



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000305821

1833^x/a

26597

copy.

UNTERSUCHUNGEN
ÜBER DIE
BETTAUSBILDUNG
GERADER ODER SCHWACHGEKRÜMMTER
FLUSZSTRECKEN MIT BEWEGLICHER SOHLE

VON

H. ENGELS

GEH. HOFRAT UND PROFESSOR AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN DRESDEN

F. Nr. 26597

MIT 5 TAFFLN



BERLIN 1905

VERLAG VON WILHELM FRNST u. SOHN

GROPIUS'SCHE BUCH- UND KUNSTHANDLUNG.

X
1833/a



III 33614

Untersuchungen über die Bettausbildung gerader oder schwach gekrümmter Flußstrecken mit beweglicher Sohle.

Von H. Engels.

(Mit Abbildungen auf Blatt 63 bis 67 im Atlas.)

(Alle Rechte vorbehalten.)

Während in Flußstrecken, deren Mittelwasserufer in einem gewissen gegenseitigen Abstände festgelegt sind und deren Grundriß eine Aufeinanderfolge ausgeprägter Krümmungen aufweist, der Niedrigwassertalweg eine ziemlich beständige Lage hat, indem er zwischen den einbiegenden Ufern überschlägt und dabei die Schwellen austieft, die bei Hochwasser die den ausbiegenden Ufern vorgelagerten Geschiebebänke miteinander verbinden, ist solches in der Regel nicht der Fall in geradlinigen oder schwach gekrümmten Wasserläufen, auch dann nicht, wenn ihre Mittelwasserufer unter sonst gleichen Verhältnissen in dem gleichen gegenseitigen Abstände ausgebaut sind. Zwar zeigt sich auch bei diesen eine Schlängelung des Niedrigwassertalweges, aber er ist nicht ortsbeständig, da die Geschiebebänke, zwischen denen er sich hindurchwindet, bei jedem Hochwasser aufs neue ihren Ort verändern. In beiden Fällen bezweckt eine Verbesserung des Fahrwassers bei Niedrigwasser eine Vertiefung der Fahrrinne auf den Übergängen und stellt eine Aufgabe dar, die nur dann mit Aussicht auf dauernden Erfolg durchgeführt werden kann, wenn man eine zuverlässige Kenntnis davon hat, wie sich diese Übergänge bilden und

verändern. Nun wissen wir wohl, daß in gekrümmten Flußstrecken bei Hochwasser die Geschiebe unter Kreuzung des Talweges von einem ausbiegenden Ufer zu dem nächsten ausbiegenden Ufer unterhalb wandern.¹⁾ Soweit es sich aber um gerade oder schwach gekrümmte Flußstrecken handelt, sind unsere diesbezüglichen Kenntnisse durchaus unsichere und ungenügende.

Vielleicht die erste eingehende Beobachtung über das Verhalten gerader Flußstrecken verdanken wir Grebenau, der vor 35 Jahren die Aufmerksamkeit der Fachkreise auf die in dem übermäßig begradigten Oberrhein auftretenden wandernden Kiesbänke lenkte.²⁾ Er erklärt das Auftreten der Kiesbänke in folgender Weise:

„Da die das Geschiebe in die Flüsse führenden Gebirgsbäche stets ein stärkeres Gefälle haben als der Fluß und immer seitwärts einmünden, so muß das aus dem Bach kom-

1) Zeitschrift für Bauwesen 1900 S. 358 und die später unter 4) angegebenen Quellen.

2) Heinrich Grebenau, Der Rhein vor und nach seiner Regulierung auf der Strecke von der elsässisch-bayerischen Grenze bis Germersheim. Dürkheim a. d. H. 1870.

Akc. Nr.

3951/50

mende Geschiebe sich unter der Zusammenwirkung von Bach und Fluß unterhalb der Ausmündung des ersteren an demselben Ufer als ein flußabwärts gerichteter Schuttkegel ablagern. Dieser bildet den Anfang einer Kiesbank, welche je nach dem Maß ihrer Ausdehnung den Fluß zum Ausweichen an das andere Ufer nötigt. Hierdurch, und da die Bänke abwechselnd in gewissen Abständen seitwärts solche Schuttkegel in den Fluß bringen, wird der Keim zu der undulierenden oder serpentinierenden Talweglinie der Flüsse gelegt. Bei jeder Anschwellung des Flusses, wodurch das Gefälle vermehrt wird, werden diese an den Flußufern liegenden Schuttkegel talabwärts bewegt, wobei jede Kiesbank gleichsam auf die andere drückt und, da das Wasser stets nahezu die gleiche Querprofilfläche zu seinem Abfluß erfordert, dieselbe vorwärts schiebt. Schließlich wird unter der stetigen ausgleichenden Wirkung der Wasserfäden am Flußgrund, durch das unausgesetzt erfolgende Hinwegführen des leichteren Schlammes, Sandes und des feineren Kieses, durch die auf längere Zeitdauer sich gleichbleibende Wassermasse und Geschwindigkeit in die Sortierung des Kieses, in die Lage desselben in bezug auf die Ufer und den Talweg, in die Entfernung, Länge, Breite und Höhe der Kiesbänke und in die Tiefe der Talwegrinne eine gewisse Regelmäßigkeit gebracht, welche auf den ersten Blick überrascht, bei näherer Untersuchung der Erscheinung aber als notwendige Folge einfacher Naturgesetze sich herausstellt.“

Grebenau stellte ferner fest, daß zwischen den abwechselnd am linken und rechten Ufer gelagerten Kiesbänken der Talweg sich hindurchschlängelt. Das Vorrücken der Kiesbänke erfolgt nach Grebenau „im allgemeinen in der Weise und dadurch, daß die einzelnen Sandkörner und Kiesel am oberen, d. i. wasseraufwärts gerichteten Ende der Kiesbank von der Geschwindigkeit des Flusses an der Sohle in Bewegung gesetzt und so lange weitergeführt werden, bis sie an eine Stelle kommen, wo die Geschwindigkeit zu klein ist, die Kiesel zu bewegen, in welchem Falle sie liegen bleiben. Die Gestalt der Kiesbänke, welche am Rhein bei kleinem Wasser nicht selten zwei Meter über dem Wasserspiegel hervorragen, gibt eine vollständige Erklärung der Erscheinung. Alle Kiesbänke sind stromaufwärts ganz flach und spitz abgerundet, wasserabwärts dagegen breit, meistens mit zwei Hacken versehen, krebsscherenartig geformt und so steil abgebösch, als der Kies sich halten kann. Wird nun der Kies einer hinreichend hoch überfluteten Kiesbank am oberen Ende oder auch auf deren ganzen Rücken in Bewegung gesetzt, so rollt er auf und neben der Kiesbank in einer den Stromfäden parallelen Richtung weiter und fällt schließlich über den höchsten Rand der Kiesbank in die ehemalige Talwegtiefe hinab. Auf diese Weise wird die Kiesbank stets oben kürzer, unten länger; sie rückt also talabwärts. Hierbei bleibt, da bei Hochwasser die Wasserfäden unter sich und nahezu dem Ufer parallel sind, die Kiesbank stets auf derselben Seite des Talwegs, wo sie ursprünglich war, ohne jemals denselben zu kreuzen“.

Grebenau hebt noch hervor, daß die Kiesel stets auf einer schiefen Ebene von geringer Steigung, die die Oberfläche der Kiesbank in der Richtung ihrer Länge bildet, hinangewälzt werden.

Die Abb. 2 und 3 Bl. 63 und 64 bringen Lageplan und Längenschnitt von Kiesbänken kurz unterhalb Straßburgs nach einer Aufnahme vom Jahre 1882. Abb. 5 Bl. 63 u. 64 stellt eine etwa 60 km weiter unterhalb im November 1893 bewirkte Aufnahme des Rheinbettes dar.

Die Grebenauschen Anschauungen haben m. W. nur eine kritische Beurteilung erfahren, die aber um so gewichtiger ist, als sie von einem der vortrefflichsten Kenner des Oberrheins, E. Faber³⁾, herrührt: „Zur Aufstellung seiner Gesetze stützte sich Grebenau auf zu wenige, meist nur bei Niedrigwasser vorgenommene Messungen und Beobachtungen. Wohl nicht allein wegen der mit höheren Wasserständen wachsenden Schwierigkeiten der Aufnahme, sondern weil Grebenau nach seinen Angaben und Berechnungen der Anschauung war, daß die Stromsohle des Oberrheins bei Nieder- und Hochwasser der Hauptsache nach die gleiche Form zeigt und daß ein wesentlicher Unterschied nur in der Schnelligkeit liegt, mit der sich Kiesbänke und Talweg bei verschiedenen Wasserständen zu Tal schieben.“

Gleichzeitig mit Grebenau hat Georg Lavale in eingehender Weise die Bewegung der Geschiebe beobachtet.⁴⁾ Seine Beobachtungen beschränken sich aber nicht auf den Oberrhein, sondern umfassen auch den Main, Teile der Donau, des Inns, des Lechs und der Salzach. Sie sind daher wertvoller wie die Grebenauschen und bilden heute noch ein ausgezeichnetes Studienmaterial für den, der sich insbesondere über Geschiebebewegungen unterrichten will. Lavale hat dem Vorgange der Ablagerung und des Wanderns der Geschiebemassen besondere Aufmerksamkeit zugewendet und dabei allenthalben die Schwellenbildungen beobachtet, so daß er zu dem Schlusse kommt, daß diese „wohl als eine allen geschiebeführenden Flüssen gemeinsame angesehen werden muß“. Nach seinen Beobachtungen tritt sie in korrigierten Flüssen mit gleichmäßiger Breite deutlicher auf als in solchen mit ungleichmäßiger Breite. Seine Beobachtungen über die Ablagerung der Geschiebe in verhältnismäßig zu breiten Stromstrecken und an ausbiegenden Ufern, sowie über die Wanderung der Geschiebe in Flußkrümmungen sind für die vorliegende Frage ohne Bedeutung. Nur das sei hervorgehoben, daß Lavale diese Wanderung genau so beschreibt, wie ich sie im Modellversuche beobachtet habe¹⁾, daß nämlich das wandernde Geschiebe von einem ausbiegenden Ufer zum nächsten unterhalb überschlägt.

Für die hier zu erörternden Untersuchungen ist aber das anzuführen, was Lavale über das Auftreten von wandernden Geschiebeebänken in geraden Flußstrecken sagt:

„Führt ein Fluß Material in so bedeutender Masse, daß sich die einzelnen Stücke hintereinander anschließen, und bietet der vordere Teil des Materials dem Stoße des Wassers für die massenhafte Fortführung eine zu geringe Fläche dar, dann läuft selbst in regelmäßigen und geraden Stromstrecken eine Materialbank an, und es wächst diese so lange auf, bis der infolge des partiellen Aufstaus entstandene Stoß, sowie die durch die Wasserablenkung entstandenen Wirbel kräftig genug sind, die einzelnen Steine am oberen Ende der Bank

3) Über die Verbesserung der Schiffbarkeit des Oberrheins Deutsche Bauzeitung 1897 S. 307.

4) Unsere natürlichen Wasserläufe. Hydrotechnische Studien von Georg Lavale, herausgegeben von Jacob Rapp. Weilheim 1883.

abzutreiben. Das abgetriebene Material lagert sich dann am unteren Ende der Bank im stilleren Wasser wieder ab. Es entsteht dadurch ein Wandern der Kiesbank stromab. Der Stromstrich, d. h. das Hauptwasser, wird durch die Bank auf das gegenüberliegende Ufer gewiesen und prallt von hier wieder auf das andere Ufer ab. Dadurch bildet sich abwärts der Bank in der Nähe des anderen Ufers eine zweite, und auf ähnliche Weise eine dritte, vierte usw. Bank. Die Materialbänke sind ähnlich wie zwei an konvexen Ufern schräg gegenüberliegende Bänke durch Schwellen miteinander verbunden. Der Talweg schlängelt sich zwischen den Bänken hindurch, und es wandert die Schlangenlinie des Talwegs mit den Kiesbänken und Schwellen abwärts. Erst in den starken Konkaven löst sich die betreffende Kiesbank, und es läuft der Kies abwärts der Konkaven wieder in eine Bank zusammen, währenddem auf der entgegengesetzten Seite die ankommende Materialbank an die am konvexen Ufer liegende Bank oben anschließt und der untere Teil dieser Bank abgetrieben wird.“

Die sehr wichtige Frage, welche Wasserstände für die Querschnittsgestaltung ausschlaggebend sind, beantwortet Lavale dahin, daß die wenigen, außerordentlich hohen Wasserstände nicht lange genug andauerten und die kleinen zu unwirksam seien, um auf die Querschnittsform von besonderem Einflusse zu sein. Es müsse vielmehr angenommen werden, daß dies die unter eine gewisse Grenze nicht zurückgehenden Wasserstände seien. Er sieht als diese hauptsächlich wirksamen Wasserstände die 182 höchsten im Jahre bzw. deren arithmetisches Mittel, den „hydraulischen Wasserstand“, an. Dann geschieht einer anderen Ursache der Schwellenbildung wie folgt Erwähnung: „Ist in einem Strome, welcher in Menge feines, möglichst gleichmäßiges Material treibt, die feine Materialmasse nur mit einzelnen, wenigen groben Steinen vermengt, dann üben die wenigen groben Stücke auf das Gefälle keinen besonderen Einfluß aus. Die vereinzelt schweren Stücke rollen, in der feineren Masse eingeschlossen, längere Zeit fort, bis sie den festen Grund erreichen und hier liegen bleiben. Haben sich mehrere grobe Stücke neben- und übereinander abgelagert, dann veranlaßt die Schwellung und raschere Bewegung des Wassers die Zerteilung und raschere Abführung des feineren Materials, währenddem die schwereren Stücke zurückbleiben und sich zu einer Schwelle vereinigen. Die auf diese Weise entstehenden Schwellen liegen in der Regel weit auseinander, gehen schräg durch den Fluß und sollen ihre Lage beibehalten.“ Solche Schwellen hat Lavale im Main gefunden.

Der Herausgeber der Lavaleschen Studien, Rapp, gibt in einem Berichte⁵⁾ das in Abb. 9 Bl. 63 und 64 dargestellte Bild von der stark geschiebeführenden Donau zwischen Ulm und Kelheim und bemerkt dazu, daß sich in größerer Tiefe von der einen nach der anderen Kiesbank schräg zur Mittellinie des Flusses ein Kiesrücken hinüberzieht, der, von den beiden Kiesbänken an langsam abfallend, etwa dort, wo er die Flußachse bei *a* schneidet, seine größte Tiefe besitzt.

5) Die Schiffbarkeit der Donau zwischen Ulm und Kelheim. Bericht über die IX. Generalversammlung des Vereins für Hebung der Fluß- und Kanalschiffahrt in Bayern in Neu-Ulm am 28. Mai 1899.

Einer eingehenden Beschreibung der genannten Donau-Strecke von Faber⁶⁾ entnehmen wir, daß diese Strecke nach denselben Grundsätzen wie der Oberrhein korrigiert, „oder, um mit Tulla die Bauweise richtig zu bezeichnen“, durch Anlage von Durchstichen und durch Sicherung der beiderseitigen Ufer mit festen Bauten — Parallelwerken — „rektifiziert“ worden ist. Der Talweg zeigt im allgemeinen eine um so größere Veränderlichkeit, um so schroffere Übergänge, je gestreckter der Flußlauf ist. „Das allmähliche Verschieben der Kiesbänke und des Talweges nach abwärts in den geraden oder sanft gekrümmten Flußstrecken mit übermäßigen Breiten läßt sich bei kleineren Anschwellungen leicht verfolgen. Dagegen lassen sich die Umbildungen bei hohen Wasserständen in ihrem vollständigen Verlaufe nicht beobachten, mindestens ist dies bis jetzt noch nicht geschehen. Doch ist aus einzelnen Beobachtungen bekannt, daß sich je nach der Höhe und der Dauer der Wasserstände der Talweg streckt und sich die Tiefen im Flußbette mehr oder weniger ausgleichen.“ „Es darf daher“, so fährt Faber fort, „nach den Beobachtungen bei Niederwasser und Mittelwasser nicht vorausgesetzt werden, daß eine Verschiebung der Kiesbänke und des Talweges ohne wesentliche Änderungen der äußeren Form auch bei den stärksten Anschwellungen vor sich geht. Eine Bestätigung dieser Annahme ergibt sich sogar aus der Gestaltung des Flußbettes bei Niederwasser.“

Faber bezieht sich zum Beweise seiner Behauptung, daß für die Donau genauere Aufnahmen über die Gestalt des Flußbettes nicht vorhanden sind, auf die in Abb. 5 Bl. 63 und 64 dargestellte Rhein-Strecke und macht auf die tiefen Rinnen aufmerksam, die sich längs der beiden Ufer weit über die Strecken hinaus hinziehen, denen der Talweg bei Niedrigwasser folgt. Er glaubt annehmen zu dürfen, daß bei einer so vorbereiteten Sohle der Strom bei hohen und namentlich raschen Anschwellungen vielfach den kürzeren Weg längs der Ufer fort durch eine Nebenrinne nehme und daß dann eine Verlegung der Fahrrinne von einem zum anderen Ufer erfolge, ohne daß die nebenan liegende Kiesbank in ihrer Hauptmasse zu Tal gewandert sein müsse. Bei fallendem Wasser finde sodann wieder eine Rückbildung statt, und es könne mit Sicherheit angenommen werden, daß die Veränderungen, die sich von Niedrigwasser zu Niedrigwasser beobachten ließen, um so weniger von einer Verschiebung der Kiesbänke herrührten, wie sie bei dem sogenannten Wandern angenommen werde, je höher die Anschwellungen zwischen den einzelnen Niedrigwassern aufgetreten seien. Bei einem stetigen Wandern der Kiesbänke müsse eine so große Geschiebebewegung vorausgesetzt werden, wie sie zum Glück wohl nicht vorhanden sei. Man solle daher vielleicht Flußstrecke mit pendelndem Talweg sagen, statt Flußstrecke mit wandernden Kiesbänken.

Von Bedeutung für unsere Betrachtungen ist ferner der Hinweis Fabers darauf, daß bei Dettenheim (Abb. 4 Bl. 63 und 64) die wandernden Kiesbänke, wie sie von Basel abwärts auf 211 km Stromlänge bestehen, mit einem Male verschwinden, indem hier plötzlich eine Stromstrecke mit festliegendem Talweg beginnt, mit Kiesbänken, die sich bei Niedrigwasser trocken an das Ufer anschließen und die Mitte

6) Eduard Faber, Studien über die Verbesserung der Schiffbarkeit der Donau von Kelheim bis nach Ulm. Berlin-Grünwald 1903.

des Stromes freier lassen. Und, was besonders beachtenswert, die Niedrigwassertiefen über den Schwellen im festliegenden Talweg sind fast doppelt so groß als die über den Schwellen im beweglichen Talweg! Faber erblickt die Ursache für die plötzliche Änderung in der Gestaltung und in dem Verhalten des Strombettes lediglich darin, daß die Ufer der unbeständigen stromaufwärts gelegenen Strecke in gerader, die der beständigen Strecke in gewundener Richtung verlaufen, wobei die Halbmesser der Krümmungen bei Dettenheim der Niedrigwassermenge, dem Geschiebe und dem Gefälle so entsprächen, daß der Stromrinne eine stetige Leitung gegeben sei. Diese Beständigkeit verliere sich weiter stromabwärts dadurch, daß die Krümmungen wieder wesentlich schwächer würden und überdies zwischen den einzelnen Gegenkrümmungen gerade Strecken von zu großer Länge eingeschaltet seien.

Auch des umgekehrten Falles tut Faber Erwähnung durch die Vorführung einer Donautrecke, des Karolinenkanals unterhalb Lauingen (Abb. 8 Bl. 63 u. 64). Hier liegt noch 1 km weit in die gerade Strecke hinein der Talweg stets an den gleichen Uferstellen an. In der sich abwärts anschließenden 4,7 km langen geraden oder sanft gekrümmten Flußstrecke zeigt er nach Ablauf eines Hochwassers nur geringe Verschiebungen und wechselt oft erst nach Jahren die Uferseite, während er solches ober- und unterhalb der genannten Strecke fast alljährlich tut. Faber führt diese Erscheinung zurück auf die Nachwirkung der Flußrinne bei Lauingen, die durch ihre gewundene Laufrichtung in ihrer Lage beharrt und in der deshalb eine verhältnismäßig gleichförmige Geschiebebewegung vor sich geht. Erst damit, daß die Flußrinne zwischen den geraden Ufern allmählich ihre Leitung verliere, in ihrer Richtung immer mehr schwanke, stellten sich nach und nach wieder größere Unregelmäßigkeiten in der Bewegung und Lagerung der Geschiebe ein.

Ein drittes Beispiel für die Abhängigkeit der Sohlengestaltung von der Grundrißform des Flusses erblickt Faber in der Innstrecke von Kiefersfelden bis Flintsbach (Abb. 13 Bl. 63 u. 64), die beiderseits von Hochwasserdämmen eingeschlossen ist, ohne für die Ableitung des Mittel- und Niedrigwassers besondere Querschnitte aufzuweisen. In der Strecke von Kil. 3 bis Kil. 9 folgt der Talweg streckenweise auf durchschnittlich 900 m Länge dem einen Ufer, hart an diesem anliegend, und folgt dann wiederum eine Strecke weit dem anderen Ufer. Die Kiesbänke treten jedoch stets an dem gleichen Ort zutage und zeigen nur an ihren Enden Verschiebungen. Bei Hochwasser kreuzt der Stromstrich in gestreckterer Richtung das Flußbett als bei Niedrigwasser. Die Ursache der unregelmäßigen Ausbildung des Flußbettes kann nach Fabers Meinung nur darin gefunden werden, daß die Ufer des Inns vom unteren Ende der Flußkrümmung bei Kiefersfelden bis gegen Reisach und von unterhalb Reisach bis nach Windshausen bei zu großem gegenseitigen Abstände meist in gerader Richtung verlaufen. Die auffallend geringe Beweglichkeit des Talweges schreibt Faber dem Umstande zu, daß durch den bei Kil. 2,0 einmündenden Kieferbach und durch den Auerbach bei Kil. 8,6 schweres Geröll in den Inn getragen wird, wodurch die Flußrinne an diesen beiden Orten gegen das rechte Ufer gedrängt und somit stets an gleicher Stelle festgehalten wird. Dazu finde

der Stromstrich durch die zwischenliegenden, wenn auch geringen Krümmungen eine gute Leitung. Dadurch aber, daß die Flußrinne an mindestens zwei Stellen, bei Kil. 2,0 und Kil. 8,6 — also innerhalb einer verhältnismäßig kurzen Entfernung — unveränderlich festliege, werde eine Verwerfung des Stromstrichs verhindert, da doch immerhin eine bestimmte Länge für jeden Wechsel vorhanden sein müsse. Ähnlich wie zwischen Kiefersfelden und Reisach ist die Flußrinne zwischen Reisach und Windshausen festgelegt. Unterhalb Windshausen ist aber der Versuch gemacht worden, durch ein Zusammenschieben der für Niedrigwasser zu weit gestellten Ufer ein gleichmäßiger gestaltetes Flußbett herzustellen. Daß diese Absicht vollkommen erreicht worden ist, zeigt Abb. 12 Bl. 63 u. 64. Tatsächlich hat sich das Flußbett wie ein „nach der Schnur geebener Kanal“ ausgebildet, der auch bei Niedrigwasser weder Kolke noch Kiesbänke und Schwellen aufweist, trotzdem die Geschiebebewegung eine lebhaft ist. Es ist aber einleuchtend, daß diese „Verbesserung“ der eingegengten Strecke eine wesentliche Ermäßigung ihres Gefälles durch Auswaschung der Sohle in der oberen und Erhöhung der Sohle in der unteren Strecke herbeigeführt hat, so daß Faber³⁾ mit vollem Recht sagt: „Alles wäre in schönster Ordnung, wenn nicht die Vorteile in dieser Strecke mit den übelsten Folgen für die unterhalb gelegene verschüttete Flußstrecke verbunden wären. Gegenwärtig sieht man sich veranlaßt, durch Erweiterung des Durchflußprofils die Erosion und damit die schädlichen Folgen der früheren Korrektur abzuschwächen“.

Daß die übermäßige Streckung des Oberrheins ohne solche Nachteile für die untere Stromstrecke geblieben ist, ist nach Faber⁷⁾ verschiedenen Umständen zuzuschreiben.

Einmal findet eine größere Zuleitung von Geschieben nach dem Inn als nach dem Oberrhein statt. Dann besteht der Boden des Rheinbettes von der elsässisch-bayerischen Grenze abwärts vorwiegend aus Sand und Lehm, so daß der Strom dieses leichte Material aus den zahlreichen Durchstichen weit in die Niederungen hinein, auch über hohe Uferbauten hinweg, forttragen konnte. Endlich werden aus dem Strombettes des Oberrheins alljährlich viele Tausende Kubikmeter Kies und Sand gebaggert, während im Inn verhältnismäßig wenig gebaggert wird. „Jeder Zweifel daran“, so schließt Faber seine einleuchtenden Darlegungen, „daß die sehr ausgiebigen Baggerungen die Nachteile der Rektifikation für die untere Stromstrecke abgewendet haben, müßte verschwinden, wenn die gesamte aus dem Oberrhein, namentlich auch bei Mannheim-Ludwigshafen alljährlich geförderte Menge von Sand und Kies bekannt wäre“.

Daß allenthalben in übermäßig geraden und breiten Flußstrecken mit beweglicher Sohle sich Geschiebebänke und ein sich schlängelnder Niedrigwasser-Talweg bilden, daß diese Bildungen also eine allen geschiebeführenden Wasserläufen gemeinsame Erscheinung darstellen, das lehren auch die Beobachtungen an den norddeutschen Strömen, wie die folgenden Auszüge aus den im Auftrage des preußischen Wasser-Ausschusses von H. Keller herausgegebenen Beschreibungen dieser Ströme dartun werden.

7) Faber. Die Regulierung geschiebeführender Flüsse auf Niedrigwasser. München 1889. S. 21.

Memel-, Pregel- und Weichselstrom.⁸⁾ Die Stromsohle der preußischen Weichsel besteht fast durchweg aus Sand, dessen leichte Beweglichkeit nach jedem Hochwasser Veränderungen der Gestalt der Sohle zur Folge hat, die um so weitergehend sind, als ein Ausbau des Niedrigwasserbettes noch nicht erfolgt ist. „So entstehen zuweilen mächtige Sandfelder, welche entweder inselartig in der Stromrinne liegen oder sich an ein Ufer anschließen, zuweilen auch als Barre den Strom quer durchsetzen. Auch bei mittleren Wasserständen erfolgt eine Bewegung des Sandes. Doch geschieht dies dann meist so, daß einzelne Teile der Sandbänke sich nach und nach verschieben, während bei Hochwasser zuweilen die ganze Sohle in Bewegung gerät. Bei niedrigeren Wasserständen zieht sich das Wasser in schmalen Rinnen zwischen den Sänden zusammen und spült hier eine tiefe Rinne aus“. In besonders anschaulicher Weise werden diese Vorgänge beleuchtet durch das Verhalten der Weichselstrecke Kil. 140 bis Kil. 148, die seit einer Reihe von Jahren jährlich einmal sorgfältig gepeilt wird, um ein möglichst genaues Bild über die Bewegung der Sandfelder zu gewinnen. Von den sechs mir vorliegenden Herbstaufnahmen der Jahre 1897 bis 1902 gebe ich in Abb. 10 und 11 Bl. 63 und 64 die beiden letzten wieder und bemerke dazu, daß der Zustand vom September 1902 bezüglich der Lage der Niedrigwasserrinne fast genau mit dem vom September 1899, der vom September 1901 mit dem vom September 1898 übereinstimmt usw., so daß alle drei Jahre annähernd die Lage der Niedrigwasserrinne sich wiederholt. Aus den Aufnahmen geht mit Beweiskraft hervor, daß die Niedrigwasserrinne parallel zu sich selbst stromabwärts wandert. Wie die Wanderung im einzelnen vor sich geht, scheint aber bis jetzt nicht beobachtet zu sein.

Der Oderstrom.⁹⁾ Von dem Unterlaufe der mittleren Oder heißt es an der angezogenen Stelle: „Der feine Sand des Strombettes ist äußerst leicht beweglich, so daß das Bett fortwährenden Umgestaltungen unterliegt, die sich am raschesten beim Hochwasser vollziehen, oder wenn durch Instandsetzung und Ergänzung der Strombauwerke eine vorübergehende Änderung der Abflußverhältnisse erfolgt. Dieser Beschaffenheit entspricht daher eine erhebliche Menge von Sink- und Wanderstoffen, welche noch vermehrt wird durch die vom Bober und von der Lausitzer Neiße hinzugebrachten Sandmassen. Unterhalb ihrer Mündungen bilden sich stets von neuem rückenartige Ablagerungen aus, die beim Hochwasser weggenommen werden, bei niedrigen Wasserständen aber die Breite der Stromrinne sehr beeinträchtigen. Beim Abfallen des Hochwassers lagert sich der aufgewühlte Sand wieder ab, ohne daß seine Bewegung völlig aufhört, da Mittel- und Kleinwasser in diesen Ablagerungen ein stetig wechselndes Bett ausgraben müssen. In geraden Strecken und flachen Krümmungen liegen die Sandbänke abwechselnd am rechten und linken Ufer, durch den eingesattelten Rücken des Überschlages miteinander verbunden. Die am unteren Ende des stromaufwärts liegenden Sandes weggerissenen Sandkörnchen setzen sich am oberen Ende des stromabwärts gegenüberliegenden Sandes an und verursachen eine ungünstige Richtung des Überschlages. Wo das Strombett eine übermäßige, seiner Wasserführung nicht entsprechende Breite

besitzt, folgen solche ungünstigen Überschlage rasch aufeinander, und die Stromrinne schlängelt in kurzen Windungen vom einen zum anderen Ufer.“

Der Elbstrom.¹⁰⁾ Von den geraden Strecken und flachen Krümmungen zwischen der Havel- und Jeetzelmündung wird berichtet, daß sich hier die Sandfelder abwechselnd am rechten und linken Ufer befinden und durch den Rücken des Überschlages miteinander verbunden sind. Über die Beschaffenheit des Strombettes zwischen der Jeetzel- und Seevemündung ist S. 361 das folgende bemerkt:

„Gewisse geschützte Stellen des Strombettes haben stets eine Sandbank in unveränderter oder wenig veränderter Lage, die auch den örtlichen Verhältnissen nach vom Hochwasser unberührt bleibt; aber wo solche besondere Umstände nicht vorliegen, ist der Sand in steter Bewegung. Dieses Wandern der Sandfelder bedingt eine fortwährende Änderung der Fahrrinne, welche daher im Schiffsfahrts-Interesse durch Landmarken bezeichnet wird. — — Allerdings tritt der Fall oft ein, daß ein vortretender Sand Änderungen in sich erfährt, z. B. in der Weise, daß nur der untere Teil fortgespült wird, während sich von oben her das nächstfolgende Sandfeld an ihn anschließt. Dabei ist deutlich erkennbar, daß in Jahren, die kein Hochwasser hatten, nur geringe, bei lange anhaltendem Hochwasser aber erheblich große Verschiebungen stattfinden.“

Auch hier weisen die geraden Strecken eine besonders große Veränderlichkeit auf, wie das die Strecke Kil. 520,5 bis Kil. 522,5 zeigt, von der ich in Abb. 1 Bl. 63 u. 64 eine Aufnahme vom Jahre 1898 bringe. Ich habe bereits früher¹⁾ über Modellversuche berichtet, die ich mit dieser Strecke angestellt habe und verweise insbesondere auf die damals gebrachte Abb. 5 Bl. 48 u. 49 (Jahrg. 1900), die die Veränderungen der Fahrrinne für die Jahre 1894 bis 1899 zeigt. —

Für die Beurteilung der Bettausbildung in geschlebeführenden Wasserläufen ist endlich die Ungleichartigkeit des Geschiebes nach Größe und Schwere von besonderer Bedeutung. Es ist eine durch viele Beobachtungen und auch durch von mir im Flußbaulaboratorium angestellte Versuche bewiesene Tatsache, daß dort, wo das Wasser in stets gleicher Bahn dahinfließt, die leichteren Bestandteile aus der Sohle herausgewaschen und fortgeschwemmt werden, während die schwereren Geschiebe im oberen Teile des Bettes zurückbleiben. Die letzteren bilden alsdann hier eine Schutzdecke, die die weitere Auswaschung des Bodens erschwert und die Geschiebebewegung verringert.⁷⁾

Je wandelbarer also der Fluß, um so lebhafter ist unter sonst gleichen Umständen seine Geschiebebewegung, da die Bildung einer Schutzdecke aus größeren Geschieben verhindert wird. Daher auch die große Beweglichkeit der Sohle in den übermäßig geraden und breiten Flußbetten. „Die Wandelbarkeit des Flusses ist als das Grundübel anzusehen.“ (Faber). Die Regelung solcher Wasserläufe auf Niedrigwasser soll daher keineswegs — wie so häufig ausgesprochen wird — eine Vermehrung der Geschiebebewegung veranlassen, sondern vielmehr eine Verminderung dadurch, daß durch die Festlegung des Talweges die Bildung einer Schutzdecke herbeigeführt wird. Im Zusammenhange hiermit und zur

8) Berlin 1899. Band IV S. 189.

9) Berlin 1896. Band III S. 208.

10) Berlin 1898. Band III S. 294.

weiteren Bestätigung des Gesagten sei noch aus dem Oderwerke — S. 102 — angeführt, daß unterhalb Breslaus die Beschaffenheit der Sohle eine wesentliche Änderung dort erfahren hat, wo durch die Baggerungen zur Gewinnung von Kies und Sand die widerstandsfähige kiesige Schicht allmählich weggenommen und der leichter bewegliche feinere Sand freigelegt worden ist.

Das Gesamtergebnis der bisher vorliegenden Beobachtungen und Erfahrungen fassen wir in folgenden Sätzen zusammen:

1. Allen geschiebeführenden Wasserläufen — unter Geschiebe soll hier allgemein jede Art von Sinkstoffen verstanden werden — ist die Erscheinung gemeinsam, daß in längeren geraden und schwach gekrümmten Strecken, deren Querschnitt wohl die höheren Wasser, nicht aber das Mittel- und Niedrigwasser genügend zusammen zu halten vermag, bei Niedrigwasser sich örtliche Geschiebeanhäufungen, sogen. Geschiebebänke, zeigen.

2. Während Grebenau das Auftreten von Geschiebebänken von der Einmündung geschiebeführender Nebenflüsse abhängig macht, bedarf es nach Lavale dieser Vorbedingung nicht, sobald nur die unter 1. gekennzeichneten Verhältnisse vorliegen.

3. Die Geschiebebänke liegen abwechselnd am rechten und linken Ufer, wobei sie sich entweder hart an das Ufer anschließen oder aber durch eine schmale Rinne von diesem getrennt sind. In letzterem Falle ist die gegenüberliegende breitere Rinne auch die tiefere.

4. Die Geschiebebänke sind durch den Rücken des Überschlages miteinander verbunden, dessen tiefste Einsattelung bei Niedrigwasser gewöhnlich etwa in der Mitte der Stromrinne liegt und hier die Lage des Talweges bestimmt.

5. Über die Bildung dieser Rücken besitzen wir keine zuverlässigen, sondern einander widersprechende Angaben. So sollen nach Grebenau die Kiesbänke des Oberrheins ohne Kreuzung des Talweges stromabwärts rücken, während an der Oder auch bei geraden Flußstrecken eine solche Kreuzung stattfinden soll. Faber spricht endlich von einem „pendelnden“ Talweg.

6. Nach jedem Hochwasser zeigen in der Regel die Geschiebebänke eine andere Lage und zwar eine solche, daß der sich zwischen ihnen durchschlängelnde Talweg parallel zu sich selbst stromabwärts verschoben erscheint.

7. Über die Art der Wanderung der Geschiebebänke während des Hochwassers sind zuverlässige Beobachtungen bis jetzt noch nicht gemacht worden. Insbesondere fehlt uns eine zuverlässige Kenntnis darüber, ob die Stromsohle bei Hoch- und Niedrigwasser der Hauptsache nach die gleiche Form zeigt oder nicht.

8. Wenn unmittelbar unterhalb der Einmündungen von geschiebeführenden Nebenflüssen ortsfeste Geschiebebänke sich bilden, so können diese unter gewissen Vorbedingungen bewirken, daß auch in geraden oder schwach gekrümmten Strecken die zwischenliegenden Geschiebebänke stets an dem gleichen Orte zutage treten. In solchen Fällen liegt auf der betreffenden Strecke auch der Niedrigwasser-Talweg ziemlich fest.

9. Durch das Festliegen des Talweges wird die Bildung einer Schutzdecke begünstigt und die Geschiebebewegung verringert.

10. Die Niedrigwassertiefen über den Schwellen im festliegenden Talwege sind stets größer als über den Schwellen im beweglichen Talwege.

11. Es ist zwar möglich, das Mittelwasserbett gerader Flußstrecken so weit einzuengen, daß auf der eingeeengten Strecke die Geschiebebänke gänzlich verschwinden, aber nur unter Verschlechterung der Gesamtverhältnisse gegen früher wegen der stets eintretenden Gefälleermäßigung als Folge der Sohlenauswaschung am oberen und Sohlenaufhöhung am unteren Ende.

Aus den bisherigen Darlegungen erhellt, daß die Vorgänge bei der Bettausbildung gerader Flußstrecken einer weiteren Erforschung dringend bedürfen. Und da es hierbei auf die Beobachtung der Vorgänge an der Bettsohle insbesondere während der höheren Wasserstände ankommt, einer solchen sich aber unüberwindliche Hindernisse entgegenstellen, so habe ich den Weg des Versuchs im kleinen im hiesigen Flußbaulaboratorium beschritten. Die im ersten Abschnitte erwähnten Wasserläufe habe ich übrigens fast ausnahmslos in Begleitung der zuständigen Baubeamten bereist und so im mündlichen Meinungsaustausche die bestmögliche Belehrung an Ort und Stelle empfangen. Indem ich unter Hinweis auf die früheren Veröffentlichungen¹⁾ die Einrichtung des Laboratoriums als bekannt voraussetze, gehe ich zur Beschreibung der Versuche über, die ich vom Oktober 1904 bis zum April 1905 durchgeführt habe. Als Bettmaterial benutzte ich die gleiche Sandmischung wie bei meinen Bühnenversuchen.¹¹⁾ Wegen der geringen Länge des Gerinnes ergab es sich als zweckmäßig, die Größtwassermenge auf etwa 8 sl (Sekundenliter) zu beschränken. Die Breite des genau geradlinig eingebauten Flußbettes bestimmte ich nach einigen Vorversuchen zu ungefähr dem fünfzehnten Teile seiner nutzbaren Länge, damit sich noch eine hinreichende Zahl von Übergängen bilden konnte. Um von möglichst einfachen Verhältnissen auszugehen, wurden bei der ersten Versuchsgruppe die Flußbetten nach Abb. 7 Bl. 65 mit wagerechter Querschnittsohle eingebaut. Die Ufer wurden in sorgsamster Weise mit Monierplatten abgedeckt, da bei einer Befestigung mit Schrotsäckchen die Unebenheit der Uferwandung im Verhältnis zur Bettbreite eine übermäßig große geworden wäre und die Ausbildung der Bettsohle in unzulässiger Weise beeinflußt haben würde.

Damit die Bettsohle in genügendem Maße ins Wandern geriet, mußte das Gefälle größer sein als das Gleichgewichtsgefälle. Bezeichnet J das Gefälle, t die Wassertiefe in m und γ das Gewicht eines Kubikmeters Wasser in kg, dann ist die Angriffskraft K des fließenden Wassers auf die Bettsohle

$$K = J \cdot t \cdot \gamma \text{ (kg/qm).}$$

Einem jeden Bettmaterial entspricht danach für den Grenzstand des Gleichgewichts ein bestimmtes K , das ich für meinen Sand durch Versuche zu 0,024 kg/qm gefunden hatte. Bei der gewählten Abmessung des Bettes ergab sich bereits für eine Wassermenge von etwa 5 sl und einem $J = 0,0025$ bis 0,003 ein so großes K , daß die gewünschte Sandwanderung eintrat. Dementsprechend wurden die Versuche mit den letztgenannten Gefällen durchgeführt, die während der

11) Zeitschrift für Bauwesen 1904 S. 452.

Dauer eines jeden Versuchs dadurch unterhalten wurden, daß am oberen Einlaufe genau soviel Sand zugegeben wurde als unten abging. Da das Gerinne selbst mit einem wesentlich größeren Gefälle eingestellt war, so lag am unteren Ende die Bettsohle so hoch, daß die Wanderung des Sandes durch die untere Querabschlußrippe nicht beeinflusst wurde.

Zur Vermeidung jeder gewaltsamen Umformung der Bettsohle wurden die Versuche so angestellt, daß die jeweilige Größtwassermenge erst nach einiger Zeit erreicht wurde. Die Vorgänge bei der nunmehr erfolgenden allmählichen Umbildung der Bettsohle bespreche ich zunächst am besten an Hand einiger Lichtbildaufnahmen, die ich von einem Zwischenversuche gemacht habe. Es hatte sich nämlich gleich bei den ersten Versuchen gezeigt, daß die ersten Sohlenumbildungen in der Form von kleinen blattartigen Sandzungen auftreten, die netzartig sich aneinanderreihen, indem jeder aufgeworfenen und stromabwärts in einer Spitze endigenden Zunge eine scherenartige Bildung folgt (vgl. beistehende Text-Abb. 1).

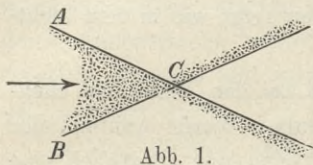


Abb. 1.

Da ich solche Bildungen bei meinen früheren Versuchen mit Pfeilerkörpern stromabwärts von diesen beobachtet hatte, wobei die Zunge ABC den Hinterkopf eines Pfeilers darstellt,

so baute ich in dem vorher sorgfältig geebneten Bette in der Nähe des Einlaufes einen dieser Pfeiler so ein, daß dessen Längsachse mit der Mittellinie des Bettes genau zusammenfiel. Die Lichtbildaufnahmen Abb. 1, 2 und 3 Bl. 66 zeigen die überraschende Sohlenumbildung nach halbständigem Durchflusse, die ich mir wie folgt erkläre. Das fließende Wasser sucht sofort das Gleichgewichtsgefälle herzustellen und kann dieses wegen der zu großen Breite, Glätte und Neigung der Sohle nur durch eine solche Umformung der letzteren bewirken, daß ihm möglichst viele Angriffsflächen bei gleichzeitig möglichst großem Widerstande geboten werden. Namentlich Abb. 3 Bl. 66 zeigt in besonders anschaulicher Weise das rautenförmige Netz von Sandzungen, das diesen Anforderungen offenbar entspricht: an Stelle des anfänglich einheitlichen tritt ein in viele kleine Staffeln gebrochenes Sohlengefälle und an Stelle der anfänglich ebenen Sohle eine solche mit vielen Vertiefungen und Erhöhungen, die sich gesetzmäßig ineinanderschoben. Auf Grund vieler ähnlicher Naturvorgänge darf wohl behauptet werden, daß diese Sohlenumbildung nach solchen Gesetzen vor sich geht, wie sie sich bei der Lösung von Maxima- und Minimaproblemen ergeben.

Es unterliegt keinem Zweifel, daß diese anfänglichen Bildungen, so gering sie auch auftreten mögen, den ersten Anlaß zu den allmählich sich vollziehenden Geschiebeanhäufungen an einzelnen Stellen des Flußbettes abgeben. Zu dem Ende ist nur nötig, daß an irgend einer Stelle des Flußbettes die Gleichartigkeit in der Zusammensetzung und Lagerungsdichtigkeit des Bettmaterials, in dem Gefälle, in der Richtung der Strömung sich ändert. Die geringste Veränderung nur eines dieser Faktoren bedingt sofort eine Störung in der Gleichartigkeit des Sohlennetzes. Solche Veränderungen sind aber unvermeidlich, auch in dem sorgfältig eingebauten künstlichen Bette und erst recht in den natürlichen Wasserläufen. So erklärt es sich, daß sich stets in dem Netze nach kurzer Zeit eine größere unsymmetrische Sandzunge, z. B.

ABC (Text-Abb. 2) ausbildet, die bei C ihre größte Erhebung hat und daher stromabwärts durch Böschungen AC und BC begrenzt wird, deren Höhe von A nach C und von B nach C

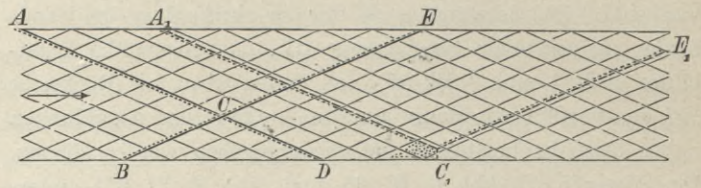


Abb. 2.

allmählich zunimmt und deren weitere Umbildung durch folgende Umstände bedingt wird. Es sei hierzu ausdrücklich bemerkt, daß die beschriebenen Vorgänge bei allen Versuchen in einwandfreier Weise beobachtet worden sind.

Die Zunge ABC wandert dadurch abwärts, daß die Sandkörner parallel zur Strömung, also auch parallel zu den beiden festen Ufern bewegt werden. Sobald nun diese Sandkörner die Böschungen AC und BC erreichen, erleiden sie eine plötzliche Veränderung in ihrer Fortbewegung, die um so größer ist, je höher die Böschung ist, in deren Schutz sie zunächst gelangen. Während die Sandkörner, die bei C die Böschung hinunterrollen, im Schutze der Böschung liegen bleiben und bald von den nachfolgenden überrollenden Sandkörnern bedeckt werden, wandern die bei A und B durchgehenden Sandkörner, da hier die Böschungshöhe fast gleich Null ist, ungehindert weiter. Für die zwischen A und C sowie B und C wandernden Sandkörner wirken diese Böschungen, sobald jene an deren Fuß angelangt sind, wie stromabwärts gerichtete Buhnen: sie werden unter der Wirkung der zur Böschung parallelen Seitenkraft der Strömung, sofern sie nicht von der unaufhaltsam talwärts wandernden Böschung überdeckt werden, nach der Spitze C hingetrieben oder aber unter der Einwirkung der anderen Seitenkraft wieder emporgerissen und setzen dann ihren Weg stromabwärts fort. So erklärt es sich, weshalb nach einer gewissen Zeit die Spitze C der Zunge seitlich nach C_1 gewandert ist.

An C bzw. C_1 schließen sich die Zungen CD und CE bzw. C_1E_1 an. Damit ist aber die Bildung von Sandanhäufungen bei C_1 am rechten und E_1 am linken Ufer gegeben, die sich nunmehr talwärts in gleicher Weise wiederholen. - Abb. 1 Bl. 66 zeigt diese Zungenbildungen in sehr schöner Weise.

Man könnte nun dem eben beschriebenen Versuche gegenüber einwenden, daß durch den Einbau des Pfeilerkörpers der erste Anlaß zu dieser Bettausbildung gegeben sei. Daß aber diese Bildung ganz allgemein vor sich geht, das zeigen alle meine weiteren Versuche, von denen ich hier nur eine Auswahl bringen kann, und zwar drei Versuche, mit A, B, C bezeichnet und mit dem Querschnitt nach Abb. 7 Bl. 65, und einen vierten Versuch D mit dem Querschnitt nach Abb. 8 Bl. 65. Indem ich wegen der Einzelheiten dieser Versuche auf die den Abbildungen beigefügten Erläuterungen verweise, beziehe ich mich zur Bestätigung des eben Gesagten auf die Abb. 1 und 2 Bl. 67, die die auch hier vor sich gegangene Ausbildung der abwechselnd an das linke und rechte Ufer sich anschließenden Zungen zeigen. Sowohl aus den zugehörigen Lageplänen (Abb. 1 u. 2 Bl. 65) als auch aus denen des Versuches B (Abb. 3 bis 5 Bl. 65) kann man erkennen, wie die Aus- und Umbildung der Bettsohle unter

der Einwirkung höherer Wasserstände vor sich geht, wie insbesondere die abwechselnd längs der Ufer sich bildenden Kolke allmählich talwärts wandern, ohne die Uferseite zu wechseln. Daß letzteres auch für die als Anfänge der Sandbänke anzusehenden Sandzungen gilt, das zeigen die Lichtbilder Abb. 1 und 2 Bl. 67, von denen aber mit Rücksicht auf den verfügbaren Raum nur die kurze in den Abbildungen näher bezeichnete Strecke hat wiedergegeben werden können. Der Versuch *C* (Abb. 6 Bl. 65 und Abb. 3 Bl. 67) unterscheidet sich von den vorigen sowohl durch eine längere Dauer des Durchflusses als auch durch eine größere Durchflußmenge. Wir sehen, wie unter der vereinigten Wirkung dieser beiden Faktoren die Kolke längs der Ufer sich tiefer ausgearbeitet und die Sandzungen sich länger gestreckt haben als bei den vorigen Versuchen und wie dadurch eine bemerkenswerte Übereinstimmung mit den unter gleichen Verhältnissen in der Natur entstandenen Flußbettformen sich herausgebildet hat. Hinzuweisen ist ferner auf die unter der Wirkung des längeren und stärkeren Durchflusses entstandenen bekannten Rippelmarken, die somit als durch das Hochwasser bewirkte Umbildungen der anfänglich netzartigen aufgerauhten Sohle anzusehen sind.

Otto Baschin¹²⁾ hat darauf hingewiesen, daß die Ursache zur Bildung dieser Rippelmarken das Bestreben zur Bildung einer Helmholtz'schen Wellenfläche ist, die deshalb so genannt wird, weil Helmholtz auf mathematischem Wege den Nachweis geliefert hat, daß sie als Grenzfläche zweier Flüssigkeiten von verschiedener Dichte und Geschwindigkeit den Bedingungen des stabilen Gleichgewichtszustandes entspricht.

Den bisherigen Versuchen könnte aber vorgeworfen werden, daß sie in einem Gerinne mit wagerechter Querschnittsohle angestellt seien, während doch letztere in unseren natürlichen Wasserläufen eine mehr oder minder parabolische Form aufweisen. Deshalb habe ich noch eine Anzahl von Versuchen unter Einbau einer parabolischen Querschnittsohle nach Abb. 8 Bl. 65 durchgeführt, von denen ich den bereits erwähnten Versuch *D* in seinen Ergebnissen (Abb. 9 Bl. 65 und Abb. 4 und 5 Bl. 66) zur Darstellung bringe. Die Lichtbilder Abb. 4 und 5 Bl. 66 zeigen deshalb besonders anschaulich die Bettausbildung und die Verwerfung des Talweges, weil das Wasser nach Einstellung des Durchflusses so weit abgelassen war, daß nur die Kolke längs der Ufer mit stillstehendem Wasser ausgefüllt blieben, während der erhöhte und geschlängelte Rücken trocken zutage lagen. Abb. 4 zeigt das Bett stromabwärts und Abb. 5 stromaufwärts gesehen. Leider wird in letzterer die Spiegelung der Decke des Versuchsraumes in dem vordersten Kolke etwas störend. Auch bei diesem Versuche tritt in außerordentlich überzeugender Weise die Übereinstimmung mit der Verwerfung des Talweges in der Natur hervor. Dabei ist hervorzuheben, daß alle Aufnahmen das Flußbett während höherer Wasserstände darstellen: und das zu tun, war ja meine Absicht. Die ergänzenden Versuche mit allmählich abnehmender Durchflußmenge zeigten, daß der sich schlängelnde Niedrigwasser-Talweg unter Durchbrechung der Schwellen bei *S* — vgl.

12) Die Entstehung wellenähnlicher Oberflächenformen. Zeitschrift der Ges. f. Erdkunde zu Berlin. Band XXXIV S. 408 ff. Vgl. auch Zentralblatt der Bauverwaltung 1900 S. 231 ff.

die verschiedenen Lagepläne — sich bildete, boten daher nichts Neues.

Beim Wiederansteigen des Wassers unter Sandzuführung stellten sich alsbald die Rücken bei *S* wieder her, indem der Sand parallel zur Strömung wanderte, der sich schlängelnde Sandrücken also parallel mit sich selbst talwärts verschob. Wiederholte Versuche mit gefärbtem Sande haben untrüglich dargetan, daß die wandernden Sinkstoffe die Uferseite nicht wechseln, mit alleiniger Ausnahme der im Verhältnisse zu jenen wenig zahlreichen Sandkörner, die — wie beschrieben — am Fuße der jeweiligen Zungenböschungen diese entlang wandern.¹³⁾ Daß die bei allen Versuchen beobachtete Zungenbildung sich in der Natur wiederfindet, das zeigen besonders schön die Abb. 1 und 14 Bl. 63 und 64, in denen ich die flußseitige Begrenzung der Geschiebebänke durch eine strichpunktirte Linie hervorgehoben habe. Letzteres ist auch in der Abb. 11 Bl. 63 u. 64 geschehen, und es ist jedenfalls bemerkenswert, daß sich hier eine ähnliche bogenförmige Begrenzung der Sandzungen zeigt wie in dem Lichtbilde der Abb. 1 Bl. 66.

Es ist erwähnt worden, daß bei den Versuchen ebensoviel Sand zu- wie abgeführt wurde. Wurde während des Durchflusses kein Sand zugeführt, dann trat allmählich eine Auswaschung der Sohle oben und eine Erhöhung derselben unten so lange ein, bis die dadurch bewirkte Gefälleermäßigung das Gleichgewichtsgefälle hergestellt hatte, was sich durch das gänzliche Aufhören der Sandbewegung kund gab. Dabei liefen die schrägen Zungen allmählich glatt aus, so daß das Gleichgewichtsbett keine schrägen Rücken mehr zeigte.

Ferner wurde durch Versuche das ja aus der Praxis bekannte Ergebnis — Inn, Abb. 12 u. 13 Bl. 63 u. 64 — herbeigeführt, daß bei einer gewissen Verringerung der Querschnittsbreite unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen keine schrägen Sandzungen, sondern lediglich Querrippen, die annähernd senkrecht zur Gerinneachse standen, auftraten, daß also in der Tat durch Querschnittsbeschränkung die Verwerfung des Talweges verhindert werden kann, aber nur unter Ermäßigung des Gefälles. Eine gleiche Bettausbildung — also das Auflaufen von annähernd senkrecht zur Gerinneachse stehenden Querrippen — trat, wie zu erwarten war, auch jedesmal dann ein, wenn unter Beibehaltung der Bettbreite die Durchflußmenge so vergrößert wurde, daß sie dem eigentlichen Hochwasser entsprach.

Es ist daher zu beachten, daß die erörterte Bildung von schrägen Sandzungen nicht bei Hochwasser, sondern nur bei höheren Mittelwasserständen vor sich ging und daß daraus gefolgert werden darf, daß auch in der Natur die Geschiebebänke nicht bei Hochwasser, sondern erst dann auflaufen, wenn das Wasser so weit gefallen ist, daß es in dem Flußbette nicht mehr genügend zusammengehalten wird, wenn also die Bettbreite in bezug auf die Wassermenge zu groß geworden ist.

Die Versuche haben somit folgendes ergeben:

1. In geraden Flußstrecken mit beweglicher Sohle, die von festen Ufern begrenzt und vom Hochwasser in einer

13) Meine in der Zeitschr. f. Bauw. 1900 S. 357 mitgeteilten früheren Beobachtungsergebnisse sind daher nur auf diese Sandkörner zu beziehen.

diesen gleichlaufenden Richtung durchströmt werden, wandert das Geschiebe ebenfalls in dieser Richtung.

2. Wenn bei zu großem Gefälle das Wasser so tief gefallen ist, daß die Breite des Abflußquerschnittes in bezug auf die Wassermenge zu groß geworden ist, dann laufen bei dieser Wanderung auch ohne das Hinzutreten von geschiebeführenden Nebenflüssen Geschiebeebänke auf, die in Form von schrägen Zungen abwechselnd vom einen zum anderen Ufer überschlagen.

3. Nur längs der Böschungen, die diese Zungen flußseitig — stromabwärts — begrenzen, findet eine aber verhältnismäßig unbedeutende Wanderung von Geschieben unter Kreuzung der Stromrinne statt.

4. Das fallende Wasser wäscht in diesen Böschungen senkrecht zu ihrer Richtung den Überschlag der Niedrigwasserrinne aus, die hier ihre geringste Tiefe aufweist.

5. Indem sich die Zungen bei jedem Hochwasser talwärts verschieben, werden auch bei jedem Hochwasser diese Auswaschungsrinnen wieder zugeworfen, um sich bei jedem fallenden Wasser, und zwar jedesmal talwärts verschoben, aufs neue zu bilden.

6. Die Zungen und mit ihnen die Verwerfungen des Niedrigwasser-Talweges verschwinden, wenn entweder die Geschiebezufuhr von oben ermäßigt oder der Abflußquerschnitt eingengt wird. In beiden Fällen tritt aber in der betreffenden Strecke eine Gefälleermäßigung ein.

* * *

Fassen wir zum Schlusse diese Ergebnisse mit denen unserer praktischen Erfahrungen und Beobachtungen zusammen, so lassen sich folgende Grundsätze ableiten.

Zur Verbesserung des Fahrwassers in geraden oder schwach gekrümmten Flußstrecken mit beweglicher Sohle bieten sich folgende Mittel dar:

1. Einschränkung der übermäßigen Breite des Mittelwasserbettes. Mit dieser Maßnahme ist aber stets eine Gefälleverminderung verbunden. Sie darf daher nur auf solchen Strecken Anwendung finden, die ein zu großes Gefälle bei Mittelwasser haben, und nur in dem Maße bewirkt werden, daß die entstehende örtliche Gefälleermäßigung einen Gefälleausgleich, also eine Verminderung der Gefällebrüche aus dem Anfangs- und Endpunkte der Strecke herbeiführt. Das Maß der Breitenbeschränkung ergibt sich alsdann in folgender Weise.

Ist J das alte zu große Gefälle und t die alte mittlere Wassertiefe, J_1 das neue kleinere Gefälle und t_1 die neue größere Wassertiefe, dann muß sein

$$Jt = J_1 t_1, \text{ woraus } t_1 = \frac{J}{J_1} t.$$

Die neue Geschwindigkeit wird

$$v_1 = c \sqrt{J_1 t_1}, \text{ worin nach Heßle } c = 25 \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{t_1}\right)$$

und die gesuchte Mittelwasserbreite $b_1 = \frac{Q}{v_1 t_1}$, wenn Q die Abflußmenge bezeichnet.

2. Verschärfung der Krümmungen in der zu geraden Strecke unter Belassung der bisherigen Mittelwasserbreite. Mit dieser Maßnahme ist eine Hebung des Wasserspiegels und der Sohle am Anfange der Strecke verbunden, die nach unten allmählich ausläuft und die unter der Annahme, daß das relative Gefälle sich nicht verändert, leicht vorauszubestimmen ist. Es wird daher in jedem einzelnen Falle unschwer festgestellt werden können, ob und in welchem Maße dieses Mittel eine Verminderung der Gefälleunregelmäßigkeiten herbeiführt. Nur dann, wenn letzteres der Fall ist, darf dasselbe angewendet werden. Es wird insbesondere für solche Strecken in Erwägung kommen, die, wie die Weichsel (Abb. 10 u. 11 Bl. 63 u. 64), durch Bühnen geregelt sind. Man würde dann an dem einen Ufer die Bühnen um das Maß verlängern, um das sie am gegenüberliegenden Ufer verkürzt werden.

Auch die gleichzeitige Anwendung der Mittel 1. und 2. ist möglich.

Es läßt sich nun nicht vorhersagen, in welchem Maße durch diese Mittel eine Verminderung der Anzahl der Talwegübergänge und eine Festlegung des Talweges herbeigeführt werden wird. Man wird daher stets, falls diese Mittel zur Anwendung kommen sollten, zunächst den Erfolg einer solchen Vorregelung abzuwarten haben, ehe man

3. zur Festlegung und gleichzeitigen Streckung der Übergänge des Niedrigwasser-Talweges übergeht. Die hierzu erforderlichen baulichen Maßnahmen werden je nach der Natur der Gewässer verschieden ausfallen. So hat man nach dem Vorschlage Fabers am Inn damit begonnen, den schwierigsten Übergang zwischen Kiefersfelden und Reisach durch bühnenartige Grundschwellen (Abb. 6 u. 7 Bl. 63 u. 64) versuchsweise zu regeln.

Es wird von den noch ausstehenden Ergebnissen dieses Versuches abhängen, ob an den Stellen, wo der Strom vom Ufer abgeht und wo er dasselbe wieder erreicht, für den schließlichen Ausbau vollwandige Ufer mit flacher Böschung vorzusehen sein werden.

Als allgemein gültig für solche Bauten darf der Grundsatz aufgestellt werden, daß sie so anzulegen und auszubilden sind, daß sie bei Niedrigwasser die größte und bei Hochwasser die kleinste Wirkung ausüben, und daß die Auswaschung des Überganges durch das fallende Wasser stets an der gleichen Stelle vor sich geht. Es wird in vielen Fällen genügen, nur einige, nicht alle Übergänge durch Bauten festzulegen. Die passendste Bauweise wird — wie am Inn — durch die versuchsweise Behandlung eines Überganges zu erforschen sein. Das Ziel der Regelung ist dann als erreicht anzusehen, wenn die zwischen den Mittelwasserufern sich schlängelnde Niedrigwasserrinne dauernd festliegt.



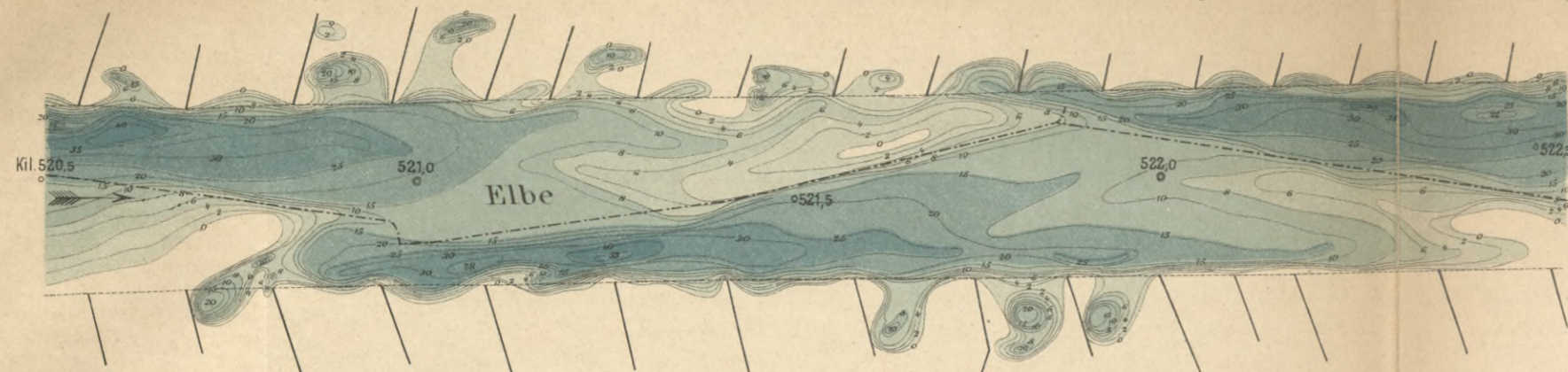


Abb. 1. Elbe von Kil. 520,5 bis 522,5. Aufnahme vom Jahre 1898. 1: 9000.

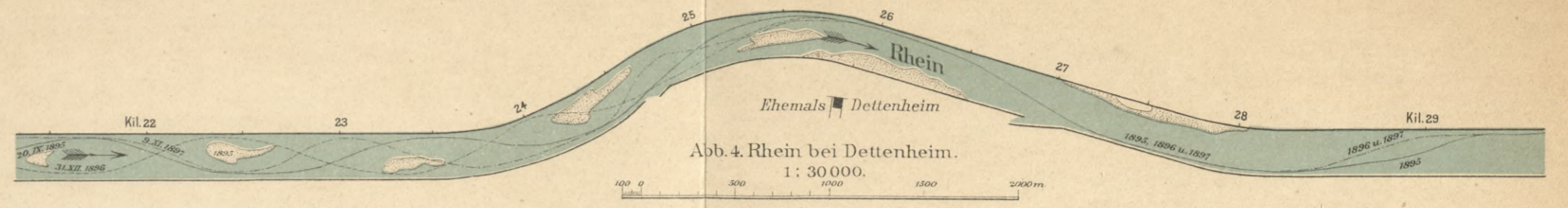


Abb. 4. Rhein bei Dettenheim. 1: 30 000.



Abb. 2. Kiesbänke im Oberrhein unterhalb Straßburgs. Aufnahme vom Jahre 1882. 1: 9000.

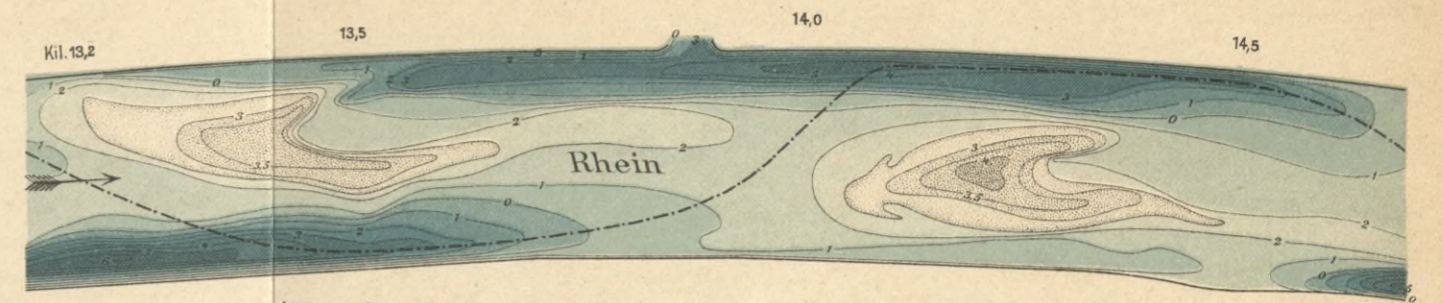


Abb. 5. Oberrhein unterhalb Straßburgs. Aufnahme v. November 1893. 1: 9000.

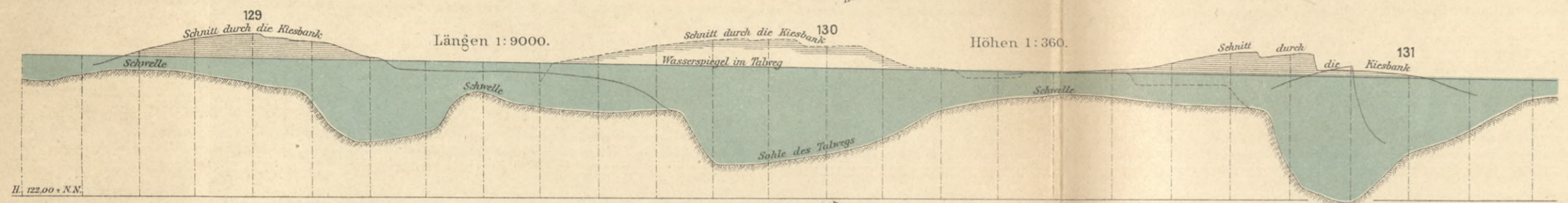


Abb. 3. Längenschnitt vom Oberrhein.

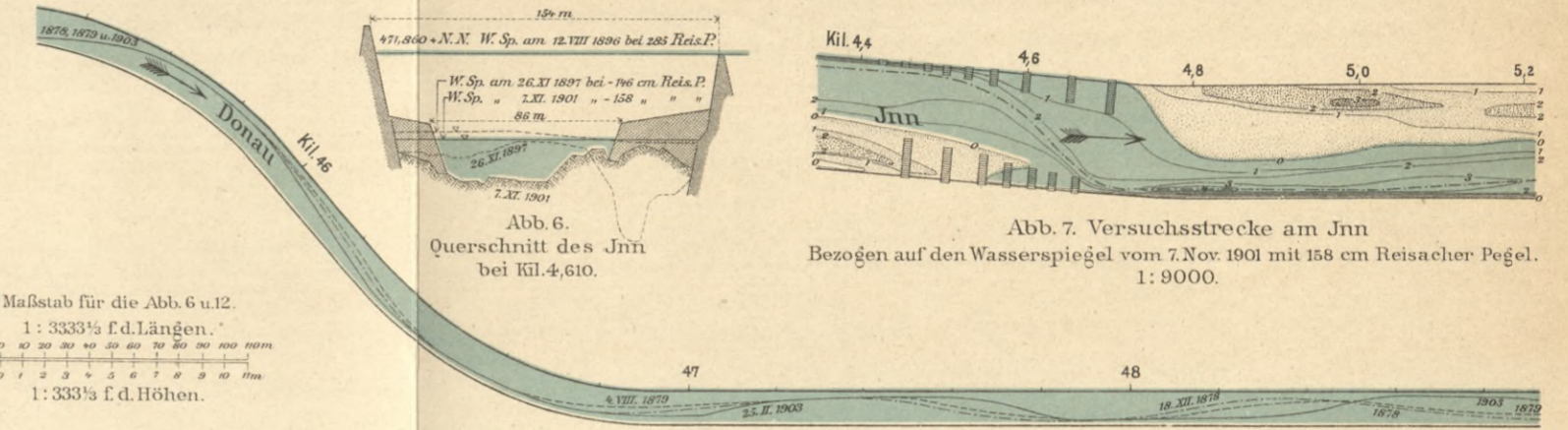


Abb. 8. Donaustrecke, Karolinenkanal. 1: 17 000.



Abb. 10 u. 11. Tiefenkurven der Weichsel von Kil. 140 bis 148. 1: 17 500.



Abb. 9. Kiesbänke in der Donau zwischen Ulm u. Kehlheim. 1: 9000.

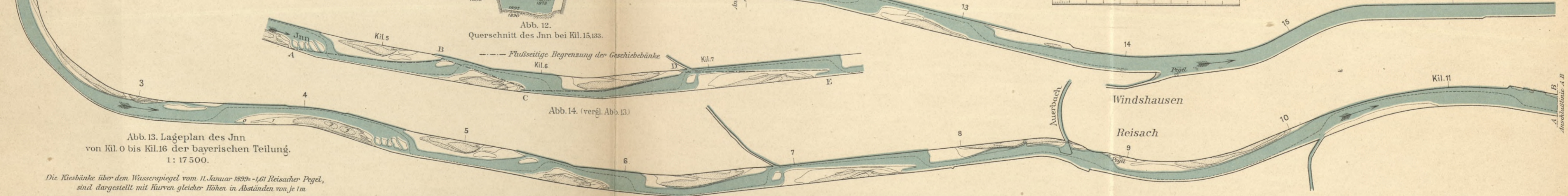


Abb. 13. Lageplan des Jnn von Kil. 0 bis Kil. 16 der bayerischen Teilung. 1: 17 500.

Die Kiesbänke über dem Wasserspiegel vom 11. Januar 1899 - 161 Reisacher Pegel, sind dargestellt mit Kurven gleicher Höhen in Abständen von je 1 m

Maßstab für die Abb. 6 u. 12. 1: 333 1/3 f.d. Längen. 1: 333 1/3 f.d. Höhen.



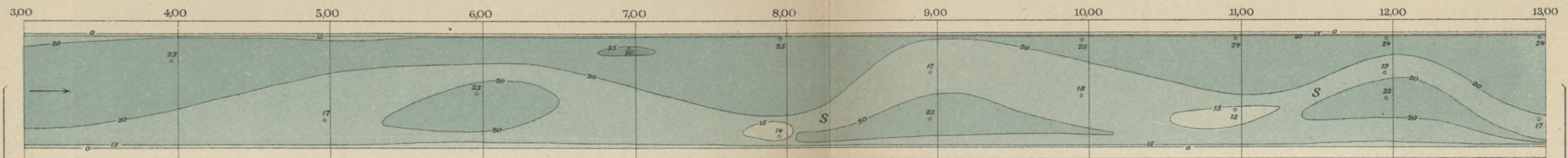


Abb.1. Nach 1 stündigem Durchflusse.

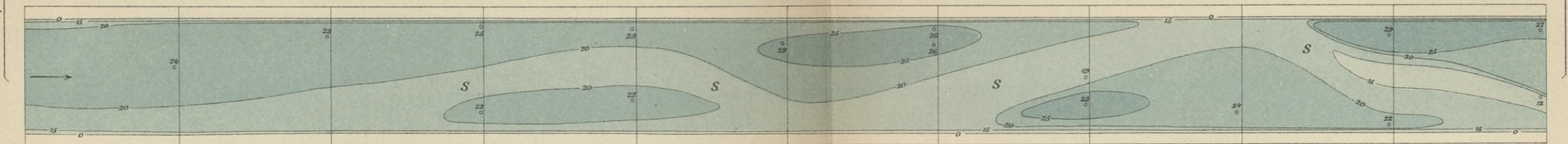


Abb.2. Nach 2 stündigem Durchflusse.

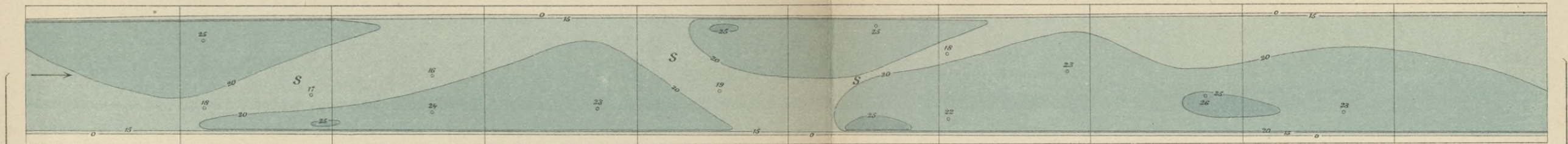


Abb.3. Nach 1 stündigem Durchflusse.

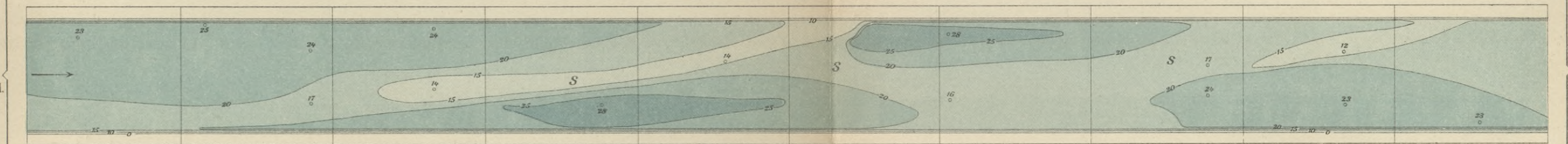


Abb.4. Nach 2 stündigem Durchflusse.

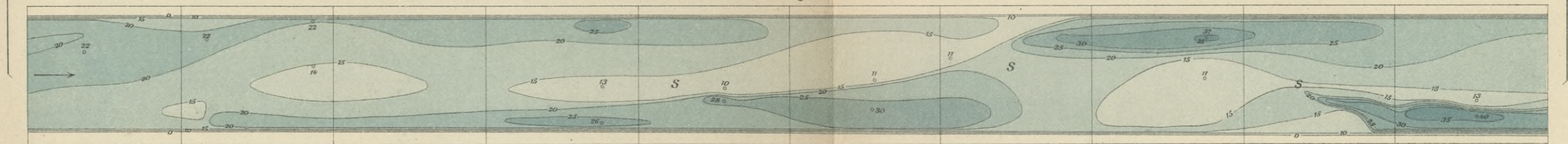


Abb.5. Nach 3 stündigem Durchflusse.

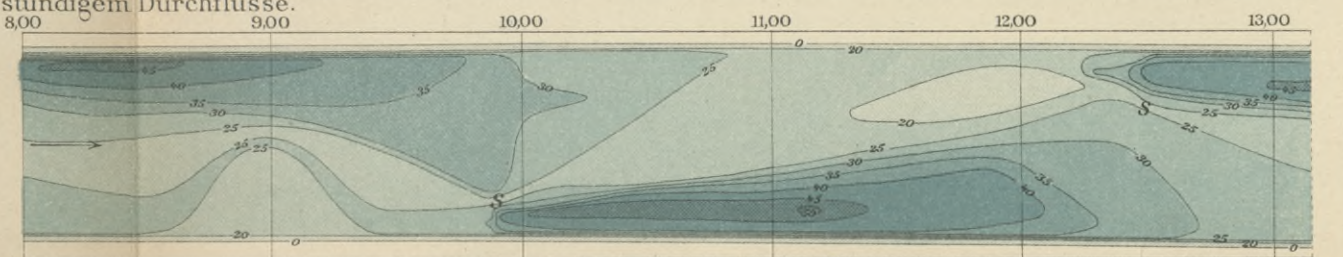


Abb.6. Nach 5 stündigem Durchflusse.

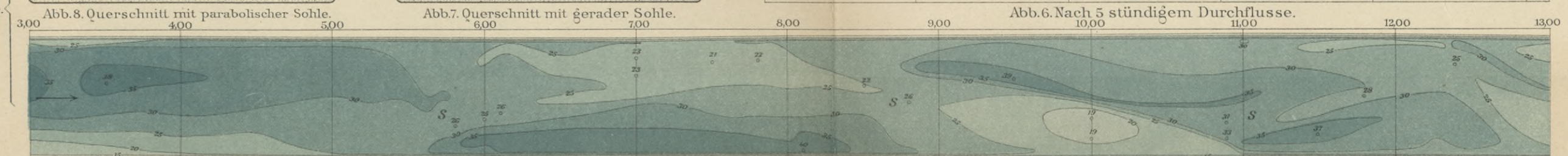
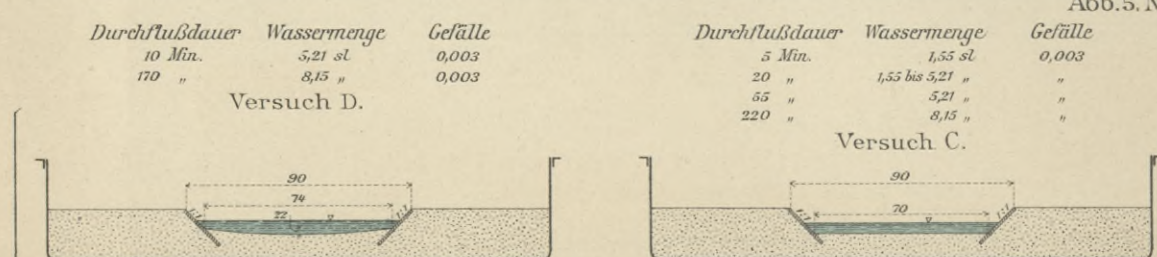


Abb.9. Nach 3 stündigem Durchflusse.

Versuch A
Gefälle 0,003
Wassermenge 5,21 sl.
1 : 30.

Versuch A
Gefälle 0,003
Wassermenge 5,21 sl.

Versuch B
Gefälle 0,0025
Wassermenge 5,21 sl.
1 : 30.

Versuch B.
Gefälle 0,0025
Wassermenge 5,21 sl.

Versuch D.
1 : 30.

Versuch C.

Versuch D.



Untersuchungen über die Bettausbildung
gerader oder schwach gekrümmter Flußstrecken mit beweglicher Sohle.



Abb. 1. Pfeilerversuch. Stromaufwärts gesehen.
Wassermenge 5,21 s/l, Durchflußdauer 30 Min., Gefälle 0,0025.

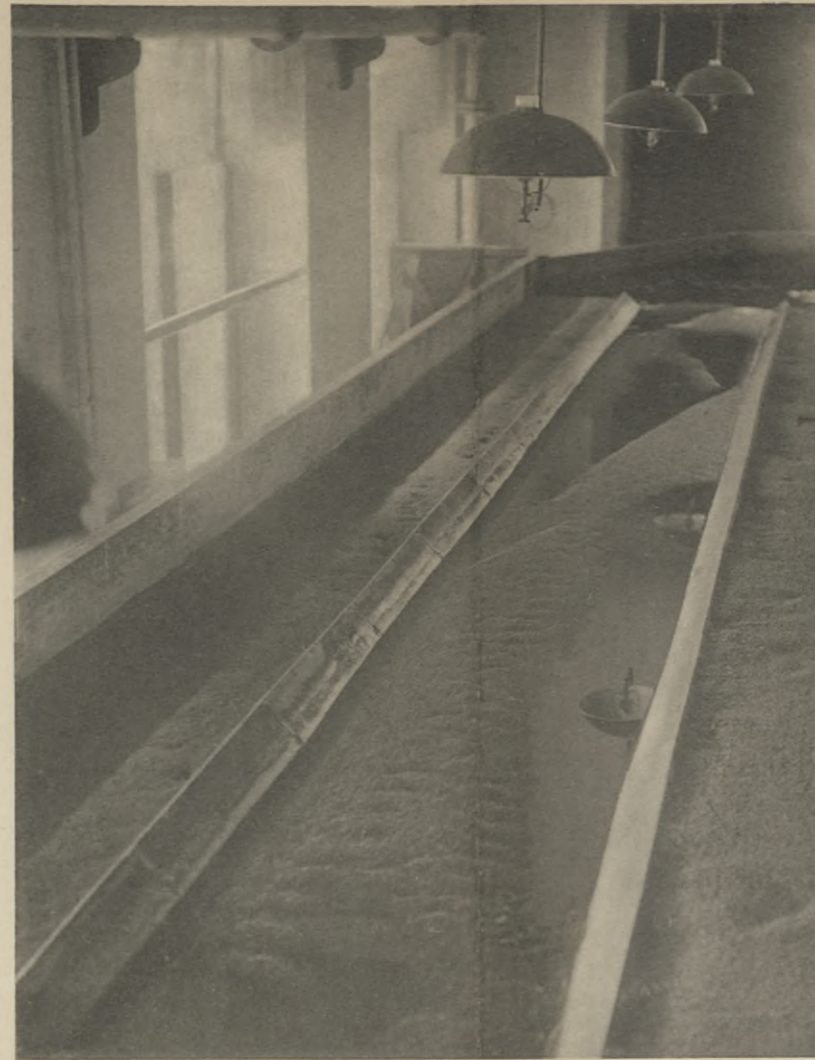


Abb. 4. Versuch D. Stromab gesehen.

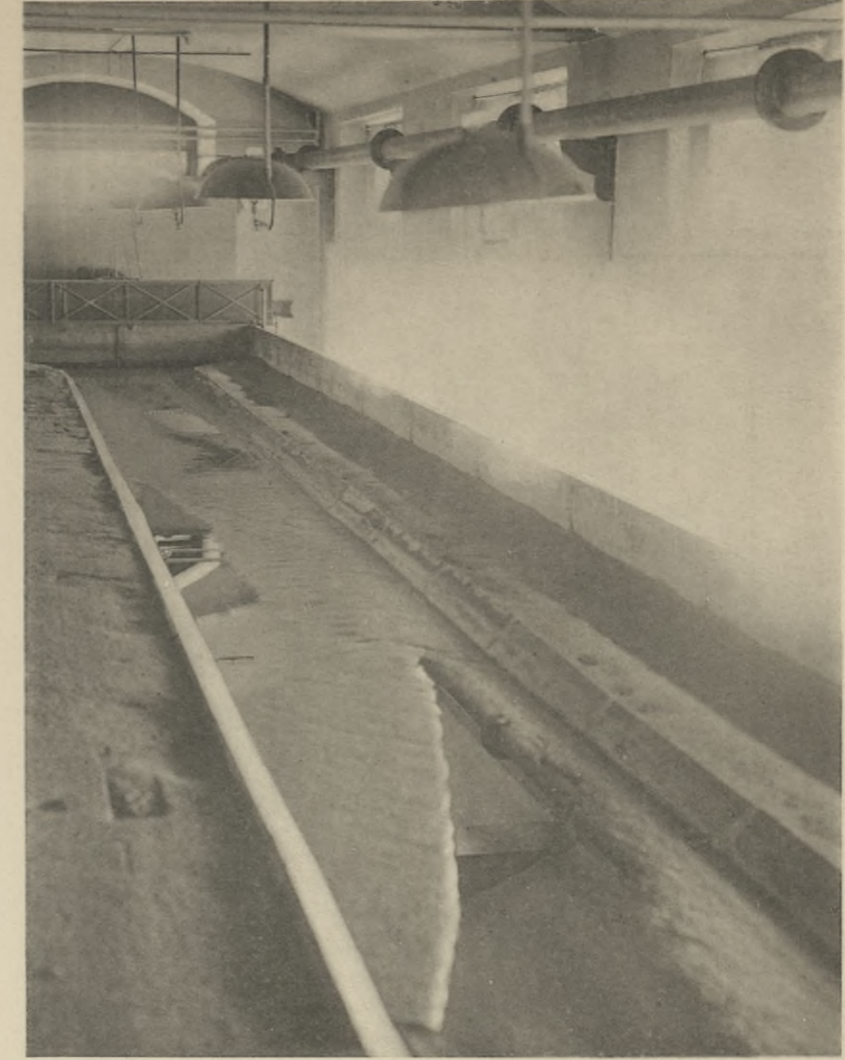


Abb. 5. Versuch D. Stromauf gesehen.



Abb. 2. Auslauf der rechtsufrigen Sandbank von Stat. 8,5 bis 9,4 (s. Abb. 1).

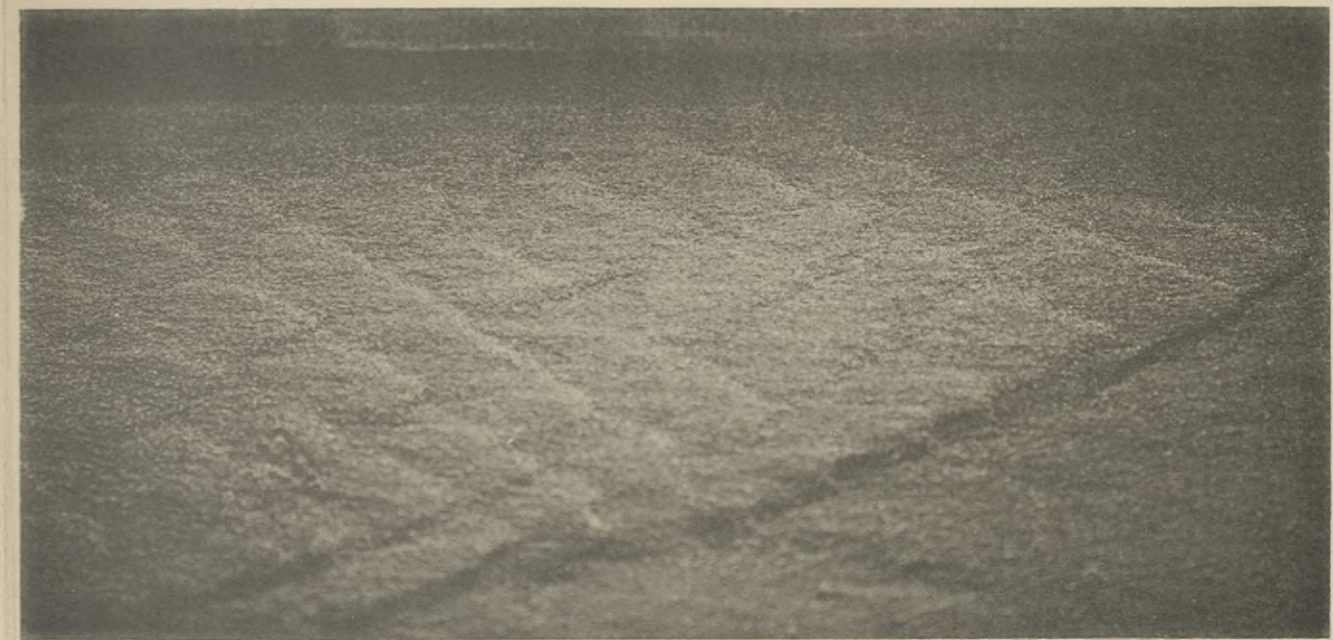


Abb. 3. Auslauf der linksufrigen Sandbank von Stat. 9,9 bis 11,1 (s. Abb. 1).



Untersuchungen über die Bettausbildung
gerader oder schwach gekrümmter Flußstrecken mit beweglicher Sohle.

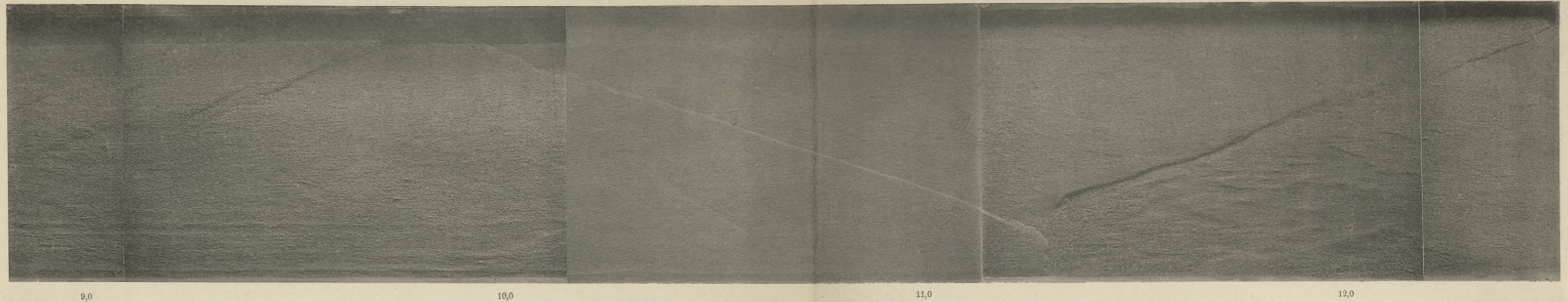


Abb. 1. Versuch A. Von Station 8,8 bis 12,5.

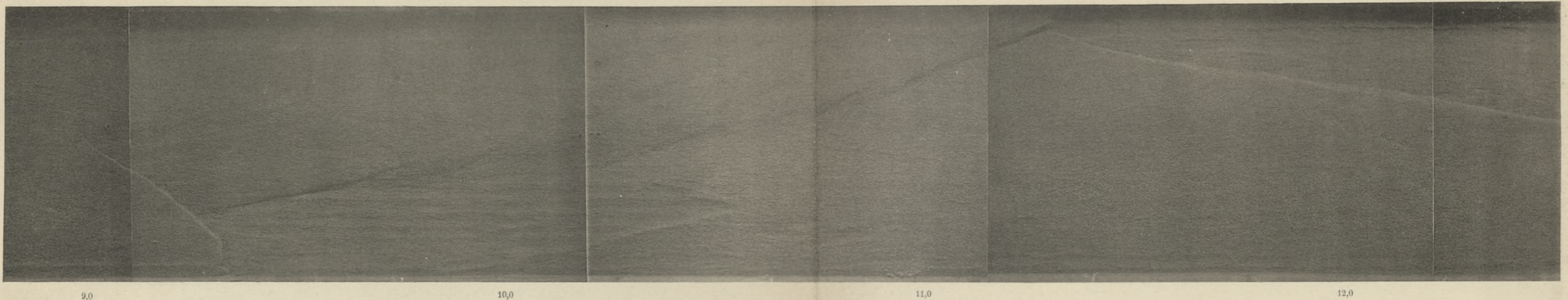


Abb. 2. Versuch A. Von Station 8,8 bis 12,5.



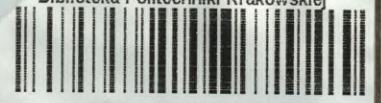
Abb. 3. Versuch C. Von Station 8,8 bis 12,7.



S. 61

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Biblioteka Politechniki Krakowskiej



III-33614

Kdn., Czapskich 4 — 678. I. XII. 52. 1.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000305821