

Deltas — Schwemmfächer — Priele

Mit 6 Abb. im Text

Von SIEGHARD MORAWETZ, Graz

Seit frühesten Zeiten interessierten die Flußmündungen, und unter ihnen nehmen die Deltas eine ganz besondere Stellung ein. Viele Abhandlungen, die sich sowohl mit Deltas der Alten wie der Neuen Welt befaßten, wurden geschrieben. Es entwickelte sich eine umfangreiche Nomenklatur und man findet zahllose Einzelangaben über Formen und Wachstum weit verstreut in den verschiedensten Berichten und länderkundlichen Darstellungen. Die Darlegungen von O. PESCHEL [1866], G. R. GREDNER [1878], F. P. GULLIVER [1898], einem Schüler von Davis, und O. MARINELLI [1898] geben vor allem aus der Zeit der stürmischen Entwicklung der physischen Geographie über Gestaltung, Wachstum und Umbildung der Deltas wichtigste Hinweise, während das Buch von J. V. SAMOJLOV aus jüngster Zeit [1956] außer allgemeinen Zusammenfassungen recht viele Angaben über russische und andere eurasiatische Flüsse enthält. In all diesen Ausführungen findet man sehr wechselnde Angaben über das Deltawachstum und die Deltaveränderungen. Es drängt sich die Beobachtung auf, daß Zeiten mit schnellerem und langsamerem Wachstum unregelmäßig abwechseln, wobei gerade dieser Wechsel das Beständige zu sein scheint. Aller Wahrscheinlichkeit nach hat man es bei den Deltaformen und Deltaveränderungen mit rhythmischen Phänomenen im Sinne H. KAUFMANN'S [1929] zu tun.

Zu den auffälligsten Erscheinungen gehört, daß immer wieder Dreiecksformen beim Vorschuh der Deltas und bei den jüngsten Vorbauten entstehen, die je nach der Geschwindigkeit der Vorgänge zwischen breiten Dreiecksformen bei langsamer und schmalen Schaufelformen bei schneller Entwicklung schwanken. Deltas sind aber nichts anderes als Schwemmfächer oder Schwemmkegel, die sich ins Wasser hinausbauen. E. D. MARTONNE betonte dies 1926 nochmals recht ausdrücklich. Von den Schwemmfächern weiß man aus zahlreichen Beispielen, wie schnell sich Materialverlagerungen auf ihren Oberflächen vollziehen und daß dafür viel weniger eine Verbreiterung an der Basis oder eine Vorschuhung an bestimmten Abschnitten maßgebend sind, sondern vielmehr die Ausbrüche der Wasser an den Kegel- und Fächerspitzen. Wird das Wachstum der Schwemmfächer an zahlreichen Stellen durch die Schmalheit der Talböden, auf denen sie sich aufbauen, beschränkt oder durch kräftige Erosion des Hauptflusses beschnitten, so fallen diese Hemmungen bei den Deltas meist weg und es kann zu immer weiteren Vorschuhungen und neuen Deltaringansetzungen kommen. Voraussetzung für dieses Wachstum ist jedoch Erhöhung an der alten Deltaspitze, damit für den Weiterfluß noch genügend Gefälle erhalten bleibt. Solche Erhöhungen sind für einen Weiterbau umso mehr nötig, da sich viele Deltabildungen während einer Zeitspanne abspielten und abspielen, in der der

Meeresspiegel durch eustatische Vorgänge ansteigt und dadurch bei ruhender Scholle vom Meer her das Flußgefälle noch eine weitere Minderung erfährt.

Neben Einteilungen der Deltas nach den Formen und Phasen des Vorbaues, nach denen z. B. F. P. GULLIVER mit der Ausscheidung von stumpfen, abgerundeten, gezahnten Schaufeldeltas vorging, oder auch O. MARINELLI [1926] gliederte, der Alpha-, Beta- und Deltaformen unterscheidet, haben Einteilungen nach der Neigung der Deltaflächen nicht nur ihre Berechtigung, sondern sie geben vor allem über die Kräfte, die die Deltas bilden, meist besser Auskunft als die anderen Gliederungen. Hält man Einschau in die zahlreichen Angaben über die Gefällsverhältnisse der Deltas, so läßt sich eine rohe Zweiteilung in außerordentlich flache und solche, die dagegen geradezu steil sind, vornehmen.

Zu den flachen Deltas gehört z. B. das der Wolga mit einem Gefälle der Flußarme von 0,01 bei Niedrig-, aber 0,14‰ bei Hochwasser; in einzelnen Abschnitten sind jedoch auch bei Niedrigwasser Gefälle von 0,04—0,06‰ möglich und an der Küste senkt sich bei Hochwasser der Wasserspiegel für kurze Strecken auf 0,1—0,2‰ ab. Mit sehr ähnlicher Neigung verläuft das Dnjepr-Delta (0,01 bei Niedrigwasser und 0,14‰ bei Hochwasser); ähnlich liegen die Verhältnisse im Kura-Delta (0,015—0,07‰). Der Ural hat für die letzten 400 km ein Gefälle von 0,035 bei Normalwasserstand, aber bei Hochwasser ein solches von 0,08‰. Die Donau weist zwischen Galatz und Sulina 0,04‰ Gefälle auf. Bis Cernavoda hebt sich der Donauspiegel auf 11,3 m Höhe bei über 260 km Lauflänge, was eine Neigung von 0,043‰ ergibt. Im Sulinaarm sinkt bei Niedrigwasser das Gefälle auf 0,006 ab, hebt sich aber bei Hochwasser auf 0,056‰. Im Po-Delta mißt man im oberen zehn Kilometer langen Abschnitt bei Flut 0,07 und bei Ebbe 0,09‰ und im unteren über 30 km langen Teil 0,02 und 0,03‰. Der Hauptrhônearm hat bis zur Gabelung der Petit Rhône bei Arles rund 0,06‰. In den Pässen des Mississippi strömen die Wasser mit 0,017—0,034‰ dahin (Paß Loutre, Südpaß).

Im Vergleich zu diesen Neigungen von ganz wenigen Zentimetern ist die des Syr Darja vom Deltascheitel bis zum Aralsee mit 0,05‰ beachtlich. Der Amu Darja weist dagegen für die letzten 450 km schon 0,2‰ Gefälle auf. Die Deltaebene des Terek senkt sich im östlichen Teil mit 0,5‰. Dies ist bereits ein 10—50mal so hohes Gefälle als an der untersten Donau oder dem untersten Don. Die Schiefe der Nil-Deltaebene mit 0,2‰ muß bereits als sehr groß bezeichnet werden. Der Hwangho hat von Kaifeng bis zum Meer über eine Strecke von 600 km, also der mehr als dreifachen Entfernung Kairo—Mittelmeer, die gleiche Neigung (0,22‰).

Nun bauen Flüsse in Seen, sieht man von den Einwirkungen von Ebbe und Flut und den Meeresströmungen ab, unter äußerlich gleichen Bedingungen, wie die Flüsse, die in Meere münden, ihre Deltas auf, aber die Neigungen dieser Deltaebenen mit benachbartem Steilrelief sind hier doch wesentlich andere und übertreffen die sog. steilen Deltas von Nil und Terek. So verzeichnet das Rheindelta (Einzugsgebiet 6125 km²) in den Bodensee über 5 km 0,8 und für 16 km schon 1,25‰. Die Rhône hat in den letzten Kilometern vor der Einmündung in den Genfer See (Einzugsgebiet 5221 km²) rund 1‰ Gefälle. Die Adda, die den nördlichen Teil des Comosees in den Lago di Mezzola und Como teilte, besitzt ebenfalls um 0,5—1‰ Gefälle über drei und fünf Kilometer. Es werden da die Neigungen des Nildeltas wieder um ein Mehrfaches überboten, wenn auch diese Seedeltas, die von steilen Gebirgen gerahmt werden, äußerst flach erscheinen. Der Ticino vor der Mündung in den Lago Maggiore hat 1—2‰ Gefälle. Der

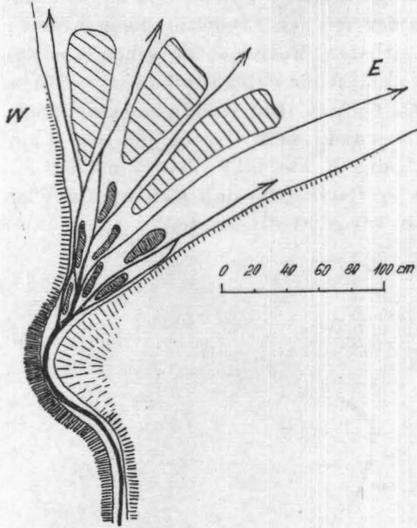


Abb. 1.

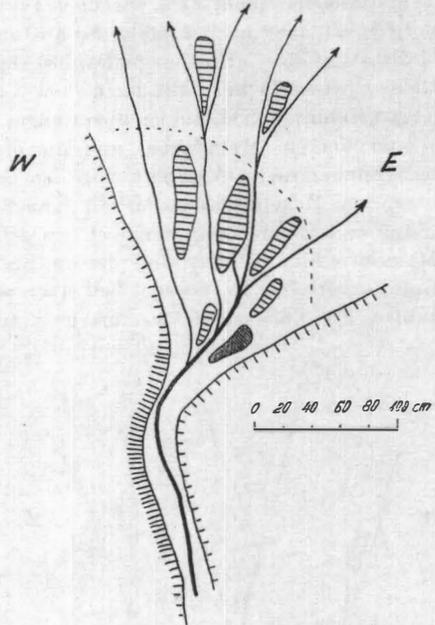


Abb. 2.

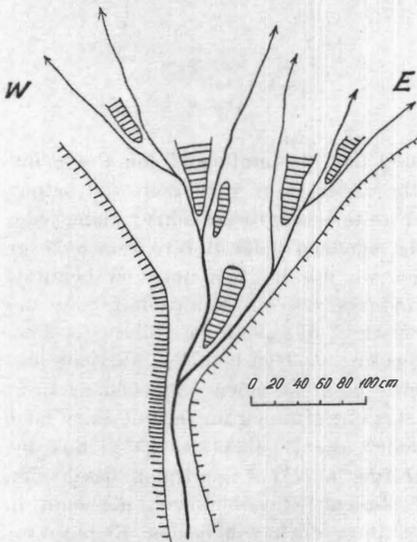


Abb. 3.

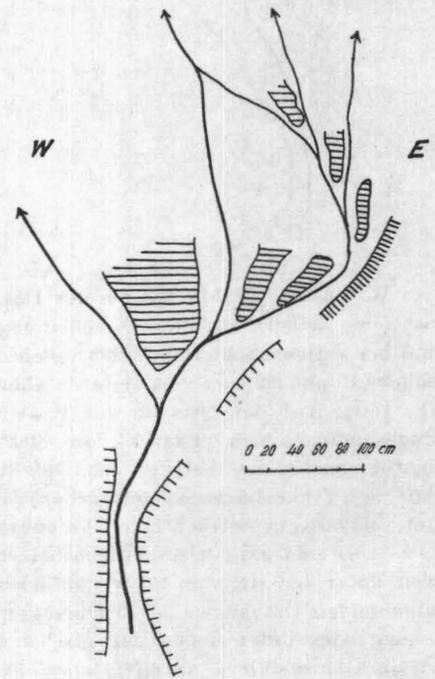


Abb. 4.

Trauntalboden senkt sich vor dem Traunsee (Einzugsgebiet 1255 km²) um 1,8, vergrößert aber nach 2100 m Seeabstand sein Gefälle bereits auf 3‰. Vor dem Hallstätter See (Einzugsgebiet 331 km²) hat die junge Traun 4—6‰. Der Reußschwemmfächer fällt nach dem Vierwaldstättersee mit 3—6‰ ab. Die zuletzt genannten Neigungen übersteigen die der flachen Seedeltaschwemmfächer wieder um ein Mehrfaches und die der flachsten Meeresdeltas schon um das mehrhundertfache. Verfolgt man den Schwemmfächer der Lüttschine von 575 m nach dem Brienersee zu, erhält man 8—9‰ Gefälle. Der drei Kilometer breite Maggiaschwemmkegel, der sich zwischen Locarno und Ascona in den Lago Maggiore hinaus baut und dessen Sektorbogen 5 km mißt, hat zunächst ein Gefälle von 7‰, im oberen Teil aber wird es flacher, so daß sich hier wie an zahlreichen anderen Schwemmkegeln ein konvexes Profil einstellt.

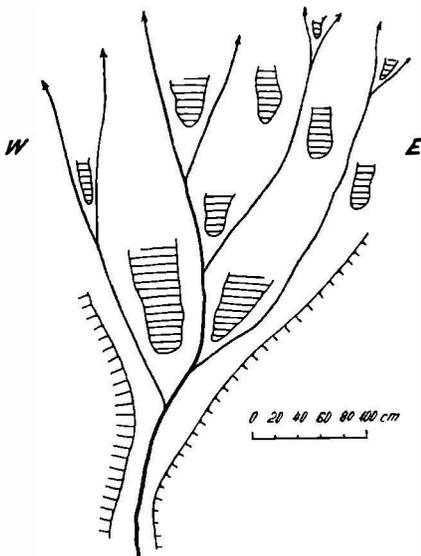


Abb. 5.

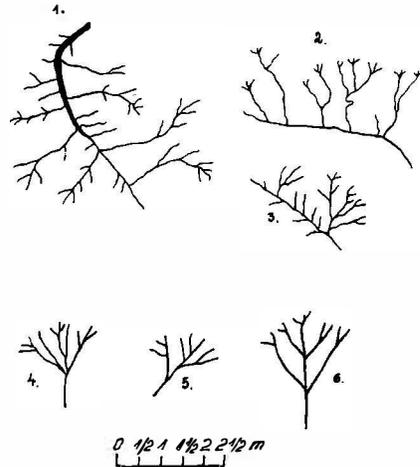


Abb. 6.

W. CZAJKA [1951] hat bei der Darlegung der Mechanik auf den Piedmont-Schwemmfächern auf diese Erscheinungen besonders klar verwiesen und betont, daß bei aktiven Schwemmfächern sich die Flußterminante umkehrt; nicht jeder höhere Punkt ist dort vom tieferen abhängig, sondern jeder tiefere vom höheren [S. 160]. Auf der Ostseite des Faakersees, wo die im Sommer viel benützte Badesandbank sich erstreckt, die nichts anderes als ein Schwemmfächer des Woroutzbaches ist, beträgt das Gefälle zwischen 554—600 m Höhe 11—25‰. Auf dem Zinkenbachschwemmfächerdelta, das den Wolfgangsee im Salzkammergut schon recht beträchtlich einschnürt, mißt man zwischen 539—560 m Höhe 11‰. Das sind ganz beträchtliche Schwemmkegel-Deltaneigungen, die zwar noch weit unter den steilsten Schwemmfächerflächen, die W. CZAJKA [1951] aus den subhumiden Osthängen der Tucumaner Gebirge in NW-Argentinien beschreibt, liegen, oder unter denen der großen und steilen Schwemmkegel, die man in vielen Gebirgstälern antrifft, aber da und dort doch schon den Kegelsektor erkennen lassen. Diese Schwemmkegeldeltas bilden eine Art Übergang zu den

ganz deutlichen Kegelformen, die sich aus den Nebentälern in die Haupttäler hineinbauen und sehr markante Abriegelungen auf den Talsohlen hervorrufen.

Wenn man die Anzahl der Beispiele von Seedeltas in den Gebirgen erweiterte und auch noch mehr Angaben über Schwemmkegel in den großen und kleinen Gebirgstälern einholte, so würden da und dort sicher Neigungsverhältnisse aufscheinen, die zwischen den hier genannten liegen; aber im allgemeinen würden auch dann die Hauptkategorien der Neigungen immer wiederkehren, so daß die Ursache der unterschiedlichen Schwemmfächer- und Deltaflächenneigungen sicher auch allgemeiner Art sein dürfte. Wie die Neigungen geschütteter Halden sich meist durch ihre Steilheit von dem anderen Gelände abheben und im einzelnen die Korngröße und Kantenschärfe des geschütteten Materials für die Endneigung das Maßgeblichste ist, so bestimmen bei dem durch das Wasser verfrachteten und abgelagerten Sedimenten die Beziehungen zwischen Gefälle, Wassermenge, Sinkstoff-Geröllmenge, Geröllgröße und Reibungswiderstand auf dem Untergrund die Formen der Ablagerung. Da jeder dieser Faktoren wechseln kann und auch wechselt, müssen dementsprechend dauernd Veränderungen auf den Schwemmfächern und Schwemmkegelflächen vor sich gehen, wobei aber die Geröll- bzw. Sedimentgröße für die Deltaneigung ein sehr ausschlaggebender Faktor sein muß. In den subariden bzw. subhumiden Gebieten mit sehr wechselnden Wasserführungen werden die jahreszeitlichen Veränderungen aber viel bedeutender sein als in Gebieten mit sehr gleichmäßigen Niederschlägen während des Jahres oder solchen, wo auch einzelne schwere Güsse selten sind oder ganz ausbleiben. Ebenso gehören die wirklich ganz trockenen Gebiete, in denen sogar Güsse eine Ausnahme darstellen, zu den Gebieten, in denen kein Formenwandel der Schwemmfächer auftritt. Aber selbst bei stark wechselnden Wassermengen und Neigungsverhältnissen werden alle jene Hangteile, über die, was für ein Wasserstand auch walten mag, gleich viel an- wie abtransportiert wird, lange die gleiche Form bewahren.

Auffälliger als die allmählichen Hangformungen, während welcher ein gerader Hang von bestimmter Neigung nicht nur steiler oder flacher wird, sondern sich auch in einen konvexen oder konkaven wandelt, sind Änderungen an Riegeln. Auf solche Riegel machte W. CZAJKA in der subhumiden Piedmontzone von NW-Argentinien aufmerksam. Sie kommen noch häufiger in Gebirgen vor, stellen sich aber auch weit abseits von den Gebirgen in fernen Vorländern und selbst in Deltas ein. Ein gutes Beispiel für Riegelbildung an einem großen Fluß im Delta liefert die Donau, in deren Mündungsbereich alte Strandwälle, Dünenzüge und auch festere tonige Barren auftreten. G. ANTIPA [1912, 1935, 1938], H. SLANAR [1945] und M. PFANNENSTIEL [1950] gingen bei ihren Untersuchungen auf diese Erscheinungen ein. Diese Strandwälle, Dünenzüge und festeren Barren gaben vielfach Anlaß zu Stromgabelungen und neuen Deltavorbauten, so der Grindul Chilia, an dessen Ostseite die Verzweigungen in die Arme Steponoj, Solomonov, Babinof und Cernofca erfolgte. Vor dem Grindul Letea kommt es nochmals zu einer Stromvereinigung, nach dem östlich das junge Deltadreieck mit den Armen Stambul, Ocakov, Mittelarm, Ankudinov und Belgord ansetzt. Auch bei der Stromaufspaltung östlich Ismail in die Hauptarme Stepovoj und Srednij, von dem sich letzterer wieder in die Arme Paraša, Ivanešti und Tatar teilt, wirkte ein Grind mit. Bei Überwindung dieser Grinde geht die Tiefe der Donau stark herab. So beträgt sie östlich Kilia im Maximum nur 4,7 m und bei Valkov gar nur 4,5 m. Aber auch diese bescheidenen Tiefen reichen alle noch um drei Meter unter den Meeresspiegel. Verfolgt man den

Talweg der Donau, wie dies J. LEPSI [1941] tat, so ließ sich für den Kiliaarm über 10,98% des Talweges ein horizontaler, über 47,14 ein ansteigender und über 41,88% ein absteigender Verlauf feststellen. Bei Kilia kommen noch Tiefen von über 30 m vor, das größte Gefälle in die Kolke erreicht 66 und der steilste Anstieg aus den Kolken bis 76,68%; oft ist aber die mittlere Anstiegsneigung aus den Kolken heraus geringer als die in die Kolke hinein, eine Erscheinung, die sich an zahlreichen Kolken bei kleineren Flüssen und da vor allem unter Schnellen, Fällen und Wehren sehr deutlich ausbildet.

Alle diese Erscheinungen sind wohl ganz jung und unterliegen dauernden Verschiebungen, wie ja das Mündungsgebiet der Donau überhaupt ein Delta erheblicher Veränderungen ist, wenn man die Entwicklung etwa in die Quartärzeit zurück verfolgt. Nach M. PFANNENSTIEL [1950, S. 59] begann die Geburtsstunde des heutigen Deltas im Würm II, als das Mittelmeer vom Marmarameer Besitz ergriff, der Spiegel des Schwarzen und des Mittelmeeres konform anstiegen und ein Stand von — 21 m erreicht wurde. Vorher, bei noch bedeutend tieferem Wasserstand des Schwarzen Meeres, reichte eine bis zehn Kilometer breite Rinne, deren Tiefenkurve bis unter — 30 m in OSO-Richtung, dann in SSW-Richtung zieht und sich nach Erreichen der — 80 m Isobathe verliert. Das untermeerische Delta, das jünger ist als das heute submarine Bett, dessen absolute Taltiefe M. PFANNENSTIEL [1950, S. 46] mit 10—24 m angibt, verschüttet dieses. Zur Zeit des postglazialen Klimaoptimums kommt es dann zur Überschwemmung der Baltas und der Limane und zu Wasserständen, die 5—6 m über den gegenwärtigen Meeresspiegel reichten. Nehrungen und Barren aus dieser Zeit sind sicher wesentliche Ursachen für den Zusammenschluß von Stromarmen vor und Gabelungen nach den Barren.

An solchen Stellen bilden sich sowohl die Uferdämme (levées), wie die dazugehörigen Dammluflstreckenbayons sehr deutlich aus. Selbst in einer stark sinkenden Deltaebene, wie in der des Mississippi, wo nach R. J. RUSSELL [1939] trotz eines abschnittweisen Deltawachstums von 217—385 m im Jahresdurchschnitt Absenkungen im Bereich des Südwestpasses von 2,05 m im Jahrhundert, beim Südpafß von 1,80 m und 30 km landein beim Headpaß noch solche von 0,60 m festgestellt wurden, trifft man auf gut entwickelte Uferdämme und -überhöhungen. Interessant sind in manchen Deltaebenen die Dammuferseen sowie eigenartig kreisrunde und ovale Seen von recht unterschiedlichen Größen, über die H. WILHELMY [1958] an tropischen Tieflandflüssen berichtete. Im Tantanal in Mato Grosso, im Orinoco-Apure-Mündungsdreieck und in der Magdalena-Niederung in Venezuela treten sie in großer Zahl auf. Es handelt sich nach H. WILHELMY bei den runden und ovalen Formen um Umlaufseen im Bereich der freien Flußmäander, die von Uferdämmen und -erhöhungen umschlossen werden und bei Bildung eines Mäanderdurchbruches dann eine vollständige Abschließung erfuhren. Im Mississippigebiet heißen diese Seen oxbow lakes, Joch-Seen, weil sie oft wie ein Ochsenjoch zu beiden Seiten eines Wasserstranges angeordnet sind und aus zwei gegenüberliegenden Mäanderschleifen hervorgingen. Gleichsam als Miniaturgegenstück zu diesen Umlaufseen lassen sich auf von Wasserriegen durchzogenen Flußsandbänken niedere Sand- und Schlammplatten feststellen, die überall dort recht schön zur Ausbildung kommen, wo an und unter Prallhängen das eben überspülende Wasser Material abgelagert und durch die Verlagerung der Prallstellen eine Um- und Überspülung an zwei bis drei Seiten erfolgt. Hingegen kommen entlang der sich sehr stark verändernden Wasserstränge Flußdamm- und Flußumlaufseen en miniature wegen der ganz schnellen

Auffüllung der tiefen Partien kaum zur Ausbildung; denn sobald die Wasserbetten inaktiv werden, sind sie auch schon fast ganz mit Sedimenten erfüllt. Dennoch fallen die Platten, die bei höchsten Wasserständen sedimentiert wurden, deutlich auf. Das aus den großen Kolken abströmende Wasser verteilt sich oft fächerförmig, wird dabei seicht und es kommt beim Auseandertreten der Wassermassen bei niedrigem Stand sogar zur Auflösung in einzelne Stränge, zwischen denen je nach vorhandenem Material Schlamm-, Sand- und Geröllbänke auftreten. Diese Bänke und Flußinseln rücken aber, tritt Verfestigung durch Vegetation ein oder kommt es zu weiteren Sinkstoffanlagerungen, zur Barrierenfunktion auf, von der eine Zeitlang die Schwemmfächerstreu, also die Winkelweite der Deltadreiecksform, bestimmt wird. Bleibt dagegen die Wassermenge in einem Strang möglichst weithin beisammen, kommt es in diesem Abschnitt zu einem besonders schnellen Deltavorbau, da ja mit der Festhaltung der Wassermenge auf einem schmalen Streifen die für den Deltabau zur Verfügung stehenden Materialmengen sich nur wenig flächenhaft verteilen.

In vielen Deltas, wo eine Regulierung eine Eindämmung des Flußlaufes brachte und für den Wasserzusammenhalt sorgte, kommt es zu einer Steigerung der Wachstumsgeschwindigkeit. Bei der Po- und Rhöneregulierung bzw. ihrer Eindämmung ließ sich dies ebenso verfolgen wie nach der Regulierung des noch jungen Rheines und der noch jungen Rhône vor dem Eintritt in den Boden- bzw. Genfersee. Nur liegen die Verhältnisse in den flachen Deltas viel komplizierter als bei den Flußmündungen in Gebirgs- oder Vorlandseen, da in den Meeresdeltas durch die Flut, selbst der bescheidenen des Mittelmeeres, und auch durch Windstau der Meereseinfluß doch beachtlich in das Delta hinein reichen kann. So steigt z. B. im Donaudelta bei Ostwinden von der Stärke 6—8 der Wasserspiegel um 60—75 cm an, was bei den wenigen Zentimetern Durchschnittsgefälle die ursprüngliche Wasserflächeneigung über Zehnern von Kilometern aufhebt. Auch dringt dann schweres Salzwasser in der Bettiefe nach dem Fluß vor und füllt die tiefen Teile des Flußbettes, so daß das leichtere Süßwasser überhaupt nur an der Oberfläche vorhanden ist. Da die Talwege der verschiedenen Arme alle unter dem Meeresspiegel liegen, verdrängt jede Sedimentation in diesen Teilen bereits Meereswasser, wie es auch das Süßwasserniveau verändert. So können bereits Sinkstoffabsetzungen, in der Bettiefe noch weit unter dem Meeresspiegel, schon Barrenwirkung ausüben. Nur so sind die meernahen letzten Aufgabelungen, die an der Donau in 3 bis 15 km Meeresabstand erfolgen, zu verstehen.

Die Vorgänge, die sich in den großen, aber auch in den kleineren flachen Deltas in der Tiefe unter der Wasseroberfläche vollziehen und wegen der Wassertrübe für den Beobachter fast immer unsichtbar ablaufen und darum meist nur indirekt erschlossen werden können, lassen sich an Kleinformen in Naturlaboratorien, zu denen die Sand- und Schlamm-bänke an kleinen Flußläufen in regelmäßig überschwemmten Gebieten aufrücken, recht deutlich sichtbar verfolgen. Erstrecken sich die großen Deltas über tausende von Quadratkilometern, so sind es hier wenige Quadratmeter, die sich mit einem Blick übersehen lassen, und viele Vorgänge verlaufen hier wie dort sicher ähnlich. An Dutzenden von Sandbänken an der Drau, Gail und den kleinen Nebenflüssen der Mur aus dem Steirischen Randgebirge wurden vom Verfasser durch Jahre Beobachtungen gesammelt; als besonders geeignet erwiesen sich kleine Sandbänke, die zwischen Buhnen in ruhigem Wasser und geschützt von der Strömung durch die Regulierung abgelagert wurden. An der Drau bei Villach

erfahren im Sommer während Schönwetterperioden die Sandbänke infolge der intensiven Gletscherschmelze in den Hohen Tauern während der wärmsten Tagesstunden innerhalb 24 Stunden regelmäßig eine Überflutung von 20—30 cm Höhe die zwar nur wenige Stunden dauert, aber ausreicht, um eine glatte Sandbankoberfläche zu schaffen. Während des Fallens des Flußspiegels kommt es dann zur Zerschneidung der Sandbänke durch kleinste seitliche Gerinne mit einer Wasserführung von einigen Kubikzentimetern bis einigen Zehnerkubikzentimetern; ferner bilden sich Deltabauten im fast stehenden Wasser zwischen den inneren Bühnen. Die Anlage kleinster Zuleitungsgräben ermöglichte es, die Wasserführung konstant zu erhalten und zu regulieren. Was sah man da?

Bei Neigungen der Sandbänke von 5—20 cm, bei 1,5—2 m Horizontalabstand (Gefälle 25—100%) und Wasseradern von wenigen Zentimetern Breite, einigen Millimetern Tiefe sowie Fließgeschwindigkeiten von wenigen bis über 20 cm in der Sekunde zeigte sich auf den zu Schwemmfächern umgewandelten Sandbankabschnitten in den oberen Teilen Einschnitten und schon wenige Zentimeter nach dem Beginn des Wasseraustrittes Bogenbildung. Diese war immer begleitet von Materialwegnahme an der Prallseite. Dort war die Abspülung so heftig, daß es bereits knapp unterhalb des Prallhanges zum Liegenlassen des vorher aufgenommenen Materials und zur Aufspaltung der Wassermenge in mehrere, sich schnell verändernde Wasseradern und Sandinseln kam. Gerade diese Aufspaltung wirkte bald wie eine Barre. Die Mehrzahl der Wasserfäden zwischen den Sandinseln wurde schwächer und schwächer, aber eine meist seitliche Ader, die durch den Ausfall der anderen mehr Wasser erhielt und deshalb — in dieser Ader wurde zunächst noch wenig Sand verfrachtet — auch offen blieb, rückte nun zur Hauptader auf und schob sich kräftig nach dem seichten Bühnenwasser vor. Legte man Strohhalme oder kleine Leisten längs der Hauptwasserader, so sah man deutlich, wie durch den erzielten Wasserzusammenhalt der Deltavorbau gefördert wurde und dieser sichtbar wuchs. Es zeigte sich auch, daß die Verlagerung des Sandes von der Spitze des Schwemmfächers nach den tieferen Teilen und in den neuen Deltavorbau nicht gleichmäßig, sondern etwas stoßweise vor sich ging. An Stellen wo sich ein Prallhang bildete, wurde viel Material weggenommen, verfrachtet und darunter im Fächer abgesetzt. An hell aufglänzenden Glimmerschüppchen, deren Bahn sich leicht verfolgen ließ, erkannte man, wie die Blättchen hochstiegen, dann plötzlich unruhig wurden, fächerförmig auseinander strebten und nach einigen bis 15 cm langem horizontalem Transport liegen blieben. Im Stadium der Vielarmigkeit drohte die Sandverfrachtung zu stocken, ja auch das Wasser schien nicht mehr recht zu wissen, wohin fließen, und erst wieder mit dem Sammeln in einem Gerinne setzt eine neue Phase ein, die meist einen seitlichen Durchriß in der Fächerbank schuf, und wo nun Materialwegnahme aus dem Bereich des eben erst erhöhten Bankgebietes begann.

In der geschilderten Art wiederholten sich Materialwegnahme, Wasser-Verteilung und Ablagerung in ermüdender Weise. Lagerten etwas gröbere oder fester zusammenhaftende Sandkörner auf dem Fächer, wirkten diese Stellen als Barre und deutlich zeigte sich, wie das Wasser ihnen eine Zeitlang zu beiden Seiten auswich. Immer wieder vollzog sich ein Wechsel von Aufschüttung, Einreißen und Abwärtsverlegung, wodurch es im ganzen zu einer Verflachung des Gesamtfächers kam. Die Erniedrigung betrug 1—4 cm, was sich durch eingesteckte Gräser einwandfrei feststellen ließ, während dessen ein Deltavorbau von 5—20 Quadratdezimetern in dem 20—30 cm tiefen Bühnenwasser zustande

kam, wozu 10—60 Kubikdezimeter Material nötig waren. Innerhalb 4—8 Stunden vollzogen sich diese Formungen und Deltabauten, für deren Entstehung das Auftreten von Bogenbildung an den Wassersträngen und ihr Abwärtswandern maßgeblich beteiligt waren. Von den Prallstellen abgesehen, fehlten aber gut sichtbare Kolkbildungen auf den Fächerflächen.

Die Zeichnungen 1—5 (S. 43 f.) zeigen die Verschiebungen der einzelnen Wasserstränge (die Wasserführung des Gesamtstranges betrug $15 \text{ cm}^3/\text{sec}$). Man sieht deutlich, wie im Zwiesel zweier Arme fast immer eine Sandbank liegt. Diese entsteht zumeist dadurch, daß die Wasserader zunächst leicht aufschüttet, dann plötzlich von dem flachen Damm an einer Stelle ausbricht. Zwischen der Gabelung wird die Sandbank sichtbar, da unmittelbar nach der Verzweigung beide Äste sich etwas eintiefen. In Abb. 1 gewahrt man, wie nach dem Einschnitt und Prallhang eine Aufspaltung in fünf Arme erfolgt und zwischen den Armen nur kleine, sich schnell verändernde Sandinseln auftauchen, während weiter abwärts größere, aber ganz flache Sandplatten lagern. In Abb. 2 entwickelte sich wieder ein Hauptstrang zwischen den oberen kleinen Sandbänken; die Platten darunter wurden schmaler und die Eintiefung dazwischen etwas stärker, dafür erfolgte etwas unterhalb Aufschüttung und zwei neue Gabelungen stellten sich ein. Auf Abb. 3 verlagerte sich die Mehrfachgabelung etwas abwärts und oberhalb bildete sich bei der ersten Gabelung eine größere Sandbank aus. Abb. 4, die nächste Phase, vier Stunden nach Ausbildung der Formen auf Abb. 1 entstanden, läßt eine Verlagerung nach rechts erkennen, die eintreten mußte, da der Westarm in Abb. 3 akkumulierte; dadurch glitt die Hauptader nach Osten ab, schuf einen neuen Prallhang, unter dem es zu Akkumulationen und neuen Gabelungen kam. Abb. 5 zeigt eine wesentlich andere Situation. Der mittlere Arm wurde zum stärksten und schneidet zwischen den zwei obersten größeren Sandbänken ein, die kleinen, die man auf Abb. 1 und 2 sieht, sind schon ganz verschwunden. Der mittlere Arm schüttet weiter unten auf und gabelt sich zweimal. Ganz gut erkennt man, wohl etwas verbreitert, die Sandbänke von Abb. 4, die sich erhielten, und unter denen kleine neue Gabelungen gerade zur Ausbildung ansetzen.

Es ergab sich ein Zusammenhang zwischen der Ablagerung von Sandbänken und einer fächerförmigen Betterhöhung in einer ersten Phase, auf die dann eine zweite mit neuer Einrißbildung und kräftigem Abtransport folgte. In dieser Phase kam es auch immer zu einem stürmischen Deltavorbau. Diese Vorgänge wiederholten sich ständig, allerdings mit wechselnder Stärke, wechselnder Ausdehnung und unterschiedlicher Dauer der einzelnen Phasen. Auf den kleinen Schwemmfächern von ganz wenigen Quadratmetern schwankten die Areale, über die sich die einzelnen Vorgänge erstreckten, nicht einmal im Verhältnis 1 : 2, und für die Zeitdauer, die die Vorgänge beanspruchten, lagen die Unterschiede etwas weiter auseinander, aber kaum mehr als etwa 1 : 3.

Auf den Sandbänken sah man auch eigenartige Formen, die man als „umgekehrte Deltafächer“ bezeichnen könnte. Man muß sich dabei die einzelnen Deltaarme nicht als das Ende, sondern als den Anfang eines Rinnen-Flußsystems denken. Es handelte sich um prielartige Wasseradern, die sich im feuchten, sehr stark mit Wasser durchtränktem Sand einstellten. Selten quoll nur eine einzelne Wasserader aus dem Sand hervor, vielmehr war es die Regel, daß 3—4 Adern, die fächerartig nebeneinander lagen, austraten. Aber auch Gabeln kamen vor. Die Vereinigung der Fächeräste erfolgte zwar nicht in einem Punkt, sondern es bestanden kleine Abstände, die etwa $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{6}$ des äußeren

Fächerbogens ausmachten. Diese Sandbankrinnensysteme ähnelten ganz den Prielern im Watt. Die Abstände, mit denen die Seitenäste in den Hauptast einmündeten, betragen bei den kleinen Seitenadern etwa das 3—6-fache der Hauptastbreite, während die Länge der kleinsten Seitenäste das 7—10-fache, die der größeren um das 20-fache der Abstände zwischen zwei Ästen ausmachten (Abb. 6). Auch auf diesen flachen Sandbänken begann bereits der Kampf um die Wasserscheide, die allerdings erst eine wenig gebuchtete Linie bildete. Den Kilometern in den Flußsystemen der Großlandschaften, entsprachen hier die Dezimeter-, ja Zentimeterabstände. Warum auf den Sandbänken solche prielartige Miniaturflußbäume entstanden und die Gerinneanfänge und -abstände ähnliche Verhältnisse einhielten wie bei den regulären Talsystemen, dafür läßt sich keine befriedigende Antwort geben, soferne man sich nicht mit der Tatsache begnügt, daß hier eben Formen in kleinsten Maßstäben auftraten.

Stieß man ein Hölzchen am Beginn der ersten Rinnsale in den Sand, so sah man, daß dort das Wasser besonders heftig hervorquoll, während an den Partien dazwischen dies viel weniger der Fall war. Dort, wo die ersten Wasseraustritte vor sich gingen, liefen kleinste unterirdische Wasseradern im Sand zusammen und der Wasserandrang wurde so groß, daß ein Hervorbrechen an der Oberfläche eintreten mußte. Es wäre auch denkbar, daß an solchen Stellen ein Kapilarsystem restlos mit Wasser gefüllt war, dadurch der Reibungswiderstand in ihm äußerst gemindert wurde und das Wasser austrat. Solche Erscheinungen stellen sich auf stärker geneigtem Wiesen- und Ackergelände nach katastrophalen Wolkenbrüchen gelegentlich ein, wo das Wasser fern von jedem sichtbaren Gerinne dann plötzlich mehrere Dezimeter hoch aus dem Boden schießt, wie das während der Unwetterkatastrophe am 12. August 1958 im Breitenautal im Steirischen Randgebirge zu beobachten war, wo im tiefgründigen Verwitterungsmantel die unterirdischen Wasserstränge sich so füllten und ausweiteten, daß bei ihrem Austritt ganze Höhlungen und Gänge entstanden.

Die Abstände und Anordnungen der Gerinne bei den Miniaturprielbäumen sind sicher von der Wasserführung im Sand und den kleinsten unterirdischen Wasserfäden mit abhängig. Wie jede kleinste Rinne ein Einzugsgebiet haben muß und ein Einschneiden immer erst in einigem Abstand von den Kämmen, Rücken oder höchsten Höhen erfolgen kann, so müssen auch hier Mindestabstände zwischen den Wasseradern, so klein sie im mit Wasser fast gesättigtem Sand auch sind, eingehalten werden. Folgt man einem Flußlauf oder auch nur einem ganz kleinen Flußbaum-Gerinnesystem von der Hauptader aufwärts, so erreicht man sowohl in groß- wie kleinsträumigen Systemen recht bald — dieses „bald“ gilt für die Anzahl der Gerinnegrößenordnungen, die zu durchwandern sind, um bis an ein Ende zu kommen — und zwar meist nach drei bis vier Abzweigungen, die zugleich ein Hineinschreiten in kleinere Einheiten darstellen. Mit der Reihe Haupttal — wobei unter Haupttal ein Tal mit einigen 1000 km² Einzugsgebiet verstanden sein soll — Nebental 1., Nebental 2. Ordnung oder Kleintal von nur mehr wenigen Kilometern Länge und Kleinsttälchen wird bereits eine Wasserscheide erreicht. In den großen Flußgebieten wie bei den kleinen im Bereich der Miniaturflußbäume auf den Sandbänken und in den Prielgerinnen sind diese Abstufungen immer wieder anzutreffen. Sie kehren in den Deltas wieder, wo selbst auf den größten selten mehr als 3—4 erkennbare Deltafächer und -vorbauten hintereinander zu erkennen sind. Die rhythmische Ordnung scheint da relativ eng begrenzt zu sein, während die Ausmaße der Fluß- und Gerinnesysteme dagegen eine fast unbegrenzte Fülle aufzeigen.

Literaturnachweis

- ANTIPA, G.: Das Überschwemmungsgebiet der unteren Donau. Anuarul Inst. Geologic al Romaniei, Vol. IV, S. 225 ff. Bucuresti 1912.
- Les bonifications hydrobiologiques des Deltas. Rappoport pour les réunions scientifique de la commission internat. pour l'exploration scientif. de la mer méditerranée. Bucuresti 1935.
- Quelques observations concernant les bases géophysiques des travaux destinés à assurer la navigabilité des bouches-du-Danube. Bull. de la Sect. scientif. de la Academie Roumaine, XIX/8, Bucuresti 1938.
- CREDNER, G. R.: Die Deltas. *Pet. Ergh.* 56, 1878, Gotha.
- CZAJKA, W.: Schwemmfächer und Schwemmebene in der Piedmontzone. *Die Erde*, Bd. II, 1950/51, 155—166.
- Schwemmfächerbildung und Schwemmfächerformen. *Mitt. Geogr. Ges. Wien*, Bd. 100, 1958, 18—36.
- GULLIVER, F. H.: *Shoreline Topography*. USA Proceedings Amer. of Arts and Sciences, Vol. XXXIV, 1899.
- KAUFMANN, H.: *Rhythmische Phänomene der Erdoberfläche*. Braunschweig 1929.
- LEPSI, I.: Das Gefälle der Talwege im Donaudelta. *Pet. Mitt.*, Bd. 87, 1941, 267—270.
- MARINELLI, O.: L'incremento del delta del Po nel secolo. *Rivista Geogr. Ital.*, XIX, 1898.
- Sull età dei delta dei fiumi italiani. *La Géographie*, XIV, Fasc. 1—2, 1926.
- MARTONNE de E.: *Traité de Géographie Physique*. Tome second, 971—996, Paris 1926.
- PESCHEL, O.: Neue Probleme der vergleichenden Erdkunde. Leipzig 1870, 110—129.
- PFANNENSTIEL, M.: Die Quartärgeschichte des Donaudeltas. *Bonner Geogr. Abhandlungen*, H. 6, Bonn 1950.
- RUSSEL, R. J.: Morphologie des Mississippideltas. *Geogr. Zeitschr.*, 45. Bd., 1939, 281—293.
- SAMOJLOV, I. V.: *Die Flußmündungen*. Gotha 1956.
- SLANAR, H.: Zur Kartographie und Morphologie des Donaudeltas. *Wiener Geogr. Studien*, H. 12, Wien 1945.
- WILHELMY, H.: Umlaufseen und Dammuferseen tropischer Tieflandflüsse. *Zeitschrift f. Geomorphologie, Neue Folge*, Bd. 2, H. 1/2, 1958, 27—54.