

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Rubbert, F. K.

Die Vertiefung der Tideflüsse und ihre Problematik

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103158>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Rubbert, F. K. (1958): Die Vertiefung der Tideflüsse und ihre Problematik. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 11. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 3-12.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Die Vertiefung der Tideflüsse als hydraulisches Problem

Bericht über die Berechnungsmethoden und ihre Problematik

I. Das instationäre Widerstandsproblem

von Dipl.-Math.F.K. Rubbert

BAW-Dienststelle zur Vertiefung der Seewasserstrassen, Hamburg

Der seit hundert Jahren ständig zunehmende Tiefgang der Schiffe machte immer wieder den Ausbau der Seewasserstrassen erforderlich. Die entsprechende Vertiefung eines Tideflusses stellt den Wasserbauer vor die Aufgabe, den Einfluss auf Tidehub und Durchflußgeschwindigkeit im voraus zu berechnen. Das ist ein ausserordentlich schwieriges Problem, und zwar in dreierlei Hinsicht:

1. Die Berechnung einer Flusstide verlangt die Integration eines nichtlinearen Systems zweier partieller Differentialgleichungen.
2. Durch die stetigen und unstetigen Änderungen des Flussbetts längs der Berechnungsstrecke können die charakteristischen Größen nur als Mittelwerte von Teilintervallen erfasst werden.
3. Der Strömungswiderstand des Wassers bei der Tidebewegung ist selbst ein hydraulisches Problem.

Die beiden Bewegungsgleichungen einer instationären Wasserbewegung wurden zuerst 1871 von SAINT-VENANT [1] in vollen Allgemeinheit und der Erkenntnis ihrer Zusammengehörigkeit aufgestellt. Die eine ist die dynamische Gleichung

$$\frac{du}{dt} = -g \frac{\partial z}{\partial s} - \alpha \frac{u|u|}{R} \quad , \quad (1)$$

die andere die "Kontinuitätsgleichung" benannte kinematische Beziehung

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (2)$$

Hier bezeichnet

- s die Ortskoordinate,
- t die Zeitkoordinate,
- z die Höhe des Wasserstandes,
- u die Durchflussgeschwindigkeit (mittlere Geschwindigkeit),
- A die Querschnittsfläche eines Profils,
- $Q = Au$ die pro Zeiteinheit A durchfliessende Wassermenge,
- R den Hydraulischen Radius,
- g die Erdbeschleunigung,
- χ den (dimensionslosen) Widerstandsbeiwert.

In dieser Schreibweise nehmen die Bewegungsgleichungen ihre einfachste Form an; für die praktische Rechnung sind sie entsprechend den gewählten Variabeln umzuformen. Ferner ist dann

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} \quad (3)$$

zu setzen.

Auf die Methoden der numerischen Integration dieses Gleichungssystems und ihre Verbesserungsmöglichkeiten wird der zweite Teil dieses Berichtes eingehen. Die folgenden Ausführungen sollen den instationären Widerstand und dessen Problematik behandeln.

1. Die Bedeutung der Widerstandsbeiwerte für das Regulierungsproblem

Mit der Vertiefung der Fahrwasserrinne und den damit i.a. verbundenen Regulierungsmassnahmen zur Erhöhung der Räumkraft ändern sich in einem Tidefluss die mittlere Geschwindigkeit, der Wasserstand und der Tidehub, und zwar nicht nur direkt aufgrund des vergrösserten Querschnitts, sondern auch im Zusammenhang mit dem neuen Widerstandsbeiwert des Profils. Zur Vorausberechnung der Tideverhältnisse nach einer Flussregulierung ist deshalb für alle Berechnungsintervalle die Kenntnis der vor und nach dem Eingriff in die Morphologie des Stromes wirkenden Widerstandsbeiwerte notwendig. Da diese nur empirisch bestimmt werden können, hat jeder Entwurfsrechnung die Untersuchung einer abgelaufenen Tide vorauszugehen. Diese kann aber nicht willkürlich ausgewählt werden, denn jede Tide hat - als Ergebnis des veränderlichen Oberwassers und der nie in gleicher Weise einlaufenden Flutwelle - einen anderen Ver-

lauf. Wegen dieser Umstände ist es auch nicht angebracht, eine konstruierte "mittlere Tide" zu wählen, wohl aber eine solche, die dieser nahekommt. Damit hat man natürlich auch nur die Möglichkeit, über die zu erwartenden Durchschnittswerte etwas auszusagen. Die Verhältnisse, z.B. bei einer Sturmflut, bedürfen stets einer besonderen Untersuchung.

Der gesuchte Widerstandsbeiwert κ_i des i -ten Teilintervalls ergibt sich, indem man die durch eine Differenzengleichung approximierte dynamische Gleichung nach dem Widerstandsglied auflöst. Die hierzu erforderlichen Durchflussgeschwindigkeiten u_i werden durch Kubizierung aus den bekannten Wasserständen berechnet.

Der Erfolg dieser Methode beruht auf zwei Voraussetzungen:

- 1) Die Kubizierung muss durch eine gleichmässige Approximation in allen räumlichen und zeitlichen Teilintervallen vorgenommen werden, was nur mit hinreichend kleinen Intervallschritten möglich ist.
- 2) Alle hydrodynamischen Effekte, die durch Zuflüsse, Stromspaltungen, Wattengebiete etc. entstehen und die (durch die Ungenauigkeit der Wasserstandsmessungen bestimmte) Fehlergrenze überschreiten, müssen als Zusatzglieder der dynamischen Gleichung explizit erfasst werden, da sonst die Widerstandsbeiwerte unverständliche Grössen und störende Schwankungen zeigen¹⁾.

Zu Aussagen über die Veränderung der Widerstandsbeiwerte κ_i durch die geplanten Regulierungsmassnahmen kann man in folgender Weise gelangen: Man sucht zunächst die Schwankungen der κ_i längs der Berechnungsstrecke aus der wechselnden Morphologie zu verstehen. Damit gewinnt man einen Einblick in ihre Profilabhängigkeit, die auch eine Abschätzung der zu erwartenden Änderungen ermöglicht. Die hiermit verbundene Unsicherheit lässt sich am einfachsten dadurch beseitigen, dass man nicht eine möglichst genaue Bestimmung des neuen Widerstandsbeiwertes anstrebt, sondern diesen nur durch ihm

1) Sorgfältige Untersuchungen, die sogar den Windeinfluss erfassen, wurden bisher vom Centralen Studiendienst des Rijkswaterstaat, Den Haag, durchgeführt. Man vergl. den Bericht von DRONKERS und SCHÖNFELD [2].

nahekommende obere und untere Grenzen einschliesst. Indem man dann mit jedem dieser beiden χ -Werte eine Tiderechnung vornimmt, erhält man auch für die zu erwartenden Wasserstände und die neuen Durchflußgeschwindigkeiten eingrenzende Werte. Der Gewinn an Sicherheit lohnt durchaus den grösseren Rechenaufwand. Die Überprüfung dieser Methode und ihre Verbesserung kann nur durch die Nachrechnung bereits durchgeführter Regulierungen erfolgen.

Wichtig ist ferner folgende Bemerkung: Der Wasserbauer interessiert sich bei einem Regulierungsentwurf nicht nur für die zu erwartende Veränderung des Wasserstandes und des Tidehubs, sondern auch für die neuen Durchflussgeschwindigkeiten, und diese können - im Gegensatz zu den Wasserständen - bereits durch kleine Änderungen des Widerstandsbeiwertes stark beeinflusst werden. Da die erstrebte Selbstströmung des Tideflusses aber wesentlich von der Grösse der Durchflussgeschwindigkeit abhängt, darf die Bedeutung kleiner Änderungen des Widerstandsbeiwertes nicht unterschätzt werden.

2. Der instationäre Strömungswiderstand

In der dynamischen Gleichung (1) wird der Einfluss des Strömungswiderstandes W ausgedrückt durch

$$W = \chi \frac{u|u|}{R} \quad (4)$$

Es wird also das von CHÉZY aufgestellte Widerstandsgesetz für stationäre Wasserströmungen, die durch

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0$$

gekennzeichnet sind, auch für die instationäre Tidebewegung als gültig angenommen. Dieser Ansatz wurde schon von den Klassikern der Hydraulik gemacht. Und REINEKE [3] erzielte mit der dynamischen Gleichung (1) befriedigende Übereinstimmung mit der Erfahrung. Seitdem ist CHÉZYS Formel - bzw. die nach MANNING und STRICKLER benannte Variante - in allen Tiderechnungen angewandt worden.

Das Problem des instationären Strömungswiderstandes ist damit aber durchaus nicht erledigt, sondern gehört noch immer zu den ungelösten Fragen der Hydraulik. Diese Aussage bezieht sich nicht nur

auf einen möglichen "instationären Widerstandseffekt", sondern hauptsächlich auf eine innere Schwierigkeit der CHÉZY-Formel: Seit hundert Jahren ist nämlich bekannt, dass CHÉZYS Koeffizient $c^{-2} = \chi$ nicht konstant, sondern eine Funktion von u und R ist, sodass also statt c eigentlich $c(u,R)$ geschrieben werden müsste. Die Abhängigkeit von der Durchflussgeschwindigkeit u äussert sich derart, dass c mit wachsender Geschwindigkeit einem Grenzwert zustrebt, während mit abnehmender Geschwindigkeit auch c immer kleiner wird. Da nun bei einem Tidefluss die Geschwindigkeit u sowohl positive wie negative Werte und damit auch den kritischen Wert Null annimmt, muss die Anwendung der CHÉZY-Formel zu Diskrepanzen führen, solange der explizite Ausdruck dieser Geschwindigkeitsabhängigkeit nicht bekannt ist. Wie aus BOUSSINESQs [4] wesenserhellenden Untersuchungen über die Turbulenz als Ursache des Strömungswiderstandes zu schliessen ist, könnten auch Ebbe und Flut verschiedene Widerstandsbeiwerte haben, und zwar wäre aufgrund der Theorie anzunehmen, dass der Widerstandsbeiwert für Flut (wegen der grösseren Turbulenz) grösser ist als der für Ebbe.

Da eine beschleunigte Wasserströmung eine hydrodynamische Reaktionskraft auf in ihr befindliche materielle Körper - und damit auch auf das Flussbett - ausübt, ist theoretisch auch ein instationärer Zusatzwiderstand möglich. Nach Messungen von SCHÖNFELD [5] ist dieser aber vernachlässigbar klein gegenüber dem turbulenten Widerstand.

3. Empirische Ergebnisse

REINEKE hat schon in seiner klassischen Arbeit [3] ¹⁾ darauf hingewiesen, dass sich durch die Tiderechnungen eine Möglichkeit

1) REINEKE sagt wörtlich (S.7):

"Es scheint sich hier ein vorzüglicher Weg zu bieten, im Anschluß an die bisherigen vielseitigen Ermittlungen der Funktion c weitere Erhebungen über die Natur dieser Funktion anzustellen, da man in der Lage ist, in einem Tidefluss mit grosser Schärfe Wassermengenberechnungen anzufertigen, wobei während einer Tide sowohl die Gefälle wie die Geschwindigkeiten starken Wechseln unterworfen sind. Diese Veränderlichkeit wäre für die Erforschung des Wertes c sehr erwünscht."

bietet, die Natur des CHEZY-Koeffizienten näher zu erforschen. In diesem Sinne sollen einige Ergebnisse von Tiderechnungen angeführt werden.

Untersuchungen an der unteren EMS, der unteren EIDER und der unteren HUNTE aus den Jahren 1948/50 ergaben - wie aus den von Herrn ORBR Dr.-Ing. NIEBUHR zur Verfügung gestellten Unterlagen seiner damaligen Untersuchungen hervorgeht - folgende Resultate:

1) Der Widerstandsbeiwert \mathcal{K} wird mit abnehmender Geschwindigkeit immer grösser und strebt in der Nähe der Kenterpunkte zu sehr grossen Werten. Mit zunehmender Geschwindigkeit nähert sich \mathcal{K} einem Grenzwert.

2) Die Widerstandsbeiwerte \mathcal{K}_E (für Ebbe) und \mathcal{K}_F (für Flut) sind nicht gleich, und zwar gilt bei jedem der drei Flüsse die Ungleichung

$$\mathcal{K}_E > \mathcal{K}_F$$

3) Das Verhältnis $\mathcal{K}_E : \mathcal{K}_F$ ist geschwindigkeitsabhängig; im Emdener Fahrwasser steigt es von 1 auf ca. 2,5, wenn sich die Durchfluggeschwindigkeit u von 0,2 m/sec. zu 2,0 m/sec. ändert.

Neuere Untersuchungen der EMSMESSUNG (Nachrechnung des Naturzustandes für die Tide vom 25.6.1949, Emden 1957) bieten umfangreiches Material mit tabellarischen und graphischen Darstellungen des Widerstandsbeiwertes in seiner Zeitabhängigkeit. Leider können diese mit grossem Aufwand durchgeführten Rechnungen in bezug auf die hier erstrebte Analyse nicht in vollem Umfang ausgewertet werden, da nicht nur die beiden in § 1 genannten Voraussetzungen nicht berücksichtigt wurden, sondern auch ausserdem das konvektive Glied $u \frac{\partial u}{\partial s}$ vernachlässigt wurde¹⁾. Ferner wurden die \mathcal{K} -Kurven in einer das hydrodynamische Verhalten entstellenden Weise willkürlich geändert. Immerhin lassen sich doch einige interessante Zusammenhänge herauslesen.

1) Dieses auf W.HANSEN zurückgehende, stark vereinfachte Verfahren war von diesem eigentlich nur für die Tiderechnung mit Mittelwerten des Widerstandsbeiwertes angegeben worden; deshalb wurden zur Vereinfachung alle Zusatzeffekte summarisch als "Widerstands-glied" erfasst.

1) In der EMS gilt

$$\chi_F < \chi_E$$

2) Im EMSTRICHTER (von der KNOCK bis BORKUM) gilt

$$\chi_F > \chi_E$$

3) Die Differenz

$$\chi_F - \chi_E$$

nimmt ab mit kleiner werdender Trichteröffnung.

4) An der Mündung der LEDA werden die Widerstandsbeiwerte ausserordentlich groß und zeigen im Verhältnis zu den χ bestimmenden Einflüssen völlig wesensfremde und ganz bedeutende Schwankungen.

4. Diskussion der Messergebnisse

Das zu erwartende unbegrenzte Anwachsen des Widerstandsbeiwertes in der Nähe der Kenterpunkte haben die Messungen und Rechnungen Dr. NIEBUHRs bestätigt. Dagegen ist es als ein ebenso interessantes wie überraschendes empirisches Ergebnis anzusehen, dass die Ungleichung

$$\chi_F > \chi_E \quad (1)$$

nur im Mündungstrichter auftritt, während die Auswertung der Messungen im Flusslauf

$$\chi_F < \chi_E \quad (2)$$

ergibt.

Die Erklärung dieses zunächst paradox erscheinenden Sachverhalts dürfte in einer Unvollkommenheit der allgemeinen Theorie zu suchen sein, d.h. auf ein fehlendes Glied in der dynamischen Gleichung zurückzuführen sein. Denn der den Strömungswiderstand verursachende hydrodynamische Effekt kann nicht im Flußlauf und im Mündungstrichter in verschiedener Weise wirken.

In diesem Zusammenhang ist die Bemerkung wichtig, dass die hier mit χ_E und χ_F bezeichneten Widerstandsbeiwerte nur halbempirischen Charakter haben, d.h. Kennzahlen bedeuten, deren empirisch bestimmte Größe wesentlich von dem zugrunde gelegten theoretischen Ansatz abhängt, indem nicht erfaßte hydrodynamische Kräfte zu täuschenden Kompensationseffekten führen. Trotz der angedeuteten (und allgemein angenommenen) Möglichkeit verschiedener Widerstandsbei-

werte für Ebbe und Flut besteht aber durchaus die Aussicht, dass eine vervollkommnete Theorie diese Abweichungen als scheinbare aufklären und damit auch zu einer wesentlichen Vereinfachung beitragen wird.

Wie wichtig die Forderung einer expliziten Erfassung der auftretenden hydrodynamischen Effekte ist, zeigt besonders die sprunghafte Änderung der Widerstandsbeiwerte im Mündungsgebiet der LEDA. Da die dynamische Wirkung dieses Zuflusses vernachlässigt wurde, ergeben sich Widerstandsbeiwerte, die von den tatsächlich wirkenden erheblich abweichen.

5. Die OHIO-Diskrepanz

Auf eine unerwartete Schwierigkeit sind STOKER und ISAACSON bei der Tiderechnung für den OHIO gestossen. Für eine 36-Stunden-Periode wurde mit Mittelwerten von λ eine Vorausberechnung der Tide- welle unternommen. Dabei zeigte sich, daß die für den Flutast be- rechneten Wasserstände systematisch zu gross waren, und zwar der- art, daß die Abweichung mit der Zeit wuchs. Da als Ursache dieser Unstimmigkeit falsche Widerstandsbeiwerte angenommen wurden, wurde mit dem UNIVAC-Automaten der New York-University eine Serie von weiteren Rechnungen durchgeführt, und zwar mit in verschiedener Art variierten Widerstandsbeiwerten. Auf diese Weise war es möglich, Ergebnisse zu erhalten, die mit den beobachteten Wasserständen gut übereinstimmten. Eine Aufklärung dieser Diskrepanz wurde nicht ge- geben; STOKER [6] spricht in seinem Buch nur von der Anpassung des "Rechenmodells" an die Wirklichkeit.

Dieses Erzwingen der äusseren Naturähnlichkeit wird man bei den Tiderechnungen für eine Flußregulierung nicht durchführen kön- nen, denn die Reduktion eines abweichenden Wasserstandes kann nur durch beträchtliche Änderungen des Widerstandsbeiwertes erreicht werden, was aber - da die Abweichungen i.a. andere Ursachen hat - zur Zerstörung der hydrodynamischen Wirklichkeit führt. Es bleibt in solchen Fällen nichts anderes übrig, als der Ursache nachzuspü- ren oder die Grundlagen der Theorie zu überprüfen.

In diesem Zusammenhang sei auch eine andere Merkwürdigkeit erwähnt, die bei einer Tiderechnung mit mittleren Widerstandsbei- werten auftrat. Bei seinen Untersuchungen über die voraussichtli-

chen Folgen der DOLLART-Eindeichung fand W.HANSEN (1953), daß zeitweilig das Gefälle dem Flutstrom entgegengesetzt war, und zwar zeigte sich dieses paradoxe Verhalten sowohl in einem Berechnungsabschnitt des Emstrichters als auch auf der Berechnungsstrecke zwischen EMDEN und HERBRUM.

6. Zusammenfassung

Der erfolgreiche Ausbau der Seewasserstrassen setzt nicht nur Kenntnis ihrer Morphologie voraus, sondern auch das Verständnis ihrer hydrodynamischen Eigenschaften. Insbesondere macht die mit einem Regulierungsentwurf verbundene Vorausberechnung der veränderten Tideverhältnisse die Bestimmung der Widerstandsbeiwerte vor und nach der Vertiefung notwendig.

Bei einer Tiderechnung bereitet - besonders wegen der periodischen Geschwindigkeitsänderungen - die richtige Erfassung des Widerstandsbeiwertes wesentliche Schwierigkeiten, da seine explizite Abhängigkeit von der Durchflussgeschwindigkeit und dem hydraulischen Radius ein noch ungelöstes Problem ist.

Die Erkenntnisse der Theorie des Strömungswiderstandes stimmen nur zum Teil überein mit den aus Strommessungen hervorgehenden Ergebnissen über die Geschwindigkeitsabhängigkeit und die Asymmetrie (in bezug auf Ebbe und Flut) des Widerstandsbeiwertes. Eine Überprüfung der Grundlagen der Theorie der Tidewellen ist deshalb erforderlich.

Ohne die explizite Erfassung der dynamischen Wirkungen von Zuflüssen, Stromspaltungen, Wattengebieten usw. führen die Rechnungen nicht zu den wirklichen Widerstandsbeiwerten. Insbesondere können die bei einer formalen Anpassung des Rechenmodells an die Wirklichkeit gefundenen Widerstandsbeiwerte - trotz guter Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Wasserständen - völlig falsch und für die gewünschten hydraulischen Aussagen gänzlich ungeeignet sein.

Die Berechnung der Flußtiden hat über die eigentliche wasserbauliche Aufgabenstellung hinaus eine grosse Bedeutung für die Erforschung des bisher unbekanntes Widerstandsgesetzes. Theoretische

Untersuchungen dieser Art, die von der Hamburger Dienststelle entwickelt wurden und bei ihren Arbeiten erprobt werden, sollen bei nächster Gelegenheit veröffentlicht werden.

In diesem Zusammenhang darf gesagt werden, daß die Tiderechnung eines der vielen Gebiete ist, wo der moderne Ingenieur nicht mehr mit bekannten Ergebnissen auskommt, sondern selbst wissenschaftliche Untersuchungen anstellen muss.

Literatur:

- [1] SAINT-VENANT, B.de: Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. I. Comptes Rendus Acad. Sci. (Paris) t.73 (1871), 147-154.

- [2] DRONKERS, J.J. and SCHÖNFELD, J.C.: Tidal Computations in Shallow Water. Proc. Amer. Soc. Civil Eng. 81 (1955), Nr. 714, 1-48.

- [3] REINEKE, H.: Die Berechnung der Tidewelle im Tideflusse. Jahrb. Gewässerk. Nordd., Bes. Mitt. 3, Heft 4. Berlin 1921.

- [4] BOUSSINESQ, J.V.: Théorie de l'écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes à grande section. I. II. Paris 1897.

- [5] SCHÖNFELD, J.C.: Resistance and Inertia of the Flow of Liquids in a Tube or Open Canal. Appl. Sci. Res. A 1 (1948), 169-197.

- [6] STOKER, J.J.: Water Waves. N.Y. 1957, S. 501.