

Hjulström, F. H. (1942): Studien über das Mäander-Problem. – Geogr. Ann., 24:233-269, 9 Abb., 3 Tab.

STUDIEN ÜBER DAS MÄANDER-PROBLEM

von FILIP HJULSTRÖM

Viele Probleme sind mit den freien Mäandern der Flüsse verknüpft, am wichtigsten ist jedoch die Frage über deren Ursache. Weshalb verlaufen die Flüsse unter gewissen Umständen in diesen eigentümlichen Windungen, die als Serpentinen oder Mäander bezeichnet werden? Weshalb haben sie statt dessen nicht einen mehr zufällig bestimmten oder geraden Lauf? Diese Frage in ihren verschiedenen Formulierungen hat die Forschung lange interessiert, und im Jahre 1910 hatte man zwischen 20 und 30 Mäandertheorien. Während der Jahre intensiver physisch-geographischer Forschung, die seitdem verstrichen sind, ist weiterhin eine Anzahl Theorien über diese Frage entstanden, vielleicht noch ein Dutzend. Trotzdem lassen sich die Mäander als eine noch unerklärte Erscheinung betrachten. Die vielen vorgelegten Theorien waren mit wenigen Ausnahmen mehr metaphysisch als physikalisch; sie haben sich selten auf bekannte Naturgesetze oder ein wissenschaftliches Verwerten neuer Beobachtungen gegründet. Einige Ausnahmen kommen jedoch vor. Die quantitative Untersuchung der freien Mäander begann durch Jefferson 1902, und unter den späteren Forschern sei besonders Exner erwähnt, der in mehreren Arbeiten aus den Jahren 1919—1931 sich dieses Problems angenommen hat. Aus Schweden sind wichtige Beiträge geliefert worden von Sten De Geer 1910 durch die genaue Beschreibung der Flussaue und des Serpentinlaufes des Klarälv und von Ahlmann 1914.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, teils das Vorkommen von mäandernden Flüssen in Schweden zu beleuchten und teils zu untersuchen, ob neue Erfahrungen bezüglich der Strömung des Wassers zur Erhellung des Mäander-Problems beitragen können. Ein womöglich folgender Teil soll über geplante Messungen in schwedischen Flüssen berichten.

I.

Eine Karte über mäandernde Flüsse in Schweden.

Das Mäander-Problem kann gewiss nicht allein durch das Studium des Bildes der Flussysteme auf Karten gelöst werden. Indessen ist wie bei anderen morphologischen Untersuchungen eine Kartenanalyse notwendig und vermag gewisse, teilweise sehr wichtige Aufschlüsse zu geben. Bezüglich des Mäander-Problems ist das einfache geographische Untersuchungsprinzip, das im Feststellen der Verbreitung des Phänomens besteht, wenig beachtet worden. Es sind wohl vereinzelt Karten erschienen, so z. B. eine von Masuch, doch geben diese gewöhnlich die Verbreitung von eingesenkten Mäandern wieder. Was Schweden betrifft, ist deshalb eine Karte ausgearbeitet worden, die alle mäandernden Wasserläufe von einiger Bedeutung wiedergibt. Diese erscheint hier als Taf. I.

Anfertigung und Eigenschaften der Karte.

Das Quellenmaterial. — Die Karte über mäandernde Flüsse in Schweden, die der vorliegenden Arbeit beigefügt ist, gründet sich vollständig auf die topographischen Kartenblätter. Um die grösstmögliche Gleichmässigkeit zu erreichen, wurden Karten im Masstab 1: 100 000 verwendet, da solche für das gesamte Land ausser für die westlichen Teile Norrlands existieren. Auf Taf. 1 ist angegeben, für welche Gebiete Karten in diesen Masstab fehlen. In diesen Fällen mussten die Karten 1: 200 000 benutzt werden. Wie unten näher erklärt werden soll, ist doch dadurch keine grosse Verschiedenheit bezüglich der Häufigkeit von Mäandern in diesen Teilen Norrlands und im übrigen Schweden entstanden. Über grosse Teile des Landes gibt es ausserdem Karten 1: 50 000, topographische, geologische und Wirtschaftskarten, oder solche in grösserem Masstab, z. B. Wirtschaftskarten im Masstab 1: 20 000 und Luftbildkarten 1: 10 000. Daneben kommen Katasterkarten in noch grösserem Masstab über ausgedehnte Gebiete vor. Da grösstmögliche Gleichmässigkeit angestrebt wurde, sind jedoch Karten in grösserem Masstab als 1: 100 000 nur in Ausnahmefällen beim Studium von besondern Beispielen zu Rate gezogen worden.

Von verschiedenen Kartenblättern gibt es zwei Auflagen, eine ältere aus den Jahren 1840—1870 und eine jüngere, die gewöhnlich aus den 20-er oder 30-er Jahren dieses Jahrhunderts herrührt. In diesen Fällen wurde immer die ältere Karte verwandt, und dies aus zwei Gründen: Teils ist das Entwässerungsnetz auf den älteren Karten gegenüber den neueren viel deutlicher und kräftiger markiert, und teils ist eine grosse Zahl von mäandernden Flussläufen besonders auf den Ebenen gereinigt und kanalisiert worden, so dass sie ihren natürlichen Lauf nicht länger aufweisen. Beinahe jedes Kartenblatt liefert hierfür Beispiele. Um ein solches zu erwähnen, so ist der Silletorps-Fluss auf der Auflage des Jahres 1924 vom Kartenblatt 11 Karlskrona in seinem geraden Verlauf mitten zwischen Wegen und Besiedlung kaum zu unterscheiden, während er auf der Karte vom Jahre 1870 vor seiner Regulierung einen auf dem Blatt deutlich hervortretenden Mäanderlauf hatte.

An Hand dieser Karten wurden die Mäanderbildung auf einer Arbeitskarte im Masstab 1: 2 Mill. eingetragen, die später bei der Reproduktion zu Taf. 1 verkleinert wurde. Eine Länge von 1 mm auf der Arbeitskarte entsprach also 2 cm auf den topographischen Kartenblättern. Infolgedessen konnten nur längere Mäanderstrecken über eine gewisse Minimallänge hinaus mitaufgenommen werden. Die untere Grenze wurde auf 1 km festgesetzt.

Die schwedischen topographischen Kartenblätter unterscheiden zwischen breiten und schmalen Flüssen. Wasserläufe, deren Breite sich auf 25 m beläuft, sind auf den Karten im Masstab 1: 100 000 mit zwei Uferlinien markiert; bei dem Masstab 1: 200 000 ist dies erst bei 50 m Breite der Fall. Schmälere Flüsse sind in beiden Fällen mit einer einfachen Linie bezeichnet. Auf Taf. 1 ist dieser Unterschied durch breite oder schmale schwarze Linien wiedergegeben. Für den Hauptteil des Landes bezeichnet also eine

dicke Linie einen mäandernden Fluss von mindestens 25 m Breite, doch für Inner-Norrland einen solchen von mindestens 50 m.

Mäander und Flusskrümmungen auf den Karten. — Die grösste Schwierigkeit bei der Anfertigung der Karte bestand im Unterscheiden der Mäander von allerlei unregelmässigen und zufälligen Krümmungen von Wasserläufen.

Die Ausdrücke Mäander und Serpentine sind der Gegenstand vieler Definierungsversuche gewesen, die hier nicht erörtert zu werden brauchen. Die Mäander können mit dem Vorkommen von Flussebenen in Verbindung gebracht werden, doch gilt dies nicht für eingesenkte Mäander. Ein Studieren der Mäander mit Hilfe von Karten in einem so kleinen Maßstab, wie 1:100 000 darstellt, erfordert eine so weitgedehnte Begriffsbestimmung wie möglich, da alle vorkommenden Mäandertypen eingeschlossen werden sollen. Auch darf der Grad der Krümmung nicht für den Begriff Mäander den Ausschlag geben, da dann die Grenze für das, was als Mäandern bezeichnet werden soll, völlig dem Gutdünken überlassen bleibt. Prinzipielle Gründe finden sich nicht gegen eine weite Grenzziehung. Doch *existiert* natürlich anderseits eine Grenze gegen nicht mäandernde Flüsse mit gewundenem Lauf. Auf den Karten können jedoch beide Typen verwechselt werden. Es ist deshalb notwendig, die Neigung zu beachten und Gebirgsbäche und -flüsse mit abschüssigem und wirbelbildendem Lauf auszuschliessen. In der Regel sind diese Strecken mit gekrümmtem, mäanderähnlichem Verlauf sehr kurz und die Windungen jäher und weniger regelmässig als auf einer Flussebene. Auf der Karte, Taf. I, sind sie soweit als möglich unberücksichtigt.

Eine andere Schwierigkeit tritt bei Flüssen auf, die ihren Weg durch *Moore* und *Sumpfböden* nehmen. Hier weisen die Flüsse bisweilen — nicht immer — einen Lauf mit vielen Windungen eines nicht selten mäanderähnlichen Aussehens auf. Auf Mooren ist dies vielleicht am häufigsten bei solchen Flüssen, die längs des Lagges fliessen, wie viele Beispiele zeigen. Vielleicht verlaufen die Flüsse dort wenigstens teilweise in mineralogenen Bildungen. In anderen Fällen nehmen sie unzweifelhaft ihren Weg durch das Moor selbst. Es kommt vielfach vor, dass ein Bach oder Fluss mit relativ geradem Lauf äusserst schlingenreich wird, sobald er über ein Moor oder einen Sumpf passiert, und dann seine vorherige Laufgestaltung wiederaufnimmt, wenn er wieder zu mineralogenen Bodenarten kommt. Beispiele derartiger stark gekrümmter Läufe finden sich u. a. auf Kartenblatt 19 Öldestad (mehrere Beispiele, u. a. Österån), 21 Lenhofda, westlicher und mittlerer Teil, z. B. Alsterån östlich des Sees Alstern. Blatt 26 Nissafors bietet mehrere Beispiele, z. B. in der Nähe von Sämsjön. Dort finden sich auch Beispiele für Wasserläufe ohne Windungen in Mooren, z. B. in Storemosse.

Der Anlass für das Verhalten der Flüsse in Mooren ist nicht bekannt. Ihre Morphologie in Moorböden ist — trotz wichtiger Aufklärungen durch Osvald — noch nicht erforscht, obwohl sie ein verhältnismässig wichtiges Problem bildet. Ob diese Windungen als Mäander zu bezeichnen sind oder nicht, ist nicht klar. Sie sind in solchem Fall Mäander eines ganz besondren Typs, bei deren Bildung teilweise andere Prozesse ausschlaggebend sind, als bei Mäanderbildung in mineralogenen Bodenarten. Das Vorkommen einer derartigen Mäanderbildung muss den Gegenstand einer speziellen Unter-

suchung bilden. — Bei der Verfertigung der Karte wurde besondere Aufmerksamkeit darauf gelenkt, derartige gekrümmte Strecken auszuschliessen, wo das Auftreten der Windungen nicht ausgeprägt und regelmässig war.

Genauigkeit der Karte. — Taf. I besitzt die Genauigkeit und Zuverlässigkeit, wie sie der gewählte Maßstab sowie die Zuverlässigkeit der Karten zulässt, worauf sie sich gründet. Der grösste Übelstand ist, dass ein einheitlicher Maßstab nicht angewendet werden konnte. Dadurch besteht die Gefahr für einen gewissen Unterschied zwischen der Häufigkeit und Art der Mäanderbezeichnung in Inner-Norrland und dem Hauptteil des Landes. Dieser dürfte jedoch nicht gross sein. Das gesamte Küstengebiet besitzt Karten sowohl im Maßstab 1:100 000 wie 1:200 000, weshalb für diese Gegenden ein Vergleich möglich ist. Es zeigt sich hierbei, dass die Unterschiede nicht stark sind und fast ausschliesslich für kleine Bäche in Frage kommen. In Inner-Norrland konnten also mäandernde kleine Bäche in nicht ganz der gleichen Häufigkeit wie für das übrige Schweden markiert werden. Der Unterschied kann natürlich nicht exakt angegeben werden, doch nach den Gebieten zu urteilen, die Karten in beiden Maßstäben aufweisen, ist er nicht gross. Die Grenze zwischen breiten und schmalen Flüssen läuft verschieden, für Inner-Norrland ist sie 50 m und für das übrige Schweden 25 m. Das Vorkommen breiter mäanderbildender Flüsse (dicke schwarze Striche auf der Karte, Taf. I) sollte deshalb eigentlich in Inner-Norrland etwas grösser sein.

Unzweifelhaft kommt zu diesen auf dem Kartenmaterial beruhenden Ungenauigkeiten auch ein subjektives Moment hinzu, und zwar bei der Beurteilung der gewundenen Flüsse, ob sie mäandern oder nicht. Im vorhergehenden wurde über die Grundsätze berichtet, die bezüglich Flüssen in Mooren und Flüssen mit steilem Gefälle angewandt wurden. Das subjektive Moment dürfte ebenfalls an Bedeutung herabgemindert worden sein durch ein genaues Überlesen der Karte, teils durch einen Assistenten und teils durch den Verf. zweimalig mit einer längeren Zwischenzeit. Es kann schliesslich hinzugefügt werden, dass auch eine Inaugenscheinnahme von Schwedens sämtlichen Wasserläufen an Ort und Stelle — was wohl deren mehrere hunderttausend Kilometer betragende Gesamtlänge entlang mit den vorhandenen Verkehrsmöglichkeiten nicht durchführbar ist — sicher zahlreiche zweifelhafte Fälle bringen dürfte, wo ein subjektives Moment sich bemerkbar machen könnte.

Das Vorkommen von mäandernden Wasserläufen in Schweden.

Eine der wichtigsten Einwirkungen der quartären Vereisung in Schweden besteht in der umfassenden Umwandlung, um nicht zu sagen Neubildung des Entwässerungssystems, die auf sie folgte. Die hauptsächliche Neigungsrichtung ist sicher dieselbe wie früher, vielleicht gilt dies auch für den grösseren Teil der Täler, doch gleichwohl ist das gesamte Flusssystem verjüngt. Moränen und glazifluviale Ablagerungen haben auf die Täler eingewirkt oder die Flüsse aus ihnen hinausgezwungen; in dem grossen ebenen Gelände ohne markiertes Talsystem, das einen so grossen Teil der Oberfläche des Landes einnimmt, dürfte die Entwässerung völlig neu sein. Die direkte Erosion des Gesteins

hat viele Seenbecken hervorgerufen. Es dürfte in Schweden kein einziger bedeutender Fluss mit regelmässiger Fallkurve zu finden sein. Statt dessen ist sie immer durch Fälle oder Strecken mit Stromschnellen oder durch Seen bis zur Mündung hinunter unterbrochen.

Unter derartigen Umständen lässt sich nicht erwarten, dass die Wasserläufe Schwedens in grösserer Ausdehnung mäandern. Verglichen mit Ländern, die früher nicht vereist waren, ist dies vielleicht auch nicht der Fall. Ein Vergleich ist wegen fehlender systematischer Untersuchungen schwer anzustellen, doch ergeben die Reiseeindrücke des Verfassers von den Ebenen in den Ländern Mitteleuropas — wie auch flüchtiges Kartenstudium, dass eine solche Vermutung nicht unbegründet ist. Ein Blick auf Taf. I zeigt indessen, dass mäandernde Wasserläufe in grösserem Umfang vorkommen, als man hätte annehmen wollen.

Die trotz allem nicht unbedeutende Häufigkeit von Mäandern dürfte durch zwei Ursachen erklärt werden können. Die relative Ebenheit, die grosse Teile des Landes kennzeichnet, muss das Aufkommen von Mäandern begünstigen, denn zwischen den Wasserfall- oder Seenstrecken in einem jungen Flusslauf finden sich oft längere oder kürzere Strecken mit ruhigem Lauf. Eine andere beitragende Ursache ist das Vorkommen glazifluvialer oder postglazialer (mariner und lakustriner) Sedimente, die durch die Landhebung oder andere Ursachen nun trockengelegt sind und oft als flache Ebenen auftreten. Die Eiszeit und ihre Nachwirkung haben also die Bedingungen für Mäanderbildung nicht nur vermindert, sondern auch etwas begünstigt.

Verschiedene Typen von Mäandern. — Es seien hier nur einige Bemerkungen über den Mäandertyp als Einleitung zum Folgenden gemacht.

Der schönste Mäanderlauf Schwedens in einem grossen Fluss ist der des Klarälvs, der durch Sten de Geer 1910 eingehend beschrieben wurde. Nach ebengenanntem Verfasser ist indessen der Mäandergürtel im Verhältnis zur Grösse des Flusses schmal, da das Spaltental, in dem der Fluss seinen Weg nimmt, eng ist. Unter Ausgehen von Jeffersons empirischem Satz, dass die maximale Breite des Mäandergürtels 18-mal die Durchschnittsbreite des Flusses ist, findet er, dass die Mäander des Klarälvs (oder Serpentinen, wie er sie nennt, um eine schwächere als halbkreisförmige Biegung zu bezeichnen) auf ein Viertel ihres natürlichen Tätigkeitsfeldes eingeschränkt sind. Der Mäanderlauf des Klarälvs ist deshalb nicht ganz frei. Dagegen ist er verhältnismässig typisch und regelmässig durch den gesetzmässigen Aufbau seiner Flussebene.

In seiner Klassifikation von Flüssen auf Flussebenen unterscheidet Melton drei verschiedene Mäandertypen: *scroll meanders*, *bar meanders* und *lacine meanders*. Der erstgenannte unter diesen ist sehr regelmässig mit einem überall gleich breiten Fluss zwischen parallel verlaufenden Ufern und mit einer Flussebene, die aus langen, gleichmässig geschwenkten und dicht beieinander liegenden Flusswällen (scrolls) aufgebaut ist. Diese Beschreibung passt gut zu Mäanderlauf und Flussebene des Klarälvs, (auch wenn eine gewisse Übereinstimmung mit dem naheverwandten Typ *lacine meanders* vorhanden ist), doch nach den Karten zu schliessen finden sich auch viele andere Beispiele für diesen regelmässigen Typ.

Bar meanders ist zufolge der Einteilung Meltons ein anderer extremer Typ, der sich durch eine sehr verschiedene Breite des Flusses, scharfe Winkel und abrupte Krümmungen kennzeichnet. Der Mäandercharakter tritt in der Flussebene deutlich zutage, doch ist auf Karten in kleinem Maßstab, wo nur der Fluss selbst angegeben ist, der Mäandercharakter weniger offensichtlich. Viele schwedische Flüsse, vielleicht besonders in Norrland, besitzen in der Nähe ihres Deltas ein Aussehen, das stark an Fig. 5 bei Melton erinnert, und könnten infolgedessen *bar meanders* sein. — Der dritte Typ, *lacine meanders*, ist ein Übergangstyp und weniger leicht auf Karten über nur den Fluss zu entdecken. — Zu diesen Typen treten schliesslich eventuell weitere mäanderähnliche Wasserläufe in Mooren und Sümpfen hinzu, wie früher erwähnt wurde.

Ein grosser Teil der Mäander auf schwedischen Lehmb- und Sandebenen ist mehr oder weniger in diese Ablagerungen eingesenkt. Infolge der Landhebung wurde die Erosion intensiert, und eine Tiefenerosion begann. Das Ergebnis ist gewöhnlich ein Zwischending zwischen einem eingesenkten Mäanderlauf in engerem Sinne mit einem gewundenen Tal ohne eigentliche Talebene und einem freien Mäanderlauf auf mehr oder weniger breiter Talebene, die von Seiten mit losem Material begrenzt wird. Auf der Uppsala-Ebene, die verhältnismässig reich an Mäandern ist, kann man verschiedene Arten und Zwischenformen studieren, doch selten die ganz reinen Typen. Der Jumkils-Fluss erinnert zumeist an den erstgenannten Typ. Er ist in die sehr gleichmässige Ebene eingesenkt und hat ein gewundenes Tal, dessen Breite bald um ein wenig bedeutender ist als der Fluss selbst, bald sich beträchtlich ausweitet. Charakteristisch sind die an den Mäander-Landzungen vorspringenden Sporne, die sich in gleichmässigem Abfall vom Niveau der Ebene an der Talseite zum Talgrund hinabsenken. Solche kommen regelmässig vor, auch wo die Talsohle breiter ist wie bei Librobäcken. Ihr Vorkommen ist bemerkenswert, da es zeigt, dass *eine Flussabwärtsgleitung des gesamten Mäander-systems kaum stattgefunden haben kann* ausser möglicherweise in Einzelfällen. Bei Librobäcken ist das Tal an mehreren Stellen hinreichend breit für eine relativ freie Entwicklung von Mäandern. Wo der Bach sich durch die feinen Sedimente zu einer blockhaltigen Moräne hinab eingeschnitten hat, dürfte sich jedoch der Prozess verzögert haben. Gleichartige Verhältnisse gelten für mehrere andere Bäche auf der Uppsala-Ebene, z. B. für die Zuflüsse von Jumkils- und Funbo-Fluss. Der Verfasser hat ähnlich geartete Verhältnisse auch in Ost-Värmland, in Södermanland, in Västergötland und in Medelpad beobachtet, weshalb diese als Charakteristik für den grösseren Teil der schwedischen Mäanderläufe bei kleineren Flüssen in Betracht kommen dürften.

Länge und allgemeiner Charakter der Mäanderläufe. — Die mäandernden Strecken in schwedischen Flüssen sind in der Regel kurz und meist nur wenige Kilometer lang. In ganz Norrland gibt es nur drei Flüsse mit einer zusammenhängenden Mäanderstrecke von über 20 km. In Mittel- und Südschweden sind längere Abschnitte etwas häufiger. Wie erwähnt besitzt der Klarälv den längsten und am meisten imponierenden Mäanderlauf des Landes mit 65 km. In Skåne weisen Kävlinge- und Rönne-Fluss relativ lange mäandernde Strecken auf, in Småland gibt es zwei im Flussystem des Lagan, und in

Västergötland kommt eine im System des Viskan vor. Viele Flüsse haben zahlreiche Unterbrechungen in ihren Mäanderläufen; so weist der Fluss Tidan 7 verschiedene Mäanderstrecken auf, abgesehen von den Nebenflüssen. Unter anderem bildet das Vorkommen von Seen einen häufigen Anlass zur Unterbrechung.

Die schwedischen Mäanderläufe machen oft einen unreifen, unfreien Eindruck. Nur in selteneren Fällen entwickelt sich der Mäandergürtel zu seiner vollen natürlichen Breite über längere Strecken hinweg. *Ein kennzeichnender Zug ist auch, dass in der Regel nur die kleineren Flüsse mäandern. Keiner der grossen Flüsse des Landes* (mit mindestens 100 m³/sec Mittelwasser) *ausser dem Klarälv besitzt Mäanderlauf.*

Gebietsmässige Verteilung der Mäander. — In keinem grösseren Teil des Landes fehlen mäandernde Flüsse, aber diese sind deshalb keineswegs gleichförmig über seine Fläche verteilt. Wie Taf. I zeigt, sind sie am häufigsten innerhalb eines Gürtels von ungefähr 75 km Breite längs der Küste in Ångermanland—Västerbotten. Die meisten — doch weit entfernt alle — Bäche oder Flüsse in diesem Gebiet mäandern kürzere oder längere Strecken. Ein anderes solches Gebiet ist Skåne, welche Landschaft sich durch relativ lange Mäanderstrecken in ost-westlicher Richtung kennzeichnet. Ein drittes Gebiet ist die Västgöta-Ebene südlich und südwestlich des Sees Vänern. Einige andere mäanderreiche Gebiete — obwohl weniger ausgeprägt als die vorhergehenden — finden sich teils auf der Nordseite der grossen mittelschwedischen Seen, teils in Nord-Värmland und teils in West-Småland.

Arm an Mäandern ist vor allem Inner-Norrland. Landeinwärts des ebenerwähnten mäanderreichen Gebietes längs der Küste liegt also ein grosses Gebiet, das in fraglicher Beziehung seinen Gegensatz darstellt. Es umfasst den grösseren Teil der umfangreichen inneren Moränenlandschaft, die im grossen gesehen eben, doch im Einzelnen kleinhügelig oder in Plateaus aufgerautet, waldbedeckt und reich an Sümpfen ist, und umschliesst ferner die Fjällregion bis zur norwegischen Grenze. Grosses Gebiete von mehreren Hundert km² Oberfläche weisen kein Zeichen der Mäanderbildung auf. Diese Gegenden liegen meist unterhalb der Region der grossen Seen. — Wie früher erwähnt, ist das Kartenmaterial für diese Gebiete ein anderes als betreffs des übrigen Schweden, und es liesse sich annehmen, dass die Karten im Maßstab 1:200 000 Mäanderbildung nicht mit der gleichen Zuverlässigkeit wie die übrigen Karten verzeichnen. Dass der Kartenmaßstab nicht den Ausschlag gibt, geht indessen daraus hervor, dass die Grenze zwischen Karten in verschiedenem Maßstab *nicht* die Grenze zwischen mäanderarmen und mäanderreichen Gebieten ist. Der Teil von Jämtland, für den es Karten 1:100 000 gibt, ist nicht reicher an Mäandern als die Gegenden in Norden und Süden. Auch im Küstenland lässt sich keine Übereinstimmung nachweisen. Der Einfluss des Kartenmaßstabs kann deshalb nicht gross sein. Auch wenn ein geringerer Grad an Genauigkeit die dünn bevölkerten Gegenden des Innern gegenüber den besiedelten Gebieten kennzeichnen mag, muss doch der Mangel an Mäandern im Innern Norrlands als eine Erscheinung von tatsächlichem Werte angesehen werden. Auch in Süd- und Mittelschweden finden sich gewisse Gebiete mit einem auffallenden Mangel an mäandernden Flussläufen: hierin zählt

ein grosses Gebiet in Südost-Småland um die Seen Möckeln, Åsnen und Rottnen, ein zweites umfasst Süd-Östergötland und Nord-Småland, ein drittes West-Södermanland und Ost-Närke südlich des Hjälmar-Sees, ein vierthes die Gegenden um den Dalälvd unterhalb von Domnarvet und umschliesst Teile von Dalarna, Västmanland, Gästrikland und Uppland.

Das Mäandern in Bezug auf verschiedene Faktoren.

Die obenerwähnte Verteilung der Mäandervorkommen steht in ziemlich deutlicher Verbindung mit gewissen naturgegebenen Bedingungen. Teilweise lassen sich jedoch diese Beziehungen erst bei einem direkten Studium der topographischen Kartenblätter erkennen: sie konnten nicht immer auf Taf. I infolge des kleinen Masstabs zum Ausdruck kommen.

Die Einwirkung der Topographie. — Es ist eine bekannte Sache, dass Mäandern nur bei Flüssen der Ebenen mit geringem Gefälle vorkommt. Flüsse mit steilem Lauf haben gewiss oft Krümmungen, doch mäandern sie nicht regelmässig. Wie aus dem vorstehenden und Taf. I hervorgeht, spiegelt sich die Topographie in gewissem Masse in der Verbreitung der Mäander wider. Die Fjällgegenden sind nicht besonders reich an mäandernden Flüssen, wohingegen die drei Gebiete mit der grössten Mäanderhäufigkeit alle auf Ebenen liegen: der norrländische Küstenstreifen mit seiner Fortsetzung in die Flusstäler hinein, Skåne und Västergötland.

Die Übereinstimmung zwischen Mäanderfrequenz und topographischer Ebenheit ist jedoch weit entfernt von Vollständigkeit. Grosse Gebiete mit ausgeprägtem Rumpfflächencharakter haben relativ wenige und kurze mäandernde Flusstrecken, wie das småländische Seengebiet, Närke, Nord-Uppland und übrige Gebiete um den unteren Dalälvd, Gotland und Teile von Inner-Norrland. Auch wenn man von diesen Gebieten die ausscheidet, die oberhalb der höchsten marinischen Grenze gelegen sind — d. h. das erst- und letztdenominante, so ist es offensichtlich, dass die Gebiete der Lehmebenen eine sehr verschiedene Mäanderfrequenz aufweisen. Als Gesamtheit betrachtet ist diese doch grösster auf den Ebenen unterhalb der marinischen Grenze als oberhalb von dieser. Ausser der schwachen Neigung und dem auch in Einzelheiten sehr ebenmässigen Terrain ist ebenfalls ein anderer Faktor von Bedeutung, nämlich die Zahl der Seen. Diese ist ziemlich gering auf gewissen Ebenen, wo die Sedimentation stark war.

Die Einwirkung der Seen. — Zwischen der Häufigkeit der Seen und der Frequenz des Mäanderns besteht ein ziemlich intimer, doch bisher nicht beachteter Zusammenhang. *Wo Seen häufig sind, ist Mäandern selten, oft auch umgekehrt.* Dies geht aus einem Vergleich zwischen Taf. I und den topographischen Karten oder Karten über Seen hervor, beispielsweise aus der durch Thunmark (1937) über Süd-Schweden herausgegebenen. Arm an Seen sind Skåne, die Ebenen in Västergötland, Östergötland, Närke, Süd-Västmanland und grosse Teile des norrländischen Küstenlandes, vor allem in Västerbotten. In diesen Gebieten ist Mäandern ein mehr oder minder häufiges Phänomen; u. a. sind ja hier die in dieser Hinsicht besonders hervortretenden Teile des Landes

einbegriffen. Im grossen gesehen ist der fragliche Zusammenhang ungemein auffallend. Erst eine genauere Prüfung zeigt geringere Abweichungen, indem z. B. Halland, Öland, Gotland und Süd-Värmeland arm an Seen sind, während gleichwohl die Flüsse einen relativ geraden oder in unregelmässiger Weise gekrümmten Lauf besitzen. Dies ist anscheinend besonders in Kalkgebieten der Fall, wo eine Schicht quartärer Ablagerungen von grösserer Mächtigkeit fehlt. Aber auch in gewissen anderen Fällen herrscht das

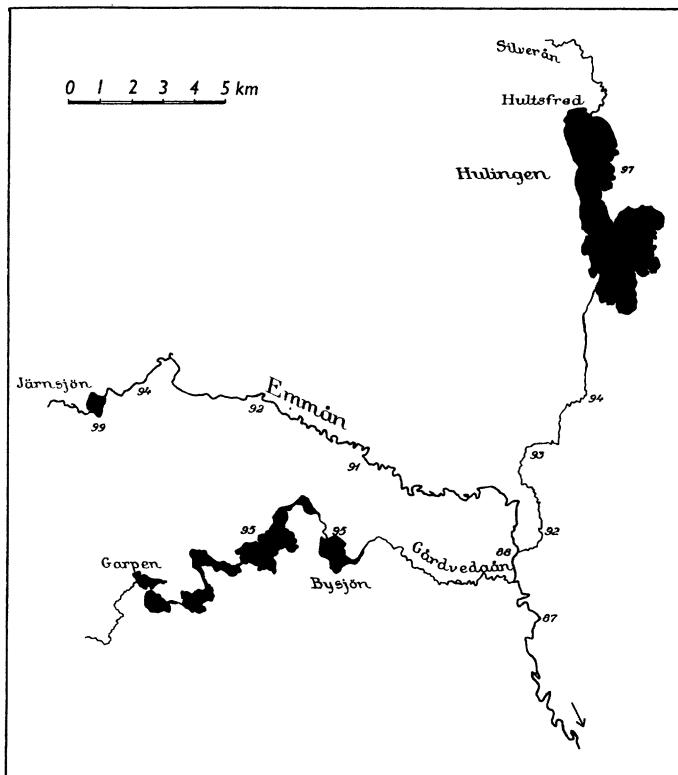


Fig. 1. Der Lauf von Emmån und einige seiner Nebenflüsse nach dem topographischen Kartenblatt Nr. 27 Nydala im Maßstab 1:100 000. Man beachte, dass die Flüsse oberhalb der Seen mäandern, doch unterhalb erst nach einer längeren oder kürzeren Strecke.

gleiche Verhalten, wie sich aus den aufgezählten Beispielen ergibt. Hier müssen also weitere Faktoren eingewirkt haben.

Der Einfluss der Seen auf das Mäandern macht sich auf zwei Weisen geltend. Für das erste setzt der See durch seine blosse Existenz das freie Verlaufen des Flusses herab. Wenn ein Tal von einer Reihe mehr oder weniger zusammenhängender Seen eingenommen wird, ist für einen freien Mäanderlauf wenig Platz vorhanden. — Für das zweite besteht die Herabsetzung des Mäanderns durch Seen darin, dass *ein Fluss bei seinem Abfluss aus einem See nicht mäandert*. Erst nach 1—3 km pflegt das Mäandern von neuem zu beginnen.

Figur 1 zeigt typische Beispiele für das Verhalten von mäandernden Flüssen beim Passieren durch Seen. Sowohl Emmån wie seine Nebenflüsse mäandern sehr typisch und markant vor ihrer Einmündung in die Seen, wo sie nicht unbedeutende Deltabildungen verursachen. Bei ihrem Ausfluss haben sie indessen eine bedeutende Strecke lang einen beinahe geraden Lauf, ehe sie wieder mit dem Mäandern beginnen. Der Emmån hat ein relativ starkes Gefälle mit zahlreichen Schnellen in seinem oberen Lauf. Gleich oberhalb des kleinen Sees Järnsjön ist jedoch der Lauf ruhig, und Mäandern tritt auf. Unterhalb dieses Sees ist die Strömung rascher, und es finden sich beträchtliche Fälle während der nächsten zwei Kilometer, doch beginnt das Mäandern nicht eher als nach 6—7 km. Der nördliche Nebenfluss mäandert oberhalb der Einmündung in den See Hulingen, doch erst wieder etwa drei Kilometer unterhalb desselben. Ebenso bildet der Gårdvedaån oberhalb der durch den See Garpen eingeleiteten Serie von Seen und erst nach zwei Kilometern unterhalb des Sees Bysjön Mäander. — Die mäanderfreie Strecke des Wasserlaufs umfasst also den See und teils ein Stück unterhalb desselben. Es ist deshalb völlig natürlich, dass seenreiche Gebiete relativ mäanderfrei werden.

Weitere Beispiele treten beinahe überall auf, wo ein mäandernder Fluss in einen See mündet. Taf. 1 zeigt zwei solche Exempel vom Flussystem des Lagan. Der Hauptfluss mäandert ungemein markant auf einem langen Weg oberhalb des Sees Vidöstern, doch erst 30 km unterhalb des Ausflusses aus diesem See findet sich erst wieder eine Andeutung von Mäandern auf zwei kurzen Strecken. Der Zufluss Storån besitzt auf einem Weg, der dem mehrfachen von 10 km entspricht, vor seiner Einmündung in den See Bolmen einen sehr ausgeprägten Mäanderlauf, während dagegen der Bolmån, der über mehrere kleinere Seen das Wasser zum Lagan ableitet, ohne deutlichen Mäandercharakter ist. — Der kleine Suseån mäandert oberhalb, doch nicht unterhalb des Sees Eftesjön (Blatt 18 Warberg). Der Storån, der von Norden in den See Lyngern mündet, mäandert sehr kräftig, aber nicht Rolfsån, der den Ablauf des Seensystems ausmacht. Die beiden Arme des ebengenannten Storån, Nolån und Sörån, zeigen genau gleichartige Erscheinungen bei den durchflossenen Seen. Ein gutes Beispiel bietet das Flussystem um den See Hugn bei Köle in Värmland. Hier haben die Zuflüsse schöne Mäanderläufe, doch nicht der Abfluss.

Flüsse mäandern in ihrem oberen Lauf nur selten auf andere Weise als innerhalb sehr ebener Landflächen. Das Mäandern beginnt jedoch in der Regel nicht beim Ausfluss aus einem See, auch wenn das Gefälle gering sein sollte und die Verhältnisse im übrigen günstig erscheinen. Der Nissan südlich des Gusjön bildet ein Beispiel hierfür.

Die hier oben angeführten Exempel über das Verhalten des Mäanders bei Seen liessen sich stark vervielfachen. Es ist jedoch auch zu erwähnen, dass Ausnahmen vorkommen, indem in einigen Fällen ein mehr oder weniger deutliches Mäandern bereits beim Abfluss aus einem See beginnt. Der Verfasser hat beim Überlesen der Karten 12 solche Fälle notiert. Von diesen liegen 10 in Gebieten, über die geologische Karten existieren. Bei einer Prüfung wurde gefunden, dass fünf dieser Beispiele für Ausflussmäandern auf Torfboden gelegen waren (Kärrestadsån unterhalb der Linnebörke- und Skär-Seen auf topogr. Kartenblatt 21 Lenhovda, Nötån unterhalb der Seen St. Saden

und Sandsjön auf dem gleichen Kartenblatt, Emmån unterhalb des Sees Nömmen auf Blatt 27 Nydala, Lyckebyån unterhalb des Bockabosjön auf Blatt 16 Lessebo sowie Vindån unterhalb des Sees Vindomen auf Blatt 46 Valdemarsvik). Von den übrigen fliesst einer eine kurze Strecke über versumpfte Moräne und sonst über Torfboden (Wästerån südlich des Lagmanshaga-Sees auf Kartenblatt 26 Nissafors); dieser besitzt also Ähnlichkeit mit den erstgenannten.

Die vier restlichen haben hingegen ihre häufig sehr kurzen Mäanderstrecken innerhalb von Feinsand (Mosand). (Hierhin zählen Säveån unterhalb des Sees Aspen bei Jonsered auf Kartenblatt 33 Borås sowie Viskan unterhalb von Öresjön gleich nördlich von Borås auf dem gleichen Kartenblatt, siehe Fig. 2, ferner Storån südlich der Seen Flaten und Långsjön auf Blatt 26 Nissafors und der Huskvarnaån südlich des Ramsjön auf Blatt 35 Jönköping.) Auf gleiche Weise verhält es sich anscheinend in einigen Fällen, wo das geologische Kartenblatt fehlt (Rottnaälv zwischen den Seen Rottnen und Fryken auf Blatt 79 Charlottenberg sowie Hunan unterhalb des Busjön auf Blatt 95 Malung). *Es scheint demnach, als ob die seltenen Fälle des Mäanderns unmittelbar unterhalb von Seen an Torf oder feinen Sand gebunden seien.*

Taf. 1 weist noch ein solches Beispiel auf, nämlich den Rönneå, der beim Ausfluss aus dem See Ringsjön durch Rönneholms mosse (Moor) fliesst und hierbei einige mäanderähnliche Windungen aufweist.

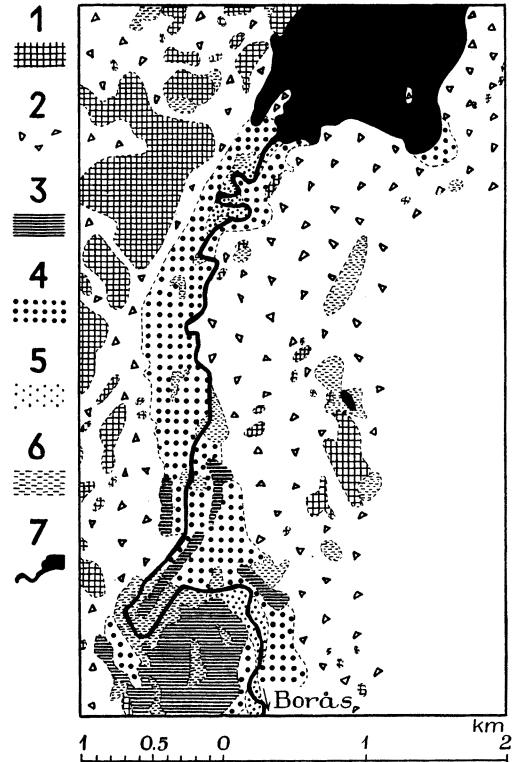


Fig. 2. Ausfluss des Viskan aus Öresjön nach dem geologischen Kartenblatt 28 Borås im Massstab 1:50 000. 1 = Grundgebirge, 2 = Moräne, 3 = Osmaterial, 4 = Mosand, 5 = alluvialer Sand, 6 = Torfdy, 7 = Fluss und See.

Der Einfluss der losen Bodenschichten. — Die obenerwähnte Beobachtung, dass Mäander sogar beim Ausfluss aus Seen vorkommen kann, falls die Bodenart gewissen Typen angehört, deutet darauf hin, dass die Mäanderbildung in verschiedenen Bodenarten Unterschiede aufweist. Eine statistische Aufstellung über die Mäanderhäufigkeit in Beziehung zu verschiedenen Bodenarten könnte vielleicht Aufschlüsse von Interesse vermitteln. In Ermangelung einer solchen Untersuchung können indessen gewisse Schlussfolgerungen aus Taf. 1 und den geologischen Kartenblättern gezogen werden.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Mäandern und den spät- oder postglazialen

Feinsedimenten kann nicht nachgewiesen werden, denn die höchste marine Grenze bildet auf Taf. 1 keine Scheidelinie. Mäandern ist in Värmland und Dalarna oberhalb der M. G. ebenso häufig wie in Uppland oder dem Küstenland Südschwedens. Die drei am stärksten hervortretenden Mäandergebiete liegen indessen alle unter genannter Grenze.

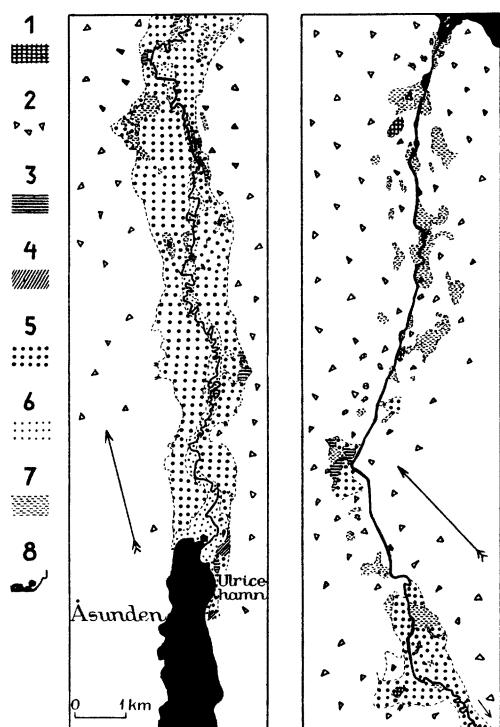


Fig. 3. Lauf des Åtran ober- und unterhalb des Sees Åsunden nach den geologischen Kartenblättern 21 Ulricehamn und 33 Svenljunga im Massstab 1:50 000. 1 = Grundgebirge, 2 = Moräne, 3 = Osmaterial, 4 = Bänderton, 5 = Mosand, 6 = alluvialer Sand, 7 = Torfdy, 8 = Fluss und See.

ist der Lauf des Flusses sehr stark mäandernd. Der Ausfluss des Åtran geschieht nicht durch die seen- und sumpfreiche Senke über Wassgården, in der der Os verläuft, sondern längs des nördlicheren Teils über Hillared, wobei der Åtran über Moräne fliesst. Er ist hier ohne Mäander; nur beim Überqueren von Torfboden nimmt er einen mehr oder weniger gewundenen Lauf an. Erst sobald er wieder in den Mosand hineingelangt, tritt Mäandern auf einigen kürzeren Strecken ein.

Die Einwirkung der Landhebung. Da ein geringes Gefälle einer der wichtigsten Faktoren für die Mäanderbildung ist, lässt sich erwarten, dass dieses von den durch die Landhebung bewirkten Veränderungen in der Neigung beeinflusst worden sein kann.

Eine Prüfung der geologischen Karten ohne statistische Berechnungen ergibt, dass *Mäandern viel häufiger bei Flüssen vorkommt, die ein Bett von Sand oder Lehm haben, als bei solchen in Moräne*. Dies dürfte zum grossen Teil darauf beruhen, dass das Gefälle bei Flüssen auf Lehmebenen und Sandfeldern in der Regel gering ist, während die Moränengebiete sowohl im grossen als im einzelnen uneben sein können. In den grossen Gebieten mit glazifluvialem Feinsand — später häufig mehr oder weniger durch Meeres- oder Binnenseewellen-Tätigkeit bearbeitet — haben oft die Flüsse ausgeprägte Mäanderläufe. So ist auch häufig der Fall bei den Sandfeldern in der Nähe der Oser.

Ein schönes Beispiel für mehrere der oben analysierten Faktoren bildet der Fluss Åtran ober- und unterhalb des Sees Åsunden (geologische Kartenblätter 21 Ulricehamn und 33 Svenljunga), Fig. 3. Sein Lauf oberhalb dieses Sees zieht sich in einem Tal hin, das zum grossen Teil durch Mosand — wahrscheinlich in genetischem Anschluss an verstreuete Partien von Geröllkies — und Schwemmsand um den Fluss selbst gefüllt ist. In diesem Bett

ist der Lauf des Flusses sehr stark mäandernd.

Eine derartige Einwirkung ist auch in ziemlich hohem Grad zu bemerken, doch vielleicht nicht auf die Weise, wie man zunächst erwartet hätte.

Die Landhebung hat das Gefälle bei den Flüssen verstärkt, deren oberer Lauf im Vergleich zum unteren gehoben wurde, und es verringert, falls der untere Teil des Flusses im Vergleich zum oberen erhöht wurde. Das Gefälle ist konstant geblieben bei einer gleichen Einwirkung der Landhebung auf den gesamten Lauf. Das letztere tritt ein, wenn die Richtung des Flusses mit der der Isobasen übereinstimmt. Auf Taf. I wurde das Isobasensystem nach der letzterschienenen Darstellung (Magnusson-Granlund, 1936) eingetragen und auf Fig. 4 an Hand dieses Systems veranschaulicht, wo das Gefälle bei den grösseren Flüssen verstärkt bzw. verringert wurde oder konstant geblieben ist. Über Inner-Norrland wurde keine Bezeichnung eingetragen, da die Kenntnis von der dortigen Landhebung noch unsicher ist.

Es ist von Interesse, die ebengenannte Karte mit der Mäanderkarte, Taf. I, zu vergleichen. Eigentlich sollte das Mäandern in den Gebieten selten vorkommen, wo das Gefälle der Flüsse verstärkt wurde, und grösser dort sein, wo es verringert wurde oder konstant geblieben ist. Das Beruhen der Mäanderfrequenz auf diesem Faktor ist deutlich relativ locker, denn in Gegenden mit Gefäll-Erhöhung ist keineswegs ein Fehlen oder eine besondere Seltenheit an Mäandern festzustellen. Der Verfasser erwartete bei der Anfertigung von Taf. I zu finden, dass Nebenflüsse, die ungefähr in der Richtung der Isobasen auf den Hauptfluss zufließen, Mäander aufweisen würden, dagegen nicht die Hauptflüsse. So ist jedoch nicht der Fall. Die Karte zeigt, dass z. B. die Flüsse, die vom Südschwedischen Hochland nach der Westküste Schwedens hinabfliessen, nicht selten mäandern trotz der Erhöhung ihres Quellgebietes im Vergleich zum Unterlauf. Ebenso lässt sich kein hervortretendes Mäandern bei Flüssen mit anderer Richtung bemerken. Eine statistische Berechnung wurde jedoch nicht gemacht.

Bis zu einem gewissen Grad lässt sich indessen ein Zusammenhang wahrnehmen; *sämtliche Gebiete mit bemerkenswert hoher Mäanderfrequenz kennzeichnen sich durch ein Gefälle, das durch die Landhebung verringert wurde oder konstant geblieben ist:* das norrländische Küstenland (Ångermanland und Västerbotten), die Västgöta-Ebene und Skåne. Eine Übereinstimmung besteht auch darin, dass die lehmüberdeckten Flachländer nördlich der Seen Mälaren und Vänern keine bemerkenswert grosse Häufigkeit an mäandernden Strecken bei ihren Flüssen aufweisen. Wie erwähnt, ist der Klarälv der einzige unter den grossen Flüssen Schwedens, der mäandert. Es ist darauf hinzuweisen, dass diese längste Mäanderstrecke Schwedens sich auf dem Teil des Laufes befindet, der keine grössere Gefäll-Erhöhung erlitten hat, wie es bei dem unteren, mäanderfreien Teil des Flusses der Fall ist. Aber da viele andere der grossen Flüsse, z. B. der Dalälv, eine Verminderung ihres Gefälles erfahren haben ohne zu mäandern, müssen weitere günstige Faktoren beim Klarälv hinzutreten. Wahrscheinlich hängen diese zusammen mit der Eigenschaft dieses relativ breiten Spaltentals als früherem Boden eines spätglazialen Meeresarms mit reichlicher Sedimentation von feinem Sand.

Wir sehen also, dass wenn auch die Einwirkung der Landhebung nicht immer im Détail zu erkennen ist, doch im grossen gesehen eine Übereinstimmung vorhanden ist.

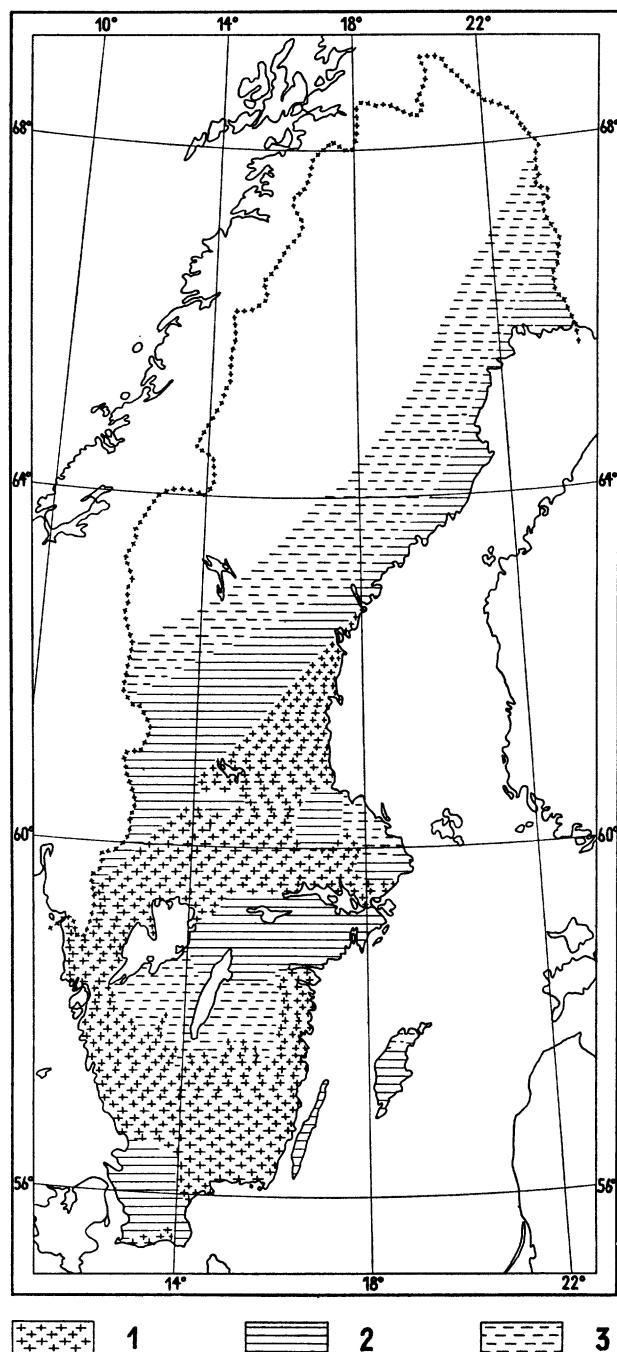


Fig. 4. Karte über die Einwirkung der Landhebung auf den Gradienten der grösseren Flüsse in Schweden. 1 = der Gradient hat zugenommen, 2 = der Gradient ist annäherungsweise konstant geblieben, 3 = der Gradient hat abgenommen.

In einer anderen Hinsicht ist jedoch die Einwirkung der Landhebung direkt auf der Mäanderkarte ablesbar; hierbei ist der Lauf der Flüsse nahe der Mündung an der Küste aufschlussreich. Im südlichsten Schweden kommt Mäandern bis zur Küstenlinie vor, doch hört es in Nord-Schweden ein Stück davon entfernt auf, so dass eine mäanderfreie Küstenzone entsteht. Siehe Taf. I. Der Unterschied der Gezeiten beträgt an der Westküste nur ungefähr 20 cm und an der Ostküste 2 cm, ist also in beiden Fällen viel zu gering, um eine Einwirkung auf den Lauf der Flüsse zu haben. Das Fehlen von Mäandern gleich oberhalb der Mündung dürfte völlig der Landhebung zuzuschreiben sein und darauf beruhen, dass — da die Mäanderbildung ein so langsamer Prozess ist — sie mit dem Landzuwachs nicht gleichen Schritt zu halten vermochte. Die Flüsse haben ganz einfach noch nicht Mäander bilden können, als nach und nach die Mündung nach aussen verschoben wurde.

Untersucht man die Mäanderkarte genauer, lassen sich u. a. folgende Beobachtungen bezüglich des Mäanders an der Küste machen. So gehen in Skåne, Halland, Blekinge und Småland die Mäanderwindungen im allgemeinen bis zur Küstenlinie selbst hinunter. Vereinzelt wird sie auch in Östergötland, Södermanland und sogar Uppland erreicht. Von Gästrikland ab nordwärts ist dem nicht mehr der Fall, hier *gibt es eine mäanderfreie Küstenzone*, deren Breite jedoch sehr stark wechselt. Sie kann sich 20 bis 30 km ins Land hinein erstrecken, doch beträgt sie mitunter nur wenig über einen Kilometer. In einigen Ausnahmefällen reicht die Mäanderbildung bis zur Küste, so bei Gnarpån und ein paar kleineren Flüssen in Nord-Hälsingland gleich nördlich des 62. Breitengrades, und in einigen anderen solchen Fällen kommt sie der Küste sehr nahe, so hinsichtlich Lögdeå, Moälven, Ljustorpsån. Dies ist jedoch selten. In Nord-Bohuslän existiert ein ähnlicher Gürtel in der Nähe der Küste, doch erreichen die Mäanderwindungen in einigen Fällen die Küste, z. B. mehrfach zwischen Göteborg und Lysekil.

An der südlichen Grenze des mäanderfreien Gürtels in Gästrikland beträgt die Landhebung ungefähr 0,6 m pro 100 Jahre (Bergsten, 1930). *Die Mäanderbildung kann also anscheinend gleichen Schritt mit der Landhebung halten, falls diese geringer als 0,6 m pro 100 Jahre ist, bleibt jedoch in der Entwicklung zurück, sobald die Landhebung grösser ist.* Wenn man annimmt, dass das Gefälle auf den zunächst der Küste gelegenen Strecken der mäandernden Flüsse 1 m pro km ist, was ein angemessener Wert zu sein scheint, so bedeutet dies, dass die Flüsse auf einer Strecke von nur 0,6 km pro 100 Jahren zur Neubildung von Mäandern imstande sind.

Das Mäandern erweist sich auf Taf. I als ein so überraschend sicherer Indikator für Niveauveränderungen, dass es sogar *die Überkipfung unserer Binnenseen zu registrieren vermag*, die eine Folge der ungleichartigen Niveauveränderung ist. Beim Studieren der Zuflüsse von Väner- und Vätter-See auf Taf. I findet man, dass sie das Südufer mit Mäandern erreichen, doch dass die nördlichen Zuflüsse ein Stück vom Ufer entfernt mit dem Mäandern aufhören. Die Landhebung ist am Nordende dieser Seen ungefähr 40 Meter grösser als am Südende gewesen. Da der Ablauf des Vänern am südlichen Ende des Sees gelegen ist, hat am Nordufer nach der Isolierung des Sees vom Meere eine Trockenlegung stattgefunden. Eine entsprechende relative Hebung ist im Süden, wo der Gradient der Flüsse durch die Landhebung abnimmt, nicht eingetreten. Hierdurch

wurde die Mäanderbildung begünstigt. Der Abfluss des Vättern liegt bei Motala, weshalb am Südufer Landgebiete vom See eingenommen werden, während gleichzeitig am Nordende neues Land freigelegt wird. Hieraus ergibt sich die erwähnte Verschiedenheit im Mäandern der Zuflüsse. In den kleineren Seen war die Überkippung nicht hinreichend gross genug, um einen ebenso deutlichen Effekt dieser Art zu bewirken. Indessen ist möglicherweise auch bei zahlreichen kleineren Seen eine Andeutung hierzu spürbar, dadurch dass in unmittelbarer Nähe der Einmündung am Nordende eines Sees das Mäandern schwächer oder weniger ausgeprägt wird. Vielleicht dürfen die Mäander des Ätran bei der Einmündung in den See Åsunden auf Fig. 3 als eine Wirkung dieser Art gedeutet werden. Wie die Figur zeigt, ändert sich die Grösse der Mäanderbögen während des letzten Kilometres oberhalb des Sees; die Windungen erhalten nicht die gleiche energische Ausformung wie weiter flussaufwärts.

Eine Methode zur Feststellung verschiedenartiger Niveauveränderung. — Es will nicht unberechtigt erscheinen, sich an Beobachtungen über das Mäandern bei Flüssen zu bedienen, die in grössere Seen einmünden, um hieraus Schlüsse über etwaige verschiedenartige Niveauveränderungen zu ziehen. Wenn sich ein mäanderfreier Gürtel längs einer Seite eines Sees findet, während die auf der anderen Seite mündenden Flüsse bis zum Seeufer einen mäandernden Lauf besitzen, dürfte dies ein Anzeichen für die Hebung der ersten Seite im Vergleich zur letzteren sein. Bei der Anwendung der Methode auf Karten ist natürlich die grösste Vorsicht zu beachten, da die lokalen Verhältnisse das Ergebnis verrücken können; eine Voraussetzung ist u. a., dass Gefälle und Material des Flussbettes um den See herum einigermassen gleichartig sind. Eine andere besteht natürlich darin, dass Mäandern überhaupt vorkommt. Ein Mangel an dieser Erscheinung verhindert die Anwendung dieser Methode auf Inner-Norrländ, wo die Niveauveränderungen noch nicht sicher bekannt sind.

Zusammenfassung. — Die obenstehende Untersuchung über die Verbreitung der Mäander und ihre Beziehung zu gewissen Faktoren hat u. a. folgendes gezeigt:

1. In der Regel mäandern nur die kleineren Flüsse.
2. Das Gefälle ist anscheinend ein Faktor von vitaler Bedeutung.
3. Seenreiche Gebiete sind in der Regel arm an Mäandern.
4. Ein Fluss mäandert nicht beim Abfluss aus einem See. Bei den wenigen vorkommenden Ausnahmen von dieser Regel findet das Mäandern in Moorboden oder in Feinsand statt.
5. Das Mäandern ist viel häufiger bei Flüssen, die ein Bett aus Sand oder Lehm als ein solches aus Moräne haben.
6. Sämtliche Gebiete mit bemerkenswert hoher Mäanderfrequenz kennzeichnen sich dadurch, dass die Landhebung das Gefälle verringert oder konstant erhalten hat.
7. In Norrländ gibt es infolge der Landhebung eine mäanderfreie Küstenzone.
8. Die Bildung von Mäandern ist ein sehr langsamer Prozess.
9. Die Überkippung der grösseren Seen ist im verschiedenartigen Mäandern der Zuflüsse zu erkennen.

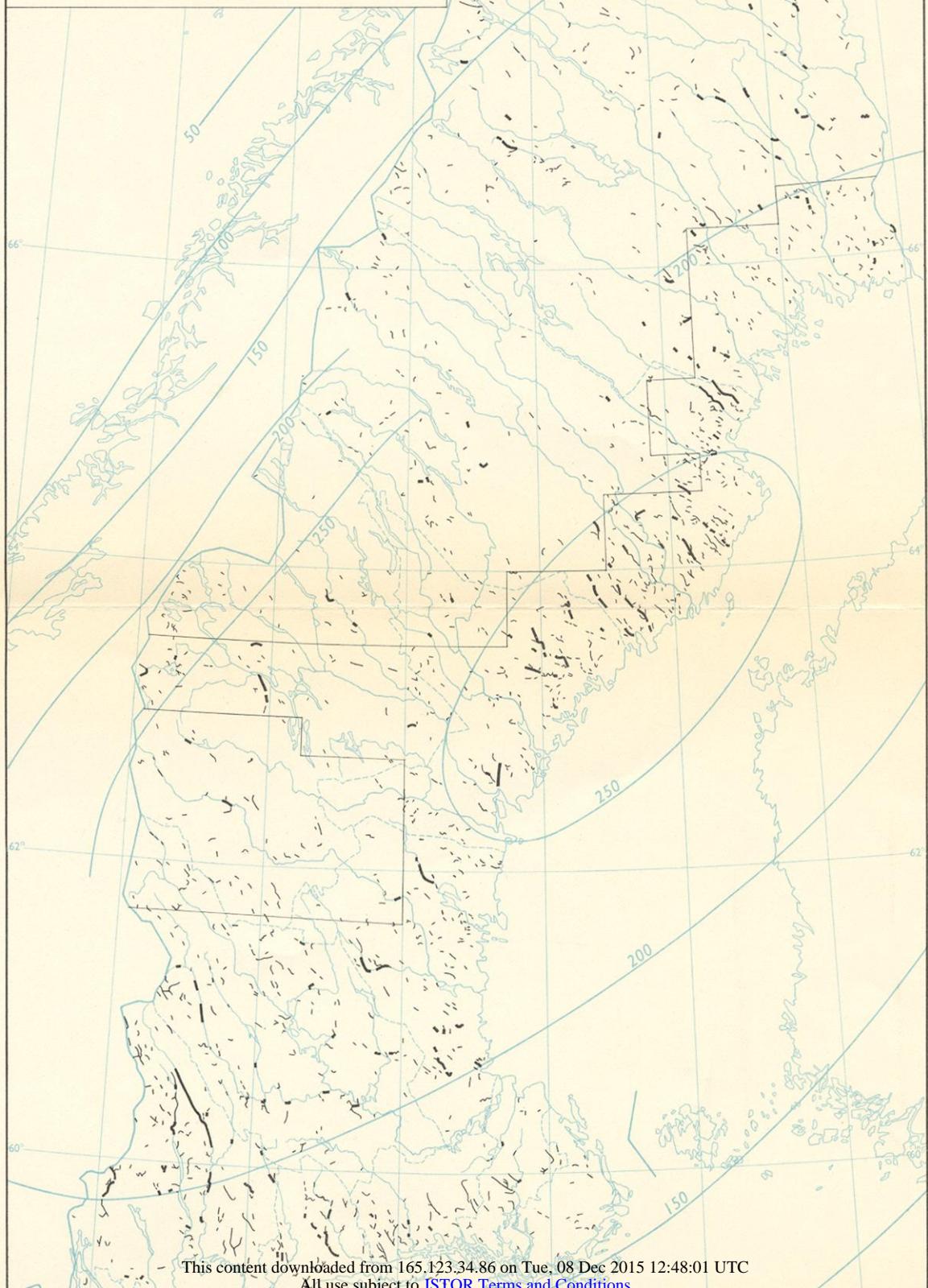
MÄANDERNDEN FLÜSSTRECKEN IN SCHWEDEN

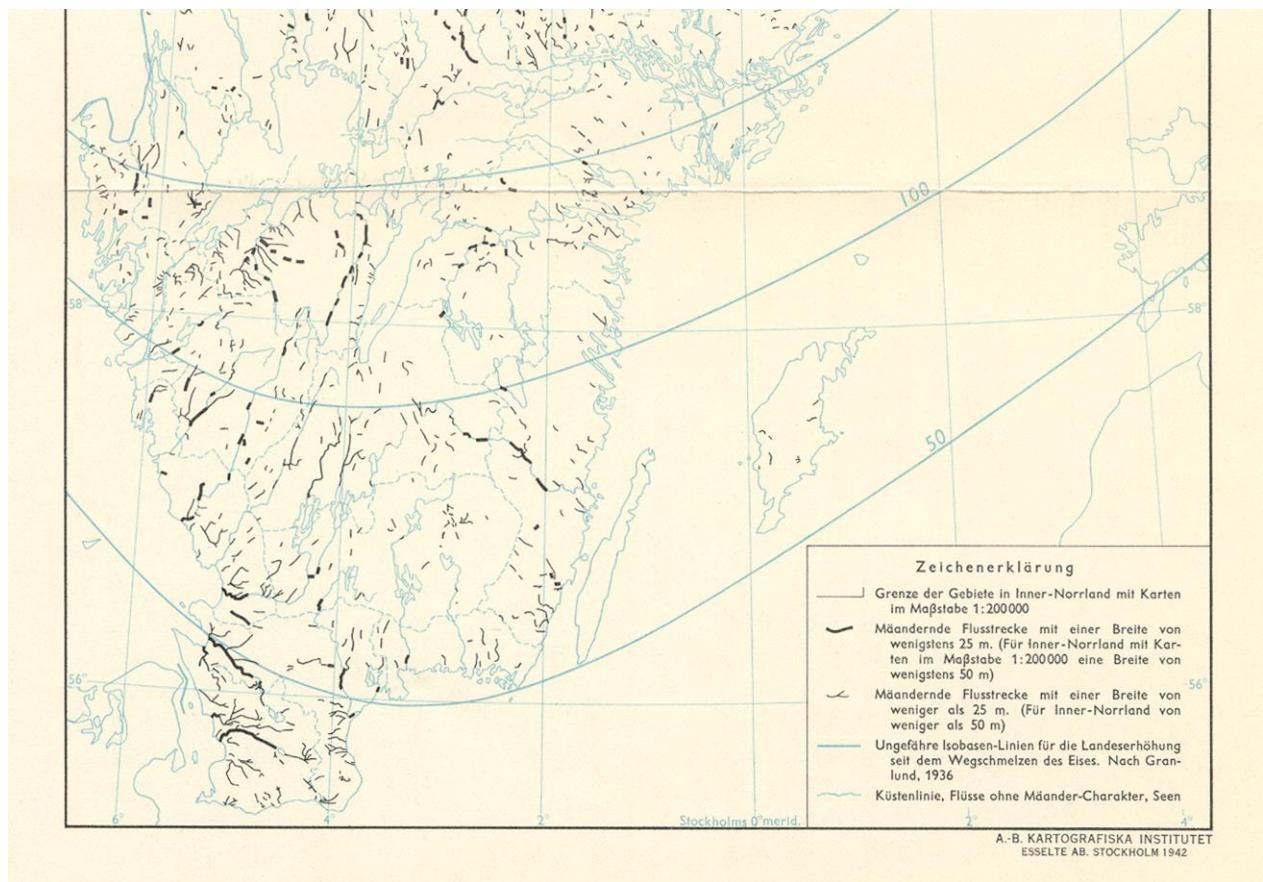
Nach den topographischen Karten in den
Maßstäben 1:100 000 (hauptsächlich) und in 1:200 000

von
FILIP HJULSTRÖM

Maßstab 1:4 500 000

0 50 100 150 km





II.

Zur Frage der Entstehung der freien Mäander.

Die Verbreitung des Mäanderphänomens über die gesamte Erdoberfläche, sein Auftreten in verschiedenen geologischen Formationen und in Flüssen von sehr unterschiedlichem Typ und Regime ist alles ein Zeichen dafür, dass die Ursache des Phänomens bei dem fliessenden Wasser selbst zu suchen ist. Die meisten Mäandertheorien gehen auch hiervon aus, doch machen sich auch andere Auffassungen geltend.

Die Erfüllung gewisser hydrodynamischer Bedingungen ist eine notwendige, doch keineswegs ausreichende Bedingung für die Entstehung von Mäandern. Es kommt häufig vor, dass von zwei Flüssen, die hinsichtlich Gefälle, Fliessgeschwindigkeit, Reibung und Regime einander gleichartig sind, nur der eine mäandert. Ausser der Strömung des Wassers muss auch das Flussbett und seine Zusammensetzung gewisse Bedingungen erfüllen. Wenn ein Fluss mäandern soll, hat ein gewisser Zustand im Verhältnis zwischen Erosion, Transport und Sedimentation aufzutreten.

Die Frage über die Bedingungen des freien Mäanders lässt sich deshalb in zwei Problemkomplexe teilen: einen hydro-dynamischen und einen morphologisch-dynamischen.

Fliessvorgänge als Bedingung der Mäanderbildung.

In den meisten Theorien über das Entstehen der Mäander tritt mehr oder weniger direkt die Strömung des Wassers als eine beitragende oder entscheidende Ursache auf.¹ Es will auch dem Verf. dieses Aufsatzes natürlich erscheinen, dass so der Fall ist.

Es gibt jedoch andere Mäandertheorien, die die Erklärung in irgendwelchen mechanischen Ablenkungen von aussen her suchen, z. B. in Terrainverhältnissen, verschiedenem Gesteinsuntergrund, Vegetation, Uferrutschungen, Schutt- und Schwemmkegeln, Sandbänken, Einmündung von Nebenflüssen, beständigen starken Winden. Oder auch sei das Mäandern durch eine Abrundung und Verebnung bestehender Windungen entstanden (Davis). Gegen beide diese Theorien erhebt sich ein bestimmter Grund auf eine entscheidende Weise: Das Mäandern findet nur bei geringem Gefälle statt. Falls die erwähnten äusseren mechanischen Hindernisse eine bestimmende Veranlassung des Mäanders bildeten, dürfte sich diese im oberen, schnellen Lauf der Flüsse am kräftigsten hervorheben, wo die eben aufgezählten Hindernisse in der Regel am zahlreichsten sind. Das Mäandern tritt dagegen wie erwähnt erst bei einem geringen Gefälle auf, also bei einem Fluss mit ausgeglichener Fliesskurve im unteren Teil des Laufes. Auch wenn man von der Theorie der existierenden Flusskrümmungen als Grund des Mäanders ausgeht, dürfte dies bei stärkerem Gefälle sehr bedeutend sein und auf jeden Fall nicht fehlen. Das Vorkommen von Windungen ist ja bei nicht mäandernden Flüssen auf dem steileren Teil des Laufes selten am geringsten; im Gegenteil ist es häufiger dort am

¹ Eine Zusammenstellung von Mäandertheorien findet sich z. B. bei Maull, 1938, und Kaufmann, 1929.

grössten. Diese Theorie vermag auch nicht zu erklären, weshalb eine gerade, z. B. kanalisierte Flusstrecke so oft Tendenzen aufzeigt, auf eine regelmässige Weise mit dem Mäandern zu beginnen. — Gegen die Theorie über äussere mechanische Hindernisse als ein Impuls, der bei fortgesetzter Reflexion gegen die Ufer Mäanderbildung veranlasst, spricht stark ein weiterer Grund. Ein derartiger Impuls wird in einem Fluss immer schnell gedämpft und verschwindet nach einer kurzen Strecke vollständig. In einem natürlichen Fluss konnten nirgendwo mit Sicherheit Mäanderwindungen gezeigt werden, die auf diese Weise hervorgerufen wurden. Bei Experimenten in Laboratorien (z. B. Exner, 1919) zeigte sich auch, wie das Mäandern schnell gedämpft wird und nur ein kurzes Stück nach dem Hindernis aufhört.

Die Ursache für das Mäandern ist nicht in Zufälligkeiten zu suchen, sondern muss ständig zugegen und ununterbrochen während des gesamten Mäanderns tätig sein. Derartige andauernde Erscheinungen lassen sich teils beim Fliessen des Wassers in seinem Bett und teils beim Transport des mitgeführten festen Materials denken. Das letztgenannte kann nicht allein ausschlaggebend sein, denn Transport kommt auch auf den steileren Flusstrecken vor, wo Mäander fehlen. Es bleibt demnach übrig, die Grundursache des Mäanderns und seine Antriebskraft im Fliessvorgange selbst zu suchen.

Die Strömung des Wassers. — Das wichtigste Kennzeichen der Bewegung des Flusswassers ist seine Turbulenz. Damit ist gemeint, dass der Fliessvorgang sich durch eine Mannigfaltigkeit verschiedener, durcheinander gemengter Bewegungen charakterisiert, die einen unruhigen, wirbelnden Eindruck machen. Das Stromlinienbild wechselt von Augenblick zu Augenblick, und die Stromfäden scheinen sich zu verflechten. Der Verfasser hat in anderem Zusammenhang eine Darstellung der Besonderheiten bei der Bewegung des Wassers zu geben versucht, die aus dem Gesichtspunkt der fluvalen Morphologie und des Materialtransportes von Interesse sein können (1935 und 1939). Da es zu weit führen würde, an dieser Stelle die Anschauungen in diesem Punkte zu referieren, hat hier ein Hinweis auf diese Arbeiten oder auf die hydrodynamische und technische Literatur über diese Probleme zu geschehen. Aus dieser Literatur geht hervor, dass viele wichtige Fragestellungen bezüglich der Strömung des Wassers noch unlösbar sind. Trotz der intensiven Forschung, beispielsweise über das wichtige Turbulenz-Problem, wurden bisher nur Ansätze zu dessen Lösung gemacht. Andere Probleme sind kaum in ihren Hauptzügen bekannt, z. B. die Sekundärströmungen. Hinsichtlich ihres Auftretens in natürlichen Flüssen wissen wir noch fast nichts, ein Umstand, der aus fraglichem Gesichtspunkt sehr beklagenswert ist. Vielleicht harren noch unbekannte Eigenschaften der Strömung in grossen natürlichen Flüssen ihrer Entdeckung.

Man kann deshalb noch kaum mit der Möglichkeit rechnen, eine erschöpfende Erklärung des Mäanderns zu erhalten. In dieser komplizierten Erscheinung ist sicher ein ganzer Komplex von Strömungs-Besonderheiten miteinander verschnürt. Es will jedoch die Benutzung einer praktisch anwendbaren Hilfsformel möglich erscheinen, die eine grobe Vorstellung über das Phänomen zu geben vermag. Es liegt nahe sich vorzustellen, dass alle Unregelmässigkeiten der turbulenten, anscheinend völlig ungeordneten Strö-

mung eine transversale Schwingung der Wasseroberfläche verursachen, welche dem Wasser stromabwärts mitfolgt und dabei allmählich ein regelmässiges Pendeln des gesamten strömenden Wassers hervorruft. Diese Erklärung ist wie erwähnt naheliegend und auch einmal vorgelegt worden, und zwar durch Exner (1919, 1921) in seinen älteren Arbeiten über das Mäander-Problem. Leider wird doch seine Darstellung mit einer falschen Analogie eingeleitet. Daher bereitete es auch W. M. Davis (1923, 1924) keine Schwierigkeiten, gewisse von Exners Behauptungen endgültig zu widerlegen. Die Theorie Exners erfuhr deshalb keinen Anschluss und ist anscheinend auch von ihm selbst aufgegeben, da er später mit neuen Theorien kam. Es ist jedoch hervorzuheben, dass die Kritik von Davis die falsche Analogie traf und nicht Exners Ausgangspunkt. Wenn im folgenden die Theorie über die Schwingungen der Wasseroberfläche als Ausgangspunkt benutzt wird, geschieht dies, da man — unter Berücksichtigung der Einwirkung der Turbulenz — eine gute Übereinstimmung mit den natürlichen Verhältnissen bekommt. Vor allem geschieht es jedoch deswegen, weil von diesem Ausgangspunkt ausgehend eine Theorie weitergebaut werden kann, die gewisse Züge im Vorkommen und in den Eigenschaften des Mäanderns erhellt. Hierbei hat man indessen sich andauernd hinzuzudenken, dass diese Querschwingungen als eine Zusammenfassung mehrerer komplizierter, teilweise sehr wenig bekannter Eigenschaften der Strömung des Wassers anzusehen sind. Es lässt sich auch denken, dass in der Zukunft Fälle entdeckt werden können, bei denen die eine oder andere dieser Eigenschaften in so hohem Grad über die anderen dominiert, dass das hier vorausgesetzte Zusammenwirken geändert wird. Eine erwünschte Vertiefung der gegenwärtigen Mäanderaufassung wird — wie man erwarten darf — dabei ermöglicht.

Die Theorie über die Querschwingungen der Wasseroberfläche. — Jede in der Hauptströmung des Flusses teilnehmende Wasserpartikel weist außer dieser auch eine individuelle Bewegung auf. Die letztere kann nach jeder beliebigen Seite hin gerichtet sein, auch wenn gewisse Richtungen vielleicht begünstigt sind. Diese Bewegungen können für die verschiedenen Wasserpartikeln von individueller Natur sein, doch erhält man bei der Beobachtung der Bewegung häufig den Eindruck, dass sie in gewissen Einheiten vor sich geht, die als Turbulenzkörper bezeichnet werden. Diese scheinen während eines kurzen Zeitabschnitts zu existieren und sich danach durch die Mischung mit umgebenden Wassermassen aufzulösen, worauf neue gebildet werden. Auf diese Weise setzt sich die Bewegung in stetigem Wechsel fort. Nähere Kenntnis über diese Turbulenzkörper besitzt man jedoch nicht. Es ist indessen die Tatsache zu beachten, dass innerhalb der sichtlich völlig unregelmässigen Bewegung verschiedene Teile der Flüssigkeit sich auf eine unterschiedliche Weise verhalten. Wirbel spielen in der Bewegung eine grosse Rolle. Ein Teil derselben röhrt von Unregelmässigkeiten auf dem Grunde oder an den Seiten her; sie haben sich hiervon abgelöst und sind mit der Strömung weitergewandert. Bei jedem derartigen Hindernis machen sich Wirbel wechselweise bald von der einen, bald von der anderen der beiden Aussenseiten des Hindernisses frei, so eine Wirbelstrasse bildend. Wirbel entstehen jedoch nicht nur an Hindernissen gegen die

Strömung, sondern auch durch die Bewegung selbst. Nicht einmal bei der Strömung in Rinnen mit glatten Flächen fehlen sie. In den Wirbeln geht ein Einsaugen des Wassers mit abwärtsgerichteter Bewegung vor sich, an anderen Punkten geschieht ein Aufwärtssteigen, und das Wasser brodelt gegen die Oberfläche auf. In solcher Weise werden viele Störungen an der Wasseroberfläche hervorgerufen.

Diese und andere Bewegungen im Wasser bringen die Wasseroberfläche auf die gleiche Weise in Schwankung, wie Störungen in ruhendem Wasser Seiches-Schwingungen bei ihm hervorzurufen vermögen. Derartige Schwingungen dürften auch durch solche äussere mechanische Einflüsse verursacht werden können, wie sie im vorhergehenden erwähnt wurden, z. B. durch Hindernisse an den Flussufern, Sandbänke usw. Einen wichtigen Einfluss dürften gleichfalls die zufälligen Krümmungen ausüben, die immer vor dem Mäanderstadium vorkommen, u. a. durch ihre Einwirkung auf die Schwingungsphase. Diese äusseren Einflüsse spielen jedoch wahrscheinlich im Vergleich mit den Ursachen eine untergeordnete Rolle, die das fliessende Wasser *in sich* infolge seiner eigenen Fliessvorgänge aufweist. Natürlich gleichen diese Einflüsse oder alle diese Störungen an der Wasseroberfläche einander zum Teil aus. Die Wahrscheinlichkeit einer vollständigen Ausgleichung ist jedoch äusserst gering. Andererseits ist die Wasseroberfläche immer empfindlich für Störungen und gerät leicht in Schwingung. Weiter ist die Ursache der Schwingung immer gegenwärtig und erneuert sich ständig auf dem Weg zur Mündung hinab. Sie kann bei der Strömung einer Wassermenge zufälligerweise aufhören zu wirken, doch lässt sich ein Ausbleiben während eines längeren Zeitabschnitts vernunftgemäß nicht voraussetzen.

Die Schwingung dürfte mit der helicoidalen Spiral- oder Sekundärströmung kombiniert sein, auf die zuerst J. Thomson und später A. Einstein und mehrere andere hingewiesen haben. Zuletzt wurde diese Strömung in Windungen in einer aus dem Karlsruher Laboratorium hervorgegangenen wertvollen Arbeit untersucht (Wittmann-Böss, 1938).

Die fragliche Schwingung muss nach Dimensionen, Breite und Tiefe des Wasserlaufs abgestimmt werden. Sie ist mit anderen Worten eine Seiches-Schwingung und besitzt die Schwingungszeit, die eine solche kennzeichnet. Doch gleichzeitig bewegt sich das Wasser stromabwärts und legt während der Zeit einer Schwingung abwärtsfliessend eine Strecke zurück, deren Länge auf der Geschwindigkeit des Wassers beruht. Diese Strecke entspricht also der Wellenlänge der Mäander, und ihr ist in folgender Formel Ausdruck verliehen:

hierin ist l = Wellenlänge der Mäander (siehe Fig. 5).

b = Breite des Mäandergürtels.

u = Durchschnittsgeschwindigkeit des Wassers

h = Tiefe des Flusses.

g = Schwere.

Die Wellenlänge der Mäander ist demnach direkt proportional zur Breite des Mäandergürtels und Durchschnittsgeschwindigkeit des Wassers sowie indirekt proportional zur Quadratwurzel aus der Tiefe.

Da die Wassermenge eines Flusses in der Regel flussabwärts zunimmt, vergrössern sich auch die Dimensionen desselben, besonders b und h . Gleichzeitig wird

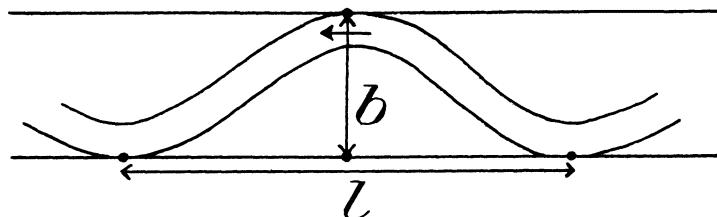


Fig. 5. Zur Erläuterung der Grössen 1 und b .

gewöhnlich die Geschwindigkeit des Wassers geringer, weshalb die Wellenlängen der Mäander nicht im Verhältnis zu den übrigen Dimensionen des Flusses anwachsen. Eine gewisse Erhöhung kann jedoch festgestellt werden, wie aus Fig. 1 hervorgeht.

Die Formel (1) setzt indessen eine geringe Schwingung der Wasseroberfläche und eine turbulenzfreie Bewegung beim Wasser voraus. Um der Formel eine allgemeinere Gültigkeit zu verleihen, ist auch eine Berücksichtigung der Turbulenz vonnöten.

Die Einwirkung der Turbulenz. — Die Turbulenz ist wirksam in einem Dämpfen und Verzögern der Schwingung. Sie muss deshalb eine Erhöhung der Wellenlänge hervorrufen. Es erübrigt indessen noch die Suche nach Erhaltung eines quantitativen Masses für diese Erhöhung.

Die Einwirkung der Turbulenz auf die Seiches-Schwingung ist aus geophyschem Gesichtspunkt von Defant (1932) untersucht worden, der sich hierbei auf eine mathematische Arbeit von Proudman und Doodson (1924) stützt. Das Ergebnis geht aus Tab. 1 und Fig. 6 hervor. In der Tabelle wurde eine Umrechnung vorgenommen zwecks Erhaltung der

Tab. 1. Die prozentuelle Verlängerung
der Schwingungsdauer durch den Ein-
fluss der Turbulenzreibung.

$\frac{\mu \cdot b}{h^2}$	Prozentuelle Verlängerung
72,105	∞
67,688	221,9 %
57,173	81,7 %
45,434	42,4 %
35,259	26,9 %
24,402	17,4 %
15,370	12,8 %
9,520	10,6 %
5,094	8,3 %

gleichen Einheiten wie in der obenstehenden Formel. Bei der Berechnung wurde g mit 981 cm/sec^2 gleichgesetzt. μ bezeichnet den als konstant angenommenen Koeffizienten der Turbulenzreibung (cm^2/sec). Der Koeffizient χ von Defant ist gleich $\frac{\pi}{b}$ gesetzt.

Die obenstehende Formel ist also durch folgende zu ersetzen:

$$l = \frac{2 b \cdot u}{\sqrt{g \cdot h}} \left[1 + \frac{1}{100} \cdot f \left(\frac{\mu \cdot h}{h^2} \right) \right] \dots \dots \dots \quad (2)$$

wo f eine Funktion des Wertes in der Klammer bezeichnet. Die Funktion ist in rechnerisch verwertbarer Form in Fig. 6 dargestellt.

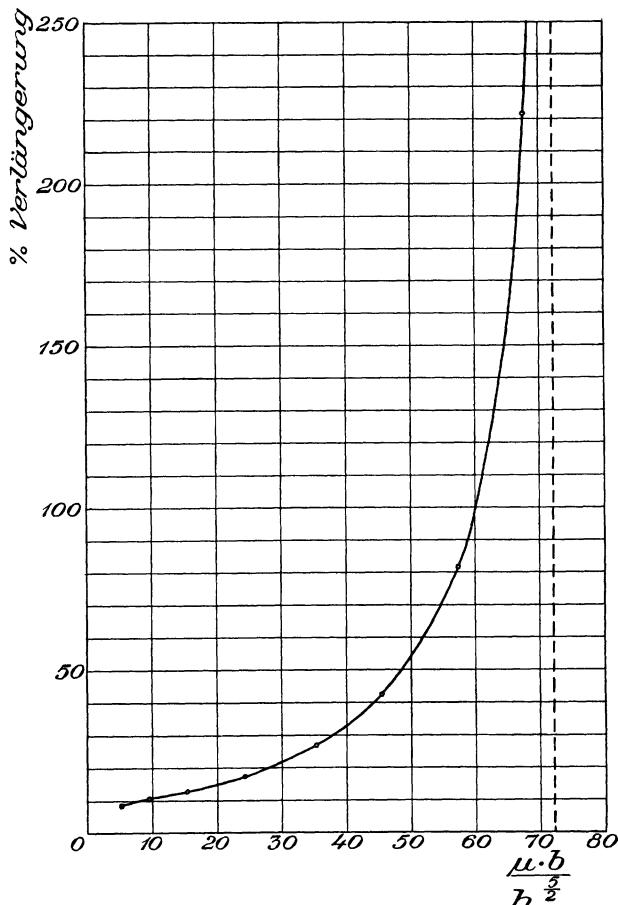


Fig. 6. Die prozentuelle Verlängerung der Schwingungsdauer infolge der Turbulenz.

Wie die Formel zeigt, ist die Turbulenz nicht allein für die Verlängerung der Periode entscheidend. Die Dimensionen, d. h. die Tiefe des Flusses und die Breite des Mäandergürtels, sind gleichzeitig von grosser Bedeutung.

Die Rolle der Turbulenz besteht wie erwähnt in einer Verlängerung der Wellenlänge. Diese Verlängerung wird immer ausgeprägter, sobald die durch den Koeffizienten μ vertretene Intensität der Turbulenz zunimmt. Ein Anführen von zahlenmäßig belegten Beispielen über diesen Einfluss bei verschiedenen Flusstypen lässt sich schwerlich durchführen, da es mit Ausnahme einiger weniger Flüsse¹ noch keine Turbulenzuntersuchungen in natürlichen Flüssen gibt. Die erwähnten Untersuchungen ergaben indessen ein Schwanken des Austausch-Koeffizienten (siehe unten) innerhalb sehr weiter Grenzen, nämlich von 75 bis 8 000; die letztere Ziffer stammt vom Nil und die erstere vom kleinen, trägefliessenden, doch nicht mäandernden Fyris-Fluss bei Uppsala in Schweden. (Die genannten Zahlen über den Austausch-Koeffizienten sind aus dem Gehalt an suspendiertem Schlamm errechnet. Diese Koeffizienten besitzen die Dimension g/cm, sec und unterscheiden sich dadurch von μ , dass sie mit der Dichte multipliziert sind, die indessen für Wasser = 1 ist.) Die angeführten Untersuchungen haben gewiesen, dass der Austausch-Koeffizient innerhalb des Querprofiles eines Flusses stark variiert und im grossen gesehen nach der Tiefe hin zunimmt. Für den hier in Frage kommenden Zweck ist der wirksame Turbulenz-Koeffizient wahrscheinlich eine Art Durchschnittszahl. Es dürften jedoch nur direkte Untersuchungen eine sichere Erklärung darüber abgeben können, wie sich dieser effektive Turbulenzfaktor zu den Werten an den verschiedenen Punkten des Profils verhält. Hier wird nur vorausgesetzt, dass ein solcher effektiver Faktor existiert. — Es hat sich weiterhin gezeigt, dass die Turbulenz stark mit der Geschwindigkeit zunimmt, wahrscheinlich ungefähr mit dem Quadrat derselben. In schnellen Flüssen ist sie also grösser als in langsamem, falls die Verhältnisse im übrigen gleichartig sind, d. h. Beschaffenheit des Flussbettes, Dimensionen des Flussprofiles usw. Diese Voraussetzung wird nicht erfüllt, da eine höhere Geschwindigkeit das Vorhandensein von gröberem Material im Flussbette bewirkt, doch hierdurch nimmt die Turbulenz weiterhin zu. Der Zusammenhang zwischen Turbulenz und Flussdimensionen ist indessen noch nicht bekannt. — Wir sehen also, dass erst zukünftige Untersuchungen nähere Aufklärung über die Gesetze für Grösse und Variationen der Turbulenz zu geben vermögen.

Es können im Anschluss an Fig. 6 zur Beleuchtung der Rolle der Turbulenz ein paar Rechenbeispiele angeführt werden. In einem geraden Fluss mit den Dimensionen 4 m (Tiefe) und 25 m (Breite) hat die Verlängerung des Pendelns des Stromstriches relativ unbedeutend zu sein. Es sind sehr hohe Werte für die Turbulenz erforderlich, damit sie eine grössere Einwirkung erhalten kann; erst bei $\mu = 10\,000$ wird die Verlängerung 10 % und bei dem sechsfachen Wert 50 %. Wenn der Fluss dagegen mäandert und der Mäandergürtel die nach Jefferson normale Breite von 18-mal Flussbreite aufweist, so ergeben sich als die erforderlichen Turbulenz-Koeffizienten 570 bzw. 3 400. Der erstere dieser Werte ist vielleicht wahrscheinlicher als der letztere.

Als zweites Beispiel wählen wir den Mississippi mit den durch Exner² eingesammelten Angaben: $h = 10$ m, $b = 30$ km, $u = 1,3$ m pro sec, wovon besonders die letzte

¹ Leighly, 1934, S. 457, 458; Hjulström, 1935, S. 409.

² Exner, 1919, S. 1461.

Ziffer unsicher ist. Errechnet man hieraus l , so erhält man den Wert 7875 m, während die Karten 13 000 m angeben. Die prozentuelle Verlängerung beträgt in diesem Fall 65 %. Die Kurve in Fig. 6 ergibt $\frac{\mu \cdot b}{h^2} = 54$. Hieraus lässt sich der Turbulenz-Koeffizient μ für den unteren Mississippi auf 570 berechnen. Dieser Wert ist nicht sicher, da die benutzten Angaben über Flussdimensionen und Wassergeschwindigkeit unsicher sind. Er wirkt niedrig im Vergleich mit den obengenannten Werten Leighlys für 5–6 m Tiefe im Nil, doch wird im Folgenden gezeigt, dass der erhaltene Wert die richtige Größenordnung hat.

Die Verlängerung der Amplitude wird sehr gross, sobald das Produkt $\frac{\mu \cdot b}{h^2}$ über 50 steigt und die Kurve sich asymptotisch dem Wert 72,1 nähert. Bei diesem Wert für genanntes Produkt ist die Verlängerung also unendlich. Dies bedeutet, dass in diesem Fall keine Querschwingung möglich ist, da die dämpfende Einwirkung der Turbulenz sich als viel zu stark erweist. Aus Fig. 6 und Tab. 1 lässt sich schliessen, bei welchen Dimensionen und Turbulenzwerten dies eintrifft.

Den Grenzwert, bei dem weitere Entwicklung des Mäanderns unmöglich gemacht wird, erhält man aus der Gleichung

$$\frac{\mu \cdot b}{h^2} = 72,105.$$

In Tab. 2 wurden für verschiedene Beziehungen zwischen Breite, b , und Tiefe, h , des Mäandergürtels die Werte für den Turbulenzkoeffizienten aufgenommen, die verschiedener Tiefe entsprechen. Fig. 7 illustriert diese Tabelle.

Tab. 2. Theoretisch berechnete maximale Werte des Turbulenzkoeffizienten, μ cm²/sec, bei verschiedener Breite des Mäandergürtels, b Meter, und bei verschiedener Tiefe, h Meter.

h	$\frac{b}{h} = 10$	$\frac{b}{h} = 50$	$\frac{b}{h} = 100$	$\frac{b}{h} = 200$	$\frac{b}{h} = 500$	$\frac{b}{h} = 1000$	$\frac{b}{h} = 2000$	$\frac{b}{h} = 3000$	$\frac{b}{h} = 5000$
0,01	7,2	1,4	0,7	0,4	0,1	0,07	0,04	0,02	0,01
0,10	228	46	23	11	5	2,3	1,14	0,76	0,46
0,50	2 549	501	255	127	51	26	12	9	5
0,75	4 673	937	468	234	94	47	23	16	9
1	7 211	1 442	721	361	144	72	36	24	14
2	6 ¹⁰ 6	4 979	2 040	1 020	408	204	102	68	41
3	—	7 493	3 747	1 873	749	375	187	125	75
4	—	11 537	5 768	2 884	1 154	577	288	192	115
5	—	—	8 062	4 031	1 612	806	403	269	161
6	—	—	10 597	5 299	2 120	1 060	530	353	212
7	—	—	—	6 677	2 671	1 336	668	445	267
8	—	—	—	8 158	3 263	1 632	816	544	326
9	—	—	—	9 734	3 894	1 947	973	649	389
10	—	—	—	11 401	4 560	2 280	1 140	760	456
11	—	—	—	—	5 261	2 631	1 315	877	526
12	—	—	—	—	5 995	2 997	1 499	993	600
13	—	—	—	—	6 759	3 380	1 690	1 126	676
15	—	—	—	—	8 378	4 189	2 095	1 396	838
17	—	—	—	—	10 108	5 054	2 527	1 685	1 011

Fig. 7 gestattet also eine Beurteilung der maximalen Turbulenz bei einem mäandernden Fluss. Hier bedeutet nämlich jede Kurve eine gewisse Beziehung zwischen Breite des Mäandergürtels und Tiefe des Flusses, und es lässt sich ablesen, welche Turbulenzwerte bei gewissen Dimensionen des Flusses nicht überschritten werden dürfen.

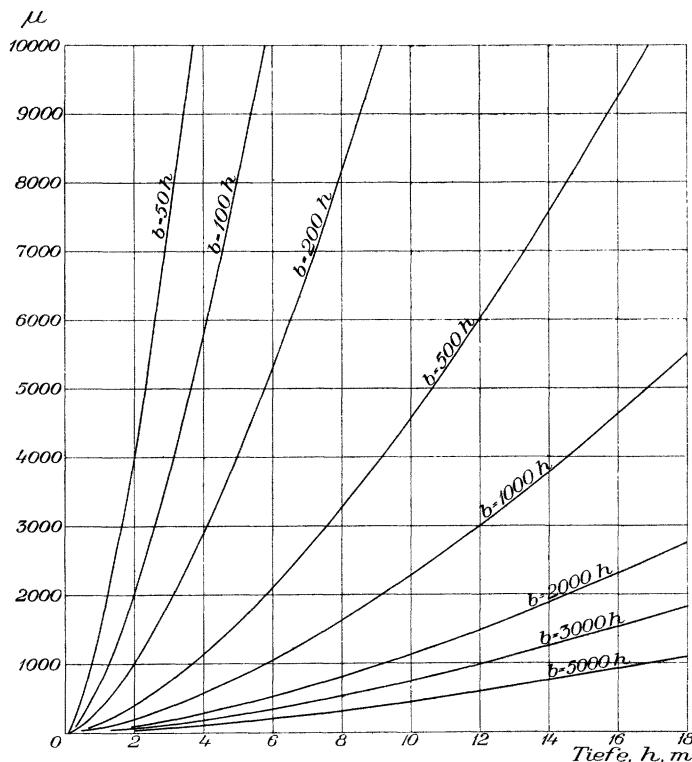


Fig. 7. Theoretisch berechnete maximale Werte des Turbulenzkoeffizienten μ für verschiedene Breite, b , des Mäandergürtels und verschiedene Tiefe, h .

Wie ersichtlich ist der Einfluss der Turbulenz am grössten bei Flüssen mit geringer Tiefe. Falls die Tiefe 0,5 m unterschreitet, wird die Weiterentwicklung von Mäandern im Verhältnis $b/h = 50$ unmöglich gemacht, sobald die Turbulenz den Wert $510 \text{ cm}^2/\text{sec}$ übersteigt, ein Mäandern im Verhältnis $b/h = 100$ ist schon bei der Hälfte dieses Wertes unmöglich, im Verhältnis 200 bereits bei $\mu = 130$, bezüglich 500 bei $\mu = 51$, 1 000 bei $\mu = 25$, 2 000 bei $\mu = 12$, 3 000 bei $\mu = 9$ und 5 000 schon bei $\mu = 5$.

Für grössere Tiefe wird der Einfluss der Turbulenz geringer, spielt jedoch selbstverständlich immer noch eine wichtige Rolle. Ein Mäandern mit einer Breite beim Mäandergürtel, die mehr als 100-mal die Tiefe des Flusses ausmacht, dürfte in der Natur beinahe überall dort vorkommen können, wo die Tiefe grösser als 5 bis 6 Meter ist. Die Turbulenz müsste nämlich den Wert $10\,000 \text{ cm}^2/\text{sec}$ überschreiten, um ein Mäandern zu verhindern, und solch grosse Werte hat man bisher in natürlichen Flüssen nicht beobachteten können.

Dagegen kann das Mäandern bei derartigen Flüssen nicht bis zu einer sehr grossen Breite des Mäandergürtels fortfahren, denn in diesem Fall beginnt die dämpfende Einwirkung der Turbulenz sich geltend zu machen. Wir kommen im folgenden zurück auf die Frage über die Breite des Mäandergürtels als eine Funktion der Turbulenz. Im früher erwähnten Beispiel vom Mississippi wurde der Turbulenz-Koeffizient auf 570 cm^2/sec errechnet. Da die Tiefe 10 m und die Breite des Mäandergürtels 30 km betrug, lässt sich aus Fig. 7 und Tab. 2 ersehen, dass der theoretisch berechnete maximale Turbulenz-Koeffizient 760 ist. Dies spricht für die Richtigkeit der Größenordnung des errechneten Wertes.

Bei Flüssen mit steilem Gefälle und infolgedessen schnellem Lauf kann der Turbulenz-Koeffizient als sehr gross angenommen werden. In solchen Fällen ist nur ein sehr mässiges Mäandern möglich, schon im Hinblick auf die dämpfende Einwirkung der Turbulenz. Hierzu tritt weiterhin ein hindernder Umstand, der — wie im folgenden erwähnt werden wird — eine bestimmte Grenze für das Mäandern bei hohen Geschwindigkeiten setzt.

Die Einwirkung der Tiefe des Flusses. — Nach der oben angegebenen Grundformel für die Wellenlänge l der Mäander ist diese umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Tiefe. Nimmt die Tiefe zu, verringert sich demnach die Wellenlänge, obwohl nicht in so schnellem Takt wie bei gewöhnlicher umgekehrter Proportionalität. Bei der durch die Turbulenz hervorgerufenen Verlängerung der Wellenlänge des Mäanders ist auch die Tiefe ein Faktor von Bedeutung, ja sogar von sehr grosser Bedeutung. Doch herrscht auch hier eine umgekehrte Beziehung, indem die Verlängerung von $h^{-\frac{1}{2}}$ abhängig ist. Je grösser die Tiefe, desto geringer wird also die Verlängerung. Wir sehen demnach,

Tab. 3. Theoretisch berechnete maximale Breite des Mäandergürtels, b Meter, bei verschiedener Tiefe, h Meter, und verschiedenen Werten des Turbulenzkoeffizienten, μ cm^2/sec .

h	$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 200$	$\mu = 500$	$\mu = 1000$	$\mu = 2000$	$\mu = 5000$	$\mu = 10000$
0,01	0,07	0,01	0,007	0,004	0,001	0,0007	0,0004	0,0001	0,00007
0,10	23	4,56	2,28	1,14	0,456	0,228	0,114	0,046	0,023
0,50	1 274	255	127	64	25,5	13	6,37	2,55	1,274
0,75	3 441	688	344	172	69	34	17	6,88	3,44
1,00	7 211	1 442	721	366	144	72	36	14	7,21
1,50	19 870	3 974	1 987	994	397	199	99	40	20
2	40 790	8 158	4 079	2 040	816	408	203	82	41
3	112 400	22 480	11 240	5 620	2 248	1 124	562	225	112
4	—	46 148	23 074	11 537	4 615	2 307	1 154	461	231
5	—	80 618	40 309	20 155	8 062	4 030	2 015	806	403
6	—	—	63 584	31 792	12 717	6 358	3 179	1 271	636
7	—	—	93 480	46 740	18 696	9 348	4 674	1 869	935
8	—	—	—	65 263	26 105	13 052	6 526	2 611	1 305
9	—	—	—	87 608	35 043	17 522	8 761	3 504	1 752
10	—	—	—	114 010	45 604	22 802	11 401	4 560	2 280
11	—	—	—	—	57 874	28 937	14 469	5 787	2 894
12	—	—	—	—	71 937	35 969	17 984	7 194	3 597
13	—	—	—	—	87 872	43 936	21 968	8 787	4 394
15	—	—	—	—	125 670	62 835	31 418	12 567	6 284
17	—	—	—	—	—	—	42 961	17 184	8 592
19	—	—	—	—	—	—	56 731	22 692	11 346

dass eine vergrösserte Tiefe die Wellenlänge des Mäanderns herabsetzt; bei einer geringen Tiefe wird umgekehrt die Wellenlänge gross.

Eine geringfügige Tiefe wirkt in hohem Grad auf das Mäandern dämpfend ein. Wie oben erwähnt, kann in solchen Fällen schon eine relativ niedrige Intensität der Turbulenz die Entstehung von breiten Mäandergürteln verhindern. Dieser Umstand erklärt die

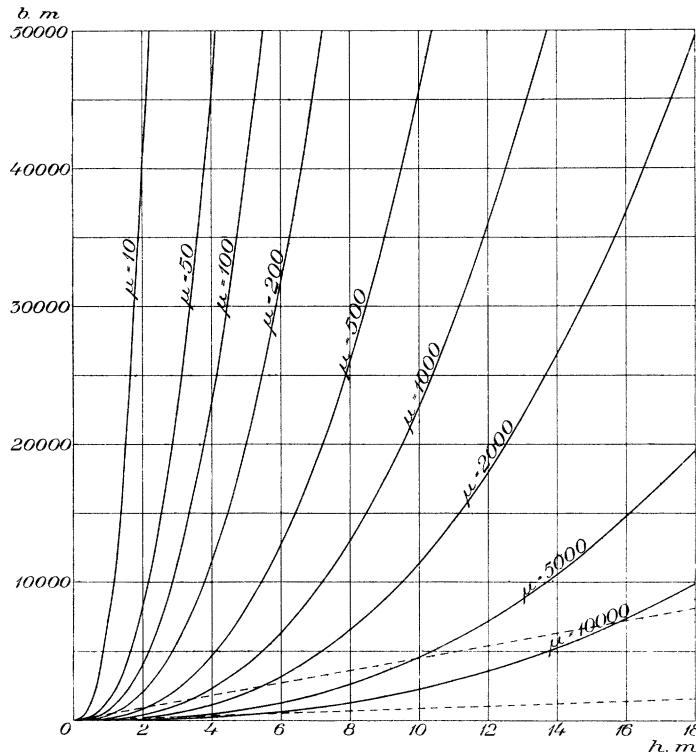


Fig. 8. Theoretisch berechnete maximale Breite, b , des Mäandergürtels bei verschiedener Tiefe, h und verschiedenen Turbulenzkoeffizienten μ .

Tatsache, dass sehr seichte Wasserläufe kaum jemals mäandern. — Die Erörterung dieser Verhältnisse geschieht jedoch besser in Verbindung mit der Behandlung der Frage über die Breite des Mäandergürtels.

Die Breite des Mäandergürtels. — Die Breite des Mäandergürtels ist ein wichtiges Kennzeichen für das Mäandern. Gemäss der Grundformel herrscht bei konstanter Tiefe, h , ein direkt proportionales Verhältnis zwischen der Wellenlänge des Mäanderns, l , und der fraglichen Breite, b . Bei konstanter Tiefe und Geschwindigkeit ändert sich demnach l in Übereinstimmung mit b . Die durch die Einwirkung der Turbulenz hervorgerufene Verlängerung nimmt mit wachsender Breite des Mäandergürtels zu.

Es ist von Interesse, die durch den Einfluss der Turbulenz stattfindende Verlängerung etwas näher zu untersuchen. Die Verlängerung wird wie erwähnt unendlich, d. h. das Mäandern hört mit der Weiterentwicklung auf, sobald das Produkt $u \cdot b \cdot h^{-\frac{5}{2}}$ den Wert

72,105 erreicht. Es ist deshalb eine Berechnung der maximalen Breite des Mäandergürtels für gegebene Tiefe und gegebene Turbulenz möglich. Die erhaltenen Werte ergeben sich aus Tabelle 3 und Fig. 8.

Die Figur zeigt, dass die Einwirkung der Turbulenz äusserst stark ist. Bei einer hohen Turbulenz kann das Mäandern nicht zu seiner vollen Entwicklung kommen. Für $\mu = 10\,000$ kann das Mäandern bei einem Fluss von 5 m Tiefe nicht die Breite von 400 m überschreiten, während sie sich für $\mu = 1\,000$ auf 4 km und für $\mu = 100$ auf 40 km belaufen kann. Die Breite des Mäandergürtels ist demnach bei dem voll entwickelten freien Mäandern in hohem Grad eine Funktion der Turbulenz.

Je grösser die Tiefe ist, desto breiter kann sich der Mäandergürtel entwickeln, falls der Turbulenzwert der gleiche bleibt.

Normales Mäandern. — Nach einer häufig zitierten Arbeit von Jefferson (1902) soll die Breite des Mäandergürtels in höherem Grad von der Breite des Flusses als von dessen Tiefe abhängen, und ausserdem betrage das Verhältnis zwischen Breite des Mäandergürtels und des Flusses 18 oder eine Zahl in der Nähe dieses Wertes, doch kommen in einzelnen Fällen grosse Abweichungen vor (85,0 für die Seine bei Paris). Nach der Theorie über die Querschwingungen sei dagegen die Tiefe von noch grösserer Bedeutung, und falls man überhaupt zugeben will, dass die Turbulenz für dieses Problem eine Rolle spielt, muss man einwilligen, dass die Tiefe ein wichtiger Faktor ist. Ein Fluss besitzt ja in der Regel viel grössere Breite als Tiefe, und der Grund erhält deshalb für den Turbulenz-Zustand des Wassers eine grössere Bedeutung als die Seiten. Diese Frage ist übrigens von untergeordneter Bedeutung, da im allgemeinen eine gewisse Beziehung zwischen Breite und Tiefe bei mäandernden Flüssen zu existieren scheint, trotzdem die Abweichungen von einem solchen Durchschnittsprofil sehr gross sind. — Man wird indessen häufig finden, dass die Breite bei einem mäandernden Fluss einen 5 bis 25-mal grösseren Betrag als die Durchschnittstiefe aufweist. Dies bedeutet, dass die Breite des Mäandergürtels 90 bis 450-mal grösser als die Tiefe ist. Diese Ziffern beabsichtigten natürlich nur, eine sehr grobe Abgrenzung zu geben. Für den Mississippi ist ja das Ziffernverhältnis 3 000, und jede Detailmessung ergibt sehr grosse Abweichungen für einzelne Krümmungen.¹ In Fig. 8 wurde das ebengenannte Ziffernverhältnis mit gestrichelten Linien angegeben. Das auf solche Weise abgegrenzte Dreieck dürfte demnach Normalfälle von mäandernden Flüssen einschliessen. Wie ersichtlich sind es vor allem die Kurven für hohe Turbulenz, die grosse Gebiete aus dieser Fläche herausschneiden. Dadurch wird angedeutet, dass *normal-mäandernde Flüsse keine besonders hohen Turbulenzwerte aufweisen*. Bei einem näheren Studium der Figur findet man nämlich, dass ein Mäandern mit ebenerwähntem Normalverhältnis zwischen Breite des Mäandergürtels und Tiefe des Flusses eine Tiefe von mindestens 5,5 m $\left(\text{bei } \frac{b}{h} = 90\right)$ oder $\left(\text{bei } \frac{b}{h} = 450\right)$ 16 m voraussetzt, falls der Turbulenz-Koeffizient den Wert 10 000 besitzt. Für $\mu = 1\,000$ werden die entsprechenden Grenzen ca. 1,25

¹ Siche z. B. J. Sölich's Referat einer ungedruckten Abhandlung von D. H. Eisner: Frage der Mäanderbildung. — Geographischer Jahresbericht aus Österreich, XX. Bd., Wien 1940, S. 109—110.

und 3,5 m und für $\mu = 500$ ungefähr 0,75 und 2 m. Falls $\mu = 200$ ist, kann ein Mäandern von obenerwähntem Normaltyp nur bei einer 1,25 m überschreitenden Tiefe vorkommen, und ist $\mu = 100$, dann nur bei einer grösseren Tiefe als 0,6 m. *Kommt Mäandern bei grösserer Tiefe vor, so kann die maximale Breite des Mäandergürtels sehr gross sein.* Das Verhältnis zwischen dieser Breite und der Tiefe kann weit das Normale (90—450) überschreiten. Der Mississippi bildet ein Beispiel hierfür. Für seinen Turbulenzwert von 570 kann ein Mäandern von Normaltyp nur bei einer Tiefe von mindestens 0,75 bis 2,5 m vor sich gehen. Da nun dieser Fluss eine Durchschnittstiefe von 10 m aufweist, kann das Mäandern in einem sehr breiten Gürtel auftreten; tatsächlich ist ja das Verhältnis $b : h = 3000$.

Ein Mäandern von obenerwähntem Normaltyp kann nicht auftreten, sobald die Turbulenz eine gewisse Grenze überschreitet, die am deutlichsten auf Fig. 7 abgelesen werden kann. Falls die Tiefe 4 m ist und das Verhältnis $b : h = 500$, kann μ nicht 1150 übersteigen, und bezüglich $b : h = 100$ nicht 5800. Ist die Tiefe dieselbe, aber der Turbulenzwert niedriger als 1150, muss nach der Figur ein auftretendes Mäandern breiter als normal sein, so dass die Tiefe im Verhältnis zur Breite als gering erscheint. Man kann diese Schlussfolgerungen umkehren und hervorheben, dass *das Mäandern in einem sehr breiten Gürtel, wie es bisweilen auf Ebenen im Unterlauf der Flüsse vorkommt, seine Voraussetzung in einer relativ geringen Turbulenz hat.* Findet sich demgegenüber Mäandern bei einem Fluss mit gleicher Tiefe in einem unnormal schmalen Gürtel, so hat dies seine Erklärung in einer sehr hohen Turbulenz. Bezuglich einer Tiefe von 4 m ist ein Mäandern in einem niedrigeren Verhältnis zwischen b und h als 100 nicht möglich, falls nicht die Turbulenz 5800 überschreitet. Es ist dabei vorausgesetzt, dass die Mäander zu ihrer vollen, maximalen Breite ausgebildet sind.

Aus unserer Grundformel (2) erhellt, dass das Verhältnis von Wellenlänge und Breite des Mäandergürtels, $l:b$, klein wird, die Flüsse also sehr stark mäandern (mit dem Verhältnis $b : h$ sehr gross) unter folgenden Voraussetzungen:

1. die Tiefe ist gross,
2. die Geschwindigkeit ist klein,
3. die Turbulenz ist gering.

Die zwei letzten Bedingungen sind bei Flachlandflüssen normalerweise erfüllt. Die wichtigste Voraussetzung ist aber, dass die Tiefe gross ist. Das mitgeführte feste Material muss leicht beweglich sein und vom Flusse ohne Neigung zur Ablagerung mitgeführt werden. Flüsse mit diesem übernormalen Mäandern müssen also tief und daher schiffbar sein, wenn auch bewegliche Sandbänke die Schiffahrt hindern. Eine normale Mäanderung muss nach der Theorie seichter sein, daher auch für die Navigation viel schwerer. Man muss nach der Theorie auch warten, dass Mäander von dieser Grundform öfters bei grossen Flüssen zu finden sind, als bei kleineren; bei den letzteren wird das Verhältnis $b : h$ nicht gross genug, denn h muss auch gleichzeitig gross sein. Vgd. Mississippi mit $b : h = 3000$, $h = 10$ und den grössten Tiefen 15—40 m. In Schweden finden sich keine Flussmäander dieses Typs.

Das Mäandern in seichten Flüssen. — Es ist von gewissem Interesse für die fluviale

Morphologie, auch das Mäandern bei Flüssen mit sehr geringer Tiefe zu untersuchen. In Fig. 8 liegen die Kurven in der Nähe der Basislinie bei niedrigen Werten für h und steigen anfangs beim Zunehmen der Tiefe nur sehr allmählich an. Hiermit wird angezeigt, dass die maximale Breite des Mäandergürtels bei Wasserläufen mit geringer Tiefe klein ist. Für eine Tiefe von 0,5 m beträgt die maximale Breite bei $\mu = 5000$ nur 2,55 m. In diesem Fall ist also ein Mäandern völlig ausgeschlossen. Für $\mu = 1000$ ist die maximale Breite 12,74 m, für $\mu = 500$ beträgt sie 25,5 m, für $\mu = 100$ ist sie 127 m, für $\mu = 50$ beträgt sie 254,94 m und für $\mu = 10$ beläuft sie sich auf 1274 m. Erst der vierte dieser Werte entspricht normalem Mäandern. Ist die Tiefe noch geringer, sehen wir, dass Mäandern noch seltener ist. Wählen wir eine so geringe Tiefe wie 0,1 m, finden wir, dass Mäandern für μ grösser als 500 völlig ausbleibt, da die Breite des Mäandergürtels unter 0,5 m hinabsinkt, d. h. kleiner ist, als was normalerweise für die Breite eines Wasserlaufs angesehen wird. Erst bei $\mu = 50$ beläuft sich die Breite auf 4,5 m und bei $\mu = 10$ auf 23 m.

Eine geringe Tiefe kommt in der Natur besonders in drei Fällen vor, nämlich teils bei kleinen Bächen, bevor sie den Charakter von Flüssen erreicht haben, teils in Schichtfluten, und teils bei grösseren Flüssen, wo diese durch die Ablagerung der mitgeführten Feststoffe verseichten, wie es in Deltas geschieht.

Bei kleinen Bächen mit geringer Tiefe ist wohl in der Regel auch die Breite geringfügig, weshalb sich nicht selten Mäandern bemerkbar macht. Die Tiefe überschreitet ja bei kleinen Bächen beinahe immer einige dm bei Hochwasser, und gerade letzteres dürfte für das Mäandern ausschlaggebend sein. In Schweden ist Mäandern dieses Typs ungemein häufig, wie im vorhergehenden betont wurde. Es tritt nicht immer auf den Karten hervor, doch sind auf Taf. 1 mehrfach Mäanderstrecken dieser Art aufgenommen.

Die ephemären Rinnale, worin das Regenwasser von der Bodenoberfläche abfliesst, gehören ebenfalls hierher. Die Tiefe derartiger fliessender Wasserschichten beträgt gewöhnlich nur einige wenige cm, während die Breite beträchtlich sein kann, falls das Gelände keine Hindernisse bereitet. Ein Mäandern kann hier von der gesamten Wasserschicht kaum stattfinden. Bisweilen lassen sich nach dem Abfliessen des Wassers schwach sinoidale Kurven dort wahrnehmen, wo ein Zusammendrängen in mitunter auftretenden rinnenförmigen Einsenkungen in der Bodenoberfläche stattgefunden hat. Der Mäandercharakter bei diesen ephemären Rinnalen ist fast immer sehr unbedeutend, wenn er überhaupt zu entdecken ist. Das Fehlen von Mäanderbildungen beruht also darauf, dass die Turbulenz bei diesen Wasserschichten viel zu stark ist. Dass die Strömung in derartigen Schichten in der Natur turbulent ist, wurde früher auf experimentellem Weg dargelegt.¹

Eine geringe Tiefe kommt schliesslich auch bei solchen Flusstrecken vor, wo Sedimentation stattfindet. Dies ist natürlich vor allem im Delta des Flusses der Fall, kann indessen auch in anderen Teilen des Laufes auftreten, wo Gefälle und Geschwindigkeit gering sind. Der Wasserlauf ist dort gewöhnlich auch relativ breit, und wie Fig. 9 zeigt, kommt in solchen Fällen Mäandern nicht einmal bei sehr niedrigem Turbulenzgrad vor. In Verbindung mit dem Wechsel zwischen Hoch- und Niedrigwasser wird indessen der

¹ Hjulström, 1935, S. 237—243.

Fluss reichlich in Adern von wechselnder Breite aufgezweigt. Es ist kennzeichnend und steht in voller Übereinstimmung mit diesen theoretischen Betrachtungen, dass sich hierbei in gewissen Fällen ein Mäandern bei den schmäleren Adern wahrnehmen lässt, doch nicht bei den breiten.

de Lóczy's Gesetz. — Die ebenerwähnte Eigenschaft der Flüsse, nicht zu mäandern, wenn das Wasser seicht ist, kann durch das Gesetz als erklärt angesehen werden, das zuerst Lojos de Lóczy in folgenden Sätzen zum Ausdruck brachte: In jenen Flüssen, deren Geschiebe schwerer beweglich, also zum Weitertransport weniger geeignet ist, als das Material ihrer Ufer, kommt es zur Bildung von Untiefen, von Sandbänken, sie neigen zur Verzweigung; diejenigen Flüsse jedoch, welche ihr eigenes Geschiebe leichter fortbewegen, als das Material ihrer Ufer, haben Krümmungen aufzuweisen (Zitiert nach de Cholnoky, 1907, S. 135). Wir sehen, dass dieses Gesetz u. a. die oben diskutierte Frage über das Mäandern auf Flussstrecken mit Verseichtung einbegreift. de Lóczy's Gesetz stellt demnach einen Sonderfall der hier erörterten Frage über den Zusammenhang zwischen Tiefe des Flusses und Breite des Mäandergürtels dar. Seine völlige Erhellung erfährt jedoch dieses Gesetz erst in Verbindung mit der Diskussion über Flusserosion und Sedimentation im nächsten Kapitel.

Der Einfluss von steilem Lauf und hoher Geschwindigkeit. — Wenn sich die Geschwindigkeit vergrössert, nimmt nach allem zu urteilen die Intensität der Turbulenz in schnellem Takt zu. Die Turbulenz ist indessen auch von den Dimensionen und der Reibung des Flusses abhängig, weiterhin von Temperatur und anderen Eigenschaften des Wassers.

Falls beim Zunehmen der Geschwindigkeit eine gewisse Grenze überschritten wird, ändert sich der Strömungscharakter des Wassers. Er geht von Strömen zu Schiessen über. Dies bedeutet, dass die Geschwindigkeit des Wassers die von Wellen an der Wasseroberfläche übertrifft. Ein Impuls kann sich deshalb stromaufwärts nicht geltend machen. Wellen bei einem Hindernis werden schräg stromabwärts gerichtet und sind völlig verschieden von den stationären Querwellen, die beim Strömen vorkommen.¹

Die Grenze zwischen Strömen und Schiessen findet sich bei der Geschwindigkeit, als u bezeichnet, wo

$$u = \sqrt{g \cdot h}$$

Diese Geschwindigkeit ist die gleiche wie für Wellen an der Wasseroberfläche. Sie ist wie ersichtlich ausser von der Schwerkraft ($g = 981 \text{ cm/sec}^2$) nur von der Tiefe abhängig und nimmt mit diesen Faktoren zu, so dass sie für eine grosse Tiefe stärker ist als für eine kleine. Es wurde indessen in der Hydraulik nachgewiesen, dass der Gradient von Flüssen bei dieser Grenzgeschwindigkeit gleich dem halben Wert des Reibungskoeffizienten ist. Dieser Gradient dürfte zwischen den je nach der Grösse des Flusses wechselnden Gradienten $3,5-5\%$ liegen.² Dies stellt ein nicht unbedeutendes Gefälle dar; für Flüsse auf Ebenen beträgt es in der Regel nur $1/50$ oder $1/100$ dieser Werte.

Bezüglich des Mäanderproblems ist von Interesse zu beachten, dass Mäandern in der Hauptsache bei strömender Bewegung des Wassers stattzufinden scheint. Es stellt

¹ Siehe Hjulström, 1935, S. 255—257 und die hier zitierten Arbeiten von Rehbock.

² Ibid., S. 256.

ein noch zu lösendes Problem dar, ob wirkliches Mäandern überhaupt bei schiessender Bewegung des Wassers vorkommt. Der Verfasser neigt zur Aufstellung der *Hypothese*, dass Mäandern bei dieser Art Fliessvorgang nicht auftritt. Es erscheint als zweifelhaft, ob die Besonderheiten in der Bewegung des Wassers sich in diesem Fall unter dem Begriff Querschwingungen zusammenfassen lassen. Überhaupt ist nicht völlig klar, ob Schwingungen fraglicher Art in Wasser mit schiessender Bewegung vorkommen können. Jedenfalls lässt sich erwarten, dass sowohl Wasserbewegung wie Morphologie des Flusses gerade bei dieser Grenzgeschwindigkeit mancherlei an Interesse aufzuweisen haben. Forchheimer¹ bezeichnet solche Flüsse als Achen. Ist die Geschwindigkeit des Wassers ebenso gross oder grösser als die Wellengeschwindigkeit, lässt sich annehmen, dass die Schwingung den Charakter ändert oder aufhört. Die Untersuchung, wie sich das Mäandern hierbei verhält, dürfte ein Problem von grossem Interesse darstellen.

Falls zukünftige Untersuchungen die Richtigkeit der aufgestellten Hypothese bezeugen, besitzt man indessen eine einfache und natürliche Erklärung für die bisher unerklärte Erscheinung, dass Flüsse mit steilem Lauf nicht mäandern. Eine weitere Deutungsmöglichkeit besteht darin, dass die Turbulenz bei den fraglichen, relativ hohen Geschwindigkeiten so intensiv ist, dass dadurch ein Mäandern ausgeschlossen wird (siehe oben). Leider ist die Kenntnis über die Turbulenzwerte in natürlichen Flüssen noch so gering, dass es hinsichtlich der Beurteilung dieser Frage keinen Ausgangspunkt gibt.

Ausblick.— Im obigen wurde nachgewiesen, dass sich, falls man die mehr oder minder ungeordneten Bewegungen des Wassers nach fraglichem Gesichtspunkt als eine Schwingung von Seiches-Charakter zusammenfasst, mehrere Schlussfolgerungen ziehen lassen, die mit den natürlichen Verhältnissen gut übereinstimmen. Die Bedingungen für das Vorkommen derartiger Schwingungen wurden in dem Masse dargelegt, als sie das Mäander-Problem betreffen. Es hat sich hierbei gezeigt, dass der Turbulenz-Zustand eine ungemein grosse Rolle spielt. Durch eine Berücksichtigung dieser Faktoren können verschiedene Eigentümlichkeiten im Charakter und Vorkommen des Mäanderns ihre Erklärung finden oder in neues Licht gestellt werden. Falls man die obenstehende Betrachtungsweise übernimmt, lassen sich bezüglich der mittels des Turbulenzkoeffizienten μ gemessenen Intensität der Turbulenz in verschiedenen natürlichen Flüssen gewisse Schlüsse ziehen. Als ein wichtiges und grosser Anstrengungen würdiges Ziel besteht indessen noch die Vergrösserung der Kenntnis über den Turbulenz-Zustand bei Flüssen. Es ergibt sich aus dem obigen, dass das Mäander-Problem seiner Lösung näher geführt werden kann, teils durch eine Erforschung hierherzählender Probleme und teils durch eine solche der Sekundärströmungen und Schwingungen des Wassers. In der Tat dürfte eine nähere Kenntnis hierüber eine Voraussetzung für ein fortgesetztes Eindringen in die fluvialen Prozesse und die fluviale Morphologie darstellen.

Als Beispiel mag hervorgehoben werden, dass erst ein näheres Studium der Turbulenz in flüssen von verschiedenen Dimensionen für ihre obenerwähnte verschiedenartige Neigung zum Mäandern eine Erklärung abgeben können dürfte. Vergleiche auch die Ergebnisse einer diesbezüglichen Untersuchung von Imamura (1935).

¹ Forchheimer: *Hydraulik*, Leipzig 1930.

Das Bettmaterial und die morphologische Aktivität als Bedingung des Mäanders.

Die Querschwingungen, die im vorigen Abschnitt als eine Zusammenfassung von ungeordneten Bewegungen des Wassers und äusseren Einflüssen angesehen wurden, dürfen als ständig vorkommend zu betrachten sein, und zwar abgesehen von den Fällen, wo die Turbulenz hindernd einwirkt, wie bei geringer Tiefe und allzu grosser Geschwindigkeit und eventuell auch bei schiessender Bewegung des Wassers.

Diese Schwingung im Stromstrich des Flusses führt jedoch keineswegs immer zum Mäandern. Sie muss auch das Bett des Flusses umgestalten können, so dass Mäander entstehen. Man darf keineswegs voraussetzen, dass der Fluss bei seiner Arbeit in fraglichem Sinne von einem geradlinigen Lauf ausgeht, sondern von einem relativ unregelmässigen Naturzustand, wie besonders Ahlmann (1914) mit Schärfe hervorgehoben hat. Bei der Umbildung werden bereits vorkommende Krümmungen verändert und ausgeglichen und in ein Mäandersystem eingeordnet, dessen Gesetzmässigkeit gleichwohl im grossen durch die Bewegung des Wassers bestimmt wird.

Dieser Umbildungsprozess ist, wie im vorhergehenden bezüglich Schweden nachgewiesen wurde, in der Regel von langsamem Verlauf. Er setzt beim Fluss eine morphologische Aktivität mit sowohl Erosion als Ablagerung voraus. Bei der Bildung und fortgesetzten Entwicklung der Mäander muss der Fluss natürlich an den Aussenseiten der nach aussen geschwenkten Krümmungen erodieren und Material am entgegengesetzten Ufer ablagern können. Sonst ist die Entstehung von Mäandern nicht möglich. Es ist unsere Aufgabe, in diesem Abschnitt die Bedingungen im Flussbette für diese Tätigkeit des Flusses näher zu studieren.

Die Mäanderbildung dürfte vor allem bei Hochwasser vor sich gehen, wo die Geschwindigkeit des Wassers und das Arbeitsvermögen des Flusses ihr Maximum aufweisen. Auch bei diesen Gelegenheiten ist gleichwohl die Geschwindigkeit relativ niedrig, denn Mäandern findet sich kaum anderswo als bei Flüssen auf Ebenen. Die Erosionskraft des Wassers ist daher bei mäandernden Wasserläufen nicht besonders gross. In früher vereisten Ländern, wozu Schweden zählt, lässt sich kaum ein Mäandern bei Flüssen in festem Gestein oder in grober Moräne erwarten. Es ist ein feineres Material erforderlich. Die Geschwindigkeit, bei der ein gewisses Material erodiert wird, hängt teils von der Partikelgrösse und teils von der Kohäsion zwischen den Partikeln ab. In Fig. 9 zeigt Kurve A den Zusammenhang zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit in einem Fluss und der Korngrösse eines einheitlichen Materials, das bei dieser Geschwindigkeit erodiert wird. Es wäre selbstverständlich richtiger gewesen, wenn man die Geschwindigkeit in der Nähe der Partikel statt der Durchschnittsgeschwindigkeit des Flusses hätte benutzen können, doch fehlen leider noch Angaben für eine solche Darstellung.¹ Infolge der Unsicherheit der benutzten Angaben wurde Kurve A als eine Serie von Bändern anstatt als eine einzige Linie gezeichnet. Die Kurve zeigt, dass für ein einheitlich sortiertes Material mit einem Durchmesser grösser als 0,5 mm die Erosions-

¹ Vergleiche die Diskussion hierüber bei Hjulström, 1935, S. 293—305, 1939, S. 9—12.

geschwindigkeit schnell mit zunehmender Korngrösse wächst, doch dass sie ebenfalls für ein mehr feinkörniges Material ansteigt. Feiner Sand mit einer Korngrösse von 0,3—0,6 mm ist deshalb am leichtesten erodierbar, während sowohl einerseits Lehm wie anderseits Kies und Steine eine höhere Geschwindigkeit benötigen. Dieses Verhalten ist auch im Hinblick auf das Mäandern beachtenswert. Letzteres wird natürlich erleichtert, wenn das Material leicht zu erodieren ist, wie für feinen Sand gilt. Wir haben deshalb ein Mäandern vor allem in solchem Material zu erwarten.

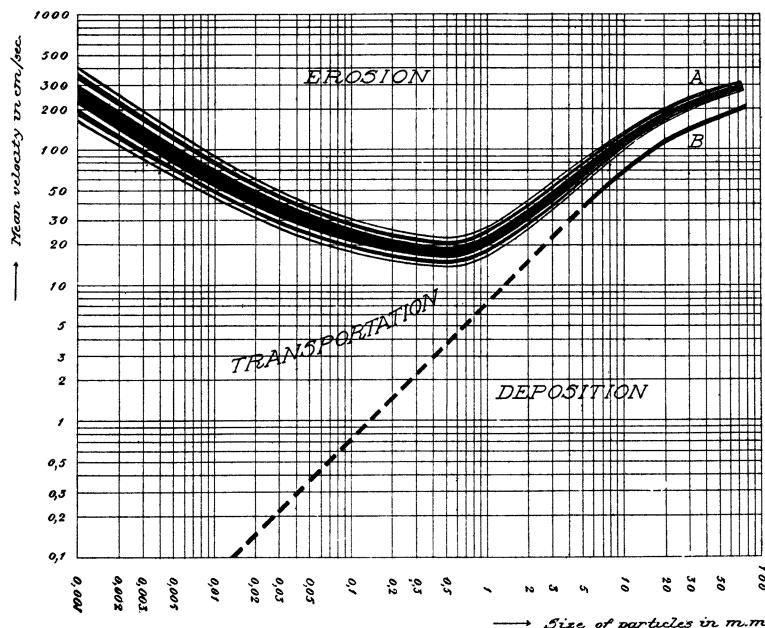


Fig. 9. Approximative Kurven für Erosion und Ablagerung gleichförmigen Materials (Nach Hjulström, 1939, Fig. 1).

Doch spielt auch die Leichtigkeit des Ablagerns für das Mäandern eine grosse Rolle. Das erodierte Material darf nicht in wesentlichem Umfang vom Fluss zu seinen Aufschüttungsstrecken fortgeführt, sondern muss so abgelagert werden, dass die Breite des Flusses darin sich nennenswert ändert. Parallel mit dem Fortschreiten der Erosion hat auf dem entgegengesetzten Ufer das Aufbauen von Sandbänken zu geschehen. In Fig. 9 vertritt Kurve B diese Eigenschaft des Materials. Sie gibt die geringste Geschwindigkeit an, bei der nach Messungen von Schaffernak (1922) ein Transport stattfinden kann. Nur der ausgezogene Teil der Kurve ist durch seine Messungen systematisch bestimmt, doch deuten zahlreiche Einzelbeobachtungen darauf hin, dass diese Kurve zu sehr niedrigen Geschwindigkeitswerten bei geringer Partikelgrösse absinken kann. Für das Mäander-Problem ist dies von Bedeutung. Die relativ gute Parallelität der Ufer kann nicht beibehalten werden, wenn die Partikelgrösse so gering ist, dass das Material nach seiner Erosion in Bewegung gehalten wird. Aus Fig. 9 geht hervor, dass das Ver-

hältnis zwischen Erosionsgeschwindigkeit und der niedrigsten Geschwindigkeit, die den Weitertransport des erodierten Materials ermöglicht, gleich 1,4 bis 1,5 ist, solange die Partikelgrösse 1—2 mm überschreitet. Für feineres Material vergrössert sich das erwähnte Verhältnis zwischen den Geschwindigkeiten. Von einer gewissen Korngrösse ab, die unter dem ebenerwähnten Mass, doch über dem des Lehmes zu liegen hat, wird die Ablagerung erschwert. Aber auch hier besitzt die Turbulenz eine grosse Einwirkung. Das Verlaufen dieses Prozesses ist auf interessante Weise durch amerikanische Forscher klargelegt worden.¹ Leighly (1932) hat hervorgehoben, dass der Transport des Materials nach der inneren Seite von Mäanderwindungen durch turbulente, zufällige und von der Hauptbewegung abweichende individuelle Bewegungen bei kleineren Wasserpartien im Flusse geschieht. Durch diese Nebenbewegungen im Wasser werden die Partikeln Stück um Stück nach der innern Seite der Krümmungen geschoben, wo sie abgelagert werden. Diese Theorie ist später auf experimentellem Weg im Vicksburg-Laboratorium² bekräftigt worden. Wir sehen also, dass die entscheidenden Geschwindigkeiten teils die Erosionsgeschwindigkeit sind (bei ihr sicher die zufälligen Maxima, die durch die Pulsationen hervorgerufen werden) und teils die Geschwindigkeit der turbulenten Nebenbewegungen im Wasser, die das Material nach dem inneren Ufer transportieren, wo es abgelagert wird. Sicherlich kann das Verhältnis zwischen diesen beiden Geschwindigkeiten beträchtlich gross sein, doch je grösser es ist, desto stärker sind die Schwierigkeiten für den Fluss, die Parallelität zwischen den Ufern zu bewahren. Was gröbere Korngrösse betrifft, und zwar von feinem Sand aufwärts, wird das Material mit Leichtigkeit ausserhalb des Stromstriches selbst abgelagert. Aus theoretischen Gründen kann man sich die Frage stellen, ob ein Mäandern mit parallelen Ufern überhaupt bei Flüssen möglich ist, die ausschliesslich in Lehmgebieten dahinfließen. Es liesse sich erwarten, dass in solchen Fällen ein Mäandern ausbleibt oder die Mäandervariante entsteht, die nach Melton's Klassifikation (1936) die Namen »bar meanders«, »meanders of advanced cut« oder »induced meanders« trägt.

Wie stimmen diese theoretischen Betrachtungen mit den natürlichen Verhältnissen überein? Hinsichtlich der Frage des Mäanderns in Lehmgebieten erhält man innerhalb Schwedens keine sicheren Aufklärungen, denn teils sind solche Flüsse sehr selten, teils ist der Lehm oft mit Sand oder sogar Kies vermischt, besonders in grossen Gebieten in der Nähe von Osern, und teils haben sich die Flüsse häufig durch den Lehm, wo er nicht allzu mächtig ist, bis zur Moräne hinab eingeschnitten. Die Flüsse können deshalb oft ein bedeutend gröberes Material als Lehm transportieren und dadurch mäandern, insbesondere da das Gefälle auf diesen Lehmebenen in der Regel gering ist und ein Mäandern deswegen begünstigt wird. Ähnliche Beobachtungen können bei indischen Flüssen³ und dem Mississippi angestellt werden.

Im vorhergehenden wurde im Anschluss an die Beschreibung der Karte über Schwedens Mäanderläufe betont, dass Mäandern anscheinend durch feinen Sand begünstigt wird. Ein Mäandern ist darin ungemein häufig, und es kann sogar unterhalb von Seen

¹ Siehe z. B. Russel, 1936, S. 129—132.

² Vogel, 1933.

³ Kennedy 1895.

auftreten. Die Erklärung besteht natürlich darin, dass dieses Material sehr leicht zu erodieren und auch leicht zu akkumulieren ist. Der an Umfang grösste Mäanderlauf Schwedens, der Klarälv, verläuft in solchem Material. Aus Nordamerika existiert eine äusserst aufschlussreiche Detailschilderung über einen intensiv mäandernden Fluss namens Buffalo River.¹ Er fliest durch feinen Sand, und sein Mäandern hängt in hohem Grad vom Vorkommen dieses leicht erodierbaren Materials ab.

Die im obigen beschriebene Tatsache, dass Mäandern in Schweden oberhalb, aber nicht unterhalb von Seen vorkommt, findet auch ihre Erklärung in Erosion, Transport und Akkumulation beim Flusse. Da die Ablagerung des vom einem Ufer erodierten Materials nicht direkt auf dem anderen geschehen kann, muss immer ein Transport dieses Materials stattfinden, wenigstens bis zur nächsten Krümmung. *Das Mäandern setzt daher Materialtransport voraus.* Wird dieses Material in einem See abgefangen, kann deshalb kein neues Mäandern auftreten, bevor die Erosion neues Material für den Transport herangeschafft hat. Ein bemerkenswerter Beleg für diese Ansicht besteht auch darin, dass mäandernde Flüsse eine relativ spärliche Wasservegetation zu haben scheinen. In Uppland hat der Verfasser beobachtet, dass der Unterschied in der Vegetation zwischen Flüssen mit aktivem Mäandern sowie geraden oder unregelmässig verlaufenden in der Regel gross ist. Bei den ersteren ist die Beständigkeit des Betttes geringer infolge des Materialtransports in diesem, während bei den letzteren ein solcher von nennenswertem Umfang zu fehlen scheint.

Vom Material im Flussbett und von Materialtransporten hängt auch die Geschwindigkeit ab, unter der in einem geraden oder unregelmässigen Lauf Mäander neugebildet werden. An der früher vom Meer bedeckten schwedischen Küste geht wie erwähnt die Mäanderbildung sehr langsam vor sich. Dies dürfte darauf beruhen, dass das Bettmaterial hier zum grossen Teil aus sedimentären Lehmen besteht, die nicht besonders leicht zu erodieren oder abzulagern sind. In mehreren Fällen verlaufen indessen die Flüsse über Felder von glazifluvialem, feinem Sand und erhalten einen umfangreichen Transport von Bettmaterial. Die Entwicklung des Mäanders kann hier schnell vor sich gehen und mit der Landhebung gleichen Schritt halten, wie z. B. Moälven und einige andere zeigen. Natürlich macht sich auch der Gradient des Flusses in gewissem Grade geltend.

Velleicht hat der Mangel an Mäandern bei den grossen schwedischen Flüssen seine Ursache in einem allzu geringen Sediment-Transport. Die vielen Seen und Erweiterungen der Flüsse wirken als Klärungsbecken, und die Deltas darin sind nicht besonders gross, wenigstens nicht unterhalb der Fjällregion. Andererseits setzt ja das Mäandern bei jedem Bogen des Flusses die Bildung eines kleinen Seiten-Deltas voraus. Es ist sehr bezeichnend, dass *der einzige unter den grossen schwedischen Flüssen, der einen Mäanderlauf besitzt, nämlich der Klarälv, auch das grösste Delta Schwedens aufweist.* Das andere grosse Delta in Schweden, das an der Mündung des Indalsälv, ist durch die ungewollte katastrophalartige Trockenlegung des Ragunda-Sees entstanden.

Geographisches Institut der Universität Uppsala.

¹ Griggs. 1906.

Literatur.

- AHLMANN, HANS W:SON: Beitrag zur Kenntnis der Transportmechanik des Geschiebes und der Laufentwicklung des reifen Flusses. — *Sveriges Geologiska Undersökning*, Årsbok 8 (= Serie C, Nr 262). Stockholm 1914.
- BERGSTEN, F.: Changes of level on the coasts of Sweden. — *Geografiska Annaler*, Bd XII. Stockholm 1930.
- DAVIS, W. M.: River Meanders and Meandering Valleys. — *The Geographical Review*, Vol. XIII, New York 1923 und *ibid.*, Vol. XIV, New York 1924.
- DE CHOLNOKY, EUGÈNE: Über die Lageveränderungen des Tiszabettés. — *Abrégé du Bulletin de la Société Hongroise de Géographie*, Budapest 1907.
- DEFANT, A.: Beiträge zur theoretischen Limnologie. — *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre*, Bd XIX (Bjerknes-Festband). Leipzig 1932.
- DE GEER, STEN: Klarälvens serpentinlopp och flodplan. — *Sveriges Geologiska Undersökning*, Årsbok 4 (= Serie C, Nr 236). Stockholm 1911.
- EINSTEIN, A.: Die Ursache der Mäanderbildung der Flussläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes. — *Die Naturwissenschaften*, Bd 14. Berlin 1926.
- EXNER, FELIX M.: Zur Theorie der Flussmäander. — *Sitzungsberichte d. Akademie d. Wissenschaften in Wien, Math.-naturwiss. Kl.*, Abt. IIa, Bd 128. Wien 1919.
- : Dünen und Mäander, Wellenformen der festen Erdoberfläche, deren Wachstum und Bewegung. — *Geografiska Annaler*, Bd III. Wien 1921.
- (†): Zur Dynamik der Bewegungsformen auf der Erdoberfläche. — *Gerlands Beiträge zur Geophysik*, Erster Supplementband: Ergebnisse der kosmischen Physik I. Leipzig 1931.
- FORCHHEIMER, PHILIPP: *Hydraulik*. Leipzig 1930.
- GRIGGS, ROBERT F.: The Buffalo River: An interesting meandering stream. — *Bull. of the American Geographical Society of New York*, Vol. XXXVIII. New York 1906.
- HJULSTRÖM, FILIP: Studies of the Morphological Activity of Rivers as illustrated by the River Fyris. — *Bull. of the Geol. Inst. Univ. Upsala*, Vol. XXV. Uppsala 1935.
- : Transportation of detritus by moving water. — *Recent Marine Sediments*. Oklahoma 1939.
- HOL, J. B. L.: Meanders, hun beteekenis en ontstan. — *Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap* Amsterdam, Tweede R. D. LVI. Leiden 1939.
- IMAMURA, GAKURO: Free Meanders of Rivers. — *Japanese Journal of Geology and Geography*, Vol. XII. Tokyo 1935.
- JEFFERSON, M. S. V.: Limiting Width of Meander Belts. — *Nat. Geogr. Magazine*, 1902. Washington 1902.
- KAUFMANN, HENNING: Rhythmische Phänomene der Erdoberfläche. Braunschweig 1929.
- KENNEDY, ROBERT GREIG: The prevention of silting in irrigation canals. — *Min. Proc. Inst. Civ. Eng.*, Vol. 119. London 1895.
- LEIGHLY, JOHN B.: Toward a theory of the morphological significance of turbulence in the flow of water in streams. — *Univ. California Publ. in Geography*, Vol. 6, Nr 1. Berkeley, Cal., 1932.
- : Turbulence and the transportation of rock debris by streams. — *The Geographical Review*, Vol. XXIV. New York 1934.
- MAGNUSSON, NILS H. och GRANLUND, ERIK: *Sveriges geologi*. Stockholm 1936.
- MASUCH, KLÄRE: Zur Frage der Talmäander. — *Berliner Geographische Arbeiten*, Heft 9. Berlin 1935.
- MAULL, OTTO: *Geomorphologie*. — *Enzyklopädie der Erdkunde*. Wien 1938.
- MELTON F. A.: An empirical classification of flood-plain streams. — *The Geographical Review*, Vol. XXVI. New York 1936.
- PROUDMAN J. and DOODSON, D.: Time-relations in meteorological effects on the sea. — *Proc. London Math. Soc.*, Ser. 2, Vol. 24, part. 2. London 1924.
- RUSSELL, RICHARD JOEL: Physiography of Lower Mississippi River Delta. — State of Louisiana Department of Conservation, Geological Bull. No. 8: Lower Mississippi River Delta. New Orleans 1936.
- SCHAFFERNAK, F.: Neue Grundlagen für die Berechnung der Geschiebeführung in Flussläufen. Leipzig und Wien 1922.
- THOMSON, JAMES: On the Origin of Windings of Rivers in Alluvial Plains, with Remarks on the Flow of Water round Bends in Pipes. — *Proc. Royal Soc. of London*, Vol. XXV. 1877.
- : Experimental Demonstration in respect to the Origin of Windings of Rivers in Alluvial Plains, and the Mode of Flow of Water round Bends of Pipes. — *Ibid.*, Vol. XXVI, London 1878.
- THUNMARK, SVEN: Über die regionale Limnologie von Südschweden. — *Sveriges Geologiska Undersökning*, Årsbok 31 (= Ser. C, Nr 410). Stockholm 1937.
- WITTMAN, H. und BÖSS, P.: Wasser- und Geschiebebewegung in gekrümmten Flusstrecken. — Untersuchungen aus dem Flussbaulaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe. Berlin 1938.
- VOGEL, H. D.: Flow in River Bends. — *Civil Engineering*, Vol. 3. New York 1933.