Vereinfachte Berechnung von Wasserschlössern

Autor(en): **Gardel, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **75 (1957)**

Heft 31

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-63395

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Vereinfachte Berechnung von Wasserschlössern

DK 627.843.001.2

Von Ing. Dr. **A. Gardel**, Lausanne

1. Einleitung

Die grosse Anzahl von verschiedenen Wasserschlosstypen, die für ein Projekt in Betracht gezogen werden können, ist Grund für eine scheinbare Vielgestaltigkeit der Berechnung. Die wichtigsten Typen der Wasserschlösser sind: das Schacht-, das Kammer-, das Drossel-, das Differentialwasserschloss sowie die Wasserschlosstypen mit Ueberlauf. Um die Schwingungsvorgänge in einem gewählten Wasserschlosstyp ganz allgemein zu erfassen, sind normalerweise zwei Parameter notwendig. Werden zudem noch ein, eventuell sogar zwei Parameter hinzugefügt, welche die Bewegung der Absperrorgane der Turbinen (Schliess- und Oeffnungsgesetz) berücksichtigen, so geht daraus deutlich hervor, wie rasch die möglichen Anwendungsfälle zunehmen.

Es wird versucht, die erwähnten, verschiedenen Wasserschlosstypen auf ein einziges, vereinfachtes, fiktives Wasserschloss zurückzuführen, das auf den Druckstollen annähernd den gleichen Einfluss ausübt wie die tatsächlich ausgeführten Wasserschlösser. Die Berechnung der Schwingung wird dadurch bedeutend vereinfacht. Mit Hilfe von zwei Diagrammen kann das ungefähre Volumen des Wasserschlosses sofort bestimmt werden. Diese Diagramme bezwecken eine Erleichterung bei der Aufstellung von Vorprojekten sowie eine rasche Kostenbestimmung [1]).

2. Begriffe und Berechnungsmethode

a) Begriffe

Wird in einer Kraftwerkanlage (Bild 1) die Anordnung eines Wasserschlosses zum Schutze gegen den Druckstoss als notwendig erachtet, so sind dessen Form und Volumen in erster Linie eine Funktion der ungünstigsten Oeffnungs- und Schliessgesetze der Absperrorgane: teilweises oder vollständiges rasches Oeffnen und vollständiges rasches Schliessen [2]). Das Wasserschloss muss dabei in der Lage sein, die durch Betätigung eines Absperrorganes entstehende Wassermengendifferenz zwischen Druckstollen und Turbine aufzunehmen bzw. abzugeben.

[1]) Der vorliegende Aufsatz ist ein Auszug aus dem 1956 erschienenen Buch des Verfassers «Chambres d'équilibre. Analyse de quelques hypothèses usuelles. Méthodes de calcul rapide». Ed. Rouge & Cie S. A., Lausanne.

[2]) Der Horizontalquerschnitt des Wasserschlosses muss ausserdem genügend gross sein, um den Stabilitätsbedingungen zu genügen (op. cit. Kap. II und III).

Die Stollenabflussmenge dringt zum Beispiel beim Schliessen eines Absperrorgans in das Wasserschloss ein und lässt in diesem den Wasserpiegel ansteigen, bis der dadurch hervorgerufene Gegendruck die Bewegung im Druckstollen verzögert und schliesslich anhält. Der Inhalt des Wasserschlosses und damit auch dessen Kosten werden klein, wenn dieser Gegendruck rasch anwächst. Anderseits ist es wünschenswert, diesen Gegendruck so zu begrenzen, dass Druckstollen und Druckleitung nicht übermässig beansprucht werden. Die optimalen Bedingungen werden erreicht, wenn der Gegendruck beim Schliessen eines Absperrorgans sehr rasch seinen maximalen Wert erreicht und wenn dieser Gegendruck während der Verzögerung der Wasserbewegung im Stollen und der Spiegelhebung im Wasserschloss konstant bleibt. Die höchste im Wasserschloss erreichte Wasserspiegellage entspricht dann diesem Gegendruck [3]).

In Bild 2 ist für den Fall des vollständigen, plötzlichen Schliessens der Druck in Funktion der Zeit während dem Wasseranstieg im fiktiven Wasserschloss dargestellt.

b) Vergleich mit den gebräuchlichen Wasserschlosstypen

Bei den gebräuchlichen Wasserschlosstypen (Bild 3) ist man bestrebt, den oben aufgestellten Bedingungen möglichst nahe zu kommen. Diese können nicht streng erfüllt werden; die Abweichung ist im allgemeinen jedoch nicht sehr gross, und die im folgenden beschriebene Vereinfachung liefert eine gute, erste Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse. In den Bildern 2b bis 2f wurde der Verlauf der Drucklinie für die üblichen Wasserschlosstypen dargestellt.

c) Grundlagen für die vereinfachte Berechnungsmethode

Die Berechnung lässt sich vereinfachen durch die Annahme, dass der Druck sofort sein Maximum — es sei mit M bezeichnet — erreicht und konstant gleich M bleibt. In den Gleichungen verschwindet damit die variable Z für den Wasserspiegel im Wasserschloss.

Ueber den Querschnitt des Wasserschlosses seien keinerlei Voraussetzungen gemacht. Es soll direkt das erforderliche Volumen bestimmt werden, *welches dann so anzuordnen ist,*

[3]) Manchmal lässt man einen den maximalen Wasserspiegel übersteigenden Gegendruck zu, was zu einer geringen Verkleinerung des Wasserschlossvolumens führt. Für die Untersuchung eines Vorprojektes jedoch bleibt die oben erwähnte optimale Bedingung eine gute Rechnungsgrundlage.

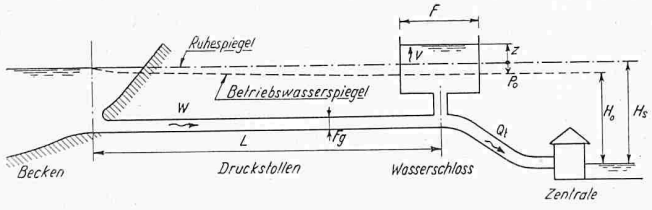
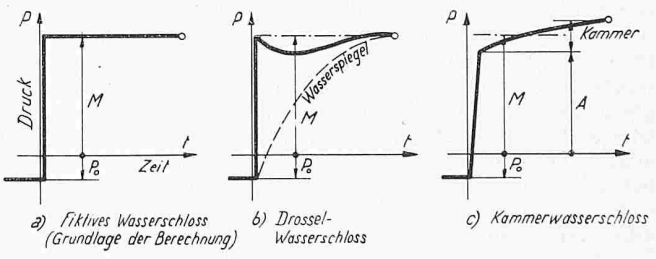


Bild 1. Schema einer Wasserkraftanlage mit Wasserschloss



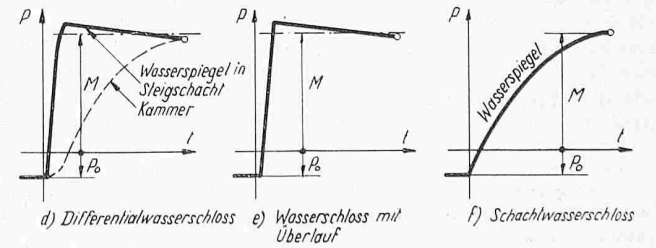


Bild 2 (rechts). Druckänderungen am Fusse des Wasserschlosses infolge eines plötzlichen, totalen Schliessvorganges. Das in das Wasserschloss eintretende Wasservolumen beträgt:

v für Typen a, c, d, e; 1,1 bis 1,2 v für Typ b und etwa 2 v für Typ f

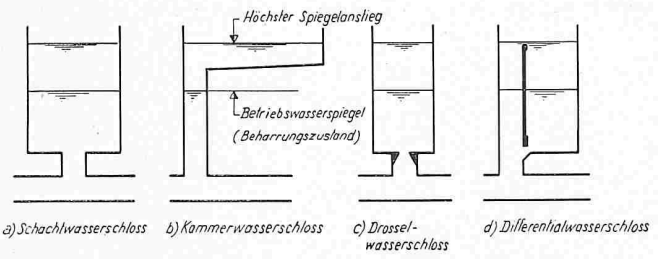


Bild 3. Prinzipschemata einiger Wasserschlosstypen

dass die obenerwähnten Bedingungen (siehe 2a) möglichst erfüllt sind.

Das Volumen beträgt in Absolutwerten:

$$(1) \qquad C = \int_{T=0}^{V=0} V\,F\,dT$$

worin V die Geschwindigkeit dZ/dT des Wasserspiegels im Wasserschloss, F den horizontalen Querschnitt des Wasserschlosses und T die Zeit darstellen.

Dieses Volumen wird positiv, wenn das Wasser dem Wasserschloss zuströmt, negativ, wenn es dieses verlässt. Es versteht sich als das Volumen zwischen dem Betriebswasserspiegel im Beharrungszustand und dem höchsten oder tiefsten Wasserspiegel bei extremen Regelvorgängen. Die Definitionsgleichungen der Wasserbewegung im Druckstollen und im Wasserschloss werden als bekannt vorausgesetzt; sie lauten:

Die Gleichung von Newton, auf den Druckstollen angewendet:

$$(2) \qquad \frac{L}{g}\frac{dW}{dT} + M + P = 0$$

worin L die Länge des Druckstollens, W die Wassergeschwindigkeit im Stollen, P die Reibungsverlusthöhe im Stollen und g die Erdbeschleunigung bedeuten. Die Reibungsverlusthöhe ist proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit W; unter Verwendung des Index $_0$ für die Grössen im Beharrungszustand kann geschrieben werden:

$$(3) \qquad P = P_0 \left(\frac{W}{W_0}\right)^2$$

Die Kontinuitätsgleichung der Wassermengen, aufgestellt für die Stelle vor dem Eintritt ins Wasserschloss, führt zu:

$$(4) \qquad W F_g = V F + Q_t$$

worin F_g den Querschnitt des Druckstollens und Q_t die Turbinenwassermenge bedeuten. Für ein gewähltes Schliess- bzw. Oeffnungsgesetz der Abschlussorgane der Turbinen ist Q_t eine bekannte Funktion der Zeit.

d) Anwendung von Relativwerten (dimensionslose Grössen)

Die Berechnung von Wasserschlössern wird durch die Anwendung von Relativwerten sehr stark vereinfacht. Wie sich zeigen lässt [4]), können dabei verschiedene Systeme von Relativwerten benützt werden. Calame und Gaden haben zum ersten Mal für die Berechnung von Wasserschlössern die Verwendung von Relativwerten eingeführt, und das von ihnen vorgeschlagene System ist auch das am meisten gebräuchliche. Dieses System weist jedoch den Nachteil auf, dass der im allgemeinen unbekannte Querschnitt des Wasserschlosses als bekannt vorausgesetzt werden muss. Es sei daher ein ebenso einfaches, anderes System angewendet, das nachstehend erklärt werden soll [5]).

Die Relativwerte, die mit kleinen Buchstaben bezeichnet werden sollen, stellen das Verhältnis von Absolutwerten (Höhen, Geschwindigkeiten, Abflussmengen, usw.) zu konstanten, nur von der Anlage abhängigen Vergleichsgrössen dar. Diese Vergleichsgrössen weisen die gleichen Dimensionen wie die entsprechenden Absolutwerte auf, wodurch die Relativwerte dimensionslos werden. Die in der Rechnung verbleibenden Parameter können dabei durch eine gute Wahl der Vergleichsgrössen auf ein Minimum reduziert werden. Es seien sämtliche Höhen auf die Reibungsverlusthöhe des Druckstollens P_0 im Beharrungszustand (Ausbauwassermenge Q_0) bezogen [6]), ebenso die Geschwindigkeiten auf die Geschwindigkeit im Beharrungszustand und die Zeit auf eine Zeit T_0, die ebenfalls nicht mehr vom Querschnitt F des Wasserschlosses abhängig ist. Daraus folgt:

$$(5) \qquad \begin{cases} t = \dfrac{T}{T_0} \quad \text{worin } T_0 = \dfrac{W_0 L}{g P_0} \\ q = \dfrac{Q_t}{Q_0} \\ v = \dfrac{V}{V_0} = \dfrac{V F}{Q_0} \\ w = \dfrac{W}{W_0} = \dfrac{W F_g}{Q_0} \\ p = \dfrac{P}{P_0} = \left(\dfrac{W}{W_0}\right)^2 = w^2 \\ m = \pm \dfrac{M}{P_0} \quad (m \text{ ist immer positiv}) \end{cases}$$

($M > 0$ für Schliessen des Absperrorgans,
$M < 0$ für Oeffnen des Absperrorgans)

Die Gleichungen (2) bis (4) lauten jetzt

$$(6) \qquad \frac{dw}{dt} \pm m + w^2 = 0 \qquad w = v - q$$

wobei $q = q(t)$ gegeben ist.

In der ersten Gleichung (6) kommt nur das positive Zeichen in Frage, da die Rechnung nur bis zum ersten, maximalen oder minimalen Ausschlag der Wasserspiegelschwingung durchgeführt wird.

Es sei noch der Relativwert c des Wasserschlossvolumens C (Gl. 1) wie folgt definiert [7]):

$$(7) \qquad c = C : \frac{Q_0^2 L}{g F_g P_0}$$

Aus diesen Gleichungen folgt:

$$(8) \qquad c = \int_{t=0}^{v=0} v\,dt$$

3. Teilweise, allmähliche Oeffnungs- und Schliessvorgänge

a) Oeffnungs- und Schliessgesetze

Schliessen: von der Wassermenge $n\,Q_0$ auf die Wassermenge 0, in Relativwerten geschrieben: von $q = n$ auf $q = 0$ (n = Amplitude der Schliessbewegung)

Oeffnen: von der Wassermenge $n\,Q_0$ auf die Wassermenge Q_0, in Relativwerten: von $q = n$ auf $q = 1$
($1 - n$ = Amplitude der Oeffnungsbewegung)

Spezialfälle: totales Schliessen $n = 1$
totales Oeffnen $n = 0$

Wir betrachten nun den Fall des allmählichen Oeffnungs- bzw. Schliessvorgangs von der Dauer T_d, in Relativwerten $t_d = T_d/T_0$. Die Turbinenwassermenge sei eine lineare Funktion der Zeit.

Turbinenwassermenge:

$$(10) \qquad \begin{cases} q = n - n\dfrac{t}{t_d} & \text{während des Schliessvorganges} \\ q = 0 & \text{nach dem Schliessen} \end{cases}$$

$$(11) \qquad \begin{cases} q = n + (1-n)\dfrac{t}{t_d} & \text{während des Oeffnungsvorganges} \\ q = 1 & \text{nach beendigtem Oeffnen} \end{cases}$$

4) Ueber die Wahl von Relativwerten (op. cit. Kap. IV).

5) Im erwähnten Buch findet man die Umformung der von Calame und Gaden aufgestellten Diagramme in die Diagramme mit dem neu gewählten System.

6) Diese Verlusthöhe P_0 enthält ausser dem effektiven Reibungsverlust noch die Geschwindigkeitshöhe $W_0^2/2g$.

7) $c = \dfrac{C}{P_0 S_0}$, worin $S_0 = \dfrac{W_0^2 L F_g}{g P_0^2}$ den Querschnitt nach Thoma für ein Bruttogefälle von $H_s = \dfrac{3 P_0}{2}$ bedeutet.

b) Durchflussmenge, die in das Wasserschloss eindringt

Die Berechnung sei nur für den Fall des Schliessens durchgeführt, während für das Oeffnen die wichtigsten Resultate aufgeführt werden.

Die erste Gleichung (6) mit getrennten Variabeln ergibt:

$$dt = -\frac{dw}{m + w^2}$$

Deren Integration führt zu:

$$-(t - t_a) = \frac{1}{\sqrt{m}} \operatorname{arc\,tg} \frac{w}{\sqrt{m}}$$

Aus den Anfangsbedingungen $t = 0$ und $w = n$ folgt:

$$t_a = \frac{1}{\sqrt{m}} \operatorname{arc\,tg} \frac{n}{\sqrt{m}}$$

t_a in die vorangehende Gleichung eingesetzt ergibt

$$(11) \quad t = \frac{1}{\sqrt{m}} \operatorname{arc\,tg} \frac{n}{\sqrt{m}} - \frac{1}{\sqrt{m}} \operatorname{arc\,tg} \frac{w}{\sqrt{m}}$$

Diese Gleichung (11) kann umgeformt werden in:

$$\operatorname{tg} \sqrt{m}\, t = \sqrt{m} \frac{n - w}{m + n\,w}$$

Daraus folgt:

$$(12) \quad w = \frac{\sqrt{m}\, n - m \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t}{\sqrt{m} + n \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t}$$

Für den Fall des Oeffnens erhält man:

$$(12a) \quad w = \frac{\sqrt{m}\, n + m \operatorname{tgh} \sqrt{m}\, t}{\sqrt{m} + n \operatorname{tgh} \sqrt{m}\, t}$$

Mit der zweiten Gleichung (6) $v = w - q$, worin q durch (10) gegeben ist, folgt:

$$(13) \quad v = \frac{\sqrt{m}\, n - m \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t}{\sqrt{m} + n \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t} - n + n \frac{t}{t_d}$$

während des Schliessens und

$$(14) \quad v = \frac{\sqrt{m}\, n - m \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t}{\sqrt{m} + n \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t}$$

nach Beendigung des Schliessens.

c) Wasservolumen, das in das Wasserschloss eindringt

Erreicht der Spiegel im Wasserschloss sein Maximum (d. h. wenn $v = 0$ ist), während die Schliessbewegung des Abschlussorgans noch vor sich geht, so muss das Integral $v\,dt$ von $t = 0$ bis zur Zeit t_m des Maximums mit Gleichung (13) bestimmt werden. Wird hingegen das Spiegelmaximum nach Beendigung der Schliessbewegung erreicht, so ist das Integral mit Gleichung (13) von $t = 0$ bis t_d und mit Gleichung (14) von $t = t_d$ bis zur Zeit t_m des Maximums zu bestimmen.

Es folgen daraus:

$$(15) \quad c = \int_{t=0}^{t=t_m} v\,dt = \int_0^{t_m} \frac{\sqrt{m}\, n - m \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t}{\sqrt{m} + n \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t}\, dt + \int_0^{t_1} n \left(\frac{t}{t_0} - 1 \right) dt$$

mit

$$(16) \quad \begin{cases} t_1 = t_m & \text{wenn } t_m < t_d \\ t_1 = t_d & \text{wenn } t_m > t_d \end{cases}$$

Die Zeit t_m bis zum Erreichen des Maximums wird bestimmt durch:

$$(17) \quad \begin{cases} \dfrac{\sqrt{m}\, n - m \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t_m}{\sqrt{m} + n \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t_m} - n + n \dfrac{t_m}{t_d} = 0 & \text{wenn } t_m < t_d \\ t_m = \dfrac{1}{\sqrt{m}} \operatorname{arc\,tg} \dfrac{n}{\sqrt{m}} & \text{wenn } t_m > t_d \end{cases}$$

Wir schreiben zur Vereinfachung:

$$x = \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t$$
$$x_m = \operatorname{tg} \sqrt{m}\, t_m$$

Nach Integration der Gleichung (15) findet man für den Fall des Schliessens [8]):

$$(18) \quad \boxed{c = \ln \left(1 + \frac{n}{\sqrt{m}} x_m \right) - \frac{1}{2} \ln (1 + x_m^2) - n\,t_1 + \frac{n}{2\,t_d} t_1^2}$$

t_m ist definiert durch (17) und t_1 durch (16)

d) Oeffnungsvorgänge

Für den Fall des Oeffnens führt die gleiche Berechnung zu:

$$(19) \quad \boxed{\begin{aligned} c = {} & \ln \left(1 + \frac{n}{\sqrt{m}} x_m \right) - \frac{1}{2} \ln (1 - x_m^2) - \\ & - \frac{1}{2\sqrt{m}} \ln \frac{1 + x_m}{1 - x_m} - n\,t_1 - \frac{1 - n}{2\,t_d} t_1^2 \end{aligned}}$$

mit $x_m = \operatorname{tgh} \sqrt{m}\, t_m$.

t_m ist bestimmt durch:

$$\begin{cases} \dfrac{\sqrt{m}\, n + m \operatorname{tgh} \sqrt{m}\, t_m}{\sqrt{m} + n \operatorname{tgh} \sqrt{m}\, t_m} - n - \dfrac{1 - n}{t_d} t_m = 0 & \text{wenn } t_m < t_d \\ t_m = \dfrac{1}{\sqrt{m}} \operatorname{arc\,tgh} \dfrac{\sqrt{m}\,(1 - n)}{m - n} & \text{wenn } t_m > t_d \end{cases}$$

und t_1 ist definiert wie für den Fall des Schliessens (16).

e) Sonderfall des plötzlichen teilweisen Oeffnens und Schliessens:

In diesem Sonderfall führen die Formeln (18) und (19) zu folgenden, einfacheren Ausdrücken: Für teilweises plötzliches Schliessen:

$$(20) \quad c = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{n^2}{m} \right)$$

Für teilweises plötzliches Oeffnen:

$$(21) \quad c = \frac{\sqrt{m} + 1}{2\sqrt{m}} \ln \frac{\sqrt{m} + n}{\sqrt{m} + 1} + \frac{\sqrt{m} - 1}{2\sqrt{m}} \ln \frac{\sqrt{m} - n}{\sqrt{m} - 1}$$

4. Anwendungsbereich der Ergebnisse

Für den Fall des plötzlichen teilweisen Oeffnens und Schliessens wurden die Gleichungen (20) und (21) ausgewertet und in Diagrammen zusammengefasst (Bilder 4 und 5). Handelt es sich beim projektierten Wasserschloss um ein *Kammerwasserschloss* nach Bild 3b, so stellt das mit der vorhergehend erläuterten Berechnungsmethode gefundene Volumen den Inhalt der Wasserschlosskammer dar, wobei der Steigschacht vernachlässigt wird. Das berechnete Volumen wird daher um so genauer, je kleiner das Volumen des Steigschachtes gewählt wird. Durch die Vernachlässigung des Steigschachtes befindet man sich jedoch auf der sicheren Seite der Berechnung. Das für die Kammer gefundene Volumen muss nun derart verteilt werden, dass sich sein Schwerpunkt auf der der Berechnung zugrunde gelegten Kote M befindet [9]).

Beim Drosselwasserschloss (nach Bild 3c) stellt das berechnete Volumen den Inhalt des Wasserschlosses dar, unter der Bedingung, dass die Drosselung optimal ist (d. h. dass der Anfangsdruck dem maximalen Ausschlag des Wasserspiegels entspricht). Diese Bedingung der optimalen Drosselung kann nur für einen im voraus bestimmten Schliess- und Oeffnungsvorgang erfüllt sein. Für alle übrigen Oeffnungs- und Schliessvorgänge wird die gewählte Drosselung nicht mehr optimal, was jedoch keine grosse Bedeutung für die praktische Berechnung hat. Es genügt, wenn die optimale Drosselung für die strengsten Oeffnungs- und Schliessgesetze erreicht

[8]) Es sei daran erinnert, dass der Absolutwert des Volumens $C = c\,P_0 S_0$ beträgt, worin $S_0 = \dfrac{W_0^2 L F_g}{g P_0^2}$ ist.

[9]) Befindet sich beim Eintritt des Steigschachtes in die obere Kammer eine Ueberfallmauer, so stellt M die Kote der Mauerkrone — vergrössert um die mittlere Höhe des Ueberfallstrahles — dar.

wird [10]). Wählt man M ebens gross wie den maximalen Spiegelausschlag im Wasserschloss (analog dem Anfangsdruck der Drosselung), so werden die mit den Diagrammen bestimmten Volumina durchwegs kleiner als es für ein Drosselwasserschloss notwendig ist. In Wirklichkeit ist der Gegendruck während der Wasserspiegelbewegung im Wasserschloss nicht konstant. Das für diesen Wasserschlosstyp berechnete Volumen muss daher noch um etwa 15 bis 20 % erhöht werden, wenn es sich um plötzliche Schliess- bzw. Oeffnungsvorgänge handelt. Das so vergrösserte Volumen ist im Wasserschloss zwischen Beharrungsspiegel (Ausgangslage für die Berechnung) und der Kote M anzuordnen, woraus sich dann der Horizontalquerschnitt des Wasserschlosses bestimmen lässt.

Es sei darauf hingewiesen, dass sich das totale Volumen nicht einfach als Summe der beiden berechneten Volumina aus Oeffnungs- und Schliessvorgang ergibt, da dadurch der Volumenteil zweimal berücksichtigt wäre, der zwischen den beiden der jeweiligen Berechnung zugrunde gelegten Ausgangslagen der Wasserspiegel liegt. Daher ist ein solcher Volumenteil vom Resultat in Abzug zu bringen. Ferner ist das Volumen zwischen den beiden extremen Ruhespiegellagen im Wasserschloss (höchster und tiefster Seespiegel) hinzuzufügen, wie im nachfolgenden Anwendungsbeispiel gezeigt wird.

Handelt es sich beim projektierten Wasserschloss um ein *Differential-Wasserschloss* (nach Bild 3d), so ist das berechnete Volumen unter der Voraussetzung, dass der Inhalt des Steigschachtes vernachlässigbar ist, für jeden plötzlichen Schliessvorgang gültig. Die Kote M stellt dabei die Kote des mittleren Ueberfallstrahles im Schacht dar. Für den Oeffnungsvorgang verhält sich ein Differentialwasserschloss wie ein gedrosseltes Wasserschloss. Das Berechnungsergebnis ist daher nur für den Oeffnungsvorgang richtig, in welchem die Drosselung ein Optimum darstellt (dieser Oeffnungsvorgang kann frei gewählt werden).

Andere Wasserschlosstypen können im allgemeinen durch Vergleiche beurteilt werden.

Für nicht plötzliche Entnahmeänderungen wird das mit Hilfe der Diagramme bestimmte Volumen offensichtlich zu gross. Schliesslich sei bemerkt, dass diese Volumina selbstverständlich die sicherheitshalber notwendigen Freibordhöhen in Kammern usw. nicht enthalten.

5. Anwendungsbeispiel

Wir bestimmen mit Hilfe der Diagramme das Volumen des Wasserschlosses einer mittleren Anlage und vergleichen darauf die gefundenen Resultate mit denen einer genauen Berechnung (Bild 6).

a) Bekannte Grössen:

Ausbauwassermenge	Q_o	= 40 m³/s
Druckstollen: Länge	L	= 4000 m
Querschnitt	F_g	= 12,5 m²
Geschwindigkeit	W_o	= 3,2 m/s
Druckverlust (einschl. $W_o^2/2g$)	P_o	= 9,0 m

Strengste Bewegungsgesetze des Absperrorgans:
vollständiges, plötzliches Schliessen
plötzliches Oeffnen von 50 % auf 100 %
Maximale Differenz der Ruhespiegel 10 m

b) Volumen des fiktiven Wasserschlosses, vereinfachte Berechnungsmethode

Wir wählen:

M_1 = 5 m für Schliessen $m_1 = 0{,}555$
M_2 = 10 m für Oeffnen $m_2 = 1{,}111$

10) Es kann vorkommen, dass der durch einen plötzlichen, teilweisen Schliessvorgang hervorgerufene maximale Spiegelanstieg denselben vollständigen Schliessens übersteigen kann. Für optimale Drosselung stellt sich dieser Fall für $F/S_0 > 0{,}25$ ein. Der Einfluss ist jedoch sehr gering und kann in Vorprojekten vernachlässigt werden.

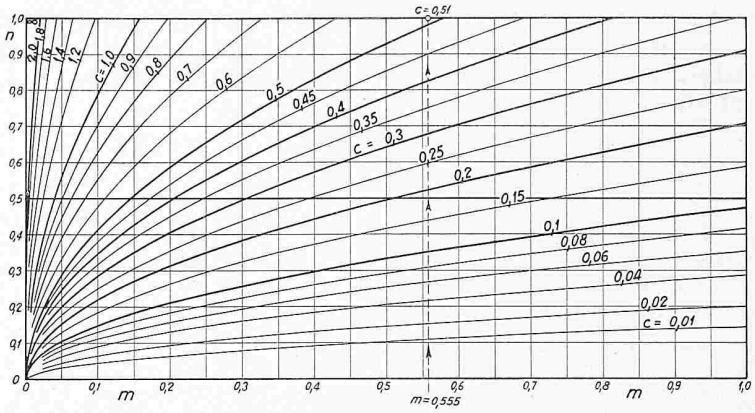


Bild 4. In das Wasserschloss eindringendes Wasservolumen infolge eines teilweisen, plötzlichen Schliessvorgangs, wobei die Wassermenge von $Q = nQ_0$ auf $Q = 0$ abnimmt. (n = Amplitude der Schliessbewegung)

Ergebnis der vereinfachten Berechnungmethode

$$m = \frac{M}{P_0} \qquad c = \frac{C}{P_0 S_0} \text{ wobei } S_0 = \frac{W_0^2 L F_g}{g P_0^2}$$

$$S_0 = \frac{W_0^2 L F_g}{g P_0^2} = 642 \text{ m}^2$$

Schliessen: $c_1 = 0{,}51$ $C_1 = 2950$ m³
Oeffnen: $c_2 = 0{,}21$ $C_2 = 1210$ m³

c) Volumen eines Drosselwasserschlosses

Volumen aus der vereinfachten Berechnungsmethode abgeleitet:

Volumen für Schliessen: 2950 + ~ 20% = 3500 m³
Volumen für Oeffnen: 1210 m³ + ~ 20% = 1500 m³
Ungefährer Querschnitt: 3500 m³: ($M + P_0$) = 250 m²
totales Volumen:

$$3500 \text{ m}^3 + 1500 \text{ m}^3 + \underbrace{F \cdot 10 \text{ m}}_{\text{Ruhespiegeländerung}} - \underbrace{F\,(P_0 - P_0/4)}_{\text{2 × berücksichtigtes Teilvolumen}} = \underline{5800 \text{ m}^3}$$

$P_0/4$ = Reibungsverluste für 50 % der Ausbauwassermenge

Volumen nach der üblichen Berechnungsmethode (nach Calame und Gaden oder Schoklitsch):

Schliessen:

Querschnitt F, für den Z ein Maximum wird ($Z_{max} = 5{,}0$ m)
$F = 250$ m² (bestimmt durch Versuchsrechnung)
Z: Kote des Wasserspiegels im Wasserschloss
$Z_* = 14{,}46$ m; $p_0 = 0{,}623$; $z_m = 0{,}345$; $Z_m = 5{,}0$ m

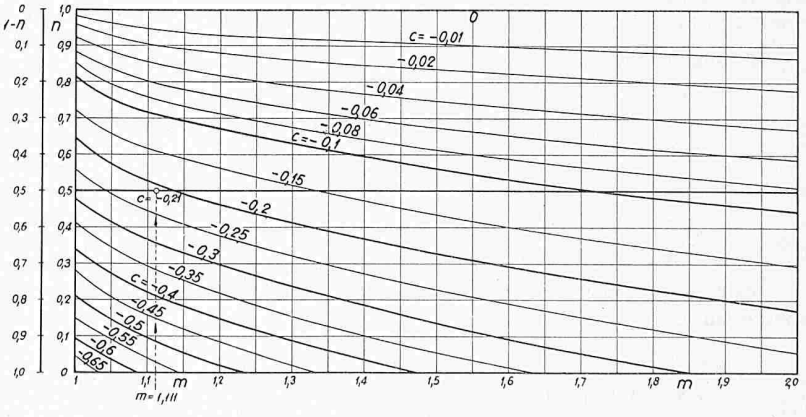


Bild 5. Aus dem Wasserschloss austretendes Wasservolumen infolge eines teilweisen, plötzlichen Oeffnungsvorgangs, bei dem die Wassermenge von $Q = nQ_0$ auf Q_0 zunimmt. (1 - n = Amplitude der Oeffnungsbewegung)

Ergebnis der vereinfachten Berechnungsmethode

$$m = \frac{M}{P_0} \qquad c = \frac{C}{S_0 P_0} \text{ wobei } S_0 = \frac{W_0^2 L F_g}{g P_0^2}$$

wobei $Z_* = W_0 \sqrt{\frac{L F}{g F_g}}$; $p_0 = \frac{P_0}{Z_*}$; $z_m = \frac{Z_m}{Z_*}$

Oeffnen:

Querschnitt F, für den $Z_{min} = -10$ m:

$F = 200$ m² (bestimmt durch Versuchsrechnung)

$Z_* = 16{,}16$ m $p_0 = 0{,}557$ $z_m = -0{,}620$ $Z_m = -10{,}00$ m

Volumen des Wasserschlosses (Koten berechnet ab höchstem Ruhespiegel im Wasserschloss).

Von Kote —9 bis Kote + 5: $14 \times 250 = 3500$ m³

Von Kote —9 bis Kote —20: $11 \times 200 = 2200$ m³

totales Volumen 5700 m³

6. Zusammenfassung

Es wurde dargelegt, wie ein beliebiger Wasserschlosstyp mittels einer vereinfachten Methode berechnet werden kann, wenn dabei der vom Wasserschloss auf den Druckstollen ausgeübte Druck während des ersten Spiegelausschlags (verursacht durch eine Entnahmeänderung) konstant angenommen wird. Diese Annahme hat es ermöglicht, zwei Diagramme (Bilder 4 und 5) zu erstellen, mit deren Hilfe für totale oder beliebige teilweise, plötzliche Schliess- und Oeffnungvorgänge das in das Wasserschloss eindringende oder aus ihm austretende Wasservolumen bestimmt werden kann. Mit diesen beiden Diagrammen kann man sofort, ohne lange Versuchsrechnung und ohne den Wasserschlosstyp von Anfang genau festlegen zu müssen, eine erste Annäherung des Wasserschlossvolumens ermitteln. Ihre Anwendung ist daher

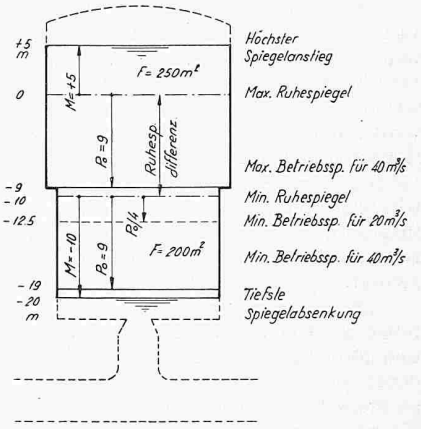


Bild 6. Zur Berechnung eines Drosselwasserschlosses

vor allem für Kostenvoranschläge von Vorprojekten zweckmässig. Die allgemeinen Gleichungen (18) und (19) tragen ebenso den nicht plötzlichen, sich über eine Zeitdauer erstreckenden Entnahmeänderungen Rechnung.

Die Anwendung dieser Formeln und Diagramme liefert um so genauere Resultate, je mehr sich die aus den endgültigen Formen des Wasserschlosses ergebenden Betriebsfunktionen der in der Berechnung gemachten Annahme $Z = M =$ konst. nähern.

Adresse des Verfassers: Dr. *A. Gardel,* Ingénieur-conseil, Avenue de la Gare 10, Lausanne.

Zur Frage der Kaltlagerung von Obst

DK 621.565:634.1

Von Dipl. Ing. **A. Ostertag,** Zürich

1. Die Problemstellung

Die Kaltlagerung von Obst steht im Zusammenhang mit andern Massnahmen, die hauptsächlich drei Zwecken dienen, nämlich dem Schutz vor Verderb, was im Hinblick auf die beschleunigte Bevölkerungsvermehrung bei gleichzeitigem Schwund von Kulturland von grösster Bedeutung ist, der Qualitätsverbesserung, im besondern dem Erhalten wertvoller Nährstoffe, Vitamine und Aromaträger, und schliesslich dem Senken der Gestehungskosten, um einer möglichst grossen Zahl von Bezügern den ganzjährigen Genuss frischer Früchte zu gestatten. Als massgebende Vorkehrungen sind im Obstbau vor allem die Züchtung geeigneter Sorten sowie die Qualitätsverbesserung der Früchte durch zweckmässige Boden- und Baumpflege, ferner die sachgemässe Durchführung der Ernte, der Verpackung und des Transportes nach den Küllagern zu nennen. Nur wenn hochwertiges Obst in geeignetem Zustand eingelagert wird, rechtfertigen sich die beträchtlichen Aufwendungen der Kaltlagerung.

Die grosse Bedeutung möglichst guter Erhaltung der baumfrischem Obst eigenen Werte kommt u. a. in den verschiedenen Vorschlägen und Ausführungen zur Verbesserung des Lagerklimas zum Ausdruck. Neben den üblichen Kühlräumen mit künstlicher Luftumwälzung werden Räume mit besonderen Einrichtungen zur Sterilisation der umgewälzten Luft und luftdichte Kühlkammern angewendet, in denen ein Teil des Sauerstoffgehaltes der Luft durch Kohlensäure ersetzt ist (z. B. 10,5 % O_2 und 10,5 % CO_2). Ueber die Anwendung solcher und weiterer Zusatzverfahren hat Prof. Dr. *J. Kuprianoff,* Karlsruhe, näheres mitgeteilt [1]). Hier soll nicht weiter auf sie eingegangen werden. Wir beschränken uns auf die Untersuchung von Anlagen, die das Konstanthalten von Temperatur und Feuchtigkeit unter den bei der Kaltlagerung von Obst auftretenden Bedingungen bezwecken.

Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Anlageteile wird in der Regel so festgelegt, dass sie den Anforderungen bei den ungünstigsten Betriebsbedingungen genügen. Damit ist über das tatsächliche Betriebsverhalten jedoch nicht viel ausgesagt. Um dieses kennen zu lernen, ist eine grössere Zahl von möglichen Betriebszuständen zu untersuchen. Man wird dann erst feststellen, wie die Anlage in den hauptsächlichsten Phasen ihrer Benützung arbeitet und welche zusätzliche Einrichtungen zum Erfüllen der Anforderungen u. U. noch nötig sind. Ein solches Vorgehen drängt sich aber auch zur Abklärung der Frage nach der Wirtschaftlichkeit auf. Hier interessieren vor allem die Kosten des als Lösung vorgeschlagenen Verfahrens im Vergleich zu denen anderer Arten der Frischerhaltung. Sie müssen in einem tragbaren Verhältnis zu den Vorteilen stehen, die jenes erwarten lässt. Als massgebende Kenngrösse ist der Betrag der Jahreskosten bei mittleren Verhältnissen zu betrachten, der sich einerseits als Summe der festen jährlichen Aufwendungen für Verzinsung und Tilgung der Anlagekosten sowie für den Unterhalt der Einrichtungen und für Wartung und Bedienung (Personalkostenanteil) ergeben, zu denen anderseits die von der Betriebszeit abhängigen jährlichen Ausgaben für die Betriebsmittel kommen. Beim Ermitteln der Jahreskosten bedeutet das Bestimmen des Betriebsmittelverbrauchs den interessantesten und meist auch den sichereren Teil der Untersuchung. Er gibt zugleich über die verschiedenen, durch das Aussenklima bedingten Betriebsweisen Auskunft und weist auf Einsparungsmöglichkeiten hin. Es lohnt sich also, bei jedem neuen Vorhaben solche Berechnungen durchzuführen. Wie das geschehen kann, soll am Beispiel eines Obstlagerraumes gezeigt werden.

Grundsätzliche Erwägungen

Durch die Kaltlagerung soll der Ablauf der Lebensvorgänge im Obst verlangsamt werden. Diese äussern sich u. a. in einer Abgabe von Wärme, Wasser und Kohlensäure. Je tiefer die Raumtemperatur und je höher die relative Feuchtigkeit, desto langsamer verlaufen die biologischen Umsetzungen, desto höher ist die Qualität des Gutes am Ende der Lagerzeit, desto geringer auch dessen Gewichtsabnahme. Nun sind aber der Temperatursenkung und der Feuchtigkeitssteigerung durch das Auftreten von Kaltlagerkrankheiten, Schimmel und Fäulnis Grenzen gesetzt. Die günstigsten Bedingungen liegen je nach den Sorten bei +2 bis +4° C und bei 90 bis 92 % relativer Feuchtigkeit. Durch Anwenden besonderer Massnahmen gelingt es, 94 bis 96 % rel. Feuchtigkeit anzuwenden, ohne dass Erkrankungen auftreten.

[1]) SBZ 1956, Nr. 19 und 20, S. 275*, 305*.