

## Von der Beschaffenheit und dem Verhalten des Sandes<sup>1)</sup>

VON HEINRICH HÜBBE

Unter der Benennung Sand verstehen wir ein Gemenge verschiedener Mineralien in theils eckigen, theils abgerundeten Körnern, worunter gemeinlich der Quarz vorherrscht. Als charakteristisches Merkmal des sogenannten reinen Sandes gilt die Eigenschaft, daß die Körner im trocknen Zustande nicht durch Cohäsion oder Klebrigkeit zusammengehalten, wohl aber in gewissem Grade durch Reibung am Herabgleiten gehindert werden. Zum Zwecke theoretischer Behandlung eines mit dem Namen Statik des Sandes belegten Zweiges der Wissenschaft ist die Definition aufgestellt worden „Eine lose Masse, zwischen deren Elemente keine andre Kraft wirkt als die Reibung, nennen wir Sand.“ (ORTMANN, Statik des Sandes.) Die Gesetze des Gleichgewichts solcher „gleichartiger, unpreßbarer“ Sandmassen bilden den Gegenstand jener theoretischen Erörterungen, von denen die hier vorliegenden Untersuchungen jedoch wesentlich verschieden sind und deshalb auch nicht von einer gleich beschränkten Definition des Gegenstandes ausgehen können; sie verhalten sich zu jener Theorie etwa wie die Betrachtung eines wirklichen, aus Holzfasern bestehenden Balkens zu der statischen Lehre vom Hebel, welche letztere eine feste, unbiegsame Linie voraussetzt; oder wie die Anschauung eines lebendigen Stromes mit seinen Wellen und inneren Bewegungen zu den abstracten Betrachtungen der Hydraulik, bei denen eine in parallelen Stromfäden und mit ebener Oberfläche im Strombette sich fortschiebende Flüssigkeit gedacht wird.

Selten findet man in natürlichen, trüben Strömen den Sand ohne Beimischung desjenigen feineren Materials, welches wir Schlick nennen, und dessen Eigenschaften und Verhalten ich in einer besonderen Abhandlung erörtert habe.<sup>2)</sup>

Es ist aber das Verhältniß des Schlicks zum Sande in den oberen Stromgegenden, wenigstens im Bereiche der Strömung, ein so geringes, daß dort der im Strombette befindliche Sand als reiner Sand bezeichnet zu werden pflegt; weiter abwärts, im Gebiete der Meeresfluth, ist die Beimengung von Schlick zum Sande bedeutender, bis sie in der Nähe des Meeres wo die Wirkung der Wellen vorherrscht, wieder geringer wird, so daß zuletzt am Meeresstrande der reinste Sand angetroffen wird. Eine Mischung von Schlick und Sand kann man im trocknen Zustande nicht rein von einander trennen, wenn man auch die feinsten Siebe mit der ausdauerndsten Beharrlichkeit anwendet; nur durch sogenanntes Schlämmen, d. h. durch die Wirkung bewegten Wassers, welches die Schlicktheilchen schwebend fortführt, die Sandkörner aber zurückläßt, ist die Darstellung von reinem oder schlickfreiem Sande möglich. Im gewöhnlichen Sprachgebrauche der Baupraxis nennt man den Sand schlickfrei, wenn derselbe, in reines Wasser geschüttet, rasch zu Boden sinkt, ohne eine merkliche Trübung zu verursachen; den Schlick aber nennt man mehr oder weniger sandig, je häufiger beim Reiben zwischen den Fingern einzelne, stets leicht zu unterscheidende Sandkörner fühlbar sind. Für die Praxis und für Untersuchungen, die, wie die gegenwärtigen, der Praxis dienen sollen, reichen diese allgemein anerkannten Merkmale aus, um Schlick von Sand zu unterscheiden, und in Fällen, wo es darauf ankommt, das eine oder das andere Material

<sup>1)</sup> Aus: Zeitschr. f. Bauwesen, Jg. 11, 1861

<sup>2)</sup> Zeitschr. f. Bauwesen, Jg. 10, 1860, S. 491

unvermischt darzustellen, zu erkennen, ob das Verfahren des Schlämmens angewendet werden muß oder nicht.

Nach der andern Seite hin, nämlich nach der des gröbereren Materials, welches *Kies*, Geschiebe, Gerölle (vulgo Steine) genannt wird, ist der Begriff des Sandes nicht scharf abzugrenzen, ja man kann die ebengenannten Materialien als grobkörnigen Sand ansehen, und diejenigen Sätze, welche in Bezug auf reinen Sand ganz allgemein zu erweisen sind, auch auf Gemenge der letzteren Art anwenden. Eine conventionelle Unterscheidung zwischen Sand und Kies kann indeß aus dem gewöhnlichen Sprachgebrauche abgeleitet werden, indem ein Material, dessen Körner in einem Siebe mit Oeffnungen von 2 Millimeter Durchmesser gar nicht oder nur in geringer Zahl zurückbleiben, von dem Einen als grober Sand, von dem Andern als feiner Kies bezeichnet werden wird, mithin in dieser Gegend die Grenze anzunehmen ist. Von meinen Experimenten habe ich alle Körner, die in einem Siebe zurückblieben, dessen Oeffnungen 2,2 Millimeter Durchmesser hatten, ausgeschlossen.

Der Sand bedeckt den Boden unserer Strombetten fast durchgängig, er bildet die Unterlage aller Moore und Marschen in den Stromthälern, ist in den, zuweilen vom Strom bespülten Hochufeln der Geest in mächtigen Lagen enthalten, und die Strandgegenden am Meere bestehen fast allenthalben aus diesem Material. Somit umfaßt die Betrachtung des Sandes und seines Verhaltens unter der Einwirkung von Strom und Wellen ein Feld von unermeßlicher Ausdehnung und eine unendliche Mannigfaltigkeit der Erscheinungen, wo nur mittelst eines systematischen Verfahrens, welches auch diejenigen Umstände berücksichtigt, die auf den ersten Anblick minutiös oder unwesentlich erscheinen mögen, ein sicherer Ueberblick erlangt wird. Aus der Natur der Sache ergibt sich bei der Behandlung dieses Stoffes eine Trennung der Untersuchungen in zwei Hauptabschnitte, von denen der erste die natürliche Beschaffenheit und Vertheilung des Sandes im Strombette zum Gegenstande hat, der zweite aber sich mit der Bewegung des Sandes in Strom und Wellen beschäftigt. Die Folgerungen aus beiden und deren Zurückführung auf ein allgemeines Princip werden in einem dritten Abschnitte den Schluß des Ganzen bilden.

### I. Die natürliche Beschaffenheit und Vertheilung des Sandes im Strombette

Wenn man Proben von Sand aus verschiedenen Gegenden vergleicht, so wird man oft einen großen Unterschied bemerken. Sind zwei Sandproben aus verschiedenen Strömen, so ist dies zuweilen an der mineralogischen Beschaffenheit der Sandkörner erkennbar, an einem und demselben Strome ist es weniger der Fall. Der auffallendste und zugleich für Experimente zur Beobachtung der Sandbewegung ungemein nützliche Unterschied unter mehreren Sandproben besteht in der verschiedenen Färbung. Reinen Quarzsand hat man zuweilen ganz weiß, die einzelnen Körner sind dann unter dem Mikroskop vollkommen durchsichtig, und ein solcher Hügelabhang oder Seestrand kann in einiger Entfernung so blendend wie frisch gefallener Schnee erscheinen. Bunte Färbungen rühren theils von beigemengten Metalloxyden, namentlich Eisenoxyd her, theils, aber seltner, werden sie durch Bruchstücke farbiger Gesteine verursacht, wenn diese ein merkliches Verhältniß zur ganzen Masse ausmachen. Bekannt sind die, in wunderbar schöner Abwechslung farbiger Streifen zu Tage tretenden, aufgerichteten Sandschichten an der Küste von Alum Bay auf der Insel Wight, aber auch unsre Alluvialgegenden enthalten sehr intensiv gefärbte, gelbrothe und rothbraune Schichten.

Wichtig ist auch der Unterschied in der Form der Sandkörner, da einerseits die Form unstreitig Einfluß auf die Beweglichkeit derselben hat, und andererseits die Bewegungen,

denen die Körner durch Strom und Wellen unterworfen werden, zweifelsohne auf die Form der Körner eine Einwirkung ausüben.

Die am allgemeinsten verbreitete Ansicht hierüber ist wohl die, daß die durch den Strom abwärts geführten Geschiebe, Kiesstücke und Sandkörner allmählig durch Reiben, Stoßen und Schleifen an und gegen einander immer mehr verkleinert würden, so daß nach und nach aus dem größeren Material das feinere entstehe, welches letztere demnach abgerundeter sei als das erstere. Eine gerade entgegengesetzte Ansicht, nach welcher im Allgemeinen die Sandkörner, so wie sie im Strome gefunden werden, durch Abspülung der Ufer und der Erdoberfläche hineingelangt sein, und durch den Strom nur nach Maaßgabe ihrer Größe gleichsam *s o r t i r t* werden sollen, schließt sich, wie dies in dem Folgenden näher nachgewiesen werden wird, genauer an die Natur an, denn das Hauptgeschäft des Stromes in dieser Beziehung besteht allerdings darin, daß derselbe das feinere Korn von dem größeren sondert und jenes schneller fortführt als dieses. Nichts destoweniger ist hierbei die Entstehung kleiner Sandkörner aus größeren eine unverkennbare Thatsache, so wie auch das häufige Vorkommen abgeschliffener oder abgerundeter Sandkörner nicht unbemerkt bleiben kann.

Nach häufiger Betrachtung einer großen Menge von Sandproben aus verschiedenen Gegenden, wobei ich mich mäßiger Vergrößerungen durch das Mikroskop bediente (starke Vergrößerungen sind hierbei nicht zu empfehlen, da sie keine Uebersicht gewähren), habe ich gefunden, daß unter den Sandkörnern aller Größen gewisse Hauptarten in Betreff der Form zu unterscheiden sind, nämlich:

- a) Unversehrte, ursprüngliche Gebilde; Krystalle, kugelige, perlförmige, nierenförmige;
- b) dergleichen Gebilde mit deutlicher Abschleifung hervortretender Theile, zuweilen ganz abgerundet;
- c) Bruchstücke solcher Gebilde; eckig, muschelrig, gespalten oder blätterig;
- d) Bruchstücke von Conglomeraten und Massengesteinen, meistens mit abgeschliffenen Ecken, zuweilen auch ganz abgerundet.

Selten dürfte im Bereiche eines großen Stromes ein Sand gefunden werden, worin nicht jede dieser Arten von Körnern vertreten wäre, aber es zeigen sich dabei folgende Verschiedenheiten.

Im Allgemeinen kommt die eckige Form (c) unter den kleineren Sandkörnern häufiger vor als unter den größeren; die rundlich abgeschliffenen Formen (b und d) zeigen sich häufiger unter den größeren Körnern; unversehrte Gebilde (a) werden unter allen Größen von Körnern gefunden. In der Nähe der See, wo die Wellen und der Wind lebhaftere Wirkungen auf die Bewegung des Sandes ausüben, herrschen die rundlichen Formen auch bei den kleineren Körnern vor, und man kann zuweilen an nahe bei einander liegenden Küstenpunkten, wenn der eine gegen Wind und Wellen geschützt, der andere denselben ausgesetzt ist, diese Verschiedenheit der Lage in den Formen der Sandkörner ausgesprochen finden. Ein solcher Fall kommt an der Mündung der Elbe vor, wo in dem feinen Quarzsande des Cuxhavener Hafens die eckige Form auffallend contrastirt mit den rundlichen Formen des Sandes von dem nur etwa eine Meile weiter seewärts belegenen Steinmarter Seestrande. Hieraus ist zu schließen, daß viele der kleineren Sandkörner ihre Abrundung nicht sowohl auf dem langen Wege erhalten, den sie im Strome zurücklegen, sondern daß sie zum Theil in ziemlich eckiger Form bis in die Nähe des Meeres geführt, dann aber am Strande durch Wind und Wellen abgeschliffen werden.

Da ich mich in Betreff dieser interessanten Thatsachen nicht auf meine alleinige Beobachtung verlassen wollte, habe ich Proben von ausgesiebten kleinen Sandkörnern aus verschiedenen Gegenden des Elbestroms an Herrn Doctor Herrmann SCHACHT, der in Fragen dieser Art als Autorität genannt werden darf, gesandt. Dieser hat die hier in Betracht kommenden Körner folgendermaßen charakterisirt:

- 1) Gegend von Lauenburg. Ziemlich reine Quarzkörner, meist scharfkantig.
- 2) Gegend von Altona. Fast durchaus reine Quarzkörner mit nicht abgeschliffener Oberfläche.
- 3) Aus dem Cuxhavener Quarantäne-Hafen. Die Körner sind scharfkantig, nur vereinzelt hie und da ein abgeschliffenes Korn.
- 4) Vom Steinmanner Seestrand. Quarzkörner, rein; der Mehrzahl nach rundlich abgeschliffen und mit warzenförmiger Oberfläche, d. h. nicht vollkommen glatt oder polirt, wohl aber der scharfen Kanten beraubt.
- 5) Vom Strande der Insel Neuwerk. Sehr reine Quarzkörner, zum Theil etwas abgeschliffen, zum Theil scharfkantig.

Diese Proben waren, wie gesagt, sämmtlich von der feinsten ausgesiebten Körnergröße, deren Durchmesser kleiner als 0,15 Millimeter ist. Beachtet man nun, daß die großen Körner am Boden des Strombettes gerollt oder gewälzt, die kleinsten dagegen bei lebhafter Strömung schwebend fortgetragen werden, so erklärt es sich, daß diese die eckige Form länger conserviren; der gerollte Körper überliefert, indem er abgerundet wird, die kleinen abgestoßenen Stückchen dem Strome in eckiger Form, und die Form der letzteren bleibt eckig, so lange sie selber nicht gerollt werden. Im Bereiche der Strandwellen aber werden alle Körner gerollt, die großen wie die kleinen, und zwar mit einer viel größeren Geschwindigkeit als dies durch die Strömung geschieht; demnach muß am Meeresstrande die abgerundete Form allgemeiner vorherrschen und zuletzt, wenn die Körner als Flugsand, fast mit Windesgeschwindigkeit am Boden hingeführt werden, ihre Vollendung erhalten. Hieraus erklärt sich auch die größere Beweglichkeit des Flugsandes im Vergleich mit getrocknetem Baggersande, die nicht einer größeren Feinheit des Kornes zugeschrieben werden kann, da auch grober Flugsand sich durch größere Beweglichkeit vom gebaggerten Sande unterscheidet. In kleineren Küstenflüssen, welche schon nach einem kurzen Laufe aus dem Hochlande das Meer erreichen, müssen hiernach auch die großen Sandkörner scharfkantiger sein, eine Annahme, die ich bei Vergleichung von Sand aus dem River Tyne in Nord-England sehr in die Augen fallend bestätigt fand.<sup>1)</sup> Noch ist zu bemerken, daß der Sand im Fluthgebiete der Ströme häufig fremdartige Beimischungen enthält, die schon bei mäßigen Vergrößerungen als Bruchstücke von Thierschalen, Muscheln und dergleichen erkannt werden. Von zwei derartigen Sandproben hat Herr Doctor SCHACHT folgende Beschreibung gegeben:

1) Von der Gegend bei Bojen-Sand (Elbe). Vielfach mit Seesternfüßen (nach EHRENBURG'S Angabe) verunreinigt; ferner, jedoch in geringerer Menge, Infusorienpanzer (Sphaerodiscus) und Bündel langer Kieselnadeln (von einer Spongia?), auch sehr kleine Schneckenhäuschen, desgleichen Bruchstücke äußerst zarter Muschelschalen; außerdem Pflanzenüberreste, wahrscheinlich von Schilffarten, vielleicht auch braunkohlenartige Substanzen, über welche sich jedoch nichts Näheres ausmachen läßt.

2) Aus dem Quarantäne-Hafen zu Cuxhaven. Sehr unrein; ähnlich wie bei Bojen-Sand mit vielen Seesternfüßen, Schneckenhäusern und Bündeln zarter Kieselnadeln. Pflanzenüberreste scheinen jedoch zu fehlen, dagegen Bruchstücke von Insectenbeinen u. dergl.

Ich wende mich jetzt zu den Untersuchungen, welche die Eigenschaften des reinen, von Schlick und anderen Beimischungen befreiten Sandes betreffen.

In Betreff des specifischen Gewichts wird von hydrotechnischen Schriftstel-

---

<sup>1)</sup> Besonders geeignet zur Veranschaulichung der allmäligen Formveränderung durch Abschleifen, sind die im Sande befindlichen Feldspathkristalle, die an ihrer, ursprünglich rhomboëdrischen Form leicht erkannt werden, auch wenn die Kanten schon ziemlich weggeschliffen sind.

lern angenommen, daß dasselbe für feinen und groben Sand, für Kies und größere Geschiebe keine erhebliche Unterschiede zeige, ein Satz, den ich bei meinen Untersuchungen mit Sandsorten von der verschiedensten Körnergröße vollkommen bestätigt gefunden habe.

BRAHMS, dessen Angaben den noch jetzt geltenden praktischen Regeln in den wesentlichsten Punkten zum Grunde liegen, fand das spezifische Gewicht „eines Kieselsteins“ = 2,59, dasjenige von reinem weißen Sande = 2,64.

WOLTMAN setzt (Beitr. Bd. 2.) das specif. Gew. der „Feldsteine zu Uferbefestigungen,“ worunter an seinem damaligen Wohnorte und Wirkungskreise (Cuxhaven) granitische Findlingsblöcke verstanden werden, = 2,6, und theilt (Bd. 3, S. 197) folgende auf eigenen Versuchen beruhende Verhältnißzahlen mit:

Feldst.	2 bis 6 Pfd. schwer	2,586; Zwischenräume = 0,376
Kiesel	½ Pfd. schwer	2,696; Zwischenräume = 0,417
Kiesel	3 Lth. schwer	2,629; Zwischenräume = 0,393
Flugsand		2,577; Zwischenräume = 0,412
Geestsand (Grubensand)		2,626; Zwischenräume = 0,419

Diese Werthe für das spezifische Gewicht gelten für die Substanz der Körner ohne Zwischenräume gedacht; das Verhältniß der letzteren zum ganzen Raum ist durch die zweite der gegebenen Zahlen ausgedrückt.

Daß sich durch meine Versuche für das spezifische Gewicht keine neue abweichende Bestimmung ergeben werde, ließ sich schon nach einigen wenigen Experimenten erkennen, und es würde keiner Fortsetzung derselben bedurft haben, wenn nicht in dem Verhältniß der Zwischenräume zum ganzen Raume starke Verschiedenheiten sich gezeigt hätten, welche das Interesse an der Auffindung eines darauf bezüglichen Gesetzes erregten. Es wurden deshalb mit verschiedenen Sandsorten 42 Experimente ausgeführt, wobei folgendermaßen verfahren ward:

Ein Gefäß von bekannter Inhaltsgröße ward mit trockenem Sande (80°R.) gefüllt, das Gewicht des eingeschütteten Sandes bestimmt, dann der Sand im Gefäß mit Wasser gesättigt und das Gewicht des hierzu erforderlichen Wassers notirt, und schließlich, weil trockner Sand durch Benetzung stets mehr oder weniger zusammensinkt, durch abwechselnde Hinzufügung von trockenem Sande und Wasser, bei jedesmaliger Notirung des Gewichtes des Hinzugefügten, die Sache dahin gebracht, daß das Gefäß mit völlig von Wasser gesättigtem Sande, ohne eingeschlossene Luftblasen und ohne überflüssiges Wasser, genau gefüllt war.

Nennt man dann:

$P$  das Gewicht des zur Auffüllung des ganzen Gefäßes erforderlichen Wassers,

$g'$  das Gewicht des Sandes, welcher in dem Gefäße Platz gefunden hat,

$g''$  das Gewicht des Wassers, welches in den Zwischenräumen der Sandkörner im Gefäße Aufnahme fand,

$G$  das spezifische Gewicht der Sandkörner und

$J$  das Verhältniß der Zwischenräume zum ganzen Raum, so hat man

$$G = \frac{g'}{P - g''} \text{ und } J = \frac{g''}{P}.$$

Als Beispiel möge folgender Versuch dienen:

Für das benutzte Gefäß war  $P = 78,165$  Grammen;

		Sand	Wasser
1. Wägung	121,20 Gr.	121,20	—
2. Wägung	151,89	—	30,69
3. Wägung	154,76	2,87	—
4. Wägung	155,05	—	0,29

Das mit gesättigtem Sande gefüllte Gefäß enthielt also 124,07 Gr. Sand u. 30,98 Gr. Wasser; hieraus folgt:

$$\text{das spezifische Gewicht } G = \frac{124,07}{78,165 - 30,98} = 2,63,$$

$$\text{das Verhältniß der Zwischenräume } J = \frac{30,98}{78,165} = 0,396.$$

Bei einem Gefäße von der angegebenen Größe kommt man gewöhnlich mit 4 Wägungen zum Ziel, bei größeren Gefäßen sind mehrere erforderlich.

Für das specif. Gewicht war das Mittel aus allen 42 Versuchen = 2,579; der kleinste gefundene Werth war = 2,51, der größte = 2,63. Weder die Ortslage noch die Größe der Körner hatte darauf einen Einfluß, denn es ergab sich, daß sowohl bei den Versuchen mit dem feinsten Sande, als auch bei denen mit den größten Sorten, und ebenfalls bei denjenigen, die mit natürlichen Sandgemengen von verschiedenen Fundorten gemacht waren, die Werthe von  $G$  vom Maximum bis zum Minimum schwankten. Da WOLTMAN für Sand  $G = 2,577$  bis  $2,626$ , also im Mittel  $2,601$ , und BRAHMS  $G = 2,64$  angiebt, und das obige Mittel =  $2,579$  ist, so wird das Mittel aus allen dreien, oder  $2,6$  als das spezifische Gewicht unseres gewöhnlichen Flußsandess, derselbe möge fein oder grob sein, vom oberen Strome oder von der Meeresküste herrühren, anzunehmen sein.

Das Verhältniß der Zwischenräume zum ganzen Raume, oder der Werth von  $J$  schwankt, scheinbar unregelmäßig, zwischen  $J = 0,396$  bis  $J = 0,279$ .  $J$  ist offenbar von mindestens zwei Umständen abhängig, nämlich von der mehr oder minder gleichen Größe der Körner und von ihrer mehr oder minder regelmäßigen Gestalt, und da jeder dieser Umstände stark variiren kann, so müssen natürlich sehr verschiedene Werthe von  $J$  zum Vorschein kommen, in denen eine Regel nur dann zu entdecken ist, wenn man den Einfluß eines jener beiden Umstände eliminiren kann. Letzteres ist in Betreff der Körnergröße möglich, wenn man Versuche mit Sandproben von nahezu gleicher Körnergröße aus verschiedenen Stromgegenden zusammenstellt. Hierzu eignet sich die bei meinen Versuchen mit No. VI bezeichnete Sorte am besten, da bei ihr die Grenzen der Körnergröße am nächsten aneinander liegen (die Körner dieser Sorte haben nicht unter  $0,15$  und nicht über  $0,22$  Millimeter Durchmesser). Fünf Versuche sind mit dieser Sorte gemacht, und zwar war der dazu benutzte Sand von 5 verschiedenen Orten entnommen, die auf der 21 Meilen langen Stromstrecke von Lauenburg bis zu der an der See belegenen Insel Neuwerk vertheilt liegen. Danach ist nach der Reihenfolge der Ortslage am Strome:

für Lauenburg Sorte VI  $J = 0,372$

für Geesthacht Sorte VI  $J = 0,342$

für Köhlbrandt Sorte VI  $J = 0,369$

für Blankenese Sorte VI  $J = 0,337$

für Neuwerk Sorte VI  $J = 0,331$ .

In diesen Zahlen scheint das Princip der Abnahme der Werthe von  $J$ , so wie man vom oberen Strome nach der See zu fortschreitet, ausgesprochen zu sein, woraus sich auf eine zunehmende Regelmäßigkeit der Gestalt der Körner in dieser Richtung schließen läßt, da a priori anzunehmen ist, daß unregelmäßige Körper sich nicht so dicht lagern als regelmäßige.

Denkt man sich einen Haufen von gleich großen Kugeln, deren Durchmesser als verschwindend klein gegen die Größe des Haufens angenommen wird, so daß es auf die Gestalt des letzteren nicht weiter ankommt, und setzt man voraus, daß diese Kugeln möglichst dicht gelagert sind, so findet man die Zwischenräume zwischen den Kugeln =  $0,2595$  des ganzen Raumes; soweit würde also der Werth von  $J$  herabsinken, wenn gleich

große Sandkörner bis zur vollkommenen Kugelgestalt abgeschliffen wären. Die obigen Zahlen nähern sich offenbar diesem Grenzwerte, jedoch ohne denselben zu erreichen, wie es auch in der Natur der Sache liegt, da selbst in dem abgerundetsten Flugsande noch eine große Mannigfaltigkeit der Gestalt der Körner gefunden wird.

Der kleinste Werth von  $J$ , den meine Versuche ergaben, nämlich  $J = 0,279$ , liegt, wie man sieht, diesem auf die Regelmäßigkeit der Gestalt bezüglichen Grenzwerte sehr nahe; dies hat aber einen andern Grund, indem der Versuch, zu dem jener kleinste Werth gehört, mit einem Sande von sehr v e r s c h i e d e n e r Körnergröße angestellt ward, ein Umstand, der bekanntlich viel dazu beiträgt, eine dichte Lagerung zu bewirken, weil die kleineren Körner in die Zwischenräume zwischen den größeren fallen.

Das Mittel aus allen 42 Versuchen ist . . . . .  $J = 0,344$ .

Das Mittel aus 11 Versuchen mit natürlichen Gemengen, so wie das Strombette sie an verschiedenen Orten darbietet, ist . . . . .  $J = 0,346$ , wobei der kleinste Werth =  $0,307$ , der größte =  $0,396$  war.

Es kann also nach meinen Versuchen nicht wohl ein größerer Mittelwerth als  $0,345$  für die Zwischenräume im Flußsande angenommen werden, ein Werth, der sich den in der Praxis gebräuchlichen Regeln für Mörtelbereitung anschließt, dagegen von der oben mitgetheilten Angabe WOLTMAN's, die  $0,41$  betrug, nicht unerheblich abweicht.

Von Interesse ist es, die hierauf bezüglichen Resultate für Sand und Schlick mit einander zu vergleichen. Nach meinen früheren Mittheilungen<sup>1)</sup> beträgt das specif. Gewicht der Schlicktheilchen  $2,43$ , das Verhältniß ihrer Zwischenräume zum ganzen Raume  $0,392$ , und es ist nach dem Obigen das specifische Gewicht der Sandkörner im Mittel =  $2,6$ , das Verhältniß ihrer Zwischenräume zum Raume der ganzen Masse =  $0,35$ . Wenn nun auch, wie wir gesehen haben, diese Zahlen zwischen gewissen Grenzen schwanken, so scheint es nach denselben doch nicht mehr zweifelhaft zu sein, daß in der That die Schlicktheilchen nicht bloß kleiner, sondern auch in Masse specifisch leichter und im Einzelnen unregelmäßiger (eckiger?) von Form sind als die Sandkörner. Ersteres erklärt sich daraus, daß im Schlick die Thonerde, im Sande die schwerere Kieselerde vorherrscht. Letzteres kann zur Bestätigung der eben ausgesprochenen Ansicht dienen, daß vom Strome die feineren Sinkstoffe weniger abgerundet werden als die gröbereren. Beide Eigenthümlichkeiten aber stehen ohne Zweifel mit dem bekannten Umstande im Zusammenhange, daß Sand, als Alluvialschicht, einen besseren Baugrund abgiebt als Klei- oder Thonschichten.

In Betreff der Größe der Sandkörner lehrt die Beobachtung aller Orten, daß jeder natürliche Sand ein Gemenge von gröbereren und feineren Körnern ist; sogar der allerfeinste, staubähnliche Sand zeigt unter dem Mikroskop eine unendliche Verschiedenheit der Körnergröße. Daher beruht die Bezeichnung einer Sandmasse als grob- oder feinkörnig im gewöhnlichen Sprachgebrauche nur auf einer höchst unsicheren Schätzung der Größe derjenigen Körner, die in der Masse vorherrschend zu sein scheinen, welches aber nicht genügt, wenn für wissenschaftliche Zwecke der Sand nach dem Grade seiner Feinheit unterschieden werden soll. Zur Erforschung der Wirkungen, die in der Natur strömendes Wasser auf ein sandiges Bette ausübt, trägt es wesentlich bei, wenn man eine präzise Charakteristik des in verschiedenen Gegenden eines großen Stromes befindlichen Sandes mit Bezug auf seine Körnergröße aufstellen kann, denn es ist vorauszusetzen, daß der Widerstand der Sandkörner gegen die Fortbewegung durch den Strom eine Function ihres Gewichtes, also bei gleichem specifischen Gewichte ihres cubischen Inhaltes ist. Wären nun in jeder bestimmten Stromgegend alle Sandkörner von gleicher Größe, so wäre es sehr einfach, das Widerstandsvermögen

<sup>1)</sup> Zeitschr. f. Bauwesen, Jg. 10, 1860, S. 492

des Grundbettes gegen den Strom in einen präcisen Ausdruck zu fassen; man brauchte nur an mehreren geeigneten Stellen die Größe einiger Sandkörner direct zu messen und die Ergebnisse mit den dabei beobachteten Stromgeschwindigkeiten zusammenzustellen. Es ist bekannt, daß es in der That derartige traditionelle Zusammenstellungen giebt, deren Unzulänglichkeit übrigens HAGEN (Handb. II. 1 p. 360) bemerklich gemacht und durch eigne Beobachtung dargethan hat.

Zur Charakteristik eines Gemenges von Körnern ungleicher Größe eignet sich am besten diejenige Lineargröße, welche man den mittleren Durchmesser nennen kann, nämlich der Durchmesser, den die Körner haben würden, wenn sie – bei unveränderter Anzahl – gleich groß wären. Das Verfahren, um zu einer, wie sich von selbst versteht approximativen Bestimmung eines diesen Durchmesser darstellenden Ausdrucks zu gelangen, ist nicht besonders schwierig, wenn man sich mit einem geeigneten Apparate, der mehrere Siebe von verschiedener Feinheit der Löcher enthalten muß, versieht. Der von mir angewendete Apparat besteht aus 7 blechernen Gefäßen, welche in bestimmter Reihenfolge, dicht schliessend, auf einander passen; das unterste Gefäß hat einen dichten Boden, die Böden der 6 anderen bestehen aus Sieben von verschiedener Feinheit, und zwar von oben nach unten feiner werdend; das oberste Gefäß wird mit einem dichten Deckel geschlossen. Es ist leicht einzusehen, wie bei angemessener Handhabung eines solchen Apparates die Körner eines in das oberste Gefäß geschütteten Sandgemenges sich nach Maßgabe ihrer Größe in den verschiedenen Räumen zwischen und unter den Sieben vertheilen werden, wodurch dann das Gemenge in eine Anzahl von Sorten zerlegt ist, deren jede aus Körnern von nahezu gleicher Größe besteht. Bestimmt man dann das Gewichtverhältnis der einzelnen Sorten zu dem Gewichte der ganzen eingeschütteten Masse, so hat man Zahlen, aus denen, in Verbindung mit der bekannten oder leicht zu ermittelnden Dimension der Löcher in den Sieben, man den gesuchten mittleren Durchmesser der Sandkörner ableiten kann.

Es sei

$P$  das Totalgewicht des eingeschütteten Gemenges,

$p', p'', p''' \dots$  seien die Gewichte der einzelnen Sorten,

$d', d'', d''' \dots$  die Durchmesser der Körner in denselben,

$n', n'', n''' \dots$  die Anzahl der Körner in den einzelnen Sorten, und

$D$  der gesuchte mittlere Durchmesser, welchen die Körner haben würden, wenn sie in der Anzahl  $N = n' + n'' + n''' \dots$  vorhanden und alle von gleicher Größe wären.

Da nun die Gleichungen statt finden:

$$P = p' + p'' + p''' + \dots$$

$$P = \alpha N D^3; p' = \alpha n' d'^3; p'' = \alpha n'' d''^3; \text{ etc.},$$

wo  $\alpha$  einen von der Gestalt und dem specifischen Gewicht der Körner abhängigen Coefficienten bezeichnet, der aber bei Entwicklung der Schlußgleichung herausfällt, so ist:

$$D^3 = \frac{P}{\frac{p'}{d'^3} + \frac{p''}{d''^3} + \frac{p'''}{d'''^3} + \dots}$$

und dies ist die Form, deren Daten unmittelbar aus dem oben beschriebenen Experimente hervorgehen, nämlich das Totalgewicht, die Gewichte der einzelnen Sorten und die, aus den Dimensionen der Löcher in den Sieben abzuleitenden Durchmesser der Körner in den einzelnen Sorten.

Da der Widerstand des Sandes gegen die Fortbewegung durch den Strom dem cubischen Inhalte der Körner (unter Voraussetzung gleicher Gestalt und gleichen specifischen Gewich-

tes) proportional ist, so eignet sich die dritte Potenz von  $D$  vorzugsweise zur Charakterisierung des Sandes im Strombette.

Die Größe des Apparates für dergleichen Experimente, so wie die Feinheit der Siebe kann natürlich sehr verschieden angenehm werden; mein Apparat ist im Ganzen 18 Zoll hoch, cylindrisch und hat  $8\frac{1}{2}$  Zoll Durchmesser. Die oberen 4 Siebe sind von Zinkblech und haben kreisrunde Löcher von respective 1,8, 1,25, 0,5 und 0,36 Millimeter Durchmesser. Die beiden unteren Siebe sind von Seidengeweben, in denen die Größe der Oeffnungen respective zu 0,22 und 0,15 Millimeter gefunden ward. Die Fäden solcher, in den Sichtapparaten der Mehlmühlen gebrauchten Zeuge bilden ein sehr regelmäßiges Geflecht und können sich nicht an einander verschieben.

Die Durchmesser der einzelnen, aus meinem Apparat hervorgehenden Sorten ergeben sich hiernach annähernd wie folgt:

$$\text{Sorte I; } d^I = \frac{2,2 + 1,8}{2} = 2,0 \text{ Millimeter}$$

$$\text{Sorte II; } d^{II} = \frac{1,8 + 1,25}{2} = 1,52 \text{ Millimeter}$$

$$\text{Sorte III; } d^{III} = \frac{1,25 + 0,50}{2} = 0,87 \text{ Millimeter}$$

$$\text{Sorte IV; } d^{IV} = \frac{0,50 + 0,36}{2} = 0,43 \text{ Millimeter}$$

$$\text{Sorte V; } d^V = \frac{0,36 + 0,22}{2} = 0,29 \text{ Millimeter}$$

$$\text{Sorte VI; } d^{VI} = \frac{0,22 + 0,15}{2} = 0,18 \text{ Millimeter}$$

$$\text{Sorte VII; } d^{VII} = \frac{0,15 + 0,01}{2} = 0,08 \text{ Millimeter}$$

wobei zu bemerken ist, daß durch den Apparat selbst die Sorten I und VII nur nach einer Seite hin begrenzt werden; ich habe deshalb bei Sorte I durch Weglassung aller Steinchen, die über 2,2 Millimeter hielten, und bei Sorte VII durch Ausschlämmen der Schlicktheilchen, wo solches erforderlich war, hier Grenzen gebildet, denen die obigen Zahlen nahe genug entsprechen.

Nach dem im Vorstehenden beschriebenen Verfahren habe ich nun mit Sand, der aus dem Strombette der Elbe entnommen war, und zwar an einer Reihe von Punkten, die von Lauenburg bis zur Insel Neuwerk, also vom oberen Stromgebiete bis zur See vertheilt belegen sind, Versuche angestellt. Zur besseren Uebersicht trenne ich die Resultate in folgende Abtheilungen:

- I. Sand in der Nähe des Hauptstromes bei ordinär Niedrigwasser aufgenommen.
- II. Sand aus der Tiefe des Stromschlauchs heraufgeholt.
- III. Sand vom Strome entfernt, oder dagegen geschützt.
- IV. Sand vom Wellenaufwurf am Ufer unweit der Hochwasserlinie.

Die hier mitgetheilten Resultate sind meistens Durchschnittszahlen aus 4 Versuchen; ich habe eine Mittheilung aller einzelnen Versuche aus Rücksicht auf Raumersparung unterlassen, was zulässig erschien, da die Abweichungen derselben bei jeder Sandprobe nur gering waren.

## I. Sand in der Nähe des Hauptstromes, bei Niedrigwasser aufgenommen.

Sorte.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.		
	Lauenburg.	Geesthacht.	Riepenburg.	Warwisch.	Ortkathen.	Bullenhusen.	Peute.	Köhlbrandt.	Nienstedten.	Blankenese, Nord.	Blankenese, Süd.	Hanskalb Sand.	Bojen Sand.	Juels Sand.	Bank von Glückstadt.		
	Gewichte der einzelnen Sorten in Procent des ganzen Gewichts.																
I. $p^I =$	1,93	1,40	2,77	2,67	1,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,02	} 1,56	} 0,23	0,00	0,00	
II. $p^{II} =$	1,86	1,15	1,65	1,55	1,21	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	0,14			0,00	0,00	0,00
III. $p^{III} =$	36,39	17,56	25,28	31,36	21,44	0,45	6,31	0,47	0,18	0,35	0,75	1,79			0,23	0,50	0,50
IV. $p^{IV} =$	47,82	30,69	36,98	44,62	39,79	10,69	42,86	1,63	2,00	0,45	3,11	6,33			2,32	3,96	2,32
V. $p^V =$	9,89	17,70	17,31	13,47	23,59	32,67	32,92	9,56	16,48	0,65	13,87	16,85			0,19	3,96	3,96
VI. $p^{VI} =$	1,96	28,72	14,80	5,55	12,04	51,68	16,63	67,90	78,44	64,05	77,38	35,29			15,64	3,20	46,29
VII. $p^{VII} =$	0,15	2,78	1,21	0,78	0,46	4,51	1,24	20,44	2,90	34,40	4,89	39,58			82,61	96,57	46,93

Betrachten wir zuvörderst, ehe wir in Berechnungen eingehen, die in vorstehenden Zahlen ausgesprochenen Thatsachen an und für sich, so zeigt sich darin die Art, wie das Mischungsverhältniß von Sandkörnern verschiedener Größen sich nach und nach verändert, wenn man dem Strome von der oberen Stromgegend seewärts folgt. Man bemerkt, daß in der oberen Stromgegend die feinste Sorte VII keineswegs fehlt, aber sie macht daselbst unter der überwiegenden Menge größerer Körner nur ein Geringes aus: bei Lauenburg 0,15, bei Geesthacht 1,78, bei Riepenburg 1,21, bei Warwisch 0,78; bei Ortkathen 0,46 und bei der Peute 1,24 Procent der Gesamtmasse. Dies ist freilich, absolut genommen, durchaus nicht als eine kleine Quantität anzusehen, relativ aber verschwindet dieselbe, und man kann danach muthmaßen, daß der Strom in diesen Gegenden Sandkörner von der Feinheit No. VII nicht ruhen läßt, sondern aufnimmt und schwebend fortführt, wenn sie nicht durch gröberes, schwerer zu bewegendes Material bedeckt und dadurch gegen den Angriff des Stromes geschützt sind.

Die nächstgrößere Sorte VI ist bei Lauenburg gleichfalls nur schwach vertreten, mit etwa 2 Procent; dagegen kommt sie bei Geesthacht (in einer unregulirten, zu Ablagerungen geneigten Stromstrecke, die in den Commissions-Protocollen der Elbeuferstaaten als Leichtstelle erwähnt ist) mit beinahe 30 Procent vor, nimmt dann in den folgenden Stromgegenden: Riepenburg, Warwisch und Ortkathen, respective auf 15,6 und 12 Procent ab; steigt in der verflachten Gegend bei Bullenhusen (nahe oberhalb der Stromtheilung) auf mehr als 50 Procent, und sinkt bei der Peute noch einmal auf 16 Procent, um von da an abwärts so lange vorherrschend zu bleiben, bis endlich bei Hanskalb-Sand die feinere Sorte VII das Uebergewicht erhält.

Die Sorte V findet sich bei Lauenburg mit ungefähr 10 Procent, steigt dann bis auf 33 bei der Peute und wird von da an abwärts durch die feineren Sorten überwogen.

Die Sorte IV ist bei Lauenburg vorherrschend, fast die Hälfte der ganzen Masse, und bildet auch in den folgenden Stromgegenden bis zur Peute den Hauptbestandtheil; weiter abwärts kommt sie nur in geringem Verhältniß vor.

Die Sorte III, welche bei Lauenburg und in den darauf folgenden Gegenden über 30 Procent beträgt, sinkt schon bei Ortkathen auf 21 und von da an auf ein ganz geringfügiges Maaß herab. Die gröbsten Sorten II und I kommen von Lauenburg bis zum Ortkathen noch

in merklichem Verhältniß vor, weiter abwärts verschwinden sie fast gänzlich. Eine Spur derselben zeigt sich bei Blankenese in der nördlichen Stromrinne, und in den unter No. 12 bis 14 registrierten Gegenden. In Betreff der letzteren ist jedoch zu bemerken, daß hier Muschel-fragmente etc. mit vorkamen, die zwar aus den Versuchsergebnissen nicht entfernt werden durften, aber bei der Auffassung derselben nicht als Sandkörner anzusehen, und deshalb zusammengezogen sind.

Faßt man diese sämtlichen Thatsachen unter einen gemeinschaftlichen Gesichtspunkt zusammen, so sieht man, daß der Strom das feine Material massenweise aus der oberen Stromgegend fortführt und dasselbe weiter abwärts, wo die bewegende Kraft, sei es wegen örtlicher Unregelmäßigkeiten (Geesthacht) oder wegen allgemeiner Abnahme des Gefälles und Gegenwirkung der Meeresfluth, ermattet, nach und nach fallen läßt. Das gröbere Material der ersten vier Sorten ist offenbar schon bei Lauenburg lediglich auf die rollende oder wälzende Bewegung angewiesen und gelangt in die Stromgegend unterhalb der Peute nur dann ohne vorherige Verkleinerung durch Abschleifung und Bruch, wenn besondere Umstände seine Bewegung ausnahmsweise begünstigen.

## II. Sand aus der Tiefe des Stromschlauches.

Sorte.	16.	17.	Bemerkungen.	
	Riepenburg. Zu vergleichen mit No. 3 der vorigen Tabelle.	Peute. Zu vergleichen mit No. 7 der vorigen Tabelle.	In voriger Tabelle war:	
	Gewichte der Sorten in Procent des Ganzen.		No. 3. Riepenburg.	No. 7. Peute.
I. $p^I$ =	4,91	1,78	2,77	0,00
II. $p^{II}$ =	4,09	1,62	1,65	0,04
III. $p^{III}$ =	44,70	32,70	25,28	6,31
IV. $p^{IV}$ =	38,27	44,92	36,98	42,86
V. $p^V$ =	2,17	14,83	17,31	32,92
VI. $p^{VI}$ =	5,49	3,92	14,80	16,63
VII. $p^{VII}$ =	0,37	0,23	1,21	1,24

In den Columnen No. 16 und 17 zeigt sich die Beschaffenheit der Körnergröße in der Tiefe des Stromschlauches an den genannten Stellen. Vergleicht man diese Zahlen mit den in den Columnen No. 3 und 7 der vorigen Tabelle enthaltenen, welche den Sand in der Niedrigwasserlinie in denselben Gegenden darstellen, so ergibt sich nicht nur im Allgemeinen, daß der Sand in der Tiefe des Stromes gröber ist als auf den flachen Seitenabhängen des Strombettes, sondern auch im Speciellen, daß diese Veränderung in beiden Fällen in ganz übereinstimmender Weise herbeigeführt ist. Es ist nämlich die mittlere Sorte IV nahezu in demselben Verhältnisse (Riepenburg 36,98 und 38,27; Peute 42,86 und 44,92); die größeren Sorten I, II und III sind in der Tiefe stärker vertreten als am Strande, die feineren dagegen, V, VI und VII, schwächer. Man sieht hieraus ganz deutlich, daß in der Tiefe das feine Material durch den Strom schärfer aussortirt wird.

Vergleicht man die Zahlen der Columne No. 18 mit denen der Columne No. 2 der ersten Tabelle, so findet man eine Veränderung in gerade entgegengesetzter Richtung wie diejenige, welche der Sand aus der Tiefe des Stromschlauches darbot. In Columne No. 18 sind nämlich, wie man sieht, die größeren Sorten schwächer, die feineren stärker vertreten als in Columne 2. Uebrigens ist ersichtlich die Sorte VII auch auf dem flachen Sandfelde an der Nebenrinne

## III. Sand vom Strome entfernt liegend oder dagegen geschützt.

Sorte.	18.	19.	20.	21.	22.
	Geesthacht. Sandfeld an einer Neben- rinne.  Zu vergleichen mit No. 2 der ersten Tabelle.	Cuxhaven. Im Innern des Quarantäne- Hafens.	Steinmarn Strand. Seestrand mit flachen Watten davor.	Insel Neuwerk. Seestrand mit Brandung.	Vom Strande der Helgolan- der Sanddüne ohne genauere Ortsangabe.
Gewichte der Sorten in Procent des Ganzen.					
I. $p^I$ =	0,00	0,00	0,00	} Muschelfragmente	0,24
II. $p^{II}$ =	0,01	0,00	0,00		0,11
III. $p^{III}$ =	0,28	0,00	0,00	0,77	0,61
IV. $p^{IV}$ =	11,35	0,00	0,01	3,16	2,90
V. $p^V$ =	44,32	0,00	0,04	9,34	14,21
VI. $p^{VI}$ =	42,80	5,03	6,07	54,14	80,88
VII. $p^{VII}$ =	1,24	94,91	93,88	32,17	1,08

beinahe rein aussortirt, während die Sorte VI daselbst schon bedeutenderen Widerstand leistet.

Die Zahlen der Columnen No. 19, 20 und 21 sind untereinander zu vergleichen; sie zeigen, daß zwischen dem Sande im Quarantäne-Hafen zu Cuxhaven und demjenigen am Steinmarnen Strande kein nennenswerther Unterschied in der Feinheit gefunden wird, beide aber den größten Grad der Feinheit haben, der mit meinen Mitteln darzustellen ist. Am Strande der Insel Neuwerk, wo die Wellenbewegung auf den Abhang des Strandes wirkt, und der tiefe Stromschlauch bedeutend näher liegt als beim Steinmarnen Strande, findet sich ein weit gröberes Korn; es ist klar, daß die Körner bis zur Sorte V für den Strom, der in das Innere des Quarantäne-Hafens eintritt, zu schwer sind, daß aber im tiefen Hauptstrom die Sorten III bis V noch vorkommen können, indem sie bei Neuwerk von den Brandungen an den dortigen Strand geführt werden. Ob die bei Helgoland gefundenen Verhältnisse hiermit Zusammenhang haben, lasse ich dahingestellt, halte es aber nicht für wahrscheinlich.

## IV. Sand vom Wellenaufwurf über der Hochwasserlinie und nahe an derselben.

Sorte.	23.	24.	Bemerkungen.	
	Blankenese. Nördl. Ufer am Fuß des Geestabhanges.  Zu vergleichen mit No. 10 der ersten Tabelle.	Juels Sand.  Zu vergleichen mit No. 14 der ersten Tabelle.	In der ersten Tabelle war:	
Gewicht der einzelnen Sorten in Procent des Ganzen.				
I. $p^I$ =	13,66	0,00	0,69	0,00
II. $p^{II}$ =	7,66	0,00	0,01	} 0,23
III. $p^{III}$ =	45,45	4,11	0,35	
IV. $p^{IV}$ =	20,93	29,33	0,45	
V. $p^V$ =	10,16	38,59	0,65	
VI. $p^{VI}$ =	2,03	25,46	64,05	3,20
VII. $p^{VII}$ =	0,01	2,51	34,40	96,57

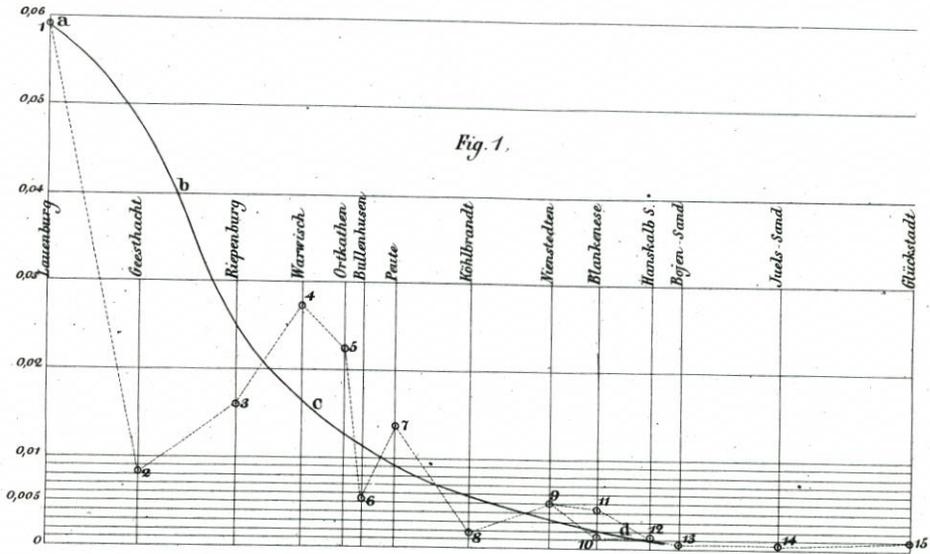
Die Vergleichung dieser Zahlen eröffnet einen vorläufigen Einblick in die Wirksamkeit, welche die Wellen auf einen sandigen Strand ausüben. Dieselbe besteht im Wesentlichen darin, daß sie die größeren Körner an dem obersten Saume, den sie erreichen, aufhäufen, die feineren Körner aber mit dem rücklaufenden Wasser in die Tiefe hinabführen. Es findet aber zwischen den beiden hier vorgelegten Fällen der bemerkenswerthe Unterschied statt. daß bei Blankenese ein hoher, jeweiligem Absturze ausgesetzter Geestabhang sich längst des Ufers erstreckt, der den, den Strand bespühlenden Wellen viel grobes Material liefert, daß dagegen bei Juels-Sand, welches eine im Strom entstandene Insel ist, die Wellen kein anderes Material vorfinden als dasjenige, was der Strom an diese Stelle geführt hat. Spezielle Folgerungen aus Vergleichung von No. 23 und No. 10 sind demnach von mehr lokaler, diejenigen aus Vergleichung von No. 24 und No. 14 aber von mehr allgemeiner Bedeutung. Beide Fälle zeigen übrigens die Sortirung der Körner in dem oben ausgesprochenen Sinne, daß nämlich die groben Sorten bei der Hochwasserlinie im Wellenaufwurfe, die feinen dagegen in der Strandfläche bei der Niedrigwasserlinie gefunden werden.

Werden aus den durch die Versuche gefundenen Daten nach der oben mitgetheilten Gleichung die Werthe von  $\sqrt{D}$ ,  $D$  und  $D^3$  berechnet, so erhält man folgende Uebersicht:

Benennung der Stromgegend	I. In der Niedrigwasserlinie.			II. Im tiefen Stromschlauch.			III. Vom Strom entfernt oder dagegen geschützt.			IV. Wellenaufwurf in der Hochwasserlinie.		
	$\sqrt{D}$	$D$	$D^3$	$\sqrt{D}$	$D$	$D^3$	$\sqrt{D}$	$D$	$D^3$	$\sqrt{D}$	$D$	$D^3$
1. Lauenburg . . . . .	0,624	0,389	0,0591	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2. Geesthacht (18.) . . . . .	0,454	0,206	0,0087	.	.	.	0,452	0,204	0,0085	.	.	.
3. Riepenburg (16.) . . . . .	0,504	0,254	0,0163	0,593	0,352	0,0435	.	.	.	.	.	.
4. Warwisch . . . . .	0,549	0,301	0,0275	.	.	.	.	.	.	.	.	.
5. Ortkathen . . . . .	0,531	0,282	0,0224	.	.	.	.	.	.	.	.	.
6. Bullenhusen . . . . .	0,416	0,173	0,0052	.	.	.	.	.	.	.	.	.
7. Peute (17.) . . . . .	0,491	0,241	0,0139	0,591	0,349	0,0424	.	.	.	.	.	.
8. Köhlbrandt . . . . .	0,353	0,124	0,0019	.	.	.	.	.	.	.	.	.
9. Nienstedten . . . . .	0,414	0,171	0,0050	.	.	.	.	.	.	.	.	.
10. Blankenese Nord (23.) . . . . .	0,329	0,108	0,0013	.	.	.	.	.	.	0,669	0,447	0,0894
11. Blankenese Süd . . . . .	0,403	0,162	0,0043	.	.	.	.	.	.	.	.	.
12. Hanskalb Sand . . . . .	0,325	0,106	0,0012	.	.	.	.	.	.	.	.	.
13. Bojen Sand . . . . .	0,291	0,085	0,0006	.	.	.	.	.	.	.	.	.
14. Juels Sand (24.) . . . . .	0,284	0,081	0,0005	.	.	.	.	.	.	0,455	0,207	0,0089
15. Bank von Glückstadt . . . . .	0,316	0,100	0,0010	.	.	.	.	.	.	.	.	.
19. Cuxhaven, im Hafen . . . . .	.	.	.	.	.	.	0,285	0,081	0,0005	.	.	.
20. Steinmarnr Strand . . . . .	.	.	.	.	.	.	0,286	0,081	0,0005	.	.	.
21. Neuwerker Strand . . . . .	.	.	.	.	.	.	0,334	0,111	0,0014	.	.	.
22. Helgolander Düne*) . . . . .	.	.	.	.	.	.	0,427	0,182	0,0060	.	.	.

\*) Die Lage des Punktes, an welchem der Sand von der Helgolander Düne aufgenommen, ist mir nicht bekannt, liegt also möglicherweise im Bereiche von Strom und Wellen.

Da die dritten Potenzen der Durchmesser der Sandkörner ein Maaßstab sind für die vom Strome an der betreffenden Stelle auf das Bette ausgeübte Spühlkraft (das ausscheuernde Vermögen des Stroms; engl. scowring power), so kann eine durch die Werthe von  $D^3$  als Ordinaten gezogene Curve – wenn die Abscissen den Entfernungen der respectiven Beobachtungs-Orte vom Anfangspunkte entsprechen – die Curve der effectiven Spühlkraft des Stromes genannt werden, und diese wird (in soweit als die untersuchten Sandpro-



ben in Beziehung zum Hauptstrom gleiche Lagen repräsentiren) einen wesentlichen Beitrag zur Charakteristik eines gegebenen Stromes ausmachen.

Die Fig. 1, welche die für die Niedrigwasserlinie gefundenen Werthe von  $D^3$  von Lauenburg bis Glückstadt als Ordinaten in gehörigen Abständen darstellt, charakterisirt in solcher Weise die betreffende Strecke der Elbe. Die bestehenden Unregelmäßigkeiten des Strombettes sind in der durch die Endpunkte der Ordinaten gezogenen punktirten Linie deutlich ausgesprochen, und müssen es sein, da sie, sei es als Ursache oder als Wirkung, mit der ungleichen Spühlkraft im engsten Zusammenhange stehen. Wäre das Strombette in seiner ganzen Länge vollkommen regelmäßig gestaltet und das Gefälle vollkommen regulirt, so würde, unter übrigens gleichen Umständen, die Curve ersichtlich ungefähr dem durch die Linie *a b c d* angedeuteten Zuge folgen. In dieser Form zeigt dieselbe sehr deutlich die rasche Abnahme der Spühlkraft beim Eintritte des Stroms in das Fluthgebiet, d. h. in derjenigen Stromgegend, wo die eigentliche Mündung des Stroms in den alten Meerbusen anzunehmen ist, und die man auf jeder guten Landkarte der Unter-Elbe etwa 3 Meilen oberhalb Hamburg leicht erkennt. Von hier an weiter seewärts wird die Abnahme der Spühlkraft allmäliger, und bleibt endlich im mittleren und unteren Theile des Meerbusens nahezu constant.

Man kann die Kraft, welche hier die Spühlkraft genannt ist, auch als den Stoß des Wassers auf die Partikeln, aus denen das Grundbette besteht, betrachten. Sei der Stoß =  $T$ , die Geschwindigkeit =  $v$ , die gestoßene Fläche =  $A$  und der Anstoßwinkel =  $\psi$ , so hat man,

nach bekannten hydraulischen Gesetzen, für den isolirten Strahl,  $T = \frac{\gamma}{g} (1 - \cos \psi)$

$A v^2$ . Wenn es nun auch bis jetzt nicht gelungen ist, das Gesetz für den Stoß unbegrenzter bewegter Wassermassen vollkommen zu entwickeln, so kann man doch nach Analogie des isolirten Strahls annehmen, daß dasselbe gleichfalls die Form habe

$$T = a A v^2.$$

Wenn nun nach dem Vorhergehenden die Spühlkraft proportional der 3ten Potenz des Durchmessers der Körner ist, und wenn ferner  $A$  oder der Inhalt der gestoßenen Fläche dem Quadrate dieses Durchmessers proportional gesetzt werden kann, der Stoß  $T$  aber als

identisch mit der Spühlkraft angesehen wird, so finden für verschiedene Werthe von  $D$  und von  $v$ , welche mit  $D'$ ,  $D''$ ,  $D'''$ ,  $v'$ ,  $v''$ ,  $v'''$  etc. bezeichnet werden mögen, die Verhältnisse statt:

$$D'^3 : D''^3 : D'''^3 \dots = \alpha D'^2 v'^2 : \alpha D''^2 v''^2 : \alpha D'''^2 v'''^2 \dots$$

oder

$$v' : v'' : v''' : \dots = \sqrt{D'} : \sqrt{D''} : \sqrt{D'''} \dots$$

d. h. die auf das Strombette wirkenden Stromgeschwindigkeiten, sofern sie sich in der Größe der Sandkörner des Strombettes aussprechen, verhalten sich in verschiedenen Gegenden zu einander, wie die Quadratwurzeln aus den Durchmessern der Sandkörner.

Die Einführung des nach der oben gegebenen Formel berechneten mittleren Durchmessers für den wirklichen Durchmesser der Körner, ist ein Verfahren, dessen Berechtigung in aller Strenge nicht erwiesen ist, das aber angewendet werden muß, um den Gegenstand überhaupt für eine Betrachtung wie die vorliegende zugänglich zu machen.

Eine Eigenthümlichkeit in Betreff der Größe der Sandkörner bieten diejenigen alten Stromarme dar, welche an ihrem oberen Ende abgeschlossen oder verlandet sind, besonders in solchen Gegenden, wo noch ein merkliches Steigen und Fallen des Stromspiegels durch die Meeresfluth bewirkt wird. Man findet nämlich in dem unteren Theile dieser sogenannten „tauben“ Stromarme<sup>1)</sup> oft Sandablagerungen von viel größerem Korn, als die benachbarte Gegend des offenen Hauptstromes zeigt. Die Erklärung dieser Thatsache liegt nahe, wenn man berücksichtigt, daß solche Stromarme keine neue gemischte (d. h. aus großen und kleinen Körnern durcheinander bestehende) Sandmassen vom oberen Strome zugeführt erhalten, daß aber in ihrem unteren Theile der durch die Schwankungen des Wasserspiegels erzeugte aus- und eingehende Strom durch eine lange Reihe von Jahren unablässig darauf hingewirkt hat und noch fortwährend hinwirkt, alle feineren Sand- und Schlicktheilchen aus dem vorhandenen Material auszusortiren und abwärts oder aufwärts fortzuführen. Die Folge hiervon kann keine andere sein, als daß hier in der Oberfläche des Strombettes zuletzt nur solche Körner liegen, deren Durchmesser der größten Stromgeschwindigkeit entspricht, die an der betreffenden Stelle überhaupt vorkommen kann. Auf diesem Wege muß also zuletzt in dem daselbst lagernden Sande ein Zustand eintreten, den man, im Vergleich mit den bewegten Zuständen am Boden des Hauptstromes, Ruhe nennen kann, und wirklich zeigt sich bei genauer Betrachtung der Sandkörner aus solchen Lokalitäten eine Erscheinung, die dies auf eine höchst interessante Weise constatirt. Man sieht nämlich unter dem Mikroskop die Körner solcher Sandablagerungen fast ohne Ausnahme bunt gefleckt, welches von bräunlichen und grünlichen Niederschlägen oder Algenbildungen auf ihrer Oberfläche herrührt. Etwas Aehnliches ist mir bei Sandkörnern aus dem offenen, freien Strome niemals vorgekommen; Herr SCHACHT hat dieselbe Wahrnehmung auch bei dem schlickhaltigen Sande von Hanskalb-Sand (Versuche No. 12) gemacht, und folgendes als das Ergebniß seiner mikroskopischen Untersuchungen der ihm aus verschiedenen tauben Stromarmen übersandten Proben mir geschrieben:

„Die Quarzkörner sind zum größten Theil farblos, durchsichtig, selten gelblich oder bräunlich gefärbt; der Niederschlag auf diesen Körnern ist wahrscheinlich durch zerstörte Organismen entstanden; die grüne und braune Färbung verdankt derselbe niederen Algenformen; wirkliche Moose sind nicht vorhanden. Es wäre möglich, daß sich bei

<sup>1)</sup> Dove-Elben. Die Wichtigkeit derselben für die Fahrtiefe im Hauptstrom ist an einem Beispiele nachgewiesen in meinen Erfahrungen und Beobachtungen. Hamburg 1853, S. 79. (In dieser Zeitschrift nicht mit abgedruckt.)

frisch aufgenommenem, nicht abgetrocknetem Sande die Pflanzen selbst noch unterscheiden ließen.“

Eine ganz analoge Beobachtung im größeren Maaßstabe ist an der Kieselanhäufung gemacht worden, welche die Insel Portland mit der Südküste von England verbindet. Der Ingenieur COODE benutzte hier die ihm bei dem Hafenbaue zu Gebote stehenden Taucherapparate, um diese Kieselbank in größerer Tiefe zu untersuchen, und fand, daß die Kiesel unterhalb einer deutlich markirten nach Maaßgabe der Witterung veränderlichen Grenzlinie mit kleinen Algen und Muscheln auf ihrer Oberfläche besetzt waren. Er schloß hieraus, gewiß mit vollem Rechte, daß die rollende Bewegung der Kiesel durch Strom und Wellen sich so weit abwärts erstreckte als das Freisein derselben von dergleichen Incrustationen. (Minutes of Proceedings Civ. Engin. Bd. XII. S. 534.)

Da zum Zwecke der oben mitgetheilten Versuche der Sand von den beigemengten Schlicktheilchen vorher befreit werden mußte, so habe ich das ausgewaschene Schlickquantum, wenn es ein genügend erhebliches Verhältniß ausmachte, bestimmen können. Folgendes sind die Ergebnisse.

In den natürlichen Mischungen von Sand und Schlick, wie dieselben an den unten genannten Orten im Strombette aufgenommen waren, betrug das Gewicht des ausgeschlämmt und getrockneten Schlicks:

- bei No. 5. Ortkathen 0,0008 der ganzen Masse oder  $\frac{1}{1250}$
- bei No. 12. Hanskalb-Sand 0,1811 der ganzen Masse oder beinahe  $\frac{1}{5}$
- bei No. 14. Jules-Sand 0,0653 der ganzen Masse oder ungefähr  $\frac{1}{15}$
- bei No. 15. Bank von Glückstadt 0,0336 der ganzen Masse oder  $\frac{1}{30}$
- bei No. 19. Hafen von Cuxhaven 0,0758 der ganzen Masse oder ungefähr  $\frac{1}{13}$ .

Es ist anzunehmen, daß eine Beimischung von Schlicktheilchen in gewissem Grade hemmend auf die Beweglichkeit der Sandkörner einwirkt, indem die Sandkörner durch den in den Zwischenräumen befindlichen Schlick gleichsam festgekittet werden. Man kann die Art des Widerstandes, welchen ein inniges Gemenge von Sand und Schlick dem Stromangriffe entgegensetzt, mit dem Widerstande rundlicher, in Mörtel eingebetteter Kiesel vergleichen, die man durch Stoßen oder Schlagen von der umgebenden Masse zu trennen versucht. Die größere oder geringere Schwierigkeit dieser Operation ist allemal wesentlich bedingt durch das Mischungsverhältniß zwischen Kieseln und Mörtel, und zwar um so mehr, je geringer die Festigkeit des Mörtels im Vergleich mit der Festigkeit der Kiesel ist. Da nun der Schlick bei dieser Parallele als ein schlechter Mörtel betrachtet werden muß, so ist klar, daß eine aus Sand und Schlick gemischte Bodenschicht dem Strome alsdann den größten Widerstand leisten wird, wenn die Zwischenräume zwischen den Sandkörnern gerade durch den vorhandenen Schlick ausgefüllt sind, d. h. wenn etwa ein Drittheil des ganzen Raumes der Masse (etwa 0,31 des Gewichts) von den möglichst gleichmäßig vertheilten Schlicktheilchen eingenommen wird. Das bei Hanskalb-Sand gefundene Verhältniß kommt, wie man sieht, dieser Grenze ziemlich nahe. Mischungen, in welchen noch mehr als  $\frac{1}{3}$  des Raumes mit Schlicktheilchen ausgefüllt wäre, würden eine geringere Widerstandsfähigkeit besitzen und wohl nicht mehr als Sand anzusehen sein.

Zum Schlusse dieser Betrachtungen möge hier eine Beobachtung aufgenommen werden, welche zwar zunächst nur vom geologischen Standpunkte Interesse hat, indeß doch zur Vervollständigung des ganzen Bildes beiträgt.

Die vor dem Ausflusse der Elbe belegene Insel Neuwerk besteht aus einer nur wenige Fuße dicken, horizontalen Schicht sandiger Kleierde, die auf einem Untergrunde von schlickhaltigem Sande ruht und mit einem sandigen, von der Fluth überspülten Wattgrunde umgeben ist. Die Kleierde enthält 66,4 Procent Schlick, der Untergrund, auf dem die

Kleischicht ruht, 3,6 Procent Schlick, und der Sand des umgebenen Strandes ist schlickfrei. Vergleicht man nun den ausgewaschenen Sand aller drei Orte hinsichtlich der Körnergröße mit einander, so ergibt sich Folgendes:

		Sand aus der Kleischicht ausgewaschen.	Sand aus dem Untergrunde ausgewaschen.	Schlickfreier Sand vom umgebenden Strande.
Sorte	I u. II	fehlen	fehlen	0,42
"	III	0,8	fehlt	0,77
"	IV	1,6	5,0	3,16
"	V	11,8	17,0	9,34
"	VI	71,4	60,0	54,14
"	VII	14,4	18,0	32,17

Hiernach ist der Sand des Seestrandes etwas feiner als derjenige, auf dem die Kleischicht der Insel ruht; dieser letztere aber scheint, wenn man von kleinen, vielleicht zufälligen Unterschieden absieht, demjenigen gleich zu sein, der mit dem Schlick der Kleischicht vermischt ist und aus dieser ausgewaschen werden kann. Die drei Gemenge unterscheiden sich also wesentlich nur durch ihren verschiedenen Schlickgehalt, und es würde die Annahme nicht mit den Thatsachen im Widerspruch stehen, daß einst ein ähnliches Gemenge von Sand und Schlick, wie dasjenige, welches wir noch jetzt unter der Insel finden,<sup>1)</sup> die Oberfläche in weiterer Ausdehnung bedeckt habe, und daß die den kleinen Fleck, welchen die Insel einnimmt, bildende Kleischicht das Product der Auswaschung der Schlicktheilchen aus der Umgebung sei, das an dieser, der Strömung und den Wellen vielleicht weniger zugänglichen, oder durch besondere Umstände zur Aufschlickung vorbereiteten Stelle abgelagert worden.

## II. Bewegung des Sandes in Strom und Wellen

DUBUAT nennt in den *Principes d'hydraulique* die Art, wie das strömende Wasser ein bewegliches Bette bearbeitet und wie es den Sand, den es mit sich führt, weiter schafft, „ein methodisches Verfahren, welches man als ein Meisterstück der Dynamik bewundern muß“, und knüpft an diese Bemerkung eine so naturgetreue Beschreibung des Vorganges, der sich am Boden eines vom Strome bewegten sandigen Flußbettes darstellt, daß ein besserer Ausgangspunkt für eine neue auf denselben Gegenstand gerichtete Betrachtung nicht gefunden werden kann. Wenn dann durch erweiterte Beobachtungen der innere Zusammenhang der Ursachen und Wirkungen in diesen merkwürdigen Erscheinungen sich aufklärt, und dadurch der Eindruck des Wunderbaren, den DUBUAT's Beschreibung hervorruft, vielleicht verschwindet, so wird dennoch das Gefühl der Bewunderung nur belebt und gesteigert, je mehr das geordnete, zweckvolle Ineinandergreifen mannigfaltiger Umstände und Wirkungen unter den Gesichtspunkt eines das Ganze beherrschenden Gesetzes fällt.

Die Beschreibung der Sandbewegung durch DUBUAT ist zu umfangreich, um hier aufgenommen zu werden, sie ist aber in HAGENS Handbuch der Wasserbaukunst II., 1, § 56 in deutscher Uebersetzung abgedruckt und von Mittheilungen über HAGEN's eigene Beobachtungen bei Wiederholung von DUBUAT's Experimenten begleitet, und da im Folgenden auf den Inhalt dieser Mittheilungen Bezug genommen wird, so ist die betreffende Stelle in der

<sup>1)</sup> Von ähnlicher Beschaffenheit ist die Bank von Glückstadt.

untenstehenden Note wörtlich aufgeführt<sup>1)</sup>). Die Experimente, auf welche dieselbe sich bezieht, wurden in kleinen, regelmäßig geformten Canälen angestellt und gewährten den Beobachtern den Vortheil, die kleinsten, fast unmerklichen Bewegungen genau betrachten zu können. Beobachtungen, die im größeren Maaßstabe im Strombette selbst angestellt werden, gestatten dies nicht, sie führen aber zu Ergebnissen, durch welche jene kleineren Experimente vollkommen bestätigt und zugleich noch weiter vervollständigt werden. Die Behauptung, daß man von dem Verhalten der kleinen DUBUAT'schen Sandrücken schließen könne auf die Art der Bewegung ganzer Sandbänke, die nach Hunderten oder Tausenden von Fuß gemessen werden, ja daß in beiden Fällen die nämlichen Ursachen wirksam sind, um die nämliche Operation zu vollziehen, mag vielleicht überraschen, aber sie ist begründet und wird im Folgenden aus unmittelbarer Naturanschauung und durch directe Messung festgestellt werden. Die Bezeichnungen groß und klein haben in diesem Falle Nichts mit dem Wesen

<sup>1)</sup> „Besteht die Sohle des Bettes aus einem etwas groben Sande, dessen Körnchen man deutlich verfolgen kann, und beträgt die Geschwindigkeit des Wassers am Grunde 10 bis 12 Zoll in der Secunde, so lagert sich der Sand in der Form jener Gewebe, die unter dem Namen der Ungarischen Spitzen bekannt sind: er stellt nämlich unregelmäßige Rücken dar, die sich quer durch den Strom ziehen. Jeder dieser Rücken wird durch zwei Böschungen gebildet, die nach entgegengesetzter Richtung ansteigen. Die stromaufwärtsgekehrte fällt sehr sanft ab, wogegen die andere sehr steil ist. Das Profil eines solchen Rückens ist ziemlich ähnlich demjenigen des Glacis und des verdeckten Ganges bei Festungswerken. In geringer Entfernung vom Fuße der steilen Böschung beginnt die sanfte Ansteigung des folgenden Hügels, und so setzt sich die Bildung stromabwärts fort. Das Sandkörnchen, welches vom Strome getroffen wird, steigt die sanfte Neigung der vordern Fläche heran, und sobald es auf den Scheitel gekommen ist, rollt es durch sein eigenes Gewicht an der andern Seite herab. Hier bleibt es ruhig liegen, weil es vor dem Stoße des Wassers gesichert ist. Andere Körnchen machen der Reihe nach denselben Weg und begraben das erste. Diese Bewegung hat viel Aehnlichkeit mit der des Transportes bei starken Aufträgen, wobei nämlich die Erdarbeiter die gefüllte Karre auf einem sanft geneigten Wege bis ans Ende des bereits geschütteten Dammes schieben und hier die Erde ausstürzen. Die Sandkörnchen, welche auf solche Weise verdeckt sind, bleiben so lange unter der Last der späteren Ankömmlinge ruhig liegen, bis endlich die ganze Masse des Sandrückens, welchen sie hinter sich gelassen hatten, in einzelne Körnchen zertheilt vorübergezogen ist. So schreitet der ganze Rücken in Folge der nach und nach eintretenden Bewegung seiner Theile weiter, und sobald er einen Raum zurückgelegt hat, der seiner Breite gleichkommt, so ist das erste Körnchen wieder frei geworden und befindet sich am Fuße der vorderen Böschung. Es ist alsdann aufs Neue dem Angriffe des Wassers ausgesetzt: es steigt das Glacis wieder herauf, und stürzt wieder wie das erste Mal herab. Diese sehr langsame Bewegung findet bei den sämtlichen hintereinander liegenden Sandrücken gleichzeitig statt, und bei mäßiger Geschwindigkeit des Wassers dauert es eine volle halbe Stunde, bis der kleine Hügel von 4 bis 5 Zoll Breite eine solche Station oder eine Strecke die seiner Breite gleichkommt, zurückgelegt hat. Nimmt die Geschwindigkeit des Wassers zu, so geht die Veränderung schneller vor sich, und im entgegengesetzten Falle langsamer. Durchschnittlich würde aber ein Sandkörnchen zwei Jahre gebrauchen, um ein Lieue (ungefähr  $\frac{2}{3}$  preuß. Meilen) zurückzulegen.“

HAGEN, der diesen Versuch wiederholte, fand die Wahrnehmungen DUBUAT's vollständig bestätigt und setzt der Beschreibung derselben noch Folgendes hinzu: „Man bemerkt, daß die einzelnen Körnchen nicht etwa sich in größern Zwischenräumen auf einander folgen, sondern die ganze Oberfläche des Sandrückens ist gleichzeitig in Bewegung und rückt ziemlich regelmäßig die flach geneigte Böschung herauf: hier stürzen die Körnchen augenblicklich herab und überdecken sich eines das andere, so daß sie sogleich einen neuen Scheitel des Rückens bilden. Bei diesem Fortrücken des ganzen Sandhügels nimmt derselbe indessen an Höhe nicht zu, und dieser Umstand zeigt, daß nicht nur die Körnchen am Fuße der flachen Böschung in Bewegung gesetzt werden, sondern daß das Wasser die ganze vordere geneigte Fläche angreift, wie dieses auch wohl nicht anders sein kann. Man bemerkt in der That, daß an ihrem Fuße die Anzahl der in Bewegung gesetzten Körnchen viel geringer ist, als weiter nach dem Scheitel hin, wo ein Körnchen das andere zu berühren oder die ganze Oberfläche in Bewegung zu sein scheint.“

der Sache gemein, und es tritt hier der auch sonst vorkommende Fall ein, daß dem Beobachter bei einer und derselben Sache, je nachdem sie in kleinerem oder größerem Maaßstabe vorliegt, so verschiedene Eigenschaften entgegentreten, daß die wesentliche Gleichheit des Vorganges für eine bloß oberflächliche Anschauung völlig verschwindet. Es sei mir erlaubt, hier an das auffallendste Beispiel eines solchen Falles zu erinnern, nämlich an die gewöhnliche Wasserwelle und die Fluthwelle. Bei der ersteren ist die Form so allgemein als das charakteristische Merkmal anerkannt, daß jeder Gebildete eine – wenn auch mehr oder minder genaue – doch deutliche Vorstellung von der Wellenlinie hat; dagegen wird bei der Fluthwelle die Form von den Meisten kaum geahnt, während man bei ihr allgemein eine andere Eigenschaft, nämlich die entgegengesetzten Stromrichtungen auf den beiderseitigen Abhängen des Wellenberges kennt. Die Strömungen sieht bei den gewöhnlichen Wellen Niemand, sie sind dort nicht wahrnehmbar, aber sie sind eben so gewiß vorhanden, als es bei der Fluthwelle die nicht wahrnehmbare Wellenform ist, und als überhaupt in beiden Fällen eine wirkliche Welle den Gegenstand der Betrachtung ausmacht. So wie man nun in diesen an Größe so verschiedenen Erscheinungen das wesentlich Gleichartige erkennt, wenn man sich näher damit vertraut macht, so fällt es auch nicht schwer, die Form und die Bewegung der kleinen DUBUAT'schen Sandrücken unter einen gemeinschaftlichen Gesichtspunkt mit den Formen und Veränderungen großer Sandbänke und ganzer Stromstrecken zusammenzufassen. Die Schwierigkeiten, welche dabei zu überwinden sind, liegen nicht in der Verstandes-Operation, sondern nur in der sinnlichen Wahrnehmung der Einzelheiten und in der Auffindung von Hilfsmitteln, um die in so verschiedenem Maaßstabe vorliegenden Erscheinungen zu messen und mit einander vergleichbar zu machen.

Die Beobachtung der Sandbewegung in großen Strömen wird besonders durch den Umstand erschwert, daß das den Sand bedeckende trübe Wasser denselben meistens unseren Blicken entzieht, und selbst in klaren Strömen wird die Transmission richtiger Bilder vom Boden des Strombettes durch die inneren Bewegungen des Wassers verhindert. Es ist deshalb selten möglich, den Sand in der Natur während seiner Bewegung zu beobachten, und man muß aus den von Zeit zu Zeit ermittelten Veränderungen seiner Lage auf die stattgehabten Bewegungen und ihre Ursachen schließen. Hierbei kommt der Wechsel des Wasserstandes in Folge der Fluth und Ebbe sehr zu Statten, denn zur Zeit des niedrigsten Wassers wird ein großer Theil des Strombettes vom Wasser frei, der sowohl bei der Fluth als bei der Ebbe den Einwirkungen des Stromes ausgesetzt war, so daß in nicht allzu langen regelmäßigen Zeiträumen die Oberfläche ausgedehnter, vom Strome bewegt gewesener Sandfelder für die unmittelbare Betrachtung und Messung der stattgehabten Veränderungen periodisch bloßgelegt wird.

Um sich nun sichere Rechenschaft über die Veränderungen geben zu können, welche von einer Periode zur andern vorsichgegangen sind, muß man die beiden Gesichtspunkte, welche DUBUAT zuerst von einander unterschieden hat, nämlich die Verschiebung der Formen des Ganzen und die Bewegung der einzelnen Sandkörner, auch bei den Beobachtungen im freien Strome, jeden für sich gesondert, im Auge behalten, und um dies möglich zu machen, müssen im Strombette feste Anhaltspunkte für die Messungen angebracht sein und außerdem geeignete Mittel angewendet werden, um in gewissem Grade die Identität der Sandkörner noch nach Verlauf mehrerer Fluthzeiten constatiren zu können.

Außer der Benutzung derjenigen Messungen der Beschaffenheit des Strombettes, welche über die in längeren Zeiträumen stattgefundenen Veränderungen im Großen und Ganzen Auskunft geben, und die in den Archiven aufzusuchen sind, habe ich mich folgender Mittel bedient, um die Thatsachen festzustellen, welche mit der Bewegung des Sandes im Strombette im Zusammenhange stehen.

1. Die zur Anstellung von Beobachtungen ausersehenen Flächen im Strombette wurden, wenn sie bei der Ebbe trocken gelaufen waren, an gewissen Punkten, so wie es eben die Art der beabsichtigten Beobachtung erheischte, mit dünnen eisernen Stäben oder Bolzen von etwa 2 Fuß Länge bezeichnet, indem diese ganz in den Boden eingeschlagen wurden, so daß die Oberfläche der Bolzenköpfe genau in der Oberfläche des Strombettes sich befand. Zugleich ward die betreffende Fläche nebst ihrer Umgebung, mehr oder weniger genau, im Grund- und Profilriß aufgenommen und dabei insbesondere die Stellung der Bolzen bemerkt. Auf einer so vorbereiteten Fläche können alle eingetretenen Veränderungen leicht bemerkt und (worauf es bei diesen Beobachtungen wesentlich ankommt) in kurzer Zeit notirt werden; wo die Fläche niedriger geworden ist, stehen die Bolzenköpfe vor, und wo dieselbe sich erhöht hat, sind letztere vom Sande bedeckt; den unveränderten Stand der Bolzen selbst prüft man leicht durch ein Controllmaß, falls es erforderlich scheint.

2. Bei Beobachtungen, die nicht bloß die Veränderung der Form, sondern auch die Ortsveränderung der Sandkörner zum Gegenstande hatten, ließ ich farbigen Sand in bestimmt abgegrenzter und genau notirter Ausdehnung an die Stelle des natürlichen Flußsand, der vorher weggeräumt ward, einbringen. Ersterer ward unweit des Flusses auf der Geest in einer von Eisenoxyd stark rothgelb gefärbten Schicht gefunden, und hielt die Farbe so gut, daß eine Beobachtung 6 bis 7 Wochen lang fortgesetzt werden konnte. Zu solchen langdauernden Experimenten muß man indeß ziemlich große Massen anwenden<sup>1)</sup>; für kürzere Beobachtungen genügt es, daß die farbigen Flächen einige Fuß Ausdehnung haben und der Sand einige Zoll dick eingebracht ist.

Gefährliche Feinde solcher Beobachtungen sind Schiffer, die Sand zu Ballast einwerfen, weil gerade diejenigen Sandbänke, welche in der Nähe des Hauptstromes liegen und bei der Ebbe ziemlich hoch heraus kommen, auch für deren Zwecke am geeignetsten sind. Ist nun gar etwa aus der Ferne beachtet, daß etwas Ungewöhnliches auf der Sandbank eingegraben worden, so muß man darauf gefaßt sein, die Experimentalfläche durch eine in der nächsten Nacht vorgenommene Nachforschung zerstört und namentlich die eisernen Bolzen, so weit sie aufgefunden sind, verschwunden zu sehen.

3. Zur Aufnahme der Formen kleiner Sandwellen oder Furchen habe ich mich des Verfahrens der Eintauchung einer verticalen Ebene (gewöhnliche Kartenpappe) in den feuchten Sand des Strombettes bedient. Dies ist ein sehr leichter, vollkommen sicherer Weg, um getreue Zeichnungen natürlicher Sandwellen zu erhalten da die obersten Sandkörner in großer Menge an dem Blatte hängen bleiben, wenn dieses vorsichtig in den Sand eingedrückt und wieder herausgezogen wird. Die Richtung der Pappebene muß natürlich den Wellenrücken normal durchschneiden und die Ebene selbst vertical gehalten werden. Im trocknen Flugsande ist die Sache schwieriger, und es hat manchen vergeblichen Versuch erfordert, ehe es gelang, die Form einiger vom Winde erzeugten Sandwellen direct aus der Natur auf das Papier zu bringen.

Betrachtet man die Gestalt des Strombettes in einem der größeren Ströme, sowohl in den speciellsten Einzelheiten, als auch in den das Große und Ganze umfassenden Umrissen, so treten folgende Erscheinungen dem Blicke entgegen.

<sup>1)</sup> Die Experimentalfläche war in dem obenerwähnten Falle 40 Fuß lang, 6 Fuß breit und 9 Zoll dick mit farbigem Sande gefüllt. Die Ausgrabung und vollständige Beseitigung von 180 Cubikfuß des Flußsand und die Einbringung einer gleichen Masse des farbigen Sandes während der kurzen Zeit des Freiwerdens der Sandbank vom Wasser, ist eine ziemlich bedeutende und um so schwierigere Arbeit, da der Zweck derselben es verbietet, daß auf dem farbigem Sande herumgetreten oder von demselben etwas außerhalb der Experimentalfläche verspilt werde. Die Ausführung dieser Beobachtung ward in ihrem ganzen Verlaufe von Herrn Wasser-Bauinspector DALMANN geleitet.

Die Oberfläche eines vom Wasser bedeckt gewesenen noch feuchten Sandes ist selten glatt, vielmehr in den allermeisten Fällen mit kleinen Rücken und Thälern, deren Aehnlichkeit mit den von DUBUAT und HAGEN geschilderten Erscheinungen unverkennbar ist, überzogen. Zuweilen ist darin eine regelmäßige Anordnung, ein in großer Ausdehnung durchgeführter Parallelismus der Streifen bemerkbar; in anderen Fällen stellt sich das Ganze als ein verworrenes, netzartiges Gewebe dar, in welchem kein System abzuwalzen scheint. Diese kleinen Vertiefungen und Erhöhungen werden meistens *Sandwellen* genannt, ein Ausdruck, der durch die in der oben beschriebenen Weise aufgenommenen Formen im Allgemeinen gerechtfertigt wird, wenngleich Abweichungen von der Wellenlinie dabei vorkommen.

Erweitert man den Umkreis der Betrachtung, indem man größere Strecken eines sandigen Strombettes auf einmal in's Auge faßt, so gewahrt man alsbald, daß darin kein Theil eben, oder auch nur gleichförmig gestaltet ist. Erhöhungen wechseln mit Vertiefungen ab, sowohl in der Längenrichtung des Stromes, als querüber von Ufer zu Ufer, und je größer die Strombreite im Verhältnis zur Tiefe ist, um so mannigfaltiger, scheinbar regelloser, sind diese Unebenheiten des Bodens. Im gewöhnlichen Sprachgebrauche werden die Erhöhungen *Sandbänke* (Platen), die Vertiefungen *Stromrinnen* (Stromschläuche, Thalwege, Priele), in der Nähe der See *Gaten* (Löcher, Piepen) genannt. Hierbei ist aber zu erinnern, daß es keine in der Natur begründete präzise Definition für die Grenzlinie zwischen einer Sandbank und der ihr benachbarten Stromrinne giebt, denn die Annahme der Niedrigwasserlinie ist eine durchaus willkürliche, für die man mit demselben Rechte die Linie des mittleren Wasserstandes oder auch die Linie der Fahrwassertiefe (den sogenannten „Tonnenstrich“ in betonnten Gewässern) einführen könnte. Schon aus diesem Grunde empfiehlt es sich, eine Benennung in die wissenschaftliche Terminologie aufzunehmen, die Beides – Erhöhung und Vertiefung – im Zusammenhange begreift. Hierzu kommt aber noch der Umstand, daß die Sandbänke häufig aus einer offenbar systematisch geordneten Reihe von Rücken und Thälern bestehen, die, abgesehen von den sehr viel größeren Dimensionen, eine unverkennbare Analogie mit den kleinen DUBUAT'schen Sandwellen zeigen, mit denen sie bedeckt sind. Es liegt deshalb nahe, jene kleinen DUBUAT'schen Formen als *Sandwellen erster Ordnung*, die größeren analogen Erscheinungen aber, mithin auch diejenigen Formen der Strombetten, die gewöhnlich Sandbänke und Stromrinnen heißen, als *Sandwellen höherer Ordnungen* zu betrachten.

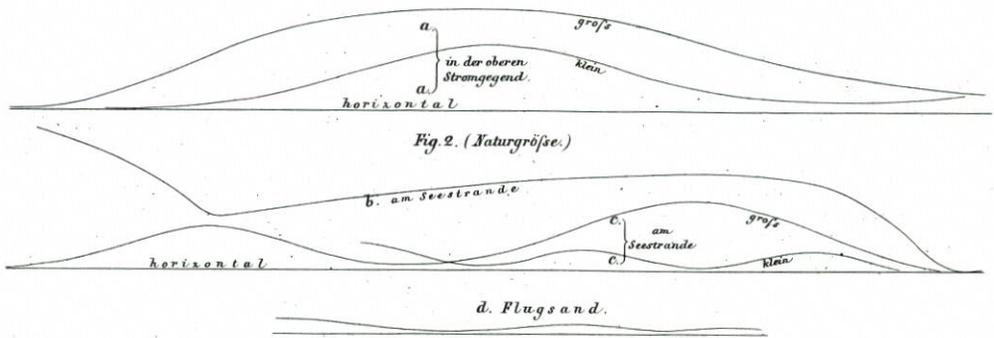
Die Praxis des Strombaues stellt uns zuweilen auf einen noch weiter umschauenden Standpunkt, wenn sie eine Charakteristik meilenlanger Stromstrecken verlangt.

Von diesem Gesichtspunkte macht sich wiederum eine Abwechslung von Höhen und Tiefen bemerkbar, dergestalt, daß einzelne Stromstrecken vergleichungsweise frei von Sandablagerung zu nennen sind, während zwischen denselben andere Strecken liegen, in denen angehäuften Sandmassen das Strombette verflachen. Fortgesetzte Beobachtung zeigt dann, daß weder die Tiefen (Pfuhe, Kolke, Ankerplätze), noch die Höhen (Barren, Leichtstellen, Flächen) unverändert an demselben Platze bleiben, und zwar findet man da, wo der Strom bereits zwischen ausgebildeten Ufern fließt, ein stetiges Fortrücken oder Wandern der Sände in der Richtung seewärts; in breiten Meerbusen und Strommündungen dagegen sind die Sände im Großen und Ganzen stationär, und man bemerkt nur ein scheinbar unregelmäßiges Schwanken, Verschwinden und Wiedererscheinen einzelner Partien derselben. Es wird gestattet sein, die Bezeichnung Sandwelle höherer Ordnung auch auf diese größten Abwechslungen von Höhen und Tiefen in Strombetten anzuwenden, wenngleich die etwigen Analogieen der Wellenform oder Wellenbewegung an denselben nicht direct beobachtet werden können.

Nach der hier zum Grunde liegenden Auffassung ist also allgemein unter dem Ausdrucke

Sandwelle eine vom Strome in rollende oder wälzende<sup>1)</sup> Bewegung versetzte Masse von Sandkörnern zu verstehen, und zwar sind Sandwellen erster Ordnung die kleinen Unebenheiten, welche von DUBUAT und HAGEN beschrieben sind; Sandwellen höherer Ordnungen sind dagegen diejenigen Erhöhungen und Vertiefungen, die auf ihrer Oberfläche ein System oder mehrere Systeme von Sandwellen niederer Ordnung tragen. Bei den Betrachtungen der Natur, zu welchen mir in dieser Beziehung die Praxis Gelegenheit gegeben hat, konnte ich vier Ordnungen von Sandwellen unterscheiden. Zur deutlichen Uebersicht wird es dienen, jede dieser Ordnungen für sich näher in Betracht zu ziehen, und zwar zunächst die Form an und für sich, sodann die Verschiebung oder das Fortrücken der Form, und endlich drittens die rollende oder wälzende Bewegung der die Form bildenden Sandkörner, soweit als beobachtete Thatsachen zur Aufklärung dieser Verhältnisse dienen können.

Um von der Größe und Form der Sandwellen erster Ordnung und von manchen nicht uninteressanten, dabei vorkommenden Modificationen eine Anschauung zu geben, könnte ich eine große Menge unmittelbar aus der Natur aufgenommener Abbildungen beifügen; es würde indeß dadurch der Raum allzusehr in Anspruch genommen werden, und verkleinerte Copien entsprechen in diesem Falle dem Zwecke nicht. Ich beschränke mich deshalb, unter



Bezugnahme auf Figur 2, die einige Sandwellen 1. Ordnung in natürlicher Größe darstellt, auf folgende Bemerkungen:

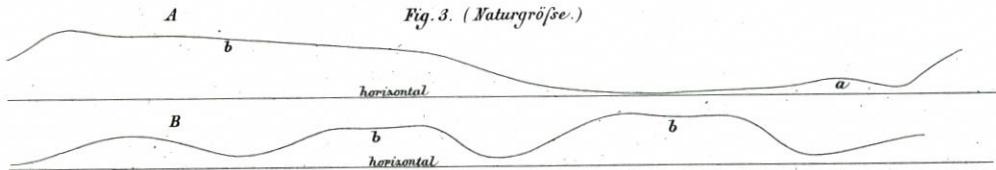
Die in allen beobachteten Fällen bestätigt gefundene Regel ist: je stärker der Strom, desto größer die Sandwelle 1. Ordnung; da nun in jeder Stromgegend sehr verschiedene Stromgeschwindigkeiten neben einander vorkommen, so findet man auch aller Orten verschiedene Größen von Sandwellen. Im Allgemeinen aber ist auf flachen Sandfeldern der Strom in der oberen Stromgegend stärker als in der Nähe des Meeres, daher ist der Regel nach die Größe der Sandwellen 1. Ordnung abnehmend, so wie man sich dem Meere nähert. Die Formen *a* und *c* in Fig. 2 illustriren diese Regel; die Form *b* zeigt eine durch starke Lokalströmungen verursachte Ausnahme. Nicht ohne Interesse ist es, die Größe und Form von Flugsandwellen, die vom Winde erzeugt sind (Fig. 2 sub *d*) mit den vom Wasser erzeugten Sandwellen zu vergleichen.

Zuweilen sind die Sandwellen vollkommen oder nahezu symmetrisch, in der Regel aber ist der voranschreitende Abhang steiler als der nachfolgende, wie dies schon von DUBUAT beobachtet und auch den Wasserwellen analog ist, die, wenn sie in untiefem Wasser fort-

<sup>1)</sup> Sandmassen, die schwebend vom Strome fortgeführt werden, könnte man, nach Analogie des vom Winde getriebenen Staubes, Sandwolken nennen.

schreiten, gleichfalls am vorderen Abhänge steiler sind als am hinteren. Das Verhältnis der Wellenhöhe zur Wellenlänge fand ich in den vom Wasser erzeugten Sandwellen wie 1: 8 bis 1: 11; in den vom Winde erzeugten ungefähr wie 1: 25.

Die Beobachtung zeigt, wie schon vorhin angedeutet ward, daß nicht selten, statt eines regelmäßigen Systems paralleler Streifen, ein verworrenes, netzartiges Gewebe von kleinen Erhöhungen und Vertiefungen, welche erheblich von der Form der Wellenlinie abweichen, die Oberfläche einer Sandbank bedeckt; auch findet man oft einzelne Partien der Oberfläche, namentlich die steileren Seitenabhänge von Sandbänken, ganz glatt, ohne alle wellenähnlichen Unebenheiten. Die Ursache dieser Erscheinungen läßt sich bei aufmerksamer Naturbetrachtung erkennen, sobald bei der Ebbe der Wasserspiegel sich weit genug gesenkt hat, daß man die Beschaffenheit des Grundes unter dem Wasser sehen kann; man hat alsdann Gelegenheit, die *U m f o r m u n g* eines vom Strome erzeugten Systems paralleler regelmäßiger Sandwellen mittelst der Wasserwellen unmittelbar zu beobachten. Auf der glatten Oberfläche der Sandbank nimmt, sobald die Rücken der Sandwellen nicht mehr beständig vom Wasser bedeckt sind, jede darüber hinfluthende Wasserwelle, indem sie eine kleine Brandung bildet, etwas Sand von dem Rücken der Sandwellen mit sich zurück und lagert denselben in dem benachbarten Wellenthal ab; diese oft und auf's Genaueste von verschiedenen Beobachtern erkannte Thatsache darf als völlig feststehend angesehen werden und erklärt es vollkommen, daß oft entstellte, theilweise zerstörte Sandwellensysteme das trockengelauene Strombett bedecken. Die völlige Planirung wird selten auf der platten Oberfläche, häufig aber auf den geneigten Abhängen der Sandbänke angetroffen, weil hier die planirende Wirkung der brandenden Wasserwellen kräftiger auftritt und länger anhält. Eigene Experimente zur Beobachtung der Wirkungen von Strandwellen und Brandungen auf die Bewegung des Sandes werden weiterhin mitgetheilt und discutirt werden. Die Figur 3 stellt einige deformirte



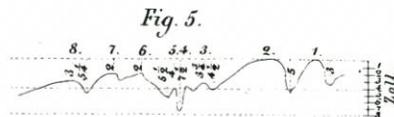
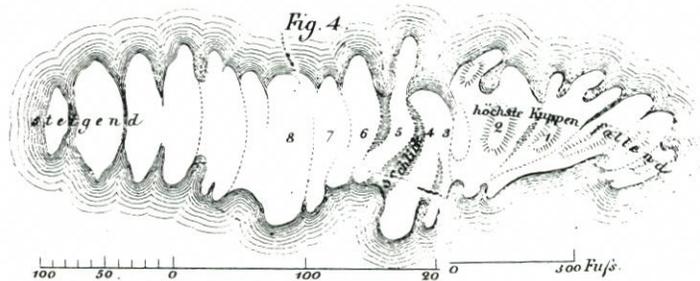
Sandwellen erster Ordnung oder *F u r c h e n* in natürlicher Größe und genau nach der Natur dar; es sind darin bei *a* kleine Ablagerungen in den Wellenthälern und bei *b* abgeplattete Scheitel bemerkbar. Einige Thatsachen, durch welche die obige Auffassung zur völligen Evidenz gebracht wird, sind folgende: Wenn man auf einer Sandfläche, die noch vom Wasser überströmt ist, die Sandwellen mittelst äußerer Einwirkung z. B. mit den Füßen oder einem geeigneten Geräthe zerstört, so wird man nach nicht langer Zeit das regelmäßige Wellensystem im Anschluss an die Umgebung durch den Strom wiederhergestellt sehen. Bedeckt man einen Theil des überströmten Flußbettes mit einer dünnen Schicht farbigen Sandes, so sieht man schon nach einigen Minuten Streifen sich bilden, die mit den Sandwellen in der Umgebung correspondiren und bekrunden, daß der Strom in durchaus regelmäßiger Weise das Bett bearbeitet. Selbst in der Tiefe des Stromschlauches ist auf diese Weise mittelst der Taucherglocke die Existenz von Sandwellen erster Ordnung beobachtet worden.

Nach allem Angeführten ist zu vermuthen, daß überall, wo strömendes Wasser über ein bewegliches Grundbett hinfließt, die Oberfläche des Bettes wellenförmig gestaltet, und daß unter dieser Form ein *a l l g e m e i n e s* *N a t u r g e s e t z* verhüllt sei, welches die Einwirkung strömender flüssiger Körper auf darunter liegende lose Anhäufungen fester Körpertheilchen regelt.

Das Fortrücken der Sandwellen erster Ordnung in der Richtung des Stromes findet bald schneller bald langsamer statt und ist ohne Zweifel eine Function der Geschwindigkeit des darüber hinfließenden Stromes. DUBUAT beobachtete bei 1 Fuß Stromgeschwindigkeit p. Secunde in kleinen künstlichen Canälen ein Fortschreiten von 3 bis 4 Pariser Zoll in einer halben Stunde. In großen Strömen sind Beobachtungen dieser Art nicht recht angebracht, doch liegen mir folgende darauf bezügliche Notizen des Wasser-Bauinspectors DALMANN vor:

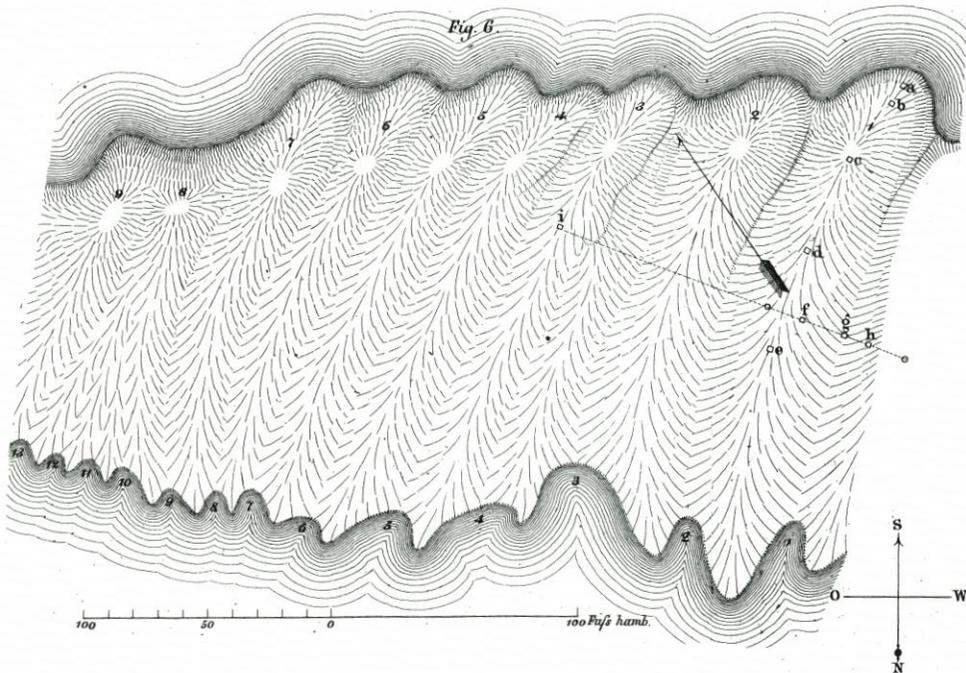
Auf der Ober-Elbe ward in geringer Wassertiefe ein Sack rothen Sandes ausgeschüttet und ausgebreitet; in 15 Minuten waren die kleinen Sandwellen vollständig gebildet, sie rückten aber in einer Stunde nicht über einen Zoll vorwärts. Bei Nienstedten (unterhalb Hamburg) ward in den Rücken einer etwa 4 Zoll unter dem Wasserspiegel befindlichen Sandwelle ein dünnes Metallstäbchen gesteckt; neben diesem bildete sich sogleich eine Vertiefung, die Verlängerung des Rückens zu beiden Seiten schritt in 12 Minuten etwa 1½ Zoll vorwärts und ward von den übrigen Sandwellen gefolgt. Eine andere Welle schritt in 8 Minuten 1½ Zoll vorwärts. An einem der folgenden Tage ward ebendasselbe ein Fortschreiten von 1 Zoll in 4 bis 5 Minuten beobachtet, es kam aber zu anderer Zeit auch vor, daß die Sandwellen in 13 Minuten nur ½ Zoll vorwärts rückten. Reducirt man alle diese Beobachtungen auf den Zeitraum von 60 Minuten, so ergibt sich, daß ein Fortrücken der Sandwellen erster Ordnung von 1, 2¼ 7½ 11¼ und 13½ Zoll pr. Stunde wirklich beobachtet ist, und daß die Beobachtung DUBUAT's von 7 Zoll pr. Stunde, zwischen den beiden Extremen ungefähr in der Mitte liegt. Die Bewegung der einzelnen Sandkörner, aus denen die Sandwelle 1. Ordnung gebildet ist, findet man ausführlich und naturgetreu a. a. Orte von HAGEN beschrieben, und habe ich dem nichts hinzuzufügen. Die Körner werden den flachen Abhang hinaufgerollt, stürzen vom Gipfel in das vordere Wellenthal hinab, werden dann von den nachfolgenden Körnern überdeckt und bleiben so lange in Ruhe, bis der ganze Wellenkörper um eine Wellenlänge vorwärts gerückt ist.

Zu den Sandwellen höherer Ordnung übergehend, fasse ich diejenigen der 2. und 3. Ordnung zusammen unter einen gemeinschaftlichen Gesichtspunkt. Ein von mir selber aufgenommenen Fall ist der in den Figuren 4 und 5 abgebildete. Figur 4 stellt die Umriss in der Wasserlinie einer Sandwelle 3. Ordnung, d. h. einer aus dem Wasser hervorragenden Sandbank der Ober-Elbe, so dar, wie sie in der gegebenen kurzen Zeit aufgemessen werden konnten; darauf sind die Formen und einige Kuppen der Sandwellen 2. Ordnung, aus denen die Sandbank gebildet war, mit punktirten Linien angedeutet, und in Fig. 5 ist ein Theil des Längenprofils durch die Mitte der Sandbank nach einem hinlänglich genauen Nivellement



aufgetragen. Man sieht daraus, daß diese Sandwelle 3. Ordnung etwa 450 Fuß lang und 100 Fuß breit über Wasser hervorragte, daß sie aus etwa 20 Sandwellen 2. Ordnung bestand, die in der Richtung der Ebbe allmählich bis zu der mit 1 bezeichneten höchsten Kuppe anstiegen, und daß sie von da an ziemlich rasch wieder bis zur Wasseroberfläche abfielen. Aus dem Profil Fig. 5 ergibt sich, daß die Sandwellen 2. Ordnung hier 1 bis 5 Zoll höher als die zwischen ihnen liegenden Täler waren; zu bemerken ist noch, daß in mehreren dieser Täler eine Schicht von frischem Schlick abgelagert war, die eine vorhergegangene Anschwellung des Flusses darin zurückgelassen hatte, und wodurch die ganze Erscheinung viel Ähnlichkeit mit einer im kleinen Maaßstabe dargestellten Reihe sandiger Geesthügel erhielt, deren Abhänge am Fuße theils von Marschländern begrenzt sind, theils unmittelbar vom Strome bespült werden. Die Sandwellen 2. Ordnung waren auf der platten Fläche sämtlich mit Sandwellen 1. Ordnung bedeckt, die durch Wellenschlag etwas gestört erschienen und von denen in der obigen Figur 3, B eine naturgetreue Anschauung gegeben ist. Die steileren Abhänge waren glatt planirt.

Eine andere Erscheinung der nämlichen Art ist von mir in der weiter seewärts gelegenen Stromgegend bei Blankenese aufgenommen und zu specielleren Beobachtungen benutzt

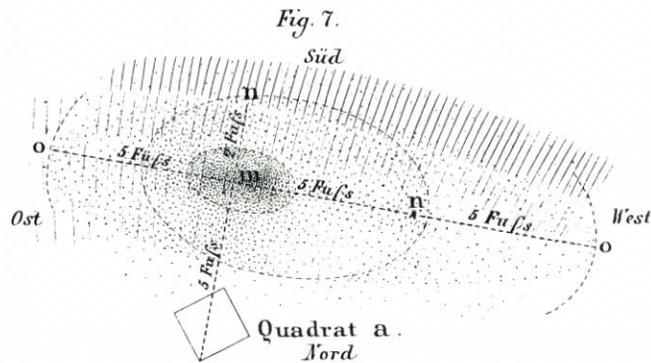


worden. Die Fig. 6 stellt die Oberfläche dieser Sandwelle so weit dar, als die Aufnahme derselben während einer Ebbe ausgeführt werden konnte. Man sieht, daß dieselbe zwischen zwei Stromrinnen belegen war und gegen die südliche einen ziemlich steilen, gegen die nördliche einen sehr flachen Seitenabhang hätte.<sup>1)</sup> Die Oberfläche ward durch ein System von einigermaßen parallelen, etwas gekrümmten Sandwellen 2. Ordnung gebildet, welche die

<sup>1)</sup> Um die LEHMANN'sche Bergzeichnung hier anwenden zu könne, mußten durchweg die Böschungswinkel steiler dargestellt werden als sie in Wirklichkeit waren, wie dies aus den oben angegebenen, gemessenen Höhenunterschieden sich ohne Weiteres ergibt.

Längsaxe der Hauptwelle schief durchschnitten. Das Ganze war, mit Ausnahme der höchsten Kuppen und des steilen südlichen Abhanges (welche planirt waren), mit Sandwellen erster Ordnung bedeckt, deren Form und Richtung nicht notirt worden ist. Die Höhe der mit 1 bis 9 bezeichneten Kuppen über den zwischenliegenden Thälern betrug etwa 6 Zoll, und das Längengefälle der Thäler bis zur Wasserlinie betrug gleichfalls 6 Zoll, so daß die höchsten Punkte der Sandbank etwa 1 Fuß über Niedrigwasser sich erhoben. Auf diesem zur genauen Beobachtung der Sandbewegung vorzüglich geeigneten Boden wurden vom 2. bis 6. Juni 1853 folgende Experimente angestellt: Auf dem höchsten Rücken einer Sandwelle 2. Ordnung wurden am 2. Juni Nachmittags 5 Quadrate, jedes von 18 Zoll Seite, 3 bis 3½ Zoll tief ausgehoben, mit farbigem Sande wieder ausgefüllt und mit beigesteckten eisernen Bolzen bezeichnet (vergl. Fig. 6 bei *a*, *b*, *c*, *d* und *e*); ferner wurde eine Linie in der Richtung *f h* nivellirt und mit Höhenpfählen bezeichnet; endlich wurden in dieser Richtung die drei Quadrate *f*, *g*, *h* von 18 Zoll Seite und 3½ bis 4 Zoll Tiefe von farbigem Sande angelegt. So vorbereitet ward das Experiment bei steigender Fluth den Wirkungen der Strömung überlassen. Am nächsten Morgen, nach Verlauf einer Tiede, wurden folgende Veränderungen vorgefunden, die ich wegen der Neuheit mancher der beobachteten Thatsachen ausführlich nach der Reihenfolge der Quadrate beschreibe.

Q u a d r a t *a*. Kein farbiges Sand war innerhalb des Quadrats befindlich, obwohl die an dem Bolzen gemessene Höhe der Oberfläche nur ½ Zoll erniedrigt war. Der farbige Sand war also in der ganzen Dicke von 3 Zoll deplacirt, und 2½ Zoll grauer Sand dafür an die Stelle



getreten. Fig. 7 zeigt die Vertheilung des farbigen Sandes auf dem südlichen Abhange, wo derselbe, mit dem Flußsande vermischt, eine in der Gegend von *m* etwa ½ Zoll dicke, weiter abwärts mehr und mehr verschwindende Schicht bildete. Die Intensität der Färbung ist durch Punktirung in der Figur angedeutet.

Q u a d r a t *b*. Die Oberfläche war um 1 Zoll erniedrigt; die oberste ½ Zoll dicke Schicht bestand aus grauem Sande mit einiger gelber Beimischung, unter dieser befand sich farbiger Sand ½ Zoll dick in unveränderter Lage. Die Deplacirung des farbigen Sandes war hier also 2½ Zoll tief gegangen und an dessen Stelle eine ½ Zoll dicke Schicht grauen Sandes niedergelegt. Die Wanderung des ersteren hatte in der Richtung gegen Süden und Südosten stattgefunden und konnte bis in eine Entfernung von 8 Fuß vom Ausgangspunkt verfolgt werden.

Q u a d r a t *c*. Die Oberfläche war 2 Zoll erniedrigt, kein farbiger Sand innerhalb der Grenzen des Quadrats vorhanden, und derselbe bis zu 10 Fuß Entfernung in südlicher Richtung in Form einer langen Ellipse zerstreut. Der höchste Rücken der Welle, auf welchem dieses Quadrat angelegt ward, befand sich jetzt 3 Fuß östlich von dem Bolzen.

Quadrat *d*. Die Oberfläche war  $2\frac{1}{4}$  Zoll erniedrigt;  $\frac{1}{2}$  Zoll unter derselben befand sich eine  $\frac{3}{8}$  Zoll dicke Schicht farbigen Sandes in unveränderter Lage, es war also eine Schicht von  $2\frac{1}{8}$  Zoll Dicke deplacirt und eine andere von nur  $\frac{1}{2}$  Zoll Dicke an die Stelle getreten. Die Wanderung des farbigen Sandes war wie bei *c*.

Das Quadrat *e* und der dasselbe bezeichnende Bolzen waren nicht aufzufinden, der farbige Sand war in demselben Sinne wie bei den vorhergehenden Quadraten fortbewegt.

Die Quadrate *f*, *g*, *h* wurden noch nicht näher untersucht, da es sich zeigte, daß im Thale die Deplacirung jedenfalls viel geringer gewesen sei, mithin die Beobachtung länger fortgesetzt werden könne. Es ward in der Verlängerung der Nivellementsline noch ein Quadrat bei *i* angelegt, in welchem die farbige Sandschicht eine Dicke von 9 Zoll erhielt.

Am 6. Juni, 8 Tieden nach der ersten Anlage (7 Tieden nach der Anlage des Quadrats *i*) ward die Fläche wieder besichtigt. Die Quadrate *a* bis *e* waren nicht aufzufinden. Das Quadrat *i* zeigte folgende Thatsachen: Der Rücken, welcher sich bei dessen Anlage an derselben Stelle mit dem Quadrate befunden hatte, befand sich jetzt 14 Fuß ostwärts von dem Bolzen entfernt; die Oberfläche war an der Stelle des Quadrats  $2\frac{1}{8}$  Zoll niedriger als bei der Anlage, die oberste Schicht,  $1\frac{1}{4}$  Zoll dick, bestand aus grauem Sande mit etwas farbiger Beimischung, und darunter lag farbiger Sand  $5\frac{1}{8}$  Zoll dick, der seine Stelle nicht verändert hatte. Es war hier also eine  $3\frac{3}{8}$  Zoll dicke Sandschicht deplacirt und durch eine andere  $1\frac{1}{4}$  Zoll dicke ersetzt worden. In der Umgebung des Quadrats war die Vermengung der farbigen Körner mit dem grauen Flußsande schon zu weit gediehen, um bei der geringen Quantität derselben die Richtung der Wanderung noch erkennen zu können.

Im Quadrat *f* war die Höhe der Oberfläche unverändert; eine Schicht von  $2\frac{1}{8}$  Zoll Dicke, aus grauem Sande lag auf einer  $1\frac{1}{2}$  Zoll dicken Schicht farbigen Sandes, der seine Stelle nicht verändert hatte.

Im Quadrat *g* war die Oberfläche  $\frac{5}{8}$  Zoll niedriger geworden, grauer, mit etwas farbigem gemischter Sand bedeckte  $1\frac{1}{4}$  Zoll dick die untere, noch unbewegt vorhandene Lage farbigen Sandes von  $2\frac{1}{4}$  Zoll Dicke. Die Deplacirung hatte hier also eine Tiefe von  $1\frac{1}{8}$  Zoll erreicht, und eine Schicht andern Sandes von  $1\frac{1}{4}$  Zoll Dicke war an die Stelle getreten.

Das Quadrat *h* zeigte die merkwürdigste Beschaffenheit, indem der farbige Sand in  $3\frac{1}{2}$  Zoll dicker Lage unverändert, so wie er eingebracht war, sich noch vorfand und mit einer beinahe 4 Zoll dicken Lage grauen Sandes bedeckt war.

Zum Abschlusse der Beobachtungen ward nun noch das Nivellement vom 2. Juni in der Richtung *f*, *g*, *h* am 6. Juni wiederholt, welches zwei Wellenrücken und das dazwischenliegende Wellenthal umfaßte. Aus der Vergleichung dieser beiden, in Figur 8 dargestellten Nivellements zeigt sich eine Verschiebung des Rückens der Welle 2. Ordnung von *z* nach *z'*, oder in 8 Tieden 9 bis 10 Fuß, in der Richtung der Nivellementsline gemessen.

Es ergibt sich aber dabei zugleich eine Verminderung der Höhe in dieser Linie um  $1\frac{3}{8}$  Zoll, und dieser Umstand deutet darauf hin, daß die Richtung der allgemeinen Bewegung nicht in die Richtung der Nivellementsline falle, sondern mehr gegen Süden oder Südosten. Die oben erwähnten, bei einzelnen Quadraten notirten Wahrnehmungen über den Weg der



farbigen Sandkörner bestätigen dies. Wenn angenommen wird, daß die in der Figur 6 durch einen Pfeil bezeichnete Richtung diejenige der allgemeinen Bewegung ist, so entspricht der in der Nivellementslinie beobachteten Verschiebung des Rückens von  $z$  nach  $z'$ , (welche 9 bis 10 Fuß beträgt) eine wahre Bewegung von 12 bis 13 Fuß in 8 Tieden, oder pr. Tiede  $1\frac{1}{2}$  Fuß. Bei dem Quadrate  $i$  hatte dort der Rücken der Sandwelle in 7 Tieden 14 Fuß, oder pr. Tiede 2 Fuß zurückgelegt, und bei dem Quadrate  $c$  ergab die Beobachtung eine Verschiebung von 3 Fuß pr. Tiede. Vielleicht sind diese Verschiedenheiten zufällig, wie ja auch bei den Wasserwellen die Bewegung der einen schneller oder langsamer sein kann als die einer andern, bald darauf folgenden. Man kann aber auch eine lebhaftere Bewegung dieser Sandmasse an der Südseite und eine langsamere an der Nordseite annehmen, womit alle Beobachtungen harmoniren würden; am wahrscheinlichsten ist, daß hier Beides zusammentraf, nämlich eine schnellere Verschiebung einzelner Sandwellen 2. Ordnung im Vergleich mit den benachbarten, und zwar vorzugsweise an der Südseite. Hierauf weist der merkwürdige Umstand hin, daß die Anzahl der an der Südseite belegenen Kuppen (1-9) kleiner ist als die Anzahl der an der Nordseite belegenen Thaleingänge (1-13), wodurch die Verschmelzung mehrerer Kuppen in eine einzige indicirt zu sein scheint (z. B. No. 3). Wie dem aber auch sein möge, so ergeben die Beobachtungen doch zweifellos, daß die Formen der Sandwellen 2. Ordnung in diesem Falle nur  $1\frac{1}{2}$  bis 3 Fuß pr. Tiede fortgerückt sind, während in derselben Zeit die einzelnen Sandkörner, durch deren Wanderung und zeitweilige Anhäufung zunächst die veränderlichen Formen der Sandwellen 1. Ordnung gebildet werden, bis zu 10 Fuß und selbst noch weiter von ihrer ursprünglichen Stelle entfernt wurden (vergl. oben die Quadrate  $a, b, c, d$ ). Die Beobachtungen ergeben ferner, daß die Bewegung der Sandkörner sich bis zu einer gewissen, nicht allenthalben gleichen Tiefe unter die Oberfläche des Strombettes erstreckte und daß die Stelle der fortgeführten Sandkörner von einer bald dünneren, bald dickeren Schicht anderer Sandkörner eingenommen ward, wodurch die Oberfläche im ersteren Falle niedriger, im letzteren höher geworden war. Der ganze Vorgang läßt sich ziemlich anschaulich darstellen, wenn wir die vorliegenden Daten über das Deplacement des Sandes mit dem Längenprofil der vorigen Figur vereinigen. Dies ist in Figur 9 geschehen, wo die scharf gezogene Linie  $m - m$



die Form der Oberfläche vor Beginn des Experimentes bezeichnet, die mit Strichpunkten gezogene Linie  $n - . - n$  die Form der Oberfläche nach Beendigung des Experimentes darstellt, und die rundpunktirte Linie  $o \dots o$ , welche an einem Ende in  $m m$ , am andern Ende in  $n n$  übergeht, die untere Grenze der während des Experimentes stattgefundenen Sandbewegung andeutet. Die Betrachtung ergibt, daß hier nicht nur die DUBUAT'sche Beschreibung von der Fortbewegung der Sandkörner überhaupt, sondern auch ganz speciell die von HAGEN zuerst bemerkte Thatsache bestätigt wird, „daß am Fuße der vorderen geneigten Fläche die Anzahl der in Bewegung gesetzten Körner viel geringer ist als nach dem Scheitel hin, wo ein Körnchen das andere zu berühren, oder die ganze Oberfläche in Bewegung zu sein scheint.“ Die hier mit HAGEN's Worten aufgenommene Beschreibung schildert genau diejenige Operation, welche stattfinden muß, wenn so wie es bei der vorliegenden Beobachtung der Fall war, die Dicke der in gleichen Zeiträumen bewegten

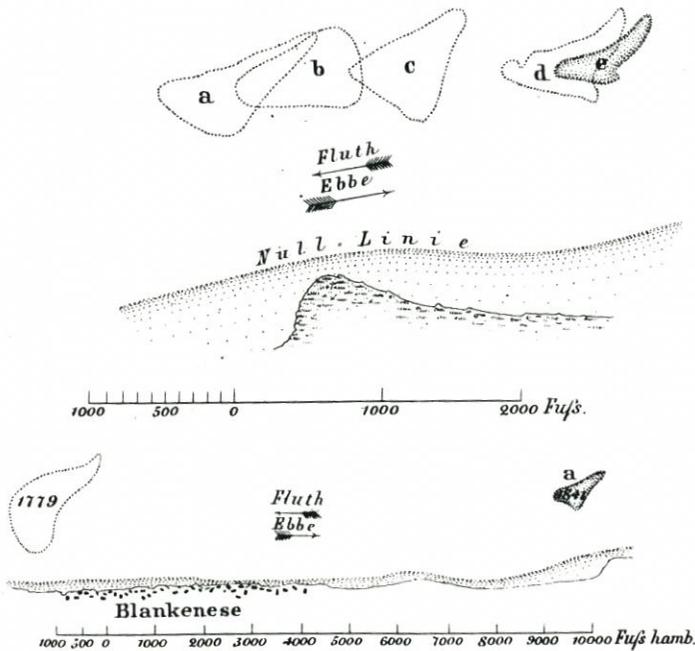
Schicht auf dem Scheitel der Welle bedeutend größer sein soll als im Wellenthale. Diese Uebereinstimmung erhält noch ein besonderes Interesse dadurch, daß die hier vorliegende Beobachtung an Sandwellen 2. Ordnung, also in einem viel größeren Maaßstabe gemacht ist, als die auf Sandwellen 1. Ordnung bezüglichen Beobachtungen DUBUAT'S und HAGEN'S, so daß mithin die Allgemeinheit des Gesetzes, nach welchem der Strom „das Grundbette bearbeitet,“ nicht zu bezweifeln ist. Eine Vergleichung zwischen dem Maaße der Bewegung bei Sandwellen 1. Ordnung und 2. Ordnung läßt sich nicht eher erschöpfend durchführen, als bis auch die Bewegung von Sandwellen höherer Ordnungen näher in Betracht gezogen ist. Dabei müssen aber noch längere Beobachtungsperioden zum Grunde gelegt werden, indem man sich bald überzeugt, daß das Fortrücken von Sandwellen um so langsamer vor sich geht, je höher die Ordnung ist, welcher sie angehören.

In derselben Stromgegend, in welcher die eben mitgetheilten Beobachtungen angestellt sind, ist das Fortrücken einer Sandwelle 3. Ordnung von 1841 bis 1855, also während eines Zeitraumes von 14 Jahren beobachtet und wiederholt durch Messung festgestellt worden; später konnten die gewonnenen Resultate noch durch eine im Archive aufgefundene Aufmessung desselben Sandfeldes vom Jahre 1779 erweitert werden, so daß die ganze Beobachtungsperiode einen Zeitraum von 76 Jahren umfaßt. Die Figur 10 enthält hierüber Folgendes:

- die Aufmessung *a.* mit dem Datum „im Sommer“ 1841
- „ „ *b.* „ „ „ April 1844,
- „ „ *c.* „ „ „ October 1847,
- „ „ *d.* „ „ „ Mai 1854,
- „ „ *e.* „ „ „ Juni 1855,

ferner in der unteren Abtheilung, nach kleinerem Maaßstabe, die Aufmessung von 1779 im Zusammenhange mit derjenigen von 1841.

Fig. 10.



Diese Zeichnungen stellen sämtlich die Contour der Sandwelle, so wie dieselbe bei ordinär Niedrigwasser vom Wasser frei ward, vor, und ist darüber noch zu bemerken, daß der vordere, steilere Abhang eine schärfere Bestimmung der Niedrigwasserlinie gestattete als der sehr flach verlaufende, hintere Abhang, und daß man deshalb die Entfernungen in den verschiedenen Jahren nach der Vorderseite abmessen muß. In Betreff der einzelnen Messungen ist zu erinnern, daß diejenigen von 1841 und 1844 weniger sicher sind als die späteren, da Anfangs die Aufmerksamkeit auf diesen speciellen Punkt noch nicht fixirt war. Die Messung von 1779 ist einer mit Sorgfalt im großen Maaßstabe bearbeiteten Stromkarte entnommen.

Wenn man nun die zurückgelegten Wege nach den Originalrissen mißt, so ergeben sich folgende Zahlen:

1779 bis 1855; in 76 Jahren 13 400 Fuß, pro anno 176 Fuß;

October 1847 bis Juni 1855; in 92 Monaten 1200 Fuß, pro anno 156 Fuß;

Mai 1854 bis Juni 1855; in 13 Monaten 700 Fuß, pro anno 162 Fuß;

Sommer 1841 bis Juni 1855; in 14 Jahren 2450 Fuß, pro anno 175 Fuß;

Sommer 1841 bis October 1847; in etwa 76 Monaten 1250 Fuß, pro anno 197 Fuß.

Auf die Abweichungen derjenigen Zahlen, die sich auf kürzere Zeiträume beziehen, ist hier kein besonderes Gewicht zu legen, da die bald mehr bald weniger starken Hochfluthen in verschiedenen Jahren verschiedene Werthe für die Größe der Sandbewegung zur Folge haben müssen. Dazu kommt noch der Umstand, daß die Bestimmung der Niedrigwasserlinie am Fuße einer so ungemein schwach geneigten Fläche, wie die Kuppe einer Sandbank, stets eine gewisse Unsicherheit in sich trägt, die erst in dem Durchschnittswerthe vieler Jahre verschwindet. Wir müssen deshalb den 76jährigen Durchschnitt, der mit dem 14jährigen nahe übereinstimmt, nämlich 176 Fuß pro anno, als die richtige Größe der Bewegung dieser Sandwelle 3. Ordnung annehmen.

Neben dieser Thatsache tritt bei Betrachtung der Figur noch eine zweite Erscheinung unverkennbar hervor, nämlich eine stetige Verkleinerung der über Niedrigwasser sichtbar werdenden Oberfläche, d. h. ein allmähiges Niedrigerwerden der Sandbank oder, was dasselbe sagt, eine Verminderung ihrer Masse. Auch in dieser Beziehung kann aus den schon erwähnten Gründen die Vergleichung von Messungen nahe auf einander folgender Jahre keinen sichern Anhalt gewähren, dagegen ist ein Zeitraum von  $\frac{3}{4}$  Jahrhundert sicher ausreichend, um mittelst eines Durchschnittswerthes alle erheblichen Zufälligkeiten auszuschließen und die unvermeidlichen Messungsfehler unschädlich zu machen. Figur 11 zeigt die betreffende Sandwelle nach den Aufnahmen von 1779 und 1854 im gleichen Maaßstabe über einander gezeichnet; danach ist:

der Flächeninhalt über Niedrigwasser

für 1779 = 1 651 000 □ Fuß, für 1854 = 223 200 □ Fuß;

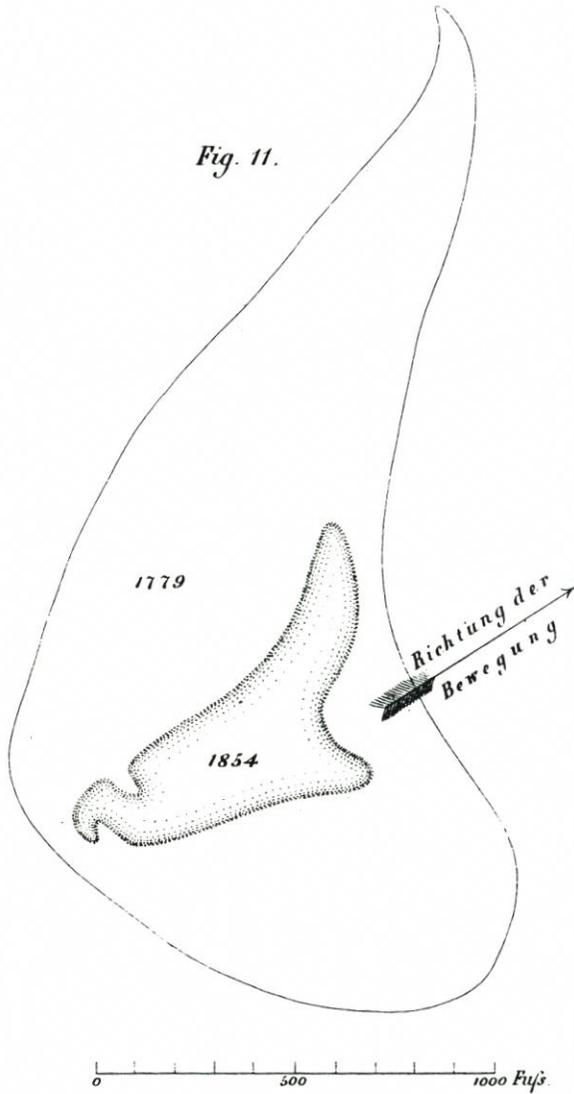
der Umfang in der Niedrigwasserlinie

für 1779 = 6150 Fuß, für 1854 = 2540 Fuß.

Stellt man sich nun die Sache so vor, als ob die Sandbank eine nach allen Seiten gleichmäßig abfallende gerade Böschung hätte, also ein flacher Kegel oder eine Pyramide wäre, und allmähig in gleichem Zeitmaße tiefer eingesenkt oder erniedrigt würde, und bezeichnet man den Umfang in der Niedrigwasserlinie für zwei verschiedene Jahre mit  $p'$  und  $p''$ , die Differenz der Flächeninhalte mit  $d$  und die Anzahl der Jahre mit  $n$ , so ist klar, daß in jedem Jahre das Wasser ringsherum einen Streifen am Fuße der Böschung in Besitz genommen haben

müsse, dessen Breite  $b = \frac{2d}{n(p' + p'')}$  ist. Die Unregelmäßigkeit der gegebenen Figuren und

die Form der Kuppe überhaupt ist nun freilich sehr verschieden von der hier zum Grunde gelegten Vorstellung eines regelmäßigen pyramidalischen Körpers, indeß kommt sie demsel-



ben doch nahe genug, um diese Behandlungsart auf den vorliegenden Fall anzuwenden. Wir haben dann, nach den Messungen von 1779 und 1854:

$$d = 1427800; p' = 6150; p'' = 2540; n = 75,$$

folglich  $b = 4,4$  Fuß.

Nach den Messungen von 1854 und 1855 ist:

$$d = 223200 - 129000 = 94200; p' = 2540; p'' = 1900; n = 1,$$

folglich  $b = 4,25$  Fuß.

Einer Böschungsbreite von  $4\frac{1}{4}$  bis  $4\frac{1}{2}$  Fuß entspricht auf der Kuppe großer Sandbänke die Höhe von ungefähr  $\frac{1}{2}$  Zoll, da das Neigungsverhältnis etwa  $= 1 : 100$  anzunehmen ist; man kann also die im vorliegenden Falle erkannten Thatsachen folgendermaßen zusammenfassen: Die Kuppe dieser Sandwelle wird jährlich um 176 Fuß in der Richtung des Ebbestromes

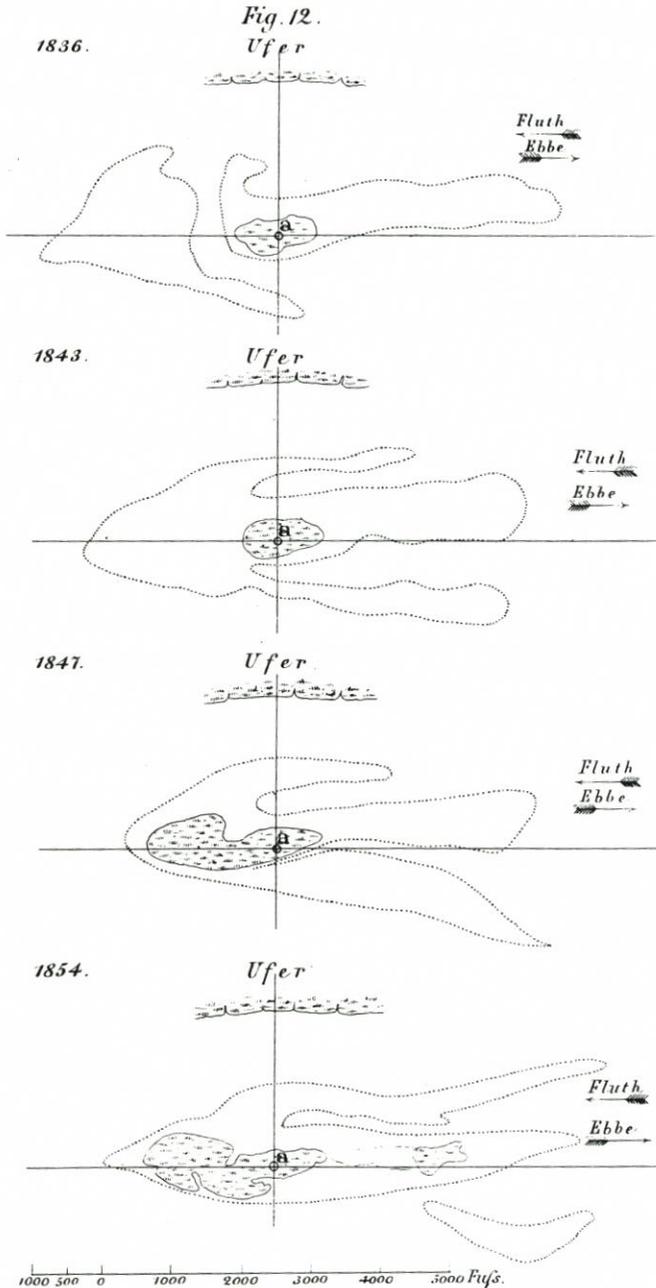
fortbewegt und um etwa  $\frac{1}{2}$  Zoll erniedrigt, wodurch die über Niedrigwasser zu Tage kommende Oberfläche in jedem Jahre um so viel verkleinert wird, als ein Streifen von  $4\frac{1}{2}$  Fuß Breite, ringsum die ganze Sandbank in der Niedrigwasserlinie liegend, beträgt.

Auch bei Sandwellen, die so niedrig sind, daß sie selbst bei den tiefsten Ebben niemals wasserfrei werden, ist das regelmäßige Fortschreiten derselben in der Richtung des Ebbestromes beobachtet worden. Als Beispiel solcher Beobachtungen hebe ich, unter mehreren mir bekannten, einen Fall hervor von einer, etwa eine Meile oberhalb der eben erwähnten Stromgegend in schräger Richtung quer durch das große Fahrwasser sich erstreckenden Untiefe, auf welcher die natürliche Wassertiefe bei ordinär Niedrigwasser 9 Fuß betrug, und deren Lage von 1847 bis 1852 in jedem Jahre genau aufgemessen ist. Hier ward während der Sommermonate die Tiefe in der Richtung des Fahrwassers durch Baggerung um 2 bis 3 Fuß vermehrt und nahm dann während des Winters wieder ab, und es ergab sich, daß das Fortschreiten der ganzen Sandwelle, von welcher die Baggerstelle nur einen verhältnismäßig sehr kleinen Theil ausmachte, in 64 Monaten um 1100 Fuß oder im Durchschnitt pro anno 206 Fuß in der Richtung der Ebbe fortrückte. Die Bewegung war hier also merklich schneller als die in dem vorhin mitgetheilten Falle beobachtete, wie es auch sein muß, da eine Sandmasse, die beständig unter Wasser bleibt, der Einwirkung des Stromes länger ausgesetzt ist, als eine solche, die während eines Theils der Ebbe wasserfrei wird. Diese Wahrnehmung lenkt übrigens die Aufmerksamkeit auf den beachtenswerthen Umstand, daß aus demselben Grunde auch bei hohen Sandbänken der tieferliegende Theil der Böschungen stärker angegriffen werde, als ihre über Niedrigwasser hervorragende Kuppe, und hierauf ist bei Erklärung des beobachteten allmäligen Zusammensinkens oder Kleinerwerdens solcher Sandanhäufungen Rücksicht zu nehmen, ohne daß jedoch die Mitwirkung anderer Ursachen dadurch ausgeschlossen wird. Unter letzteren ist ohne Zweifel diejenige am wirksamsten, welche ich in dem vorhergehenden Abschnitte dieser Abhandlung als *Sortirung der Sandkörner* durch den Strom bezeichnet und in den Mengungsverhältnissen der Körnergrößen verschiedener Stromgegenenden nachgewiesen habe.

Die in den beiden so eben erörterten Fällen wahrgenommene Regelmäßigkeit des Fortschreitens während langer Zeiträume findet nun aber keinesweges bei allen Sandwellen 3. Ordnung statt, sondern es treten dabei mancherlei Hemmungen, Beschleunigungen und Ablenkungen von der allgemeinen Richtung des Ebbestromes ein. Schon der zuerst angeführte Fall zeigte eine solche Ablenkung, indem dort die Bewegung, der westlichen Richtung des allgemeinen Ebbestromes beinahe gerade entgegengesetzt, gegen Südosten ging. Die Ursachen solcher Störungen lassen sich – insofern sie nicht der Natur der Ströme fremd sind, wie z. B. Stromcorrectionswerke, Brückenbauten etc. – unter den allgemeinen Begriff der *Inselbildung* zusammenfassen.

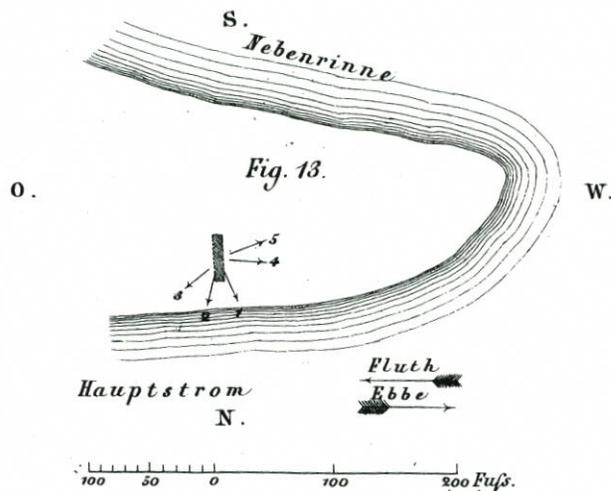
Sobald nämlich auf dem Gipfel einer Sandwelle einige Vegetation Platz greift, welches durch meist zufällige, unerkennbare Umstände veranlaßt wird, so hört nicht nur dieser begründende Theil der Oberfläche auf, an der allgemeinen Sandbewegung Theil zu nehmen, sondern derselbe verzögert und stört auch das Fortschreiten seiner Umgebung, und zwar besonders den stromaufwärts und stromabwärts belegenen Theil derselben, während zu beiden Seiten der werdenden Insel der vorbeistreichende Strom fortfährt, seine Wirkung auf die lose Sandmasse auszuüben. Nähert dann eine andere, noch in der Wanderung begriffene Sandwelle sich der oberen Spitze einer begrüneten Insel, so bleibt der, dieser in der Richtung des Stromes gegenüberliegende Theil der ersteren zurück, während die seitwärts liegenden Enden in ihrer Bewegung beharren, und dadurch nimmt die wandernde Sandwelle, schon ehe sie sich über der Wasserfläche mit der festliegenden Insel vereinigt hat, eine gekrümmte Form an; sie hängt sich gleichsam auf der oberen Inself Spitze auf. Neben der Insel bilden sich dann

zu beiden Seiten lange schmale Rücken, die durch einen Priel von derselben geschieden sind, sich mehr und mehr stromabwärts ziehen und zuletzt von dem mittleren, in die Masse der Insel übergehenden Theile trennen, um als kleinere unabhängige Sandwellen sich der allgemeinen Bewegung wieder anzuschließen. Auf der Insel selbst breitet die Vegetation sich mehr und mehr aus, wenn sie nicht, z. B. durch Eisgang, zerstört wird, und es ist bekannt, wie rasch die Vergrößerung solcher Alluvionen zunimmt, zumal wenn sie durch Schlickfall begünstigt ist



oder man ihr durch Anpflanzung von Weiden etc. zu Hülfe kommt. Alle diese Erscheinungen treten sehr deutlich in Figur 12 hervor, welche eine jetzt ziemlich ausgedehnte Insel, einige Meilen unterhalb Hamburg, nebst einer dagegen getriebenen Sandwelle nach Aufmessung von 1836, 1843, 1847 und 1854 darstellt.

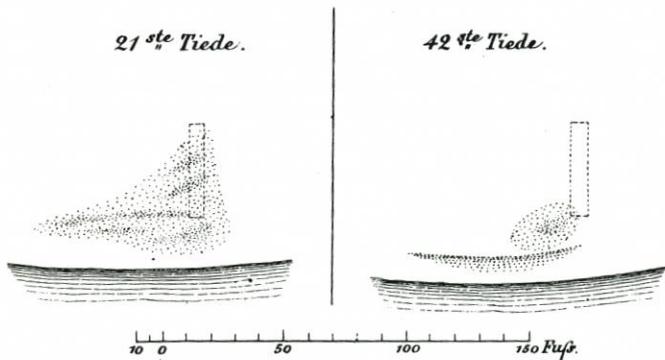
Am untern Ende festliegender Inseln sieht man oft in bedeutender Länge stromabwärts sich erstreckende Sandrücken, die, gegen directe Einwirkung des Hauptstromes durch ihre Lage geschützt, an der allgemeinen Sandbewegung in der Richtung des Ebbestromes keinen Theil nehmen; gleichwohl ist die Ruhe derselben nur scheinbar, indem sie beständigen Angriffen von Querströmungen ausgesetzt sind, durch welche sie von einer Seite zur andern übergewälzt werden. Die Ursache dieser Erscheinung liegt darin, daß zwei nebeneinander befindliche Stromrinnen niemals in ganz gleichem Grade von den Schwankungen der Fluthwelle afficirt werden, so daß zwischen ihnen ein Bestreben zur Ausgleichung des Niveau-Unterschiedes stattfindet, welches, sobald der Wasserspiegel den trennenden Sandrücken übersteigt, sich durch die erwähnten Querströmungen bemerkbar macht. Bei den in Folge dessen eintretenden Verschiebungen des Sandrückens von einer Seite zur anderen findet dieselbe Operation statt, welche DUBUAT beschrieben hat und die hier schon in einem der mitgetheilten Fälle durch Beobachtung im größeren Maaßstabe bestätigt worden ist. Einen ganz speciellen Nachweis dieser Operation lieferte folgende, auf einer Sandwelle von der eben beschriebenen Art angestellte Beobachtung, mit Hülfe einer von farbigem Sande angefertigten Fläche, die 40 Fuß lang, 6 Fuß breit und 9 Zoll tief angelegt war. Die Dauer des Experiments war etwa 3 Wochen (vom 28. Juli bis 19. August 1853).



Die beobachtete Veränderung der Stromrichtung während des Verlaufs einer Tiede ist in Figur 13 durch numerirte Pfeile veranschaulicht, das mit farbigem Sande ausgefüllte Rechteck ist schraffirt gezeichnet. Als bei steigender Fluth der Sandrücken unter Wasser kam, fiel der Strom nach der Richtung No. 1 querüber aus der südlichen Stromrinne in die nördliche, und drehte sich allmähig weiter aufwärts durch No. 2 bis zu No. 3, welche mit Hochwasser zusammentraf; dann wechselte der Strom nach der Richtung No. 4, welche der allgemeinen Ebbeströmung des Hauptstromes parallel ist, und drehte allmähig bis No. 5, welche von der nördlichen Rinne nach der südlichen hinweist. Man sieht hieraus, daß in diesem Falle die südliche Rinne sowohl von der Fluth als von der Ebbe rascher afficirt ward als die nördliche,

indem bei steigendem Wasser jene in diese, bei fallendem Wasser aber diese in jene sich entlastete. Die Bewegung der farbigen Sandkörner fand vorherrschend in der Richtung No. 1 bis No. 4 statt, worin das überwiegende Moment des querüberfallenden Fluthstromes über den Ebbestrom an dieser Stelle sich zu erkennen gab. Schon nach Verlauf der 2. Tiede konnte man in der Oberfläche den farbigen Sand vermisch mit dem Flußsande bis in eine Entfernung von 40 Fuß von der ursprünglichen Stelle bemerken; nach Verlauf der 21. Tiede und der 42. Tiede gewährte die Oberfläche etwa den in der Figur 14 dargestellten Anblick, wenn man statt der Punktirung den farbigen Sand sich denkt, durch den die Oberfläche an den Stellen

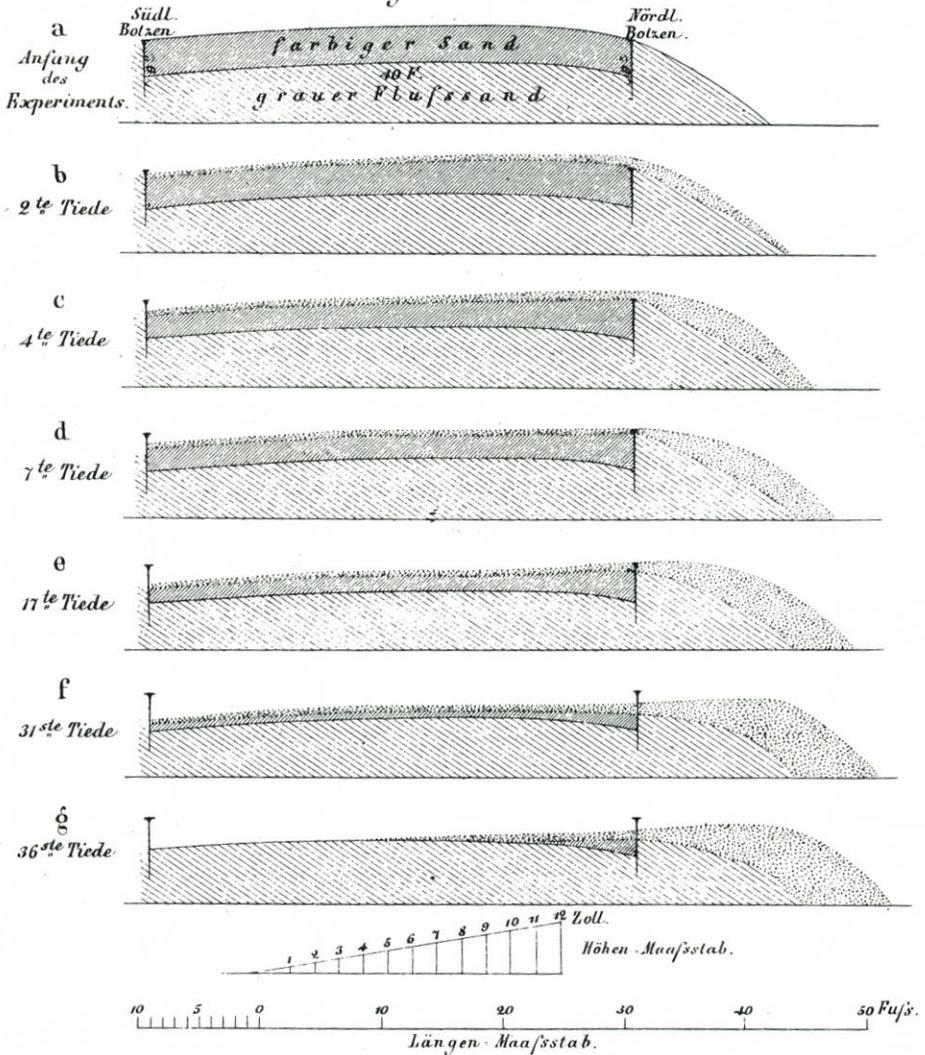
Fig. 14.



intensiver gefärbt erschien, wo die Punktirung dichter gezeichnet ist. Die spezielle Untersuchung der Experimentalfläche und ihrer nächsten Umgebung, wobei auch das Innere des Sandkörpers mittelst vorsichtiger Aufdeckung und Bohrung in Betracht gezogen ward, zeigte eine Reihe interessanter Veränderungen, die über den ganzen Vorgang Aufschluß geben. Fig. 15 stellt einen Längendurchschnitt durch die Experimentalfläche und die darin stattgefundenen Veränderungen für verschiedene, dabei angegebene Zeitpunkte dar. Der farbige Sand ist da, wo er mit dem grauen Flußsande vermengt, also in Bewegung gewesen war, punktirt gezeichnet. Die Schraffierung nach links bedeutet unvermischten, also bis dahin in Ruhe verbliebenen farbigen Sand, die Schraffirung nach rechts aber grauen Flußsand ohne bemerkbare farbige Beimischung.

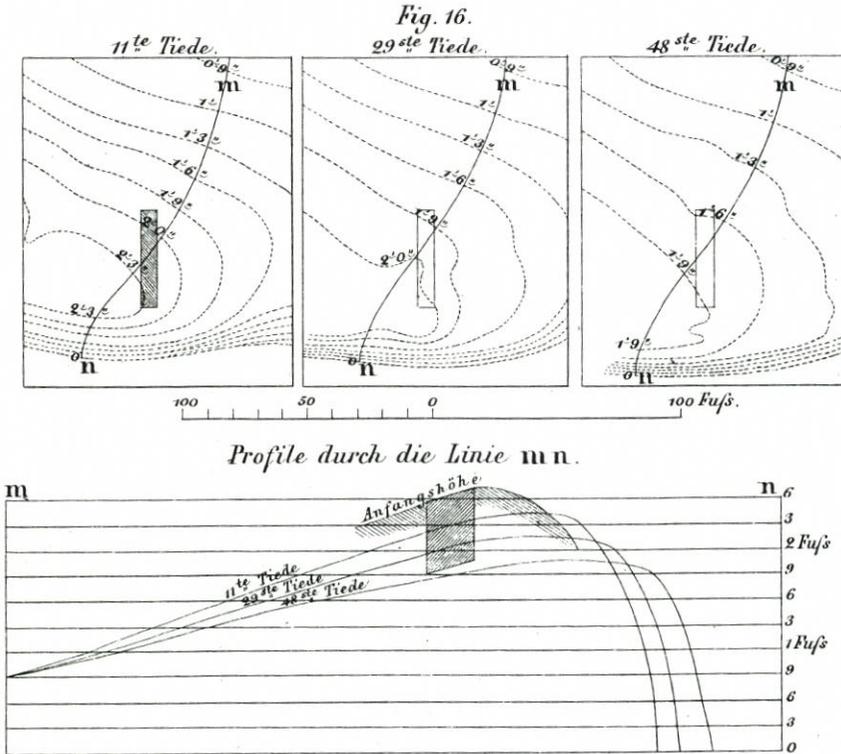
Das Profil *a* zeigt die Form der Oberfläche und die Lage des farbigen Sandes beim Beginn des Experimentes, als noch kein Strom darüber gegangen war. Die beiden, während des ganzen Experiments in unveränderter Stellung verbliebenen Bolzen, welche die Anfangshöhe der Oberfläche markirten, sind in sämtlichen Zeichnungen *a* bis *g* angegeben, und die Umgebung ist in den Zeichnungen *b* bis *g* so dargestellt, wie sie resp. nach Ablauf der 2., 4., 17., 31. und 36. Tiede befunden ward. Die Veränderungen bestanden im Wesentlichen darin, daß der Sand in der Richtung von Süden nach Norden übergewälzt und dabei die Oberfläche nach und nach erniedrigt ward. Anfangs zeigte sich am Nordende einige Erhöhung, bis nach Ablauf der 4. Tiede auch dort Erniedrigung eintrat. Der übergewälzte Sand blieb auf dem nördlichen Abhänge so lange in Ruhe, bis die Erniedrigung der Oberfläche denselben hier abermals erreichte und der Strom ihn wieder in die Bewegung hineinzog (vergl. 17. Tiede und folg.) Die Dicke der in Bewegung gewesenen Sandschicht war geringer auf dem südlichen flachen Abhänge als in der Gegend des Scheitels der Welle, und variierte von 1 bis 2½ Zoll. In der am nördlichen Abhänge successive abgelagerten, ruhenden Sandmasse wurde die farbige Beimischung bis zu 13 Zoll Tiefe unter der Oberfläche wahrgenommen. Ein kleiner Rest

Fig. 15.



unvermischten farbigen Sandes ward noch nach Ablauf der 36. Tiede am Nordende der Experimentalfläche in der ursprünglichen Lage vorgefunden; als auch dieser nach Verlauf der 48. Tiede verschwunden war, ward die Beobachtung geschlossen. Während des Verlaufs des Experiments ist die Oberfläche der Sandbank dreimal, nämlich nach Ablauf der 11., 29. und 48. Tiede, in weiterem Umfange genau aufgemessen und nivellirt; das Ergebnis ist in Fig. 16 im Grund- und Profilriß dargestellt. Die in den Grundrissen angegebenen Horizontallinien liegen in Verticalabständen von je 3 Zoll; das beigegefügte Profil ist so gelegt, daß es sämtliche Horizontalen thunlichst in normaler Richtung durchschneidet. Hiernach hat die Verschiebung dieser Sandwelle 3. Ordnung in der Richtung *m n* in dem Zeitraume von 37 Tieden 9 bis 10 Fuß, d. i. circa 3 Zoll p. Tiede betragen.

Ueberblickt man die bei dieser Beobachtung zur Anschauung gekommenen Thatsachen, so findet man dieselben sämtlich genau übereinstimmend mit der von DUBUAT und HAGEN



in Bezug auf Sandwellen 1. Ordnung beschriebenen Operation des Stromes, nur das Maaß der Bewegung scheint ein anderes zu sein, worauf im Verfolg dieser Untersuchungen noch näher eingegangen wird. Eine bemerkenswerthe Erscheinung war es noch, daß der farbige mit dem grauen vermischte Sand an keiner Stelle gleichmäßig in der Masse verteilt war, sondern durchweg dünne Schichten oder Streifen, von bald schwächerer, bald intensiverer Färbung bildete, die in der Richtung der Bewegung gegen den Horizont geneigt waren. Man konnte aber weder in der Anzahl und Dicke der farbigen Streifen, noch in ihren Abständen von einander, regelmäßigen Zusammenhang mit der Anzahl der darüber hingegangenen Tieden entdecken, obgleich darüber sehr specielle Aufnahmen vorlagen. Die Ursache dieser Erscheinung ist die während jeder einzelnen Tiede stattfindende Veränderung der Stromrichtung. Da nämlich die Experimentalfläche im Anfang die einzige, später jedenfalls die Hauptquelle der farbigen Beimischungen ist, und deshalb der Strom einem bestimmten Punkte außerhalb derselben nur so lange erhebliche Quantitäten farbigen Sandes zuführen kann, als die Stromrichtung zugleich auch die Experimentalfläche trifft, dieses Zusammentreffen aber für jeden einzelnen Punkt nur vorübergehend stattfindet, so ist zuvörderst klar, daß eine schichtenweise Abwechslung von farbigem und grauem Sande in der Ablagerung entstehen muß. Diese kann aber nicht einfach der Anzahl der vorübergegangenen Tieden entsprechen, theils weil nach und nach auch die Umgebung der Experimentalfläche dem Strome farbigen Sand überliefert, theils weil durch die zeitweilig stattfindende entgegengesetzte Stromrichtung die Ablagerungsbedingungen nothwendig schon in der ersten Tiede viel zu complicirt werden, um sich in einer leicht erkennbaren Schichtenfolge auszusprechen. Ich kann nicht umhin, hier auf die wahrscheinliche Analogie aufmerksam zu machen, welche zwischen den so eben besprochenen Erscheinungen und der bekannten Thatsache stattfindet,

daß in unseren Alluvialgebenden höchst mannigfaltige Schichtungen verschiedenen Materials, bald gröberes über feinerem, bald umgekehrt dieses über jenem, so wie auch verschiedene Färbungen in wellenförmigen Streifen abwechselnd gefunden werden. Die Annahme von Ebbe- und Fluthbewegungen in den Gewässern, welche einst diese Alluvialformationen bedeckt haben, scheint eine ausreichende Erklärung dafür zu gewähren.

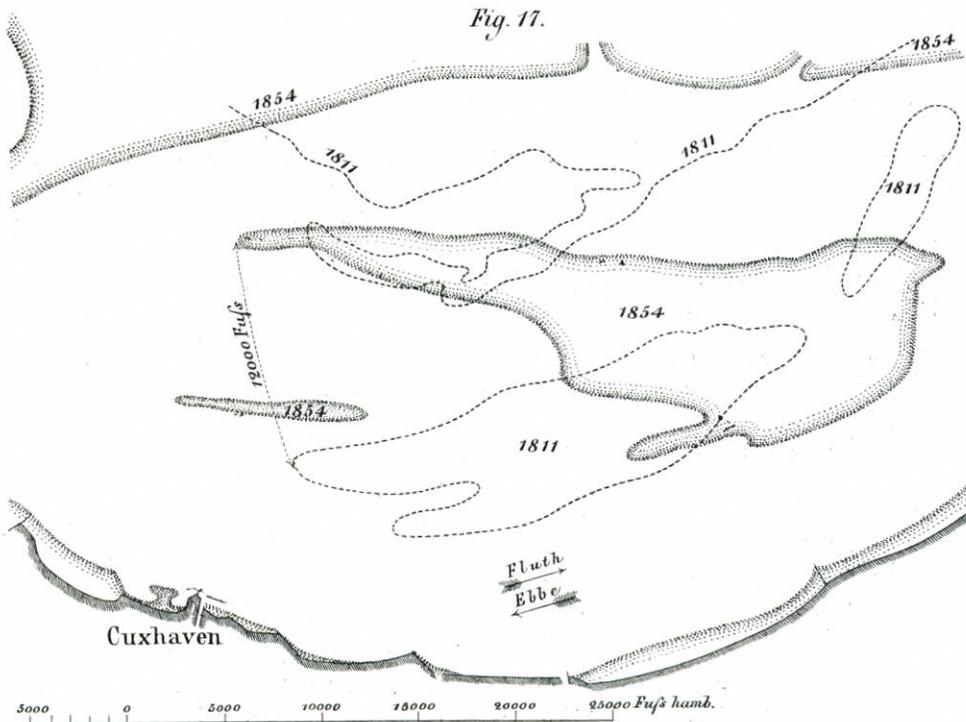
In Betreff der durch Vegetation und Inselbildung gefesselten oder in ihrer Bewegung aufgehaltenen Sandwellen 3. Ordnung ist schließlich noch zu bemerken, daß dieselben, nachdem sie während langer Zeit geruht haben, zuweilen wieder in die allgemeine Sandbewegung hineingezogen werden, sobald die bedeckende Schicht von Humus und Wurzeln durch Wellenschlag, Eisgang oder Stromangriff zerstört wird. Beispiele hierfür könnten leicht nachgewiesen werden, doch glaube ich dies unterlassen zu müssen, da dieselben nur beim Specialstudium einer bestimmten Lokalität Interesse beanspruchen können, und im Allgemeinen die Sache keinem Zweifel unterliegt.

In einem einigermaßen zutreffenden Bilde kann man die geschilderten Formveränderungen in dem Bette eines sandführenden Stromes mit einer in großer Entfernung vorüberziehenden Wolkenmasse vergleichen. Einer flüchtigen Anschauung erscheint dieselbe stillstehend und in ihren Formen unverändert; eine Vergleichung mit einigen festen Punkten zeigt die Verschiebung derselben im Großen und Ganzen, und aus anhaltender genauer Betrachtung der Formen im Einzelnen ergibt sich die unaufhörliche Verschiebung, Verkürzung oder Verlängerung der einen oder der anderen Partie, wodurch nach und nach auch das Ganze ein anderes Aussehen erhält. Wir sind hiermit bereits in die Betrachtung der Sandwellen vierter Ordnung eingetreten, die ich oben als Stromstrecken von oft meilenlanger Ausdehnung definirt habe, welche im Vergleich mit den oberhalb und unterhalb belegenen Stromgebenden vorzugsweise mit Sandmassen angefüllt und daher durch Untiefen charakterisirt sind. Dieselben zeigen in mehrfacher Beziehung höchst interessante Erscheinungen, wengleich ihre Bewegung nicht einer analogen Betrachtung mit den kleinen DUBUAT'schen Sandwellen unterzogen werden kann.

Zuvörderst ist im Allgemeinen anzunehmen, daß das Maaß der Bewegung dieser größten Sandwellen im Durchschnitt durchs ganze Jahr in allen Gegenden eines und desselben Stromes dasselbe und beinahe gleich Null ist, wengleich die Stromgeschwindigkeiten nicht aller Orten gleich sind. Diese Annahme eines constanten Verhältnisses zwischen der Kraft eines Stromes und dem am Boden desselben liegenden Materials im Großen und Ganzen, ist mit den bestehenden Unregelmäßigkeiten der natürlichen Ströme und der Ungleichheit der Stromgeschwindigkeit an verschiedenen Orten vollkommen vereinbar, weil, wie oben nachgewiesen wurde, die verschiedene Größe der bewegendes Kraft sich in der mittleren Körnergröße am Boden des Strombettes ausspricht. Mir sind keine Thatsachen bekannt, welche ein ungleiches Maaß der Bewegung für hintereinander liegende Sandwellen 4. Ordnung darthun, vielmehr finde ich die Ortsveränderung der Furthen, Leichtstellen, Untiefen, Barren etc. in der Richtung seewärts, sowohl in der Elbe als in anderen mir bekannten Strömen, kaum merklich, jedenfalls so überaus langsam, daß dieselben gemeinhin für festliegend angesehen werden und nur archivalische, sehr lange Zeiträume umfassende Forschungen deren Fortrücken darthun können. Betritt man diesen letzteren Weg, so wird es allerdings wahrscheinlich, daß auch bei diesen größten Sandwellen eine Bewegung seewärts stattfindet, die aber innerhalb der Zeiträume, in denen sichere Kartirungen vorgenommen wurden, nicht meßbar erscheint. Man erfährt nur etwa, daß es vor Jahrhunderten Untiefen in Gegenden gegeben hat, die jetzt vergleichsweise davon frei sind, und daß tiefgehende Schiffe den letzten Theil ihrer Ladung an Stellen an Bord genommen haben, deren Lage jetzt dazu nicht geeignet ist; aber sichere in Zahlen auszudrückende Angaben lassen sich daraus ebenso wenig ableiten, als es

sich ausmachen läßt, ob und in wie weit partielle Verschiebungen und Wanderungen der Sandwellen niedrigerer Ordnung die in Rede stehenden Veränderungen verursacht haben. Nur der Satz geht als unzweifelhaft feststehend aus Allem hervor, daß die Bewegung der Sandwellen 4. Ordnung für die unmittelbare Beobachtung unmerklich und demnach langsamer als diejenige der Sandwellen 3. Ordnung ist.

Die zweite interessante Wahrnehmung bei den Sandwellen 4. Ordnung betrifft ihre Ueberwälzung von einer Seite des Stromes zur anderen, in ganz analoger Weise und aus derselben Ursache, wie solche in kleinerem Maaßstabe bei den Sandwellen 3. Ordnung vorhin nachgewiesen ist. Die vor den Mündungen sandführender Flüsse befindlichen Seebarren bestehen bekanntlich aus einer bogenförmigen, nach außen convex gestalteten Anhäufung, durch welche der Strom in der Regel an mehreren Stellen Rinne ausgehöhlt hat, deren tiefste man zum Fahrwasser wählt. Verfolgt man den Zustand solcher Barren während langer Zeiträume, z. B. während eines Jahrhunderts, so wird man das Fahrwasser nicht beständig in der nämlichen Rinne finden, sondern abwechselnd bald in der einen, bald in der anderen. Diese Thatsache habe ich in Betreff der Flüsse Mersey und Tees in England in meinen Reisebemerkungen hydrot. Inhalts p. 7 und 14 nachgewiesen; eine ähnlich gestaltete Seebarre befindet sich auch vor der Elbe. Durch dieselbe führen vier Stromrinnen, von denen zwei, das Südergat und das Nordergat, abwechselnd zum Fahrwasser gedient haben, so lange wir Nachrichten darüber besitzen. Vor dem Jahre 1737 war das Südergat die Hauptrinne, aber durch seitliche Ueberwälzung des zwischenliegenden Sandriffes ward dieselbe damals untief und beengt, so daß man in dem genannten Jahre sich genöthigt sah, das Fahrwasser in das Nordergat zu verlegen. Aus dem weiteren Verlaufe des vorigen Jahrhunderts liegen keine Nachweisungen vor, doch ergibt es sich, daß zu Anfang des laufenden Jahrhunderts das Fahrwasser wieder durch das Südergat ging. Während des Decenniums 1840 bis 1850 nahm



aber dieses durch Ueberwälzung des Sandriffs dergestalt ab, daß um 1850 wiederum das Nordergat zum Fahrwasser bestimmt ward. Aus diesen immerhin etwas unvollständigen Daten scheinen sich Perioden von etwa 30 bis 40 Jahren für die seitliche Bewegung der dortigen Sandwelle zu ergeben.

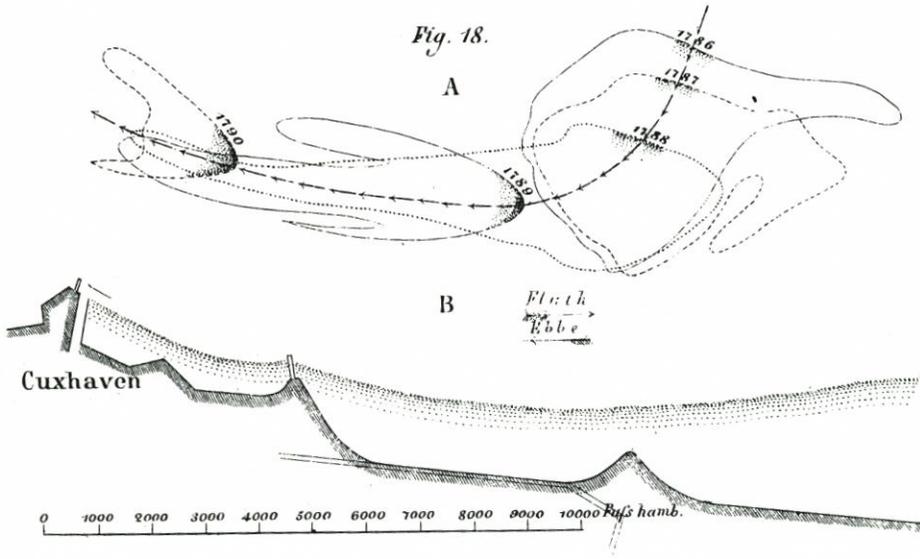
Etwas genauer ist dieselbe Erscheinung an einer anderen Sandwelle der Elbe, dem oberhalb Cuxhaven belegenden Medem-Sand nachzuweisen, indem von derselben Aufmessungen aus den Jahren 1811 und 1854 vorliegen, die eine Vergleichung gestatten. Die Aufnahme im Jahre 1811 ist von dem französischen Admiral BEAUTEMPSBEAUPRÉ zum Zwecke der gegenüberliegenden Küstenfortification ausgeführt, und darf deshalb in Betreff der Lage des Sandes gewiß als zuverlässig angesehen werden; die Aufmessung von 1854 ist ebenfalls richtig. In der Figur 17 sind beide Messungen in gleichem Maaßstabe übereinander gezeichnet, und man ersieht daraus die totale Verschiebung dieser Sandwelle von einer Seite des Stromes zur anderen, so daß die westliche Spitze in dem 43jährigen Zeitraume ihren Ort um circa 12 000 Fuß in der Richtung von Süden nach Norden verändert hat, woraus sich, in der Voraussetzung, daß die Bewegung beständig in derselben Richtung geblieben sei, ein täglicher Weg von ungefähr  $\frac{3}{4}$  Fuß ergibt.

Sehr genaue Nachweisungen über einen Theil dieser großen Sandwelle, der unter dem Namen „die Nordplate“ in den Jahren 1786 bis 1790 durch rasche Annäherung an das südliche Ufer lebhaftes Besorgniß zu Cuxhaven erregte, verdanken wir WOLTMAN, aus dessen eigenhändigen Concepten die Figur 18 zusammengestellt ist. Die Aufmessung ist jedesmal während einer einzigen Ebbezeit ganz durchgeführt, giebt also eine an ein präcises Datum geknüpfte Darstellung, was bei der großen Ausdehnung der Fläche nicht leicht zu erreichen gewesen sein mag.<sup>1)</sup>

Die aus WOLTMAN'S Messungen dieser zur 3. Ordnung gehörenden Sandwelle sich ergebenden Ortsveränderungen derselben lassen sich unter einen gemeinschaftlichen Gesichtspunkt bringen, aus welchem sie als eine gesetzmäßig fortschreitende Operation erscheinen. Zieht man nämlich die Linie a b, welche die in der Niedrigwasserlinie gezogenen Contouren der Sandwelle sämmtlich normal durchschneidet, und betrachtet dieselbe als den von der Hauptmasse der letzteren zurückgelegten Weg, so ergeben sich folgende interessante Verhältnisse:

Daten der Aufmessungen		Durchschnitt pr. Tag
No. 1. d. 14. Aug. 1786	in 300 Tagen 500 Fuß;	1,66 Fuß,
No. 2. d. 10. Juni 1787	in 326 Tagen 1400 Fuß;	4,3 Fuß,
No. 3. d. 2. Mai 1788	in 405 Tagen 2600 Fuß;	6,42 Fuß,
No. 4. d. 11. Juni 1789	in 354 Tagen 5750 Fuß;	15,54 Fuß.
No. 5. d. 31. Mai 1790		

<sup>1)</sup> WOLTMAN erzählte mir selber einmal, daß es ihn große Anstrengung gekostet habe, diese Aufmessungen stets vor Eintritt der Fluth zu beendigen; das erste Mal erregte sein und seiner Leute hastiges Laufen und Winken die Aufmerksamkeit der zu Cuxhaven ausschauenden Lootsen, deren Commandeur ihm ein Boot hinübersandte, weil man glaubte, es sei Jemandem ein Unglück widerfahren. Eine so strenge Gleichzeitigkeit der Aufnahme ist bei Stromkarten von größerem Umfange unmöglich und unnöthig, aber es wäre im Interesse der Wissenschaft zu wünschen, daß auf den Karten vollständigere Nachweisungen über die Zeit der Aufmessung einzelner Partien sich befänden, welche oft sehr verschieden von dem Datum der Karte ist, und auch untereinander abweicht. Die fortwährende Wandelbarkeit der Zustände in den Strombetten darf bei Kartirungen nicht ignoriert werden, wenn man nicht fehlerhafte Vorstellungen des Ganzen erhalten will.



Sowohl die in Fig. 18 dargestellten Formen, als auch diese Durchschnittszahlen führen auf eine einfache Erklärung der Bewegung dieser Sandwelle. Die Form ist Anfangs abgerundet, auf ein Centrum zu beziehen, und deutet auf einen Zustand der Ruhe; nachdem aber dann die Masse seitwärts in Bewegung gesetzt ist, wird die Form mehr und mehr langgestreckt und von der Anfangsrichtung abgelenkt, worin sich die Wirkung einer neu hinzukommenden Kraft äußert, die den schmalen Sandrücken mit sich fortreißt, so daß derselbe an Höhe und folglich auch an Ausdehnung abnimmt und nach einigen Jahren unter dem Niveau der Ebbe verschwindet. Die gefundenen Zahlen  $1\frac{1}{3}$ ,  $4\frac{1}{3}$ ,  $6\frac{1}{2}$  und  $15\frac{1}{2}$  weichen nicht bedeutend von dem Verhältniß 1, 2, 4, 8 ab, was zufällig sein kann, sie deuten aber jedenfalls auf eine die Anfangsgeschwindigkeit nach irgend einem Gesetze beschleunigende Kraft hin, deren Wirkung vielleicht durch Nebenumstände modificirt erscheint. Zur Erklärung des ganzen Vorganges muß man sich dasjenige vergegenwärtigen, was oben über die Ursachen der Querströmungen gesagt ist, und berücksichtigen, daß solche Strömungen in der hier in Rede stehenden Gegend mit einer Geschwindigkeit von  $2\frac{1}{2}$  Fuß pr. Secunde auf Entfernungen von einer halben Meile sich quer über das Fahrwasser ausbilden können, sowie daß die Geschwindigkeit des geraden Ebbestromes zu 6 Fuß, in einzelnen Fällen sogar bis zu 8 Fuß in der Secunde beobachtet worden ist.<sup>1)</sup>

Es ist dann davon auszugehen, daß um 1786 die nördliche Rinne A während der Ebbe ein etwas höheres Niveau gehalten habe, als die südliche Rinne B, und daß in Folge dessen eine Entlastung der ersteren in die letztere quer über den trennenden Sandrücken stattgefunden und den Sand in der Richtung gegen Süden übergewälzt hat. Hierdurch ist die Südrinne nach und nach beengt, bis im Jahre 1788 der angespannte Ebbestrom in dieser Rinne die Sandwelle umgelenkt und in den folgenden Jahren mit beschleunigter Bewegung abgeführt hat, während der Seitendruck oder die seitliche Ueberwälzung in demselben Verhältniß nachließ, als die Rinne A sich relativ erweiterte. Da alle derartige natürlichen Veränderungen sich allmählig und stetig entwickeln, so ist sowohl die Umlenkung in Form einer Curve, als auch die successive Beschleunigung der Bewegung durchaus naturgemäß.

<sup>1)</sup> Nach meinen eigenen, alle diese Verhältnisse vollständig umfassenden Schwimmerbeobachtungen.

Endlich ist noch eine dritte Wahrnehmung, die bei Betrachtung der Sandwellen 4. Ordnung gemacht ward, hier zu erwähnen, nämlich die Unterbrechung jeder an der Oberfläche bemerkbaren Sandbewegung in der Schlickregion des Stromes (Vergl. d. Abhandlung: Ueber die Eigenschaften und das Verhalten des Schlicks, abgedruckt auf S. 133 dieser Zeitschrift). Hier ist das Strombette soweit, als es bei der Ebbe wasserfrei wird, und auch noch in größerer Tiefe mit einer mehr oder minder dicken Schlickschicht bedeckt, durch welche der darunter liegende Sand gegen jede Einwirkung des Stromes geschützt wird, so daß nicht die Spur einer Bewegung, weder in Richtung seewärts noch von einer Stromseite zur anderen, bei den zu Gesicht kommenden Ablagerungen zu bemerken ist. Wenn also gerade in dieser Gegend sich eine Sandwelle 4. Ordnung befindet – wie es in der Elbe zwischen Stade und Glückstadt wirklich der Fall ist, so erscheint für eine oberflächliche Betrachtung dieselbe unbeweglich. Dabei drängt sich indeß das Bedenken auf, daß an einer Stelle, wo die Sandbewegung völlig unterbrochen wäre, die Anhäufung der von oben herabgeführten Sandmassen beständig zunehmen und in kurzer Zeit zu den größten Unzuträglichkeiten führen müßte, was sich unmöglich der Wahrnehmung entziehen könnte. Um hierüber in's Klare zu kommen, habe ich die Gelegenheit benutzt, als im Jahre 1853 eine Taucherglocke in der in Rede stehenden Elbgegend mit Räumungsarbeiten beschäftigt war, mittelst derselben die Beschaffenheit des Strombettes in größerer Tiefe in Hinsicht auf Sandbewegung zu untersuchen. Uebereinstimmende Wahrnehmungen mehrerer Beobachter haben gezeigt, daß die Schlickdecke sich nicht bis in die Tiefe des Stromschlauchs erstreckt, sondern daß dort der Sand den Einwirkungen des Stromes ausgesetzt ist. Es ward hier am Boden des Strombettes, 27 Fuß unter ordinär Hochwasser, eine Fläche von ungefähr 3 Fuß Durchmesser  $3\frac{1}{2}$  Zoll dick von farbigem Sande angelegt, dann nach Verlauf der folgenden Ebbe und abermals nach Verlauf der Fluth untersucht; dabei zeigte sich, daß eine Schicht von etwa 2 Zoll Dicke mit grauem Flußsande vermischt und also in Bewegung gewesen war, auch ward in der Umgebung farbiger Sand mit dem grauen vermengt befunden und das Vorhandensein kleiner DUBUAT'scher Sandwellen 1. Ordnung notirt. So speciell, wie auf der trocken gelaufenen Oberfläche, lassen sich jedoch in solcher Tiefe die Beobachtungen nicht durchführen, und es mußte genügen, die Thatsache, daß die allgemeine Sandbewegung hier nur in den höher liegenden Partien des Strombettes gehemmt sei, sicher festgestellt zu sehen. Uebrigens ist in Betreff der Schlickregion noch zu bemerken, daß dieselbe im Laufe von Jahrhunderten sich bemerkbar weiter seewärts verschiebt; dadurch werden mit der Zeit die durch die Schlickdecke festgehaltenen Sandmassen, soweit sie dann nicht durch Vegetation in Besitz genommen und in festes Land verwandelt sind, wieder bloßgelegt und vom Strome in die allgemeine Sandbewegung hineingezogen. Diese Verhältnisse lassen sich indeß nur im Hinblick auf bestimmte Ströme und auf historischer Grundlage speciell erörtern, was von dem vorgesetzten Zwecke dieser Abhandlung zu weit abführen würde.

Um die bis hieher vorgeführten Thatsachen unter einen gemeinsamen Gesichtspunkt zu bringen, ist nun folgender Weg einzuschlagen:

Zuvörderst sind zwei Klassen von Beobachtungen zu trennen, nämlich diejenigen, bei denen der zurückgelegte Weg während der Bewegung direct gemessen ist, und diejenigen, durch welche nur die Ortsveränderung nach einer längeren, in verschiedenen, sich zum Theil entgegengesetzten Richtungen stattgefundenen Bewegung, oder mit andern Worten nur die Differenz des Fluth- und Ebbe-Weges constatirt werden konnte. Die ersteren betreffen die Sandwellen 1. Ordnung, die letzteren diejenigen der höheren Ordnungen. Der Maaßstab oder das Vergleichungsmittel für jene ist die ebenfalls direct zu messende Stromgeschwindigkeit. DUBUAT glaubte bekanntlich ein bestimmtes Verhältniß zwischen der Stromgeschwindigkeit und dem Widerstande verschiedener Materialien durch Beobachtung gefun-

den zu haben und drückte dasselbe in gewissen Zahlen aus, die in alle späteren Lehrbücher übergegangen sind und noch jetzt nicht selten als Grundlage für die folgenreichsten Bestimmungen in Bauprojecten benutzt werden.<sup>1)</sup> In Bezug hierauf hob HAGEN (Handb. II, 2, §. 68) die große Unsicherheit derartiger Beobachtungen hervor und fügte hinzu, daß ihm die Auffindung einer bestimmten Beziehung zwischen der Geschwindigkeit und der Beweglichkeit des Materials nicht möglich gewesen sei. Diese Aeußerung HAGEN's wird durch meine Beobachtungen vollkommen bestätigt, in sofern nämlich – wie es die Meinung der DUBUAT'schen Regel ist und auch bei deren Anwendung stets vorausgesetzt wird – von solchen Materialien die Rede ist, wie sie in der Natur vorkommen, d.h. von Gemengen ungleich-großer Körner, die in Masse niemals gleichmäßig vom Strome behandelt werden können. Faßt man diese vollkommen festgestellte Eigenschaft des natürlichen Sandes in's Auge, so ist klar, daß und warum kein constantes Verhältniß zwischen Stromgeschwindigkeit und gewissen Materialien aufgefunden werden kann, obgleich es nicht zweifelhaft ist, daß es für jede lose Masse von gleichgroßen und gleichgeformten Theilchen ein solches constantes Verhältniß geben muß.

Directe Beobachtungen über die Geschwindigkeit der Bewegung der einzelnen Sandkörner liegen nicht vor, dieselben würden auch ungemein schwierig sein und, da die Bewegung ungleichförmig und intermittirend ist, eine ziemlich complicirte Untersuchung erfordern, der ein praktisches Interesse nicht entspricht. Dagegen haben wir für die Geschwindigkeit des Fortrückens der Sandwellen 1. Ordnung mehrere directe Beobachtungen. Dieselbe betrug bei den Versuchen von DUBUAT in ½ Stunde 3 bis 4 Zoll, pr. Stunde 7 Zoll;

bei vorstehenden Beobachtungen an verschiedenen Stellen des Elbstroms:

- a. in 1 Stunde nicht über 1 Zoll, pr. Stunde 1 Zoll;
- b. in 12 Minuten . . . . . 1½ Zoll, pr. Stunde 7½ Zoll;
- c. in 8 Minuten . . . . . 1½ Zoll, pr. Stunde 11¼ Zoll;
- d. in 4 bis 5 Minuten . . . . . 1 Zoll, pr. Stunde 13½ Zoll;
- e. in 13 Minuten . . . . . ½ Zoll, pr. Stunde 2½ Zoll.

Es ist nicht anzunehmen, daß diese Zahlen die Grenze der Möglichkeiten erreichen, da bei den Beobachtungen weder große Stromgeschwindigkeiten noch extreme Körnergrößen vorgekommen sind; umso mehr also geht daraus hervor, daß in der Natur ein sehr weiter Spielraum für die rollende Bewegung stattfindet, dessen Grenze einerseits völlige Ruhe, andererseits die Aufhebung und schwebende Fortführung des Sandes in Masse ist.

Die Dicke der bewegten Schicht ist ebenfalls mehrmals direct gemessen und von 1 bis zu 2½ Zoll befunden. Auch in dieser Beziehung ist die äußerste mögliche Grenze nicht bekannt; es ist aber anzunehmen, daß in jedem Falle die Höhe der Sandwellen 1. Ordnung zugleich dieser Dicke entspreche, und daß dieselbe daher unter allen gewöhnlichen Umständen nicht mehr als einige Zolle betrage. Endlich ist noch die an einer speciell beobachteten Sandwelle und ihren Veränderungen von 1779 bis 1854 nachgewiesene Thatsache im Auge zu behalten, daß eine Sandmasse nach und nach an Volumen verliert, während sie

<sup>1)</sup> Jene Angaben DUBUAT's sind folgende:

Töpferthon fängt an, dem Angriffe zu widerstehen, wenn die Geschwindigkeit am Boden bis 3 Zoll in der Secunde vermindert ist;

feiner Sand bei 6 Zoll in der Secunde;

grober und scharfer Sand bei 8 Zoll in der Secunde;

Kies aus der Seine fein bei 4 Zoll; mittel bei 7 Zoll; grob bei 12 Zoll;

abgerundete Geschiebe von 1 Zoll Durchmesser bei 24 Zoll;

eckige Feuersteine von der Größe eines Hühnereies bei 36 Zoll.

vom Strome fortgewälzt wird. Die Sandwellen erster Ordnung werden also ganz so, wie es DUBUAT beschreibt, gebildet, auch werden die Sandkörner ganz jener Schilderung entsprechend den flachen Abhang hinaufgerollt und bleiben am Fuße des steilen Abhanges unter der Bedeckung der nachfolgenden Körner in Ruhe, bis sie von Neuem vom Strome berührt werden. Während dieses Vorganges findet aber noch Eins statt, was sich der directen Beobachtung entzieht, worauf aber bei Erörterung der Mengungsverhältnisse der verschiedenen Körnergrößen in den einzelnen Stromgegenden bereits hingewiesen ward, nämlich die Aufhebung und schwebende Fortführung aller derjenigen Sandkörner, welche klein genug sind, um von den stets im Wasser befindlichen kleinen Wirbeln erfaßt zu werden, sobald sie während der Umwälzung der Masse an die Oberfläche kommen. So haben beide Arten der Bewegung, die rollende und die schwebende, unablässig gleichzeitig ihren Fortgang, und der Strom bewerkstelligt eben auf diese Weise das Sortiren der Sandkörner. Da überdies durch das Rollen der größeren Körner fortwährend Bruch und Abschleifung stattfindet, so bildet die Strömung selbst stets neues feines Material, welches mit in die schwebende Bewegung übergeht. Je stärker die Strömung ist, desto rascher geschieht das Rollen, desto größer ist die Höhe der Sandwellen und also auch die Dicke der bewegten Schicht, und desto größer sind auch die Dimensionen schwebender Körner. Nur sehr starke, kataraktähnliche Strömungen (wie bei Deichbrüchen) können alle Körner einer ganzen Sandmasse in schwebender Bewegung mit sich fortreißen.

Daß die Verschiebung ganzer Sandbänke oder Sandwellen höherer Ordnung langsamer vor sich geht als die Bewegung der Sandwellen 1. Ordnung, lehrt schon eine flüchtige Betrachtung der mitgetheilten Beobachtungen, obgleich diese noch keine unmittelbar miteinander zu vergleichende Zahlen darbieten. Um zu solchen zu gelangen, ist es erforderlich, zuvor die Bewegung des Wassers während einer ganzen Fluth- und Ebbe-Periode genauer zu erörtern und daraus den Ueberschuß des während der Ebbe zurückgelegten Wasserweges über den während der Fluth zurückgelegten, mit Bezug auf bestimmte Stromgegenden kennen zu lernen; denn eben dieser Ueberschuß ist diejenige Größe, mit welcher die beobachtete Ortsveränderung von Sandwellen höherer Ordnung zunächst verglichen werden muß, da dieselbe – wie oben bereits bemerkt ist – nur die Differenz der Fluth- und Ebbewegung ausdrückt.

Die Wassermenge, welche während eines gewissen Zeitraumes, z. B. während eines Jahres, durch ein bestimmtes im Fluthgebiete belegenes Stromprofil seewärts oder in der Richtung der Ebbe durchfließt, kann man sich folgendermaßen zusammengesetzt denken:

1. diejenige Wassermenge, welche während sämtlicher, in denselben Zeitraum fallender Fluthen landwärts, d. h. in der Richtung des Fluthstromes, durch dieses Profil geflossen war und während der Ebbezeiten unvermindert zurückgeflossen sein muß;
2. diejenige Wassermenge, welche während des ganzen Zeitraumes vom oberen Strome aus dem Binnenlande herabgeführt und in das Fluthgebiet hineingeflossen ist;
3. diejenige Wassermenge, welche von den zwischen der oberen Fluthgrenze und dem in Rede stehenden Stromprofile in das Fluthgebiet einmündenden Nebenflüssen zugeführt worden ist.

Die Summe dieser drei Wassermengen ist gleich dem Total des in dem gegebenen Zeitraume stattgefundenen Durchflusses während der Ebbe. Nun ist aber klar, daß das Hin- und Herströmen der sub No. 1 begriffenen Wassermasse sich der Summe nach genau ausgleichen muß, wenn der Zeitraum lang genug genommen ist, um den Einfluß der zufälligen und periodischen Ungleichheiten der einzelnen Fluthwellen durch die große Menge der Fälle verschwinden zu machen; es kommt demnach nur auf No. 2 und No. 3 an. Es sei nun für ein seiner Lage und Größe nach bestimmtes Stromprofil  $P$  der durchschnittliche Ueber-

schuß des Wasserweges während einer Ebbe über den Wasserweg während einer Fluth =  $D$ ; ferner sei die mittlere Wassermenge, die der obere Strom in einer Secunde herabführt, =  $M$ , die mittlere Wassermenge der sub No. 3. bezeichneten Nebenflüsse in einer Secunde =  $M'$ , und die normale Dauer der einzelnen Fluthentwicklung (Tiede) werde = 12 Stunden 24 Minuten oder = 44 640 Secunden angenommen;

$$\text{so hat man } D = \frac{44640 (M+M')}{P}$$

wo  $D$  in Fuß ausgedrückt ist, wenn  $M$  und  $M'$  in Cubikfuß und  $P$  in Quadratfuß gegeben sind.

Der Werth von  $M$  ist für jeden gegebenen Strom constant;  $M'$  ist veränderlich und hängt, wie auch  $P$ , von der Lage des gegebenen Stromprofils ab, beide sind bestimmt, wenn diese Lage bestimmt ist.

Der solchergestalt für jedes Profil des ganzen Stromes im Fluthgebiete zu ermittelnde Werth von  $D$  ist derjenige Wasserweg, mit welchem die an demselben Orte im geraden Stromstrich beobachtete Ortsveränderung von Sandwellen höherer Ordnung zu vergleichen ist, nachdem letztere ebenfalls auf den Zeitraum einer Fluthentwicklung oder Tiede reducirt worden.<sup>1)</sup>

Unter den im Vorhergehenden mitgetheilten Beobachtungen ist diejenige der in Fig. 10 dargestellten Sandwelle hiezu vorzugsweise geeignet, nach welcher der jährliche Weg dieser Sandwelle = 176 Fuß oder ihr Weg in einer Tiede<sup>2)</sup> = 0,25 Fuß ist.

Nach meinen Messungen ist für diesen Beobachtungsort

$P = 67500$ ;  $M' = 660$ ; und der für die Elbe constante Werth  $M = 30500$ ; mithin  $D = 20600$ ; d. h. im vorliegenden Falle kam auf 20600 Fuß Wasserweg in der Richtung der Ebbe die Ortsveränderung einer Sandwelle 3. Ordnung von 0,25 Fuß oder 3 Zoll in derselben Richtung.

Die Sandwellen 1. Ordnung bewegten sich nach den mitgetheilten Beobachtungen mit einer Geschwindigkeit von wenigen bis zu 13½ Zoll pro Stunde bei Stromgeschwindigkeiten, die sicher niemals über 2½ Fuß pro Secunde betragen haben. Bleiben wir bei DUBUAT'S Angabe stehen, nämlich 7 Zoll bei einer Stromgeschwindigkeit von 1 Fuß, so haben wir auf 3600 Fuß Wasserweg 7 Zoll Fortrücken der Sandwellen 1. Ordnung in derselben Richtung. Hiernach würde sich also, bei gleicher Größe des Wasserweges, der Weg einer DUBUAT'Schen Sandwelle 1. Ordnung zu dem Wege der bei Blankenese beobachteten Sandwelle 3. Ordnung wie 40:3 oder nahe wie 13:1 verhalten. Dieses specielle Zahlenverhältniß hat natürlich keine andere allgemeine Bedeutung als diejenige einer Rechtfertigung der Annahme, daß unter übrigens gleichen Umständen die Sandwellen höherer Ordnung bedeutend langsamer fortrücken als die Sandwellen niedrigerer Ordnung. Die übrigen Beobachtungen sind weniger zum Anhaltspunkte in dieser Beziehung geeignet, weil dabei Querströmungen mitwirkten, für welche die hier benutzte Formel zur Berechnung des Wasserweges, mit dem das Fortrücken der Sandwelle verglichen werden muß, nicht anwendbar ist. Nichtsdestoweniger zeigen auch diese mehrere analoge Verhältnisse, so z. B. die in Fig. 6 bis 8 dargestellten Sandwellen 2. Ordnung, deren Weg 1½, 2 bis 3 Fuß p. Tiede betrug, während an derselben Stelle die Sandkörner selbst, also die Sandwellen 1. Ordnung mehr als 10 Fuß in einer Tiede

<sup>1)</sup> In der Nähe der See wird  $D$  nahezu = Null; an der oberen Grenze des Flutgebietes ist es =  $\frac{44640 M}{P}$  d. i. gleich der mittleren Stromgeschwindigkeit multiplicirt mit 44640.

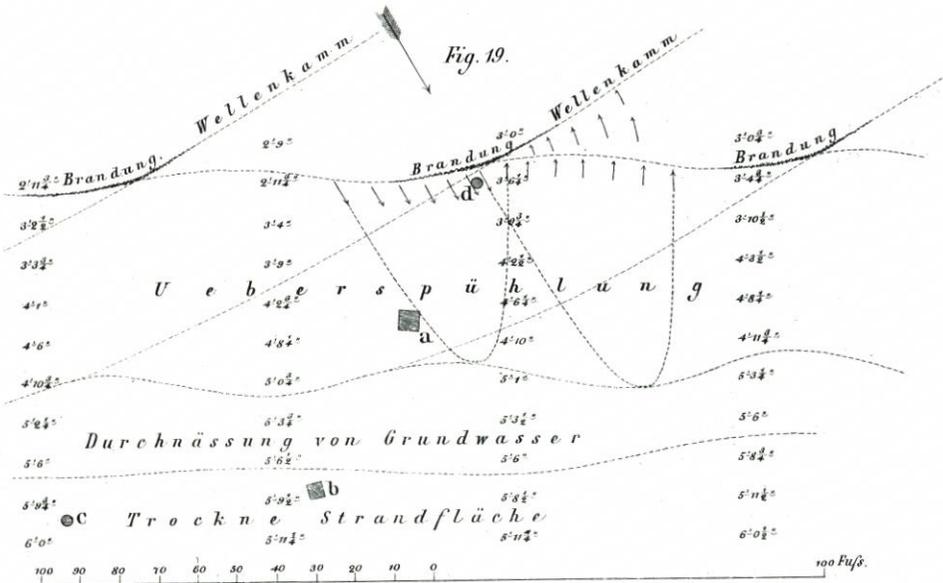
<sup>2)</sup> 707 Tieden im Jahre.

fortbewegt waren; ferner die in Fig. 16 abgebildete Sandwelle 3. Ordnung mit einer Verschiebung von 3 Zoll pro Tiede, welche die nämliche ist, auf der ein Fortrücken der Sandwellen 1. Ordnung von  $7\frac{1}{2}$  bis  $13\frac{1}{2}$  Zoll pro Stunde beobachtet ward. Für die mitgetheilten WOLTMAN'schen Messungen fehlt es dagegen an einer zu vergleichenden Beobachtung, da seine Aufmerksamkeit nicht auf die Bewegung der Sandwellen 1. Ordnung gerichtet war.

Man kann sich nunmehr ein vollständiges, anschauliches Bild von der Gesammtheit der Sandbewegung am Boden eines Strombettes machen, wenn man sich vorstellt, daß, während die feinsten Sandkörner beständig vom strömenden Wasser in kleinen Wirbeln aufgehoben und fortgeführt werden, die gröberen nach der von DUBUAT beschriebenen Weise rollend und periodisch ruhend die Abhänge der Sandwellen 1. Ordnung einnehmen; daß diese letzteren schneller als die Sandwellen 2. Ordnung deren vorderen flachen Abhang hinansteigen und in dem hinteren, meist glatten Abhange derselben verschwinden, und daß ebenso die 2. Ordnung sich über die langsamer fortrückenden Sandwellen 3. Ordnung (die Sandbänke) fortbewegt. Die Sandbänke selber unterliegen der Mehrzahl nach zu bedeutenden Störungen der Bewegung, als daß eine weitere Durchführung dieses Bildes auf Grund der Beobachtungen statthaft erscheinen könnte; es ist aber nach meiner im Vorhergehenden ausführlicher begründeten Ueberzeugung keinem Zweifel unterworfen, daß die großen Sandwellen höherer Ordnung, nämlich die ausgedehnten mit Sand überladenen Stromstrecken, die wir Barren nennen, ebenfalls langsamer seawärts fortrücken als die einzelnen Sandwellen niederer Ordnung oder Sandbänke, aus denen sie bestehen. Dieses hier in seinen Haupt-Umrissen bezeichnete Bild wird im Einzelnen modificirt durch Neben-Einwirkungen, die theils eine Folge der Niveau-Unterschiede in mehreren nebeneinanderliegenden Stromrinnen sind, theils durch Wellenbewegung des Wassers verursacht werden, theils endlich mit dem Schlickfalle und der Vegetation im Zusammenhange stehen. Dadurch ist das allgemeine, herrschende Princip für die Betrachtung des Großen und Ganzen in einen so dichten Schleier gehüllt, daß es nur auf dem mühsamen, aber belohnenden Wege, der, vom Speciellsten ausgehend, ganz allmählig zum Allgemeineren fortschreitet und den ich in dieser Untersuchung betreten habe, scheint mit Sicherheit erkannt werden zu können.

Auf die Art, wie die Wellenbewegung des Wassers den Sand auf den Abhängen des Strombettes in Bewegung setzt, ist bisher nur beiläufig hingedeutet bei Betrachtung der Körnergröße einzelner Sandproben und bei den Beobachtungen der Wirkung des Stromes, als die von den Wellen verursachten Planirungen zur Anschauung kamen; ich habe indeß noch eine Reihe von Beobachtungen unmittelbar am Seestrande angestellt, deren specieller Zweck die Erkenntniß der Wellenwirkung in allen ihren Einzelheiten war und von denen hier Einiges aufzunehmen ist. Dabei muß ich jedoch bevorworten, daß selbst die minutiöseste Beschreibung und Abbildung dieser ungemein bewegten Phänomene nicht die eigene Anschauung ersetzen können, und ich deshalb jeden Versuch, durch Wiedergebung aller einzelnen Wahrnehmungen, die in dem Beobachtungsjournal ihre Stelle gefunden haben, den Leser gleichsam auf den Standpunkt des Beobachters zu versetzen, für ein durchaus verfehltes Unternehmen halten würde. Ohne eigene Beobachtung kann eine vollkommene Vorstellung hierüber nicht erlangt werden.

Beim Anschauen von Wasserwellen, welche gegen einen flachen sandigen Strand anlaufen, kann man stets folgende, in der Richtung vom Wasser nach dem Lande nebeneinanderliegende Erscheinungen gleichzeitig wahrnehmen: Ungebrochene Wellen – Brandungen – Ueberspülung – Durchnässung des Bodens von aufsteigendem Grundwasser. Die Figur 19 stellt diese Phänomene nach wirklicher am Seestrande der Insel Neuwerk angestellten Messung dar; man sieht daraus, daß der Strand in der Gegend, wo die Beobachtung gemacht ward, einen Abhang von ungefähr 1:30 hatte, sowie daß die Wellen einen Winkel von etwa 30



Durchschnitt im dreifachen Maaßstabe des Grundrisses.

Grad mit der Strandlinie machten und eine 2 Fuß hohe Brandung erzeugten, die mit einer 50 Fuß breiten Ueberspülung verbunden war und bis auf 70 Fuß Entfernung das Grundwasser zum Aufsteigen veranlaßte. Die Ursachen dieser Erscheinungen, die, wie gesagt, bei allen Strandwellen in größerem oder geringerem Maaße sich zeigen, sind folgende: In einiger Entfernung vom Strande, wo die Wassertiefe so groß ist, daß die wellenbildenden Schwingungen der Wassertheilchen nicht erheblich durch die Nähe des Grundes gestört werden, sind die Wellen nahezu symmetrisch geformt; sobald sie aber in seichteres Wasser kommen, wird der voranschreitende Wellenabhang steiler, weil die zur Ergänzung der symmetrischen Form erforderliche Wassermasse auf dieser Seite nicht mehr dargeboten ist, und die Steilheit nimmt im Fortschreiten immer mehr zu, bis dem Kamm nach dieser Seite die Unterstützung gänzlich fehlt und derselbe überstürzt; dies ist die *Brandung*. Nachdem diese stattgefunden hat, breitet die Wassermasse, aus welcher die brandende Welle bestand, sich in einer dünnen Schicht aufwärts über den Strand aus, erreicht aber, wegen der Friction auf dem Sande, nicht die volle Höhe, welche die brandende Welle hatte; dies ist die Erscheinung, welche ich Ueberspülung genannt habe, und die sich zurückzieht, wenn eine brandende Welle im Anzuge ist, während des Passirens derselben aber ihren Höhepunkt erreicht. Oberhalb der Grenze der Spülung, bis zu der Höhe, welche mit dem Kamm der Wellen im Niveau liegt, zeigt sich der Sandboden vom Grundwasser durchnäßt, eine Erscheinung, welche während des Steigens der Fluth kräftig auftritt, während des Fallens der Ebbe aber nachläßt und zuletzt ganz verschwindet. Das Ganze bildet einen so raschen Wechsel von vorlaufenden und rücklaufenden Bewegungen der Wassertheilchen in den durch punktirte Curven und kleine Pfeile im Grundrisse angedeuteten Bahnen, von zunehmendem und abnehmendem Drucke des Grundwassers und von Stößen einer aus ziemlicher Höhe auf die Fläche des Sandes herabfallenden Wassermasse in der Brandung, daß dadurch nothwendig sehr lebhaft Bewegungen der Sandkörner, aus denen der Strand besteht, verursacht werden müssen. Um diese sicherer beobachten zu können, bediente ich mich auch hier des farbigen

Sandes, von welchem die in der Figur angegebenen Quadrate *a* und *b* vier Zoll dick angelegt, und später noch die Flächen *c* von 21 Zoll Dicke und *d* von 15 Zoll Dicke hinzugefügt wurden. Der ganze Verlauf war folgender:

Sobald bei steigendem Wasser eine Stelle des Strandes vom Drucke des Grundwassers erreicht ward, wurde der vorher harte, keine Fußspur, ja kaum eine Wagenspur aufnehmende, auch keinen Reflex des Sonnenbildes zeigende Sandboden plötzlich weich und spiegelnd; bei genauerer Betrachtung zeigten sich die Zwischenräume zwischen den Sandkörnern mit Wasser gefüllt, so daß die Reibung zwischen den Körnern beinahe ganz aufgehoben war. Trat dann bei weiterem Steigen der Fluth die erste Ueberspülung ein, so führte diese eine dünne Schicht von Sandkörnern aufwärts; dann nahm das rücklaufende Wasser die kleineren Körner dieser bewegten Schicht wieder mit sich hinab und ein feiner Saum größerer Sandkörner, welche die Ueberspülung zurückgelassen hatte, bezeichnete die äußerste von dieser erreichte Grenze. Auf den mit farbigem Sande ausgefüllten Stellen zeigte es sich, daß sofort bei der ersten Ueberspülung die obere Lage des farbigen Sandes aufwärts fortgeführt und durch eine Mischung von grauem und farbigem Sande ersetzt ward. Die Dicke der von einer Ueberspülung abgelagerten Schicht fand ich, bei einer Wellenhöhe von 2 Fuß, nach wiederholten Beobachtungen =  $\frac{1}{24}$  Zoll; 84 aufeinanderfolgende Ueberspülungen lieferten während eines Zeitraumes von 6 Minuten aber nur eine Ablagerung von  $\frac{1}{8}$  Zoll Dicke, woraus folgt, daß jede folgende Ueberspülung zwar den größten Theil der vorhergegangenen Ablagerung wieder mit in Bewegung setzt, das Ergebnis aller aber eine Erhöhung der überspülten Fläche ist. Die Köpfe der zur Bezeichnung der Quadrate benutzten Bolzen waren schon nach der zweiten Ueberspülung von grauem Sande bedeckt, nach einer Viertelstunde die Experimentalflächen nicht mehr von ihrer Umgebung zu unterscheiden. Daß die Wellengröße Einfluß auf die Dicke der deplacirten Schicht hat, läßt sich voraussetzen, ward aber auch durch Beobachtung der Thatsache erwiesen, daß eine besonders starke Ueberspülung plötzlich farbigen Sand aus einem bereits ganz von grauem Sande bedeckten Quadrate bis zu einer Entfernung von 8 Fuß den Strandabhang hinaufführte, wo derselbe zum Theil bis zur nächsten Ueberspülung liegen blieb.

Sobald nun mit steigender Fluth die Brandung selbst die beobachtete Stelle des Strandes erreichte, trat ein völlig veränderter Zustand der Oberfläche ein. Die erste daselbst brandende Welle setzte nicht nur die ganze Dicke der grauen Deckschicht, sondern noch eine beträchtliche Menge des darunter befindlichen farbigen Sandes in Bewegung; zwischen den Brandungen konnte man die Bolzenköpfe, die beim Beginn der Beobachtung mit der Oberfläche gleich hoch gewesen und dann durch Ueberspülung noch eingesandet worden waren, einen halben Zoll hoch vorstehen sehen.

Von diesem Moment an blieb die Experimentalfläche dem Blicke entzogen, bis bei fallender Ebbe dieselbe wieder wasserfrei ward; sobald dies der Fall war, fanden dieselben Erscheinungen auf der Stelle statt, wie vorhin, nur in umgekehrter Reihenfolge, also zuerst Brandung, dann Ueberspülung, Durchnässung von Grundwasser und zuletzt Trockenheit des Sandes. Während der Ebbe konnte das Vorstehen der Bolzenköpfe im Bereiche der Brandung direct gemessen werden, es betrug  $\frac{1}{8}$  bis  $\frac{3}{4}$  Zoll; der farbige Sand war nicht mehr mit grauem Sande überdeckt, sondern lag frei an der Oberfläche, dann aber ward in der auf die zurückweichende Brandung folgenden Periode der Ueberspülung die frühere Höhe mittelst Ablagerung einer neuen Deckschicht wiederhergestellt und Alles wieder geebnet. Die allmähliche Zurückziehung des Grundwassers aus den Zwischenräumen des Sandes machte den Schluß des Experimentes, das dann in ganz ähnlicher Weise während der nächsten Fluthperiode sich wiederholte. Zwischen den Fluthperioden konnte die trockengewordene Strandfläche genauer untersucht werden; es zeigte sich dabei, daß eine aus grauem Sande mit

Fig. 20 a.

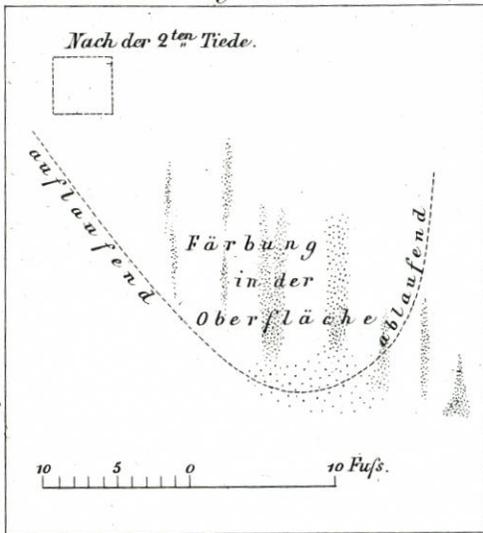
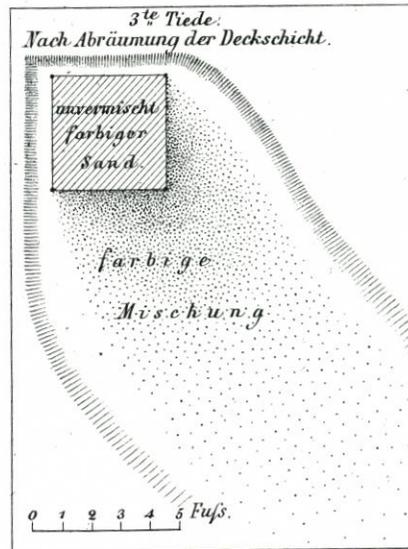


Fig. 20 b.



untermengten farbigen Körnern bestehende Schicht von 1 bis 3 Zoll Dicke den unter denselben unvermischt befindlichen Rest des farbigen Sandes bedeckte, und daß, von der Experimentalfläche ausgehend, in schräger Richtung aufwärts farbige Körner bis zu 40 Fuß Entfernung zerstreut waren. Die Figur 20 stellt die Ergebnisse solcher Untersuchungen dar. Fig. 20 a zeigt die Zerstreuung farbiger Körner auf der Oberfläche, nach Ablauf der zweiten Fluth; Fig. 20 b die nächste Umgebung des Quadrates a nach Ablauf der dritten Fluth- und nach Abräumung der Deckschicht. Es ergab sich, daß bei diesen Experimenten nur eine sehr dünne Schicht des Sandes in Bewegung gewesen war, deren Dicke von  $\frac{1}{2}$  bis  $\frac{1}{4}$  Zoll variierte. Nach Verlauf von 15 Fluthzeiten ward an einer Stelle der Sand bis zur Tiefe von 4 Zoll deplacirt befunden, während an einer andern Stelle die Bewegung nicht tiefer als  $\frac{1}{4}$  Zoll unter die Oberfläche gereicht hatte. Ohne Zweifel hat hierauf die Größe der Wellen Einfluß, und wenn in längeren Zeiträumen Stürme mit heftigen Brandungen auf den Strand wirken, oder während des Winters Ablagerungen von Eis zu unregelmäßigen Strömungen und Wirbeln Anlaß geben, erstrecken sich die Umwälzungen der Sandmasse noch weit tiefer. Als ich nach einem Jahre dieselbe Stelle des Strand wieder untersuchte, war auch bei c und d, wo der farbige Sand bis zu 21 Zoll Tiefe eingebracht gewesen war, keine Spur desselben mehr zu entdecken, woraus folgt, daß die Sandmasse mindestens bis zu dieser Tiefe in Bewegung gewesen war.

Die Art und Weise der Bearbeitung eines flachen, sandigen Strand durch die Wellen ist also folgende:

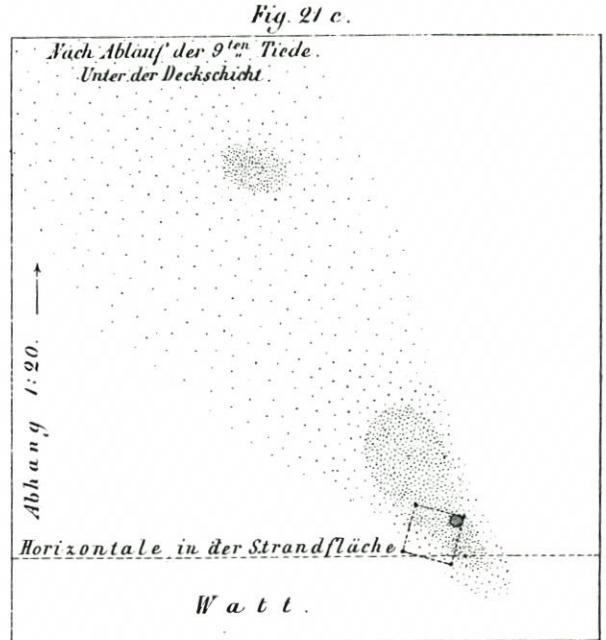
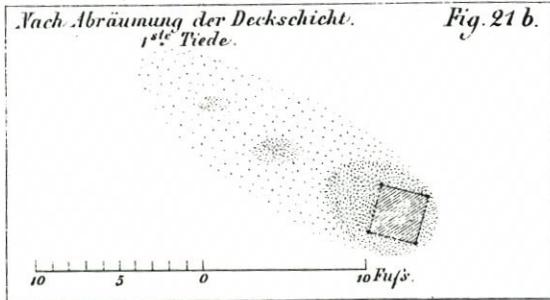
a) Während der Fluth. Der Stoß des in der Brandung von der Wellenhöhe auf die Strandfläche herabfallenden Wassers setzt eine Sandschicht, deren Dicke von der Größe der Wellen abhängig ist, in Bewegung; Wasser und Sand, mit einander vermengt, breiten sich oberhalb der Brandung in einer dünnen Schicht aus; das rücklaufende Wasser nimmt die feineren Sandkörner mit sich abwärts, während die gröberen liegen bleiben, bis die steigende Brandung sie erreicht und weiter aufwärts führt; ein zurückbleibender Aufwurf solcher gröberer Körner bezeichnet den höchsten von dieser Fluth erreichten Saum.

b) Während der Ebbe. Die unmittelbaren Wirkungen der Brandung und Ueberspülung sind ganz die nämlichen wie während der Fluth; da sie aber in umgekehrter Reihenfolge jede einzelne Stelle treffen, so ist das Endresultat, daß der Strand ungefähr in derselben Höhe, welche er vor der Fluthbrandung hatte, durch die Ebbespülung wiederhergestellt wird. Nur der erwähnte Wellenaufwurf am obersten Saume der vorhergegangenen Fluth macht davon eine Ausnahme; dieser bleibt in Form einer Erhöhung liegen, bis vielleicht eine spätere Fluth ihn noch höher hinaufführt, oder derselbe nach stattgefundener Austrocknung ein Spiel der Winde wird, die das Material zur Dünenbildung lediglich von solchen Wellenaufwürfen hernehmen.

Da – mit Ausnahme der verhältnismäßig kurzen Zeiträume völliger Meeresstille – die Strandflächen beständig der Wirkung größerer oder kleinerer Wellen ausgesetzt sind, so müßten alle sandigen Küsten fortwährend zunehmen, wenn nicht die oben beschriebenen, im eigentlichsten Sinne des Wortes *Alluvion* zu nennenden Wirkungen der Wellen durch andere im entgegengesetzten Sinne wirksame Kräfte zuweilen aufgehoben oder selbst überwogen würden. Solche Fälle finden an den Orten statt, wo entweder die Stromtiefe sich dem Strande nähert und denselben direct angreift, oder wo die herrschende Windrichtung vom Lande absteht und den von den Wellen aufgeworfenen Sand, statt daraus Dünen zu bilden, dem Meere wieder zuführt, oder endlich, wo zwischen dem Strandabhange und der eigentlichen Küste sich ausgedehnte Wattflächen befinden, über welche die Fluth sich ausbreitet, und von denen das Fluthwasser während der Ebbe wieder über den Strandabhang dem Meere zufließt. Im ersteren Falle findet am Fuße des Strandabhanges Grundabbruch statt, und das Zurückweichen der Strandlinie muß durch künstliche Defensionswerke aufgehalten werden, wengleich alle übrigen Umstände der Alluvion durch Wellenwirkung so wie der Dünenbildung günstig sein mögen;<sup>1)</sup> im zweiten und dritten Falle kann sich ein Zustand des Gleichgewichts zwischen Wirkung und Gegenwirkung ausbilden. Die Wirkungen eines Stromangriffs, so wie diejenigen des Windes, bedurften keiner specielleren Beobachtungen zur näheren Aufklärung, dagegen schien es wünschenswerth, noch einige Experimente auf einem See-strande auszuführen, der einem bedeutenden Abflusse von Wattwasser<sup>2)</sup> zur Ebbezeit ausgesetzt ist; ein solcher Strand bildet den Saum einer meilenweiten beinahe horizontalen Wattfläche zwischen dem Festlande bei Cuxhaven und der Insel Neuwerk; das Watt wird bei ordinär Hochwasser 4 bis 8 Fuß hoch mit Wasser bedeckt und läuft bei Niedrigwasser trocken; in der Nähe des Strandes bildet die Oberfläche einen Abhang von 1:100, der am Rande mit einem Böschungsverhältniß von 1:22 bis 1:17 abfällt. Auf diesem steileren Abhange wurden zwei Experimentalflächen von farbigem Sande angelegt und während mehrerer Tieden beobachtet. Die unmittelbaren Wirkungen der Wellen waren genau dieselben wie bei den früheren Beobachtungen, nämlich Aufrührung der Oberfläche des Strandes im Bereiche der Brandung, Ausbreitung und theilweise Ablagerung der aufgerührten Sandkörner im Bereiche der Ueberspülung und Bildung einer, aus grauem und farbigem Sande gemischten Deckschicht über dem unbewegt gebliebenen unteren Theile des eingebrachten farbigem Sandes. Zwei Unterschiede von den früheren Erscheinungen fanden hier indeß statt, es fehlte nämlich nach Ablauf der Ebbe die Erhöhung durch Wellenaufwurf, und ferner war die Richtung der in der Strandoberfläche wahrnehmbaren Bewegung des Sandes der früher beobachteten gerade entgegengesetzt. Während bei der Insel Neuwerk, wo kein erheblicher Abfluß von Wattwasser die Experimentalflächen berührte, die Action der Wellen einen Ueberschuß der Sandbewe-

<sup>1)</sup> Solche Oertlichkeiten bietet die Dünenküste Hollands in bedeutender Ausdehnung dar.

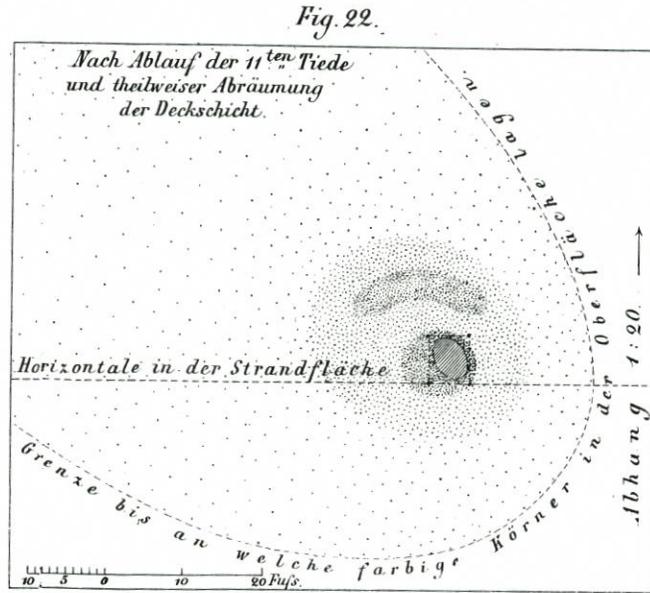
<sup>2)</sup> Wattwasser wird dasjenige Wasser genannt, welches während der Fluth über Wattgründe sich ausbreitet und während der Ebbe sich nach der Seeseite zurückzieht.



gung in schräger Richtung strand a u f w ä r t s bewirkt hatte, war im vorliegenden Falle der farbige Sand entschieden nach der entgegengesetzten Richtung strand a b w ä r t s geführt.

Die Figuren 21 und 22 veranschaulichen die gemachten Beobachtungen. Ein Quadrat von 3 Fuß Seite war 3 Zoll dick von farbigem Sande angelegt; nachdem bei ruhigem Wetter und einer nur 6 Zoll betragenden Wellenhöhe die erste Fluth darüber gegangen war und die Ebbe sich weit genug gesenkt hatte, zeigte sich die Fläche mit einer  $\frac{3}{8}$  Zoll dicken, aus grauem und farbigem Sande gemischten Schicht überzogen. Die Färbung erstreckte sich, wie Fig. 21 a darstellt, bis zu 15 Fuß Entfernung schräge abwärts, und hatte die Form einer länglichen Ellipse. Nach theilweiser Abräumung der Deckschicht fand sich in dem Quadrate der untere Theil des farbigen Sandes unvermischt in der ursprünglichen Lage, die nächste Umgebung bildete nach der in Fig. 21 b angegebenen Curve eine Mischung von farbigem und grauem Sande, worin der farbige Sand vorherrschte, und etwas weiter abwärts befanden sich in der Richtung der großen Axe zwei Flecken von gleicher, vorherrschend farbiger Mischung; dies Alles umgab die schon auf der Oberfläche erkannte elliptische Form einer Mischung, in welcher grauer Sand vorherrschte, aber der farbige deutlich erkennbar war. Der Uebergang in den rein grauen Wattsand war allmähig. Bald nach dieser Beobachtung trat unruhiges Wetter ein, mit 2 Fuß hoher Brandung; zugleich ward die Fluthhöhe geringer, so daß der vom Watt abfallende Strom vermindert war, während die Wellenwirkung verstärkt war. Nach Ablauf der 9. Tiede wurde das Quadrat und dessen Umgebung von Neuem untersucht, wobei sich die in Fig. 21 c dargestellten Erscheinungen fanden. Der farbige Sand war aus dem Quadrate bis auf einen kleinen, noch in der ursprünglichen Lage befindlichen Fleck weggespült und mit dem grauen Sande in der Umgebung vermischt; in den dichter punktirten Parteien herrschte der farbige Sand in der Mischung vor, in der weitläufiger punktirten Umgebung dagegen der graue, wobei die farbigen Körner bis an die angedeutete Grenze erkennbar waren.

Die etwa 100 Fuß von der vorigen entfernte zweite Experimentalfläche war 6 Fuß lang, 5 Fuß breit, 1 Zoll dick und blieb während 11 Tieden unberührt. Bei der dann folgenden



Untersuchung konnte man in der Oberfläche des Strandes die Beimischung farbiger Körner bis zu 60 Fuß Entfernung schräge abwärts verfolgen, seitwärts und aufwärts bis an die in Fig. 22 angegebene äußerste Grenze. Nach Abräumung der gemischten Deckschicht fand sich,  $\frac{1}{2}$  Zoll unter der Oberfläche, eine Abstufung in der Intensität der Färbung des Sandes, die durch die Dichtigkeit der Punktirung in der Figur veranschaulicht ist und worin analoge Formen mit der vorherigen Beobachtung unverkennbar sind. In der Experimentalfläche selbst befand sich noch eine unvermischte,  $\frac{1}{8}$  Zoll dicke Schicht farbigen Sandes in der ursprünglichen Lage in abgerundeter Form mit scharfer Begrenzung, wogegen die Grenzen der gemischten Färbungen nach außen allmähliche Uebergänge zeigten.

Aus diesen Beobachtungen geht hervor, daß die Wirkungen der Wellen und der Strömung des abfließenden Wattwassers in der That einander in der vorhinbeschriebenen Weise entgegengesetzt sind, und daß bei schwacher Wellenbewegung (erste Beobachtungstiede) jene Strömung ungeachtet ihrer äußerst geringen, direct kaum zu messenden Geschwindigkeit im Stande ist, den durch die Wellen aufwärts geführten Sand in derselben Tiede ganz in die entgegengesetzte Richtung strandabwärts zu ziehen; daß dagegen bei stärkerer Wellenbewegung die Strömung nicht jede Spur der Bewegung aufwärts verwischen konnte, obgleich eine Reihe von Tieden über die Fläche gegangen waren.

Die beobachteten, detachirten Flecke einer intensiveren Färbung scheinen mir mit zu den Wirkungen der Strömung zu gehören, da bei der Insel Neuwerk, wo nur Wellenwirkung in Betracht stand, dergleichen Erscheinungen nicht bemerkt sind; auch deutet darauf der Umstand, daß die Flecken in der Richtung der Strombewegung lagen, und sie können möglicherweise ähnlichen alternirenden Zuständen der Bewegung und Ruhe ihre Entstehung verdanken, wie sie DUBUAT bei den Sandwellen erster Ordnung beobachtet hat.

### 3. Erörterung des herrschenden Principis

Bisher ist die Frage unberührt geblieben, auf welche Grundursache wir zurückgehen können und müssen, um die merkwürdige Thatsache zu erklären, daß ein geebener Sandboden, wenn derselbe längere Zeit hindurch der Einwirkung des strömenden Wassers ausgesetzt wird, nicht eben bleibt, sondern alsbald in Wellenformen gefurcht wird, bei denen ein systematischer Zusammenhang, ein herrschendes Princip oder, wenn die Benennung zusagender ist, ein Naturgesetz, vom Kleinsten bis zum Größten unverkennbar ausgeprägt ist; eine Thatsache, die ebenso allgemein stattfindet und ebenso wunderbar erscheint, als die von HAGEN zuerst in ihrer ganzen Bedeutung hervorgehobenen inneren Bewegungen des strömenden Wassers, und die mit diesen in so engem Zusammenhange steht, daß in sandigen Strombetten Beide gar nicht getrennt von einander gedacht werden können. Haben wir, im Hinblick auf diesen Zusammenhang, die bald größeren, bald kleineren, bald horizontalen, bald verticalen Wasserwirbel als Ursache der Sandwellen zu betrachten? oder sind die letzteren die Ursache der Wirbel? oder sind vielleicht beide Erscheinungen hervorgerufen durch eine bisher noch nicht aus diesem Gesichtspunkte aufgefaßte Grundursache, welche den ganzen Strom, d. h. das Strombette und das darin fließende Wasser zusammengenommen, beherrscht? Die Erörterung dieser Fragen führt zurück zu einem Fundamentalsatze der Lehre von der Bewegung flüssiger Körper, nämlich zu dem allgemein bekannten Satze von der gleichförmigen Bewegung des Wassers. Derselbe besagt, daß die Geschwindigkeit des fließenden Wassers in offenen Gerinnen eine von der Länge des durchlaufenden Weges unabhängige Function des Abhanges und des Stromprofils sei, dergestalt, daß hier die beim Herabrollen oder Gleiten fester Körper auf geneigten Ebenen stattfindende Beschleunigung durch die Bewegungshindernisse gerade aufgehoben werde. Die in der Wirklichkeit eintretenden Modificationen und Einschränkungen dieses Satzes bedürfen hier keiner erschöpfenden Behandlung, da ich als bekannt voraussetzen darf, daß eine solche zu dem Resultate führt, daß die gleichförmige Bewegung im strengsten Sinne des Wortes nur in gleichgroßen und gleichgeformten Stromprofilen mit constanter Wassertiefe und constantem Abhang oder Längengefälle des Stromes darzustellen ist. Diese Bedingung findet man in natürlichen Strömen niemals in aller Strenge erfüllt; wenn aber in einer gegebenen Stromstrecke die Abweichungen von der erlangten Gleichheit der Profile nur klein sind und das Gefälle constant bleibt, so ist auch die Geschwindigkeit nahezu gleichförmig. In mehreren Stromstrecken mit verschiedenen Gefällen und von gleicher Tiefe verhalten sich dann die Geschwindigkeiten wie die Quadratwurzeln aus den Gefällen. Es ist demnach Thatsache, daß die Beschleunigung, welche das Wasser wie jeder andere schwere Körper beim freien Falle erfährt, beim Herabfließen in offenen Gerinnen oder natürlichen Strömen durch Bewegungshindernisse vollständig aufgehoben werden kann. Diese Hindernisse pflegen als Reibung des Wassers an den Wänden und dem Boden des Strombettes bezeichnet zu werden, wenn nicht die inneren Bewegungen des Wassers als Ursache der Zerstörung der lebendigen Kraft dabei in Betracht gezogen werden, wie solches von HAGEN geschehen ist.

Neben der gleichförmigen Bewegung und ihren Ursachen haben wir noch einen zweiten Umstand in's Auge zu fassen, der in der Lehre von der Bewegung des Wassers von wesentlicher Bedeutung ist, nämlich die Weise, wie wir uns in offenen Gerinnen die Uebertragung des Drucks von einem Querschnitte des Stroms auf einen folgenden vorzustellen haben. Auch in dieser Beziehung bedarf es einer erschöpfenden Erörterung nicht, indem als bekannt vorausgesetzt werden darf, daß die Annahme eines constanten Druckes von einem Querschnitte des Stromes zum andern nicht mit der Annahme gleichförmiger Geschwindigkeit coincidirt, sondern mit Beschleunigung oder Verzögerung verbunden sein

kann, sobald der Druck größer oder kleiner ist als die an derselben Stelle vorhandenen Bewegungshindernisse oder Widerstände. Wenn also ein Strombette so beschaffen wäre, daß die Größe der Widerstände sich von selbst adjustirte, sobald die Bewegung des darüber strömenden Wassers aus irgend einer andern Ursache beschleunigt oder verzögert wird, so würde eben darin ein wirksames Mittel zur Erzeugung gleichförmiger Bewegung gegeben sein. Die in sandigen Betten fließenden Ströme sind nun in der That in Folge der natürlichen Beschaffenheit des Materials, welches wir unter der Benennung Sand verstehen,<sup>1)</sup> mit einer solchen sich selbst regulirenden Hemmung der Bewegung versehen, und die Art ihrer Wirksamkeit läßt sich aus den im Vorhergehenden dargelegten Beobachtungen deutlich erkennen.

Diese Beobachtungen beweisen, daß eine Sandschicht, deren Dicke mehrere Zolle betragen kann, am Boden des Stromes zugleich mit dem darüber hinfließenden Wasser in Bewegung ist; eine Thatsache, mit welcher die in alle Theorieen der Ströme aufgenommene Vorstellung unvereinbar ist, daß eine scharfe Grenze zwischen dem Strombette und dem strömenden Wasser vorhanden sei, so daß man sich an derselben einerseits Ruhe und andererseits Bewegung, mithin in ihr Reibung zu denken habe. Nicht minder gewiß ist es, daß die Zwischenräume zwischen den Sandkörnern (ungefähr  $\frac{1}{3}$  des ganzen Raumes) durch den Druck des darüber befindlichen Wassers mit Wasser angefüllt sind, und daß die in der Sandmasse befindlichen Wassertheilchen davon afficirt werden, wenn die darüberstehende Wassersäule einen bald stärkeren, bald schwächeren Druck darauf ausübt, wie dies bei der Undulation der Wasseroberfläche in der Natur unfehlbar der Fall sein muß. Ferner hat die durch ein bekanntes Experiment leicht nachzuweisende Adhäsion der Wassertheilchen aneinander ohne Zweifel die Wirkung, daß die strömende Bewegung des Wassers über dem Sande auch die im Sande befindlichen Wassertheilchen in derselben Richtung mit fortziehen, und letztere üben in den Zwischenräumen der Sandkörner einen Druck auf diese aus, der, wenn er stark genug ist, die Körner mit in die Bewegung hineinzieht, jedenfalls die Reibung derselben aneinander vermindert und die Wirkung des Stoßes des darüber hinfließenden Wassers befördert. So geht gleichsam der Strom und das Strombette in einander über, dergestalt, daß man vom Wasserspiegel abwärts sich vier Regionen<sup>2)</sup> zu denken hat: die oberste des fließenden Wassers, die zweite der im Wasser schwebenden und mit diesem fließenden feinsten Sandkörnern, die dritte des im Sande sich durchdrängenden Wassers und der von diesem gerollten gröbereren Sandkörner, und die vierte des ruhenden Sandes. Die Höhe der beiden mittleren Regionen mag selten mehr als einige Zolle betragen, aber es fallen in sie und namentlich in die dritte Region alle jene merkwürdigen Erscheinungen, zu denen Aufklärung ich in vorstehenden Blättern den Weg zu bahnen versucht habe und in denen eben die Einwirkung der Strömung auf das Strombette sich ausspricht.

Gegenüber der oben nachgewiesenen Thatsache, daß die Beschleunigung bei der Bewegung des strömenden Wassers durch Bewegungshindernisse gerade aufgehoben werden kann, darf nicht übersehen werden, daß die Ursache, welche beim Wegfall der Bewegungshindernisse Beschleunigung bewirken würde, nämlich die Schwere des Wassers, bleibt, d. h. daß das Streben nach Beschleunigung eine von der Natur des strömenden Wassers unzertrennliche Eigenschaft desselben ist. Man müßte sich also ein Strombette denken, dessen Theilchen von solcher Feinheit wären, daß die vom Wasser ununterbrochen und gleichmäßig

<sup>1)</sup> Ein Gemenge verschiedener Mineralien in theils eckigen, theils abgerundeten Körnern, die im trocknen Zustande nicht durch Cohäsion oder Klebrigkeit zusammengehalten werden.

<sup>2)</sup> Der gebräuchlichere Ausdruck „Schichten“ würde die Vorstellung scharfer Grenzen begünstigen, welche der Natur der Strombewegung nicht entspricht.

erstrebte Beschleunigung ebenso ununterbrochen und gleichmäßig im Unendlichkleinen aufgehoben würde, und solchem Strombette zugleich eine völlig regelmäßige Gestalt geben; nur unter diesen Voraussetzungen könnte darin eine völlig gleichförmige Bewegung stattfinden. Dann aber würde auch die Oberfläche des Strombettes völlig eben bleiben, keine Wellenformen würden am Boden desselben entstehen, obgleich das Material, aus dem es gebildet wäre, in gewissem Maaße an der Bewegung des Wassers Theil nehmen könnte. Unsere natürlichen Strombetten sind jedoch, wie alle vorhergehenden Untersuchungen darthun, nicht aus einem Material von unendlicher Feinheit gebildet, auch ist ihre Gestaltung weit davon entfernt, regelmäßig zu sein, und hieraus folgt evident, daß das in natürlichen Strombetten fließende Wasser vermöge seiner Schwere wirklich beschleunigt werden muß. Ist dieses aber der Fall, so kann auch der Angriff auf das Strombette kein gleichmäßiger sein, sondern das am Boden befindliche Material muß ebenfalls in zunehmendem Maaße in Bewegung gesetzt werden, womit eine Anhäufung der bewegten Masse desselben unzertrennlich verbunden ist. Damit aber wachsen zugleich die Bewegungshindernisse, der Strom erfährt durch sie eine der Beschleunigung entgegenwirkende Verzögerung, die so lange zunehmen muß, bis sie die erstere aufgehoben hat. Dieser Zustand des Gleichgewichts kann jedoch eben wegen der groben Beschaffenheit des Sandes niemals ganz vollkommen und stets nur momentan sein, eine Periode neuer Beschleunigung muß demselben alsbald wieder folgen, wodurch abermals der Angriff auf das Bette verstärkt, die Masse des bewegten Materials, d. h. die Größe der Bewegungshindernisse vermehrt und somit von Neuem die Stromgeschwindigkeit ermäßigt wird. So wiederholt sich unaufhörlich ein periodischer Wechsel von Beschleunigung und Verzögerung in der Bewegung des strömenden Wassers, und dieser prägt sich in der wellenähnlichen Form des Grundbettes aus. Dem Beobachter wird die Strombewegung um so gleichförmiger erscheinen, je kürzer die Perioden jenes Wechsels ausfallen, letzteres aber ist durch die Beschaffenheit des Materials, insbesondere durch den Grad seiner Feinheit bei mangelnder Cohäsion, und außerdem durch die mehr oder minder regelmäßige Gestalt des Stromprofils bedingt.

So wie aus der im Vorstehenden entwickelten Auffassung hervorgeht, daß ein Bild des periodisch stärker und schwächer werdenden Stromangriffes in den Formen des Bodens ausgeprägt sein muß, und als solches eben die *Sandwellen* von den kleinsten bis zu den größten Dimensionen sich darstellen, so folgt daraus auch, daß in dem strömenden Wasser, dessen Theilchen sehr fein und verschiebbar sind, Spuren erkennbar sein müssen von jenem beständigen Kampfe zwischen dem nie ganz erfolglosen Streben nach Beschleunigung und den periodisch wachsenden Bewegungshindernissen, durch welche dieses neutralisirt wird. Als solche Spuren oder Wirkungen betrachte ich die *inneren Bewegungen des Wassers*, die um so größer und gewaltsamer sind, je weniger der Wechsel zwischen Beschleunigung und Verzögerung den Charakter sanfter, allmäliger Uebergänge hat und in der Art schroffer stoßweiser Hemmungen sich äußert. Das Bild eines verhältnismäßig kleinen Stromes mit starkem Gefälle, der statt der Sandkörner grobe Geschiebe mit sich fortwälzt, kann dies veranschaulichen. So stellen beide Erscheinungen, die Sandwellen und die inneren Bewegungen des Wassers, die so viel Wunderbares zu enthalten schienen, sich als nothwendige Wirkungen einer allgemeinen Eigenschaft der Körper, nämlich der Schwere dar, die bei der Bewegung des Wassers in einem unregelmäßig geformten, aus beweglichem, im Vergleich mit den Wassertheilchen grobem Material gebildeten Bette sich nur in dieser Weise äußern kann.

Ein Rückblick aus dem hiermit gewonnenen Standpunkte auf das früher Vorgetragene dürfte genügen, um in der unendlichen Mannigfaltigkeit der Erscheinungen das herrschende Princip überall durchleuchten zu sehen. Indeß ist das Feld der Beobachtung in dieser

Beziehung noch keinesweges in allen Richtungen durchforscht; namentlich möchte das Gebiet der Küstenströme mit den Nehrungen und anderen verwandten Erscheinungen noch zu manchen neuen Wahrnehmungen Veranlassung darbieten, wozu mir die Gelegenheit gefehlt hat. Dagegen habe ich eine Reihe von Untersuchungen über die Bewegung des Wassers im Sande ausgeführt, durch welche die mit der *Capillar-Attraction*, der *Filtration* und dem *Aufsteigen des Grundwassers durch Druck von unten* zusammenhängenden Erscheinungen aufgeklärt werden. Die Resultate dieser Arbeiten hoffe ich später der Oeffentlichkeit zu übergeben.

*Ergänzende Anmerkungen zu HÜBBES Aufsatz „Von der Beschaffenheit und dem Verhalten des Sandes“*

(von Prof. Dr.-Ing. ALFRED FÜHRBÖTER, Braunschweig)

Im ersten Teil der vorstehenden Arbeit werden Verfahren zur Bestimmung der Kornverteilungskurven, der Lagerungsdichte, des Porenraumes usw. mitgeteilt, die für die damalige Zeit neu waren und deshalb vom Verfasser in aller Ausführlichkeit beschrieben werden. Heute sind dies Routineuntersuchungen, deren Ausführung in entsprechenden Normen festgelegt sind; dieser Teil der Arbeit hat vor allem historischen Wert.

Anders aber der zweite Teil der Arbeit, der sich vor allem mit den morphologischen Formen befaßt, die heute als Transportkörper bezeichnet werden. HÜBBE standen bei weitem nicht die Hilfsmittel zur Verfügung, die heute zur Erfassung dieser Formen unentbehrlich sind. Für Untersuchungen an der Stromsohle stand ihm nur das einfache Handlot (und die Taucherglocke) zur Verfügung. Die kennzeichnenden Formen der Transportkörper als Unterwasserdünen, wie sie heute mit dem Echographen erfaßt werden, konnten von ihm gar nicht bemerkt werden (vgl. HENSEN: „Über den Wert der Kenntnis von der wahren Gestalt einer Flußsohle.“ Die Deutsche Wasserwirtschaft 1948/49). Und dennoch gelang es ihm, allein durch scharfe und geduldige Beobachtung eine Reihe von Erkenntnissen über diese Formen zu gewinnen, mit denen er seiner Zeit (1861!) weit voraus war. Seine Einteilung in die 4 Klassen (1. Klasse = Kleinformen = Rippel (engl. ripples), 2. Klasse = Großformen, die von Kleinformen überlagert sind = Dünen (engl. dunes), 3. und 4. Klasse = Großformen, die sich wieder aus Dünen zusammensetzen [Sandbänke und Platen, engl. tidal ridges]) ist grundsätzlich auch heute noch gültig. Seine Beobachtung, daß sich die kleinen Formen schneller als die größeren bewegen, ist die Grundlage vieler Theorien über die Entstehung dieser morphologischen Erscheinungen.

Von größter Bedeutung sind aber seine Versuche über den Bewegungsmechanismus dieser Formen, die er mit farbigem Sand durchführte. Es dürfte sich um die erste Anwendung des TRACER-Verfahrens in der Erforschung der Sedimentbewegung handeln. Fig. 18 der Arbeit zeigt in geradezu klassischer Darstellung die kennzeichnende Bewegungsform eines Transportkörpers durch Erosion auf dem Luvhang mit anschließender Sedimentation vor dem Leehang, eine spezielle Bewegungsweise, die der Bewegung von Wasserwellen völlig entgegengesetzt ist und deren mathematische Beschreibung erst mehr als ein halbes Jahrhundert später von EXNER durchgeführt wurde.

HÜBBE zeigt dabei in seinen Ausführungen stets deutlich auf, welche Kenntnisse er anderen Forschern verdankt; insbesondere DUBUAT und HAGEN werden wiederholt von ihm zitiert mit der deutlichen Freude, daß die eigenen Ergebnisse mit den Erkenntnissen dieser Autoritäten übereinstimmen.

Bewundernswert ist, daß HÜBBE seine Ergebnisse aus einem der schwierigsten Gebiete bezieht, die es für die Sandbewegung gibt, nämlich aus dem Tidegebiet eines Flusses, der

damals von einer Flußregelung noch weit entfernt war. Auch hat HÜBBE die Wirkungen der Windwellen auf die Sandbewegungen in seine Betrachtungen einbezogen, und es fehlt auch nicht ein Hinweis auf die biologischen Einflüsse, die z. B. durch die Begrünung und die damit verbundene Stabilitätserhöhung gegen Erosionen die Bildung von lagestabilen Inseln aus wandernden Platen bewirken.

Auf weiten Strecken liest sich die Arbeit von HÜBBE weniger wie ein technischer Bericht, sondern eher wie die Mitteilungen eines Naturforschers in der klassischen Tradition etwa der Reisebeschreibungen eines ALEXANDER VON HUMBOLDT, die bei aller Detailtreue nie den großen Überblick verliert.

Er betrieb das, was heute „Interdisziplinäre Forschung“ genannt wird, ohne diesen Begriff zu kennen; die Gesamtschau aller Naturerscheinungen war ihm eine unschuldige Selbstverständlichkeit. Wir können auch heute noch von ihm lernen.