden und wieder auseinanderstreben. Dazwischen befinden sich Kies- oder Sandbänke und/oder Inseln. Das Ganze sieht aus der Vogelschau wie Flechtwerk aus. In der Regel führen mehrere Flußarme gleichzeitig Wasser.

Diese Gerinneart wird von einzelnen Morphologen nur als vorübergehende Erscheinungsform im Leben eines Flusses betrachtet und deshalb nicht weiter untersucht. Diese Betrachtungsweise mag im Sinne der *Geomorphologie* richtig sein, ist aber unbedingt abzulehnen, wenn Probleme der *Flußmorphologie* zur Diskussion stehen. — Da in der Folge nur von gewundenen Gerinnen die Rede ist, wird auf eine eingehende Beschreibung dieses Flußtyps verzichtet.

2. Einige Hinweise zur Gerinnegeometrie

Die Gerinnegeometrie ist im Prinzip festgelegt, wenn Gerinnebreite, -tiefe, -gefälle und der Verlauf der Gerinneaxe gegeben sind. Zusätzliche Angaben über den Wasser- und Geschiebehalt, die Geschiebezusammensetzung⁴ und die Fließvorgänge im Wasser sind erwünscht und tragen zum besseren Verständnis der Flußformen bei (siehe nächster Abschnitt). — Leider ist es bis heute nicht gelungen, eine allumfassende Beschreibungsweise zu finden. Ein kurzer Überblick über den heutigen Stand der Kenntnisse soll nachfolgend gegeben werden, wobei bewußt auf die Zusammenhänge zwischen Gerinnegeometrie und Hydrologie des Einzugsgebietes (im Sinne der *Hydromorphologie*) verzichtet wird.



Gerade Gerinne

Für die Beschreibung gerader Gerinne liegt eine große Zahl von Gleichungen vor, welche z. B. die Gerinnegeometrie in Abhängigkeit der Abflußwassermengen Q darstellen. In ihrer einfachsten Form sind es Potenzfunktionen, welche lauten:

$$\text{Gerinnebreite (gemessen auf Wasserspiegelhöhe)} \quad b = A_b \cdot Q^\beta \quad (1)$$

$$\text{Gerinnetiefe (mittlere Wassertiefe)} \quad h = A_h \cdot Q^{\alpha^*} \quad (2)$$

$$\text{Fließgeschwindigkeit} \quad v = A_v \cdot Q^\delta \quad (3)$$

$$\text{Sohlengefälle (mittleres)} \quad J_s = A_J \cdot Q^\gamma \quad (4)$$

$$\text{Sedimenttransport (sämtlicher Feststoffe)} \quad G = A_G \cdot Q^\epsilon \quad (5)$$

$$\text{hydraulische Rauigkeit des Gerinnes} \quad k = A_k \cdot Q^\psi \quad (6)$$

A_b , A_h usw. sind Faktoren und α^* , β usw. Potenzen. («Erfahrungswerte».)

Um die Grundgesetze der Hydromechanik zu befriedigen, haben obige Gleichungen folgende Bedingungen zu erfüllen:

$$\beta + \alpha^* + \delta = 1,0$$

$$\delta - \frac{2}{3}\alpha^* - \frac{1}{2}\gamma + \psi = 0$$

$$A_b \cdot A_h \cdot A_v = 1,0$$

Diese Gleichungen sind Bestandteile der sog. «Regimetheorie». Sie sind hinsichtlich Faktoren und Potenzen an die Verhältnisse des zu untersuchenden Flußgebietes anzupassen, wobei sie dort, gleiche geologische und klimatische Verhältnisse vorausgesetzt, als konstante Größen angenommen werden dürfen. Hierbei wird vorausgesetzt, daß die Gerinne sich im (zeitlich begrenzten) Gleichgewichts- oder Beharrungszustand befinden.⁵

Detaillierte Angaben sind in der umfangreichen Fachliteratur der Regimetheorie zu finden (zusammenfassende Arbeiten in [41], [63]).

Gewundene Gerinne:

Auch gewundene Gerinne lassen sich im Prinzip nach den Grundsätzen der Regimetheorie beschreiben, doch sind Angaben über die Gerinnegeometrie wegen der großen Streuungen nur noch qualitativer Art. Richtigerweise sollten deshalb solche Arbeiten nach den Grundsätzen der Wahrscheinlichkeitstheorie durchgeführt werden. Um die Verhältnisse zu vereinfachen, beschränkt man sich auf regelmäßig gewundene Flüsse, d. h. auf Mäanderflüsse.

Neben den Gleichungen (1) bis (6), die unter An-

passung von Faktoren und Potenzen auch für Mäanderflüsse Anwendung finden, bestehen noch solche analoger Art zur Beschreibung von Schleifengröße, Krümmungsradien usw. Kapitel V hat solche Beziehungen zum Gegenstand.

Verzweigte Gerinne

Über verzweigte Gerinne bestehen bis heute zu wenig Unterlagen, als daß hierüber irgendwelche konkrete Angaben gemacht werden könnten. Es benötigt noch viel Arbeit von Morphologen, Hydrologen und Hydraulikern, bis man den Mechanismus genügend versteht. Glücklicherweise stört uns dieser Mangel im Augenblick nicht, sodaß wir auf dieses Problem nicht weiter einzugehen haben.

3. Beschreibung der Abflußvorgänge in Gerinnen nach hydromechanischen Gesichtspunkten

Dieser Abschnitt soll dazu dienen, den Nichthydrauliker in großen Zügen in das Phänomen der Wasser- und Geschiebebewegung einzuführen, wobei bewußt ganz wesentliche Vereinfachungen vorgenommen werden, die beim Studium von Detailvorgängen keinesfalls vernachlässigt werden dürfen. Unter Zugrundelegung eines gleichförmigen Wasserabflusses (weder Beschleunigung noch Verzögerung des Fließvorganges) kann die Fließgeschwindigkeit v des Wassers berechnet werden zu

$$v = k \cdot R^{2/3} \cdot J_s^{1/2} \quad (7)$$

mit k = Rauigkeitskoeffizient nach Strickler⁶

$k = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{sec}$ für grobkörniges, unebenes Flußbett und

$k = 30 \div 35 \text{ m}^{1/3}/\text{sec}$ für Mittellandflüsse

R = Hydraulischer Radius = $\frac{F}{U}$ = Querschnittsfläche dividiert durch benetzten Umfang in m.

Hierbei wurde stillschweigend das Kontinuitätsgesetz

$$Q = v \cdot F$$

als gültig vorausgesetzt, d. h. das Gerinne erhalte weder Zuflüsse noch gehe Wasser auf der untersuchten Flußstrecke (z. B. in den Grundwasserträger) verloren. Es wird nun mit guten Gründen angenommen, daß die vor allem entlang der Gerinnesohle durch das fließende Wasser verursachten Schubkräfte (Schubspannungen oder Schleppspannungen) für den Geschiebetransport und damit auch für die Bettbildung maßgebend sind. Diese Annahme läßt sich als weitgehend zulässig nachweisen. Die Schleppspannung (Schubkraft pro Flächeneinheit) berechnet sich näherungsweise zu

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot J_s \quad (8)$$

wobei bei breiten, wenig tiefen Gerinnen R durch die Wassertiefe h ersetzt werden darf. (γ = spez. Gewicht von Wasser = $1,0 \text{ t/m}^3$). Eingehende Untersuchungen der verschiedensten Autoren führten auf dieser Grundlage zu folgender Geschiebetriebgleichung, d. h. einer Gleichung, die angibt, wieviel Geschiebe der Fluß unter den gegebenen Verhältnissen im Maximum zu transportieren vermag:

$$g_G = K(\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (9)$$

g_G ist die pro Zeiteinheit und Laufmeter Gerinnebreite transportierte Geschiebemenge in $\text{t/sec.} \cdot \text{m}$; K eine «Materialkonstante» in m^2/sec (variiert in der Regel zwischen $34,0$ und $41,0 \text{ m}^2/\text{sec}$ je nach spezifischem Gewicht des Geschiebes) und τ_c diejenige Schleppspannung, die notwendig ist, um den Geschiebetransport auszulösen, d. h. $\tau < \tau_c$, so findet keine Geschiebebewegung statt, ist dagegen $\tau > \tau_c$, so wird Geschiebe transportiert entsprechend Gleichung (9). Nach Shields⁷ läßt sich näherungsweise τ_c berechnen zu:

$$\tau_c = 0,06 \cdot d_m \cdot (\gamma_s - \gamma) \quad (10)$$

d_m = mittlerer Korndurchmesser des Geschiebes

Diese beiden Gleichungen (9) und (10) vermögen einen weiten Bereich der verschiedenen Abfluß- und Gerinnearten zu erfassen, doch dürfen sie nicht als allgemeingültig betrachtet werden. Als für schweizerische und alpine Verhältnisse besonders geeignet kann die analoge Gleichung von Meyer-Peter⁸ gelten, die auch auf die Form der Gerinnesohle im Hinblick auf deren «Rauigkeit» Rücksicht nimmt und andere, für Detailstudien wichtige Größen. Neben dem besprochenen Geschiebetransport werden auch Schwebstoffe geführt, die mengenmäßig meist ein Mehrfaches der Geschiebeführung ausmachen. Als Beispiel diene Fig. 3, die die Geschiebe- und Schwebstoffführung des Rheins oberhalb des Bodensees in den Jahren 1936/39 in Abhängigkeit der Wasserführung zeigt. Die oben angegebene Berechnungsmethode gibt die Möglichkeit, z. B. bei gegebenem Sohlengefälle und gegebener Wasserführung, die erforderlichen Gerinneabmessungen einer Flußstrecke zu bestimmen, um eine bekannte, z. B. jährlich anfallende Geschiebemenge schadlos abzuführen.

Leider sind in Natur die Verhältnisse nicht so einfach wie eben dargestellt. In der Regel fließt das Wasser ungleichförmig, die Wasserführung ist ständigen Schwankungen unterworfen und die Kornzusammensetzung des Geschiebes ist nicht konstant. Ebenfalls ist bekannt, daß sich die Gerinneform während eines einzelnen Hochwasserereignisses vorübergehend oder über längere Zeit ändert, Kiesbänke talwärts wandern usw. Solche Vorgänge erschweren eine analytische Untersuchung außerordentlich.

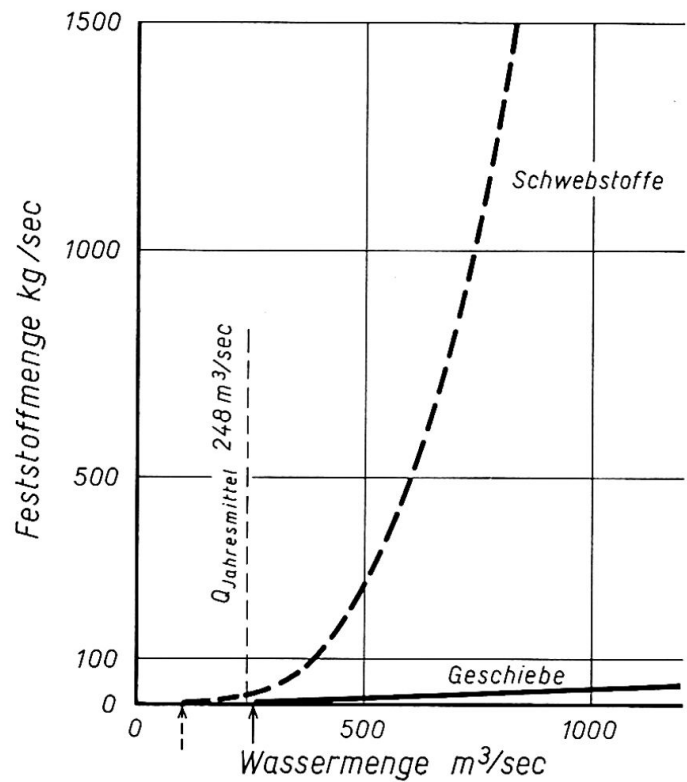


Fig. 3 Rhein bei Brügg/St. Gallen: Geschiebeführung G_g und Schwebstoffführung G_s in Abhängigkeit der Wasserführung Q , aufgenommen in den Jahren 1936/39 durch die Rheinbauleitung.

Als versuchstechnische Lösung solcher Probleme, ebenfalls auf hydromechanischer Grundlage basierend, gilt der *hydraulische Modellversuch*. Es bestehen Gesetze, die erlauben, hydraulische Naturvorgänge getreu in kleinerem Maßstabe nachzubilden und nach erfolgter Untersuchung wieder in die Natur zu übertragen. Diese Art Untersuchung ist ein bewährtes und anerkanntes Hilfsmittel zum Studium flußmorphologischer Probleme.⁹

Die eben erwähnten Modellversuche lassen auch indirekt den Schluß zu, daß die Gerinneform primär nicht von der Flußgröße abhängt, sondern kleine oder große Gerinne gleiche Formen aufweisen, falls sie im Sinne dieses Ähnlichkeitsgesetzes dieselben Randbedingungen aufweisen. Dieses Gesetz (nach Froude) ergibt unter Voraussetzung geometrischer Ähnlichkeit (Längen- und Winkeltreue) und kinematischer Ähnlichkeit (Übereinstimmung der physikalischen Größen) folgende Abhängigkeiten vom Modellmaßstab:

Beschleunigungen	= λ^0
(d. h. im Modell und Natur gleich groß)	
Drücke	= λ^1
Geschwindigkeiten	= $\lambda^{1/2}$
Kräfte und Gewichte	= λ^3
Abflußwassermengen	= $\lambda^{5/2}$
Zeiten	= $\lambda^{1/2}$

mit λ = Längenverhältnis zwischen Natur und Modell. D. h., betrachtet man zwei im obigen Sinne zueinander ähnliche Flüsse mit $\lambda = 100$ (Fluß Nr. 1 ist 100mal größer als Fluß Nr. 2), so verhalten sich die entsprechenden Abflußwassermengen wie 10^5 : 1, oder die Veränderungen am Gerinne (Bettbildungsprozesse) verlaufen in einem Zeitverhältnis wie 10 : 1 zueinander. Leider können aus praktischen Gründen die Geschiebe eines Flusses nicht beliebig

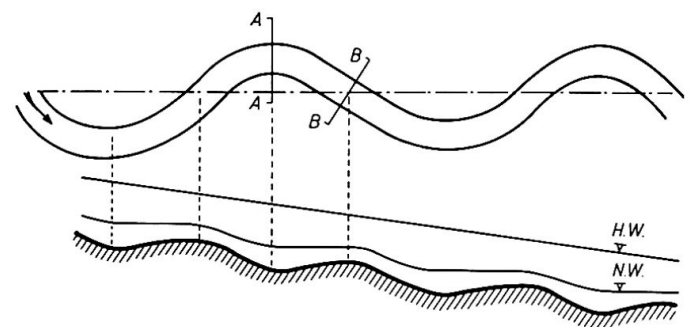
verkleinert werden, so daß für exakte Untersuchungen der Modellmaßstab nicht zu klein gewählt werden darf. Diese Einschränkung, zu der noch einige andere hinzukommen, tut aber dem grundsätzlichen Wert der Ähnlichkeitsbetrachtung keinen Abbruch, indem sie die Möglichkeit in die Hand des Flußmorphologen gibt, Flüsse und Flußsysteme nicht nur *geometrisch*, sondern auch *hydraulisch* korrekt miteinander zu vergleichen.

II. ALLGEMEINES ZUR MÄANDERBILDUNG

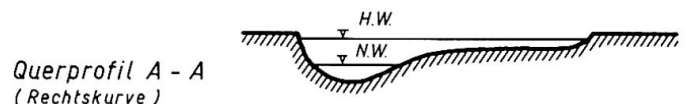
Nachdem einige wesentliche Voraussetzungen für die Bearbeitung flußmorphologischer Aufgaben geschaffen sind, können wir das Mäanderproblem in Angriff nehmen.

Die im Laufe der Jahre entwickelten Theorien und Hypothesen über Entstehung und Mechanismus der Flußmäander erweisen sich bei einer genaueren Überprüfung als zu wenig umfassend oder als überholt. Vor allem hat das Mäandern entgegen einer weitverbreiteten Meinung seinen Ursprung *nicht* in einer gewaltsamen Ablenkung des Flußlaufes, obwohl dieser Umstand die Entstehung häufig fördert. Wäre im betrachteten Mäanderfluß nicht eine Bereitschaft zum Winden «latent» vorhanden, so würden die derart entstandenen Mäander rasch unterhalb der Störung wieder abklingen und bald verschwinden.¹⁰ Man weiß jedoch heute, daß diese Gerinneform eine Folge der aus Flußströmung und Untergrund bestehenden Wechselwirkung ist (52), was die verschiedenen Modellversuche immer wieder demonstrieren (21), (59) usw.¹¹ Als man die Umstände, die zum Mäandern Anlaß gaben, näher untersuchte, stellte man bei solchen Versuchen z. B. Geschiebeablagerungen in der Gerinnemitte fest, welche den Beginn eines «dreidimensionalen Abflusses» anzeigten und nach einiger Zeit zu sichtbaren Mäanderbewegungen führten.¹² Dieses Geschiebe rührte im vorerwähnten Falle in erster Linie von Ufererosionen her und in zweiter Linie aus der Gerinnesohle. Weitere Beobachtungen lassen erkennen, daß auch andere Entstehungsmechanismen möglich sind (14). So fand man in Versuchen, daß sich — ausgehend von einem geraden Gerinne — vorerst in regelmäßigen Abständen untiefe und tiefe Stellen ablösten, woraus sich allmählich alternierende Geschiebebänke entwickelten. Diese nahmen an Größe zu, drängten das Wasser gegen die Ufer, woraus eine immer intensivere Ufererosion entstand und sich schlußendlich ein regelmäßig gewundener Flußlauf bildete. Diese gegenüber der Sohle verstärkte Ufererosion läßt sich ganz allgemein bei Mäanderflüssen beobachten. Es gibt Autoren, die darin

eine maßgebende, ja unter Umständen sogar die einzige entscheidende Ursache für die Mäanderbildung sehen (10), (21), (44). Daß tatsächlich die Vorgänge nicht so einfach sind, zeigen auch Modellversuche von Poona/Indien (10). Ausgehend von einem geraden Gerinne mit gerade ins Versuchsgerinne eingeführtem Wasser, brauchte es sehr lange, bis sich ein einigermaßen gut geformtes und stationäres Mäandergerinne ausbildete. Ein Fluß benötigt offenbar geeignete Voraussetzungen, damit er richtig mäandern kann. Andererseits stellte man an indischen Bewässerungskanälen mit unbefestigten Ufern fest, daß diese Gerinne zu mäandern begannen, würde man sie genügend lange Zeit ihrem Schicksal überlassen (6). Außerdem wurde auf wahrscheinlichkeitstheoretischem Wege gezeigt, daß das Mäandern die wahrscheinlichste Gerinneform eines Flusses dar-



Längsprofil entlang des Talweges



Querprofil A - A
(Rechtskurve)



Querprofil B - B
(Übergangsstrecke)

Fig. 4 Schematische Darstellung von Grundriß und Längsprofil entlang des Talweges und typische Querprofile eines gewundenen Flusses. (HW = Hochwasser, NW = Niederwasser.)

stellt, und daß diese Form stabiler ist als jede nicht mäandernde (37).

Diese Vielfalt der verschiedenartigsten Feststellungen, die sich scheinbar oder auch tatsächlich widersprechen, ist verwirrend. Es ist nun Ziel dieser Arbeit, solche Feststellungen zu sichten und einige typische Mäandereigenschaften herauszustellen, so daß es bei der Beurteilung von Flußmäandern leichter fallen sollte, diese einzuordnen und die Naturformen zu verstehen oder gar zu erklären.

1. Das Gerinne eines mäandernden Flusses

Die Gerinneform hängt sehr stark vom Charakter eines Flusses und dem Grad des Mäanderns ab. Einfachheit halber setzen wir voll ausgebildetes Mäandern in eigener Alluvion voraus und geben nachfolgend ein stark schematisiertes Bild des Längenprofils und zweier typischer Querprofile wieder.

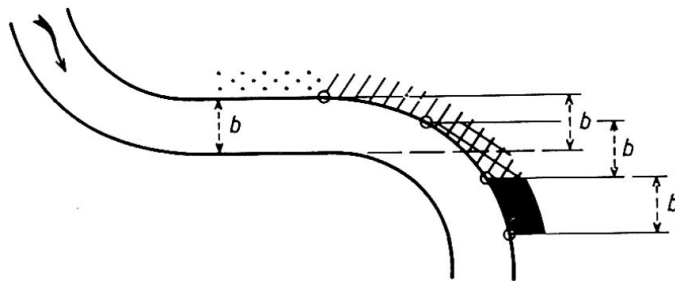
Grundsätzlich ist in Kurven das Gerinne asymmetrisch. Auf der Kurvenaußenseite ist es tief auserodiert und das Ufer der Außenseite wird unterkolkt. Laut Beobachtungen an Uferverbauungen sind die Schäden vor allem an den in Fig. 5 wiedergegebenen Bereichen zu erwarten.

In Kurven ist das Gerinne eher schmal, wohingegen es in den Übergangsstrecken zwischen zwei Krümmungen breit und untief ist (Furten). Ganz allgemein sind Gerinne mit gewundenem Abfluß breiter als gerade Gerinne, was z. B. Modellversuche von Ackers (1) bestätigen¹³.

Das Längenprofil entlang des Talweges (nicht entlang der Gerinneaxe!) zeigt ständig Gefällsänderungen, herrührend von den in Kurvenaußenseiten befindlichen Kolken. Bei Niederwasser entsteht ein sehr unregelmäßiges Wasserspiegelgefälle und dadurch ein stark ungleichförmiger Abfluß. Bei Hochwasser dagegen ist das Wasserspiegelgefälle ziemlich ausgeglichen. Dies zeigt, daß der Wasserspiegelverlauf sehr von Gerinneform und Wasserführung abhängig ist (19), (43). Es scheint der Mäanderfluß dasjenige Gerinne darzustellen, bei dem die für die Gerinnebildung maßgebende Wasserführung die am gleichmäßigsten auf die gesamte Gerinnelänge verteilten Energieverluste aufweist (41). Auch sind die Energieverluste in Mäandergerinnen bei sonst genau gleichen Randbedingungen größer als bei geraden Gerinnen, wobei auf gewisse Anomalien in der Ausbildung der Energieverluste einfachheitshalber keine Rücksicht genommen werden soll.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß

- $J_{\text{Mäandergürtel}} > J_{\text{s gerade (Sohlengefälle)}}$
- $F_{\text{Mäander}} > F_{\text{gerade (Durchflußquerschnitt)}}$
- $v_{\text{Mäander}} < v_{\text{gerade (Fließgeschwindigkeit)}}$



- Anlandung
- /////// leichte Ufererosion
- ▣ mittelstarke Ufererosion
- starke Ufererosion

Fig. 5 Erosionsbereich an mittelstark gewundenem Fluß (47).

Diese Werte sind als Mittelwerte aufzufassen (1). Zur Querprofilform in Krümmungen gilt ergänzend, daß je stärker gekrümmt eine Mäanderschleife ist, umso tiefer ist die Kurvenaußenseite. Bei schwach gewundenen Gerinnen ist es deshalb durchaus möglich, Querprofile mit wenig ausgeprägtem Quergefälle der Sohle vorzufinden. Messungen an der Elbe ergaben einen linearen Zusammenhang zwischen Kolkentiefe und Krümmungsradius (siehe Fig. 6). Bei verbauten Flüssen, besonders wenn sie schiffbar gemacht werden, stimmt die Gerinnegeometrie nicht mit obigen Angaben überein. Es wird bei solchen Flüssen jeweils versucht, die Gerinnebreite in

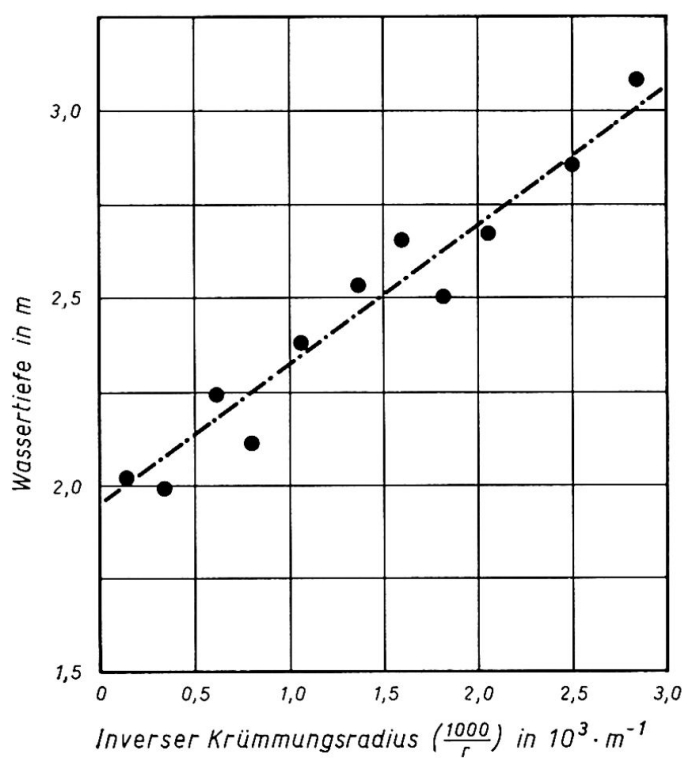


Fig. 6 Gerinnetiefen (mittl. Wassertiefe) von Flußkrümmungen der Elbe in Funktion des Krümmungsradius (38).

den Übergangsstrecken einzuengen und die Krümmungen auszuweiten. Diese Gerinneform ist eine aufgezwungene, unnatürliche und fällt deshalb außerhalb unsere Betrachtungen.

2. Die Arbeitshypothesen von Kondrat'ev, Popov, Znamenskaya u. a. für Gerinnebildungsprozesse

Die nachfolgend beschriebene Arbeitshypothese beruht auf Untersuchungen in Rußland und hat, soweit dies feststellbar ist, vor allem für Flachlandflüsse in Alluvionen Gültigkeit. Auch hat man sich bewußt zu sein, daß es sich um starke Verallgemeinerungen handelt, die dazu dienen sollen, eine möglichst systematische Ordnung in die Vielfalt der Naturerscheinungen zu bringen. Auf die Zitierung der Literatur wird in der Folge verzichtet, sie findet sich unter (15), (32), (33), (34), (48), (49), (52), (53). Die Arbeitshypothese geht davon aus, daß die Gerinneformen, wie früher erwähnt, durch hydromechanische und hydrologisch-morphologische Vorgänge entstehen. Die unmittelbare Ursache der Gerinneveränderungen ist vor allem einer Störung der Kontinuität der Geschiebefortbewegung zuzuschreiben und weiter der Wirkung der turbulenten Strömung, welche in Verbindung mit der beweglichen Gerinnesohle eine ständige Veränderung dieser Sohle spontaner Natur zur Folge hat. Bei Gerinnebildungsvorgängen sind zwei Elemente von großer Bedeutung, nämlich die *Sohlenbeschaffenheit* (Dünen, Bänke usw.), welche in Verbindung mit dem Geschiebe von der Hydraulik des Gerinnes abhängt, und die *Flußbettformen* (Mäander, Verzweigungen usw.), welche von der Gesamtheit der verschiedenen Einflußgrößen (Geologie, Hydrologie, Hydraulik usw.) bestimmt werden. Eine Systematisierung dieser Vorgänge führt zu folgenden drei Haupttypen:

— *Mikroformen*: Es sind dies Dünen, die im Verhältnis zur Gerinnegröße klein sind. Hiezu gehört das ganze Spektrum der Kleindünenformen wie Riffel, Dünen und Antidünen. (Bei großen J_s und Grobgeschiebe können Dünen und Antidünen zu den Mesoformen gehören). Je nach der Dünenart ist eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Geschiebefortbewegung vorhanden. Der gesamte Vorgang ist vor allem eine Folge der Makroturbulenz der Strömung. Solche Dünen können überall angetroffen werden.

— *Mesoformen*: Diese Formen sind von derselben Größenordnung wie das Gerinne selbst (große Dünen, Geschiebebänke usw.). Der hydraulische Vorgang beschränkt sich nun nicht mehr allein auf die Makroturbulenz, sondern erstreckt sich über den gesamten Fließvorgang. Mesoformen entstehen in



Fig. 7 Makrotyp mit zweidimensionalen Dünen.

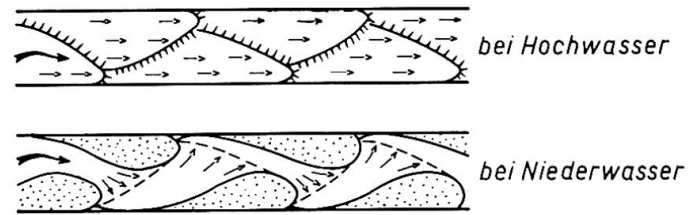


Fig. 8 Makrotyp mit alternierenden Bänken bei Hochwasser resp. Niederwasser.

der Regel unter der Voraussetzung eines gleichmäßigen Wasser- und Geschiebeabflußregimes und sind zu letzterem konform. Bei Änderung der hydraulischen Bedingungen gehen die Dünen in einen Zustand partieller Aktivität über, oder es beginnen sich auf den Dünen Mikroformen zu bilden.

— *Makroformen*: Sie umfassen die Gesamtheit der Veränderungen hinsichtlich Form und Höhenlage eines Gerinnes einschließlich benachbarter Überschwemmungsgebiete (Mäander, Verzweigungen usw.). Die Makroformen werden durch die Gesamtheit des Abflußregimes bestimmt. Innerhalb eines morphologisch gleichartigen Flußabschnittes stellt ein Flußgerinne eine Folge von aneinandergereihten Makroformen dar, welche typisch für die morphologische Entwicklung des Gerinnes sind.

Diese Einteilung ist nicht neu. Man hat sich seit jeher in den verschiedensten Ländern darum bemüht, mehr Einblick in den Mechanismus der sog. Sedimentwellen (Dünen) und damit auch der Flußbettformen zu erhalten. Das Studium der Makroformen bringt nun aber die Möglichkeit einer systematischen Einteilung dieser Gerinneformen. Entsprechend der eingangs erwähnten Literatur werden 7 Typen unterschieden und zwar wie folgt:

a) Gerades Gerinne mit zweidimensionalen Dünen («Band-Dünen-Typ»)

Dies ist die einfachste Form im Entwicklungsprozeß der Makroformen. Die Dünenfronten stehen senkrecht zur Gerinneachse, sind gerade, nehmen die ganze Gerinnebreite ein, und ihr gegenseitiger Abstand ist größer als die Gerinnebreite (siehe Fig. 7). Sie entstehen unter Voraussetzung eines unveränderten Abflußregimes und kommen deshalb in Natur und ihrer Reinform selten vor. Dagegen sind Abwandlungen davon häufig. Die Gerinne zeigen weder Auflandung noch Erosion und haben meist be-

wachsene Ufer. Die durch die Migration¹⁴ (Wandern) der Dünen im Max. entstehenden Profiländerungen betragen bei großen Gerinnen bezüglich Höhenlage 1,5 bis 2,0 m. Die Migrationsgeschwindigkeit ist groß und kann 200 bis 300 m/Jahr erreichen.

b) Gerades Gerinne mit alternierenden Geschiebänken

Diese Makroform kommt in Natur häufig vor und ist charakteristisch für gerade bis leicht gekrümmte Gerinne. (Siehe Fig. 8). Bei *Hochwasser* ist die Fortbewegungsrichtung von Wasser und Geschiebe parallel zur Flußaxe. Die Dünenfronten verlaufen jedoch schräg zu letzterer. Bei abflauendem Hochwasser ändert Form und Anordnung der Dünen nicht, jedoch können sich zusätzlich Mikroformen bilden. Bei *Mittel- bis Niederwasser* liegen die Dünenköpfe frei, und es entsteht ein gewundener (mäandernder) Abfluß. Bei dieser Gelegenheit erodiert der Fluß in geringem Rahmen auf der Kurvenaußenseite Ufer und Sohle, wodurch ein gewundener Talweg entsteht. Die Migrationsgeschwindigkeit der Bänke kann bei großen Flüssen mehrere 100 m/Jahr und Dünenhöhen von 1,2 bis 2,0 m erreichen. Wie aus besagtem Fließvorgang hervorgeht, spielt die Erozierbarkeit der Ufer eine wesentliche Rolle¹⁵.

Werden die Bänke nur in größeren Zeitintervallen fortbewegt, so siedelt sich rasch Vegetation an, was zu einer vorübergehenden Fixierung der Bänke führt.

Ist die Gerinnesohle abgepflästert oder aus Fels, so bleiben die alternierenden Bänke auf solchen Flußstrecken häufig aus. Als Beispiel diene der kanalisierte Rhein zwischen Basel und Straßburg. Die Strecke Basel—Sonderheim zeigt regelmäßig alternierende Bänke (auf 200 Fluß-km kommen 209 Bänke). In der anschließenden Felsstrecke verschwinden die Bänke vollständig, um sich in der unterstrom folgenden Alluvionsstrecke wieder neu zu bilden. (38).

c) Beschränktes (eingeengtes) Mäandern

Dieser Typ ist eine Weiterentwicklung des soeben beschriebenen mit alternierenden Bänken. Nunmehr ergibt sich aber auch bei Hochwasser ein gewundener Abfluß, was mit vermehrten Erosionen auf der Kurvenaußenseite und Ablagerungen auf der Innenseite verbunden ist (siehe Fig. 9). Der Zentriwinkel α ist meistens wesentlich unter 120° (kleiner Windungsgrad). Die Breite des Mäandergürtels entspricht in diesem Falle der Mäanderamplitude A . Der Mechanismus ist derart, daß ein Austausch zwischen Gerinne und Alluvionsmaterial der Überschwemmungsgebiete stattfindet. Die Migrationsgeschwindigkeit überschreitet kaum 5—15 m/Jahr (mittelgroße Flüsse). Wie unter Fußnote ¹⁵ erwähnt, stellt sich dieser Flußtyp nur ein, wenn die Ufer gegen Erosion wenig widerstandsfähig sind, wobei

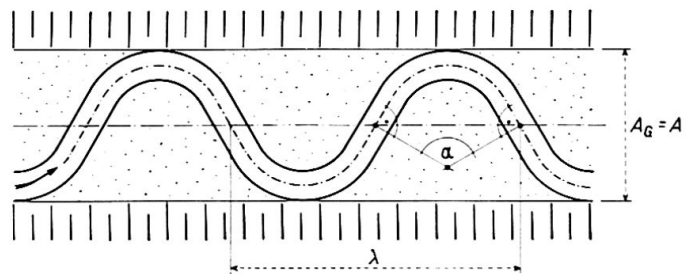


Fig. 9 Makrotyp mit beschränktem Mäandern. Die Breite des Mäandergürtels A_G und die Mäanderamplitude A sind gleichgroß (in Natur ist die Beschränkung häufig wesentlich stärker, siehe auch Fig. 19). λ = Wellenlänge, α = Zentriwinkel einer Flußschleife.

je nach deren Widerstandsfähigkeit sich größere oder kleinere Mäanderamplituden bilden.

d) Freies Mäandern

In weiten Alluvionsebenen und leichter Erozierbarkeit der Ufer ist das Mäandern voll entwicklungs-fähig (Fig. 10). Die Schleifen der Mäander nehmen mit der Zeit an Größe zu und zeigen wachsende Zentriwinkel α . Die Schleifen beginnen auch asymmetrisch zu werden. Die Mäanderentwicklung endet, wenn die Schleifen sehr groß geworden sind. Hierbei können Durchbrüche entstehen, wobei sich sichelförmige Totwasserarme bilden und der Flußlauf sich wieder streckt. Diese Bildung und Rückbildung der Mäander beansprucht gewöhnlich mehrere Dekaden. Die Uferveränderungen können bei solchen Flüssen einige bis Dutzende Meter pro Jahr erreichen, ebenso die Migrationswerte. Sie variieren jedoch von Fluß zu Fluß ziemlich stark. Die Breite des Mäandergürtels ist häufig ein Mehrfaches der Mäanderamplitude.

Der Austausch von Geschiebe zwischen Fluß und Ufer ist sehr intensiv. Aussortierungen des Materials (oben feiner, unten gröber) sind bekannte Erscheinungen.

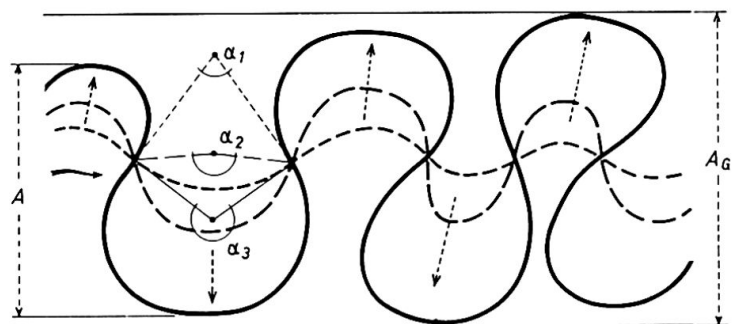


Fig. 10 Makrotyp mit freiem Mäandern. Die Mäandergürtelbreite A_G ist meist wesentlich größer als die Mäanderamplitude A einer einzelnen Mäanderdoppelschleife.

In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, daß die Mäanderschleifen nicht beliebig in ihrer Größe anwachsen können, ja es macht, wie wir später sehen werden, den Anschein, daß der oben beschriebene Zustand eher als Ausnahme zu werten ist, der sich nur unter ganz bestimmten Randbedingungen einstellen kann. An der grundsätzlichen Einteilung ändert diese Bemerkung aber nichts.

e) Unvollkommene Mäander

Oft bilden sich Einzelschleifen oder eine Folge von Einzelschleifen mit der speziellen Eigenschaft, daß bei *starkem Hochwasser* das ganze Flußgebiet (der ganze Mäandergürtel) überflutet wird. Hierbei bildet sich eine gerade Rinne geringer Breite, die die Schleife abschneidet (siehe Fig. 11). Vorerst ist diese Rinne schmal und unbedeutend. Mit der Zeit wird sie aber größer und absorbiert schließlich den größten Teil des Abflusses. Dadurch stirbt die Schleife ab. Das gerade Gerinne beginnt sich nun seinerseits zu krümmen und bildet schließlich wieder eine Schleife. Ein solcher Verformungszyklus kann sich schon während eines einzigen Hochwassers ausbilden. Die Verformungsgeschwindigkeit zeigt ähnliche Werte wie beim freien Mäandern. Das Talwärts-Migrieren hört jeweils sofort auf, sobald sich ein solcher Bypaß gebildet hat.

f) Gerinne mit Dünen, die unregelmäßig über das ganze Flußbett verteilt sind

Entsprechend wie die Mäandergerinne vom Dünen-typ abgeleitet wurden, ist dies auch möglich für *verzweigte Gerinne*, welche wir nachfolgend zur Vervollständigung des Überblicks berücksichtigen wollen. Transportiert ein Fluß große Geschiebemengen, so bildet sich ein breites, wenig tiefes Gerinne. Bei sehr starker Geschiebedotierung ergibt sich ein «wucherndes» Flußbett mit vielen, sich individuell bildenden Einzeldünen verschiedener Größe und Form. (Die unter a) beschriebene Dünenfront hat sich in viele Einzeldünen aufgelöst). Bei Mittel- und Niederwasser sieht man dann Bänke, evtl. bei sich rasch bildender Vegetation Inseln, die überall aus dem Wasser ragen. Die dadurch entstandenen Flußarme sind relativ *kurz* und zeigen öfters mäanderähnlichen Charakter. Die Migrationsgeschwindigkeit der Dünen beträgt einige bis einige 100 Meter pro Jahr.

Dieser Makrotyp entsteht bei *sehr leicht erodierbaren Ufern*. Auch bei diesem Typ besteht die Tendenz, das Gesamtgerinne übermäßig zu erweitern. Es bildet sich jeweils periodisch zurück. Je nach Aktivität des Flusses sind die Perioden ein einziges Hochwasser oder auch viele Jahre.

g) Verzweigte Gerinne in Überschwemmungsgebieten («Delta-Typ»)

Dieser Typ ist charakteristisch für Flachlandflüsse

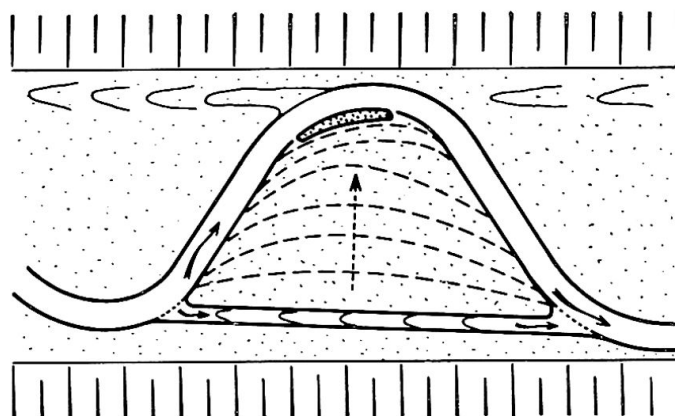


Fig. 11 Makrotyp mit unvollkommenem Mäandern. Die Mäanderschleife wird von Zeit zu Zeit abgeschnitten, indem der Abfluß durch einen Bypaß erfolgt (stark schematisiert).

mit weiten Überschwemmungsebenen. Im Gegensatz zum Typ f), wo die Verzweigungen innerhalb eines «Gesamtgerinnes» erfolgen, löst sich der Fluß beim vorliegenden Typ in einzelne, individuelle, meist gewundene Flußarme auf, die ihren Weg weit ab vom Hauptfluß nehmen können. Entstehung und Mechanismus sind gänzlich ungeklärt. Man vermutet eine gewisse Analogie zum Typ e). Verschiedene russische Flußmorphologen nennen diesen Typ *nicht* im Zusammenhang mit den Typen a) bis f). Als Beispiele können dienen: Rhein in Holland, indische Ströme (z. B. Indus) u. a.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die beschriebene Arbeitshypothese für die Beurteilung von Flußformen recht brauchbar ist und erlaubt, diese nach einheitlichen Gesichtspunkten zu ordnen. Leider mußte zur Erläuterung dieser Einteilung einiges vorweggenommen werden, was im Kapitel III und IV aus anderer Sicht nochmals diskutiert werden wird. Da es sich aber in diesen folgenden Kapiteln nicht mehr um die Wiedergabe einer Arbeitshypothese, sondern um sorgfältig gesammelte Beobachtungen und Meßdaten handelt, dürfte deren Wert nicht beschnitten worden sein.

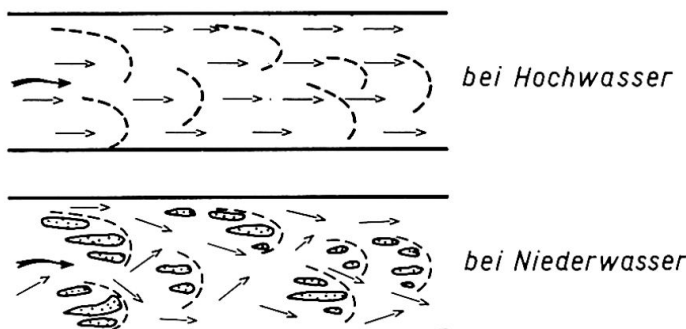


Fig. 12 Makrotyp mit verzweigtem Dünengerinne bei Hochwasser resp. bei Niederwasser.

III. PARAMETER, DIE FORM UND GRÖSSE DER MÄANDER BESTIMMEN

Obwohl man heute über die hydromechanische Seite des Mäanderproblems immer noch wenig weiß, hat man vor allem auf empirischem Weg einige wichtige Parameter feststellen können, die die Mäander in Form und Größe maßgeblich beeinflussen. Dieses empirische Vorgehen läßt Feinheiten außer acht und vermag nur diejenigen Größen zu erfassen, welche offensichtlich von Einfluß sind. Meist werden diese empirisch gefundenen Resultate in Form von Regime-Gleichungen dargestellt und gelten demnach für den Beharrungszustand¹⁶. Auf diese Beziehungen werden wir in Kapitel V zurückkommen.

Die nachfolgend aufgeführten Angaben basieren auf Modellversuchen und Naturbeobachtungen. Aus den Elementen, die das Mäandern bestimmen, gehen folgende dominierende Größen hervor:

- *Abflußwassermenge* mit Berücksichtigung des Abflußregimes (Wasserhaushalt)
- *Geschiebetrieb* unter Einschluß von Erosion-, Transport- und Ablagerungsregime, Kornaufbau, Erodierbarkeit von Gerinnesohle und -ufer (Geschiebehalt).
- *Talgefälle*

Wir nehmen dabei an, daß die anderen Größen, wie Mäanderlänge, -amplitude, Gerinnebreite und -tiefe u. a. von den oben aufgeführten Größen (Parameter) abhängig sind¹⁷.

Bevor wir auf Details eingehen dürfen, sollten wir sicherheitshalber feststellen, ob die Mäanderform evtl. zufälliger Natur ist, oder ob unter gleichen Voraussetzungen nur eine einzige Mäanderform möglich ist. Erst wenn diese Frage abgeklärt ist, dürfen wir uns in gleicher Weise auf Natur- und Modellbeobachtungen stützen und diese Beobachtungen direkt auswerten. Setzen wir uns deshalb vorerst kurz mit dieser Frage auseinander und gehen anschließend auf die drei erstgenannten Parameter ein.

1. Die Reproduzierbarkeit

Leider wurde in der Frage der Reproduzierbarkeit oder Eindeutigkeit der Mäanderbildung noch äußerst wenig unternommen, so daß man sich veranlaßt sieht, mühsam einige Teilergebnisse zusammenzuklauben. Glücklicherweise stehen einige wenige Versuche aus dem Wasserbaulaboratorium von Vicksburg/USA (21), (59) zur Verfügung. Die Gegenüberstellung von 3 unter genau gleichen Randbedingungen nacheinander durchgeführten Modellversuchen zeigen eine erfreuliche Übereinstimmung,

indem die Grundrißform der Mäander identisch war und die Querprofilformen ziemlich gut übereinstimmten. (90% der eingemessenen Sohlenpunkte stimmten kotenmäßig überein und 35% der Querprofile waren in ihrer Form identisch.) Eine weitere Untersuchung, ebenfalls mit einheitlichen Randbedingungen durchgeführt, jedoch unter Zuhilfenahme eines «falschen» Mäandergerinnes, sollte zeigen, inwieweit es einem Fluße möglich ist, das vorgegebene Gerinne umzubilden, so daß im Endzustand das «Sollgerinne» wieder entsteht, welches ausgehend von einem geraden Anfangsgerinne in früheren Versuchen erhalten wurde. Auch diese Versuche verliefen positiv, indem sich die Grundrißform langsam und die Querprofilformen rasch den «Sollformen» anpaßten. Einschränkend wurde jedoch festgestellt, daß dieses positive Ergebnis sich nur einstellte, wenn das vorgegebene Anfangsgerinne nicht außerordentlich stark von der «Sollform» abwich, andernfalls sich unter Umständen nur noch «ähnliche» Mäanderformen auszubilden vermochten. Diese Einschränkung ist jedoch nicht allzu gravierend, da wir nicht unbedingt voraussetzen müssen, daß die Mäanderform unabhängig von der Entstehungsgeschichte sei. Gewisse Befürchtungen, daß durch das im Modellversuch vorgegebene Anfangsgerinne die Mäanderform beeinflußt werde, sind deshalb abgesehen von dieser Einschränkung unbegründet (32).

Analoge Versuche mit verschiedenen Anfangsgefällen (variiert zwischen 3 und 6‰), aber sonst gleichen Randbedingungen verliefen ebenfalls positiv, indem sich im Endzustand (Beharrungszustand) immer wieder ein Gefälle von im Mittel 3,9‰ und dieselbe Mäanderform zeigte. Hierbei konnte es ohne weiteres vorkommen, daß sich am Anfang des Versuches überhaupt noch keine Mäander einstellten, sondern sich diese erst ausbildeten, nachdem sich das Gefälle durch Auflanden oder Erodieren etwas auskorrigiert hatte.

Zusammenfassend dürfen wir aufgrund dieser allerdings wenigen Versuche annehmen, daß die Mäanderbildung ein *reproduzierbarer* und ein *eindeutiger*

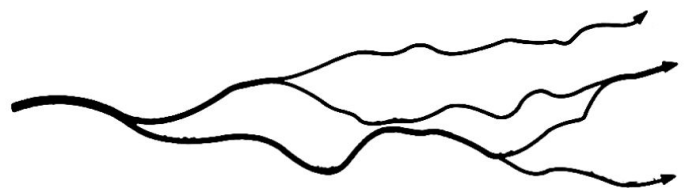


Fig. 13 Makrotyp des in individuelle Einzelgerinne verzweigten Flusses. Die einzelnen Flußarme können auf große Distanzen zu eigenständigen Gerinnen werden.

Vorgang ist. (Der exakt geführte Nachweis der Reproduzierbarkeit muß aber noch erbracht werden.)

2. Die Abflußwassermenge

Von den geraden Gerinnen ist bekannt, daß sich der Gerinnequerschnitt in Form und Abmessungen in Verbindung mit Schlengefälle und Geschiebeführung an die abzuführende Wassermenge anpaßt. Lapidar ausgedrückt hat ein Fluß mit großer Abflußwassermenge einen großen Durchflußquerschnitt und ein solcher mit kleiner Abflußwassermenge einen kleinen Durchflußquerschnitt. (Siehe Regimegleichungen im Kapitel I/2.) Diese Beobachtung gilt auch für Mäanderflüsse. So weiß man, daß große Flüsse große Mäander haben und umgekehrt (7). Es besteht demnach ein Zusammenhang zwischen der Abflußwassermenge Q und der Mäanderwellenlänge λ resp. Mäanderamplitude A einerseits und der Gerinnebreite b resp. Wassertiefe h andererseits (3), (24). Modellversuche zeigen die in Fig. 14 dargestellten Resultate, wobei jeweils Q während des Versuchs konstant gehalten wurde (21). In Natur sind allerdings die Verhältnisse wesentlich komplizierter, da Q häufig in weiten Grenzen variiert und die Häufigkeit dieser Variation sehr unterschiedlich ist. Hat man es mit einem Fluß zu tun, dessen Q auf die gesamte Mäanderstrecke denselben Charakter aufweist, so darf auch erwartet werden, daß die Mäander über die gesamte Strecke den selben Grundcharakter haben, homogene Alluvionsverhältnisse vorausgesetzt. Entsprechende Versuche mit zwei um den Faktor 2 verschiedenen Q zeigen, daß das Niederwassergerinne (entsprechend dem kleineren der beiden Q) sich sehr schnell an das «Hochwasser» (größeres Q) anpaßt, jedoch beim Abflauen des Hochwassers sich der Fluß erst wieder ein einigermaßen passendes Niederwassergerinne zu «suchen» hat. Dieser «Rückbildungsprozeß» benötigt in der Regel viel Zeit. Man hat es deshalb in Natur wegen des raschen Wechsels der Abflüsse häufig mit Zwischenformen zu tun. Es besteht demnach eine natürliche Divergenz zwischen Hochwasser- und Niederwasserabflüssen, resp. zwischen den beiden zugeordneten Gerinneformen, die evtl. aber nicht notwendigerweise beide mäandern (43). Ja, es kann ohne weiteres vorkommen, daß das Hochwasser die Tendenz hat, das mäandernde Niederwassergerinne zu begradigen oder gar zu verzweigen (20).

Zur Präzisierung der Aussage über den Einfluß des Abflußregimes auf die Mäanderbildung dienen Modellversuche von Bordas (7)¹⁹. Sie sagen aus, daß die Mäanderlänge λ sich vergrößert, je größer $\Delta Q = Q_{\max.} - Q_{\min.}$ ist und je häufiger starke Abflußschwankungen auftreten. Vieles weist darauf hin, daß bei Abflußganglinien mit stark verschiede-

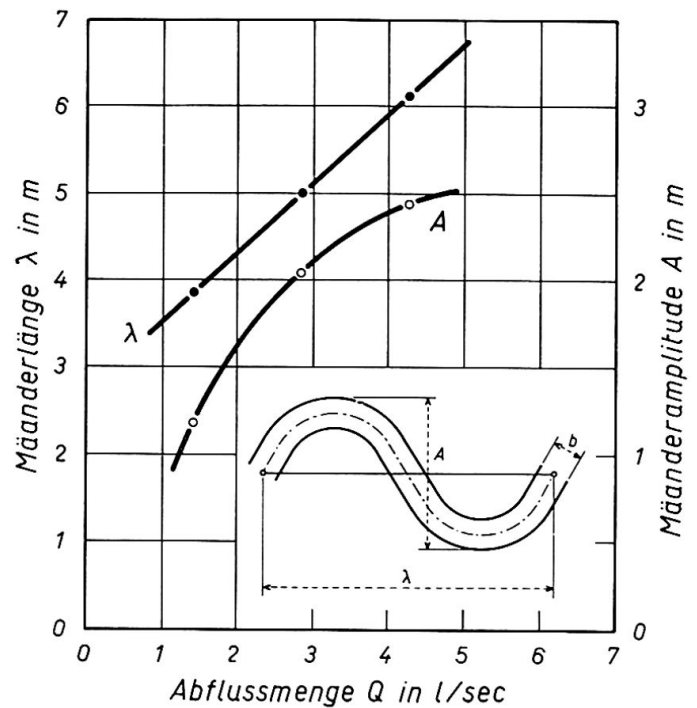


Fig. 14 Abhängigkeit der Amplitude A und der Wellenlänge λ von der Abflußwassermenge Q aus Modellversuchen (21)¹⁸.

nen $Q_{\max.}$, die relativ häufig auftreten, sich verschiedene Mäandergrundtypen ausbilden, die sich gegenseitig überlagern²⁰. Hinsichtlich der Mäanderamplitude A fand man keine eindeutigen Resultate, da diese in einem zu weiten Rahmen variierten, um einwandfrei eine Tendenz festzustellen. Bordas glaubt, daß sich ein Gerinne derart ausbildet, daß für den Transport von Q und G ein Minimum an Arbeit zu leisten ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß Mäanderform und -größe bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen von Q abhängen, und daß in Natur die Gesamtheit der hydrologischen Begebenheiten Form und Größe bestimmen, wobei speziell auf Häufigkeit und Dauer kleiner, mittlerer und großer Abflüsse zu achten ist (5), (7), (10), (21), (24), (41).

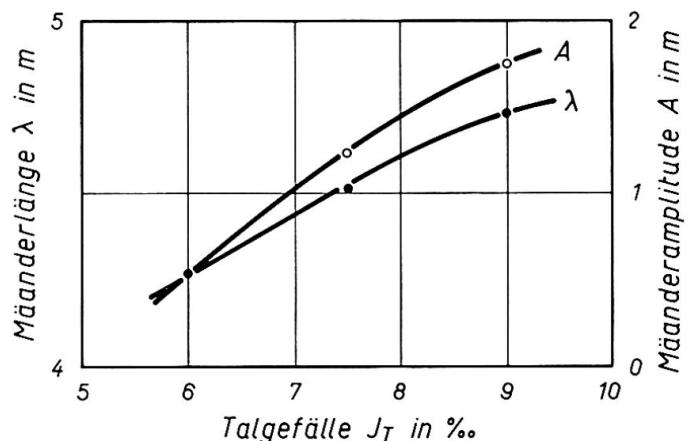


Fig. 15 Abhängigkeit der Wellenlänge λ und der Amplitude A vom Talgefälle J_T bei konstantem Q aus Modellversuchen (21).

3. Das Talgefälle

Ein weiterer relativ leicht zu überblickender Parameter ist das Längsgefälle J_T des Tales oder präziser ausgedrückt, das mittlere Längsgefälle des Mäandergürtels. Zur Abklärung der Bedeutung von J_T wurden ebenfalls Modellversuche ausgeführt (21), unter Beibehaltung derselben Randbedingungen.

Hierbei zeigte sich das in Fig. 15 dargestellte Resultat, welches aussagt, daß im untersuchten Bereich mit zunehmendem J_T die Mäander größer werden. Dies wird damit begründet, daß die Geschiebetransportenergie resp. die Erosionsenergie umso größer ist, je größer J_T ist, was ein Ausweiten der Mäander ermöglicht²¹, d. h. daß mit zunehmender Geschiebetransportenergie, die Mäander sich vergrößern (bis zu einem optimalen, heute noch unbekanntem Wert) (21), (23), (26), (32).

Häufig haben Flüsse mit steilerem Gefälle auch grobkörnigeres Geschiebe als solche mit kleinerem Gefälle. Unter solchen Umständen ist weniger mit einer Zunahme von A , als mit einer solchen von λ zu rechnen (10), (24).

Beim Durchlaufen des unteren Gefällsbereiches eines Gerinnes (flach bis mittelsteil) fand Ackers (1), daß ausgehend von einem geraden Gerinne dieses gerade blieb, auch wenn sich Erosionserscheinungen zeigten. Erst nachdem eine gewisse Minimalneigung überschritten war, setzte die Bildung von alternierenden «Bänken» (in Form seichter Stellen) ein, wodurch das Mäandern eingeleitet wurde. Beim Durchlaufen des Gefällsbereiches $J_T = 0,4$ bis $3,0\text{‰}$ bildeten sich erst bei $J_T \geq 1,2\text{‰}$ Mäander aus. Hierbei wurde ebenfalls festgestellt, daß mit zunehmendem J_T die Mäandertendenz sich verstärkte²².

Durch systematische Auswertung hauptsächlich japanischer Mäandergürtel wurde in Ergänzung zu den früheren Aussagen beobachtet (29), daß eine Änderung in J_T auch eine solche systematischer Art in A zur Folge hat (ausgeprägter bei großen als bei kleinen Flüssen). Überschreiten entsprechend dieser Publikation die Gefälle $J_T = 5\text{‰}$, so vermögen sich die Mäander großer Flüsse nicht mehr weiter an J_T anzupassen und die Mäander beginnen sich zurückzubilden oder gar zu verschwinden. Dieses «Grenzgefälle» hängt natürlich noch von anderen Parametern ab, wie Korngröße usw. Das Gefälle von $J_T = 5\text{‰}$ darf deshalb nicht als allgemein gültiger Grenzwert betrachtet werden. Ist umgekehrt J_T zu klein, so können sich keine schöngeformten Mäander mehr ausbilden, was besonders für kleine Flüsse zutrifft. Unter Umständen sind sie dann auch merkwürdig verformt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Fig. 16 dargestellt.

Die Gesamtheit dieser Beobachtungen läßt sich wie folgt zusammenfassen:

- Mäanderform und -Größe sind von J_T abhängig.
- Es gibt eine obere und eine untere Begrenzung von J_T . Außerhalb dieses Bereiches bilden sich keine Mäander aus; weitere Angaben siehe Kapitel V/1.

Obige Aussagen gelten für kleine Froude'sche Zahlen ($Fr < 0,5$)²³. Bei großen Froude'schen Zahlen ($Fr > 0,8$) bilden sich ebenfalls Mäander, welche aber auf einen etwas anderen Entstehungsmechanismus zurückzuführen sind, weshalb wir sie mit Pseudomäander bezeichnen wollen. Entsprechende Angaben finden sich im Kapitel IV/3.

4. Der Sedimenttransport

Der Einfluß des Geschiebes auf die Mäanderbildung und deren Form ist außerordentlich schwer zu beschreiben. Es spielen derart viele Faktoren eine Rolle, daß es Mühe bereitet, Ursache und Wirkung voneinander zu unterscheiden. Auch ist es kaum möglich, eine Trennung zwischen aus Sohlen- resp. Ufermaterial entstandenen Geschieben hinsichtlich deren Bedeutung auf die Gerinnebildung vorzunehmen. Denn je nach der Erodierbarkeit der Ufer wird ja der Geschiebetransport und damit der Geschiebehaushalt beeinflusst. Dies wirkt sich wiederum auf die Mäanderbildung aus. Notwendigerweise ist deshalb in diesem Kapitel die Gesamtheit dieses Komplexes zu diskutieren.

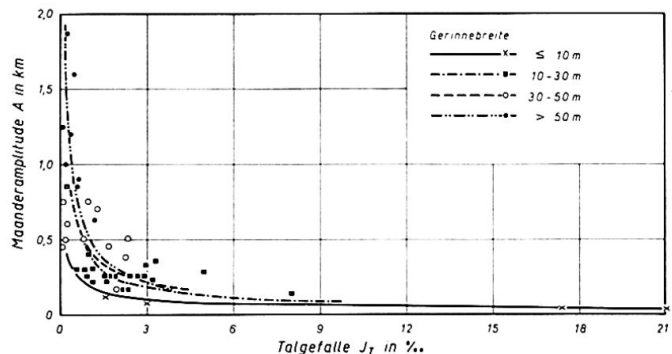


Fig. 16 Abhängigkeit der Amplitude A vom Gefälle J_T unter Berücksichtigung der Flußbreite (29)*.

*Der Widerspruch zwischen Fig. 15 und 16 ist nur scheinbar. Die Werte von Fig. 16 sind Optimalwerte (für die verschiedenartigen Q , Sedimentzusammensetzungen usw.), wohingegen Fig. 15 unter Variation eines nur einzelnen Parameters gefunden wurde. Ein einziger Punkt der A -Kurve aus Fig. 15, nämlich der optimale, entspräche einem Kurvenpunkt von Fig. 16. (Welche diese optimalsten Bedingungen sind, kennt man heute erst einigermaßen von geraden Gerinnen.)

a) Die Geschiebebewegung (Transportmechanismus)

Friedkin (21) fand in seinen Modellversuchen, daß in *aktiven Mäanderflüssen* die Kurvenaußenseite die Geschiebequelle darstelle. Dieses «Kurvengeschiebe» legt nur einen kurzen Weg zurück bis zur nächsten Kurveninnenseite, wo es größtenteils infolge einer Verminderung der Fließgeschwindigkeit abgelagert wird. Nur ein geringer Anteil dieser Geschiebemenge findet den Weg zur nächstfolgenden Kurveninnenseite (19) (siehe Fig. 17a). Bei *inaktiven Mäanderflüssen* dagegen liefern die Ufer praktisch kein Geschiebe und der Geschiebetransportmechanismus ist ähnlich demjenigen gerader Gerinne, wobei wegen der in der Kurve vorhandenen Drehströmung das Geschiebe nicht dem Talweg folgt, sondern seinen Weg von Kurveninnenseite zu -innenseite sucht (19) (siehe Fig. 17c). In den meisten Fällen hat man es jedoch mit einer Kombination der beiden erwähnten Möglichkeiten zu tun (Fig. 17b). In Natur kommt der Fall der Fig. 17a überall dort vor, wo die Ufer wesentlich leichter erodierbar, d. h. aus wesentlich mobilerem Material aufgebaut sind als die Gerinnesohle, sei dies nun, daß die Sohle aus Festgestein besteht, sich aus irgendwelchen Gründen abgeplästert hat, oder aber die Ufer z. B. aus feinerkörnigen, locker gelagerten Verlandungsmaterialien bestehen, wie sie für aktive Mäanderflüsse häufig typisch sind.

Den Fall der Fig. 17c findet man vorwiegend bei stark uferverbauten Flüssen oder dann, wenn die Ufermaterialien z. B. infolge Kohäsion eine größere Widerstandsfähigkeit aufweisen als die Sohle. Weiter wird er überall dort angetroffen, wo sich das Gesamtgerinne abgeplästert hat oder das Gerinne aus Felsgestein besteht und derart das von oberstrom anfallende Geschiebe durchgeschwemmt (-geschleust) wird.

Entsprechend den in Fig. 17 dargestellten Fortbewegungsarten sind die Querprofile von den in Fig. 14 dargestellten Grundformen etwas verschieden. Dies betrifft insbesondere die Übergangsstrecken zwischen zwei Bogen.

Außer diesen eben geschilderten Vorgängen findet vor allem in den Flußkrümmungen meist eine Ausortierung des Geschiebes nach Korngrößen statt, welche verschiedene Wegbahnen verfolgen (siehe auch [5]).

Auch die in Natur häufig stark variierenden Abflußwassermengen haben, wie schon in anderem Zusammenhange erwähnt, Auswirkungen auf die Gerinnebildung resp. die Geschiebebewegung. Je nach Wasserführung befinden sich nämlich die Stellen mit Erosion resp. Auflandung an verschiedenen Orten. In vielen Versuchen (21), (23), (59) wurde festgestellt, daß selbst bei Niederwasser Ufererosionen möglich sind. Nur liegt dann die Angriffsstelle weiter oberstrom. Mit wachsendem Q wandert diese

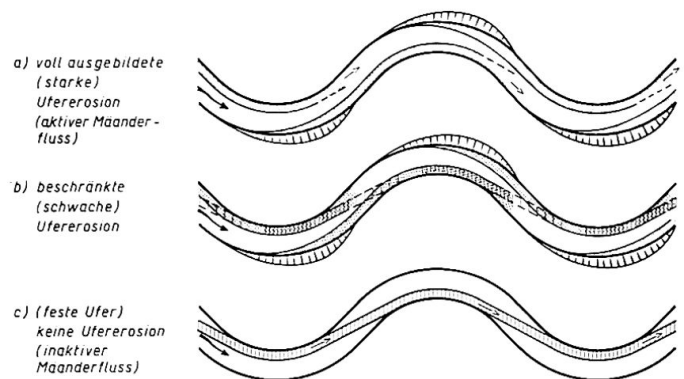


Fig. 17 Wegbahnen des Geschiebes in Mäanderflüssen mit voll ausgebildeter, mit beschränkter und ohne Ufererosion nach Modellversuchen (21) (stark schematisiert).

Stelle immer weiter kurvenabwärts. Bei schnell fließenden Gewässern kann es auch vorkommen, daß gleichzeitig mehrere Angriffsstellen in einer Kurve vorhanden sind.

Auch die Auflandungsstellen ändern sich. So kann z. B. beobachtet werden, daß die Übergangsstrecken zwischen zwei Bogen bei Hochwasser verlanden und bei Niederwasser wieder auserodieren. Dieser Wechsel wirkt sich somit auch auf das Längenprofil aus. Wie früher erwähnt, führen «sehr rasche» Wechsel in Q zu einer «Desorientierung» des Niederwasserabflusses in diesen Übergangsstrecken, wobei sich eine Normalisierung erst nach einer längeren Niederwasserperiode wieder einzustellen vermag. Je unregelmäßiger der Abfluß und je größer die Unterschiede zwischen Hoch- und Niederwasser sind, umso weniger kann sich deshalb ein einheitlich und gut geformtes Gerinne ausbilden.

b) Einfluß der Geschiebezufuhr von oberstrom auf die betrachtete Mäanderstrecke

Von geraden Gerinnen ist, wie schon mehrmals erwähnt, bekannt, daß sich im (zeitlich begrenzten) Beharrungszustand zwischen Q, G, J_s und der Querprofilform ein eindeutiges, offenbar optimales Verhältnis einstellt. Außerdem weiß man, daß bei gegebenem Q die Querprofilform des Gerinnes nur erhalten bleibt, wenn ein ganz bestimmtes G zugeordnet ist (resp. im Modell beschickt wird). Unter G ist in diesem Zusammenhang nicht nur die Geschiebemenge, sondern auch Kornaufbau, spezifisches Gewicht usw. zu verstehen. In Analogie zu den geraden Gerinnen muß für *Mäanderflüsse* deshalb angenommen werden, daß bei gegebenem Q eine enge Abhängigkeit zwischen G und der Mäanderform (einschließlich J_T) besteht. Eine Bestätigung dieser Annahme kann man darin erblicken, daß je größer G im Verhältnis zu Q ist, die Mäander umso größer werden und sich diese umso rascher entwickeln

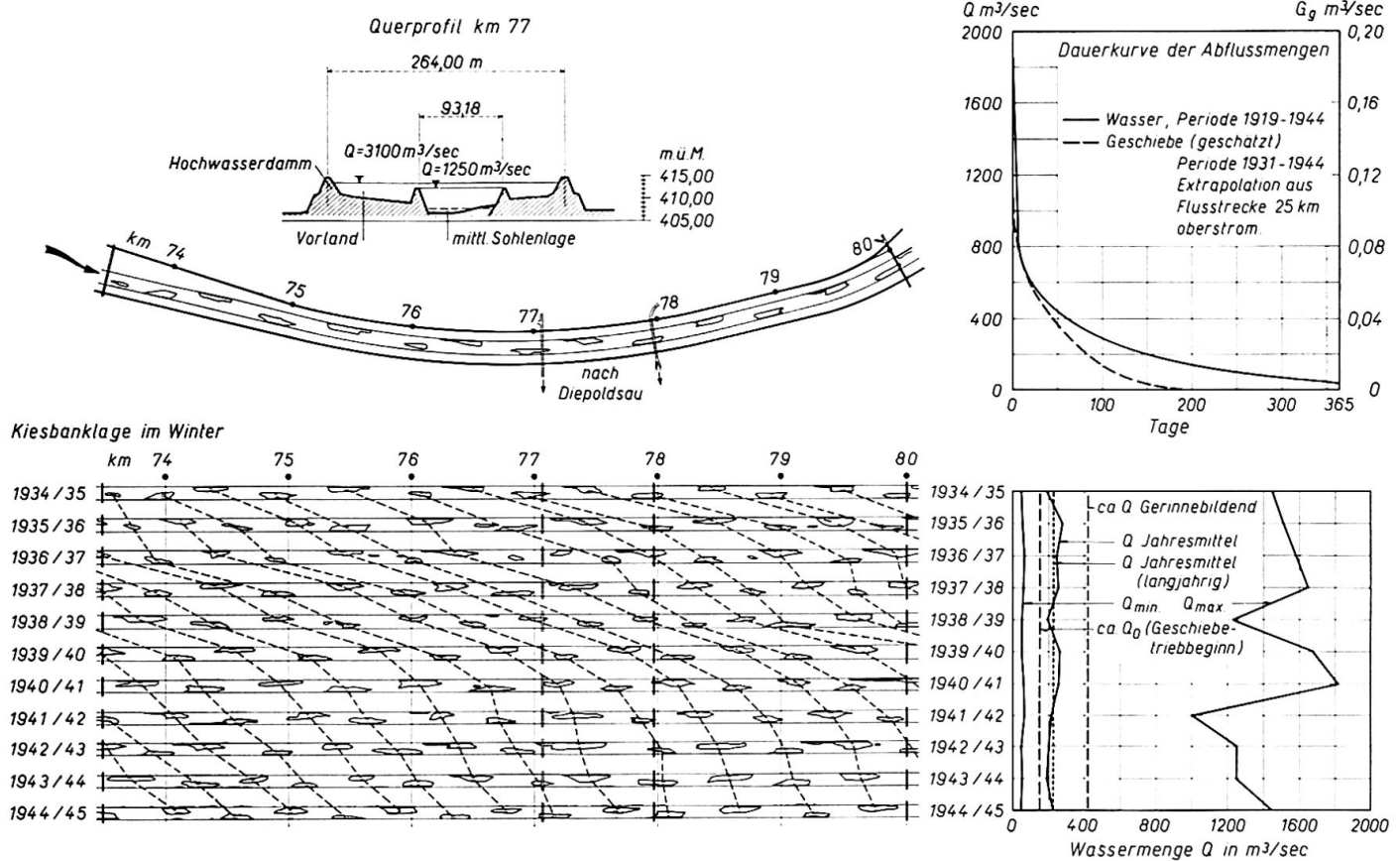


Fig. 18 Schematische Darstellung der Fortbewegung von Geschiebebänken im Rhein beim Diepoldsauer-Durchstich der Jahre 1934 bis 1944. (Nach Angaben der Rheinbauleitung sind als Folge künstlich geschaffener, stark veränderter Zuflußbedingungen die heutigen Geschiebeverhältnisse von den damaligen sehr stark verschieden.)

(21), (14)²⁴. G sollte allerdings nicht in allzu weiten Grenzen variieren, ansonst andere Flußformen entstehen können (36)²⁵. Mit der Vergrößerung von G ist in der Regel ein Flacher- und Breiterwerden des Gerinnes verbunden, wie dies auch von geraden Gerinnen her bekannt ist, wohingegen bei einer Verkleinerung von G dieses schmal und tief wird (44). In Analogie zu den geraden Gerinnen gibt es offenbar auch bei Mäanderflüssen ein günstigstes G_g , bei welchem für die Mäander hinsichtlich Gleichartigkeit und Regelmäßigkeit optimale Verhältnisse vorliegen. In Modellversuchen (59) wurde z. B. gefunden, daß bei

$G < G_g$ beim Modellanfang zu kleine Mäander und bei

$G > G_g$ beim Modellanfang zu große Mäander entstanden.

Nach Zurücklegung einer gewissen Anlaufstrecke normalisierten sich diese Mäander auf Kosten einer erodierenden resp. auflandenden Anlaufstrecke. Über den Bereich $G_g \pm \Delta G$, der für die Mäanderbildung tolerierbar ist, ohne daß wesentliche Abweichungen von den optimalen Verhältnissen entstehen, ist wenig bekannt. Es scheint ziemlich starke Abweichungen ΔG zu benötigen, um in kurzer Zeit

spürbare Gerinneänderungen entstehen zu lassen. So änderte sich z. B. am stark mäandernden Mississippi bei Cairo nach dem Bau einer Stauanlage (teilweise oder evtl. vollständiges Unterbinden der Geschiebezufuhr) die Mäandergeometrie bis heute nicht, obwohl die Flußsohle anfänglich erodiert und derart das Sohlgefälle reduziert wurde. Infolge einer zu vermutenden Sohlenabpflasterung stagnierte vielmehr die Mäanderentwicklung (inaktive Mäander).

Friedkin (21) kommt hinsichtlich seiner Modellversuche zum Schluß, daß die von oberstrom erfolgende Geschiebezufuhr (im Modell identisch mit der Geschiebebeschickung am Modellanfang) in erster Linie dazu dient, das durch die beschränkte Modelllänge (herausgegriffene Flußstrecke) verursachte Geschiebemanko am Modellanfang zu decken. Dies würde bedeuten, daß die Betrachtung der Geschiebezufuhr von oberstrom nur in außergewöhnlichen Fällen für Flüsse von großer Bedeutung ist, wie z. B. für Seeausflüsse (keine Geschiebezufuhr von oberstrom), Einmündung von Seitenflüssen mit stärkerer resp. schwächerer Geschiebeführung als der Hauptfluß, Flüsse nach Durchlaufen von Verlandungsebenen usw.

Diese aus relativ wenigen, zweckgebundenen Versuchen resultierenden Ergebnisse sollten aber nicht

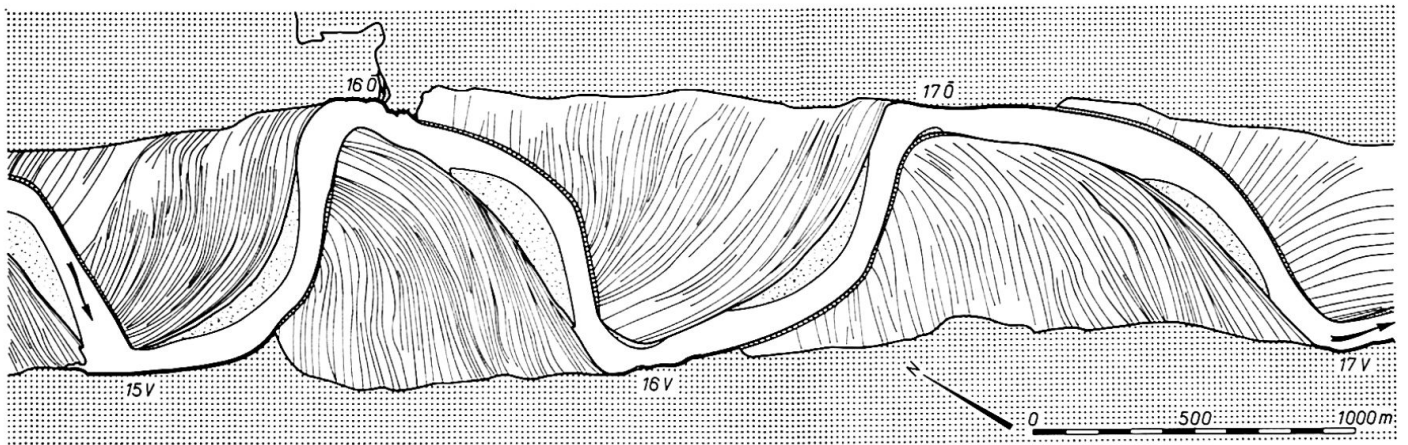


Fig. 19 Eingengt mäandernder Klarälfven (Schweden). Eingezeichnet sind typische, alte Mäanderspuren, welche als Folge der Migration entstanden sind (fluviale Sandablagerungen). Diese Spuren sind «Wälle», die sich während großer Hochwasser mit einer Häufigkeit von einem Wall pro 6 bis 30 Jahre (im Mittel alle 22 Jahre) bildeten. Die Migrationsgeschwindigkeit beläuft sich derart zu ca. 1 Mäanderlänge pro 2000 Jahre. $\lambda = 1500$ bis 2100 m, $A = 800$ bis 880 m, $J_T = 0,085$ bis $0,090\text{‰}$ (22). (Diese Zeitschätzung ist insofern fraglich, als sich in Modellversuchen mit $Q = \text{konst.}$ ebenfalls solche Wälle als Folge der Migration ausbilden.)

unbesehen verallgemeinert werden. Naturbeobachtungen decken sich nicht in allen Fällen mit Friedkins Feststellungen.

c) Einfluß der Geschiebezufuhr aus den Flußufern, resp. deren Erodierbarkeit

Die schon zitierten Versuche von Friedkin (21) lassen wie erwähnt erkennen, daß die hauptsächlichste Geschiebequelle eines mäandernden Flusses die Ufererosion ist. Die hievon anfallenden Geschiebemengen bestimmen nicht nur weitgehend Art und Weise des Mäanderns (Mäandergeometrie), sondern auch die Querprofilform des Gerinnes. In Präzisierung zum früher Gesagten gilt: *Je geringer und langsamer die Ufererosion ist, um so geringer ist das Mäandern (Windungsgrad) und um so tiefer und schmaler wird das Gerinne* (vor allem der Talweg).

Es spielt dabei eine untergeordnete Rolle, ob nun die

Erodierbarkeit (Erosionswiderstandsfähigkeit) der Ufer oder aber die Erosionskraft des Wassers schließend die anfallende Geschiebemenge bestimme (siehe auch [23]). Jedoch sind die geotechnischen Eigenschaften des Ufermaterials von etwelcher Bedeutung. Je gleichmäßiger gekörnt und je «leichter erodierbar» das Ufermaterial ist, um so regelmäßiger entwickeln sich die Mäanderformen. Schon geringfügige Materialinhomogenitäten können den Abflußvorgang stören und führen zu unregelmäßigen Formen. So können sich Mäanderschleifen übermäßig strecken mit unvermittelt auftretenden scharfen Krümmungen. Da sich in einer Kurve Störungen jeweils bis mehrere Kurven unterstrom spürbar machen, wird somit *die Form der Einzelkurven nicht nur durch die örtlichen Gegebenheiten in der Kurve selbst bestimmt, sondern auch durch die in Oberstrom vorhandenen Verhältnisse* (21), (50).

IV. SPEZIELLE EIGENSCHAFTEN VON MÄANDERFLÜSSEN

Das Mäandern von Flüssen ist mit sehr spezifischen Vorgängen verbunden. Wohl der wichtigste davon ist das Ausweiten und Wandern der Mäander, die sog. Migration. Damit in enger Verbindung steht das Verformen der Mäanderschleifen und das Abschneiden derselben. Diese Probleme sind bis heute recht unsystematisch untersucht worden. Nur wenige Laboratoriumsversuche stehen zur Verfügung, die einige Hinweise zu diesen Phänomenen liefern können. Naturbeobachtungen sind dagegen in grö-

ßerer Zahl vorhanden, doch sind diese Angaben meist unvollständig, weshalb eine systematische Auswertung stark erschwert oder gar unmöglich ist.

1. Die Migration und das Verformen von Mäandern

Das langsame Talwärtswandern von *Geschiebedünen* und *-bänken* ist eine für unsere Flüsse typische und bekannte Migrationserscheinung. Fortbewe-

gungsgeschwindigkeiten von mehreren Metern bis mehreren Hundert Metern pro Jahr werden erreicht (siehe Fig. 18).

Wie wir früher gesehen haben, besteht eine enge Verwandtschaft zwischen solchen Geschiebebänken und Flußmäandern. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß sich auch *Flußmäander* in der Regel talwärts verschieben und die Mäanderschleifen unter Umständen vergrößern und auch wieder verkleinern (10), (21). Wir haben es demnach mit 2 Phänomenen zu tun, nämlich dem Talwärtswandern (Migration) einerseits und einem mehr oder weniger ausgeprägten periodischen Vergrößern und Verkleinern der Mäander andererseits²⁶. Diese beiden Prozesse kommen je nachdem einzeln oder auch gemeinsam vor. Beobachtungen über letzteres Phänomen gibt es nur wenige. In Alpen- resp. Gebirgländern sind sie unbekannt. Hingegen ist das Migrieren eine sehr häufige Erscheinung, weshalb wir sie entsprechend ihrer Bedeutung als erstes diskutieren.

Beim *Migrationsprozeß* bleiben die Mäanderformen in der Regel erhalten, homogene Alluvionen vorausgesetzt. Ansonst verformen sich die Mäander und passen sich den lokalen Verhältnissen an. Hierbei wird dann aber auch die *Migrationsgeschwindigkeit* örtlich mitbeeinflusst, d. h. sie wird unregelmäßig, weshalb die Mäander verzerrt oder gestaucht werden (23). Die Migrationserscheinungen beschränken sich aber nicht nur auf Alluvionsmaterialien, sondern sie sind auch in Festmaterialien feststellbar (eingeschnittene Mäander). Nur ist dann die Migrationsgeschwindigkeit sehr klein. Unterschnittene (überhängende) Kurven in Schluchten und im Gletscher eis von Schmelzwasserbächen oder in mäandernden Rinnenkarren sind eine öfters beobachtete Erscheinung.

Wie einleitend erwähnt, ist die Migrationsgeschwindigkeit von Fluß zu Fluß, ja häufig von Flußstrecke zu Flußstrecke sehr verschieden. Kaum oder nicht migrierende Flüsse sind keine Seltenheit. So sind z. B. diese Geschwindigkeiten bei schwedischen Mäanderflüssen klein (26) (zum Teil eingeschnittene Mäander). Um sich über diese Geschwindigkeiten eine Vorstellung zu machen wurden in Tabelle 1 Migrationswerte sowohl von Mäandern als auch von alternierenden Geschiebebänken, letztere von geraden oder leicht gewundenen Flüssen, zusammengestellt. Der Unterschied zwischen Geschiebebänken und Mäandern ist groß. Bei den Mäandern glaubt man, daß mit zunehmender Flußgröße auch die Migrationsgeschwindigkeit zunehme²⁷. Diese Hypothese erscheint beim Vergleich der Tabellenwerte plausibel, doch sollte sie noch besser belegt werden, bevor man sie als Regel akzeptieren darf.

Aus den früheren Feststellungen über einige wichtige Parameter, die das Mäandern maßgeblich beeinflussen, kann geschlossen werden, daß auch die Migrationsgeschwindigkeit von diesen Größen ab-

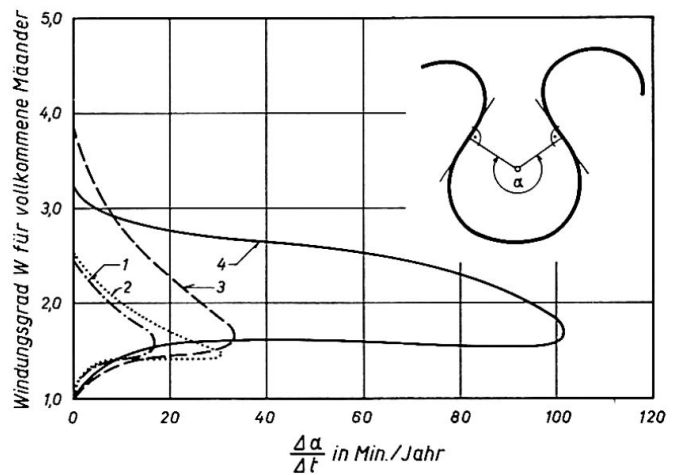


Fig. 20 Zeitlicher Verlauf des Mäanderwachstums russischer Flüsse unter Berücksichtigung des Wendungsgrades für vollkommenes (freies) Mäandern (49).

- 1 Oka-Fluß zwischen Pron-Fluß und dem Wohnort Yushta
- 2 Oka-Fluß oberhalb der Einmündung des Pron-Flusses
- 3 Oka-Fluß zwischen den Wohnorten Yushta und Rubetskoye
- 4 Irtysch-Fluß zwischen Pavlodar und Urlyutyub

hängen muß. Beobachtungen an vielen Alluvionsflüssen Neuseelands (23) bestätigen dies. Sie zeigen aber auch, welche große Bedeutung dem Abflußregime zukommt (siehe auch Fig. 18). Eben solche Bedeutung ist, wie schon früher erwähnt, der Erozierbarkeit resp. «Mobilität» der Ufer beizumessen (10).

Am Anfang dieses Kapitels wurde erwähnt, daß die Mäander sich vergrößern und z. T. auch wieder zurückbilden können, ein Prozeß, der mehrere Dekaden in Anspruch nimmt (10), (21). Dieses Verändern der Mäanderamplitude resp. des Wendungsgrades wurde genauer verfolgt (49) und man fand für Flachlandflüsse Rußlands das in Fig. 20 wiedergegebene grundsätzliche Verhalten. Hierbei zeigte sich bei den untersuchten Flüssen eine maximale Wachstumsrate bezüglich α im Bereiche des Wendungsgrades von $w = 1,5$ bis $1,6^{28}$ und im Bereich darunter eine verhältnismäßig sehr rasche Zunahme der Schleifengröße (bei geringer Änderung von α). Man weiß heute leider über dieses Phänomen noch viel zu wenig, als daß man mit Bestimmtheit Aussagen über die tatsächlichen Ursachen machen könnte. So ist es nicht ausgeschlossen, daß nicht nur hydromechanische, sondern unter Umständen auch klimatische Vorgänge (Abflußregime) diese Mäanderänderungen mitbestimmen.

Ein weiteres wichtiges Phänomen ist das Verhalten migrierender Mäanderflüsse beim Auftreffen auf Hindernisse, wie Felssporne, Taleinengungen, Ver-

bauungen usw., die den Migrationsprozeß lokal stören. Interessanterweise läßt sich aber der Gesamtprozeß des Migrierens in der Regel dadurch nur wenig beeinflussen. Die Mäander werden wohl verformt (vergrößert, verkleinert, gestaucht, gestreckt, verbogen), aber nur solange, bis die betreffende Mäanderschleife das Hindernis überwunden hat (siehe Fig. 21).

Immerhin darf man nicht vergessen, daß sich eine Störung über mehrerer Mäanderschleifen fortpflanzt und deshalb schon relativ kleine Störungen das *Mäanderbild* auf längere Strecken merklich beeinflussen. Die meisten Abweichungen von der Normalform sind jedoch nicht auf derart starke «Eingriffe», wie sie in Fig. 21 dargestellt sind, zurückzuführen, sondern stehen gewöhnlich im Zusammenhang mit Verschiebungen im methodischen Austausch von Material, meist verursacht durch Inhomogenität im Aufbau der Alluvion. Dadurch wird der Fluß veranlaßt, den Weg des geringsten Widerstandes zu suchen und seinen regelmäßigen Mäanderweg den lokalen Verhältnissen anzupassen, weshalb Gerinne mit stark variierender Sohlen- und

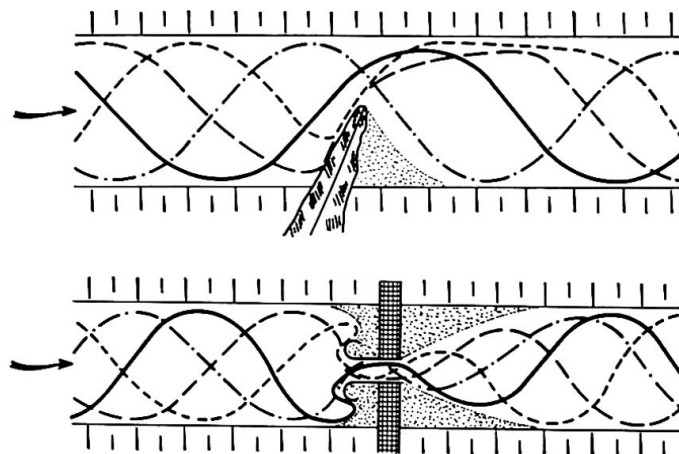


Fig. 21 Störung migrierender Mäanderflüsse (stark schematisiert). Oben: Wirkung einer einseitigen Ablenkung. Unten: Wirkung einer starken lokalen Einschnürung (Brücke).

Ufermobilität häufig sehr unvollkommene Flußformen zeigen (52). (Weitere Angaben finden sich unter [11], [23], [41], [43].)

Tabelle 1: Migrationsgeschwindigkeiten für gerade und Mäanderflüsse ([62] u. a.).

Fluß und Standort	Einzugsgebiet in km ²	Meßperiode	Migrations- geschwindig- keit in m/Jahr
<i>Mäanderflüsse</i>			
Normal Brook bei Terre Haute/Ind. USA	2,6	1897—1910	0,7
Watts. Branch bei Rockville/MD, USA	10,4	1915—1955	0—0,08
		1953—1956	0,60
Rock Creek bei Washington DC., USA	18,1—155,5	1915—1955	0—0,06
Nebenfluß des Minnesota Rivers bei New Ulm/Minn., USA	25,9— 38,8	1910—1938	2,75
North River Va., USA	129,5	1834—1884	2,4
Seneca River bei Dawsonville/Md., USA	261,0	50—100 Jahre	0,06
Laramic River bei Fort Laramic/Wyo., USA	11 920	1851—1954	0,31
Minnesota River bei New Ulm/Minn., USA	25 900	1910—1938	0,0
Ramganga River bei Shahabad/Indien	259 000	1795—1806	80,4
		1806—1883	4,3
		1883—1945	4,0
Colorado River bei Needles/Calif., USA	442 000	1858—1883	244,0
		1883—1903	45,8
		1903—1952	25,2
		1942—1952	3,1
		1903—1942	29,9
Yukon River bei	828 000		
Kayukuk/Alaska, USA		ca. 170 Jahre	9,7
Holy Cross/Alaska, USA		1896—1916	36,6
Missouri River bei Peru/Nebr., USA	906 000	1883—1903	76,3
Mississippi River bei Rosedale/Miss., USA	2850 000	1881—1913	192,0
		1930—1945	48,2
<i>Gerade Flüsse mit Geschiebebänken</i>			
Garonne/Frankreich		vor 1848	20—30
Loire zwischen Loiret und Loire-et-Cher/Frankreich		vor 1909	~ 1100
		um 1909	360
<i>Rhein</i>			
unterhalb Straßburg		1900—1922	68
oberhalb Straßburg bis halbwegs Basel		1900—1922	590
oberhalb Bodensee (bei Diepoldsau) (siehe Fig. 18)	6 118	1935—1945	410

Ähnliche Störungen verursachen auch Einmündungen von Seitenzuflüssen, besonders wenn deren Wasser- und Geschiebeabflußregime einen vom Hauptfluß verschiedenen Charakter aufweisen. Solche Störungen können vorübergehender oder auch bleibender Natur sein. Ja, es ist möglich, daß der Hauptfluß unterstrom über eine gewisse Strecke Verzweigungen zeigt und erst nach Zurücklegen einer «ausreichenden Wegstrecke» wieder zu mäandern beginnt.

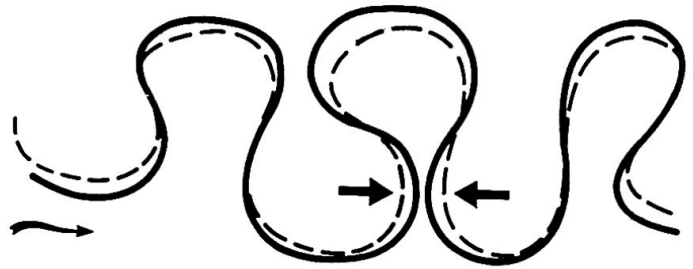


Fig. 22 Mäander-Durchstich (1. Typ).

2. Die Bildung natürlicher Mäander-«Durchstiche»

Unter Durchstich hat man das Abschneiden einzelner Mäanderschleifen zu verstehen, die im Sinne einer Verkürzung und Begradigung des Flußlaufes wirkt. Es ist ein natürlicher Vorgang, der die Gesamtflußlänge über lange Zeitperioden betrachtet gleich bleiben läßt, trotz der Tendenz, durch Vergrößern der Mäanderschleifen die Flußlänge ständig anwachsen zu lassen²⁹. Ja, es scheint, daß sich Durchstiche dann einstellen, wenn die Gerinnelänge (Talweg) einen «Maximalwert» erreicht hat.

Durchstiche sind bis heute nur von aktiven Mäanderflüssen bekannt. Zwei Haupttypen können unterschieden werden (10), (49):

— *1. Typ*: Frei mäandernder, aktiver, evtl. auch eingeschnittener Fluß hohen Windungsgrades, dessen Ufer nicht oder doch nur äußerst selten bei Hochwasser überflutet werden (Fig. 22). Der Durchstich erfolgt durch ein ständiges Näherrücken der Mäanderschleifen bis ein Durchbruch erfolgt. Meist treten Durchstiche erst bei Windungsgraden $w \geq 4$ bis 5 auf³⁰.

— *2. Typ*: Frei mäandernder Fluß mittelgroßen Windungsgrades, dessen Ufer immer wieder überflutet werden (Überschwemmen der Flußauen) und der bei dieser Gelegenheit Sekundärgerinne parallel zur Axe des Mäandergürtels bildet, die als «Bypaß» wirken. Diese vergrößern sich sukzessive, bis sie schließlich zum Hauptgerinne werden (siehe Kapitel II/3, S. 66, (10), (15), (21), (49) u. a. Dieser Bypaß entsteht meist durch Tiefenerosion von unter- nach oberstrom. Solche Durchstiche treten am häufigsten bei Windungsgraden $w \geq 1,7$ bis 3,0 auf³¹.

Durchstiche sind keine allzu häufige Erscheinung. Es braucht offenbar eine größere Zahl günstiger Vorbedingungen, damit sie sich bilden können, abgesehen vom hohen Windungsgrad, der auch seinerseits bei Mäanderflüssen nicht die Regel ist. Auch kommt dem Abflußregime seine spezielle Bedeutung zu. So weiß man, daß bei Flüssen mit nur wenigen und kurzfristigen Hochwassern pro Jahr mit einer geringen Durchstichshäufigkeit zu rechnen

ist. Ob die Ursache der Durchstichsbildung schließlich auf eine zu starke Gefällsreduktion zurückzuführen ist (59) und/oder auf Inhomogenitäten im Alluvionsmaterial (z.B. Stauchen der Mäander) (21), (43) sei dahingestellt. Auffallend ist nur, daß Friedkin (21) in seinen über 50 sorgfältig durchgeführten und einen relativ weiten Bereich erfassenden Mäanderversuchen keine Durchstiche des 1. Types erzielte und sich solche des 2. Types nur andeutungsweise einstellen (Versuche mit $Q = \text{konst.}$ und $Q = \text{variabel}$).

Blench (5) weist auf die Bedeutung der Schwebstoffe hin, indem er feststellte, daß besonders bei hoher Schwebstoffkonzentration die Schwebstoffe sich rasch im ruhigen Wasser der Kurveninnenseiten anlagern, welche derart erosionswiderstandsfähiger werden und die Bildung der Sekundärgerinne (Typ 2) sehr erschweren oder gar verunmöglichen. In ähnlichem Sinne wirken auch Wälder, indem sich bildende Sekundärgerinne von Bäumen verbarriadiert werden.

Nachdem ein solcher Durchstich erfolgt ist, entstehen oberstrom und unterstrom «vorübergehend» chaotische Verhältnisse. Einerseits erodiert der Fluß dank seines auf eine kurze Strecke konzentrierten Gefälles das Durchstichgerinne intensiv und bringt große Geschiebemengen, und andererseits werden die Ufer (und z.T. die Sohle oberstrom) des Altgerinnes, soweit dieses nicht abgeschnitten ist, wegen der neuen Linienführung stark erodiert. Meist wird dadurch vorübergehend die Transportkapazität des Flusses im restlichen unterstrom liegenden Altgerinne überschritten. Dieser Vorgang dauert über mehrere Hochwasserperioden, bis sich allmählich ein neues stabiles Gerinne auszubilden vermag.

3. Pseudomäander

In der neuesten Fachliteratur stößt man hin und wieder auf den Begriff «Pseudomäander». Die betreffenden Autoren wollen damit zum Ausdruck bringen, daß die Gerinneform einem «echten» Mäanderfluß (d. h. dem bisher beschriebenen) sehr ähnlich sehe, aber offenbar sein Ursprung auf ein anderes hydraulisches Phänomen zurückzuführen



Fig. 23 Trockenes Gerinne eines Wildbaches in kanalisierter «Flachstrecke» mit ungeschützten Ufern, kurz nach einem rasch durchlaufenen und sehr schnell abgeklungenen Hochwasser. Man beachte die rhythmische Anordnung der Uferangriffsstellen (Pfeile) und entsprechende Spuren auf der Gerinnesohle (im Vordergrund befindet sich quer dazu eine Buldozerspur). Los Angeles County, Feb. 1962 ($J_s =$ einige Prozente Wassertiefe $\leq 0,5$ m).

sei. Tatsächlich haben Mäanderflüsse Froud'sche Zahlen, die meist unter 0,5 liegen ($Fr = 0,2$ bis $0,5$). Man hat nun aber besonders bei sehr aktiven Gebirgsflüssen mit sehr großem Geschiebeanfall und entsprechend großem Gefälle festgestellt, daß auch Flüsse unter Umständen bei Fließgeschwindigkeiten «mäandern», die nahe bei schießendem Abfluß liegen ($Fr = 0,8$ bis $1,0$) (20). Ergänzende Untersuchungen im Laboratorium zeigen solche Mäandereffekte sogar im stark schießenden Bereich ($Fr \gg 1,0$) (61). Möglicherweise ist dieses Mäandern auf den für den schießenden Abfluß typischen Mechanismus zurückzuführen, bei dem sich stehende Diagonalwellen bilden. Eigene Beobachtungen an Wildflüssen der Schweiz und der USA, die solche Effekte in Form alternierender Uferangriffe zeigten, bestärken uns in dieser Annahme, z. B.: Unterlauf der Maschanser-Rüfi bei Trimmis (Graubünden) mit $J_s = 10,7\%$ oder Fig. 23³².

Wolman und Brush (61) sind diesen Fragen mit Hilfe von Modellversuchen etwas nachgegangen³³. Sie beschrieben die Entstehung dieser Pseudomäander (Fig. 24) in folgender Weise:

— Entstehung stehender Wasserwellen, wobei das Gerinne noch gerade ist, bei gleichzeitiger Bil-

dung von zweidimensionalen Dünen (parallele Dünenfronten senkrecht zur Gerinneaxe).

- Verformung dieser Dünenfronten resp. deren Schrägstellung bei gleichzeitiger Beschleunigung der Migrationsbewegung.
- Verbiegen der geraden Dünenfronten, derart, daß sie mit einer, evtl. beiden Längsseiten nahezu parallel zum Ufer verlaufen. An diesen Stellen treten starke Erosionserscheinungen auf, die, falls die Ufer zu wenig widerstandsfähig sind, zum Mäandern Anlaß geben.

Hinsichtlich der Geschiebefortbewegung ist auf das interessante und typische Merkmal der Geschiebekonzentration auf die Gerinnemitte hinzuweisen, währenddem die eigentlichen (ufernahen) Rinnen im untersuchten Falle praktisch geschiebefrei blieben. Auch ist die Migrationsgeschwindigkeit entsprechend dem schießenden Abfluß sehr groß. Solche Erscheinungen können häufig nach Hochwasserführung in unseren Gebirgsbächen und -flüssen beobachtet werden.

Die Auswertung der erwähnten Versuche ergibt das in Fig. 25 wiedergegebene schematisierte Diagramm. Es zeigt auf anschauliche Weise die verschiedenen Bereiche der Gerinnebildung.

In Fig. 25 ist die Grenze zwischen nichtbewegtem und bewegtem Geschiebe angegeben. Im letzteren Bereich wurde eine Zone mit unveränderlicher Gerinnegeometrie, d. h. den sogenannten stabilen geraden Gerinnen unterschieden. Außerdem sind im restlichen Bereich (mit veränderlichem Gerinne) die Zonen der Pseudomäander von denjenigen der Mäander getrennt worden. In der letzteren Zone vereinen sich sämtliche Gerinnetypen (einschließlich Verzweigungen), weshalb diese Zone mit «unstable Ufer» bezeichnet wurde.

Als Kriterium für das Auftreten der Pseudomäander wurde die Froud'sche Zahl benützt³⁴. Wie erwähnt fand man solche Pseudomäander im Bereich $Fr \geq 1,0$. Die Untersuchungen wurden bis $Fr = 2,4$ ausgedehnt und bis zu diesem stark schießenden Bereich wurden diese Mäander auch festgestellt. Entsprechende Versuche für $Fr < 1,0$ lassen erkennen, daß sich solche Pseudomäander noch zu bilden vermögen bis hinunter zu etwa $Fr = 0,70$, daß aber sehr kleine Wassertiefen hierzu erforderlich waren, so daß sich im Gerinne an einzelnen Stellen doch wieder lokal schießende Abflüsse einzustellen vermochten. (Für solche Bereiche ist die auf der Basis der mittleren Fließgeschwindigkeit aufgebaute Froud'sche Zahl nicht mehr repräsentativ). Vergewärtigt man sich aber, daß die «echten» Mäander vorwiegend im Bereich $Fr = 0,2$ bis $0,5$ auftreten, unter Umständen aber $Fr = 0,7$ noch möglich ist, und daß die für diese Mäander dargestellte «Ent-

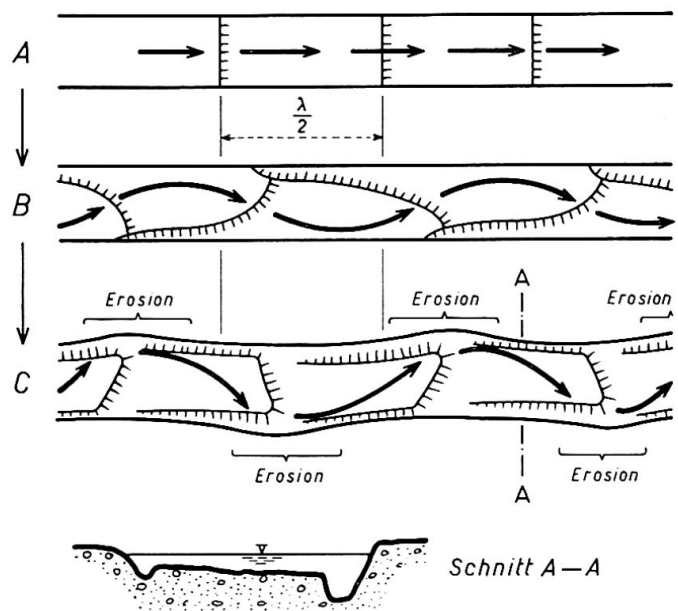


Fig. 24 Verformung von Geschiebedünen bis zur Bildung von Pseudomäandern (Reihenfolge A-B-C), ausgehend von einem geraden Gerinne in einer Alluvion (Modellversuch) (61).

stehungsgeschichte» (siehe Fig. 7 und 8) sehr ähnlich ist, derjenigen der Pseudomäander, so ist man sehr versucht, die Entstehung beider «Mäandertypen» auf dasselbe Grundphänomen zurückzuführen und die Bezeichnung «Pseudomäander» fallen zu lassen. Es benötigt umfangreiche Untersuchungen, will man diese Fragen abklären.

V. EMPIRISCHE «GESETZMÄSSIGKEITEN» ZUR MÄANDERFORM

Bis heute ist es nicht gelungen, auf physikalischer Grundlage befriedigende Gesetze über die Mäanderentstehung, das «Leben» eines Mäanderflusses und dessen Grundrißform (Geometrie), zu finden. Man behilft sich deshalb bis auf weiteres mit empirischen Regeln, die durch eine große Zahl von Naturbeobachtungen in den verschiedensten Erdteilen gesammelt wurden. Diese Gesetzmäßigkeiten basieren auf der Annahme, daß entsprechend der Regimetheorie (gerade und leicht gewundene Gerinne) auch Regeln für stark gewundene Flüsse möglich sind³⁵. Es wird dabei vorausgesetzt, daß Mäanderflüsse als stabil betrachtet werden dürfen, trotz der Migration, falls Mäanderform und Sohlengefälle unverändert bleiben (43). Dieses erforderliche Tolerieren der Migration und die damit verbundenen Komplikationen bringen aber Unstimmigkeiten oder doch große Streuungen mit in die Beziehungen, so daß diese «Gesetze» zu qualitativer Bedeutung abgemindert werden. Wir nennen sie deshalb in der Folge «Regeln». Des weitern muß leider darauf aufmerksam gemacht werden, daß in der Literatur des öfters auch nur scheinbare Zusammenhänge in analytischer Form dargestellt werden. Es ist manch-

mal sehr schwer, solche Pseudoregeln von den andern, physikalisch sinnvollen, zu unterscheiden³⁶.

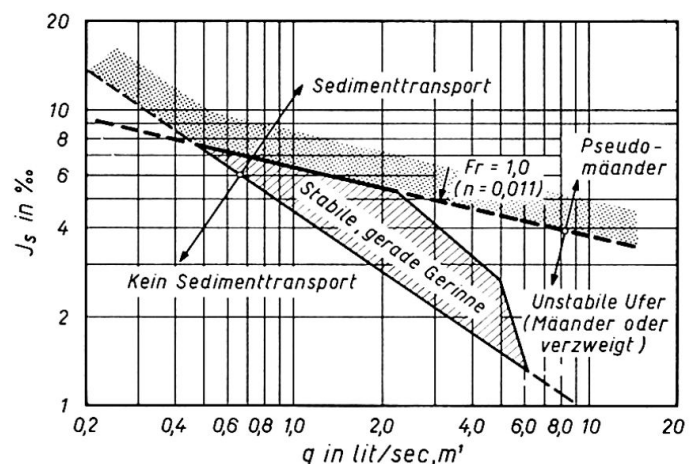


Fig. 25 Sohlengefälle J_s in Abhängigkeit der Abflußmassermenge (pro Laufmeter Gerinnebreite). Dargestellt sind die verschiedenen Bereiche der Gerinnebildung für ein Geschiebe von $d_m = 0,67$ mm eines Laboratoriumsversuches (stark schematisiert) (61). (Fr = Froud'sche Zahl, n = Rauigkeitskoeffizient nach Manning).

1. Abgrenzung der Mäandervorkommen gegenüber geraden und verzweigten Gerinnen

Solche Abgrenzungen sind schwierig zu ziehen, da man viel zu wenig über die Mäanderentstehung weiß. Man stützt sich deshalb auf Naturbeobachtungen und soweit wie möglich auch auf Modellversuche.

Es sind vor allem Altunin (32), Lane (36) und Leopold/Wolman (39), die sich mit diesem Problem

auseinandersetzen. Allen gemeinsam ist die Erkenntnis, daß Sohlengefälle und Abflußwassermenge für eine solche Abgrenzung maßgebend sind. Sie fanden, stark vereinfacht:

$$J_{s \text{ grenz}} = K_o \cdot Q^{-\varepsilon} \quad (11)$$

d. h. das mittlere Grenzgefälle ist umgekehrt proportional zu einer Potenz von Q. K_o ist hierbei ein Faktor und ε eine Potenz, welche wir später noch diskutieren werden.

Tabelle 2: Von Lane, Leopold/Wolman und Altunin verwendete Größen K_o , Q, (metrisches Maßsystem)

	Lane (36)	Leopold/Wolman (39)	Altunin (32)
K_o	<p>mäandern: $K_o \leq 7 \cdot 10^{-4}$</p> <p>verzweigt: $K_o \geq 40 \cdot 10^{-4}$</p> <p>gemischt: $K_o = 7 \div 40 \cdot 10^{-4}$</p>	<p>mäandern \leq $K_o \leq 0.012$</p> <p>verzweigt $K_o \geq 0.012$</p>	$\left[\frac{1 + \mu}{\frac{v_{tr} \cdot Q}{k^\mu}} \right] \frac{10}{2 + 5\mu}$ <p>$v_{tr} = v$, bei dem das Geschiebe transportiert wird (Grenzgeschwindigkeit?)</p> <p>$q =$ Koef. zwischen 0,7 1,7³⁸</p> <p>$k =$ Energieverlustkoeffizient nach Strickler</p> <p>$\mu =$ Exp. = (1 + a)</p> <p>$a =$ 0,25 ÷ 0,33 (vom Sohlenmaterial abhängig)</p> <p>$m =$ im Mittel 2,7 (aber immer > 2,0)</p>
Q Wahrscheinlichkeit des Auftretens	Jahresmittel der Abflußwassermengen ³⁹ zwischen 10% und 30%	«gerinnefüllend» (bankfull) (siehe im nachfolgenden 2. Kapitel Definition)	«gerinnebildend» (nicht näher definiert) ca. 10 ÷ 20% (d. h. etwas größer als das Q Jahresmittel) (63)
ε	1/4	0,44	$\frac{1}{2} \left(\frac{10}{2 + 5\mu} \right)$ (im Mittel: 1/4)
Gültigkeitsbereich	Q = 3 · 10 ⁻³ bis 3 · 10 ⁴ m ³ /sec W = 1.5	dito W = ?	(?) W = ?
Alluvionsmaterial	Sand	Sand bis Kies	alle Geschiebearten
basierend auf folgenden Unterlagen:	144 Flußstrecken aus den USA und Modellversuche	285 Flußstrecken aus den USA und vereinzelt aus Indien	theoretisch hergeleitet und mit Flüssen der UdSSR verglichen

Ist das Gefälle größer als in Gleichung (1) angegeben, so tritt meist Verzweigen ein, liegt es darunter, so mäandert ein Fluß. Gerade und schwach gewundene Gerinne sind in Gleichung (1) nicht berücksichtigt³⁷. Pseudomäander gehorchen übrigens obiger Beziehung nicht. (Beim White River [20] liegen z. B. die Pseudomäander im «verzweigten Bereich»).

Aus den Aussagen der Gleichung (1) kann geschlossen werden, daß je nach Wasserführung ein und dieselbe Flußstrecke verschiedene J_{grenz} aufweisen kann, d. h., daß z. B. der betreffende Fluß bei Hochwasser einen andern Gerinnecharakter bezüglich gerade, verzweigt und mäandernd aufweist als bei Niederwasser. Entsprechend kann ein Fluß entlang seines Tallaufes einen häufig wechselnden Charakter besitzen, der sich u. a. auch nach dem vorhandenen J_T richtet. (Vor allem dann, wenn der Fluß den «Beharrungszustand» noch nicht erreicht hat.)

Auf die Größen K_0 , Q und ε gehen wir nachfolgend ein und verweisen auf Tabelle 2. In K_0 und ε sind sämtliche Parameter (mit Ausnahme von Q) eingeschlossen, die für die Gerinnebildung maßgebend sind. Sie können deshalb keine universellen Konstanten sein, sondern ihrerseits Funktionen dieser restlichen Parameter⁴⁰. Aus der Regime-Theorie ist nun aber bekannt, daß unter Voraussetzung ein und desselben Einzugsgebietes und desselben Charakters des Abflußregimes K_0 und ε sehr wenig variieren, so daß die Schreibweise von Lane resp. Leopold/Wolman bezogen auf bestimmte Flußgebiete als zulässig betrachtet werden kann. Altunin präzisiert demgegenüber seine Angaben (siehe Tabelle 2), indem er versucht, die wichtigsten hydraulischen und geschiebetechnischen Größen miteinzubeziehen. Wie wertvoll quantitativ diese Angaben aber sind, kann leider aus der in Übersetzung nur bruchstückweise greifbaren russischen Literatur nicht entnommen werden. Auch Henderson (25) versuchte sich in einer Präzisierung und führte die Korngröße wie folgt ein: $K_0 = 2080 d_m^{1,14}$ mit d_m in mm⁴¹. Abgesehen davon wird wie von den Regime-Gleichungen her bekannt, K_0 auch wesentlich von der Art des gewählten, repräsentativen Q beeinflusst (63). Dieser Einfluß ist in beschränktem Rahmen auch in ε spürbar. Es würde in diesem Zusammenhang einer umfangreichen Analyse bedürfen, um z. B. den Unterschied von ε zwischen $Q_{\text{Jahresmittel}}^{-1/4}$ nach Lane und $Q_{\text{gerinnefüllend}}^{-0,44}$ nach Leopold/Wolman abzuklären.

Figur 26 gibt eine gute Darstellung der Betrachtungsweise von Leopold/Wolman. Die angegebene Trennlinie zwischen Mäandern und Verzweigen entspricht Gleichung (1). Es fällt jedoch auf, daß die eingetragenen geraden (und schwach gewundenen) Gerinnestrecken ungeordnet über das ganze

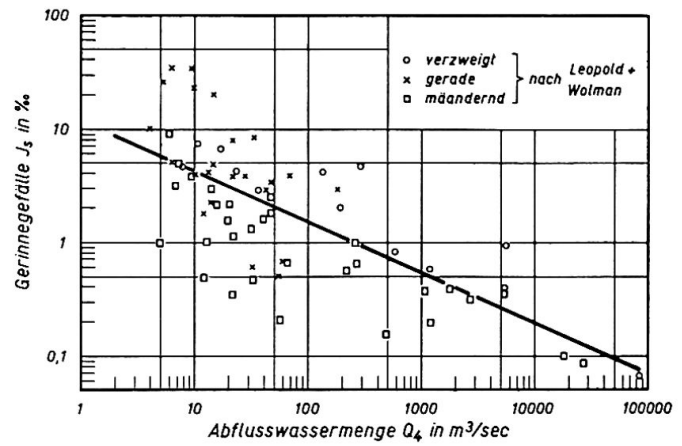


Fig. 26 Abgrenzung zwischen stark mäandernden und verzweigten Flüssen der USA. Dargestellt ist die Grenzlinie $J_s = 0,02 \cdot Q^{-0,44}$ (metrisches Maßsystem) (39).

Diagramm streuen. Es zeigt sich dadurch die Unzulänglichkeit von Gleichung (1), indem wie erwähnt wesentliche hydromechanische Elemente nicht berücksichtigt sind⁴². Modellversuche der verschiedensten Autoren, welche mit verschiedenen $Q = \text{konst.}$ ausgeführt wurden, lassen sich auch hinsichtlich *Grenzgefälle* auswerten. Sie ergeben eine sichtbare Trennung zwischen geraden und mäandernden Gerinnen. Diese Resultate decken sich mit der Auffassung, daß Gerinne auf lange Strecken nur wirklich gerade bleiben können, wenn ein gewisses, noch festzulegendes Grenzgefälle, das wir mit $J_{\text{grenz min.}}$ bezeichnen wollen, nicht überschritten wird. Aus den vorgenannten Versuchen von Ackers könnte ein $\varepsilon = 0,36$ herausgelesen werden, doch ist der untersuchte Bereich zu eng, um ε korrekt angeben zu können⁴³. Um diesem Phänomen nachzugehen, wurden in Tabelle 3 sämtliche greifbaren Versuchsergebnisse, mit deren Hilfe eine gewisse Abrundung im Sinne von $J_{\text{grenz min.}}$ möglich ist, zusammengestellt und gleichzeitig in Fig. 27 eingetragen. Diese Darstellung ist grundsätzlich mit den gleichen Mängeln behaftet wie Fig. 26. Immerhin unterscheiden sich wesentliche Parameter nur wenig, z. B. d_m , die Gerinnegeometrie (Gerinnebreite und -Tiefe) usw. Auch sind Q und $G = \text{konst.}$ Der Vollständigkeit halber ist auch die Grenzlinie nach Gleichung (1) von Leopold/Wolman in Fig. 27 eingetragen. Zusammenfassend wollen wir festhalten, daß es zwischen geraden, mäandernden und verzweigten Alluvionsflüssen eine Trennung gibt, die sich für *gleichartige Flüsse* mit Hilfe einer Beziehung vom Typ der Gleichung (1) beschreiben läßt. Eine eindeutige Trennung für den Vergleich beliebiger Flußsysteme untereinander ist aber nur möglich, wenn sämtliche Aspekte der Hydromechanik einbezogen werden. Eine derartige Beziehung fehlt leider heute noch.

Tabelle 3: Zusammenstellung von Daten aus Modellversuchen zur Abgrenzung der Bereiche für gerade resp. mäandrierende Gerinne

Autor	Literatur	Versuche durch- geführt im Jahre	Q lit/sec	J _s resp. J _T ‰	d _m mm	gerade	alternierende Bänke oder leicht. Mäandern	Mäandern	
P. Ackers (Daten aus Diagrammen entnommen)	(1)	1964	11,2	1,65	0,16	x			
			33,6	1,55	0,16	x			
			40,0	0,93	0,16	x			
			42,0	0,93	0,16	x			
			56,0	0,73	0,16	x			
			68,7	0,80	0,16	x			
			80,0	0,88	0,16	x			
			112,0	0,92	0,16	x			
			148,0	0,43	0,16	x			
			70,0	2,00	0,34	x			
			40,0	1,22	0,16		x		
			40,7	1,42	0,16			x	
			40,7	2,00	0,16				x
			40,7	2,8	0,16				x
			51,8	1,8	0,16				x
			56,0	1,53	0,16				x
			145,0	1,23	0,16				x
			68,0	2,7	0,34				x
			72,8	2,8	0,34				x
			89,7	1,8	0,34				x
N. F. Friedkin	(21)	1941	1,4	6,0	0,45			x	
			1953	2,83	7,5	0,45			x
			2,83	6,0	0,45			x	
			4,25	6,0	0,45			x	
			2,83	9,0	0,45			x	
Field Research Station Bahadrad/Indien	1966	28,0	2,7	0,18			x		
		28,0	3,0	0,18			x		
		28,0	3,5	0,18			x		
		28,0	4,0	0,18			x		
		56,0	2,2	0,18			x		
		56,0	2,7	0,18			x		
		56,0	3,0	0,18			x		
		84,0	2,7	0,18			x		
U. P. Irrigation Research Institute, Roorkee/Indien (G wurde variiert)	(8)	1960	168,0	2,0	0,23			x	
			140,0	ca. 2,0	0,23			x	
			56,0	2,0	0,23	x			
			112,0	1,0	0,23	x			
			112,0	1,5	0,23		x		
			112,0	2,0	0,23			x	
112,0	4,0	0,23			x				
A. F. Kudryashov	(32) (33)	1954 —1955	0,05	8,0	0,27			x	
			1,0	8,0	0,27			x	
			2,0	5,0	0,27			x	
River Research Institute Calcutta/Indien	(51)	1963	7,0	3,3	0,43		x		
			11,2	3,3	0,43	x			
			14,0	3,3	0,43			x	
			19,6	3,3	0,43			x	
			2,8	1,6	0,43	x			
			5,0	1,6	0,43		x		
7,0	1,6	0,43			x				
N. S. Sharashkina	(32) (33)	1947 —1951	0,96	5,0	0,22			x	
								x	
J. A. Yaroslavtsev	(32) (33)	1953	4,0	8,0	0,30			x	

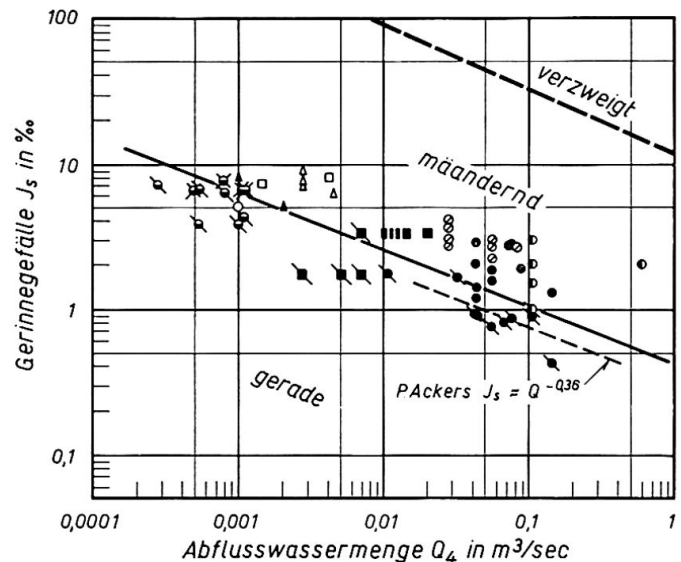
2. Einige Regeln über die Mäandergeometrie

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nachfolgend aus der großen Zahl von Studien nur einige interessante Daten herausgegriffen. Auch sei es dem Schreibenden zu verzeihen, daß wegen der angestrebten Übersichtlichkeit viele Details nicht besprochen oder gewisse Angaben nur ungenügend wiedergegeben werden. Wegen der großen Zahl von nicht koordinierten Publikationen liegt eine Vielzahl von Begriffen vor, die den Überblick sehr erschweren oder gar verunmöglichen. Eine der dabei verwendeten maßgebenden Größen ist die Abflußwassermenge Q , die in den nachfolgend aufgeführten sieben verschiedenen Variationen nebeneinander verwendet wird:

- Q₁: mindestens ein- evtl. auch mehrjähriges Hochwasser.
- Q₂: Jahresmittel der Abflußwassermengen einer langen Meßperiode.
- Q₃: Maßgebende Wasserführung («dominant discharge»), dem Q₁ sehr ähnlich, jedoch nicht exakt definierbar.
- Q₄: Gerinnefüllende Wasserführung («bankfull discharge»). Wird ein derartiges (mehrjähriges) Hochwasser überschritten, so tritt das Wasser über die Ufer.
- Q₅: Bettbildende Wasserführung, d. h. ein virtuelles Q, das über die Periode eines Mitteljahres dieselbe Geschiebefracht zu transportieren vermag wie die tatsächlichen Abflüsse, wobei dieses Q nur auf die Zeitdauer bezogen wird, während der überhaupt eine Geschiebebewegung stattfindet.
- Q₆: Virtuelles Q, das unter Berücksichtigung der Abflußganglinie speziell berechnet wird, wobei Häufigkeit, Größe und Charakter von Hoch- und Niederwasser eingeschlossen werden.
- Q₇: Bettbildende Wasserführung, d. h. ein virtuelles Q entsprechend Q₆, aber mit zusätzlicher Berücksichtigung der Geschiebeführung in der Form, daß die Verschiedenheit der J bei Hoch- und Niederwasser berücksichtigt werden.

Die Berechnungsweise der Größen Q₅, Q₆ und Q₇ ist im Anhang angegeben.

Je nach Art von Q sind, wie früher erwähnt, die Faktoren und in geringerem Maße auch die Potenzen von Q verschieden. Regeln, die sich auf Gerinnebreite, Wassertiefe usw. beziehen, d. h. also Größen, die von Q abhängen, sind sinngemäß zu beurteilen. In vielen Fällen hat man die Mäanderdaten aus topographischen Karten entnommen, d. h. man hat die Bestimmung von h oder b und damit von Q dem Topographen überlassen!



● M. G. Wolman + L. M. Brush	$d_m = 0,67 \text{ mm}$
○ N. S. Sharashkina	$d_m = 0,22 \text{ mm}$
▲ A. F. Kudryashov	$d_m = 0,27 \text{ mm}$
□ J. A. Yaroslavtsev	$d_m = 0,30 \text{ mm}$
△ N. F. Friedkin	$d_m = 0,27 \text{ mm}, d_m' = 0,45 \text{ mm}$
■ River Research Institute, Calcutta	
● Field Research Station Bahadradab	$d_m = 0,18 \text{ mm}$
● P. Ackers	$d_m = 0,16 \text{ mm}, d_m' = 0,34 \text{ mm}$
● U. P. Irrigation Research Institute, Roorkee	$d_m = 0,23 \text{ mm}$
∖ Keine, oder nur andeutungsweise Mäander	
X Pseudomäander	

Fig. 27 Zusammenstellung von Meßwerten der verschiedensten Modellversuche zur Abgrenzung des Bereiches «gerade-mäandernd». Zur Orientierung ist auch der extrapolierte Bereich «mäandernd-verzweigt» nach Fig. 26 eingetragen um anzudeuten, daß der Unterteilung «gerade, mäandernd, verzweigt» tatsächlich eine physikalische Bedeutung zukommt. (Die Modellversuche wurden beinahe ausnahmslos unter sehr ähnlichen Randbedingungen ausgeführt und sind deshalb homogen. Ein direkter Vergleich mit den Daten von Fig. 26 ist jedoch dieser Homogenität wegen nicht zulässig.) Siehe Tabelle 3.

a) Die Mäanderwellenlänge λ

Im Prinzip wurden folgende Regeln für λ gefunden:

$$\lambda = K_1 \cdot Q^{1/2} \quad (12)$$

$$\lambda = K_2 \cdot E^\alpha \quad (13)$$

$$\lambda = K_3 \cdot b^\beta \quad (14)$$

Gleichung (12) ist die gebräuchlichste und die auch am besten fundierte Regel. Sie sagt aus, daß die Wellenlänge proportional zu $Q^{1/2}$ ist. λ ist definiert als der Abstand zweier gleich angeordneter Wendepunkte, bezogen auf die Gerinneaxe (Fig. 14, Definitionsskizze). Manchmal wird in der Literatur auch $\lambda/2$ verwendet, definiert als Abstand zweier benachbarter Wendepunkte.

Da zwischen der Abflußwassermenge Q und der

Autor	Literaturangabe	Jahr	Art von Q	K ₁	K ₂	K ₃	α	β	Bemerkungen
Leopold/Wolman	(39)	1957			—		—		b gemessen auf Höhe Wasserspiegel 1) 6,5: für sehr kleine Flüsse mit $b = 0,3 \div 3,0$ m; 15 für sehr große Flüsse mit $b \leq 330$ m
	(40)	1960	Q ₄	65,0		6,5 \div 15 im Mittel 10,9		1,01	
	(41)	1964							
Inglis	(10)	1956			—		—		nur gut ausgebildete Mäander berücksichtigt. Annahme, daß $Q_3 = (\frac{1}{2} + \frac{2}{3}) \cdot Q_1$ (gültig für indische Flüsse)
	(28)	1902						0,99	
	(30)	1947	Q ₃	65,5		6,6			
	(31)	1949	Q ₁	49,0					
Shaw	(30)	1938	Q ₃	49,8					16 Flüsse des Orissa-Gebietes/Indien
Poona Research Station Indien	(10)	1956	(Q ₁)	53,7					Modellversuche mit $Q = \text{konst.} = 2,8/4,9/11,2$ lit/sec
	(30)	1947	(Q ₃)	66,1					
River Research Institute Calcutta/Indien	(8)	1960		83,0					14 Modellversuche mit $Q = \text{konst.} = 2,8$ bis 16,8 lit/sec, $J_s = 0,3$ und 0,15‰, $G = 0$ bis 0,15 lit/sec, Sandmaterial
	(9)	1961							
	(51)	(?)	(Q ₃)	(65,8 \div 86,6)					
Central Water and Power Station Poona/Indien	(12)	1943	(Q ₃)	(62,4 \div 92,4) 65,7					18 Modellversuche mit $Q = \text{konst.} = 4,9$ bis 280 lit/sec, $G = 0$ bis 0,005 lit/sec, Sandmaterial
Irrigation Research In- stitute, Roorkee/Indien	(9)	1961	(Q ₃)	(70,3 \div 106,0)		3,0 \div 7,2	—		13 Modellversuche mit $Q = \text{konst.} = 5,6$ bis 280 lit/sec, $J_s = 2$ und 4‰, $G = 0$ bis 0,2 lit/sec, Sandmaterial
	(11)	1962		85,4	—	5,0		1,0	
Speight	(56)	1965		54,3	—	16,3	—		Messungen am Angabunga-River/Central Papua (Spektralanalyse) $w = 1,5 \div 3,0$, $Fr = 0,20 \div 0,35$, $E = 940$ Meilen ² , $Q_m = 112$ m ³ /sec, $Q_{\max} = 392$ m ³ /sec, Feinkies bis Sand
	(57)	1965						1,01	

Dury	(17)	1964	Q_3	54,0	$9,5 \div 16,1$	—	—	0,50 $\div 0,66$	—	Flüsse aus Nordamerika und Europa 2) von einigen untersuchten Einzugsgebieten
Hack	(24)	1965	—	—	11,3	—	—	0,5	—	Cranberry- und Potato River/USA $J_T \sim 0,08\%$, $E = 48,8/.55,5 \text{ km}^2$
Alexander	(3)	1962	—	—	—	—	—	—	—	Bassin du Lufira/Katanga, Afrika, $w = 1,0 \div 3,0$
Popov	(49)		—	—	—	—	—	—	1,0	
Altunin	(32)	1950	—	—	—	$12 \div 15$	12-15	—	1,0	Flüsse Zentralasiens (sehr lange Beobachtungsperioden)
Kondrat'ev	(32)	1959	Q_7	$449 \cdot J^{1/3}$	—	—	—	—	—	Modellversuche Dritter und Naturbeobachtungen
Bordas	(7)	1963	Q_6 (Q_5)	156	—	—	—	—	—	K_1 ist abhängig von J, G und d. Modellversuche mit $Q = \text{variabel} = 0,7 \div 4,2 \text{ lit/sec}$, 1,2 und 6 Hochwassern in 24 Stunden, $G = 0$
Friedkin	(21) (7)	1945 1963 1966	(Q_3) (Q_4) Q_{50}	94,4 31,0						Modellversuche mit $Q = \text{konst.}$ (nachträglich ausgewertete Versuchsdaten) Thur, ganze Flußlänge, freies Mäandern, (Zustand vor der Korrektion). $Q_{50} = 50\text{-jähriges Hochwasser}$

Größe des Einzugsgebietes E eines bestimmten Flußsystems ein enger Zusammenhang besteht, ist auch Gleichung (13) gerechtfertigt. K_2 ist mit großen Streuungen behaftet und ist wesentlich abhängiger vom Charakter des jeweiligen Einzugsgebietes als K_1 ⁴⁴.

Entsprechend der Regimetheorie für gerade Gerinne ist auch bei Mäandern ein Zusammenhang zwischen Q und b und damit auch zwischen λ und b zu erwarten, wobei in der Regel b die Gerinnebreite auf Wasserspiegelhöhe gemessen, bedeutet. Gleichung (14) ist aber mit der gebotenen Vorsicht im Sinne der früher gemachten Einschränkungen zu bewerten.

Die Faktoren und Potenzen haben die im metrischen Maßsystem in Tabelle 4 wiedergegebenen numerischen Werte. Hierbei ist zu beachten, daß es sich um Mittelwerte handelt und deshalb die wirklichen Werte je nach Flußgebiet mehr oder weniger davon abweichen werden⁴⁵.

Zusammenfassend wollen wir feststellen, daß

- unter Voraussetzung von Q_3 oder Q_4 der Faktor $K_1 = 50$ bis 100 beträgt (wobei von einem Autor noch die Abhängigkeit von $J^{1/3}$ eingeführt wurde).
- für K_2 noch zu wenig Daten greifbar jedoch Werte in der Größenordnung von 10 bis 15 zu erwarten sind
- K_3 trotz der Schwierigkeiten einer korrekten Bestimmung offenbar doch in engen Grenzen variiert ($6,5 \div 15$), im Mittel $10,0$.
- α sehr wahrscheinlich nahe bei $0,5$ ist
- β in guter Näherung mit $1,0$ angenommen werden darf (bei $K_3 = 10,0$ wird $\beta = 1,02$)⁴⁶.

Da die meisten Angaben auf Flachlandflüssen in fein- und mittelkörnigen Alluvionen und auf Modellversuchen mit $Q = \text{konst.}$ basieren, sind deshalb bei der Anwendung der Gleichung (12) bis (14) auf voralpine und alpine Verhältnisse (steilere Gefälle, grobkörniges Material, stark verschiedenes Abflußregime) Abweichungen in den Faktoren und evtl. auch in den Potenzen zu erwarten.

b) Die Mäanderamplitude A

Die Mäanderamplitude wird in der Regel wie folgt angegeben:

$$A = K_4 \cdot Q^\gamma \quad (15)$$

$$A = K_5 \cdot b^\delta \quad (16)$$

Es bedeuten:

$K_4 = \text{konst.} = 20$ bis 150 je nach der Art von Q
 $K_5 = \text{konst.} = 1$ bis 20 je nach der Art von b
 (b_{Mittel} oder b gemessen auf Wasserspiegelhöhe) und des dazugehörigen Q ⁴⁷.

$$\gamma = 0,5$$

$$\delta = 1,0$$

siehe Definitionsskizze Fig. 14 (je nach Autor wird die Amplitude vom Außenrand der Krümmung oder aber von der Gerinneaxe aus gemessen) und Tabelle 5.

Die erheblichen Schwankungen in K_4 und K_5 lassen darauf schließen, daß diese Größen keine Konstanten, sondern ebenfalls Funktionen von d_m , G, J usw. sind.

c) Zusammenhang zwischen Mäanderlänge und -Amplitude

Obwohl durch λ und A ein Mäander gut beschrieben ist, haben es nur wenige Autoren gewagt, diesen Zusammenhang in Form einer Regel darzustellen. Zwei Möglichkeiten stehen hiezu offen, nämlich die Vereinigung der Gleichung (12) mit (15) resp. (14) mit (16) oder aber das Aufstellen einer unabhängigen Beziehung auf empirischem Wege. Letztere lautet:

$$A = K_6 \cdot \lambda^\varphi \quad (17)$$

K_6 ist sehr unsicher, Werte von $0,25$ bis $1,7$ wurden (empirisch) gefunden.

$$\varphi = 1,0$$

Details siehe Tabelle 5.

Indem man A und λ in einer Gleichung vereinigt und voraussetzt, daß K_6 und φ konstant sind, ergibt sich ein mehr oder weniger fester, resp. konstanter Windungsgrad w. Würde man in Gleichung (17) für K_6 den Mittelwert von ca. $1,0$ einsetzen (siehe Tabelle 5), so ergäbe dies $w \simeq 2,0$. Es zeigt sich nun nachträglich, daß die Mehrzahl der verschiedenen Autoren vorwiegend gut ausgebildete, d. h. stark gewundene Mäander für ihre Betrachtungen benutzten. Dies heißt aber, daß die Faktoren K in ihren numerischen Beträgen orts- resp. flußgebunden sind. Sie sind deshalb, wie wir schon mehrmals feststellten, Funktionen von J, G, d_m usw.

Aus der Gegenüberstellung der Gleichungen (12), (14), (15) und (16) geht weiter hervor, daß die K-Werte näherungsweise folgende Bedingungen erfüllen sollten:

$$\frac{K_1}{K_4} = \frac{K_3}{K_5} \quad (18)$$

Aus Gleichung (18) oder aus den entsprechenden oben aufgeführten Einzelgleichungen ergibt sich wie bei den Regime-Gleichungen für gerade Gerinne eine Beziehung zwischen b und Q. Inglis gibt für mäandernde Gerinne an (10), (30), daß

$$b = (8,8 \div 23,6) \cdot Q^{1/2} \quad (19)$$

Tabelle 5: Faktoren und Potenzen zu den Gleichungen (15), (16) und (17) im metrischen Maßsystem für den Fall freien Mäanderns

Autor	Literatur- angabe	Jahr	Art von Q	K_4	K_5	K_6	γ	δ	φ	Bemerkungen
Leopold/Wolman	(39) (40) (41)	1957 1960 1964	Q ₄	—	2,4	1)	—	1,10	1)	1) Angaben weggelassen, da als sehr unsicher bezeichnet
Inglis	(10) (28) (30) (31)	1956 1902 1947 1949	Q ₁	104	18,6	1,7	0,54	0,99	1,06	(siehe Tabelle 4)
Bates	(4) (10) (30)	1939 1956 1947	—	—	10,4	—	—	1,04	—	für USA-Flüsse. (Wählt man $\delta = 1,00$ so wird $K_5 = 14,0$)
Central Board of Irrigation and Power/Indien	(10)	1956	—	—	—	0,25 ÷ 0,5	—	—	1,0	30 Mäanderstrecken am Indus/Pakistan (1911—1942)
River Research Institute Calcutta/Indien	(8) (9) (51)	1960 1961 ?	(Q ₃)	(19,9 ÷ 25,2) 23,3	—	—	0,50	—	—	(siehe Tabelle 4)
Central Water and Power Station, Poona/Indien	(12)	1943	(Q ₃)	(21,2 ÷ 30,8) 27,2	—	—	0,50	—	—	(siehe Tabelle 4)
Irrigation Research Institute, Roorkee/Indien	(9) (11)	1961 1962	(Q ₃)	(17,4 ÷ 58,3) 29,5	(1,5 ÷ 2,2) 1,8	—	0,50	1,00	—	(siehe Tabelle 4)
Kondrat'ev	(32)	1959 1966	Q ₇ Q ₅₀	142 0,22	— —	— —	0,74 0,76	— —	— —	(siehe Tabelle 4) Thur, ganze Flußlänge (vor Korrektion) Q ₅₀ = 50jähriges Hochwasser, bezogen auf die Gerinneaxe

Bestimmt man unter Annahme von Mittelwerten und gleichartigen Q den Faktor von Gleichung (19) mit Hilfe der eben besprochenen Gleichungen, so findet man die ungefähren Werte $11,5 \div 35$, d. h. eine relativ gute Übereinstimmung⁴⁸.

d) *Zusammenhang zwischen dem Krümmungsradius r von Mäanderschleifen und anderen Parametern der Gerinnegeometrie*

Für die Bestimmung des Krümmungsradius stehen mehrere Ansätze zur Verfügung:

$$r = K_7 \cdot Q^{\xi} \quad (20)$$

$$r = K_8 \cdot b^{\delta} \quad (21)$$

$$r = K_9 \cdot h^{\zeta} \quad (22)$$

$$r = K_{10} \cdot \lambda^{\omega} \quad (23)$$

Leider sind numerische Angaben für K und die Potenzen nur in ungenügender Zahl vorhanden, so daß wir auf Details nicht eingehen wollen (siehe Tabelle 6). Wohltuend fällt bei Gleichung (20) der Versuch auf (Tabelle 6), die in der Gerinnehydraulik gebräuchlichen physikalischen Größen einzuführen (J, h, d_m, b, k, v).

e) *Ergänzungen*

Das mittlere Sohlengefälle ist eine wesentliche Größe, die, wie wir früher feststellten als eine der maßgebenden Größen der Mäanderbildung betrachtet werden kann. Leider wurde bis heute J_s nur wenig Beachtung geschenkt. Aus einigen wenigen Modellversuchen mit Q = konst. (9), (11) wurde für den untersuchten Bereich gefunden:

$$J_s = 0,055 \cdot \left(\frac{G}{Q}\right)^{1/5} \quad \text{oder} \quad (24)$$

$$0,032 \cdot \left(\frac{G}{Q}\right)^{1/6}$$

Von ähnlicher Bedeutung ist auch das Gefälle des Mäandergürtels, welches Gegenstand japanischer Untersuchungen war (29):

$$J_T = K_{15} \cdot A^{-\beta} \quad (25)$$

Die Beziehung entstand aus einer Untersuchung von 46 Flüssen vor allem Japans mit Gerinnebreite b = 5 bis 125 m, Amplitude A = 35 bis 1870 m, «Talgefälle» J_T = 0,12 bis 21‰. K₁₅ und β sind abhängig von b. Sie nehmen mit wachsendem b zu. Folgende Werte wurden gefunden: K₁₅ = 0,5 bis 5,5, β ≥ 1,0. Diese Studie zeigt die gegenseitige Abhängigkeit von J_T, A und b. Die starke Variation von K₁₅ weist allerdings darauf hin, daß noch weitere Elemente berücksichtigt werden sollten.

Sämtliche aufgeführten Regeln sind gültig für *freies* Mäandern in Alluvionen. Entsprechende Regeln bestehen für *ingeschnittene* Mäander. Der Aufbau der Regeln ist gleich, doch unterscheiden sie sich in den K-Werten und evtl. den Potenzen.

3. *Die Thur als Beispiel einer morphometrischen Analyse nach dem Prinzip der Regimetheorie*

Die Thur ist ein Voralpen- und Mittellandfluß mit einem Einzugsgebiet von 1724 km² und einer totalen Flußlänge von rund 128 km⁴⁹. Das Einzugsgebiet befindet sich zwischen Kote 2502 (Säntis) und Kote 345 (Einmündung in den Rhein). Klimatisch ist es ziemlich einheitlich. Die anfallenden Wassermengen kommen ungehindert zum Abfluß (keine Retentionsbecken). Die Hochwasser sind nicht an spezielle Jahreszeiten gebunden. Abflußwassermengenummessungen stehen zur Verfügung.

Leider ist in den Flachstrecken die Thur weitgehend kanalisiert, so daß heute die ursprünglichen Flußformen nicht mehr sichtbar sind. Die Untersuchung hinsichtlich *Topographie* wurde deshalb auf die ältesten Höhenkurvenkarten dieser Gegend abgestellt, nämlich die

«Wild-Karten», 1 : 25 000, aufgenommen vor allem in der 1. Hälfte des 19. Jahrhunderts

«Siegfried-Karten», 1 : 25 000, basierend auf Aufnahmen der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts.

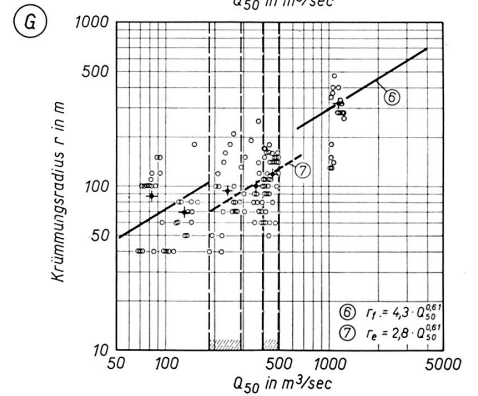
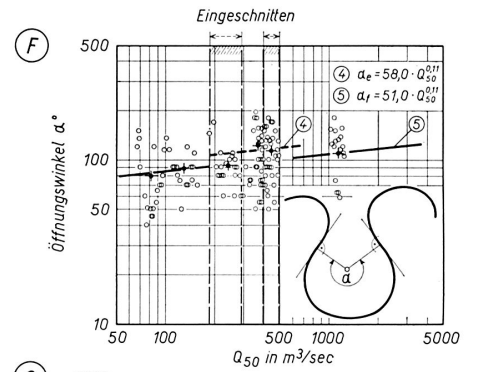
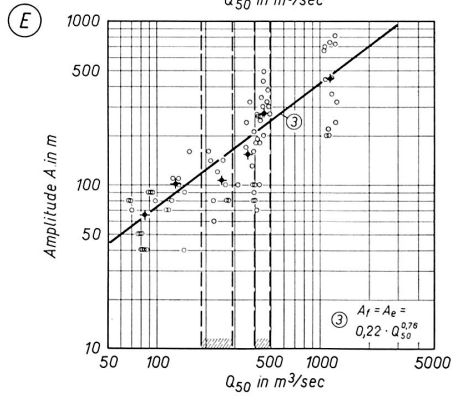
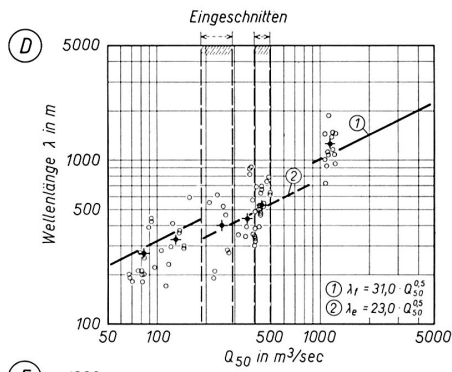
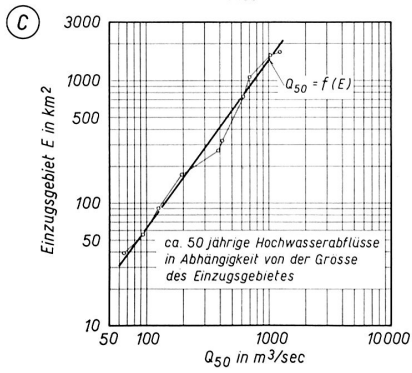
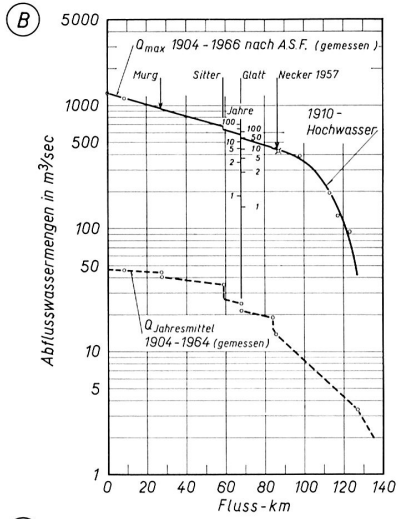
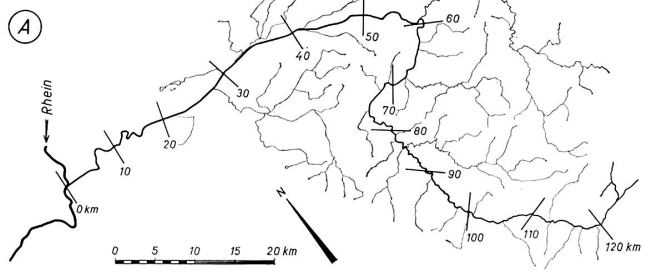
Die Geländeformen (Flußterrassen) wurden aus der neuen Landeskarte 1 : 25 000 entnommen.

Für die Beurteilung der *hydrologischen* Daten standen die hydrographischen Jahrbücher des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft und eine Zusammenstellung der größten beobachteten Abflußwassermengen, herausgegeben vom Eidg. Oberbauinspektorat, zur Verfügung. Da an der Thur nur 2 über eine lange Periode betriebene Wassermeßstationen vorhanden sind, wurde aus Gründen des Arbeitsaufwandes auf eine exakte Analyse der Abflußwassermengen zur Erlangung des repräsentativen Q verzichtet und auf die gemessenen Höchsthochwasser HHQ im Sinne der in der Einleitung erwähnten Q₁ oder Q₃ abgestellt. Dieses HHQ beträgt z. B. an der Thurmündung 1240 m³/sec und wurde 1910 gemessen. Es entspricht ungefähr einem sog. 50jährigen Hochwasser. Störend mag wirken, daß die Flußformen des letzten Jahrhunderts mit «heutigen» Abflüssen in Beziehung gebracht werden. Da aber die klimatischen Verhältnisse vor hundert Jahren kaum wesentlich von den heutigen verschieden waren und der Betrachtung ein «Höchsthochwasser» zugrundegelegt wurde, ist das Vorgehen tolerierbar.

Für die *flußmorphologische Auswertung* wurde die Flußaxe (Flußmitte) ausgemessen und daran λ, A, r, α, J_s und J_T bestimmt. Die verwendete Kilometrierung wurde vom Verfasser mit Berücksichtigung

Tabelle 6: Faktoren und Potenzen zu den Gleichungen (20) bis (23) für freies Mäandern im metrischen Maßsystem

Autor	Literatur- angabe	Jahr	Art von Q	K_7	K_8	K_9	K_{10}	ξ	σ	α	ω	Bemerkungen
Leopold/Wolman	(39) (40) (41)	1957 1960 1964	Q_4	—	2,3 ¹	—	1/4,7	—	1,0	—	1,0	1) Verhältnisse bei minimalen Energieverlusten in Krümmern; b auf Wasserspiegelhöhe gemessen.
Rzhanitsyn	(32)	1956	(konst)	²	—	—	—	1,0	—	—	—	2) <i>Theoretische</i> Studien für Rechteckgerinne $K_7 = k_o^{1/2}/v_* [F(\tau - O_o)]^{1/2}$ $k_o = l \cdot R \cdot g/b \cdot C^2 \cdot h$ $l =$ Bogenlänge $C =$ Geschw. Koef. nach Chézy für russische Flüsse war k_o im Mittel 3,9 bis 7,0 $v_* = \sqrt{ghJ} =$ dyn. Geschw. $F =$ Durchflußquerschnitt $O_o =$ Arcus des Bogenwinkels
N. J. Makkaveev	(32)	1949	Q_7	$\frac{0,0014}{J_n^{1/2}}$	—	—	—	0,5	—	—	—	$J_n = J$ bei Q_7 Messungen an Flachlandflüssen mit $J = 0,02 \div 0,25\%$, $Q = 300 \div 40\,000$ m ³ /sec
V. M. Makkaveev	(32)	1948	(konst)	$\frac{\varphi_1}{J^{6/7}}$	—	$\varphi_2 \cdot d_m^{2/8}$	—	4/7	—	8/3	—	<i>theoretisch</i> erhalten, $h =$ mittlere Wassertiefe $d_m =$ mittlere Korndurchmesser $\varphi_{1,2} =$ Konstante
		1966	Q_{50}	4,3	—	—	—	0,61	—	—	—	Thur, $Q_{50} =$ 50jähriges Hochwasser



der Altläufe von der Flußmündung an aufwärts eingelegt. Sie stimmt deshalb nicht mit den von den verschiedenen Kantonen verwendeten Kilometrierungen überein. Die Regressionskurven im Sinne der Regimeregeln finden sich in Fig. 28. Hierbei wurden zwei Bereiche unterschieden, nämlich der Bereich mit freien Mäandern (Index «f») und der Bereich mit eingeschnittenen Mäandern (Index «e»). Strecken ohne Mäander (z. B. Weinfeld bis oberhalb Gütighausen mit früher vielen Verzweigungen) wurden in der graphischen Darstellung offengelassen. Es mag auffallen, daß die «Regimegleichung» der Thur in ihren Zahlenwerten nicht mit den im vorangegangenen Abschnitt wiedergegebenen Werten übereinstimmen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, daß diese Gleichungen vor allem für Flachlandflüsse aufgestellt wurden, mit wesentlich anderen geologischen, topographischen und klimatischen Verhältnissen. Dessen ungeachtet zeigt sich aber, abgesehen von z. T. erheblichen Streuungen, eindeutig die Tendenz, daß mit zunehmendem Q (flußabwärts) die Mäandergröße zunimmt und der Windungsgrad (ausgedrückt durch α) sich nur unwesentlich ändert, jedoch die Tendenz einer Zunahme zeigt. Weiter ist festzuhalten, daß, wie früher erwähnt, trotz des Mangels an ausreichender Erfassung der hydraulischen Vorgänge durch die Regimeregeln, diese für ein und dasselbe Flußgebiet recht gut zutreffen, wenn man Faktoren und Potenzen an die örtlichen Verhältnisse anpaßt. Hinsichtlich der Streuung ist darauf aufmerksam zu machen, daß diese auf Störungen im Aufbau der Alluvionen, störende Festgesteinsformationen, seitliche Zuflüsse usw. zurückzuführen sind. Ihnen sollte bei einer derart im generellen verbleibenden

Betrachtungsweise keine allzu große Bedeutung beigemessen werden.

Auf einen Umstand ist noch speziell hinzuweisen. Fig. 28 könnte zur Annahme verleiten, daß mit zunehmender zurückgelegter Weglänge die Mäander sich vergrößern. Dies trifft jedoch nur deshalb zu, weil mit zunehmender Weglänge auch die Wasserführung infolge seitlicher Zuflüsse anwächst. Ein typisches Gegenbeispiel ist die Reuß zwischen Perlen und Aaremündung, die wegen mangelnder nahrunghafter Seitenzuflüsse auf der ganzen Strecke ziemlich gleichgroße Mäander und Bogenradien aufweist. Analoge Verhältnisse trifft man bei der Limmat.

Weitere Analysen wie z. B. des Rheins (Bodensee bis Basel), der Saane, Nebenflüsse der Thur usw., zeigen hinsichtlich Mäandergröße und Bogenradien das übliche Verhalten. Hingegen macht die Aare (Bern bis Mündung in den Rhein) eine Ausnahme, indem sie trotz erheblicher Zuflüsse wie Saane, Juraseen, Emme, Reuß und Limmat flußabwärts keine augenfällige Zunahme in Mäandergröße und Kurvenradien aufweist. Zur Abklärung dieser Anomalie bedarf es einer ins Detail gehenden Analyse, wobei u. a. dem speziellen Hochwasserverhalten der Aare Beachtung zu schenken ist.

Hinsichtlich der Beurteilung des Grenzgefälles zwischen Mäandern und Verzweigen (Fig. 26) können die Werte der Thur nur eingepaßt werden, wenn man für Q anstelle des Q_{50} die Werte für das langjährige Jahresmittel von Q einsetzen würde. Dies bedeutet offensichtlich, daß die Thur einen wesentlich anderen Abflußcharakter aufweist als die von Leopold und Wolman verwendeten Flüsse (was unsere früheren Aussagen bestätigt).

Fig. 28 Darstellung des Thurlaufes nach Regimegesichtspunkten

B. Abflußwassermenge: Für die Flußstrecke direkt oberhalb resp. unterhalb der Glatteinmündung wurde die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Abflußwassermengen ermittelt. Die Zahl 100 bedeutet z. B. eine Wassermenge, die in einer Zeitperiode von 100 Jahren nur einmal auftritt.

C. Bis heute gemessene Höchsthochwasser in Abhängigkeit der Größe des Einzugsgebietes. Die eingezeichnete Gerade soll andeuten, daß es sich wie auch bei andern Flußgebieten um eine Potenzfunktion handelt.

D.—F. Die eingetragenen Geraden geben näherungsweise den grundsätzlichen Verlauf der Potenzfunktionen («Regimegleichungen») wieder, und zwar getrennt für freie resp. für eingeschnittene Mäander. (Das «Gebiet» zwischen den eingeschnittenen Mäandern ist offenbar durch die oberstrom vorhandenen Bedingungen derart stark beeinflußt, daß in erster Näherung auch im Zwischengebiet kaum ein Unterschied zum eingeschnittenen Typ feststellbar ist.) Da sämtliche Flußwindungen berücksichtigt wurden, ist die Streuung der Meßwerte entsprechend groß.

VI. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Man könnte versucht sein nun anzunehmen, daß man über das Mäandern eines Flusses doch recht gut Bescheid weiß. Dies dürfte wohl bis zu einem gewissen Grade zutreffen, jedoch wird man nicht vor Überraschungen und Enttäuschungen bewahrt, wenn man die Natur mit ihrer außerordentlichen Vielfalt an Erscheinungsformen vollumfänglich zu erfassen versucht. Es zeigt sich nämlich, daß das Mäandern offenbar nicht nur von den besprochenen Parametern abhängt, sondern noch weitere Elemente vorhanden sein müssen, die ihren Beitrag leisten. Es sei in diesem Zusammenhang aufmerksam gemacht auf die speziellen Verhältnisse bei nachfolgenden Typen:

- Määnder in Moorgebieten, die durch ihren äußerst großen Windungsgrad auffallen
- Määnder von Tideflüssen, welche unter Umständen für das Ausströmen wie für das Rückströmen Määnder entwickeln können («Doppelmäänder»)
- Määnder in anstehendem Fels
- Määnder von Schmelzwasserbächen in Gletschereis («Schmelzerosion»)
- Määnder von Rinnenkarren in Kalkgebieten («Chemische Erosion»)

Visuell zeigen diese Määnder kaum Unterschiede zueinander, ja sie können unter Umständen klassisch zu nennende Formen aufweisen, obwohl die Randbedingungen unter denen sie entstehen von denjenigen der Flußmäänder in Alluvionen weitgehend abweichen. So konnten vom Verfasser in der Schweiz mit Ausnahme eines einzigen Falles am

Morteratschgletscher nur «Eismäänder» gefunden werden, die schießenden Abfluß haben, d. h. $Fr. > 1,0$, und die Karrenmäänder des Silbergebietes (Pragelpaß) mit ihren Miniaturdimensionen weisen sogar zeitweise laminaren Abfluß auf (oder Übergangsbereich turbulent-laminar), so daß z. B. die Annahme, daß die Määnderbewegung durch die Turbulenz der Strömung angeregt werde, wiederum in Frage gestellt ist. Man kann sich füglich fragen, ob evtl. nicht verschiedene oder mehrere Ursachen ein Gerinne veranlassen eine mäandernde Form anzunehmen, Ja, es ist durchaus möglich, daß das Mäandern ein rein hydraulischer Vorgang ist, der erst in zweiter Linie von den äußern Verhältnissen (Alluvion, Fels, Eis usw.) abhängt. Wie dem auch sei, müssen wir uns eingestehen, daß das Määnderproblem noch immer nicht gelöst ist und daß es noch vieler eingehender Studien — vorab physikalischer Art braucht, um dieses reizvolle naturwissenschaftliche Problem zu lösen.

Es verbleibt mir noch die angenehme Pflicht, Herrn Prof. G. Schnitter, Direktor der VAWE, für die tatkräftige Unterstützung der Arbeit bestens zu danken. Das Bundesamt für Industrie, Gewerbe und Arbeit (BIGA) bewilligte in dankenswerter Weise, über einen Kredit zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, einen namhaften Beitrag an die Drucklegungskosten. Dank gebührt auch der Redaktion der «Geographica Helvetica» für die Übernahme dieser Arbeit sowie meinen verschiedenen Mitarbeitern für Literaturbeschaffung, Schreib- und Zeichenarbeiten.

VII. ANHANG

1. Zur Berechnung der Q_5 , Q_6 und Q_7

Q_5 :

Man bestimme die Häufigkeit der Abflußwassermengen eines Mitteljahres (Dauerkurve der Abflußwassermengen). Hierauf wird mit Hilfe eines Geschiebetriebesetzes⁵⁰ die sog. Geschiebefunktion bestimmt, d. h. die Abhängigkeit zwischen Geschiebe- und Wasserführung und mit Hilfe dieser beiden Beziehungen die im Mitteljahr transportierte Geschiebemenge, die sog. Geschiebefracht, errechnet. Dann bestimmt man die während der Geschiebetriebperioden im Mittel pro sec transportierte Geschiebemenge und ermittelt mit Hilfe der Geschiebefunktion die dazugehörige Wassermenge Q_5 .

Q_6 :

$$Q_6 = k_1 \left(1 - \frac{1}{A} \right) + k_2 \quad \text{siehe (7)}$$

k_1 = Koef., abhängig von der Häufigkeit des Auftretens der Hochwasser während der betrachteten Zeitperiode (numerische Angaben fehlen)

k_2 = Konstante (numerische Angaben fehlen)

$$A = \frac{Q_{\text{Hochwasser}}}{Q_{\text{Niederwasser}}} = \text{Amplitude (relativ) der}$$

Abflußganglinie. (In Wirklichkeit müßte A und k_1 , k_2 mit Hilfe der Frequenzanalyse bestimmt werden).

Q_7 :

$$Q_7 = Q_i \left(1 + k_3 \cdot \frac{J_i}{J_a} \right)^2 \quad \text{siehe (32)}$$

Q_i = Jahresminimum (Mittel über mehrere Jahre)

$$k_3 = \left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{Q_a - Q_m}{Q_a + Q_m} \right) 100 \right]^3$$

α = Koef. = 65 für hinsichtlich Q relativ stabile Flüsse; = 75 für relativ instabile Flüsse

Q_a = Jahresmaxima

Q_m = Jahresmittel

J_i — Sohlengefälle bei Q_i

J_a — Sohlengefälle bei Q_a

2. Literaturverzeichnis⁵¹

- (1) P. Ackers (1962): «Experiments on small streams in alluvium». Proc. Am. Soc. Civil Eng. HY 4, paper No 3959, S. 37 und Diskussionsbeitrag in International Association for Hydraulic Research, 11th Congress Leningrad 1965, Vol. VI, S. 343—353.
- (2) F. Ahnert (1960): «Estuarine meanders in the Chesapeake Bay Area». Geographical Review, Vol. L, S. 390/401.
- (3) J. Alexandre (1962): «Les facteurs du développement des méandres à la lumière des observations faites le long de rivières intertropicales». Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Publication No. 59, (colloque de Bari).
- (4) R. E. Bates (1939): «Geomorphic history of the Kickapoo Region, Wisconsin». Bulletin of the Geological Society of America.
- (5) T. Blench (1957): «Regime behavior of canals and rivers». Butterworths Scientific Publications, London.
- (6) T. Blench (1964): «River engineering». University of Alberta, Dept. of Civil Engineering, Edmonton.
- (7) M. Bordas (1963): «Contribution à l'étude des relations entre le débit générateur et les méandres d'une rivière». Thèse, Université de Toulouse, erschienen als Sonderdruck: Universidade do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidraulicas, Pôrto Alegre, S. 78.
- (8) Central Board of Irrigation and Power (1960): «Annual review of fundamental and basic research scheme». New Delhi.
- (9) Central Board of Irrigation (1961): «Annual review of research on fundamental and basic problems relating to river valley projects and flood control works». New Delhi.
- (10) Central Board of Irrigation and Power (1956): «Manual on river behaviour, control and training». Publication No. 60, New Delhi.
- (11) Central Board of Irrigation (1962): «Annual review of research on fundamental and basic problems relating to river valley projects and flood control works». New Delhi.
- (12) Central Water and Power Research Station, Poona (1943): «Factors affecting meanders of channels». Annual Report (Technical) of work done during the year 1942—43, Research Publication No. 7.
- (13) Central Water and Power Research Station, Poona (1945): «Annual Report (Technical)». India, S. 12/13.
- (14) F. G. Charlton and R. W. Benson (1966): «Ef-

- fect of discharge and sediment charge on meandering of small streams in alluvium». Central Water and Power Research Station Poona, Golden Jubilee Symposia, Vol. 2, 285/290.
- (15) Chief Administration of Hydrometeorological Service, State Hydrological Institute (1965): «The river-bed laboratory». The Hydrometeorological Publishing House, Leningrad.
 - (16) W. M. Davis (1909/1954): «Geographical essays». Dover Publications, Inc., S. 556/557.
 - (17) G. H. Dury (1964): «Principles of underfit streams». U.S. Geological Survey, Professional Paper 452-A.
 - (18) G. H. Dury (1965): «Theoretical simplifications of underfit streams». U.S. Geological Survey, Professional Paper 452-C.
 - (19) H. Engels (1914): «Handbuch des Wasserbaues». 1. Band, S. 316/481 (Flußbau). Verlag W. Engelmann, Berlin.
 - (20) R. K. Fahnestock (1963): «Morphology and hydrology of a glacial stream — White River, Mount Rainier, Washington». U.S. Geological Survey, Prof. Paper 422-A.
 - (21) J. F. Friedkin (1945): «A laboratory study of the meandering of alluvial rivers». U. S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
 - (22) S. de Geer (1911): «Klarälvens serpentinlopp och flodplan». Sveriges Geologiska Undersökning, Arsbok 4, Ser. C, No. 236, S. 1—198.
 - (23) A. P. Grant (1948): «Channel improvements in alluvial streams». The New Zealand Institution of Engineers, S. 231/304.
 - (24) J. T. Hack (1965): «Postglacial drainage evolution and stream geometry in the Ontonagon Area, Michigan». U.S. Geological Survey, Prof. Paper 504-B.
 - (25) F. M. Henderson (1966): «Open channel flow». The Macmillan Co., New York, S. 448/484.
 - (26) F. Hjulström (1957): «Studien über das Mäanderproblem, a study on the meander problem». Bulletin No. 51 of the Inst. Hydraulics Royal Inst. of Technology, Stockholm.
 - (27) W. Jarocki (1957): «A study of sediment». U.S. Dept. of Commerce, Office of Technical Services. (Aus dem Polnischen übersetzt 1963).
 - (28) M. S. W. Jefferson (1902): «Limiting width of meander belts». The National Geographic Magazine, Vol. 13.
 - (29) G. Imamura (1935): «Free meanders of rivers». Japanese Journal of Geology and Geography, Vol. XII, No. 122, S. 33/38.
 - (30) C. C. Inglis (1947): «Meanders and their bearing on river training». The Institution of Civil Engineering, S. 54.
 - (31) C. C. Inglis (1949): «The behaviour and control of rivers and canals (Part I). Research Publication No. 13, Research Station Poona, Central Waterpower, Irrigation and Navigation.
 - (32) N. E. Kondratiev (1959): «River flow and river channel formation». Glavnoe Upravlenie Gidrometeorologicheskoi Shuzhby Pri Soviete Ministrov SSSR. Übersetzt ins Englische durch National Science Foundation, Washington DC (1962). (Erhältlich durch das U.S. Dept. of Commerce, Office of Technical Services).

- (33) N. E. Kondratiev (1959): «The channel process». Gidrometeoizdat, Leningrad.
- (34) N. E. Kondratiev, J. V. Popov und N. S. Znamenskaya (1965): «Hydromorphical basis for studying river-bed deformations unsteady flow». Int. Assoc. Hydraulic Research, 11th Int. Congress, Leningrad.
- (35) E. W. Lane (1955): «Design of stable channels». Trans. ASCE, paper No. 2776, S. 1234/1279.
- (36) E. W. Lane (1957): «A study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodible material». U.S. Army Engineer Division, Missouri River, Corps of Engineers, Omaha/Nebraska.
- (37) W. B. Langbein und L. B. Leopold (1966): «River meanders — theory of minimum variance». U. S. Geological Survey, Prof. Paper 422-H.
- (38) S. Leliavsky (1955): «An introduction to fluvial hydraulics». Constable & Co. Ltd., London.
- (39) L. B. Leopold und M. G. Wolman (1957): «River channel patterns: braided, meandering and straight». U.S. Geological Survey, Prof. Paper 282-B.
- (40) L. B. Leopold und M. G. Wolman (1960): «River meanders». Bulletin of the Geological Society of America. Vol. 71, S. 769/794.
- (41) L. B. Leopold, M. G. Wolman und J. P. Miller (1964): «Fluvial processes in geomorphology». W. M. Freeman & Co., San Francisco/London.
- (42) K. Masuch (1935): «Zur Frage der Talmäander». Berliner Geographische Arbeiten, Universität Berlin. Verlag J. Engelhorn's Nachf., Stuttgart, S. 48.
- (43) G. H. Matthes (1941): «Basic aspects of stream-meanders». Trans. Am. Geophysical Union, S. 32/636.
- (44) G. H. Matthes und J. H. Stratton (1956): «River engineering». Aus R. W. Abbett: «American Civil Engineering Practice», Vol. II, Sect. 15, S. 181. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (45) C. R. Neill (1964): «Alluvial processes and river channel regime». Trans. Engineering Inst. Canada, Vol. 7, No. A-3, Paper No. EIC-64-CIV 3.
- (46) P. F. Neményi (1952): «Annotated and illustrated bibliographic material on the morphology of rivers». Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 63, S. 595/644.
- (47) D. A. Parson (1960): «Effect of flood flow on channel boundaries». Proc. Am. Soc. Civil Eng., paper 2443, HY 4, S. 21/34.
- (48) S. J. Pin'kovskij (1962): «Types of river channels in Central and Southern Siberia». Trudy GGJ, No. 94 (russisch).
- (49) J. V. Popov (1964): «Hydromorphological principles of the theory of channel processes and their use in hydrotechnical planning». Soviet Hydrology: Selected Papers, No 2, S. 188/195.
- (50) T. M. Prus-Chacinski (1954): «Patterns of motion in open-channel bends». Assoc. Internat. d'Hydrologie, Pub. 38, Vol. 3, S. 311/318.
- (51) River Research Institute, Calcutta (1963): «Study on meandering, braiding and avulsion of streams and their prevention».
- (52) K. J. Rossinskij und J. A. Kuzmin (1958): «Gesetzmäßigkeiten bei der Bildung von Flußbetten», aus «Flußbettprozesse» (russisch), Akademie der Wissenschaften der USSR, Moskau, S. 5/14.
- (53) A. A. Saraskina (1958): Über die periodische Erweiterung der Flußbette» (wie [52]).
- (54) F. Schaffernak (1950): «Grundriß der Flußmorphologie und des Flußbaues». Springer-Verlag, Wien.
- (55) S. A. Schumm (1963): «Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains». Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 74.
- (56) J. G. Speight (1965): «Meander spectra of the Angabunga River». Journal of Hydrology, Vol. 3, No. 1, S. 1—15.
- (57) J. G. Speight (1965): «Flow and channel characteristics of the Angabunga River». Journ. of Hydrology, Vol. 3, No. 1, S. 16—36.
- (58) H. Stommel (1954): «Circulation in the North Atlantic Ocean». Nature, Vol. 173, S. 886/893.
- (59) J. B. Tiffany und G. A. Nelson (1939): «Studies of meandering of modelstreams». Trans. Am. Geophysical Union, S. 644/649.
- (60) P. Vujevic (1906): «Die Theiß, Cinopotamologische Studie». Geogr. Abhandlung, Vol. VII, issue 4.
- (61) G. Wolman und L. M. Brush (1961): «Factors controlling the size and shape of stream channels in coarse noncohesive sands». U.S. Geological Survey, Prof. Paper 282-G.
- (62) M. G. Wolman und L. B. Leopold (1957): «River flood plains: some observations on their formation». U.S. Geological Survey, Prof. Paper 282-C.
- (63) J. Zeller (1965): «Die Regime-Theorie, eine Methode zur Bemessung stabiler Gerinne». Schweiz. Bauzeitung, 83. Jahrg., Hefte 5/6, S. 15.

Anmerkungen

- 1 Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau (VAWE) an der Eidg. Technischen Hochschule, Zürich.
- 2 Siehe Erläuterungen über Modellähnlichkeit auf Seite 61/62.
- 3 Windungsgrad = Flußlänge entlang der Flußaxe, dividiert durch die Tallänge der entsprechenden Flußstrecke.
- 4 In diesem Zusammenhang ist ausnahmsweise unter Geschiebe die Gesamtheit der transportierten oder abgelagerten Feststoffe zu verstehen. In der Folge wird jedoch dafür der Ausdruck «Sediment» verwendet, das sich aus einem *Geschiebe*- (der Gerinnesohle folgend) und einem *Schwebstoffanteil* zusammensetzt.
- 5 Für die Gegenüberstellung verschiedener Flußgebiete sollte unbedingt auf dieselbe Abflußwassermenge (gleiche Abflußhäufigkeit) abgestellt werden.
- 6 A. Strickler (1924): «Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen». Schweiz. Bauzeitung, Band 83, Nr. 23 (S. 265/268).
- 7 A. Shields (1936): «Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung». Mitt. preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffsbau.

⁸ E. Meyer-Peter und R. Müller (1949): «Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes».

Schweiz. Bauzeitung, Jahrg. 67, Heft 3. J. Zeller (1963): «Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne». Schweiz. Bauzeitung, 81. Jahrg., Hefte 34—36.

⁹ Die Behauptung von J. Tricart in seinem kürzlich erschienen Buch, «Principes et Méthodes de la Géomorphologie», daß derartige versuchstechnische Untersuchungen die wirklichen Verhältnisse nicht wiederzugeben vermögen oder doch nur äußerst beschränkt anwendbar seien, ist nicht annehmbar.

¹⁰ Geht man z. B. in einem Modellversuch von einem geraden Gerinne in homogenem Alluvionsmaterial aus und läßt eine konstante Abflußwassermenge (ohne Geschiebebeschickung) fließen, so zeigt sich mit zunehmendem Abstand vom Rinnenanfang ein immer stärker werdendes Mäandern. Dies würde demnach sogar einem Anfachen des Windens entsprechen. Naturbeobachtungen bestätigen diese Feststellungen (26).

¹¹ Angaben über Modellversuche:

(59): Modell 15,0 m lang und 4,5 m breit, Alluvion und Geschiebe aus gewaschenem, mittelkörnigem Sand; mittl. Modellgefälle $J_T = 3,0$ bis $6,0\%$; Versuche mit geradem und unter 45° abgewickelm Gerinneinlauf.

(21): Modell wie oben und zusätzlich ein zweites 36,0 m lang und 11,4 m breit, Wassermengen 0,27 bis 12,15 lit/sec; Alluvion und Geschiebe aus:

siltigem Sand : $d = 0,001$ bis $0,50$ mm,
 $\gamma_s = 2,64$ t/m³

Grobsand : $d = 0,1$ bis $3,5$ mm,
 $\gamma_s = 2,69$ t/m³

Haydit-Sand : $d = 0,05$ bis $3,5$ mm,
 $\gamma_s = 1,85$ t/m³

Kohlengrus : $d = 0,01$ bis $3,5$ mm,
 $\gamma_s = 1,30$ t/m³

Kohle-Loeß-Sand : $d = 0,001$ bis $3,5$ mm,
 $\gamma_s = 1,64$ t/m³

Die oben zitierten Versuchsergebnisse wurden erhalten ohne Geschiebezugabe am Gerinneanfang.

¹² Beobachtungen an der Theiß über die Mäanderentstehung zeigen einen gleichen Ablauf (46), (60).

¹³ Im von Ackers (1) untersuchten Bereich sind nur alternierende Geschiebebänke und Mäander bei Verhältnissen von Gerinnebreite b zu Wassertiefe $h > 12,4$ (Mäanderbereich 12,4 bis ca. 47,0) vorhanden. Für $b/h < 12,4$ blieb das Gerinne gerade. Versuche ausgeführt in Sand; $Q = 11,2$ bis 140 lit/sec; Geschiebe $G \leq 0,4$ gr/lit sec; $Fr. = 0,26$ bis $0,38$ ($Fr =$ Froud'sche Zahl, siehe Fußnote ²³ auf Seite 94).

¹⁴ Siehe weitere Angaben im Kapitel IV/1.

¹⁵ Bei *erosionswiderstandsfähigen Ufern* bleibt das Gerinne gerade, obwohl die migrierenden Bänke die Ufer periodisch entblößen und derart der Erosion aussetzen. Bei *schwach erodierbaren Ufern* findet an den entblößten Stellen eine geringe Seiten-Erosion statt, die zu einer allgemeinen Ausweitung des Gerinnes führt. Dieser Prozeß schreitet so lange fort, bis sich eine Überbreite ergeben hat, bei welcher die Bänke die Tendenz haben, sich teilweise oder gänzlich vom Ufer zu lösen. Die derart entstandenen

Nebengerinne verlanden meist rasch, so daß sich wieder die ursprüngliche «Normalbreite» einstellen kann. Bei *stark erodierbaren Ufern* werden die entblößten Ufer rasch ausgeweitet, wodurch der Fluß zu mäandern beginnt, sich aber streckenweise wieder auf die ursprüngliche Form zurückzubilden vermag. Dies zeigt, daß die Flüsse mehr oder weniger ausgeprägt um eine mittlere Gerinnebreite pendeln, wobei dieser Prozeß meist sehr langsam vor sich geht (Generationen).

¹⁶ In diesen Begriff wird zusätzlich das regelmäßige Migrieren eingeschlossen.

¹⁷ Zu den oben genannten Größen ist folgendes zu bemerken: Als wirklich unabhängige, für die Gerinnebildung in einer Flußalluvion verantwortliche Größen betrachten wir in diesem Zusammenhang:

$$Q, G, d, \gamma_s, \gamma_w, v, g$$

Sämtliche andern Größen wie Gerinneform, Gefälle usw. hängen davon ab. Da das Gerinnegefälle oder in unserm Falle das Gefälle des Mäandergürtels resp. des Tales aber ein sehr guter Indikator für Fließvorgänge und Gerinneform ist, wird er in der Folge den aufgeführten unabhängigen Größen als weiterer (abhängiger) Parameter beigelegt (11), (14), (63).

¹⁸ Bei diesen Versuchen blieben die Randbedingungen immer dieselben (unveränderter Kornaufbau des Geschiebes und der Alluvion, $J_T = 7,5\%$, G wurde jeweils Q angepaßt. Man könnte erwarten, daß deshalb über den ganzen Bereich λ/A konstant sei. Dies ist jedoch nicht möglich, da nach der Froud'schen Ähnlichkeit sämtliche Größen (also auch die Kornzusammensetzung) dem Modellmaßstab angepaßt werden müßten, d. h. daß im Diagramm der Fig. 14 und 15 implizite ein «Maßstabs-effekt» wirksam ist. Die grundsätzliche Bedeutung der Diagramme ist dadurch keineswegs eingeschränkt

¹⁹ Das Ziel der Arbeit war unter anderem die Bestimmung eines ideellen Q , das als konstanter Beitrag die Gesamtheit des Abflußregimes darzustellen vermag. Im Versuch wurden verschieden lang dauernde, verschieden häufige und verschieden große Hochwasserwellen hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Mäandern untersucht.

²⁰ Man glaubt annehmen zu dürfen, daß sich diese Mäandergrundtypen wie harmonische Schwingungen höherer Ordnung superponieren.

²¹ Diese Versuche zeigen allerdings einen Schönheitsfehler. Korrekterweise müßte bei $Q = \text{konst.}$ (mit dem die Versuche durchgeführt wurden) die Geschiebemenge G dem jeweiligen Gefälle J künstlich angepaßt werden (blieb jedoch konstant), da mit wachsendem J_T auch die von oberstrom antransportierte Geschiebemenge zunimmt. Andernfalls sucht das Gerinne eine neue (optimale) Gleichgewichtsform, welche nicht nur von J_T allein, sondern auch von G mitbeeinflußt wird. Außerdem ist nicht anzunehmen, daß mit immer weiter wachsendem J die Amplitude immer größer wird. Vielmehr dürfte sich das Gerinne nach Überschreiten eines Optimums zu strecken beginnen (wachsendes λ), was in einer Abnahme des Windungsgrades zum Ausdruck käme oder aber es beginnt sich zu verzweigen.

²² Versuchsbedingungen: Modell 90 m lang, 30 m breit; Geschiebe $d_{90} = 0,21$ mm, $d_m = 0,16$ mm, $d_{10} = 0,13$ mm (einige Versuche wurden auch mit größerem Material wiederholt); $Q = 15$ bis 185 lit/sec; Versuchsdauer je 10 bis 20 Tage; total 21 Versuche, wovon 8 mit Mäanderbildung. Die Versuche wurden jedoch hinsichtlich Vergrößerung von J_T nicht soweit gesteigert, daß das Mäandern infolge zu großer Steilheit aufhörte und in einen anderen Flußtyp überging, weshalb obige Aussage bezüglich Verstärkung der Mäandertendenz nur Gültigkeit für den obigen Untersuchungsbereich hat.

²³ Die Froude'sche Zahl wird hier definiert als

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (v = \text{mittl. Fließgeschwindigkeit,}$$

$g = \text{Erdbeschleunigung, } h = \text{mittl. Wassertiefe}).$ Sie gibt unter anderem an, ob ein Fließvorgang als langsamer (strömender) mit $Fr < 1,0$ oder aber als schneller (schießender) mit $Fr > 1,0$ zu bezeichnen ist. Je nachdem ist das Fließverhalten verschieden.

²⁴ Mit zunehmendem G bei gleichbleibendem Q wächst auch J_T , wodurch sich nach dem früher Gesagten die Mäander vergrößern.

²⁵ Man weiß heute noch nicht bestimmt, ob Mäanderlänge und -breite in gleichem Maße anwachsen, d. h. die Mäanderform bei *wachsendem* G gleichbleibe (30) und welcher Einfluß die Grobkörnigkeit des Geschiebes auf die Mäanderausbildung hat (9). Bei *abnehmendem* G nimmt hingegen der Windungsgrad ab, bei gleichzeitiger Verminderung von J_s (44).

²⁶ Zur Präzisierung des Begriffes Migration sei fortan festgelegt, daß er nur noch die im engeren Sinne des Wortes zu verstehende Talwärtsbewegung der Mäander bedeutet.

²⁷ Berechnet nach der Froude'schen Ähnlichkeit müßten die Migrationsgeschwindigkeiten folgender Relation gehorchen:

$$\frac{v_1 \text{ mig.}}{v_2 \text{ mig.}} \approx \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{1/4}$$

($E = \text{Einzugsgebiet in km}^2$)

Da aber im Durchschnitt kleine Einzugsgebiete meist größere J_T und auch größere Geschiebe aufweisen als große Einzugsgebiete, müßte zu allermindestens in obiger Beziehung noch eine Korrekturfunktion eingeführt werden.

²⁸ Diese Werte sind nicht allgemeingültig, sondern sind von den örtlichen Verhältnissen abhängig. So hatten z. B. die Mäander der Versuche von Friedkin (21) ihre maximale Größe bei $w = 1,5$ bis 2,0 schon erreicht.

²⁹ Der untere Mississippi von Cairo bis zur Mündung zeigt trotz stark aktiven Verhaltens folgende Totallängen:

Jahr	1765	1820	1882	1916	1929
Länge (km)	1686	1753	1673	1692	1699

Seither wird der Fluß intensiv verbaut, so daß neuere Längenangaben nicht mehr repräsentativ sind.

³⁰ Bei Annahme eines durch Kreisbogen nachgebildeten Mäanderflusses ist der Grenzwindungsgrad, bei dem ein Durchstich erfolgt $w = 5,2$, d. h.

es braucht einen für die Alpenländer ungewohnt hohen Windungsgrad, daß dieser Typ entstehen kann.

³¹ Indische Flüsse mit solchen Durchstichen:

Punjab River $w_{\text{grenz.}} = 1,7$

Indus River bei Sind $w_{\text{grenz.}} = 2,0$

³² Siehe auch Untersuchungen über das Mäanderproblem von H. A. Einstein und R. W. Shen (1964): «A study on meandering in straight alluvial channels». Journal of Geophysical Research, Vol. 69, Nr 24,, p. 5239/5247.

³³ Die Versuche wurden in einer Laboratoriumsrinne ausgeführt, mit zwei Versuchssanden von $d_m = 0,67$ resp. 2,0 mm; $G = \text{konst. } (\neq 0)$. Bei Versuchsbeginn steigerte man die Wasserführung rasch von $Q = 0$ auf den gewünschten konstanten Wert. Dieses Vorgehen führte dazu, daß nach Erreichen von $Q = \text{konst.}$ das Gerinne nicht im Gleichgewicht war, sondern sich diesen Zustand erst schaffen mußte. Hierbei durchlief jeweils die Gerinnesohle rasch die verschiedenen Stadien der Dünenbildung (Fig. 24), Dünenformen also, die eigentlich z. T. typisch sind für andere Fließzustände (Fig. 7 und 8). Diese Eigenart des Versuches hat aber kaum einen Einfluß auf das Endergebnis.

³⁴ Die Froude'sche Zahl stellt für Dünen und Mäanderprobleme kein allgemein gültiges Kriterium dar. Sie ist aber bei Versuchen innerhalb einer Versuchserie ein guter Indikator.

³⁵ Solche Regeln basieren schlußendlich auf statistischer Grundlage wie sie z. B. besprochen wird von R.J.Choley (1966): «The application of statistical methods to geomorphology». (Erschienen in G. H. Dury: «Essays in geomorphology», Verlag Heinemann, London).

³⁶ In diesem Zusammenhang können die Beziehungen $\lambda = f(b)$ und $A = f(b)$ genannt werden ($b = \text{Gerinnebreite}$). So zeigen Versuche (21) mit verschiedenen Alluvionsmaterialien, aber sonst gleichen Randbemerkungen, trotz gleichen λ verschiedene A und sehr stark verschiedene b . Diese Materialabhängigkeit muß u. a. berücksichtigt werden. Es gibt deshalb Autoren, die solche Darstellungen kategorisch ablehnen, da b keine «grundlegende» Größe für die Mäanderform ist (36). Der Vollständigkeit halber führen wir dennoch derartige Regeln auf.

³⁷ Solche «gerade» Gerinne benötigen schärfere Kriterien, um eine Unterscheidung zu ermöglichen.

³⁸ Anmerkung ³⁸ s. Seite 95 oben (Tabelle).

³⁹ Laut (41) beträgt im Mittel für den Osten der USA $\frac{Q \text{ Jahresmittel}}{Q \text{ gerinnefüllend}} \sim 0,12$ und Q gerinnefüllend tritt im Durchschnitt alle 5 Jahre einmal auf.

⁴⁰ Wie früher erwähnt, ergibt eine Analyse der tatsächlich vorhandenen Verhältnisse unter Berücksichtigung der Kenntnisse aus der Gerinne- und «Geschiebehdraulik», daß Profilform, Rauigkeit, das Abflußregime von Wasser und Geschiebe und die Charakteristiken des letzteren (z. B. der mittlere Korndurchmesser d_m) wesentliche und zu berücksichtigende Größen sind. Zu ähnlichen Überlegungen gelangen übrigens Charlton und Benson (14)

ußtyp	Aufbau der Flußsohle	J_{Tal} ‰	Fr Größen- ordnung	Sohle leichter erodierbar als Ufer	Sohle und Ufer gleich erodierbar
birgig	Blöcke + Steine + Kies	> 9	0,5	0,75	0,90
gelig	Steine + Kies + Sand	4 ÷ 9	0,2 ÷ 0,5	0,90	1,00
bergang zu flach	Grob + Mittel + Fein- sand	0,12 ÷ 4,0	0,04 ÷ 0,2	1,00	1,10
nachland (Dar'ya Fluß)	Feinsand + Silt + evtl. Ton	< 0,12	0,02 ÷ 0,3	1,10	1,70

auf versuchstechnisch-empirischem Wege. Das Diagramm der Fig. 26 ist deshalb nur für die dort berücksichtigten Flüsse oder Flußgebiete mit ähnlichem Charakter repräsentativ. Die Werte z. B. der Thur liegen eindeutig «höher» (bei Berücksichtigung der entsprechenden Bezugswassermengen). Jedoch, und das ist das wichtigste, besteht tatsächlich eine solche Trennung zwischen mäandernden und nicht mäandernden Flüssen.

⁴¹ In Analogie zur Regimegleichung für das optimale Sohlengefälle *gerader* Gerinne ($J_s = 1630 d_m^{1,15} \cdot Q_{\text{gerinnebildend}}^{-0,46}$) und in Anlehnung an Gleichung (11) fand Henderson für Mäander $J_s = 2080 d_m^{1,15} \cdot Q_{\text{gerinnebildend}}^{-0,44}$.

Dies bedeutet in Übereinstimmung mit dem früher Gesagten, daß stabile gerade Gerinne bei sonst gleichen Randbedingungen erst auftreten können, wenn sie ein kleineres Gefälle aufweisen als mäandernde. Blench [6] nennt sogar einen mittleren Gefällsunterschied von 1:2 als notwendig.

⁴² Dies ändert z. B. nichts an der einleitenden Diskussion über den Einfluß des Gefälles auf die Flußform.

⁴³ Ein Wert $\varepsilon = 0,25$ (mit angepaßtem K_0) wäre ebenfalls noch möglich, nicht aber ein $\varepsilon \geq 0,4$. Dies bedeutet, daß dieses $J_{\text{grenzmin.}}$ eine ähnliche Neigung, jedoch eine verschiedene Lage gegenüber der Grenzlinie nach Gleichung (1) aufweist.

⁴⁴ Da $Q = X \cdot E^{(1/2 \div 4/5)}$ ist, setzt sich demnach in Gleichung (13) K_2 aus einem Anteil K_1 und einem Anteil X zusammen. Da X den Abflußcharakter des Einzugsgebietes wiedergibt und in weitem Bereiche

variiert, ist demnach K_2 wiederum keine «universelle» Konstante, sondern nur (praktisch) konstant für ein und dasselbe Einzugsgebiet.

⁴⁵ Inglis gibt auch eine Beziehung für K_1 , die er mit Hilfe der Dimensionsanalyse erhalten hat.

$$K_1 = \frac{\alpha}{g^{1/3} \cdot v^{1/12}} \cdot \left(\frac{c \cdot w_s}{d_m} \right)^{1/4}$$

$\alpha =$ Konstante = $f(J_s)$; $\nu =$ kinematische Zähigkeit; $c =$ Feststoffkonzentration = $\frac{G}{Q} w_s =$

mittl. Sinkgeschwindigkeit für Einzelkörner. Er versuchte derart die wichtigsten die Gerinnebildung bestimmenden physikalischen Größen in K_1 zu vereinen. Wie gut dieser Ansatz der Wirklichkeit entspricht wurde nicht untersucht.

⁴⁶ Unter Berücksichtigung sämtlicher bis heute greifbarer Daten aus Flußmäandern in Alluvionen und Fels, Mäandern in Gletschereis und in Kalkarren sowie mäandernden Dichteströmungen in unbewegtem Wasser.

⁴⁷ Für b auf Wasserspiegelhöhe gemessen wird entsprechend Fußnote⁴⁶ K_5 im Mittel 4,5.

⁴⁸ Bei geraden Gerinnen im Beharrungszustand ist dieser Betrag kleiner, d. h. daß in der Regel (wie bekannt) gerade Gerinne schmaler sind als mäandernde.

⁴⁹ Einschließlich der durch Korrektion abgeschnittenen Flußstrecken.

⁵⁰ Siehe z. B.: J. Zeller (1963): «Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne», Schweiz. Bauzeitung, 81. Jahrg., Hefte 34/35/36.

⁵¹ In diesem Verzeichnis sind keine Arbeiten aufgenommen, die sich der hydromechanischen Seite der Wasserbewegungen in Flußkrümmungen oder in Mäandern widmen.