

# DER BAUINGENIEUR

21. Jahrgang

20. Mai 1940

Heft 19/20

## DIE BERECHNUNG DER GEZEITEN IN SEEKANÄLEN.

Von Dr.-Ing. habil. Edgar Schultze, Regierungsbaumeister a. D., Dozent an der Technischen Hochschule Berlin.

DK 626.9:627.223.5

**Übersicht:** Dämpfung und Fortschrittsgeschwindigkeit der Gezeitenwelle, Strömungsgeschwindigkeiten, Wasserstandskurven, Stundenlinien und die HW- und NW-Linie in einem Seekanal werden ermittelt. Es werden folgende Randbedingungen betrachtet: Haflkanäle (kurze Seekanäle), Verbindungskanäle zwischen einem Gezeitenmeer und einem Binnensee von unbegrenzter und von begrenzter Ausdehnung, Verbindungskanäle zwischen zwei Gezeitenmeeren und Stichkanäle.

### 1. Fragestellung.

Die Untersuchung der Gezeiten in Seekanälen hat ihre Aufgabe darin, die Größe der Strömungen und die Höhe der Wasserstände in Verbindungskanälen zwischen einem Gezeitenmeer und einem Wasserlauf mit oder ohne Gezeiten vorzuberechnen und damit insbesondere die Frage zu lösen, ob der Kanal abgeschleust werden muß oder nicht. Infolge der Vielfalt einwirkender Kräfte und der in der Natur meist räumlichen Strömungsvorgänge ist es schwer, überhaupt ein physikalisches Denkbild der Vorgänge zu erhalten, das als Grundlage für eine Berechnung dienen kann. Unter Weglassung von Faktoren geringerer Bedeutung und Beschränkung auf eindimensionale Strömungen haben sich im Lauf der Zeit einige Rechenverfahren herausgebildet, die meist unabhängig voneinander aus bestimmten Anlässen heraus entstanden sind. Trotz mancher Abweichungen lassen sich die entwickelten Verfahren auf zwei grundsätzlich verschiedene Berechnungsweisen zurückführen: die Integration der Differentialgleichung der Gezeitenströmung oder die Gleichung der Stau- oder Übertragungswelle<sup>1</sup>.

Die gestellte Aufgabe lautet in allen Fällen: entweder sind bei Erweiterung von Seekanälen die Erfahrungskonstanten aus den bestehenden Umständen zu berechnen oder bei einem Neubau aus ähnlichen Wasserstraßen zu übernehmen und mit diesen die Wasserstandshöhen und Strömungsgeschwindigkeiten des neuen Zustandes an beliebigen Punkten zu ermitteln.

Eine exakte Gezeitenberechnung erfordert immer sehr viel Rechenarbeit. In vielen Fällen lohnt es sich daher, auf eine genauere Lösung zu verzichten und sich mit oft allerdings nur groben Näherungen zu begnügen. Nachdem heute die Theorie der Gezeitenströmung für den technischen Bedarf genügend ausgearbeitet ist, besitzt man die Grundlage, aus dieser Theorie heraus sich örtlich gültige Faustregeln und Rechnungsarten zu schaffen, die die rein gefühlsmäßige Behandlung solcher Fragen etwas mehr auf den Boden der Wirklichkeit stellen können.

Bei Seekanälen ist im Gegensatz zu Flußmündungen die Fragestellung dadurch vereinfacht, daß ein ebener Wasserlaufquerschnitt vorhanden ist und der Abfluß aus dem Binnenlande, der Oberwasserzufluß, meist nicht in Erscheinung tritt. Man unterscheidet bei der Wahl der Berechnungsweise zwischen kurzen Haflkanälen, Verbindungskanälen zwischen einem Gezeitenmeer und einem Binnensee von unbegrenzter oder begrenzter Ausdehnung, Verbindungskanälen zwischen zwei Gezeitenmeeren und Stichkanälen.

### 2. Grundlagen.

Für die Bezeichnung der Gezeiten werden folgende Symbole verwendet:

$a$  = halber Tidenhub, Amplitude der cos-Tide, an der Stelle  $x$  [m]  
 $a_0$  = dass. am Kanaleinlauf (größere Gezeit)

<sup>1</sup> Vgl. Schultze, E.: Die Bestimmung der Abflußverhältnisse im Tidegebiet. Bautechn. 12 (1934) S. 438, 493.

$a_L$  = dass. am Kanalauslauf (kleinere Gezeit)  
 $a_1, a_2, a_3$  = durch Reflexion entstehende Komponenten der Gezeit  $a$   
 $a_1', a_2', a_1''$  = Lage des Scheitels der Querschnittsersatzparabel, im Text erläutert  
 $c$  = Fortschrittsgeschwindigkeit der Gezeitenwelle  
 $= -\frac{L}{d}$  [m/sec]  
 $d$  = Hochwasserzeitunterschied an den Enden des Kanals, + wenn die niedrigere Gezeit zuerst HW hat [sec]  $= -\frac{L}{c}$   
 $e$  = Amplitude der cos-Tide der Geschwindigkeit  $v$  an der Stelle  $x$  (m/sec)  
 $e_0, e_L, e_1$  usw. wie  $a_0, a_L, a_1$  usw.  
 $g$  = Erdbeschleunigung = 9,81 (m/sec<sup>2</sup>) bzw. Funktionszeichen  
 $h$  = Wasserstand über MW (Ruhelage des Spiegels) bei  $x$  zur Zeit  $t$  [m]  
 $h_0, h_L, h_1$  usw.  $a_0, a_L, a_1$   
 $k$  = Rauigkeitsbeiwert der Gleichung  $v = k T J$  (sec<sup>-1</sup>)  
 $k_2$  = dass. der Gleichung  $v = k_2 |T J|$  (m<sup>1/2</sup> sec<sup>-1</sup>)  
 $l$  = Länge der Gezeitenwelle [m]  
 $m$  = Exponent der Geschwindigkeitsformel  $v^m = k_m^m T J$   
 $n$  = Kreisfrequenz (Schwingungszahl) der Gezeit in Bogenmaß/sec  $\left(\frac{1}{\text{sec}}\right) = \frac{2\pi}{t}$   
 $p$  = benetzter Umfang (m), im allgemeinen gleich  $B$  gesetzt  
 $p_m$  = dass. bei MW  
 $q$  = sekundliche Abflußmenge in  $x$  zur Zeit  $t$  (m<sup>3</sup>/sec)  
 $q_0, q_L, q_1$  usw. wie  $a_0, a_L, a_1$  usw.  
 $r = \frac{n}{c} \left| \frac{1}{m} \right|$   
 $s$  = Amplitude der cos-Tide der sec. Abflußmenge  $q$  an der Stelle  $x$  (m<sup>3</sup>/sec),  
 $s_0, s_L$ , wie  $a_0, a_L$   
 $t$  = Zeit (sec)  
 $t_0$  = Zeit des HW der cos-Gezeit in A  
 $t_L$  = Zeit des HW der cos-Gezeit in B  
 $t_x$  = HW-Zeitunterschied der ankommenden Welle zwischen A und  $x = \frac{x}{c}$   
 $t_y$  = HW-Zeitunterschied der reflektierten Welle zwischen B und  $x = \frac{L-x}{c}$   
 $v$  = Fließgeschwindigkeit des Wassers in  $x$  zur Zeit  $t$  (m/sec)  
 $v_0, v_L$  usw. wie  $a_0, a_L$   
 $x$  = Längsachse des Kanals (m)  
 $B$  = Breite des Kanals (m)  
 $B_m$  = dass. bei MW  
 $E$  = potentielle Energie der Übertragungswelle  
 $F$  = Querschnitt des Kanals (m<sup>2</sup>)  
 $F_m$  = dass. bei MW =  $B_m \cdot T_m$   
 $H$  = Spiegelunterschied zu beiden Seiten des Kanals zur Zeit  $t$  (m)  
 $J$  = Spiegelgefälle des Wassers =  $\frac{dh}{dx}$   
 $L$  = Länge des Kanals oder Kanalabschnitts (m)  
 $O$  = Oberfläche des Binnensees (m<sup>2</sup>)

- $Q$  = Gesamtabflußmenge während einer Tide ( $m^3$ )
- $R$  = hydraulischer Radius, meist =  $T$
- $R_m$  = dass. bei MW
- $S$  = Reibungswiderstand (Schleppspannung) =  $\frac{v^2}{k^2} = \frac{v}{k}$  ( $t/m^2$ )
- $T$  = Querschnittstiefe des Kanals, gemittelt ( $m$ )
- $T_m$  = dass. bei MW
- $a$  = Dämpfungsbeiwert
- $\gamma$  = Raumgewicht des Wassers ( $\frac{t}{m^3}$ ) =  $g \rho$
- $r$  = Parameter der Querschnittsparabel
- $\rho$  = Dichte des Wassers ( $\frac{sec^2 \cdot t}{m^4}$ )
- $\tau$  = Schwingungsdauer der cos-Tide (sec) =  $2 \pi / n$
- $\varphi$  = Phase der Gezeit bei  $t = 0$
- $\psi$  = Phase der Abflußmenge und Geschwindigkeit bei  $t = 0$
- $\xi$  = Weg des Wasserteilchens in der x-Achse (m)
- $M_2, S_2, K_1, M_4$  usw. Bezeichnungen für die cos-Tiden der harmonischen Analyse

Weitere Beiwerte werden im Text erklärt.

Die folgenden Untersuchungen gelten für Kanäle mit konstanter Tiefe und Breite bei MW. Bei Veränderungen dieser Maße ist der Kanal in einzelne Teilstücke mit gleichbleibendem  $B_m$  und  $T_m$  zu unterteilen. Der Querschnitt wird rechteckig angenommen, wenn nichts anderes erwähnt ist.

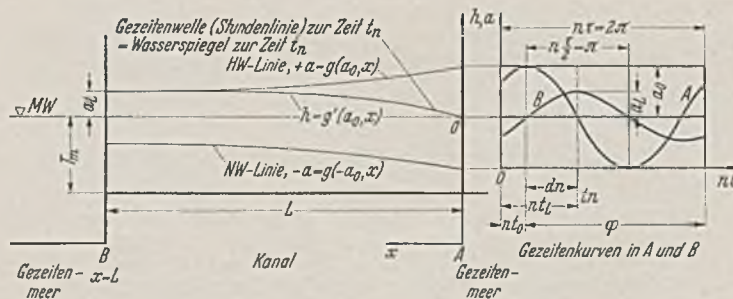


Abb. 1. Gezeitenkurven, Gezeitenwellen, HW- und NW-Linien in einem Kanal zwischen zwei Gezeitenbecken.

Der Berechnung wird jeweils eine einfache cos-Linie für die Gezeitenkurve zugrunde gelegt. Ist die Gezeit keine einfache cos-Kurve, so kann man sie nach dem Verfahren der harmonischen Analyse in mehrere cos-Kurven zerlegen. Die Rechnung ist dann für jede wichtige cos-Teilkurve gesondert durchzuführen. Für das Ergebnis werden die Teiltiden einander überlagert. Man erhält die charakteristischen Konstanten der Teiltiden — die Amplitude  $a$  und die Phase  $\varphi$  zu einem gegebenen Zeitpunkt — durch die astronomischen Recheninstitute, in Deutschland durch das Marineobservatorium in Wilhelmshaven. Für technische Berechnungen hat die Kenntnis der Phasenverschiebung der Teiltiden untereinander nur dann Zweck, wenn sie regelmäßig wiederkehrt, die Schwingungsdauern der cos-Teiltiden also in ganzzahligen Verhältnissen zueinander stehen. Sonst wird man die Teiltiden stets so zusammensetzen, daß für die HW-Berechnung möglichst ungünstige Ergebnisse entstehen. Die Schwingungsdauer der Teiltiden ist durch die astronomischen Verhältnisse festgelegt. Man zerlegt in erster Linie nach den Tiden  $M_2$  (12,4 Stunden) und  $S_2$  (12,0 Stunden), ferner  $N_2$  (12,6 Stunden),  $L_2$  (12,2 Stunden),  $K_1$  (24 Stunden),  $M_4$  (6,2 Stunden) usw. Die Bedeutung der einzelnen Teiltiden ist nach den untersuchten Orten ganz verschieden. In

Deutschland genügt es häufig, nur die Tide  $M_2$  mit  $n = \frac{2 \pi}{3600 \cdot 12,4} = \frac{0,017453}{12,4} = 1,405 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Bogenmaß}}{\text{sec}}$  zu berücksichtigen.

Gleichung der Gezeitenkurve (Abb. 1)

$$(I) \quad h = a \cos (nt + \varphi) = a \cos n \left( t + \frac{\varphi}{n} \right)$$

$\varphi$  = Phase zur Zeit  $t = 0$ , meist gleich 0 gesetzt, so daß die Gezeitenkurve mit dem HW beginnt.

$n$  entspricht den oben festgelegten Frequenzen der Tiden nach der harmonischen Analyse.

$2a$  = Tidenhub der Gezeitenkurve.

Die Gezeitenwelle wird dargestellt durch den Ausdruck:

$$(II) \quad h = g(a_0, x, T_m, n, k) \cos n \left( t - \frac{x}{c} + \frac{\varphi}{n} \right) = g \cos (nt - rx + \varphi)$$

(Gleichung der gedämpften, nicht reflektierten Gezeitenwelle). Hierbei ist  $g$  eine Funktion, die die Abnahme des Tidenhubs längs der Kanalachse angibt (Dämpfung);  $c$  gibt die HW-Zeit-Verschiebung längs des Kanals an. Die Bestimmung der Dämpfung und der Fortschrittsgeschwindigkeit des HW-Scheitels ist die Aufgabe einer jeden Gezeitenberechnung. Alle übrigen Größen lassen sich aus diesen beiden ohne Schwierigkeit ermitteln.

Die in den Kanal eintretende Gezeitenwelle wird gewöhnlich am Kanalende reflektiert. Dann setzt sich die wirklich vorhandene Welle aus der eintretenden und der reflektierten zusammen:

$$(III) \quad h = g_1 \cos (nt - rx + \varphi) + g_2 \cos (nt + rx + \varphi)$$

(Gleichung der gedämpften und reflektierten Gezeitenwelle). Eintretende und reflektierte Welle werden nach demselben Gesetz gedämpft.  $g_1$  und  $g_2$  unterscheiden sich nur durch den Ausgangstidenhub, der im zweiten Glied kleiner ist. Je nach der Größe der Dämpfung findet nur eine einmalige Reflexion statt, oder es wird mehrfach reflektiert, bis die Welle erloschen ist. Dämpfung und Reflexion hängen insofern zusammen, als eine geringe Dämpfung häufige Reflexionen ergibt. Die mehrfache Reflexion wird in einem anderen Verfahren dadurch ersetzt, daß die Gezeitenwelle als Interferenz einer einlaufenden und einer zurücklaufenden Welle aufgefaßt wird, die nicht durch Reflexion zusammenhängen, sondern durch die Randbedingungen bestimmt werden.

Setzt man in Gl. (III) für  $t$  einen bestimmten Wert  $t_n$  ein, so erhält man die Stundenlinie für diesen Zeitpunkt, d. i. den Wasserpiegel zur Zeit  $t_n$ .

Die HW- und NW-Linie bilden die Umhüllenden der Stundenlinien. Man erhält ihre Gleichungen aus (III), indem man für  $h$  das Maximum zu der Zeit  $t_m$  bestimmt und diesen Wert für  $t$  einsetzt.

$$\frac{dh}{dt} = 0 \text{ ergibt } t_m.$$

$$(IV) \quad a = g_1 \cos (nt_m - rx + \varphi) + g_2 \cos (nt_m + rx + \varphi)$$

(Gleichung der HW- und NW-Linien).

Die MW-Linie liegt bei reiner Gezeitenbewegung ohne Oberwasserzufluß waagrecht. Diese Voraussetzung gilt für alle nachfolgenden Untersuchungen. Bei einigen Verfahren ist eine Überlagerung mit einer reinen Gefällsströmung zulässig.

Für die Geschwindigkeit  $v$  bzw. die sekundliche Abflußmenge  $q$  gilt ebenfalls die cos-Funktion:

$$(V) \quad v = e \cos (nt + \psi)$$

$$(VI) \quad q = s \cos (nt + \psi)$$

Es ist  $s = e \cdot T \cdot B$  und bei der Breite  $1$ , die meist eingesetzt wird  $s = e T$ . Es ist also für die Lösung gleichgültig, ob mit  $v$  oder  $q$  gearbeitet wird.

$h$  und  $v$  ( $q$ ) haben die gleiche Dämpfung und Fortschrittsgeschwindigkeit. Man kann daher die Gl. (II) und (III) auch für  $v$  und  $q$  schreiben:

$$(VII) \quad q = g'_1 \cos (nt - rx + \psi) + g'_2 \cos (nt + rx + \psi),$$

wobei in  $g'_i$  an Stelle von  $a_0, s_0$  oder  $e_0$  einzusetzen ist.

An Stelle der Gl. (I) läßt sich auch schreiben:

$$(Ia) \quad h = a \cos 2 \pi \left( \frac{t + t_1}{\tau} \right) = a \cos n \left( t + \frac{\varphi}{n} \right),$$

da  $n = \frac{2 \pi}{\tau}$  und  $\frac{\varphi}{n} = t_1$  ist.

Ebenso läßt sich die Gezeitenwelle schreiben:

$$(IIa) \quad h = g \cos 2 \pi \left( \frac{t + t_1}{\tau} - \frac{x}{l} \right)$$

$$= g \cos (nt - rx + \varphi),$$

da  $l = c \cdot \tau$  ist.

Für den Reibungsverlust des strömenden Wassers kann man setzen:

$$(VIII) \quad S = \frac{v^2 L B \gamma}{k_2^2}$$

wenn man von der Geschwindigkeitsformel  $v = k_2 \sqrt{T J}$  ausgeht. Auf die Flächeneinheit lautet der Ausdruck:

$$(VIIIa) \quad S = \frac{v^2}{k_2^2}$$

Diese quadratische Beziehung wird wegen der schlechten Integrierbarkeit häufig ersetzt durch

$$(IX) \quad S = \frac{v B L \gamma}{k}$$

entsprechend der Geschwindigkeitsformel  $v = k T J$ . Für die Flächeneinheit ist dann:

$$(IXa) \quad S = \frac{v}{k}$$

Die Größe von  $k$  muß nach der Erfahrung bestimmt werden. Statt  $B$  steht oft genauer  $p$ , statt  $T$  der hydraulische Radius  $R$ .

Insgesamt sind also folgende Größen für eine vollständige Beschreibung der Gezeiten zu bestimmen:

- der Rauigkeitsbeiwert  $k$ ,
- die Funktion der Dämpfung des Tidenhubs  $g$  bzw.  $g_1$  und  $g_2$ ,
- die Fortschrittsgeschwindigkeit  $c$  der Gezeitenwelle,
- die Reflexion der Gezeitenwelle,
- die Stundenlinien Gl. (III),
- die HW- und NW-Linien Gl. (IV),
- die Gezeitenkurven Gl. (I),
- die Geschwindigkeitskurven Gl. (V).

Welche Größen jeweils gegeben und welche gesucht sind, hängt von den Randbedingungen ab, die durch die äußeren Verhältnisse festgelegt werden.

### 3. Einfache Abflußgleichung für einen kurzen Kanal.

Zunächst sei die Lösung für den Fall eines Hafkanals gebracht. Hierzu genügen einfache hydraulische Überlegungen ohne Inanspruchnahme der Gezeiten-Gleichungen<sup>2</sup>.

Ein Binnensee ohne Zuflüsse und mit senkrechten Ufern sei durch einen Kanal mit einem Gezeitenmeer verbunden (Abb. 2). Die Größe des Sees ist endlich.

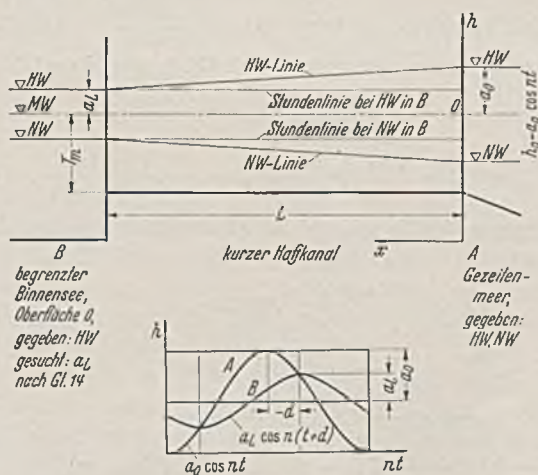


Abb. 2. Kurzer Kanal zwischen einem Gezeitenmeer und einem Wasserbecken von beschränktem Umfang.

Geschwindigkeit nach Gl. (7).

Fortschrittsgeschwindigkeit:  $-\frac{L}{d}$ .

Stundenlinien nach Gl. (6a) geradlinig.

HW- und NW-Linie gebildet durch die höchsten und niedrigsten Punkte der Stundenlinien Gl. (6b). Dämpfung durch Zeichnen der HW- und NW-Linien.

Es wird angenommen, daß der Kanal nicht allzu lang ist und daß die Wasserspiegeländerungen im See ausschließlich durch den Zufluß aus dem Kanal entstehen. Sobald der Wasserstand im See seinen höchsten Wert erreicht hat, sei infolge dieser Voraussetzung

gen der Wasserstand im Gezeitenmeer gleich hoch. Das Gefälle ist dann gleich Null. Der Wasserstand des Meeres fällt danach, und das Wasser beginnt gleichzeitig aus dem See auszufließen. Die Trägheit des Wassers wird also außer acht gelassen. Bei längeren Kanälen wäre das nicht zulässig. Hier herrscht demnach eine reine Gefällsströmung, die durch die Gleichung von Chézy

$$(1) \quad v = k_2 \sqrt{T J}$$

ausgedrückt wird. Die Gezeitenbewegung in A ist gegeben durch

$$(2) \quad h_0 = a_0 \cos n t,$$

wenn  $t = 0$  bei HW gemessen wird.

Die unbekannte Gezeitenbewegung in B sei

$$(2a) \quad h_1 = a_1 \cos n(t + d).$$

Das Gefälle im Kanal wird:

$$(3) \quad J = \frac{1}{L} (a_0 \cos n t - a_1 \cos n(t + d)).$$

Man erhält daraus:

$$(3a) \quad h = a_L + J(L - x) = \sqrt{\left( \frac{a_0 - a_1 \cos nd}{L} - a_0 \right)^2 + a_L^2 \sin^2 d} \frac{x^2}{L^2} \times \cos \left[ nt + \arctg \frac{a_L x \sin nd}{a_L x \cos nd + a_0(L - x)} \right]$$

(Gleichung der Stundenlinien).

$$(3b) \quad a^2 = \left[ \left( \frac{a_0 - a_L \cos nd}{L} \right)^2 + \left( \frac{a_L \sin nd}{L} \right)^2 \right] x^2 - 2 \frac{a_0}{L} (a_0 - a_L \sin nd) x + a_0^2$$

(Gleichung der HW- und NW-Linie).

Zur Zeit  $t = -d$  herrscht gemäß Voraussetzung in A und B gleich hoher Wasserstand (Abb. 2), und zwar in B Hochwasser. Infolgedessen ist dann

$$(4) \quad \begin{aligned} h_0 &= h_1 \text{ und} \\ a_1 &= a_0 \cos n d. \end{aligned}$$

Setzt man  $\cos nd = \frac{a_1}{a_0}$  und  $\sin nd = \sqrt{\frac{a_0^2 - a_1^2}{a_0^2}}$  in Gl. (3) ein,

so wird

$$(5) \quad H = J L = \frac{1}{a_0} (a_0^2 - a_1^2) \cos nt + \frac{a_1}{a_0} |a_0^2 - a_1^2| \sin n t.$$

Alle cos-Linien können auf die Form  $h = C \cos n(t + K)$  gebracht werden. Es ist allgemein

$$A \sin nt + B \cos nt = \sqrt{A^2 + B^2} \cos \left( nt + \arctg -\frac{A}{B} \right),$$

$$C = \sqrt{a_0^2 - a_1^2},$$

$$K = \frac{\pi}{2} - d.$$

Es wird damit:

$$J = \frac{1}{L} |a_0^2 - a_1^2| \cos n \left( t - \frac{\pi}{2} + d \right)$$

$$(6) \quad J = \frac{1}{L} |a_0^2 - a_1^2| \sin n(t + d),$$

und mit Gl. (1)

$$(7) \quad v = k_2 \sqrt{\frac{T_m}{L} |a_0^2 - a_1^2| \sin n(t + d)}$$

$$(7a) \quad v_{\max} = k_2 \sqrt{\frac{T_m}{L} |a_0^2 - a_1^2|}$$

Den Abfluß erhält man zu

$$(8) \quad dQ = k_2 \sqrt{\frac{T_m}{L} |a_0^2 - a_1^2| \sin n(t + d)} \cdot dt.$$

Integriert man über eine halbe Tide, so erhält man die Flutstrommenge

$$(9) \quad Q = 12054 k_2 F_m \sqrt{\frac{T_m}{L} |a_0^2 - a_1^2|}$$

(10) Da  $Q = 2 \cdot O \cdot a_L$  ist, wird

<sup>2</sup> BROWN, E.: Inlets on sandy coasts. Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs. 54 (1928) S. 505.

$$(11) \quad 0 = \frac{12054}{\sqrt{2}} \frac{k_2 \cdot F_m}{a_L} \sqrt{\frac{T_m}{L}} \sqrt[4]{a_0^2 - a_L^2}.$$

Setzt man:  $T_m = \frac{F_m}{B_m}$  und

$$(11a) \quad \frac{1}{2\beta} = \frac{4 \cdot 0^4 B_m^2 L^2}{12054^4 k_2^4 F_m^6},$$

so wird:

$$(12) \quad a_L = \sqrt{\beta(2a_0^2 + \beta) - \beta}.$$

Rechnungsgang:

Gegeben:  $a_0, F_m, L, B_m, T_m, k_2, 0$

Man berechnet:

- 1)  $\beta$  aus Gl. (11a)
- 2)  $a_L$  aus Gl. (12)
- 3)  $Q$  aus Gl. (9)
- 4)  $v_{max}$  aus Gl. (7a)
- 5)  $d$  aus Gl. (4)
- 6)  $v$  aus Gl. (7).

Man erhält damit

- die Gezeitenkurven nach Gl. (2), (2a)
- $$(13) \quad \text{die Fortschrittsgeschwindigkeit: } -\frac{L}{d}$$
- die Dämpfung aus Gl. (3b)  
die HW- und NW-Linie desgleichen  
die Stundenlinien aus Gl. (3a) als gerade Linien.

Einfacher ist die Lösung, wenn an beiden Enden des Kanals die Gezeiten gegeben sind. Als dann gilt Gl. (3) für die Stundenlinien, Gl. (1) für  $v$ , Gl. (14) für die Dämpfung und die HW- und NW-Linien, Gl. (13) für die Fortschrittsgeschwindigkeit.

Setzt man außerdem  $a_L = 0$ , so ergeben sich für ein Wasserbecken mit unbegrenzter Wasseroberfläche und daher ohne Gezeitenschwankungen die Werte aus den gleichen Ansätzen. Die HW- und NW-Linie erhält man aus Gl. (3b) oder (57) als Gerade. Die Fortschrittsgeschwindigkeit ist gleich 0, da alle Punkte gleichzeitig HW haben.

Die Rechnung muß für alle  $\cos$ -Teiltiden (also verschiedene  $n, a, d$ ) wiederholt werden. Die Ergebnisse werden einander überlagert.

#### 4. Die Gezeitenwelle als Übertragungswelle.

Ursprünglich wurde von Bonnet<sup>3</sup> ein Verfahren für die Mündung der Schelde ausgearbeitet. Es ist von Brown<sup>4</sup> auf die Verhältnisse bei Seekanälen zugepaßt und von einer Zahl von Erfahrungskonstanten befreit worden. Dadurch haben die Gleichungen einen höheren Grad von Allgemeingültigkeit als bei Bonnet.

Das Verfahren von Bonnet bezieht sich auf die Verhältnisse in Tideflüssen und benutzt die Ableitung der Gleichungen über den Energiehaushalt der Stauwelle, um Unterlagen für die Aufstellung statistischer Beziehungen zu erhalten, die nur örtlich bedingte Gültigkeit besitzen. Die allgemeine Anwendbarkeit des Bonnet-Verfahrens wird deshalb von Mazure<sup>5</sup> auch mit Recht bestritten. Brown verzichtet demgegenüber auf eine statistische Auswertung und beschränkt sich auf den einfachen Fall von Kanälen ohne ständigen Oberwasserzufluß mit verhältnismäßig einfachen und nicht allzusehr wechselnden Querschnitten. Seine Lösung ist exakter als bei Bonnet durchgeführt. An Erfahrungsbeiwerten tritt nur der auch sonst unentbehrliche Reibungsbeiwert auf. Bei der allgemeinen Lösung der Frage werden folgende Arten von Seekanälen betrachtet:

1. Die Verbindung zwischen einem Gezeitenmeer und einem

<sup>3</sup> Bonnet, L.: Contribution à l'étude théorique des fleuves à marée du bassin de l'Escaut maritime. Ann. Trav. publ. Belg. Bruxelles 23 (1922) u. 24 (1923).

<sup>4</sup> Brown, E. — Flow of water in tidal canals. Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs. 56 (1930).

<sup>5</sup> Mazure: De berekening van getijden en stormvloed op benedenrivieren. Diss. Delft 1937.

Wasserbecken mit unveränderlichem Spiegel und von unbegrenzter Ausdehnung, im Gegensatz zu dem in Abschnitt 3 behandelten See mit begrenzten Abmessungen.

2. Die gleiche Verbindung mit einem Wasserbecken von begrenzter Oberfläche, aber ohne eigene Gezeit bei langem Kanal.

3. Die Verbindung zwischen zwei Gezeitenmeeren mit unabhängigen Gezeiten.

Die Grundgleichungen der Übertragungswelle werden für den unendlich langen Kanal mit konstantem Querschnitt aufgestellt (Abb. 3—6). Die Fortschrittsgeschwindigkeit der Welle beträgt ohne Gefällsströmung:

$$(14) \quad c = \sqrt{g(T_m + h)} = \frac{dx}{dt}.$$

$h$  wird zur Vereinfachung der Berechnung unabhängig von  $t$  gleich  $a =$  Höhe des HW über mittl. Kanalwasserstand an der Stelle  $x$  gesetzt:

$$(15) \quad T_m + h = T_m + a.$$

Es gilt weiter die Volumengleichung der Übertragungswelle:

$$(16) \quad v = c \frac{h}{T_m + h} \approx c \frac{a}{T_m + a} \text{ oder zusammen mit (14) und (15)}$$

$$(17) \quad v = \frac{\sqrt{g a}}{\sqrt{T_m + a}}.$$

Der Reibungswiderstand wird nach Gl. (IX) zu  $S = \frac{p v}{k}$ , also linear angesetzt, wie das als Näherung bei Gezeitenberechnungen häufig geschieht.  $k$  wird für den ganzen Kanal konstant angenommen. Durch Einführung eines linearen Reibungswiderstandes entstehen Ungenauigkeiten, die schon verschiedentlich kritisiert worden sind.

Die Grundgleichung für die Dämpfung der Übertragungswelle erhält man dadurch, daß man den Energieverbrauch in der Zeiteinheit durch Reibung gleich dem Verlust an potentieller Energie in der Höhe setzt. Die potentielle Energie der Übertragungswelle beträgt:

$$(18) \quad E = \gamma B_m a^2.$$

Der Reibungswiderstand je Längeneinheit ist nach Gl. (IX):  $\frac{1}{k} p v$ .

Die Reibungsenergie während der Zeit  $dt$  ist:

$$(19) \quad dS = \frac{p_m v}{k} \cdot v \cdot dt.$$

Setzt man Gl. (17) ein, so wird  $dS = \frac{p_m g a^2 dt}{T_m + a}$ . Da  $dE = -dS$  sein soll, erhält man, wenn man nach Gl. (14) und (15)

$$(14a) \quad dt = \frac{dx}{\sqrt{g(T_m + a)}} \text{ setzt,}$$

$$(20) \quad dE = \frac{(T_m + a)^{3/2} da}{a} = -\frac{p_m dx}{2 \rho B_m \sqrt{g k}}.$$

Die Dämpfung der Gezeitenwelle ist demnach gegeben durch die Gleichung

$$(20a) \quad \frac{dx}{da} = \frac{(T_m + a)^{3/2}}{k' a}, \text{ wenn}$$

$$k' = \frac{p_m}{B_m} \frac{1}{2 \rho \sqrt{g k}} \text{ und bei } p_m = B_m \quad k' = \frac{\sqrt{g}}{2 k} \text{ ist.}$$

Das Integral dieser Gleichung lautet:

$$(21) \quad -k' x = \frac{2}{3} (T_m + a)^{3/2} + 2 T_m (T_m + a)^{1/2} + T_m \ln \frac{(T_m + a)^{1/2} - T}{(T_m + a)^{1/2} + T} + C.$$

Die Dämpfung ist also sehr verwickelt im Vergleich zu der Exponentialfunktion von Gl. (43 d) (s. u.), die  $x = C - \frac{1 g a}{\alpha}$  ergibt.  $\alpha$  ist dort nach Gl. (45 a) einzusetzen.

Entwickelt man die linke Seite der Gl. (20) nach einer Reihe, so erhält man:

$$(22) \quad \frac{T_m^{3/2} da}{a} + \frac{3}{2} T_m^{1/2} a + \frac{3}{8} \frac{a da}{T_m^{3/2}} - \frac{1}{16} \frac{a^2 da}{T_m^{5/2}} + \dots = -k' dx.$$

Die Integration ergibt:

$$(21a) \quad T_m^{3/2} \ln a + \frac{3}{2} T_m^{1/2} a + \frac{3}{16} \frac{a^2}{T_m^{1/2}} - \frac{1}{48} \frac{a^3}{T_m^{1/2}} + \dots + C = -k'x.$$

Zur Bestimmung von C setzt man  $a = a_0$  für  $x = 0$ , dann wird:

$$(23) \quad T_m^{3/2} \ln a_0 + \frac{3}{2} T_m^{1/2} a_0 + \frac{3}{16} \frac{a_0^2}{T_m^{1/2}} - \frac{1}{48} \frac{a_0^3}{T_m^{1/2}} + C = 0.$$

Die Differenz zwischen (21 a) und (23) ergibt:

$$(24) \quad T_m^{3/2} \ln \left( \frac{a_0}{a} \right) + \frac{3}{2} T_m^{1/2} (a_0 - a) + \frac{3}{16} \left( \frac{a_0^2 - a^2}{T_m^{1/2}} \right) - \frac{1}{48} \left( \frac{a_0^3 - a^3}{T_m^{1/2}} \right) + \dots = -k'x.$$

Man kann jedoch an Stelle der Gl. (22) auch das genaue Integral Gl. (21a) benutzen, dessen Integrationskonstante in gleicher Weise durch die Randbedingung bestimmt wird. Man erhält dann:

$$(24 a) \quad \frac{2}{3} (T_m + a)^{3/2} - \frac{2}{3} (T_m + a_0)^{3/2} + 2 T_m [(T_m + a)^{1/2} - (T_m + a_0)^{1/2}] + T_m \ln \frac{[(T_m + a)^{1/2} - T] [(T_m + a_0)^{1/2} + T]}{[(T_m + a)^{1/2} + T] [(T_m + a_0)^{1/2} - T]} = -k'x$$

(Gleichung der HW- und NW-Linie).

Für  $a = 0$  erhält man die Strecke X, die erforderlich ist, um die Welle zum Verschwinden zu bringen.  $\frac{X}{L}$  gibt dann die Anzahl der Reflexionen an, die dazu erforderlich sind (Abb. 4).

Die auftretenden Gezeitenwellen können ausgedrückt werden durch (nach Gl. (II) für  $\varphi = 0$ )

$$(25 a) \quad h_1 = a_1 \cos n \left( \frac{x}{c} - t \right)$$

für die erste von See einlaufende Welle und durch

$$(25 b) \quad h_2 = a_2 \cos n \left( \frac{x}{c} + t \right)$$

für die in entgegengesetzter Richtung laufende am anderen Kanalende reflektierte Welle.  $a_1$  und  $a_2$  sind mit  $x$  veränderlich.

Die durch Überlagerung entstehende resultierende Gezeitenwelle hat nach Gl. (III) die Form

$$(26) \quad h = h_1 + h_2 = a_1 \cos n \left( \frac{x}{c} - t \right) + a_2 \cos n \left( \frac{x}{c} + t \right) = a \cos n \left( \frac{x}{c} - t' \right)$$

(Gleichung der Stundenlinien), wobei:

$$a^2 = a_1^2 + 2 a_1 a_2 \cos 2 n t + a_2^2; \quad \text{tg } n t' = \frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2} \text{tg } n t.$$

$a$  ist ebenfalls eine Funktion von  $x$ . Der Zusammenhang zwischen beiden ist durch Gl. (24) und (24 a) gegeben.

a) Kanal zwischen einem Gezeitenmeer und einem gezeitenlosen Becken von unbegrenzter Ausdehnung (Abb. 3 und 4).

Für die Anwendung dieser Gleichungen wird zunächst der Fall des Kanals betrachtet, der an einem Ende mit der offenen See und mit dem anderen Ende mit einem Binnensee von unbegrenzter Oberfläche, dessen Höhe auf MW liegt, verbunden ist, so daß dort keine Gezeiten mehr auftreten können (Abb 3). Die eindringende Gezeitenwelle verliert einen Teil ihrer Energie auf dem Weg vom Meer zum See durch Reibung, wird am See reflektiert und wandert rückwärts zum Meer, wo sie wieder reflektiert wird usw., bis ihre Energie ganz aufgezehrt ist (Abb. 4). Die im Kanal entstehende Gezeit überlagert sich aus allen diesen Teilwellen.

Setzt man in Gl. (26)  $a_2$  negativ ein, rechnet also mit einer Umkehrung der reflektierten Welle und schreibt den Ausdruck  $\frac{x}{c} = t_x, \frac{L}{c} = -d, \frac{L-x}{c} = t_y$ , so erhält man

$$(27) \quad h_1 = a_1 \cos n (t - t_x) \quad \text{und} \quad -h_2 = -a_2 \cos n (t + d - t_y)$$

$$(28) \quad h = h_1 - h_2 = a \cos n (t - t_m),$$

wobei

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2 a_1 a_2 \cos n (t_x + d - t_y)$$

$$\text{tg } n t_m = \frac{a_1 \sin n t_x - a_2 \sin n (t_y - d)}{a_1 \cos n t_x - a_2 \cos n (t_y - d)}$$

Bei mehrfacher Reflexion überlagern sich die Einzelwellen folgendermaßen:

$$(29) \quad h = a_1 \cos n (t - t_1) + a_2 \cos n (t - t_2) + a_3 \cos n (t - t_3) + \dots + a_n \cos n (t - t_n).$$

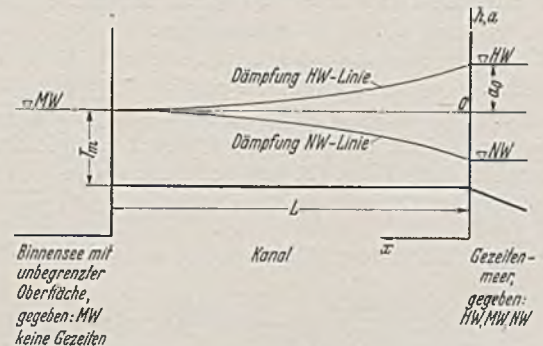


Abb. 3. Kanal zwischen einem Gezeitenmeer und einem gezeitenlosen Becken von unbegrenzter Ausdehnung. Dämpfung nach dem Energiegesetz.

Bei geneigter MW-Linie Überlagerung mit Fortschrittsgeschwindigkeit nach Gl. (26). Strömung nach Gl. (1). Dämpfung:  $x = f(a_0, a)$  nach Gl. (24a) Flutstundenlinien nach Gl. (28). Geschwindigkeiten nach Gl. (30).  $a = g(a_0, x)$ .

Dabei sind  $a_1, a_2, a_3$  die mit wechselnden Vorzeichen versehenen Ordinaten der HW- und NW-Linien der ersten, zweiten, dritten Welle,  $t_1, t_2, t_3$  die HW-Zeiten der ersten, zweiten, dritten Welle am Punkt  $x$ . Bei  $x = 0$  soll  $t_1 = 0$  sein.

Wenn sich die Höhen zweier Gezeitenwellen addieren, so müssen sich die Geschwindigkeiten bei der Reflexion der Welle subtrahieren.

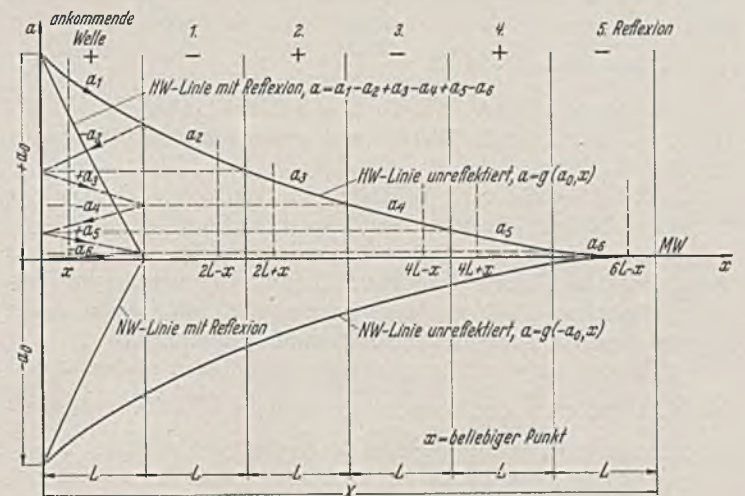


Abb. 4. Mehrfache Reflexion einer gedämpften Gezeitenwelle bis zum Erlöschen der Welle.

$$(30) \quad v = e_1 \cos n (t - t_1) - e_2 \cos n (t - t_2) - e_3 \cos n (t - t_3) \dots - e_n \cos n (t - t_n).$$

Nach Gl. (17) ist

$$v_n = a_n \sqrt{\frac{g}{T_m + a}}$$

Für die Reflexion am Binnensee gilt

$$(30 a) \quad e_n = -e_{n-1},$$

wenn  $n$  eine gerade Zahl ist, d. h. die reflektierte Geschwindigkeit ist gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet wie die ankommende. Ferner ist hier  $t_1 = t_2$ , da ankommende und reflektierte Welle die gleiche Phase haben. Man erhält daher am Endquerschnitt:

$$v_L = 2 e_1 \cos n (t - t_1) = 2 a_1 \sqrt{\frac{g}{T_m + a}} \cos n (t - t_1).$$

Für den Zeitpunkt  $t = t_1$  wird  $v_L = 2 a_1 \sqrt{\frac{g}{T_m}}$ , da am Einlauf zum Binnensee  $a = 0$  sein muß. Danach ist:

$$(31) \quad a_1 = \frac{1}{2} v_L \sqrt{\frac{T_m}{g}}$$

wenn  $v_L$  zur Zeit  $t_1$  gemessen wird. Man erhält somit die Dämpfung der Welle aus der Geschwindigkeit, die am Kanalende gemessen wird. Setzt man in Gl. (24) oder (24 a) den Wert  $a = a_1$ , so läßt sich für den Punkt L und damit das für den ganzen Kanal konstante  $k'$  und aus Gl. (20 a)  $k$  berechnen.

Will man hierzu statt des Endquerschnitts einen Zwischenquerschnitt verwenden, so wechselt man in Gl. (30) die Vorzeichen des 2., 4., 6. . . Gliedes, indem man die in Gl. (30 a) ausgedrückte Tatsache der Umkehr der Vorzeichen berücksichtigt. Das gleiche kann man auf Grund von Gl. (27) bei Gl. (29) tun. Addiert man die so erhaltenen Gleichungen, nachdem man die erstere durch

$\sqrt{\frac{g}{T_m + a}}$  geteilt hat, so erhält man nach einigen Vereinfachungen

$$(32) \quad h + v \sqrt{\frac{T_m + a}{g}} = 2 a_1 \cos n (t - t_1).$$

Hat man an dem beliebigen Zwischenpunkt  $x$  zur HW-Zeit ( $t = t_1$ )  $h = a$  und  $v$  gemessen, so läßt sich  $a_1$  nach dieser Gleichung errechnen

$$(32 a) \quad a_1 = \frac{1}{2} \left( a + v \sqrt{\frac{T_m + a}{g}} \right)$$

und in Gl. 24 oder 24 a einsetzen, um  $k'$  und damit  $k$  zu bestimmen.

Bei der Neuanlage von Kanälen, wo keine Messungen möglich sind, muß  $k$  geschätzt werden.

Rechnungsgang:

Gegeben:  $h_0 = a_0 \cos n t$ ,  $L$ ,  $T_m$ ,  $B_m$ ,  $p_m$ ,  $k$ ,  $k'$ .

1. Berechnung von  $k' dx$  nach Gl. (21 a) für die erste Welle  $h_1$ , HW-Teil. Hierbei werden für  $a = a_1$  beliebige positive Werte in regelmäßigen Abständen, beginnend mit  $a_0$ , z. B.  $+ 1,0$ ;  $+ 0,9$ ;  $+ 0,8$ ; usw. eingesetzt.

2. Berechnung von  $dx = \frac{k' dx}{k'}$ .

Addition der Werte  $dx$  ab  $x = 0$  (Kanaleinlauf), bis  $L$  erreicht ist. Damit ist die HW-Linie  $a_1$  gegeben und die Dämpfung errechnet.

3. Zwischenschaltung beliebiger Punkte  $x$  und Berechnung der dazugehörigen Werte  $a_1$  durch Interpolation.

4. Berechnung der Werte  $T_m + a$  für die verschiedenen Punkte  $x$  (meist interessieren nur die unter 3 zwischengeschalteten), wobei als Näherung angenommen wird, daß  $a$  von  $a_0$  am Kanaleinlauf bis  $0$  am Binnensee geradlinig abnimmt.

5. Berechnung der Fortschrittsgeschwindigkeit nach Gl. (16).

6. Berechnung der Fortschrittszeiten  $dt_1 = \frac{dx}{c}$  von der vorhergehenden bis zur untersuchten Station  $x$ , beginnend bei  $x = 0$ .

7. Addition der Zeiten  $dt_1$  ab Kanaleinlauf bis  $x = t_1$ .

8. Berechnung von  $n t_1$ .

Diese Berechnung wird bis zum Binnensee durchgeführt. Dort wird die Welle reflektiert.  $a$  erhält ein umgekehrtes Vorzeichen. Mit dem Binnensee als Ausgangspunkt der Zählung, also  $L - x$  an Stelle von  $x$ , am besten wird  $x$  von Anfang an durchgezählt, auch wenn die Richtung wechselt, wird die zurückgehende Welle genau so rechnerisch verfolgt wie die eingelaufene (Punkt 1 bis 3). Man beginnt mit Werten von  $a_2$  in Fortsetzung der vorher unter Punkt 1 zuletzt eingesetzten Zahlen und erhält die Werte  $a_2$  nach Punkt 3 für die einzelnen Stationen (Abb. 4).  $T_m + a$  (Punkt 4) und Punkt 5, 6 werden nicht neu berechnet. Die Werte bleiben die gleichen und werden nur in umgekehrter Richtung entsprechend der rückwandelnden Welle aneinandergesetzt. Die Addition der Fortpflanzungszeiten (Punkt 7) umfaßt die Zeiten der ersten Welle mit, wird also ebenso wie  $x$  fortlaufend weiter geführt ( $t_2$ ).

Der Vorgang wiederholt sich am Kanaleinlauf unter Umkehrung des Vorzeichens ( $a_3$ ). Die Rechnung wird solange fortgesetzt, bis die Höhe  $a_n = 0$  wird. Man erhält  $a_3, a_4$  usw.,  $t_3, t_4$  usw.

Zu diesem ersten Rechnungsgang tritt noch ein zweiter, in dem am Kanaleinlauf von  $-a_0$  anstatt  $+a_0$  ausgegangen wird (Berechnung der NW-Linie). Auch diese Rechnung wird solange durchgeführt, bis  $a_n = 0$  wird. Punkt 4 wird für  $T_m - a$  berechnet und damit der Tiefenunterschied bei HW und NW berücksichtigt.

Die Gesamttidebewegung besteht einmal aus der positiven Welle nach Gl. (29), in die die Werte  $a_1, a_2, a_3$  nach Punkt 3 und  $t_1, t_2, t_3$  nach Punkt 7 eingesetzt werden. Das gleiche wird mit der negativen Welle vorgenommen. Setzt man positive und negative Welle jede für sich nach Gl. (28) zusammen, so bekommt man je eine cos-Linie für die positive (HW) und die negative (NW) Welle. Der eine Ausdruck gilt nur über MW, der andere nur unter MW. Führt man bestimmte Werte für  $t$  ein, so lassen sich die Stundenlinien zeichnen. Die entsprechenden Ausdrücke für die Geschwindigkeit erhält man nach Gl. (17) und (30).

b) Längerer Kanal zwischen einem Gezeitenmeer und einem Wasserbecken von begrenztem Umfang (Abb. 5).

Zu den beiden Übertragungswellen, die bisher auftraten (einlaufende  $a_1$  und am Becken reflektierte Welle  $a_2$ ), tritt noch eine dritte, die durch die Hebung oder Senkung des Wasserspiegels

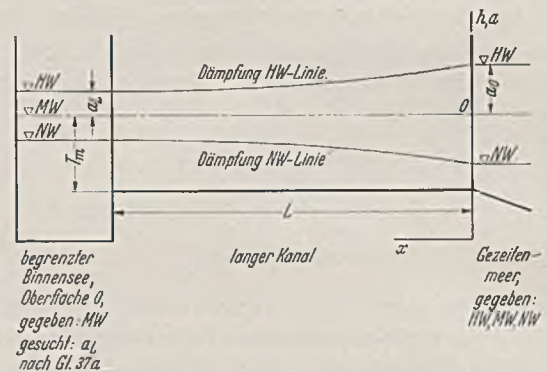


Abb. 5. Längerer Kanal zwischen einem Gezeitenmeer und einem Wasserbecken von beschränktem Umfang.

Dämpfung nach Gl. (22).  
Fortschritts-  
geschwindigkeit nach Gl. (16).  
Reflexion wie Abb. 3.  
Gleichung der HW- und NW-Linie: nach Gl. (33) und (21 a).

Stundenlinien nach Gl. (28).  
Geschwindigkeiten nach Gl. (30).  
Bei geneigter MW-Linie Überlagerung mit Strömung nach Gl. (1).

im Becken verursacht wird. Letztere hat die halbe Amplitude  $a_L$ , die Hochwasserzeit  $t_L$  und die größte Geschwindigkeit  $v_L$  (Gezeit im Becken).

Am Einlauf zum Becken ist dann:

$$(33) \quad h = a_1 \cos n \cdot (t - t_1) - a_2 \cdot \cos n (t - t_2) + a_L \cos n (t - t_L).$$

Zur Hochwasserzeit ist  $t = t_L$  und  $h = a_L$ ; wenn bei  $x = 0$  die HW-Zeit  $t_1 = 0$  ist, dann ist  $t_L = -d$ . Außerdem muß am Beckeneinlauf  $a_1 = a_2$  und  $t_1 = t_2$  sein, da direkte und reflektierte Welle die gleiche Phase haben. Man erhält dann aus Gl. (33) für den Punkt  $x = L$ :

$$(33a) \quad h = a_L \cos n \cdot (t + d).$$

$a_L$  und  $t_L$  hängen von der Amplitude der einlaufenden Welle  $a_1$  am Becken und der Größe des Beckens  $0$  ab. Die erste Abhängigkeit ergibt sich aus folgendem (vgl. Gl. (30) und (30a)):

$$(34) \quad v = e_1 \cos n (t - t_1) + e_2 \cos n (t - t_2) - e_L \cos n (t + d) = 2 e_1 \cos n (t - t_1) - e_L \cos n (t + d).$$

Wenn  $t = -d$ , ist  $v = 0$ , da zur HW-Zeit am Beckeneinlauf keine Geschwindigkeit vorhanden sein kann, wenn das Becken einen endlichen Umfang besitzt. Das Becken wirkt in der gleichen Weise wie ein Wasserschloß. Daher wird

$$(34a) \quad e_L = 2 e_1 \cos n (d + t_1).$$

Ist die größte Geschwindigkeit am Beckeneinlauf  $v_{\max}$ , dann ist

$v = v_{\max}$  zur Zeit  $t = -d + \frac{\tau}{4}$ . Infolgedessen ist:

$$(34b) \quad v_{\max} = 2 e_1 \sin n (d + t_1).$$

Teilt man Gl. (34a) durch  $\sqrt{\frac{g}{T_m + a_1}}$ , dann wird nach Gl. (17) am Punkt  $x = L$ :

$$(35) \quad a_L = 2 a_1 \cos n (d + t_1).$$

Die Abhängigkeit zwischen  $a_L$  und  $O$  läßt sich folgendermaßen ableiten:

Der Querschnitt am Beckeneinlauf sei  $F = F_m + a_1 B_m \cos n (t + d)$ . Die Wassermenge durch diesen Querschnitt ist  $dq = F v dt$ .

$$(36) \quad dq = [T_m B_m + a_1 B_m \cos n (t + d)] v_{\max} \sin n (t + d) dt,$$

da hier die Phasenverschiebung zwischen  $h$  und  $v$  den Wert  $\frac{\tau}{4}$  besitzt (vgl. Gl. (34a)).

$$dq = T_m B_m v_{\max} \sin n (t + d) dt + a_1 B_m v_{\max} \cos n (t + d) \sin n (t + d) dt.$$

$$Q = \int_{-d}^{-d + \tau/2} dq = \frac{T_m B_m v_{\max} \tau}{\pi}.$$

Aus Gl. (34a) und (34b) ergibt sich:

$$4 e_1^2 = e_L^2 + v_{\max}^2 \quad \text{und}$$

$v_{\max} = \sqrt{4 e_1^2 - e_L^2}$ ; setzt man für  $e_1$  und  $e_L$  den Wert aus Gl. (17)

$$e_1 = \frac{\sqrt{g} a_1}{\sqrt{T_m + a_1}}, \quad e_L = \frac{\sqrt{g} a_L}{\sqrt{T_m + a_L}} \quad \text{ein,}$$

so erhält man

$$(37) \quad v_{\max} = \sqrt{\frac{4 g a_1^2 - g a_L^2}{T_m + a_1}}$$

$$Q = \frac{T_m B_m \tau}{\pi} \sqrt{\frac{4 g a_1^2 - g a_L^2}{T_m + a_1}} = 2 O a_1.$$

Setzt man  $\frac{g T_m^2 B_m^2 \tau^2}{4 O^2 \pi} = K$ , so erhält man als Lösung:

$$(37a) \quad a_L^2 + (T_m + K) a_1^2 = 4 K a_1^2.$$

Treten wegen der Kürze des Kanals oder der Größe des Tidenhubs mehrfache Reflexionen auf, so gelten die Entwicklungen für das Becken von konstantem Inhalt [Gl. (29) u. (30)] mit dem Unterschied, daß auch  $a_L$  mehrfach reflektiert wird (Zusatzglied:  $+ a_{B1} \cos n (t - t_{B1}) + a_{B2} \cos n (t - t_{B2}) + \dots$ ). In diesem Fall (Haffmündungen) benutzt man jedoch besser als Näherungslösungen die bereits gegebenen Formeln für Haffkanäle [Gl. (1) bis (12)].

Rechnungsgang:

Gegeben:  $h_0 = a_0 \cos n t$ ,  $L$ ,  $T_m$ ,  $B_m$ ,  $p_m$ ,  $k$ ,  $k'$ ,  $O$ .

1. Berechnung von

- HW-Linie:  $a_1, a_2, a_3, \dots, t_1, t_2, t_3, \dots$  wie bei unbegrenztem Becken
- NW-Linie:  $-a_1, -a_2, -a_3, \dots, t_1, t_2, t_3, \dots$  wie bei unbegrenztem Becken. Siehe dort Punkt 1-8.

2. Berechnung von

- $a_L$  nach Gl. (37a) und
  - $d$  nach Gl. (35)
- für

- HW-Linie:  $a_1, a_2, a_3, \dots; t_1, t_2, t_3, \dots$
- NW-Linie:  $-a_1, -a_2, -a_3, \dots; t_1, t_2, t_3, \dots$

3. Zusammensetzung der HW- und der NW-Welle jede für sich aus ihren einzelnen Teilwellen nach Gl. (28).

4. Ermittlung der Geschwindigkeiten aus Gl. (17). Zusammensetzung nach Gl. (30).

Man erhält also

die HW- und NW-Linie nach Gl. (22)

die Fortschrittgeschwindigkeit nach Gl. (14)

die Gezeitenkurven nach Gl. (33), (35) und (37a)

die Stundenlinien nach Gl. (28), (33)

die Geschwindigkeitskurven nach Gl. (17) und (34).

c) Kanal zwischen zwei Gewässern mit unabhängigen Gezeiten (Abb. 6).

Die beiden Gezeiten haben an den Endpunkten des Kanals die Gleichungen:

$$(38) \quad h_0 = a_{01} \cos n (t - t_{01}) - a_{02} \cos n (t - t_{02}) + \dots \quad \text{und}$$

$$h_L = a_{L1} \cos n (t - t_{L1} + d) - a_{L2} \cos n (t - t_{L2} + d) + \dots$$

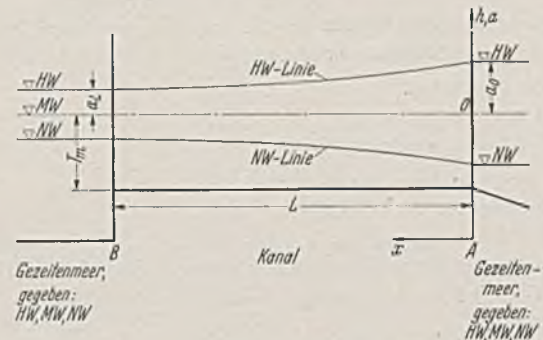


Abb. 6. Kanal zwischen zwei Gewässern mit unabhängigen Gezeiten.

Dämpfung nach Gl. (21 a).

Fortschrittgeschwindigkeit nach Gl. (16).

Reflexion wie Abb. 3.

Gleichung der HW- und NW-Linie nach Gl. (38), (39) und (21 a).

Stundenlinien nach Gl. (28).

Geschwindigkeiten nach Gl. (30).

Bei geeigneter MW-Linie Überlagerung mit der Strömung nach Gl. (1).

Für die Geschwindigkeiten gelten die entsprechenden Gleichungen [vgl. Gl. (30) und (34)].

$$(38a) \quad v_0 = c_{01} \cos n (t - t_{01}) + e_{02} \cos n (t - t_{02}) - e_{03} \cos n (t - t_{03}) + \dots \quad \text{und}$$

$$v_L = c_{L1} \cos n (t - t_{L1} + d) + e_{L2} \cos n (t - t_{L2} + d) - e_{L3} \cos n (t - t_{L3} + d) + \dots$$

Die Gesamtzeit im Kanal ist damit am Punkt  $x$ :

$$(39a) \quad h = h_{0x} + h_{Lx}$$

$$(39b) \quad v = v_{0x} - v_{Lx}$$

Es bedeutet:

$h_{0x}$  = die Gezeit im Punkt  $x$  infolge einer Gezeit  $a_0$  am Einlauf des Kanals und bei einem gezeitenlosen Binnensee am anderen Ende des Kanals.  $h_{Lx}$  = dass. für eine Gezeit am anderen Ende des Kanals und einem gezeitenlosen See am Einlauf.  $h_{0x}$  und  $h_{Lx}$  bestehen aus mehreren durch Reflexion entstandenen Teilwellen mit den Amplituden  $a_{01}, a_{02}, a_{L1}, a_{L2}$  usw. (jeweils mit  $x$  veränderlich wie in Gl. (26) und (29)).

Den Reibungskoeffizient  $k'$  findet man, indem man Gl. (39b)

mit den Ausdrücken von Gl. (38a) schreibt und durch  $\sqrt{\frac{g}{T_m + a_0 + a_1}}$  teilt. Fügt man diesen Ausdruck unter Beachtung von Gl. (17) zu Gl. (38) hinzu, so erhält man:

$$(40) \quad h + v \sqrt{\frac{T_m + a_0 + a_1}{g}} = h + h_v = 2 a_{01} \cos n (t - t_{01})$$

$$(40a) \quad + 2 [h_{Lx} - 2 a_{L1} \cos n (t - t_{L1} + d)]$$

$$h_{0x} - h_{Lx} + h_v = 2 a_{01} \cos n (t - t_{01}) - 2 a_{L1} \cos n (t - t_{L1} + d).$$

Bekannt sind am Kanalende der größeren Gezeit:

$$a_{01} = a_0, \quad t_{01} = 0, \quad h_{L0} = 0.$$

Man erhält aus Gl. (40a) für den Kanaleinlauf  $x = 0$  und die Zeit  $t = 0$ , da  $h_0 = a_0 \cos nt$ :

$$(41a) \quad h_{v0} = a_{00} - 2 a_{L0} \cos n (t_{L0} - d)$$

und am Ende des Kanals, an dem der geringere Tidenhub herrscht ( $x = L$ ):

$$(41b) \quad h_{vL} = 2 a_{0L} \cos n (t_{0L} + d) - a_{LL};$$

dabei ist:

$$a_{00} = a_0.$$

$$a_{LL} = a_L.$$

$a_{0L}$  = Höhe der ersten Gezeitenwelle infolge der Gezeit  $a_0$  am anderen Ende des Kanals ( $x = L$ );  $a_{L0}$  = Höhe der ersten Gezeitenwelle infolge der Gezeit  $a_L$  am anderen Ende des Kanals ( $x = 0$ );

$t_{0L}$ ,  $t_{10}$  sind die entsprechenden HW-Zeiten. Diese müssen näherungsweise aus den bekannten Gezeitenkurven  $h_0$  und  $h_L$  ermittelt werden, indem man für jede getrennt die Fortschrittszeit zwischen  $o$  und  $L$  berechnet.

Dann können  $a_{0L}$  und  $a_{0L}$  aus den obigen Ausdrücken ermittelt werden, wenn die Geschwindigkeiten  $v_0$  und  $v_L$  und damit auch  $h_{v0} = v_0 \sqrt{\frac{T_m + a_0}{g}}$  und  $h_{vL} = v_L \sqrt{\frac{T_m + a_L}{g}}$  gemessen sind.

Setzt man diese Werte in Gl. (24) ein, so kann hieraus  $k'$  und damit  $k$  berechnet werden.

Rechnungsgang:

Gegeben:  $h_0 = a_0 \cos n t$ ,  
 $h_L = a_L \cos n (t + d)$ ,  
 $L, T_m, B_m, P_m, k, k'$ .

1. Berechnung für die Gezeit  $h_0$

- a) HW-Linie:  $a_{01}, a_{02}, a_{03} \dots t_{01}, t_{02}, t_{03} \dots$  wie bei unbegrenztem Becken ohne Gezeiten am anderen Kanalende [Gl. (22)].
- b) NW-Linie:  $-a_{01}, -a_{02}, -a_{03} \dots t_{01}, t_{02}, t_{03} \dots$  wie unter a.

2. Berechnung der gleichen Werte für die Gezeit  $h_L$  bei unbegrenztem Becken ohne Gezeiten am anderen Ende.

3. Verfahren wie unter Abschnitt 4 b, Punkt 3.

4. Addition der Ergebnisse gemäß Gl. (39).

Man erhält die HW- und NW-Linie nach Gl. (22) und (39a), die Fortschrittsgeschwindigkeit nach Gl. (14), die Gezeitenkurven nach Gl. (39a) und (38), die Stundenlinien nach Gl. (39a), die Geschwindigkeitskurven nach Gl. (39b) und (38a).

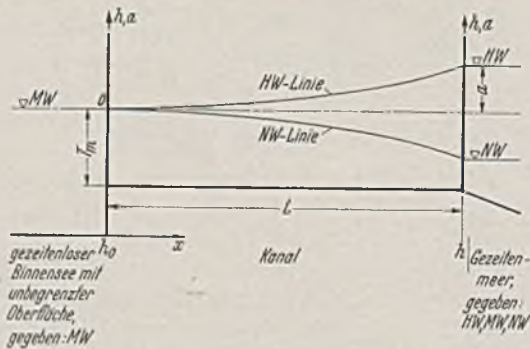


Abb. 7. Kanal zwischen einem Gezeitenmeer und einem gezeitenlosen Becken von unbegrenzter Ausdehnung.

Dämpfung nach einer Exponentialfunktion.

Dämpfung nach Gl. (45a).  
Fortschrittsgeschwindigkeit nach Gl. (46a).  
Gleichung der HW- und NW-Linie aus Gl. (44a) und (44b).  
Stundenlinien nach Gl. (43a).  
Geschwindigkeiten nach Gl. (43b).  
MW-Linie waagrecht.

### 5. Integration der Gezeitengleichungen ohne Oberwasserzufluß (Abb. 7).

Die Differentialgleichungen für die Gezeitenbewegung lauten:

$$(42) \quad -J = -\frac{dh}{dx} = \frac{v^m}{k_m^m T} + \frac{1}{g} \left( \frac{dv}{dt} + v \frac{dx}{dx} \right) \text{ (Abflussgleichung),}$$

$$(42a) \quad \frac{dq}{dx} = -B \frac{dh}{dt} \text{ (Kontinuitätsgleichung).}$$

Man kann dafür auch schreiben:

$$(42b) \quad \frac{d^2 \xi}{dt^2} + \frac{g}{k_m^m T} \left( \frac{d\xi}{dt} \right)^m - g T \frac{d^2 \xi}{dx^2} = 0,$$

$$(42c) \quad h = -T \frac{d\xi}{dx}.$$

Da  $\frac{d\xi}{dt} = v$  ist, kann man schreiben:

$$(42d) \quad \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{v^m}{k_m^m T} = T \frac{d^2 \xi}{dx^2}.$$

Setzt man Gl. (42c) in Gl. (42d) ein, so erhält man Gl. (42) und aus Gl. (42c) durch Differenzieren und Einsetzen von  $\frac{d\xi}{dt} = v$

Gl. (42a), wenn die Gleichungen, wie das meist der Fall ist, für die Einheit der Breite gelten.

Das Verfahren, die Gleichungen exakt zu lösen, beruht auf folgenden Vereinfachungen: das Glied  $v \frac{dv}{dx}$  wird vernachlässigt, da es meist unbedeutende Werte liefert.  $m$  wird gleich 1 gesetzt (s. o.).

Die Lösung für einen Kanal, der ein gezeitenloses Becken mit einem Gezeitensee verbindet (Abb. 7), lautet:<sup>7</sup>

$$(43a) \quad h = P' \sin nt + Q' \cos nt$$

$$= \sqrt{P'^2 + Q'^2} \cos \left( nt + \arctg -\frac{P'}{Q'} \right).$$

$$(44a) \quad P' = \frac{2 a_L}{\Delta} [\sin \alpha (L-x) \sin r (L+x) - \sin \alpha (L+x) \sin r (L-x)],$$

$$(44b) \quad Q' = \frac{2 a_L}{\Delta} [-\cos \alpha (L-x) \cos r (L+x) + \cos \alpha (L+x) \cos r (L-x)],$$

$$(44c) \quad \Delta = 2 \left( \frac{e^{2\alpha L} + e^{-2\alpha L}}{2} - \cos 2 r L \right),$$

wobei  $h_0 = 0$  bei  $x = 0$  und  $h_L = a_L \cos nt$  bei  $x = L$ ,

$$(45a) \quad \alpha = \sqrt{\frac{n}{2 g T_m} \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{g^2}{T_m^2 n^2 k^2}} \right)},$$

$$(46a) \quad r = \frac{n}{c} = \sqrt{\frac{n}{2 g T_m} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{g^2}{T_m^2 n^2 k^2}} \right)},$$

$$(46b) \quad c = \sqrt{\frac{2 g T_m}{1 + \sqrt{1 + \frac{g^2}{T_m^2 n^2 k^2}}}}.$$

Die Geschwindigkeit wird:

$$(43b) \quad \frac{d\xi}{dt} = v = \sqrt{M'^2 + N'^2} \cos \left( nt + \arctg -\frac{M'}{N'} \right).$$

$$(44d) \quad M' = \frac{2 a_L n}{T_m \cdot \Delta \cdot (\alpha^2 + r^2)} [\alpha \langle \sin \alpha (L+x) \cos r (L-x) + \sin \alpha (L-x) \cos r (L+x) - r \langle \cos \alpha (L+x) \sin r (L-x) + \cos \alpha (L-x) \sin r (L+x) \rangle],$$

$$(44e) \quad N' = \frac{2 a_L n}{T_m \cdot \Delta \cdot (\alpha^2 + r^2)} [\alpha \langle \cos \alpha (L+x) \sin r (L-x) + \cos \alpha (L-x) \sin r (L+x) \rangle + r \langle \sin \alpha (L+x) \cos r (L-x) + \sin \alpha (L-x) \cos r (L+x) \rangle].$$

In diesen Gleichungen hat die Lösung die Form:

$$(43c) \quad h = A e^{(\alpha + ir)x} \cos nt + B e^{(\alpha + ir)x} \sin nt$$

mit dem reellen Teil:

$$h = A e^{\alpha x} \cos (nt + rx) + B e^{\alpha x} \sin (nt + rx).$$

Für positives und negatives  $\alpha$  und  $r$  gibt es insgesamt vier partikuläre Integrale, deren Summe das allgemeine Integral bildet. Nach Einsetzen der Randbedingungen erhält man die Gl. (44a) und (44b), wo  $Q' = A e^{(\alpha + ir)x}$  und  $P' = B e^{(\alpha + ir)x}$  ist. Die Dämpfung der Gezeitenwelle vollzieht sich hier im Unterschied zu den bisherigen Lösungen nach einem Exponentialgesetz ( $e^{\alpha x}$ ).

Treten an beiden Enden des Kanals Gezeiten auf, so sind die Gleichungen zweimal anzuwenden und zu überlagern. Nach Gl. (43a) tritt im Querschnitt  $x$

$$h_{\max} = a_L \sqrt{\frac{\cos^2 2 \alpha x - \cos 2 r x}{\cos^2 2 \alpha L - \cos 2 r L}}$$

zur Zeit  $t = \pi/2 n - Q'/P' n$  auf, nach Gl. (43b) beträgt der größte

Strom  $\sqrt{M'^2 + N'^2}$  zur Zeit  $t = \frac{1 + \arctg \frac{N'}{M'}}{n}$ . Bei verschiedenen

<sup>7</sup> Parsons, W. B.: The Cape Cod Canal. Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs. 82 (1918) S. 1.

Harwood, E. C.: Proposed Improvement of Cape Cod Canal. Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs. 61 (1935) S. 1171, 62 (1936) S. 265.

<sup>6</sup> Vgl. Fußnote 1, S. 438.



MW der beiden Enden des Kanals muß die gleichförmige Gefällströmung des Wassers hinzuaddiert werden. Deren mittlere Geschwindigkeit ist:  $v = k^m T_m J$ , wobei  $J$  das Gefälle zwischen den beiden MW ist. Bei kurzen Kanälen und großem Gefälle müssen die Gleichungen für nicht stationäre Bewegung (Stau- und Senkungskurve) genommen werden.

Rechnungsgang:

Gegeben:  $h_L = a_L \cos nt$ ,  $h_0 = 0$ ,  $L$ ,  $T_m$ ,  $B_m$ ,  $P_m$ ,  $k$ ,  $n$

1. Berechnung des Dämpfungsfaktors  $\alpha$  nach Gl. (45a).
2. Berechnung des Fortschritts  $r$  nach Gl. (46a).
3.  $\Delta$  nach Gl. (44c).
4.  $P'$  nach Gl. (44a).
5.  $Q'$  nach Gl. (44b).
6.  $h$  nach Gl. (43a).
7.  $M'$  nach Gl. (44d).
8.  $N'$  nach Gl. (44e).
9.  $v$  nach Gl. (43b).

Bei beiderseitigen Gezeiten Wiederholung für  $h_0 = a_0 \cos n(t-d)$  und  $h_L = 0$ .

Überlagerung der Ergebnisse.

Wiederholung des Verfahrens für die übrigen Werte  $n$ ,  $a$  und  $d$  der anderen Teiltiden, wie bei den übrigen Verfahren.

Man erhält die HW- und NW-Linie  $a = \sqrt{P'^2 + Q'^2}$  aus Gl. (44a und b), die Fortschrittsgeschwindigkeit aus Gl. (46b), die Stundenlinien aus Gl. (43a), die Geschwindigkeit aus Gl. (43b).

Bei diesem Verfahren wird die Gezeitenwelle nur einmal reflektiert. Infolgedessen ist eine mehrfache Überlagerung nicht erforderlich.

Für den Fall, daß beiderseitige Gezeitenbewegungen oder andere Randbedingungen vorhanden sind, läßt sich die mehrfache Anwendung des Verfahrens sparen, wenn man die Lösung der Gl. (42) und (42a) schreibt<sup>8</sup>:

$$(47a) \quad h_L = A' h_0 + B' q_0$$

$$(47b) \quad q_L = C' h_0 + A' q_0$$

dabei sind  $h_0$  und  $q_0$  Gezeitenkurven am Ort  $o$ :

$$(48a) \quad h_0 = a_0 \cos (nt + \varphi)$$

$$(48b) \quad q_0 = s_0 \cos (nt + \psi).$$

Sind diese bekannt, so erhält man  $h$  und  $q$  an einem anderen Punkte ebenfalls als  $\cos$ -Funktionen, die gegenüber  $h_0$  und  $q_0$  eine Phasenverschiebung und Dämpfung aufweisen. Es genügt allgemein, wenn von den vier Größen  $h_0$ ,  $q_0$ ,  $h_L$ ,  $q_L$  zwei bekannt sind. An Stelle von  $h_L$ ,  $q_L$  kann auch jeder beliebige Punkt  $x$  stehen, also  $h_x$ ,  $q_x$ .

Folgende Randbedingungen seien betrachtet:

1. Kanal zwischen Gezeitenmeer und gezeitenlosem Binnensee von unbegrenzter Ausdehnung.

Gegeben:  $h_0 = a_0 \cos nt$   
 $h_L = 0$ ,

Gesucht:

$$(47c) \quad q_0 = -\frac{A'}{B'} a_0 \cos nt.$$

$$(47d) \quad q_L = \left( C' - \frac{A'^2}{B'^2} \right) a_0 \cos nt.$$

2. Kanal zwischen zwei Gezeitenmeeren.

Gegeben:  $h_0 = a_0 \cos nt$   
 $h_L = a_L \cos n(t+d)$ .

Gesucht:

$$(47e) \quad q_0 = \frac{a_L \cos n(t+d) - A' a_0 \cos nt}{B'}$$

$$(47f) \quad q_L = C' a_0 \cos nt + \frac{A' a_L \cos n(t+d) - A'^2 a_0 \cos nt}{B'}$$

3. Kanal zwischen einem Gezeitenmeer und einem Wasserbecken von beschränktem Umfang.

Gegeben:  $h_0 = a_0 \cos nt$   
 $O$  (Oberfläche des Beckens)

Gesucht:  $h_L$ ,  $q_0$ ,  $q_L$ ,  $d$

$$(37b) \quad \int_{-d}^{\frac{r}{2}-d} dq_L = 2 \cdot O \cdot a_L$$

$$h_L = A' h_0 + B' q_0$$

$$q_L = C' h_0 + A' q_0$$

$q_L = 0$  bei  $h_L = a$ , daher

$$q_L = s_L \sin n(t+d)$$

$$h_L = a_L \cos n(t+d),$$

daher:

$$(37c) \quad s_L = 2 \cdot O \cdot a_L$$

$$a_L \cos n(t+d) = A' a_0 \cos nt + B' q_0$$

$$s_L \sin n(t+d) = C' a_0 \cos nt + A' q_0,$$

ferner ist: nach Gl. (43d und e):

$$\operatorname{tg} n d = \left( \frac{a_0}{a_L} \frac{1}{\operatorname{Co} \alpha L} + \operatorname{Tg} \alpha L \right) \operatorname{tg} r L,$$

wo  $r$  nach Gl. (46a) eingesetzt wird. Man erhält für  $a_L$  und  $q_0$  die beiden Gleichungen:

$$(47g) \quad a_L \cos n(t+d) = A' a_0 \cos nt + B' q_0$$

$$(47h) \quad 2O a_L \sin n(t+d) = C' a_0 \cos nt + A' q_0$$

4. Stichkanal.

Gegeben:  $h_0$ ,  $q_L = 0$ .

Gesucht:

$$(47i) \quad q_0 = -\frac{C'}{A'} h_0$$

$$(47k) \quad h_L = \left( A' - \frac{B' C'}{A'} \right) h_0.$$

Die Beiwerte  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  dieser Ausdrücke enthalten die Dämpfung und die Fortschrittsgeschwindigkeit der Gezeitenwelle und werden folgendermaßen bestimmt.

Da allgemein  $e^{ix} = \cos x + i \sin x$ , kann man die  $\cos$ -Funktion als den reellen Teil der Funktion  $e^{ix}$  bezeichnen<sup>9</sup>. Da  $e^{ix}$  ein Integral der Gl. (42) ist, stellt dieser reelle Teil allein bereits eine Lösung der Gezeitengleichungen dar, so daß man schreiben kann (Gl. I):

$$h = a \cos (nt + \varphi) = a e^{i(nt + \varphi)}$$

$$= a e^{i\varphi} e^{int}.$$

$e^{int}$  ist für die Rechnung konstant. Amplitude und Phase lassen sich ausdrücken durch:

$$(49a) \quad a e^{i\varphi} = M + iN$$

$$(49b) \quad M = a \cos \varphi \quad N = a \sin \varphi.$$

Die Gezeitenwelle wird (Gl. II):

$$h = a e^{-\alpha x} \cos (nt - rx + \varphi)$$

$$= a e^{i\varphi} e^{int - (x + ir)x}.$$

Das allgemeine Integral der Gl. (42) lautet in einer etwas anderen Form als Gl. (43c) geschrieben (Abb. 8), wenn  $\alpha$  und  $r$  ohne Vorzeichen eingesetzt werden

$$(43d) \quad h = a' e^{-\alpha x} \cos (nt - rx + \varphi') + a'' e^{\alpha x} \cos (nt + rx + \varphi'')$$

$$= a' e^{i\varphi'} e^{int - (\alpha + ir)x} + a'' e^{i\varphi''} e^{int + (\alpha + ir)x}.$$

Da weder  $a'$  und  $a''$  noch  $a' e^{-\alpha L}$  und  $a'' e^{\alpha L}$  gleich groß sind, handelt es sich bei der Überlagerung dieser beiden Wellen nicht um eine Reflexion.  $a'$ ,  $a''$ ,  $\varphi'$ ,  $\varphi''$  ergeben sich aus den Randbedingungen.

Um die Beiwerte  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  zu erhalten, drückt man zunächst die mit  $a$  und  $\varphi$  gegebenen Gezeiten am Ende des Kanals durch  $M = a \cos \varphi$  und  $N = a \sin \varphi$  aus. Die Konstanten  $A'$ ,  $B'$  und  $C'$

<sup>8</sup> Verslag Staatscommissie Zuiderzee 1918 bis 1926. s'Gravenhage 1926.

Thysse, J. Th.: Einfluß der Abschließung der Zuidersee auf das Verhalten der Gezeiten längs der niederländischen Küste. Z. d. Internat. Ständigen Verbandes d. Schifffahrtkongresse 1933, Heft 15.

<sup>9</sup> Hütte I, S. 61, 81, 158. Berlin 1931.

der Lösung bestehen dann ebenfalls aus der Form  $M + i N$ :

$$(44f) \quad A' = \cos r L \cos \alpha L + i \sin r L \sin \alpha L,$$

$$(44g) \quad B' = -\frac{R'}{B_m n} [(\cos \vartheta_0/2 \cos r L \sin \alpha L + \sin \vartheta_0/2 \sin r L \cos \alpha L) - i (\sin \vartheta_0/2 \cos r L \sin \alpha L - \cos \vartheta_0/2 \sin r L \cos \alpha L)],$$

$$(44h) \quad C' = \frac{B_m n}{R'} [(-\cos \vartheta_0/2 \cos r L \sin \alpha L + \sin \vartheta_0/2 \sin r L \cos \alpha L) - i (\sin \vartheta_0/2 \cos r L \sin \alpha L - \cos \vartheta_0/2 \sin r L \cos \alpha L)].$$

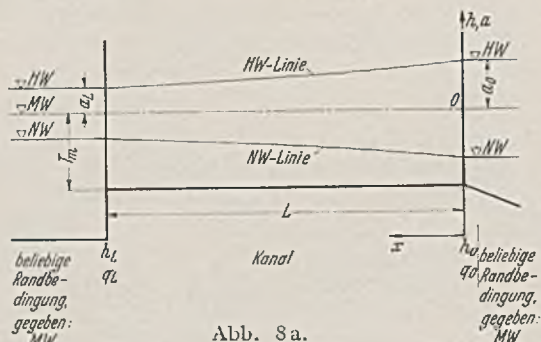


Abb. 8a.

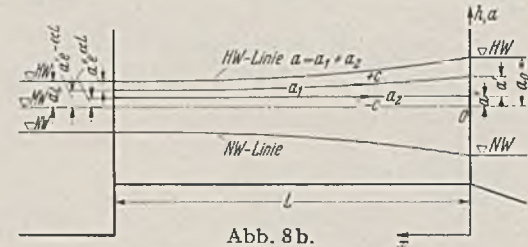


Abb. 8b.

Abb. 8. Kanal mit beliebigen Randbedingungen und Dämpfung nach einer Exponentialfunktion.

MW-Linie waagrecht, Dämpfung nach Gl. (45b), Fortschrittsgeschwindigkeit nach Gl. (46b).  
HW- und NW-Linie nach Gl. (43d), Flutstundenlinien nach Gl. (43d), Geschwindigkeit nach Gl. 47.

An Stelle von  $L$  kann auch  $x$  oder  $L-x$  geschrieben werden, je nachdem für welchen Punkt die Gezeitenwerte gesucht werden.

$$(50a) \quad \operatorname{tg} \vartheta_0 = \frac{K'}{G'} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Summe über die einzelnen} \\ \text{Teile bei unregelmäßigen} \\ \text{Querschnitten} \end{array} \right\}$$

$$(50b) \quad K' = \sum b T_m \cos \vartheta \sin \vartheta$$

$$(50c) \quad G' = \sum b T_m \cos^2 \vartheta$$

$$(51) \quad \operatorname{tg} \vartheta = \frac{g}{T_m n k} \quad \left. \begin{array}{l} \text{für einen Querschnittsteil (s. o.),} \\ \text{für den ganzen Querschnitt} = \operatorname{tg} \vartheta_0. \\ \text{(regelmäßiger Querschnitt)} \end{array} \right\}$$

Man setzt als Mittelwert über die Gezeitenperiode

$$(53) \quad k = \frac{k_2^2}{0,85 v_{\max}}$$

$v_{\max}$  muß geschätzt werden. Die Umrechnung von  $k$  auf  $k_2$  erfolgt, um die Ungenauigkeit, die durch die Annahme  $m = r$  entsteht, wieder auszugleichen.

$$(52) \quad R' = \sqrt{\frac{B_m \cdot n^2 \cos \vartheta_0}{G' g}}$$

$$(46b) \quad r = R' \cdot \cos \vartheta_0/2 = \frac{n}{c}$$

$$(45b) \quad \alpha = R' \sin \vartheta_0/2$$

$$(46c) \quad c = \frac{n}{R' \cos \vartheta_0/2}$$

Die Werte  $\alpha$  und  $r$  sind die gleichen wie in Gl. (45a) und (46a). Multipliziert man in Gl. (47) die Werte aus den Gleichungen (49) und (44f-h) miteinander, so erhält man für  $h$  und  $q$  wiederum eine Gleichung von der Form Gl. (49) und kann daraus die neue Amplitude  $a$  und Phase  $\varphi$  berechnen, die in der Entfernung  $L$  vom Ausgangspunkt auftritt.

Am Ausgangspunkt  $o$  ist die Schwingung durch Gl. (48) ge-

geben. Lautet z. B. für einen Ort zur Zeit  $t = 0$  die Gleichung der  $M_2$ -Tide

$$h = 1,578 \cos (1,405 \cdot 10^{-4} t + 46^\circ), \text{ so wird}$$

$$M = 1,578 \cos 46^\circ = 1,097$$

$$N = 1,578 \sin 46^\circ = 1,152$$

$$h = 1,097 + 1,132 i.$$

Rechnungsgang.

Gegeben:

$h_0 = a_0 \cos nt$  sowie eine zweite Randbedingung,  $L, T_m, B_m, P_m, k_2, n$

1. Schätzung von  $v_{\max}$ .
2. Berechnung von  $k$  nach Gl. (49).
3.  $\vartheta$  nach Gl. (48).
4.  $G'$  nach Gl. (47b)
5.  $K'$  nach Gl. (47a)
6.  $\vartheta_0$  nach Gl. (47)
7.  $R'$  nach Gl. (50).
8.  $r$  nach Gl. (50a).
9.  $\alpha$  nach Gl. (51).
10.  $A', B', C'$  nach Gl. (46).
11.  $M$  und  $N$  für  $h_0$  und die zweite Randbedingung  $h, q$  oder  $q_0$  nach Gl. (45).
12.  $h, q$  oder  $q_0$  nach Gl. (43).
13. Umrechnung der neuen  $M, N$  der Gl. (43) in  $a$  und  $\varphi$ .
14. Kontrolle, ob  $v_{\max}$  richtig gewählt war.
15. Fortsetzung für die nächsten Teilstücke des Kanals, da nur für Strecken mit ungefähr gleichbleibendem Querschnitt jeweils gerechnet werden darf.
16. Wiederholung der Rechnung für die anderen Tiden.
17. Überlagerung der Tiden zu der endgültigen Gezeitenkurve. Man erhält demnach die HW- und NW-Linie nach Gl. (43d) und Gl. (IV), die Fortschrittsgeschwindigkeit nach Gl. (46c) oder (46a), die Stundenlinien nach Gl. (43d), die Geschwindigkeit aus Gl. (47).

### 6. Näherungsverfahren.

Die Integration der Gezeitengleichung ist das genaueste Verfahren, das zur Lösung der gestellten Aufgabe dient. Trotz der Vereinfachungen erhält man im großen und ganzen zuverlässige

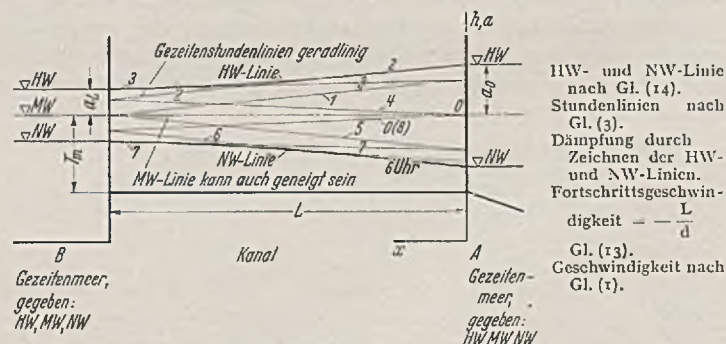
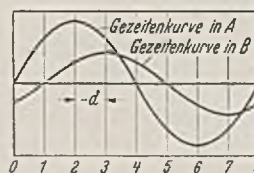


Abb. 9. Näherungsweise Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit und Wasserstände in einem Kanal zwischen Becken mit ein- oder beiderseitigen Gezeiten nach Chézy.



Zu Abb. 9. Zusammengehörige Wasserstände für die Stundenlinien (Linien gleichzeitiger Wasserstände).

Werte, insbesondere für Seekanäle. Häufig genügt es jedoch, sich näherungsweise ein ungefähres Bild von dem Verlauf der Gezeit, insbesondere der Größe von  $v_{\max}$  zu machen. Hierfür ist die Rechenarbeit, die mit der genauen Integration verbunden ist, zu groß.

Als einfachster Ansatz kann die Gl. (1) für den gleichförmigen Abfluß von Chézy dienen, die in Abschnitt 3 beschrieben wurde.

Man setzt bei Verwendung dieses Ausdrucks ein gerades, zeitlich unverändertes Spiegelgefälle voraus (Abb. 9), das genau wie bei kurzen Kanälen angenommen werden kann. Setzt man einen mittleren Wert für die Wassertiefe  $T_m$  ein, so kann man aus den gegebenen Gezeitenkurven an den Enden des Kanals die  $v_{max}$  für das größte Gefälle der Stundenlinien schätzen Gl. (3, 1, 14, 13). Diese Anwendung der Gleichung ist zulässig, wenn ein starker Wasserstandsunterschied an den beiden Enden des Kanals, also ein großes Gefälle  $J$  vorhanden ist. Beim Cape Cod Kanal war die Übereinstimmung bei einer Kanallänge von 9000 m und einem Tidenhub an den Einfahrten von 1,8 bzw. 2,5 m befriedigend. Bei Becken mit beschränkter Oberfläche wendet man das Verfahren der Gl. (1-13) an.

Bei stark wechselnden Querschnitten ersetzt man diese Schätzung durch die Verwendung der Staukurve an Stelle der

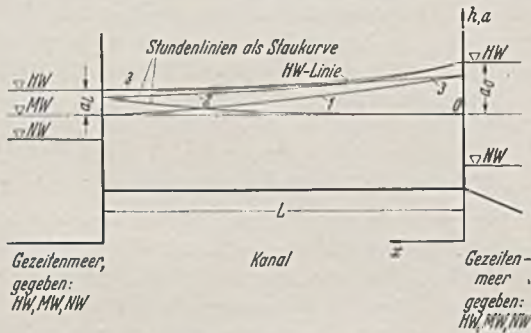


Abb. 10. Näherungsweise Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit und Wasserstände in einem Kanal zwischen Becken mit ein- oder zweiseitigen Gezeiten nach Bubendey.

Zusammengehörige Wasserstände wie Abb. 8. Stundenlinien als Staukurven nach Gl. (55a). HW- und NW-Linien gebildet durch die höchsten und niedrigsten Punkte der Stundenlinien. Dämpfung durch Zeichnen der HW- und NW-Linien. Fortschrittsgeschwindigkeit =  $-L/d$  (Gl. 13). Geschwindigkeit nach Gl. (55b). MW-Linie kann auch geneigt sein.

Geraden (Abb. 10). Diese Näherung wurde früher von Bubendey im Handbuch der Ingenieurwissenschaften angegeben.

$$(54) \quad -\frac{dT}{dx} = -\frac{u}{g} \frac{q^2}{F^3} \frac{dF}{dx} + \frac{q^2 p}{F^3 k_2^2}$$

Hierbei ist

$$\mu = \text{Erfahrungsbeiwert} = 1,1.$$

Bei einem parabolischen Kanalquerschnitt ist  $B = 2 \sqrt{v \cdot T_{max}}$ .

Wenn  $v$  = Parameter der Parabel, erhält man  $F = \frac{4}{3} \sqrt{v \cdot T_{max}} \cdot T_{max}$  und

$$(55a) \quad \frac{dT_{max}}{dx} = \frac{27 \mu q^2}{32 g v T_{max}^4} \frac{dT_{max}}{dx} - \frac{27 q^2}{32 k_2^2 v T_{max}^4}$$

$$dx = x_L - x_0, \quad dT = T_{L, max} - T_{0, max}$$

$$(55b) \quad x_L - x_0 = \frac{\mu k_2^2}{g} (T_{L, max} - T_{0, max}) - \frac{32 k_2^2 v}{135 q^2} (T_{L, max}^3 - T_{0, max}^3)$$

Aus dieser Gleichung können die Unbekannte  $q$  und damit alle Wasserstände und Geschwindigkeiten im Kanal berechnet werden. Bei trapezförmigem Querschnitt erhält man:

$$\text{bei } x = x_0 : F_1, B_1$$

$$x = x_L : F_2, B_2.$$

Hieraus läßt sich der Parameter der gleichwertigen Parabel berechnen.

$$(56) \quad v = \frac{1}{2} \left( \frac{B_1^4}{6 F_1} + \frac{B_2^4}{6 F_2} \right)$$

Ist  $a'_1, a'_2$  der Abstand des Parabelscheitels vom niedrigeren Seespiegel bei  $x = x_0$  bzw.  $x = x_L$  und  $H$  der Unterschied des Spiegel für einen bestimmten Zeitpunkt an den beiden Enden des Kanals, so ist  $\frac{2}{3} a'_1 B_1 = F_1$  und  $\frac{2}{3} (a'_2 + H) B_2 = F_2$ . Man setzt

$$(57) \quad \bar{a}_1 = \frac{a'_1 + a'_2}{2}$$

$T'_L, T'_0$  = Tiefen des Trapezquerschnitts an der Ein- und Ausfahrt des Kanals,

$$T_{L, max} = T'_L + (\bar{a}_1 - T'_L) = \bar{a}_1,$$

$$T_{0, max} = T'_0 + (\bar{a}_1 - T'_0), \text{ wobei } T_{0, max}, T_{L, max} = \text{max.}$$

Tiefen der Ersatzparabeln sind.

Rechnungsgang.

Gegeben:  $x_0 = 0, x_L, T'_L, T'_0, H, F_1, B_1, F_2, B_2$  für den Zeitpunkt des größten Spiegelunterschieds  $H$  an beiden Enden des Kanals.

Man erhält  $v$  aus Gl. (56)

$$a'_1 = 1,5 \frac{F_1}{B_1}, \quad a'_2 = 1,5 \frac{F_2 - 2/3 H B_2}{B_2}$$

$$\bar{a}_1 \text{ aus Gl. (57), } T_{0, max}, q_2 \text{ aus Gl. (55b),}$$

$$v_{max} = \frac{q}{F_1}$$

Die Anwendung dieser Näherungsformel empfiehlt sich vor allem bei kurzen Kanälen mit starker Veränderung der Querschnitte, also großem  $\frac{dF}{dx}$ . Man erhält die HW- und NW-Linie aus den höchsten Punkten der Stundenlinien, die nach Gl. (55a) ermittelt werden. Die Geschwindigkeiten ergeben sich aus Gl. (52b).

Von der französischen Akademie der Wissenschaften wurde 1886 für den Entwurf eines schleusenlosen Panamakanals eine Näherungsformel für den Fall ausgearbeitet, daß ein Wasserlauf ohne Gezeiten mit einem Gezeitenmeer durch einen Kanal verbunden wird (Abb. 11). Der Tidenhub vermindert sich gleichmäßig zum gezeitenlosen See hin (geradlinige Dämpfung).

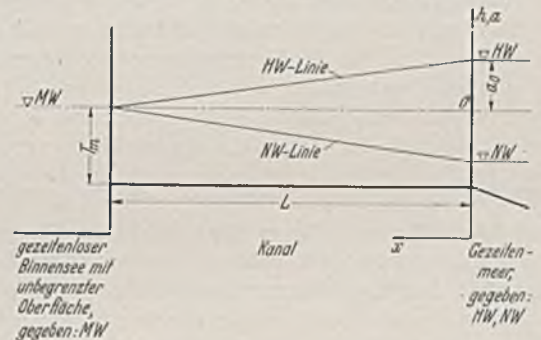


Abb. 11. Näherungsweise Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit und Wasserstände in einem Kanal zwischen einem Gezeitenmeer und einem gezeitenlosen Becken von unbegrenzter Ausdehnung. Geradlinige Dämpfung.

Dämpfung geradlinig nach Gl. (57). Stundenlinien nach Gl. (57). Fortschrittsgeschwindigkeit nach Gl. (5c). Geschwindigkeit nach Gl. (1). Reflexion nicht vorhanden. MW-Linie waagrecht. Gleichung der HW- und NW-Linie  $a = \pm a_0 (1 - L/x)$

$$(57) \quad h = a_0 \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \cos n \left( t - \frac{x}{c} \right)$$

$$(5a) \quad c = \sqrt{g (T_m + 1,5 h)} \pm Av,$$

$t$  gemessen ab HW nach Gl. (1)

$$A = \text{Beiwert bei Flut } 0,4$$

$$\text{bei Ebbe } 1,2.$$

Die Formel kann auf eine Gezeitenbewegung an beiden Enden des Kanals durch Überlagerung angewendet werden. In der Formel für  $c$  muß  $h$  zunächst geschätzt werden, oder man rechnet wie beim Cape-Cod-Kanal mit

$$(5b) \quad c = \sqrt{g T_m}$$

Dort wurde für  $t$  die geschätzte Zeit zwischen  $v_{max}$  im Kanal und NW am Ende eingesetzt. Man berechnete  $h_1$  für  $x = x_1$  und  $h_2$  für  $x = x_2$  und daraus das Spiegelgefälle  $J_1 = \frac{h_1 - h_2}{x_1 - x_2}$  für eine

Teilstrecke,  $J_2$  für die Gezeit vom anderen Ende des Kanals,

$$(58) \quad J = J_1 + J_2 \text{ und } v = k_2 \sqrt{T J}$$

Die Ergebnisse waren befriedigend, nur bei geringen Geschwindigkeiten wird die Gleichung ungenau.

Rechnungsgang.

Gegeben:  $h_0 = a_0 \cos nt$ ,  $h_L = 0$ ,  $L$ ,  $T_m$ ,  $B_m$ ,  $P_m$ ,  $k_2$ ,  $n$

1.  $c$  nach Gl. (5b).
2.  $h$  nach Gl. (57).
3.  $v$  nach Gl. (1).

Bei Gezeiten an beiden Enden des Kanals Wiederholung für das gegebene

$$(57a) \quad h_L = a_L \frac{x}{L} \cdot \cos n \left( t + d + \frac{x}{c} \right), \text{ und}$$

$v$  nach Gl. (1) für  $J$  nach Gl. (58). Die HW- und NW-Linie ist im ersten Fall eine Gerade, die Stundenlinien ebenfalls Gl. (57), im zweiten Fall erhält man die HW- und NW-Linie durch Zeichnen der Stundenlinien als Summe für beide Gezeiten nach Gl. (57) und Auftragung der höchsten Punkte derselben in jedem Profil.

Man kann auch die  $\Sigma h$  gleich  $C \cos n \left( t - \frac{x}{c} + d' \right)$  setzen und  $C$  rechnerisch bestimmen nach dem Muster der Gl. (3a und b).

Allgemein läßt sich über das Anwendungsgebiet der Näherungsformeln für  $v_{\max}$  folgendes sagen:

1. bei Kanälen mit  $rL = \frac{nL}{c} > 0,35$  : Formel von Bubendey.
2. für  $rL = 0,35$  bis  $0,55$  : Formel von Chézy.
3. für  $rL > 0,55$  : Formel der französischen Akademie.

### 7. Ergebnisse.

#### a) Der Rauigkeitsbeiwert.

Der Rauigkeitsbeiwert  $k$  oder  $k_2$  ist von wesentlichem Einfluß auf die Ergebnisse der Rechnung und muß deshalb mit Sorgfalt bestimmt werden. Bei der Nachrechnung vorhandener Anlagen benutzt man zur Bestimmung von  $k_2$  am besten Gl. (42), wozu Messungen in zwei benachbarten Profilen über eine Tide erforderlich sind.  $k_2$  ist dann bei  $m = 2$  die einzige Unbekannte. Dieses Verfahren erlaubt auch den Einfluß des Gliedes  $\frac{dv}{dx}$  und  $v \frac{dv}{dt}$  zu erkennen. Wenn keine größere Einheitlichkeit der gefundenen  $k_2$ -Werte vorhanden ist als ohne diese Glieder (Gl. 1), so sind sie bedeutungslos. Aus  $k_2$  bestimmt man  $k$  am besten nach Gl. (53). Andere Ausdrücke zur Bestimmung von  $k$  sind in den Gl. (31), (32), (41) gegeben.

Bei Neuanlage von Kanälen muß  $k$  oder  $k_2$  geschätzt werden. Anhaltspunkte hierzu liefern die bisher gemessenen Werte, von denen einige Beispiele zusammengestellt sind.

Werte von  $k_2$  [ $m^{1/2} \cdot \text{sek}^{-1}$ ]<sup>10</sup>

Cape Cod Kanal	
feiner Sand . . . . .	126
grober Sand . . . . .	115
Strombett . . . . .	92
Zuidersee . . . . .	51—57
Lek . . . . .	47—50
Alte Süderelbe . . . . .	46—60

Die Werte für den Cape Cod Kanal scheinen hiernach sehr hoch zu liegen.

#### b) Die Dämpfung und Reflexion der Gezeitenwelle.

Die Dämpfung der Gezeitenwelle ist eine Folge der Bett-  
rauhigkeit. Ihre Größe ist am besten aus dem Verlauf der Amplituden der Gezeitenkurven, der HW- und NW-Linie zu ersehen. Man muß hierbei verschiedene Annahmen unterscheiden, durch die sich die einzelnen Berechnungsverfahren grundlegend unterscheiden. Bei den Näherungsverfahren und den kurzen Kanälen nach Abschn. 3 ergibt sich die Dämpfung aus der einfachen Ab-

flußformel Gl. (1). Man erhält für die HW- und NW-Linie den Ausdruck der Gl. (3b), eine Hyperbel. Das Näherungsverfahren der Gl. (57) setzt für einseitige Gezeiten eine Gerade an. Für beiderseitige Gezeiten ergibt sich daraus ebenfalls eine Hyperbel. Die beiden Ansätze unterscheiden sich nur dadurch, daß in letzterem Fall nicht alle Punkte zugleich HW oder NW haben.

Bei der Stauformel Gl. (54) ist von der Gl. (42) das Glied  $\frac{dv}{dt}$  vernachlässigt. Daraus ergeben sich die HW- und NW-Linie als Umhüllende sämtlicher Staukurven, die am besten zeichnerisch ermittelt werden.

Die beiden genaueren Verfahren der Abschn. 4 und 5 weisen ebenfalls zwei verschiedene Gesetze der Energievernichtung durch Reibung und Reflexion auf. Bei der Stauwelle vollzieht sich die Dämpfung nach dem Energiegesetz der Gl. (20). Man erhält daraus für die Dämpfung den Ausdruck Gl. (21a). Außer durch die Reibung wird die Stauwelle aber durch mehrfache Reflexion vernichtet. Man erhält daher für die HW- und für die NW-Linie folgenden Summenausdruck:

$$(24b) \quad a = g(a_0, x) - g(a_0, 2L-x) + g(a_0, 2L+x) - g(a_0, 4L-x) + g(a_0, 4L+x) \dots \text{ (Abb. 4).}$$

Die Funktion zwischen  $a$  und  $x$  ist in Gl. (21a) in der Form  $x = f(a_0, a)$  gegeben. Eine Auflösung nach  $a$  ist sehr umständlich, daher wird diese Schwierigkeit durch probeweises Einsetzen von Werten für  $a$  umgangen. Das Dämpfungsgesetz der Gl. (21a) ist recht verwickelt im Gegensatz zu dem Gesetz, das man bei der Lösung der Differentialgleichung der Gezeitenwelle (Gl. (42), erhält. Hier erscheint die Dämpfung als vektorielle Summe zweier Exponentialfunktionen  $e^{-\alpha x}$  und  $e^{+\alpha x}$ . Die Lösung zerfällt in zwei entgegengesetzt gerichtete Wellen, die aber nicht durch Reflexion entstanden sind. Bei kurzen Kanälen, wo man mit mehrfacher Reflexion nach Gl. (22—24) rechnen muß, ist das Verfahren von Abschn. 5 zu bevorzugen. Die Anzahl der Reflexionen kann man vorher nach Gl. (24a) feststellen. Allgemein läßt sich sagen, daß die Lösung der Differentialgleichung außerdem dann den geringeren Rechenaufwand erfordert, wenn am anderen Ende des Kanals kein unbegrenztes gezeitenloses Becken mehr vorhanden ist. Dann werden mit der Stauwelle mehrfache Überlagerungen nötig, die sich nach der anderen Methode vermeiden lassen.

Der grundsätzliche Unterschied in der Dämpfungsfunktion ist darauf zurückzuführen, daß die Gleichung der Stauwelle die Lösung einer Differentialgleichung darstellt, die zum Unterschied gegen Gl. (42) die senkrechte Bewegung des Wassers berücksichtigt<sup>11</sup>. Wegen der weiteren Vereinfachungen ist die Dämpfung der Stauwelle aber nicht wirklichkeitstreu als die Exponentialfunktion. Nach den praktischen Ergebnissen zu urteilen, kann man beide Ansätze unbedenklich verwenden.

Die Gleichung der HW- und NW-Linie nach der Exponentialfunktion ist durch Gl. (43d) gegeben, wenn man für  $t$  die HW- bzw. NW-Zeit  $t_m$  nach Gl. (IV) einsetzt.

Insgesamt gibt es also folgende Vorschläge für die Funktion

$a = g(a_0, x)$ :

1. die Gerade nach Gl. (57):

$$a = a_0 \left( 1 - \frac{x}{L} \right)$$

- nur für einseitige Gezeiten.
  2. die Hyperbel nach Gl. (3b).
  3. die Umhüllende von Staukurven nach Gl. (54).
  4. die Umhüllende von  $\cos$ -Kurven nach Gl. (57) und (57a).
  5. die Funktion der Gl. (24a und 24b).
  6. die Exponentialfunktion der Gl. (43d).
- Davon stellen 1—4 Näherungslösungen dar.

Im allgemeinen ist also die HW- und NW-Linie kein einfacher Ausdruck.

<sup>10</sup> Vgl. auch Krey, H.: Die Flutwelle in Flußmündungen und Meeresbuchten, Berlin 1926, S. 43. — Reinecke: Die Berechnung der Tidewelle im Tideflusse. Berlin 1921. — Mazure: De Berekening van getijden en stormvloeden op benedenrivieren. Diss. Delft 1937.

<sup>11</sup> Vgl. Fußnote 1, S. 441. — Forchheimer: Hydraulik, Leipzig 1930, S. 251, 286.

c) Die Stundenlinien.

Weniger verschieden wie die HW- und NW-Linien sind die Ausdrücke für die Stundenlinien. Man erhält:

1. Gerade bei dem Verfahren in Abschn. 3 nach Gl. (3a),
2. Staukurve nach Gl. (55a),
3. cos-Linie  
nach Gl. (28, 29, 33, 39a, 43a, 43d, 57).

Da 1 und 2 nur Näherungsverfahren sind, ergibt sich bei den genaueren Berechnungen einheitlich die cos-Linie. Die Näherungsverfahren sind so lange zulässig, wie sie die cos-Linie ohne große Ungenauigkeit ersetzen können.

d) Die Gezeitenkurven.

Da sämtliche Verfahren sich der harmonischen Analyse bedienen, sind die Gezeitenkurven in jedem Fall cos-Linien.

Man erhält die gesuchten Gezeitenkurven aus denselben Gleichungen wie die Stundenlinien.

Bei den Verfahren des Abschn. 5 gibt es für den Fall der Verbindung eines unbegrenzten Beckens mit einem Gezeitenmeer zwei Möglichkeiten, entweder die Form von Pearson Gl. (43a) oder von Lorentz Gl. (47). Das Ergebnis ist in beiden Fällen das gleiche. Welches Verfahren vorzuziehen ist, läßt sich nicht ohne weiteres sagen, ehe man die spezielle Aufgabe vor sich hat. Sind auf der Strecke L viele Zwischenpunkte x zu berechnen, so ist das Verfahren der Gl. (43a) wohl rechnerisch einfacher. Unbedingt vorzuziehen ist das Verfahren von Lorentz bei allen anderen Randbedingungen. Die Berechnung der Konstanten A' bis C' oder M', N', P', Q' erfordert in beiden Fällen einen größeren Rechenaufwand. Die Umschreibung der cos-Funktion auf die komplexe Form der Gl. (49) empfiehlt sich, um die Vorteile der Vektorenrechnung in Anspruch nehmen zu können.

e) Die Fortschrittsgeschwindigkeit.

Die Ausdrücke für die Fortschrittsgeschwindigkeit seien nochmals zusammengestellt. Für das einfache Abflußgesetz des Abschnitt 3 erhält man keine eigentliche Wellenfortpflanzung und daher den einfachen Ausdruck Gl. (13c)  $c = -\frac{L}{d}$ .

Für die Stauwelle gilt Gl. (14):

$$c = \sqrt{g(T_m + h)} \approx \sqrt{g(T_m + a)},$$

wobei sich verschiedene Wellen überlagern, für die Gezeitengleichung (42) der Ausdruck Gl. (46b) oder (46c)

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot 2 T_m}{1 + \sqrt{1 + \frac{g^2}{T_m^2 n^2 k^2}}}}$$

für die einlaufende und die rücklaufende Welle. Die Geschwindigkeit der wirklichen Gezeitenwelle ist die vektorielle Summe beider.

Die beiden letzteren Ausdrücke unterscheiden sich infolge der Verschiedenheiten ihrer Ausgangsgleichungen ganz erheblich. So erscheint in Gl. (46b) die Amplitude a nicht, aber statt dessen n und k. Da beide Ausdrücke aber befriedigende Resultate erzielt haben, ist zu schließen, daß die Form der Beziehung weniger wichtig ist, als eine richtige Wahl der Beiwerte. Ist außer der Gezeitenströmung noch eine Gefällströmung vorhanden, so ist diese zu- oder abzuzählen.

f) Die Strömungsgeschwindigkeit.

Für den einfachen Fall der Gefällsströmung erhält man die Gl. (1). Die Geschwindigkeit der Stauwelle gibt Gl. (17). Durch Reflexion wird daraus Gl. (30) bzw. (34) bzw. (38a) je nach den Randbedingungen. Mit der Gezeitengleichung (42) erhält man den Ausdruck (43b) bzw. (47). Schließlich geben die Näherungsverfahren Gl. (52b).

Daß sich auch hier die verschiedenen Ansätze recht schwach auswirken, zeigt das Beispiel des Cape-Cod-Kanals. Dort wurden folgende maximalen Strömungsgeschwindigkeiten gefunden:

beobachtet . . . . .	1,51 m/sec
Verfahren Abschn. 5 . . . . .	1,49 ..
(Differentialgl. der Gezeiten)	
Verfahren Abschn. 3 . . . . .	
(Gefällsgleichung)	
Reibungsbeiwert	
nach Bazin . . . . .	1,68 ..
Eytelwein . . . . .	1,64 ..
Ganguillet-Kutter . . . . .	1,54 ..
Stauformel nach Bubeney . . . . .	1,61 ..
Näherung nach der franz. Akademie . . . . .	1,52 ..

8. Zusammenfassung.

Gerade bei Betrachtung dieses Beispiels verliert die Frage nach dem Wert der einzelnen Methoden an Bedeutung. Man sollte zunächst immer versuchen, die gestellten Aufgaben mit den einfachsten Hilfsmitteln zu lösen, ehe man den oft ungeheuren Aufwand einer Gezeitenberechnung auf sich nimmt. Wichtig ist, die Veränderung von Querschnitten dadurch zu berücksichtigen, daß man die Rechnung nur für kürzere Kanalstücke durchführt, wo mit gleichbleibenden Verhältnissen gerechnet werden darf. Eine große Bedeutung hat weiter die Größe des Rauigkeitsbeiwerts k, die man in den seltensten Fällen ganz genau wird festlegen können. Jedes Verfahren hat seine Vereinfachungen. Man wird sich immer dasjenige Verfahren aussuchen, das am schnellsten zum Ziele führt und sich trotzdem den gegebenen Verhältnissen anpaßt. In den Fällen, wo eine genaue Durchrechnung erforderlich ist, wird das meist für den Rechnungsgang Abschn. 5 der Fall sein.

KURZE TECHNISCHE BERICHTE.

Wasserkraft-Großausbau im Staate Washington der USA.

Im Kaskaden-Gebirge, im Nordwesten des Staates Washington der USA., ist kürzlich mit dem zweiten Ausbau der Skagit-Wasserkraft begonnen worden; nach seiner Fertigstellung wird das Skagit-Kraftwerk der Stadt Seattle mit 715 000 PS abziehbarer Leistung zu den größten Hochdruckspeicherwerken der Welt zählen.

Der erste Ausbau dieser Wasserkraftanlage wurde 1937 vollendet und umfaßt (Abb. 1) das Laufwasserwerk von Gorge mit 75 000 PS, den Jahresausgleichspeicher von Diablo, dessen Abschlußbauwerk mit 121 m Höhe seinerzeit die höchste Bogenmauer der Welt darstellte, und das Diablo-Speicherwerk mit 160 000 PS abziehbarer Leistung. Im Mittelpunkt des 1938 begonnenen zweiten Ausbaues steht die Roß-Talsperre, ein gewaltiges Überjahresspeicherbecken von 50 km Länge und 3,8 Mia m<sup>3</sup> Fassungsvermögen, an das sich ein Speicherwerk mit 480 000 PS abziehbarer Leistung anschließen wird.

Für das Abschlußbauwerk der Roß-Talsperre, dessen Herstellung sich über 11 Jahre erstrecken wird, sind gemäß Abb. 2a vier Ausbaustufen vorgesehen. Die beiden ersten Stufen umfassen eine 134 m hohe

Gleichwinkel-Bogenmauer, die in konischen Blöcken ohne Fugenspalte hochgeführt wird (Abb. 3); die Gestaltung der Fugen und die Auspreßanordnung sind aus Abb. 2b ersichtlich. In der dritten Ausbaustufe soll die Bogenmauer in eine nur um wenig höhere Bogengewichtsmauer eingefügt werden; um hierbei eine gute Verbundwirkung sicherzustellen, ist die talseitige Außenfläche der Bogenmauer mit schachbrettartig angeordneten Aussparungen versehen (Abb. 3). Der vierte Ausbau umfaßt die Erhöhung auf die vorgesehene Gesamthöhe von 198 m; es ergibt sich dann bei einer Dicke von 163 m ein Gesamtbetoninhalt von 2,3 Mia m<sup>3</sup>. Querschnitt und Grundrißanordnung (Abb. 2 a—c) lassen im Endausbau eine große Ähnlichkeit mit der Boulder-Staumauer im Coloradostrom erkennen.

Bei der Steilheit der Skagit-Schlucht (Abb. 4) und der Einöde des Kaskaden-Gebirges stellte die Einbringung so gewaltiger Betonmassen an die Baustelleneinrichtung ganz ungewöhnliche Anforderungen. Es blieb z. B. keine andere Möglichkeit, als sämtliche Einrichtungsgegenstände und auch den Zement bis zur Diablo-Staumauer anzurollen (Abb. 1), dort auf Boote umzuladen, den See heraufzufahren und kurz



Abb. 1. Skagit-Wasserkraftausbau der Stadt Seattle in Washington (USA.).

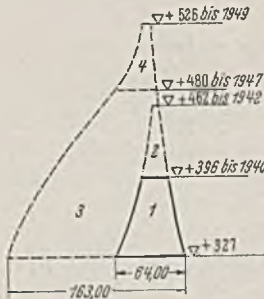


Abb. 2a. Roß-Staumauer. Querschnitt und stufenweise Herstellung.

Abb. 2b. Roß-Bogenstaumauer. Fugengestaltung und Auspreßanordnung.

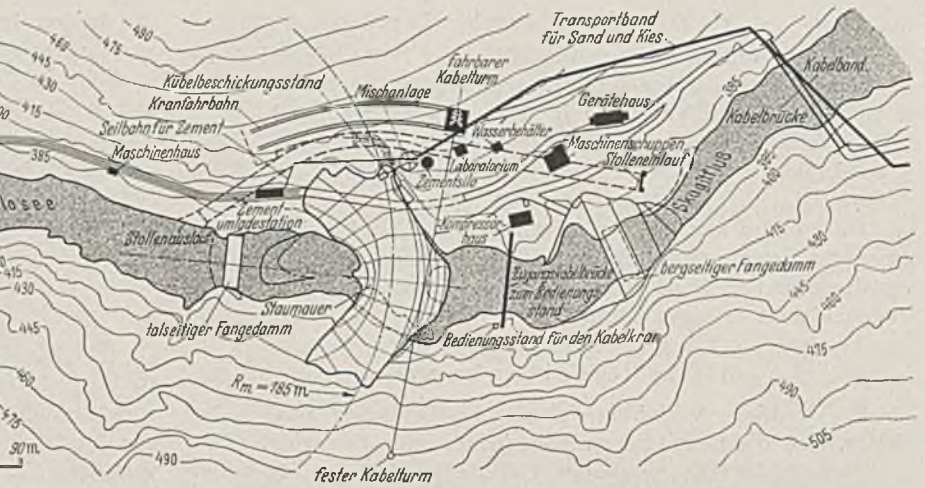
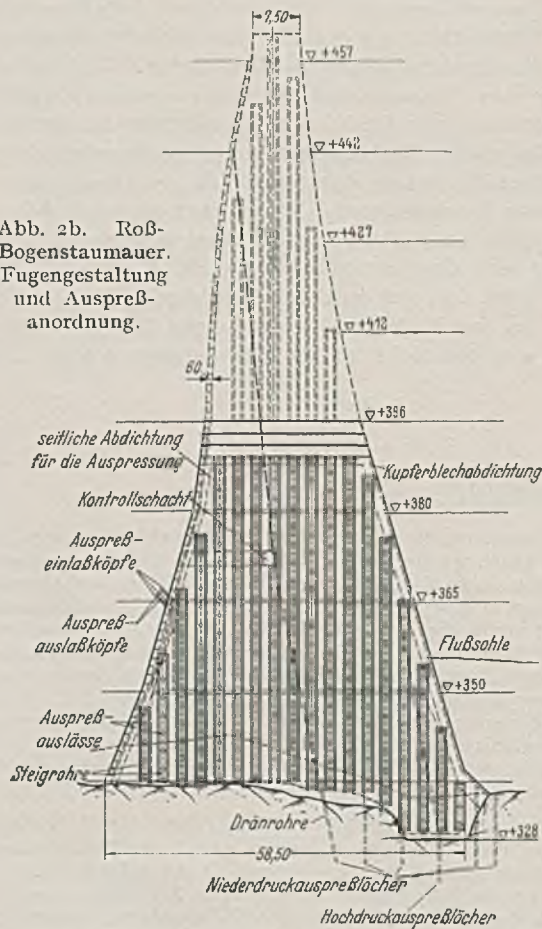


Abb. 2c. Roß-Staumauer. Grundrißanordnung und Baustelleneinrichtung.



Abb. 3. Roß-Bogenstaumauer. Herstellung der Blöcke.



Abb. 4. Skagit-Schlucht im Bereiche der Roß-Staumauer.

vor der Sperrstelle wieder auf Gleise zu verfrachten; Abb. 5 zeigt einen Waggon mit Zement, der gerade das Fährboot verlassen hat und nun durch Kabel im Schrägaufzugbetriebe zur Baustelle heraufgezogen werden soll. Überall wurden kunstvolle Holzunterbauten erforderlich, um die Aufbereitungs-, Misch- und Maschinen-Anlagen an den steilen Hängen unterzubringen.



Abb. 5. Waggon-Fährboot und Schrägaufzug für die Zementanlieferung.

Die Kiessand-Entnahmegruben befinden sich 6 km oberhalb der Sperrstelle; die zu diesen führende Zugangsstraße, die gleichzeitig die Fortsetzung des Schrägaufzuges bildet (Abb. 2c), kreuzt den Skagit-Fluß in einer bemerkenswerten Kabelbrücke für Lastwagen bis zu 20 t Höchstlast (Abb. 6). Die zwei in den Hängen verankerten Tragkabel sind 85 m weit gespannt und weisen einen Durchmesser von 7,5 cm auf; der Bohlenbelag der Fahrbahn ruht auf Querbalken von 30/36 cm in 3 m Abstand, die sich unmittelbar auf die Kabel absetzen.

Die Aufbereitungsanlage ist 1 km oberhalb der Sperrmauer auf dem linken Hang angeordnet; sie liefert Sand bis 5 mm und vier Stufen von Kies zwischen 5 und 180 mm. Von hier geht es über eine Reihe von 750 mm breiten Förderbändern zur Mischanlage auf dem rechten Hang (Abb. 2c). Bemerkenswert ist das 135 m lange Kabelband, mit dem der Skagit-Fluß gekreuzt wird.

Die Betoneinbringung besorgt ein Kabelkran von 230 m Spannweite, einseitig fahrbar und mit festem Turm am linken Hang (Abb. 2c); der Tragkabeldurchmesser beträgt bei einem Kübelinhalt von 6 m<sup>3</sup> 7,5 cm. Der fahrbare Gegengewichtsturm ist 23 m hoch und besitzt drei Fahrbahnen, zwei äußere zum Absetzen der lotrechten Lasten und eine mittlere zur Übertragung des Kabelschubes auf den Hang. Sämtliche Bewegungen erfolgen von einem festen Bedienungsstande aus, der durch eine Kabelbrücke von 60 m Spannweite zugänglich ist (Abb. 2c).



Abb. 6. 85 m lange Zweikabelbrücke für 20 t Lastwagen.

Für das Verfahren der Katze und die Auf- und Abwärtsbewegung der Kübel ist ein bei 2300 Volt arbeitender Schleifringmotor vorhanden, ferner für die Drehbewegung des Kranes ein 75 PS-Motor. Ein Fahrweg des beweglichen Turmes von 150 m reichte aus, um praktisch jeden Punkt der engeren Baugrube erreichen zu können.

Die Trockenhaltung der Baugrube erfolgte, wie fast stets in engen Tälern, durch berg- und talseitige Fangedämme mit Stollenumlenkung. Der Stollendurchmesser beträgt rd. 10 m, die Länge 300 m. Für künftige Regulierungszwecke ist im Bereich der Stollenmitte gleichzeitig ein seitlicher Zugang geschaffen worden (Abb. 2c), in dem zwei Stahlrohrleitungen Aufnahme finden sollen. Sobald diese mit den zugehörigen Schiebern fertig sind, wird der Stollen oberwasserseitig vorläufig durch einen Betonpfropfen verschlossen. Bei Beginn des zweiten Ausbaues soll der Stollen dann wieder geöffnet und nach seiner Beendigung endgültig verschlossen werden.

Tölke, Charlottenburg.

### Kritische Betrachtung von Rammergebnissen.

Unter dem Titel „Bau einer Ufermauer im Kieler Hafen“ von Reg.-Baumstr. a. D. Ruge, Hamburg, erschien im „Bauingenieur“ 20 (1939) S. 521 ein Beitrag über die dort verwendete Pfahlgründung, woraus treffend hervorgeht, wo der Pfahlbau heute steht und was ihm für die Zukunft richtungweisend nützlich werden kann.

Aus den dort mitgeteilten Rammergebnissen, die sich mit Hilfe einer geschickt getroffenen Versuchsanordnung ergaben, läßt sich überzeugend entnehmen, welche Möglichkeiten dem Standpfahl innewohnen

gegenüber den auf Reibung, Verdichtung oder Verdrängung beruhenden übrigen Pfahlarten.

Es wurde dort nach einer Reihe von Rammversuchen mit den bekannten Profilrohr-Pfählen, deren Querschnitt aus vier zusammengeschweißten Eisenbahnschwellen-Profilen von 460 mm Seitenlänge gebildet wurde, in einem Boden, der bis auf 25 m Tiefe aus sandigem weichen Ton bestand und erst von dort aus in feinen tragfähigen Sand überging, für den Pfahl eine Tragfähigkeit von 45 t Dauerlast als zulässig erklärt.

Durch die Art der Ausführung der Rammversuche, einmal mit offenem Pfahlrohr und einmal mit Verschlußkappe an der Pfahlschulter, konnte nachgewiesen werden, daß die Mantelreibung des Pfahles in diesem Falle praktisch ganz zu vernachlässigen ist, so daß die erzielte Tragkraft von 45 t im wesentlichen durch den Spitzenwiderstand des Pfahl-Querschnittes erreicht wurde.

Im Hinblick auf die gegenwärtige Neubearbeitung der Baugrundnormen ist es wichtig, derartige praktische Beispiele, die zeigen, welche hohen direkten Druckbeanspruchungen der Boden aufnehmen kann, besonders hervorzuheben. Sie können die heute dringend notwendige Entwicklung präziserer Normenbestimmungen für Pfahlbelastungen, in denen praktisch brauchbare Angaben über zulässige Bodenpressungen an der Pfahlschulter vorläufig noch fehlen, wesentlich erleichtern.

Es ist dies erforderlich, einmal weil bereits seit langem eine Tendenz besteht, unter Ausschaltung jeder (teilweise sogar schädlichen) Mantelreibung die Tragfähigkeit des Pfahles in erhöhtem Maße von seinem Spitzenwiderstand abhängig zu machen, und ferner, weil gerade bei dieser Art der Bodenbeanspruchung die erreichbare hohe Tragfähigkeit und insbesondere die weitgehendere Dauerstabilität sowie die einfachere und übersichtlichere Gestaltung der bodenmechanischen Vorgänge und deren rechnerische Verfolgung weiteste Ausblicke eröffnen.

Welche Möglichkeiten in diesen Verhältnissen liegen, soll folgende Gegenüberstellung zeigen, worin die Pfahlgründung obiger Ufermauer für Pfähle mit erhöhtem Spitzenwiderstand umgerechnet wird:

Mit dem im vorliegenden Fall verwendeten Rammpfahl-Querschnitt von rd. 1620 cm<sup>2</sup> wurde unter den oben angegebenen Verhältnissen eine zulässige Spitzenpressung für Dauerbelastung von

$$P = \frac{45000}{1620} = 28 \text{ kg/cm}^2$$

erzielt.

Würde diese Pressung auf eine größere Fläche angewendet werden, so bedeutet dies, daß ein Pfahl mit einer Widerstandsfläche von z. B. 80 cm Ø bereits

$$P = \frac{80^2 \pi}{4} \cdot 28 = 140000 \text{ kg} = 140 \text{ t}$$

unter sonst gleichen Bedingungen wie der angeführte Rammpfahl tragen würde.

Berücksichtigt man, daß der ursprünglich gewählte Pfahlquerschnitt im Schaft mit

$$F_s = 150 \text{ cm}^2 \text{ und } F_b = 1620 \text{ cm}^2$$

bei einer Beanspruchung von 35 kg/cm<sup>2</sup> unter der hier zulässigen Annahme einer durchlaufenden Einspannung im Boden ebenfalls bereits eine Tragfähigkeit von

$$(150 \cdot 14 + 1620) \cdot 35 = 130000 \text{ kg} = 130 \text{ t}$$

besaß, so zeigt sich, daß hier die Materialausnutzung beim Rammpfahl durch die zulässige Belastung von 45 t nur etwa 30% beträgt.

Der Bohrpfahl dagegen mit den gleichen Dimensionen im Schaft-Querschnitt, jedoch mit einer Standfläche von 80 cm Ø, trägt rund das dreifache, so daß hier die Festigkeit des Pfahlschaftes ebenso zu 100% ausgenutzt wird und im Hinblick auf die fehlende Rammbeanspruchung auch ausgenutzt werden kann, wie die Tragfähigkeit des Baugrundes.

Die Anwendung auf das Beispiel der Ufermauer ergibt folgendes:

Im vorliegenden Falle wurden für die Kaimauer von 162 m Länge mit drei Pfahlreihen und einem Pfahlabstand innerhalb einer Reihe von 1,35 m 360 Stück Pfähle zu 30 m Länge mit insgesamt 1250 t Stahl verarbeitet.

Die Ausführung mittels Bohrpfählen von gleichen Abmessungen und gleicher Stärke im Schaft-Querschnitt, jedoch mit einer Standfläche von 80 cm Ø, würde nach der vorhin ermittelten Tragkraft bereits mit 120 Pfählen erreicht werden können.

Nachdem bei beiden Pfahlarten gleicher Stahlaufwand je Pfahl vorausgesetzt war und auch ausreicht, bedeutet dies, daß der gesamte Stahlverbrauch von 1250 t auf rd. 415 t, d. h. entsprechend der Pfahlstückzahl um rd. 60% zurückgeht, wobei die Pfahlabstände von 1,35 m auf rd. 4,0 m erweitert werden.

Die hierdurch erforderliche Verstärkung des Überbaues kann angesichts der in jedem Fall erforderlichen sehr hohen und starken Ausführung des Überbau-Mauerwerkes für die Kranbahn kaum eine wesentliche Rolle spielen.

Man braucht jedoch nicht an die Grenzen zu gehen, Zwischenwerte verstehen sich von selbst; aber selbst wenn man die volle Stückzahl und den gesamten ursprünglichen Stahlaufwand beibehält, so ergibt dies wegen der dreimal so großen Standfläche gegenüber den Rammpfählen bei gleichem Aufwand mindestens eine dreifach höhere Sicherheit gegen die zu erwartenden Setzungen, die bekanntlich eine Potential-Funktion der Bodenpressung sind.

Diese Sicherheit wird in anderen Fällen noch weiterhin erhöht dadurch, daß bei den Rammpfählen die ursprünglich unmittelbar nach der Rammung erzielte Tragfähigkeit wieder herabgemindert werden kann, weil die Rammung der Nachbarpfähle das umgebende Erdreich bereits wieder so stark erschüttern, daß die vorher erzielte Bodenverspannung bzw. Verdichtung z. T. wieder gelöst wird.

Das vorliegende Beispiel zeigt, welche Einsparungsmöglichkeiten in der betonten Ausnutzung des Spitzenwiderstandes liegen, und es zeigt

ferner, wie auch eine Reihe weitere vorhergehende Beispiele, daß gerade der Pfahlbau in der Lage ist, durch eine grundsätzliche Schwenkung in seiner Zielsetzung die bisher in erster Linie von der Bodenverspannung und der Reibung ausging, den heutigen Sparforderungen besonders Rechnung zu tragen, indem er sich mehr und mehr dem geböhrten Standpfahl mit erhöhtem Spitzenwiderstand und seinen technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten zuwendet.

Regierungsbaurat Dr.-Ing. T. h. Müller, Berlin.

## VERSCHIEDENE MITTEILUNGEN.

### Jubiläum.

Der Seniorchef der Firma Gleitbau Klotz & Co., Herr Heinrich Klotz, feierte in diesen Tagen seinen 75. Geburtstag.

## PATENTBERICHTE.

### Bekanntgemachte Anmeldungen.

Bekanntgemacht im Patentblatt Nr. 11 vom 14. März 1940 und von demselben Tage an im Reichspatentamt ausgelegt.

- Kl. 4 c, Gr. 33. H 154 421. Erfinder, zugleich Anmelder: Dipl.-Ing. Franz Herzberg, Leisnig. Glocke oder Scheibe für nasse oder wasserlose Gasbehälter; Zus. z. Pat. 535 940. 21. I. 38.
- Kl. 19 a, Gr. 7/12. Sch 113 412. Erfinder, zugleich Anmelder: Joh. Friedrich Schneider, Berlin. Aus Einzelschienen zusammengesetztes Kreuz- und Herzstück, insbesondere für Rillenschienen. 23. VII. 37.
- Kl. 19 c, Gr. 8/20. M 127 865. Georg Hermann Müller, Berlin-Mariendorf. Fahrbare Vorrichtung zum Verdichten, Ebnen und Glätten von Beton od. dgl. für Straßendecken; Zus. z. Pat. 664 819. 27. VI. 34.
- Kl. 20 g, Gr. 1/02. E 50 878. Erfinder: Wilhelm Vogel jr., Hanau a. M. Anmelder: Bischoff K.-G., Frankfurt a. M. Kugelführungsring für Feldbahndrehscheiben mit Abstreifern. 2. III. 38.
- Kl. 20 i, Gr. 30. A 84 039. Erfinder: Lancelot Martin Simpson, Thorner b. Leeds, England. Anmelder: Automatic Telephone & Electric Company Limited, London; Vertr.: Dr. K. Griesing u. Dr. P. Holzhäuser, Pat.-Anwälte, Berlin SW 68. Eisenbahnsteuerungsanlage. 26. VIII. 37. Großbritannien 28. VIII. 36.
- Kl. 37 d, Gr. 24/03. R 40 873. Erfinder: Erwin Bilefeld, Berlin-Schöneberg. Anmelder: Mannesmann-Stahlblechbau Akt.-Ges., Berlin. Befestigungsvorrichtung für Türzargen u. dgl. 22. VI. 37. Österreich.
- Kl. 37 f, Gr. 1/01. D 76 904. Erfinder: Gerhard Degenkolb, Duisburg. Anmelder: Demag Akt.-Ges., Duisburg. Bühnenanordnung für Theater. 21. XII. 37. Österreich.
- Kl. 37 f, Gr. 5. F 83 860. Erfinder, zugleich Anmelder: Julius Furcht, Wien. Zweiteiliger Mantelstein für Schornsteine. 25. X. 37. Österreich 9. XI. 36.
- Kl. 42 k, Gr. 20/02. G 98 865. Erfinder, zugleich Anmelder: Dipl.-Ing. Hans Güth, Westerfeld über Hannover. Schaltgerät für Schwingungsprüfmaschinen zum Stillsetzen der Prüfmaschine nach erfolgtem Bruch oder bei erheblichem Abnehmen des Schwingungsausschlags des Probestabes, 31. X. 38.
- Kl. 72 g, Gr. 7/03. D 72 499. Auergesellschaft Akt.-Ges., Berlin. Einrichtung für die Notbeleuchtung von Schutzräumen. 8. IV. 36.
- Kl. 80 b, Gr. 25/03. B 188 433. Erfinder: Dipl.-Ing. Rudolf Komadina, Aachen. Anmelder: Dr. Alfred Buntru u. Dipl.-Ing. Rudolf Komadina, Aachen. Verfahren zur Herstellung von bituminösen Bindemitteln, insbesondere für Straßenbauzwecke. 18. VIII. 39.
- Kl. 84 a, Gr. 3/07. K 148 356. Erfinder: Fritz Conradi, Magdeburg-Hopflengarten. Anmelder: Fried. Krupp Grusonwerk Akt.-Ges., Magdeburg-Buckau. Antriebsvorrichtung für Hubstütze u. dgl. 27. X. 37. Österreich.
- Kl. 84 d, Gr. 1/06. M 138 177. Erfinder: Albert Kuhsel, Hamburg-Altona. Anmelder: Menck & Hambroch G. m. b. H., Hamburg-Altona. Schrapperkasten. 27. V. 37.
- Kl. 85 b, Gr. 1/01. K 141 941. Dr. Georg Walter Kühl, Helmstedt, Braunschweig. Verfahren zur chemischen Enthärtung von Wasser; Zus. z. Anm. K 141 934. 22. IV. 36.
- Kl. 85 b, Gr. 1/01. R 103 936. Erfinder, zugleich Anmelder: Wilhelm Ritschel, Köln. Verfahren zur Regenerierung von Magnesiumoxyd-Filtermassen; Zus. z. Anm. R 90 683. 11. VI. 37.

### Bekanntgemachte Anmeldungen.

Bekanntgemacht im Patentblatt Nr. 12 vom 21. März 1940 und von demselben Tage an im Reichspatentamt ausgelegt.

- Kl. 19 c, Gr. 6/10. H 152 684. Erfinder, zugleich Anmelder: Karl Halbach, Düsseldorf. Verfahren zum Herstellen von Fugen in mörtelgebundenen Straßendecken. 18. VIII. 37.
- Kl. 20 i, Gr. 41. I 55 728. International Standard Electric Corporation,

New York; Vertr.: H. B. Willers, Pat.-Anw., Berlin SW 68. Einrichtung zur Fernanzeige des jeweiligen freien oder besetzten Zustandes mehrerer Gleisabschnitte, der Stellung von Weichen, Signalen od. dgl. in einer Überwachungsstelle. 8. VIII. 36. Großbritannien 10. VIII. 35.

- Kl. 37 b, Gr. 5/01. St 56 365. Erfinder, zugleich Anmelder: Heinrich Steinhage, Berlin-Wilmersdorf. Klemmschelle für Rohre, Kabel u. dgl. 29. VI. 37.
- Kl. 37 e, Gr. 3. M 139 706. Erfinder, zugleich Anmelder: Viktor Meßner, München. Zusammenlegbares, als Absperränder oder Auflagerbock dienendes, dreifüßiges Gestell (Dreifuß). 3. XI. 37.
- Kl. 80 a, Gr. 47/30. E 52 011. Erfinder, zugleich Anmelder: Otto Euling, Hannover-Döhren, u. Rudolf Weikert, Hannover. Form zur Herstellung von Bauplatten, insbesondere Holzwool-Leichtbauplatten. 24. XII. 38.
- Kl. 80 b, Gr. 9/02. B 176 058. Erfinder: Friedrich Kühne, Gelsenkirchen. Anmelder: Berliner Gipswerke L. Mundt vorm. H. Kühne, Berlin, u. Friedrich Kühne, Gelsenkirchen. Verfahren zur Erzeugung von hochporigen Isolierkörpern aus Mineralwolle. 31. X. 36.
- Kl. 84 a, Gr. 3/02. M 135 407. Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg A.-G., Nürnberg. Einrichtung an Wehren zur Verhinderung störender Geräusche und von Schwingungen des Wehrkörpers. 10. VIII. 36.
- Kl. 84 c, Gr. 1. P 76 482. Erfinder, zugleich Anmelder: Erich Philipp, Königsberg i. Pr. Rammspaten zur Herstellung von Schächten; Zus. z. Pat. 668 282. 27. XII. 37.
- Kl. 84 c, Gr. 4. W 103 582. Erfinder, zugleich Anmelder: Dipl.-Ing. Josef Wohlmeyer, Berlin-Halensee. Schlaggerät mit Verbundwirkung. 23. V. 38.
- Kl. 84 c, Gr. 4. W 105 739. Erfinder, zugleich Anmelder: Dipl.-Ing. Josef Wohlmeyer, Berlin-Halensee. Schlaggerät mit Schlagzylinder, insbesondere Rammhammer. 23. V. 38.

### Bekanntgemachte Anmeldungen.

Bekanntgemacht im Patentblatt Nr. 13 vom 28. März 1940 und von demselben Tage an im Reichspatentamt ausgelegt.

- Kl. 19 d, Gr. 3. H 151 047. Erfinder, zugleich Anmelder: Dipl.-Ing. Willy Haupt, Dortmund-Hörde. Fahrbahndecke für Brücken und ähnliche Bauwerke. 17. III. 37. Österreich.
- Kl. 37 a, Gr. 4. R 102 320. Erfinder, zugleich Anmelder: Wilhelm Riske, Opperau-Breslau. In nebeneinanderliegende Einzelzellen unterteilte Hohlwand, insbesondere für den Hallenbau. 16. V. 38.
- Kl. 37 a, Gr. 6. F 80 411. Johannes Fauser, Bodelshausen, Württ. Gewölbartige hölzerne Dachkonstruktion. 16. XII. 35.
- Kl. 37 f, Gr. 8. B 177 818. Erfinder, zugleich Anmelder: Fritz Bergmann, Duisburg. Hallentor. 19. III. 37.
- Kl. 72 g, Gr. 2/05. W 97 149. Friedrich Martin Weber, Halle a. S. Verfahren zur Herstellung von Zementdachsteinen mit farbiger Oberfläche zur Erzielung tarntechnischer Wirkung. 10. IX. 35.
- Kl. 84 a, Gr. 3/02. N 39 536. Dr.-Ing. Ernst Natermann, Verden, Aller. Staaklappe für überströmte Wehre mit Einrichtungen zur Vermeidung von Schwingungen. 11. VI. 36.

### Bekanntgemachte Anmeldungen.

Bekanntgemacht im Patentblatt Nr. 14 vom 4. April 1940 und von demselben Tage an im Reichspatentamt ausgelegt.

- Kl. 19 c, Gr. 6/10. C 52 031. Chemieprodukte Komm.-Ges., Berlin-Britz. Verfahren zum Herstellen von Dichtungen in Dehnungsfugen von Betonstraßendecken. 3. X. 36.
- Kl. 37 d, Gr. 40/07. D 79 854. Erfinder, zugleich Anmelder: Heinrich Dederichs, Bonn. Vorrichtung zum gleichmäßigen Auftragen des Mörtels auf Wandplatten. 11. II. 39.