

- Z. f. Geomorph. Suppl. T. 2, 1960, p. 103–107, Berlin-Nikolassee.
68. Internationaler Karst-Atlas: Blatt 1, Sierra de los Organos, Cuba. Blatt 1a und 1b, Bilder und erläuternder Text. Z. f. Geomorph. Suppl., T. 2, Anhang, Berlin-Nikolassee 1960.
69. La terminologie classique du Karst sous l'aspect critique de la morphologie climatique moderne. Annales de l'Université de Lyon, Fasc. spécial II. L'Université de Lyon en 1958–1959. Conférence des Membres de la Délégation de l'Université de Francfort sur le Main 27–29 Avril 1959, Lyon.
70. La terminologie classique du Karst sous l'aspect critique de la morphologie climatique moderne. Rev. de Géogr. de Lyon, Vol. 35, Nr. 1, 1960, p. 1–6, Lyon.
71. Mit SUNARTADIRDJA, M. A. Der tropische Karst von Maros und Bone in SW-Celebes, Sulawesi. Internationale Beiträge zur Karstmorphologie. Z. f. Geomorph., Suppl. T. 2, 1960, p. 49–65, m. 13 Abb., Berlin-Nikolassee.
72. Geographie, in: Handbuch der Wissenschaft und Bildung, p. 313–364, Darmstadt 1960.
73. Neuland in den Maremmen, Südd. Rundfunk, Schulfunk, Jg. 13, H. 5, Stuttgart 1960.
74. Das Landschaftsgefüge der Padania. Grundzüge einer natur- und kulturräumlichen Gliederung des Po-Tieflandes. Frankfurter Geographische Hefte, Nr. 37, Festschrift zur 125. Jahrfeier d. Frankfurter Geographischen Gesellschaft (Verein für Geographie und Statistik) 1836–1961, p. 87–158, Frankfurt a. M. 1961.
75. Zur Problematik der Abgrenzung von „Kunstlandschaften“, dargestellt am Beispiel der Po-Ebene. Erdkunde, Bd. XV, 1961, p. 249–264, 3 Karten, 12 Bilder, Bonn.
76. Karstmorphologie, in: Westermanns Lexikon der Geographie, Westermann Braunschweig 1962.
77. Mit RODENWALDT, ERNST: Die antiken Emissare von Cosa Ansedonia, ein Beitrag zur Frage der Entwässerung der Maremmen in etruskischer Zeit. Sitzungsber. d. Heidelberger Akademie der Wissenschaften, Math.-Nat. Kl., Jg. 1962, 1. Abh. 1962, p. 3–31, 9 Textabb., 4 Karten.
78. Standortverlagerung und Funktionswandel der städtischen Zentren am Adriasaum der Poebene. Mitt. d. Österr. Geogr. Ges., Band 105, H. 1/2, p. 119–140, 11 Taf., 12 Bilder, Wien 1963.
79. State and Tasks of Research on Karst Phenomena. Report on the Symposium of the Karst. Commission of the I. G. U. in Stuttgart 1963. Erdkunde, Bd. 18, 1964, p. 81–83, Bonn.
80. Alfred Philippson zum Gedächtnis anlässlich der 100. Wiederkehr seines Geburtstages am 1. Januar 1964. Geogr. Z., 52 Jg., 1964, H. 1.
81. Glanz und Elend der morphologischen Terminologie. Festvortrag anlässlich des 60. Geburtstages von Prof. Dr. J. Büdel, Würzburger Geographische Arbeiten, Heft 12, 1964, p. 11–22, Würzburg.
82. Standortverlagerung und Funktionswandel der städtischen Zentren an der Küste der Po-Ebene. 65 S., 17 Abb., 4 Tafeln. Sitzungsber. d. Wiss. Ges. an der Joh.-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt a. M., Bd. 2, Jg. 1963, Nr. 3, Wiesbaden 1964.
83. Die Rolle des Italien-Klischees im Italienbild des Deutschen. List-Jubiläum-Almanach, München 1964.
84. Herbert Louis (zum 65. Geburtstag). Erdkunde, Band XIX, 1965, p. 3–6, Bonn.

ÜBER DIE FORM VON FLUSS-SPIEGELN UND IHRE GEOMORPHOLOGISCHE BEDEUTUNG

HERBERT LOUIS

Summary: Forms of river surfaces and their geomorphological relevance.

The so-called equilibrium of rivers is not so well defined as to allow far reaching conclusions about the morphogenetic effect of rivers considered to be in a state of equilibrium. The author thinks that accurate observations about the surface of rivers give a better indication of how to approach this problem, as it is possible to state that the general gradient and any other permanent deformation of a river's surface indicate a local change in the water's potential energy.

Four types of river surfaces may be distinguished:

1. The flat river surface. This is characteristic of rivers flowing with moderate turbulence. At times of calm the unevenness of the surface is quite insignificant. Flat spots (Quellfladen), resulting from upwelling water, and small eddies (Sogtrichter) are to be seen moving with the current. Variations in the supply of energy result from very small, hardly perceptible, alterations of surface gradient.

2. The almost flat river surface. This has more vigorous "upwell spots" (Quellbuckel) surrounded by marked undertow margins moving with the current. In addition there are wandering ripples which may even be sufficiently steep to give rise to foaming. Nevertheless, the gradient of the river surface is not deformed by any stationary break nor by permanent stretches of opposite gradient. Thus the almost flat river surface is also indicative of a balanced energy supply throughout the river.

3. The irregularly deformed river surface. This type is characterised by stationary surface breaks over the whole width of the river and in irregular arrangement, and/or by having permanently some parts of the surface with opposite gradients. Its movement is rushing (schießend). The energy supply between neighbouring points of the river is no longer balanced. It is not possible to say whether the Talweg (long profile) of the river is in the process of becoming more irregular or more regular. This is an ungraded river.

4. Between the "almost flat river surface" and the "irregularly deformed river surface" there is the "regularly deformed river surface". It has stationary waves grouped in regular patterns and the movement of the water is a rushing one. Because of the stationary waves the long profile of the river surface is not strictly speaking continuously sloping. However we can deduce from the adjustment of the surface deformations that the energy supply of adjoining points of the river must nevertheless be balanced. Thus a regularly deformed river surface also indicates a graded river.

Some further remarks deal with the influence which is exerted upon the form of the river surface by the water level. Finally it is explained that observations upon the type of river surface are to be combined with data of discharge, velocity, gradient and the character of the river bed.

Einführung, Problemstellung

Die Geographie hat es zumeist mit sehr komplexen Untersuchungsgegenständen zu tun. Selten nur gelingt in ihrem Bereich die Isolierung einfacher Sachverhalte, mit deren Hilfe die „exakten“ Naturwissenschaften so erfolgreich arbeiten. Die Geographie ist daher in hohem Maße auf eingehende und überlegte Beschreibungen ihrer Gegenstände angewiesen, und das wird so bleiben.

Wir verdanken Freund HERBERT LEHMANN außer seinem in engeren Sinne fachwissenschaftlichen Werk eine Reihe ausgezeichnete Landschaftsbeschreibungen, deren wissenschaftlicher Gehalt mit ebenso beschwingten und farbenreichen wie scharf beobachteten Strichen dargeboten ist. In der Hoffnung, daß eine reflektierte Beschreibung auch im Bereich einer physisch-geographischen Spezialfrage sein Interesse finden möchte, sei ihm die untenstehende Betrachtung über die Form von Flußspiegeln und ihre geomorphologische Bedeutung zu seinem 65. Geburtstag gewidmet.

An anderer Stelle (H. LOUIS, 1960*) wurde dargelegt, daß der sogenannte Gleichgewichtszustand der Flüsse, wie er von A. HETTNER entwickelt und seither besonders in der französischen Literatur zu verfeinern versucht worden ist, die ihm zugeordnete Aufgabe bei der Beurteilung des Flußgeschehens in der Geomorphologie nicht erfüllen kann. Dieser Gleichgewichtszustand der Flüsse erlaubt nämlich keine für den gedachten Zweck ausreichend strenge Definition. Es gibt auch u. E. im Gegensatz zu den älteren, hierin zuverlässigeren Annahmen keine beobachtbare Erscheinung, an der mit Gewißheit erkannt werden könnte, ob in einem Flusse wenigstens Annäherung an jenen gedachten Gleichgewichtszustand besteht oder nicht. Die von DAVIS und HETTNER für kennzeichnend gehaltene Ausbildung einer Talsohle gewährleistet diesen Zustand jedenfalls nicht. Denn eine Talsohle, und zwar sowohl eine Mäandersohle wie eine Verwilderungsohle kann unter geeigneten Voraussetzungen die Folge definitiver Aufschüttung sein. Eine Verwilderungsohle kann aber unter anderen Voraussetzungen sogar auch die Begleiterscheinung lebhaft fortschreitender Tieferlegung des Talgrundes, also eines Flusses mit kräftiger Tiefenerosion sein.

Wegen dieser Schwierigkeiten wurde versucht, eine Beurteilung über die geomorphologische Wirksamkeit der fließenden Gewässer auf ganz anderem Wege zu gewinnen, nämlich auf Grund der Eigenschaften des Flußspiegels. Unter Flußspiegel wird hierbei jede Art von Oberfläche eines fließenden Gewässers verstanden, auch jede sehr unebene. Das ist sprachlich sicher zulässig, denn außer ebenen Spiegeln gibt es ja auch mannigfach gekrümmte. Die Flußspiegel zu studieren liegt nahe, weil sie die Änderung der potentiellen Energie der fließenden Wassermasse längs des

Flusses zum Ausdruck bringen, und weil sie unmittelbar der Beobachtung zugänglich sind.

Wenn man, wie es hier durchgehend geschehen soll, von denjenigen Kräuselungen und Wellungen ausdrücklich absieht, die der Wind auf der Oberfläche fließender oder stehender Gewässer erzeugen kann, so läßt sich bei den fließenden Gewässern ein deutlicher Unterschied feststellen zwischen solchen, deren Oberfläche nahezu eben ist – wir wollen sie als glatt bezeichnen – und anderen mit mehr oder weniger ausgesprochen unebener Oberfläche. Dieser Unterschied kann nur von Besonderheiten des Fließvorgangs herrühren. Die Unebenheit nicht glatter Flußspiegel wäre also das Ergebnis einer Fließstörung zum Unterschied von der durch den Wind erzeugten Windstörung bzw. Windwellung.

Es ist bekannt, daß beim Fließen durch Reibung des Wassers am Flußbett und durch Reibung verschieden schnell dahinziehender Partien des Wassers aneinander Wirbel entstehen, wobei benachbarte Wirbel sich immer gegenläufig bewegen. Nur die schleichende, quasi-laminare Bewegung von Stillwassern vollzieht sich im wesentlichen ohne Wirbelbildung. Man kann das wirbelnde Fließen des Wassers angenähert auffassen als Bewegung eines Systems von sehr vielen Walzen von verschiedener Größe, Achsrichtung, Drehrichtung und Drehgeschwindigkeit, das letztlich der Überwindung der Reibung der in Bewegung befindlichen Wassermasse am Flußbett dient.

Infolge der sehr geringen Zähigkeit des Wassers gibt es hierbei einen Zustand, bei welchem man an der Wasseroberfläche nur wenig von dem Vorhandensein dieses Walzensystems sieht. Das ist der Fall des glatten Flußspiegels. Er bringt zum Ausdruck, daß die bestehenden Walzen, ob ihre Achsen nun vertikal, schief oder horizontal liegen, nicht kräftig genug sind, um durch ihre Bewegung eine erhebliche Deformierung des Wasserspiegels zu veranlassen. Als unerheblich sollen hierbei alle w a n d e r n d e n Vertikaldeformationen (Abweichungen von der Niveaulfläche) des Flußspiegels angesehen werden; denn sie beeinflussen nicht die Mittellage des Flußspiegels von Querprofil zu Querprofil. In dieser Weise wird turbulente Fließbewegung mit glattem Flußspiegel als Strömen bezeichnet. Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß die Fließgeschwindigkeit des Wassers kleiner ist als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen, auch der sogenannten langen Wellen, deren Wellenlänge groß ist im Verhältnis zur Wassertiefe. Eben dies ist ein Ausdruck dafür, daß ortsfest andauernde Deformationen des Wasserspiegels sich nicht halten können. Die durch das Wasserspiegelgefälle angezeigte Änderung der potentiellen Energie der fließenden Wassermasse macht in einem solchen Flußabschnitt keine Sprünge. Der Fluß stellt hier

*) H. Louis, Allgemeine Geomorphologie, Berlin 1960, S. 77 f.

ein Wirkungsgefüge dar, in welchem der Energieverbrauch aller Teile in dauerndem sprunghaftem gegenseitigem Ausgleich aufeinander abgestimmt ist.

Anders sind die Verhältnisse beim schießenden Abfluß, welcher bekanntlich dadurch definiert wird, daß die Fließgeschwindigkeit größer wird als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit auch der langen Wellen des Wassers. Beim schießenden Abfluß ist die Turbulenz in der Regel stark erhöht, wobei wir davon absehen, daß in Fällen, in denen das Gerinnebett ein Fließen mit besonders geringer Reibung ermöglicht, auch Ausnahmen vorkommen. Da beim schießenden Abfluß nicht einmal mehr die langen Wellen wegen der erwähnten Geschwindigkeitsbedingung einen Spiegelausgleich stromauf herbeiführen können, so müssen nunmehr besonders starke Fließwalzen und Schwingbewegungen sich bis zur Wasseroberfläche bemerkbar machen. Die Wasseroberfläche wird dadurch auch bei Windstille unruhig und wellig. Sie erleidet Fließstörung.

Insbesondere dann, wenn sich im Flusse *o r t s f e s t* andauernde Spiegeldeformationen ausgebildet haben, ist aus der dadurch für die betreffende Stelle angezeigten sprunghaften Änderung der potentiellen Energie des Wassers zu entnehmen, daß in einem solchen Flußabschnitt nicht ein für alle Punkte einigermmaßen ausgeglichener Verbrauch an potentieller Energie des fließenden Wassers stattfindet. Vielmehr treten Singularitäten des Energieverbrauchs auf. Diese erfordern eine Untersuchung darüber, ob oder wie weit sie geomorphologisch von Bedeutung sind.

Mit den bisherigen Überlegungen wurde versucht deutlich zu machen, daß es überhaupt von Interesse ist, auf die Gestaltung der Oberfläche fließender Gewässer zu achten. Nun sollen einige Beobachtungen über das Aussehen von Flußspiegeln und entsprechende Deutungsversuche folgen.

Der geglättete Flußspiegel

Nur bei schleichenden Stillwassern und auch bei diesen nur in Zeiten vollkommener Windstille ist die Oberfläche des Gewässers wirklich spiegelglatt. Aber im Unterschied von wellig und schäumend dahinrauschenden Gewässern gibt es solche, die bei Windstille trotz kleiner Unebenheiten der Oberfläche und trotz lebhafter Fließbewegung von 1 bis 2 m/sek oder sogar mehr, dennoch den Eindruck ruhigen Strömens machen. Hineingeworfene Steine verursachen eine vom Einwurfpunkt ringartig fortlaufende Welle, wenn diese auch infolge der Fließbewegung des Wassers von der Kreisgestalt abweicht. Es herrscht also strömende Fließbewegung. Die Oberfläche solcher Flüsse ist gewöhnlich durch fladenartige Partien besonders ebener Gestalt ausgezeichnet. Diese Fladen kom-

men in Durchmessergrößen von etwa 1 Dezimeter bis über 1 Meter vor und sind in der Mitte im Stromstrich besonders häufig. Genauer betrachtet stellen sie minimale ganz flache Aufwölbungen der Wasseroberfläche dar mit einzelnen Quellstellen, an denen zu sehen ist, daß Wasser von unten emporsteigt. Der rundliche Außenrand dieser Quellfladen des Wassers ist ein wenig versteilt. Die Wasseroberfläche biegt hier um einen Betrag von Millimetern bis wenigen Zentimetern nach abwärts, und auch der Rand der umrahmenden, meist etwas weniger ebenen Wasserpatrien biegt sich entsprechend herab. Deutlich bewegt sich Wasser an dem linienhaft ein wenig eingetieften Saum des Quellfladens nach abwärts. Die Quellfladen und die absinkene Wasserbewegung an ihrem Saum sind der sichtbare Ausdruck für die seit langem bekannte Schraubenbewegung des mit Wirbelbildung fließenden Wassers, bei welcher gewöhnlich im Stromstrich aufsteigende, an den Stromrändern absteigende Bewegung überwiegt. Außer den Quellfladen und ihren Absinkrändern sind meist kleine, einige Millimeter bis einige Zentimeter tiefe Sogtrichter an der Oberfläche ruhig strömender Flüsse zu sehen. In ihrem Umkreis setzt Wasser mit um den Trichter drehender Bewegung in die Tiefe. Sogtrichter sind häufig einerseits in der Umgebung der Quellfladen, andererseits nahe den Stromrändern, wo, wie erwähnt, absteigende Wasserbewegung gewöhnlich überwiegt.

Die soeben beschriebenen geringen Unebenheiten der Wasseroberfläche sind nicht ortsfest. Sie bewegen sich vielmehr in der Fließrichtung fort. Allerdings ziehen die Sogtrichter nahe den Flußrändern, flußab von Vorsprüngen des Ufers, nicht selten in größeren kreisartigen Bahnen dahin, wobei die Bewegung im ufernahen Teil des Kreises stromauf gerichtet ist. Dies verdeutlicht das Vorhandensein von Nehrströmen, d. h. von Uferwalzen der Wasserbewegung mit senkrecht stehender Achse. Mit ihrer Hilfe mindert das fließende Wasser die Reibung an der unregelmäßig verlaufenden Uferwandung.

Ganz allgemein kann man sagen, daß in derartigen Flüssen kein Punkt sprungartig verstärkten oder verringerten Energieverbrauchs vorhanden ist. Vielmehr sind alle Änderungen des Energieverbrauchs mit der Nachbarschaft durch leichte, kaum wahrnehmbare Spiegeländerungen ausgleichend abgestimmt. In einem solchen Wirkungsgefüge kann man, wenn die sonstigen Gegebenheiten gleich bleiben, Vorhersagen über den weiteren Ablauf des Geschehens, insbesondere auch über die zu erwartenden Veränderungen der Reliefgestaltung herleiten, nicht anders als das bei schleichenden Stillwassern der Fall ist. Der soeben beschriebene Typus der Flußoberfläche rechtfertigt es

durch seine Form und durch die mit ihr verbundenen Eigenschaften, ihn als *g e g l ä t t e t* zu bezeichnen.

Der vorgeglättete Flußspiegel

In Gewässern, welche starke Schnellen aufweisen, findet man gewöhnlich in einer Zwischenzone zwischen dem unter Aufbäumen des Wassers dahinjagenden Abfluß der eigentlichen Schnelle und einer talab folgenden Strecke ruhigen Strömens im Glättungszustand eine Übergangsform der Oberflächenbeschaffenheit.

Während im Glättungszustand trotz der beschriebenen geringfügigen Unebenheiten von einer glatten Wasseroberfläche gesprochen werden kann, weist die Wasseroberfläche nun auch bei Windstille deutliche Wellung auf. Deren Vertikalausmaße können von einigen Zentimetern bis zu Dezimetern gehen. Quellwirbel sind noch deutlich erkennbar, aber die einzelnen Wirbel sind flächenmäßig kleiner, doch in der Vertikalen weit kräftiger als beim Glättungszustand. Es sind mehr Quellbuckel als Quellfladen. Zwischen den Quellbuckeln und abseits von ihnen ist die Wasserfläche hier und da durch Sogtrichter gegliedert, im übrigen ausgesprochen gewellt.

Während aber im Glättungszustand die dort ja auch vorhandenen geringfügigen Unebenheiten der Wasseroberfläche stets aus im Scheitelteil abgeflachten Gebilden bestehen, überwiegen hier Wellenkörper mit zugeschärfter, manchmal sogar aufschäumender Firstlinie. Man kann sie als Kammwellen bezeichnen. Offenbar entstehen diese Kammwellen aus der Überlagerung benachbarter, unregelmäßig liegender und sich drehender Wasserwirbel, welche so kräftig sind, daß Wellenberge und Wellentäler merklich über das Mittelniveau der Wasseroberfläche gehoben, bzw. unter dieses Niveau hinabgedrückt werden. Die Turbulenz des Wassers ist also wesentlich stärker als im Glättungszustand, mag sie nun von einer oberhalb gelegenen sehr starken Schnelle her übertragen sein oder aus den Reibungswirkungen der unmittelbar durchmessenen Flußstrecke selbst herrühren.

Charakteristisch für diesen Typ der Flußoberflächen ist ferner, daß die beschriebenen Kammwellen nicht ortsfest sind, sondern mit der Strömung wandern, und daß die Größe benachbarter Kammwellen ziemlich gleich ist, jedenfalls keine auffälligen Unterschiede aufweist. Dies gilt auch dann, wenn diese Wellen bis zum Aufschäumen versteilt und zugeschärft sind.

Die Wasseroberfläche ist oft zu unruhig, um durch Einwurf von Steinen festzustellen, ob in diesem Falle die mittlere Fließgeschwindigkeit größer ist oder die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen, welche die der langen Wellen ja nicht ganz erreicht. Manchmal kann man

aber feststellen, daß sogar Oberflächenwellen ein wenig stromauf fortschreiten, was strömenden Abfluß anzeigt. Aus der Gleichartigkeit der Größe der Kammwellen ist immerhin zu schließen, daß auch in diesem Falle die Bodenreibung der fließenden Wassermasse keine sprungartigen Änderungen auf kleinem Raum erfährt. Für die Frage nach der reliefverändernden Wirkung eines Flusses dieser Spiegelgestaltung besagt dies, daß diese Wirkung wohl kräftiger sein muß als beim geglätteten fließenden Fluß, daß aber auch hier nachbarliche Ausgeglichenheit der Reibungswirkungen vorhanden sind.

Wenn man bei einer Flußoberfläche der beschriebenen Art in jedem Querprofil und für jeden Augenblick die Mittelwerte aller tatsächlichen Höhen der Wasseroberfläche gebildet denkt, so wird sich ohne Zweifel ein gleichsinniges und sprungloses Gefälle der aus den Mittelwerten aller Querprofile gebildeten Kurve in der Abflußrichtung ergeben. Nicht die Wasseroberfläche selbst, wohl aber die Gefällskurve der in jedem Querprofil genommenen Mittelhöhen der Wasseroberfläche wäre hiernach als glatt zu bezeichnen. Diese Eigenschaft kann wohl nur bei überwiegend noch strömender Fließbewegung gegeben sein, d. h. bei einer Bewegung, welche, abgesehen von mäßigen, örtlich und zeitlich veränderlichen Abweichungen, einen durchgehenden Spiegelausgleich gewährleistet. Man wird in diesem Falle vielleicht von einem unruhigen Strömen sprechen können.

Wie erwähnt, ist der soeben beschriebene Zustand des Flußspiegels in Flüssen, bei denen geglättete und sehr wilde Laufstrecken miteinander wechseln, stets oberhalb der geglätteten Abschnitte anzutreffen. Dies und die besonders beschriebenen Eigenschaften, vor allem das Glatte der Gefällskurve aus den Mittelhöhenwerten aller Querprofile der Flußoberfläche geben die Berechtigung, in diesem Typ von Flußspiegeln ein *V o r s t a d i u m* der *G l ä t t u n g* zu sehen, bzw. sie als *v o r g e g l ä t t e t* oder *v o r g l a t t* zu bezeichnen.

Der verformte Flußspiegel

Den beschriebenen Zuständen der Glättung und der Vorglättung der Flußoberfläche stehen andere gegenüber, die man Zustände der Verformung, der Deformation von Flußspiegeln nennen kann. Sie sind ausgezeichnet durch Wellen oder Sprünge der Wasseroberfläche, welche *a m O r t b e s t e h e n b l e i b e n*, bzw. dort ständig neu gebildet werden. Derartige bleibende Unausgeglichenheiten des Flußspiegels werden feststellbar, wenn sie wenigstens in einer Dimension größeres Ausmaß erlangen als die früher besprochenen wandernden Unebenheiten der Wasseroberfläche. Handelt es sich bei ihnen um ortsfest bleibende Wellen, so

sind es lange Wellen, d. h. ihre Wellenlänge ist stets groß im Verhältnis zur Wassertiefe.

Wenn man sich auch in diesem Falle eine Gefällskurve aus den in jedem Querprofil genommenen Mittelwerten der Höhe der Wasseroberfläche gebildet denkt, so ist diese weder sprungfrei, noch besitzt sie wirklich gleichsinniges Gefälle. Vielmehr treten in ihr unbeschadet der Tatsache, daß die Wasseroberfläche im großen gesehen flußab an Höhe verliert, deutlich erkennbare, ortsfest bleibende Gegenböschungen auf. Aus diesem Grunde, bzw. in diesem Sinne erscheint es angebracht, hier von einer *verformten, deformierten* Wasseroberfläche zu sprechen.

Die Art und Weise des Abflusses ist in diesem Falle von den früher beschriebenen Abflußweisen des geglätteten und des vorgeglätteten Zustands wesentlich verschieden. Durch das Aufwärtsstürmen des Wassers an der flußauf gekehrten Böschung der Standwellen und durch das Abwärtsjagen an der Gegenböschung bzw. an Stellen sprunghafter Erniedrigung des Flußspiegels wirkt sie reißend. Der Fluß besitzt nicht mehr die dem geglätteten und dem vorgeglätteten Zustand eigentümliche Fähigkeit, irgendwie entstandene Unebenheiten seiner Oberfläche sofort auszugleichen. Dies kann wohl nur damit zusammenhängen, daß bei dieser Form des Abflusses die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der langen Wellen, d. h. der für den Spiegelausgleich wirksamsten Vorgänge, nicht mehr größer ist als die mittlere Abflußgeschwindigkeit des Flusses. Diese Überlegung legt es nahe, das reißende Fließen bei Spiegeldeformationen der vorher beschriebenen Art als Schießen anzusehen.

Zweifellos gibt es Übergänge zwischen dem vorgeglätteten und dem verformten Zustand von Flußoberflächen. Einige, vereinzelt in einem Fluß durch Unregelmäßigkeiten des Betts oder durch eingebaute Brückenpfeiler verursachte Standwellen erlauben es nicht, den Flußspiegel im ganzen als deformiert zu bezeichnen, wenn nebenbei geglättete oder vorgeglättete Partien der Flußoberfläche hindurchziehen. Erst wo die Wasseroberfläche auf der ganzen Flußbreite durch Standwellen oder durch sprunghafte Spiegeländerung deformiert ist, liegt ein gegenüber dem geglätteten und dem vorgeglätteten Zustand wesentlich veränderter Zustand des Flusses vor.

Angesichts der geomorphologischen Zielsetzung dieser Betrachtung ist es unwesentlich, ob das soeben gekennzeichnete, auf Grund der Gestaltung des Wasserspiegels und der Art der Fließbewegung unmittelbar wahrnehmbare Schießen, dem von der hydraulischen Theorie erarbeiteten Begriff des schießenden Abflusses genau entspricht, oder ob das wahrnehmbare Schießen dem theoretischen Schießen nur mehr oder weniger nahe kommt.

Was den Fließvorgang anbelangt, so ist es oft schwierig oder unmöglich, in einem natürlichen Fluß nachzuweisen, wo die Grenze zwischen strömendem und wahrnehmbar schießendem Abfluß genau erreicht wird. Unter gewissen Bedingungen vollzieht sich zwar nach älteren Feststellungen der Übergang vom schießenden zum strömenden Abfluß plötzlich, unter sprunghafter Hebung des Wasserspiegels flußab, dem sogenannten Wassersprung. Daneben gibt es aber sicher auch unscharfe Formen dieses Übergangs, bei denen z. B. wahrnehmbar schießende und strömende Partien des Wassers ein Stück weit nebeneinander herlaufen können unter starker Wirbelbildung an der Grenze der verschiedenen bewegten Wassermassen.

Der unregelmäßig verformte Flußspiegel

In der Natur lassen sich zwei Typen verformter Flußoberflächen recht deutlich voneinander unterscheiden. Der erste Typ zeichnet sich durch Unregelmäßigkeit der Verformung aus. Die Wasseroberfläche bringt hier offensichtlich einzelne Unregelmäßigkeiten des Flußbetts individuell zum Ausdruck, eine Stufe im Flußbett, über die das Wasser hinwegstürzt oder hinwegschießt samt der zugehörigen Wirbel- und Deckwalzenbildung am Fuß des Gefällesprungs, ein Felsriff, große Blöcke oder sonstige Hindernisse im Flußbett, welche zum Aufbäumen des Wassers oder zu Stau und plötzlicher Spiegelsenkung flußab führen. In bezug auf den Fluß sind diese Erscheinungen unregelmäßig, weil sie von Gegebenheiten der Struktur des Untergrundes, von großen Blöcken, die irgendwie ins Flußbett gelangt sind, von Bauten und anderen Eingriffen des Menschen usw. herühren. Wir haben also einen unregelmäßig verformten Flußspiegel vor uns.

Eine unregelmäßige Deformation des Flußspiegels im oben gekennzeichneten Sinne zeigt, daß das Gewässer nicht mehr imstande ist, durch Spiegelausgleich von flußab her seinen Energieaufwand an dieser Stelle mit dem der unterhalb oder oberhalb anschließenden Flußstrecken sprunglos abzustimmen. Bei dieser Lage hört der Fluß auf, ein einheitlich zu beurteilendes Wirkungsfüge zu sein. Man kann insbesondere nicht angeben, ob der Fluß die Tendenz hat, die vorhandene Unregelmäßigkeit seines Bettes durch unterschiedliche Erosionsleistungen am Hindernis selbst und auf der flußab folgenden Strecke zunächst einmal noch zu vergrößern, oder ob er dabei ist, sie abzuschwächen.

Für die Beurteilung der reliefgestaltenden Wirkung des Flusses ist dieser Unterschied gegenüber den Verhältnissen beim geglätteten und beim vorgeglätteten Zustand von Flüssen von großer Bedeutung. Denn ist einmal die Glättung oder Vor-

glättung, d. h. ausgleichende Abstimmung des Energieaufwandes unter allen Teilgebieten des Flusses erreicht, so bedarf es ohne Zweifel einer erheblichen Abänderung der Gegebenheiten, um den Fluß aus diesem Zustand wieder herauszubringen. Bei im gegenseitigen Verhältnis annähernd gleichbleibenden Bedingungen müßte der Zustand sich dagegen erhalten, denn jede kleine örtliche Änderung im Energiebedarf würde sogleich durch eine leichte Änderung des Spiegelgefälles befriedigt und mit dem Energieaufwand der Nachbarschaft in Abstimmung gehalten werden. Bei einem solchen Fluß kann von ausgeglichenem Gefälle gesprochen werden ohne Rücksicht darauf, ob dabei die absoluten Gefällswerte hoch oder niedriger sind, was von der Wassermenge und von anderen Eigenschaften des Gewässers abhängt. Dies Gefälle braucht auch durchaus nicht nur flußab abzunehmen.

Wo dagegen quer über den ganzen Fluß sichtbare Sprünge im Gefälle auftreten, oder wo quer über den Fluß in fixierter Lage und zeitlich ununterbrochen Stellen mit gegenläufigem Gefälle der Wasseroberfläche vorhanden sind, da besteht zwar wahrscheinlich immer noch eine gewisse Beeinflussung zwischen der Spiegelhöhe unterhalb und oberhalb, aber sicher nicht mehr eine ausgeglichene Abstimmung des Energieaufwands zwischen der Störungsstelle und den beiderseits anschließenden Flußabschnitten. Ein solcher Fluß stürzt oder schießt wahrnehmbar an der betreffenden Stelle. Er besitzt hier kein ausgeglichenes Gefälle. Er ist also als ganzes genommen nicht ausgeglichen.

Der geordnet deformierte Flußspiegel

Wie schon angedeutet, gibt es unter den Flußstrecken mit verformtem Flußspiegel noch einen zweiten Typ. Bei diesem kann man von *geordneter Verformung* der Wasseroberfläche sprechen. Unterhalb von Sturzstrecken oder unregelmäßigen Schnellen, unterhalb von Stauüberläufen mit wahrnehmbar kräftig schießender Wasserbewegung, aber auch in Flußabschnitten, die nicht auf Stellen noch heftigerer Wasserbewegung folgen, zeigt die Flußoberfläche öfters ein förmliches System von Standwellen.

Diese Standwellen können in ziemlich gleichmäßigen Abständen quer zur Flußrichtung zu mehreren bis vielen hintereinander liegen. Manchmal sind sie in geregelt alternierender Nebeneinanderordnung mit mehrfacher oder vielfacher Wiederholung hintereinander über die Wasseroberfläche verteilt. Von den Ufern können Standwellen in regelmäßigen Abständen schräg stromab in den Fluß hineinziehen, vom gegenüberliegenden Ufer kommende Standwellen der gleichen Art können sich mit ihnen kreuzen.

Die Größenordnung dieser Standwellen bewegt sich in weiten Grenzen von wenigen Zentimetern Wellenhöhe bis zu mehr als Meterdifferenz zwischen Wellenberg und Wellental in großen Flüssen. Der Abstand von Wellenberg zu Wellenberg beträgt das etwa Fünf- bis Zehnfache der Wellenhöhe. Immer ist die Wellenlänge groß im Verhältnis zur Wassertiefe. Es handelt sich also stets um lange Wellen. Die Firstlänge der Standwellen reicht von Dezimetern bis zu Dekametern. Sehr oft läuft die Wasserbewegung in der Firstregion der Standwellen stromauf, und es kommt zum Überschlagen bzw. Aufschäumen. Über das System der Standwellen hinweg bewegen sich dabei stromab als Formen minderer Größe wandernde Kammwellen.

Das in den Standwellen ortsfest bleibende Gegengefälle gegen die Fließrichtung des Gewässers weist darauf hin, daß der Abfluß wahrnehmbar schießend vor sich geht. Andererseits beweist die Regelmäßigkeit der Anordnung dieser Standwellen, daß sie untereinander in Abstimmung stehen. Gewöhnlich wird die Höhe der Standwellen eines Systems flußab geringer. Das talwärtige Ende eines Systems vollzieht sich manchmal auch in der Weise, daß an Stelle der strengen Anordnung schließlich nur noch vereinzelt Standwellen auftreten, die auch öfters nach einer kleinen Zeit der Ortskonstanz verschwinden oder ihren Platz verlagern. Allmählich geht die Flußoberfläche in das Vorstadium der Glättung über mit Überhandnehmen der wandernden Kammwellen und mit dem Hervortreten von Quellbuckeln.

Überblickt man die Erscheinungen der *geordneten verformten* Flußspiegel im ganzen, so ergibt sich folgendes: Die Tatsache, daß diese Form der Flußoberfläche gewöhnlich vom unregelmäßig deformierten Flußspiegel zum Vorstadium der Glättung überleitet, ebenso die systematische Anordnung der stehenden Deformationen in diesem Zustand weisen deutlich darauf hin, daß hier, obwohl der geordnet verformte Flußspiegel bei wahrnehmbar schießendem Abfluß erzeugt wird, bereits eine gut ausgeglichene Abstimmung des Energieverbrauchs entwickelt ist. Die Einzelheiten der Spiegeldeformation gehen hier sicher nicht auf einzelne entsprechende Hindernisse im Flußbett zurück, so wie es bei den unregelmäßig deformierten Flußspiegeln der Fall ist, sondern sie sind entweder eine Resonanzerscheinung auf die Gesamteigenschaften der betreffenden Flußstrecke oder sie bedeuten das Ausklingen eines übermäßig starken Stürzens oder Schießens, oder sie sind beides zugleich.

Die in regelmäßigem Abstand aufeinander folgenden Standwellen ungefähr gleicher Größe dürften wohl dadurch zustandekommen, daß hier die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von stromauf lau-

fenden, durch das sehr starke Gefälle erzeugten langen Wellen recht genau der mittleren Abfließgeschwindigkeit des Flusses gleich ist. Das wäre die Bedingung des schießenden Abflusses.

Das reliefgestaltende Geschehen ist in solchen Flußabschnitten sicher einheitlich, und mit dem des flußab folgenden Glättungs- oder Vorglätungsabschnitts in Einklang stehend. Es können dabei bereits vorhandene Reliefunregelmäßigkeiten gemildert oder bewahrt, aber schwerlich vermehrt werden. Denn der Energieverbrauch ist in solchen Flußabschnitten von Ort zu Ort nur unbeträchtlich differenziert.

Hiernach wird man nicht nur Flußstrecken im Glättungszustand und im Vorstadium der Glättung, sondern auch solche mit geordneter Deformation der Wasseroberfläche zum Gesamtbereich des ausgeglichenen Flußgefälles rechnen müssen. Erst Flußstrecken mit unregelmäßig deformierter Wasseroberfläche scheiden aus diesem Bereich aus.

Dies Ergebnis besagt etwas ganz anderes, als die gewöhnlich gemachte Annahme, daß nämlich der „graded stream“ der amerikanischen Geomorphologen mit dem sogenannten Gleichgewichtsprofil der Flüsse in Beziehung stünde. Wenn ein graded stream dem Wortsinn entsprechend ein Fluß mit ausgeglichenem Gefälle sein soll, bei dem man unter der Voraussetzung gleichbleibender Arbeitsbedingungen Vorhersagen über den weiteren Geschehensablauf machen kann, so muß dieser Fluß geglättetes oder vorgeglättetes Spiegelgefälle haben und darf sogar geordnet deformierte Spiegelabschnitte enthalten mit wahrnehmbar schießendem Abfluß. Nur ungeordnet deformierte Spiegel und mit ihnen ein wahrnehmbar schießender Abfluß ungeordneter Art sind ausgeschlossen.

Der Einfluß wechselnder Abflußmenge

Es wurde bisher unterlassen zu erörtern, ob Beobachtungen über den Flußspiegel in ihrer Bedeutung für die Reliefentwicklung von der Höhe

des gerade herrschenden Wasserstands unabhängig sind. Sicher ist das nicht der Fall. Wohl in allen Klimaten sind die Flußwirkungen bei Hochwasser am bedeutendsten. Es kommt also darauf an festzustellen, ob ein Fluß bei Hochwasser geglättete, vorgeglättete, geordnet deformierte Spiegelabschnitte aufweist, wenn man entscheiden will, ob dieser Fluß ein ausgeglichenes Wirkungsgefüge besitzt oder nicht.

Noch unveröffentlichte Untersuchungen von H. WITT über Flüsse der Fränkischen Alb, des Vorderen Bayerischen Waldes und des Alpenrandes im Chiemseegebiet haben aber gezeigt, daß gewisse gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen dem Fließzustand einerseits und der Wassermenge, der Abfließgeschwindigkeit, dem Gefälle sowie der Form des Gerinnebettes andererseits bestehen. Man kann hiernach auf Grund von Beobachtungen bei Mittelwasser mit einem gewissen Unsicherheitspielraum Vorhersagen über das Verhalten des Abflusses bei einem Hochwasser machen, wenn man jeweils Feststellungen über die bei bestimmtem Wasserstand herrschende Abflußmenge, Abfließgeschwindigkeit, das Gefälle und die Form des Gerinnebettes zur Verfügung hat.

Die Beziehungen zwischen dem Charakter des Flußspiegels bei Mittelwasser und bei Hochwasser können nämlich sehr unterschiedlich sein. Der Charakter kann erhalten bleiben, sich nach der Seite der Glättung aber auch nach der Seite der Deformation verändern. Das hängt offenbar vom Zusammenwirken der erwähnten Begleitwerte ab. Dies macht Beobachtungen über den Fließzustand und die Begleitwerte auch bei Mittelwasser wertvoll. Da bisher über den Fließzustand unserer Flüsse, soweit es sich nicht um künstlich stark veränderte Wasserstraßen handelt, wenig bekannt ist, sind Beobachtungen über ihn bei jeglichem Wasserstand unter Hinzufügung der vorher erwähnten Begleitwerte überaus erwünscht.

KARSTWASSERFLÄCHE UND UNTERIRDISCHE KARSTNIVEAUS*)

Mit 3 Abbildungen

ALFRED BÖGLI

Summary: Karst water surface and subterranean karst level.

The existence of karst water bodies and subterranean karst levels has by now been proved beyond a doubt. A karst water surface, like the level of water under pressure, behaves according to hydro-mechanical laws and is thus more aptly called a piezometric surface. Its location is largely determined by the main drainage. Together with the phreatic marginal zone this level is the place of intensive cave formation, in particular through a special kind of corrosion (Mischungskorrosion), which gives rise to extensive subterranean gallery systems, the so-called levels

of caves or subterranean karst levels. They are closely linked with the phases of valley formation via the main drainage and are in fact their correlated feature within the karst. These theoretical deductions are tested and applied in practice, using as example the cave level of the Hölloch in central Switzerland.

*) Die vorliegende Arbeit ist aus dem Bedürfnis entstanden abzuklären, wie sich Karstwasserkörper verhalten und wie unterirdische Karstniveaus damit zusammenhängen. Die Studie ist meinem Freunde Prof. HERBERT LEHMANN gewidmet, mit dem ich in vielen lehrreichen Stunden Karstprobleme diskutiert habe.