Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 89 (1971)
Heft: 12

Artikel: Die Berechnung der Hochwasserretention von Seen
Autor: Vischer, D.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84802

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Berechnung der Hochwasserretention von Seen

DK 627.421:627.514

Von Prof. Dr. **D. Vischer**, ETH Zürich

Infolge der wachsenden Überbauung nimmt die Bedeutung des Hochwasserschutzes in der Schweiz wieder zu. Einmal wird das verfügbare Land knapper, so dass selbst hochwassergefährdete Gebiete für die Besiedlung und Bebauung herangezogen werden müssen. Dann hat aber auch der Ausbau der Orts- und Strassenentwässerungen zur Folge, dass die Niederschläge rascher als früher den Vorflutern zufliessen und in diesen entsprechend grössere Hochwasserspitzen erzeugen. Als Schutz vor Überschwemmungen bieten sich grundsätzlich drei Möglichkeiten an:

a. *Eindämmung*, d.h. Erhöhung der Fluss- und Bachufer durch hochwassersichere Dämme und Ufermauern, allenfalls ergänzt durch Schöpfwerke, welche das rückwärtige Land entwässern.

b. *Korrektion*, d.h. Umgestaltung der Flüsse und Bäche bezüglich Lage, Längen- und Querprofil, um das Abflussvermögen zu steigern und somit die Hochwasserspiegel zu senken.

c. *Retention*, d.h. Schaffung von Hochwasserrückhalteräumen in natürlichen und künstlichen Seen zur Dämpfung der Hochwasserspitzen in den unterliegenden Flüssen oder Bächen.

Diese drei Möglichkeiten können selbstverständlich kombiniert angewandt werden; es bleibt in jedem Fall einem eingehenden Variantenvergleich vorbehalten, die jeweils richtige Lösung zu begründen. Die vorliegende Arbeit will jedoch das Augenmerk ausschliesslich auf die Möglichkeit der Retention richten und einige an sich bekannte, aber in der Schweiz wenig beachtete Grundsätze und Berechnungsverfahren erläutern. Dies geschieht in der Hoffnung, dass bei den zahlreichen bevorstehenden Fluss- und Bachverbauungen die Frage der Retention ernsthaft mitgeprüft wird. Als wegweisend in dieser Hinsicht dürften die erfolgreichen Regulierungen der grossen Mittellandseen dienen. Vielleicht bringen aber auch die Ausnutzung von kleineren natürlichen Seen und die Schaffung von künstlichen Retentionsbecken da und dort eine wirtschaftliche Entlastung der Bäche. Ein interessantes Beispiel in dieser Hinsicht stellt das Projekt Orden im Bergell (Kanton Graubünden) dar, auf das weiter unten eingegangen wird.

1. Die Retentionsgleichung

Bei den geringen Strömungsgeschwindigkeiten in grösseren Becken kann angenommen werden, dass der Wasserspiegel horizontal bleibt (Bild 1). Jeder Änderung dh des Wasserstandes entspricht dann eine parallele Hebung der Seespiegelfläche F. Aus Kontinuitätsgründen ist die Differenz zwischen dem Zufluss Q_Z und dem Abfluss Q_A also gleich der Seespiegelfläche mal der Steiggeschwindigkeit dh/dt:

$$(1) \qquad Q_Z - Q_A = F \frac{dh}{dt}$$

Führt man in dieser sogenannten Retentionsgleichung mit

$$(1a) \qquad Q_R = F \frac{dh}{dt}$$

die eigentliche Retention oder mit

$$dV = F\,dh$$

die Volumenänderung des Sees ein, erhält man mit

$$(2) \qquad Q_Z - Q_A = Q_R$$

$$(3) \qquad Q_Z - Q_A = \frac{dV}{dt}$$

zwei weitere Ausdrücke für die gleiche Beziehung.

Betrachtet man die einzelnen Komponenten für sich, so gilt gewöhnlich folgendes: Der Zufluss Q_Z umfasst grundsätzlich die Wasserführung der in den See mündenden ober- und unterirdischen Gewässer sowie die auf den See treffenden Niederschläge. Bei grösseren Einzugsgebieten und namentlich bei Hochwasser kann aber der Einfluss der unterirdischen Gewässer (Grundwasser) und der Niederschläge meist ausser acht gelassen werden. Es genügt dann, den Zufluss als Ganglinie der Ergiebigkeit der oberirdischen Gewässer festzuhalten, d.h. als Funktion der Zeit

$$Q_Z = Q_Z(t).$$

Nur wenn der See ein solches Gewässer derart einstaut, dass dessen Ergiebigkeit beeinflusst wird, muss Q_Z als Funktion von t und h beschrieben werden. Als Beispiel für diesen hier nicht weiter behandelten Fall sei der Rückstau eines Sees auf den Ausfluss eines oberliegenden zweiten Sees erwähnt.

Der Abfluss Q_A setzt sich grundsätzlich aus der Wasserführung der aus dem See abfliessenden ober- und unterirdischen Gewässer sowie aus der Verdunstung zusammen. Auch hier überwiegt der Beitrag der oberirdischen Gewässer meistens derart, dass der Abfluss praktisch mit der Wasserführung des Ausflussgerinnes gleichgesetzt werden kann. Falls dieses Gerinne weder reguliert noch durch einen unterliegenden See oder seitlichen Zufluss eingestaut wird, ergibt sich der Abfluss aus einer eindeutigen Abflussmengenkurve, das heisst als Funktion des Seestandes

$$Q_A = Q_A(h).$$

Die Seeoberfläche und das Seevolumen sind naturgemäss durch die Topographie des Beckens in Funktion der Spiegelhöhe $F = F(h)$ beziehungsweise $V = V(h)$ gegeben.

2. Der Retentionsvorgang

Einen grundsätzlichen Einblick in den Retentionsvorgang erhält man, wie dies schon *P. Curti* [1] getan hat, durch Betrachtung der Ganglinien in Bild 2. Dort wird dargestellt, wie ein steil an- und abschwellender Hochwasserzufluss Q_Z durch eine Retention Q_R in einen stark gedämpften Abfluss Q_A verwandelt wird. Es wurde bereits erwähnt, dass die Retention Q_R gemäss Gl (1a), also proportional der Neigung der Ganglinie des Seestandes ist. Für den Zeitpunkt t_3, in welchem $dh/dt = 0$ ist, gilt

$$h(t_3) = h_{Max}, \qquad Q_R(t_3) = 0, \qquad Q_Z(t_3) = Q_A(t_3).$$

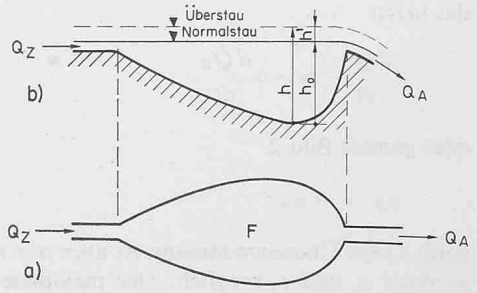

Bild 1. Schematische Darstellung eines Sees in Grundriss a) und Längsschnitt b)

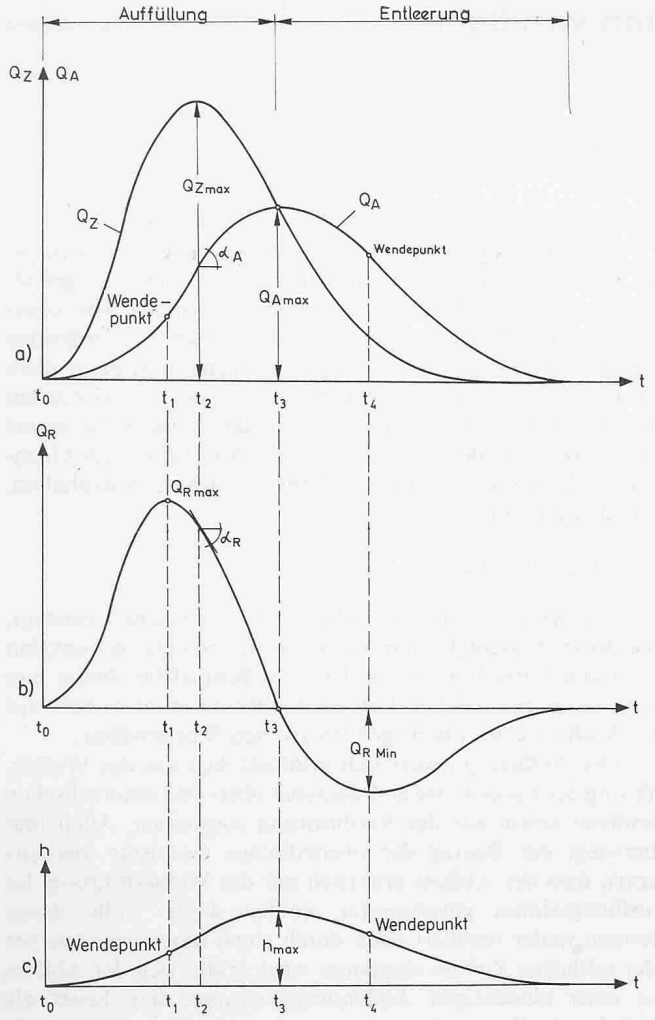

Bild 2. Grundsätzlicher Verlauf der Ganglinien bei einer Seeretention. a) Zu- und Abfluss, b) Retention, c) Seestand

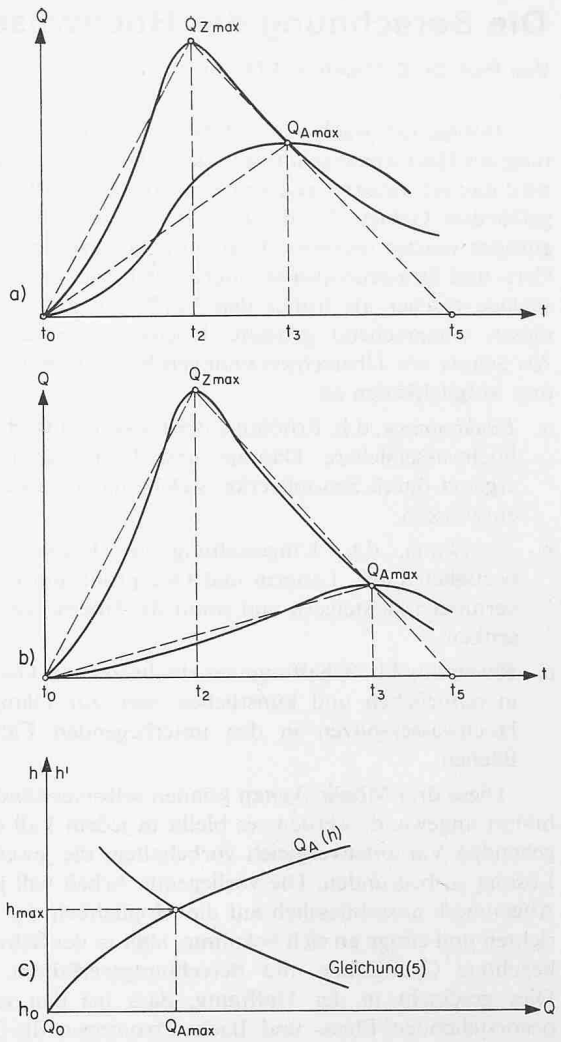

Bild 3. a) und b) Approximation der Zu- und Abflussganglinie durch Dreiecke. c) Darstellung der Gleichung (5) und der Abflussmengenkurve im h', Q-Diagramm

Da hier der Abfluss als Funktion des Seestandes allein vorausgesetzt wird, erreicht dieser sein Maximum gleichzeitig wie jener mit $Q_A(t_3) = Q_{AMax}$. Der maximale Abfluss tritt also gerade in demjenigen Zeitpunkt auf, in welchem Zu- und Abfluss übereinstimmen.

Weniger interessant, aber doch erwähnenswert sind die Zeitpunkte t_1 und t_4, in denen $d^2h/dt^2 = 0$ ist. Sie geben an, wo die Ganglinie des Seestandes h und des Abflusses Q_A einen Wendepunkt aufweisen und wann die Retention Q_R maximal oder minimal wird. Ferner kann aus Gleichung (2) geschlossen werden, dass Q_Z maximal wird, wenn

$$\frac{dQ_Z}{dt} = \frac{dQ_A}{dt} + \frac{dQ_R}{dt} = 0,$$

das heisst

$$\frac{dQ_A}{dt} = -\frac{dQ_R}{dt}$$

oder gemäss Bild 2

$$\alpha_A = -\alpha_R$$

wird. Diese Übereinstimmung ist aber nur zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_3 möglich. Der maximale Zufluss tritt also zeitlich zwischen der maximalen Retention und dem maximalen Abfluss auf.

3. Die Abschätzung des Retentionsvolumens

Für den Fall, dass die Seeoberfläche F im Bereich der auftretenden Spiegelschwankungen ungefähr konstant bleibt, kann, ausgehend von einer Arbeit von *Y. Peter* [12], ein einfaches Näherungsverfahren vorgeschlagen werden. Dieses fusst darauf, dass sowohl die Zufluss- wie die Abflussganglinie im Sinn von Bild 3 durch Dreiecke approximiert werden können. Tatsächlich kennt man vom massgebenden Hochwasserzufluss oft nicht mehr als dessen Spitze und zeitliche Ausdehnung, so dass dann eine dreieckförmige Approximation der Welle als durchaus vertretbar erscheint.

Aus Bild 3 folgt für das erforderliche Retentionsvolumen unmittelbar die Beziehung

$$(4) \qquad V_R = \frac{t_5 - t_0}{2}(Q_{ZMax} - Q_{AMax})$$

und wegen

$$h' = h - h_0;\ V_R = F\,h'_{Max}$$

$$(5) \qquad h'_{Max} = \frac{t_5 - t_0}{2F}(Q_{Z\,Max} - Q_{AMax}).$$

Sie erscheint im h', Q-Diagramm von Bild 3c somit als Kurve, die alle möglichen Kombinationen von h'_{Max} und $Q_{a\,Max}$ ver-

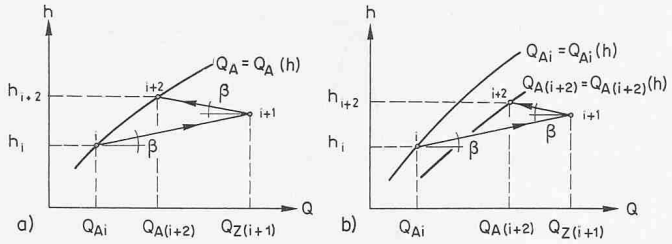

Bild 4. Elementarschritt der Retentionsrechnung im h, Q-Diagramm, a) bei zeitlich unveränderlicher, b) bei zeitlich veränderlicher Abflussmengenkurve

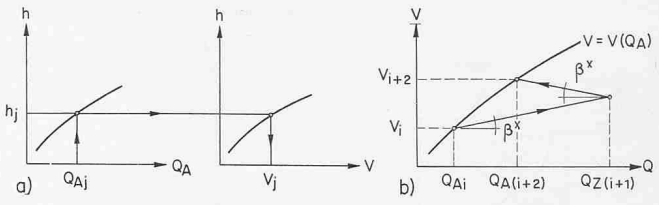

Bild 5. a) Konstruktion der Abhängigkeit $V = V(Q_A)$. b) Elementarschritt der Retentionsrechnung im V, Q-Diagramm

bindet. Bringt man diese mit der Abflusskurve $Q_A = Q_A(h)$ zum Schnitt, so erhält man im gemeinsamen Punkt das gesuchte Wertpaar h'_{Max} und Q_{AMax}. Selbstverständlich kann der Schnittpunkt auch analytisch ermittelt werden, indem man die Abflussbeziehung $Q_A = Q_A(h)$ in die Gleichung (5) einsetzt.

4. Die Retentionsberechnung

Wenn die Zufluss- und die Abflussganglinie nicht einfach durch Dreiecke approximiert werden können, muss die Retentionsberechnung durch schrittweise Lösung der Differentialgleichung (1) erfolgen. Als besonders übersichtlich hierfür erweist sich die Methode der Charakteristiken. Diese wurde in der Hydromechanik vor allem durch *L. Bergeron* [4], [6], *K.E. Sorensen* [7] und *H.M. Paynter* [8], [9] eingeführt, obschon die ersten Anwendungen von *0. Schnyder* [2] und *K.J. De Juhasz* [3], [5] stammen. Erwähnenswert ist namentlich die spätere Arbeit von *K.J. De Juhasz* [5], wo gerade der Retentionsvorgang systematisch untersucht wird, allerdings im Hinblick auf industrielle Behälter mit konstanter Spiegelfläche.

Formt man die Gleichung (1) nach Einführung endlicher Differenzen zu

$$(6) \qquad \frac{\Delta h}{Q_Z - Q_A} = \frac{\Delta t}{F} = \operatorname{tg} \beta$$

um, so fällt auf, dass bei der Wahl eines bestimmten Zeitschrittes das Verhältnis zwischen dem Spiegelanstieg und der Differenz zwischen Zu- und Abfluss konstant bleibt. Dieses Verhältnis kann deshalb im h, Q-Diagramm durch eine Gerade mit der Neigung

$$(6a) \qquad \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta t}{F}$$

eingeführt werden. Da diese das Zusammenspiel zwischen den Variablen charakterisiert, wird sie als Charakteristik bezeichnet.

Im h, Q-Diagramm, Bild 4a, wird beispielsweise ein Elementarschritt über die Zeit $2\Delta t$ durchgeführt. Dabei wird angenommen, dass der Abfluss Q_A und der Seestand h im Zeitpunkt t_i sowie der Zufluss Q_Z im Zeitpunkt $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ bekannt seien. Gesucht wird der Abfluss Q_A und der Seestand h im Zeitpunkt $t_{i+2} = t_i + 2\Delta t$. Wie die Pfeile andeuten, ermittelt man diese Werte anhand der Charakteristik wie folgt: Zuerst wird auf der Ordinate von $Q_{Z\,(i+1)}$ der Punkt $i+1$ gefunden und anschliessend auf der Abflusskurve $Q_A(h)$ der Punkt $i+2$. Dabei zeigen die geometrischen Beziehungen

$$h_{i+2} - h_i = (Q_{Z\,(i+1)} - Q_{Ai}) \operatorname{tg} \beta + (Q_{Z\,(i+1)} - Q_{A\,(i+2)}) \operatorname{tg} \beta$$

oder

$$\frac{{}^1/_2 \cdot (h_{(i+2)} - h_i)}{Q_{Z\,(i+1)} - {}^1/_2 \cdot (Q_{(i+2)} + Q_i)} = \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta t}{F}$$

fast unmittelbar, dass die Retentionsgleichung im Sinne einer Mittelwertsmethode über das Intervall $2\Delta t$ gelöst wird. Weitere Einzelheiten vermittelt auch das Beispiel von Bild 8.

Nur der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt. dass die Methode der Charakteristiken im h, Q-Diagramm auch dann anwendbar ist, wenn der Abfluss Q_A nicht durch eine eindeutige Abflusskurve gegeben ist, sondern durch ein Regulierorgan verstellt wird. In Bild 4b wird beispielsweise der Elementarschritt gezeigt, der sich ergibt, wenn die Abflusskurve zwischen der Zeit t_i und t_{i+2} etwa durch Verstellung von Schützen verändert wird. Es sind aber auch Lösungen möglich, falls der Abfluss in der Form

$$Q_A = A \int h\, dt + B h + C \frac{dh}{dt}$$

von einer stetigen Seestandsregelung bestimmt wird, worauf in einer anderen Arbeit [15] näher eingegangen wird.

5. Die verfeinerte Retentionsberechnung

Falls die Voraussetzung einer im Bereich der Spiegelschwankungen konstanten Seeoberfläche F nicht zulässig ist, muss die Methode der Charakteristiken auf das V, Q-Diagramm angewandt werden und verliert damit etwas an Übersichtlichkeit. Es ist vor allem nötig, die Abflusskurve $Q_A = Q_A(h)$ mittels der Seeinhaltskurve $V = V(h)$ in eine neue Kurve $V = V(Q_A)$ zu übertragen (Bild 5a). Dann lässt sich der Elementarschritt im V, Q-Diagramm allerdings ähnlich einfach unternehmen (Bild 5b). In [10] hat *G. Bock* sehr klar dargestellt, dass diese – im allgemeinen *K.E. Sorensen* [7] zugeschriebene-Methode den graphischen Methoden anderer Autoren überlegen ist.

Formt man die Gleichung (3) nach Einführung endlicher Differenzen zu

$$(7) \qquad \frac{\Delta V}{Q_Z - Q_A} = \Delta t = \operatorname{tg} \beta^*$$

um, so wird die Analogie zur Formel (6) und damit die Verwandtschaft zwischen dem Elementarschritt in den Bildern 4a und 5b ersichtlich. Eine vollständige Anwendung ist in Bild 10 wiedergegeben.

Selbstverständlich kann diese verfeinerte Retentionsberechnung auch numerisch mittels einer elektronischen Rechenmaschine durchgeführt werden. Entsprechende Programme gehören heute gleichsam zu den Standardwerken wasserbaulich ausgerichteter Programmbibliotheken [13]. Sie gewährleisten eine höhere Genauigkeit als die graphischen Methoden und ermöglichen bei mehrmaligem Durchlauf eine iterative Bestimmung der verschiedenen Parameter.

6. Das Beispiel einer Seeregulierung

Ein See soll oberhalb seines normalen Standes einen Hochwasserretentionsraum aufweisen, der die höchste Zuflussspitze von 600 m³/s auf eine für die Unterlieger ungefährliche

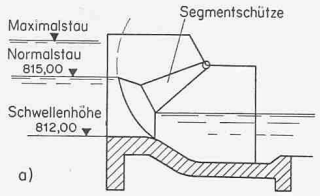

Bild 6a. Schematischer Längsschnitt durch ein Regulierwehr

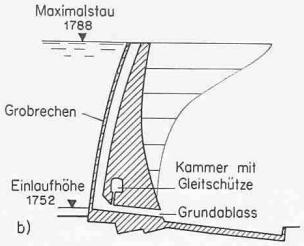

Bild 6b. Schematischer Längsschnitt durch die Staumauer Orden

Abflussspitze von 300 m³/s vermindert. Die Zuflussganglinie ist gemäss Bild 7 gegeben; der eigentliche Hochwasserzustand tritt erst bei Werten über 100 m³/s auf. Die Seeoberfläche beträgt 10 km² und bleibt sich im betrachteten Spiegelschwankungsbereich ungefähr gleich. Wie gross ist der erforderliche Retentionsraum?, wie hoch steigt der See?, wie ist das Regulierwehr am Ausfluss zu bemessen?

Um die Überschlagsrechnung gemäss Abschnitt 3 durchzuführen, muss die Zuflussganglinie von Bild 7 durch ein Dreieck approximiert werden. Dann folgt mit

$$Q_{ZMax} = 600\ \mathrm{m^3/s}, \quad Q_{AMax} = 300\ \mathrm{m^3/s}$$
$$t_5 = 30\ \mathrm{h} = 108000\ \mathrm{s}, \quad t_0 = 0\ \mathrm{h}$$
$$F = 10\ \mathrm{km^2} = 10000000\ \mathrm{m^2}$$

der erforderliche Retentionsraum V_R aus Gleichung (4) zu

$$V_R = \frac{108000}{2}(600-300) = 16200000\ \mathrm{m^3}$$

und der entsprechende Überstau zu

$$h'_{Max} = \frac{V_R}{F} = \frac{16200000}{10000000} = 1{,}62\ \mathrm{m}.$$

Für die Bemessung des Regulierwehrs kann davon ausgegangen werden, dass dessen Schützen beim Maximalausfluss von 300 m³/s vollständig geöffnet sind. Falls die Wehrschwelle auf Kote 812.00 angenommen wird (Bild 6a), ergibt sich somit eine maximale Überfallhöhe von

$$h_{Max} = h'_{Max} + 3{,}00 = 4{,}62\ \mathrm{m}.$$

Aus der Abflussbeziehung für beispielsweise freien Überfall

$$Q_{A\,Max} = 2{,}1\, B\, h_{Max}{}^{3/2}$$

folgt dann die erforderliche lichte Wehrbreite zu

$$B = \frac{300}{2{,}1\,(4{,}62)^{3/2}} = 14{,}4\ \mathrm{m}.$$

Damit sind die gestellten Fragen überschlägig beantwortet.

Wenn eine genauere Untersuchung erforderlich ist, so kann nach Abschnitt 4 vorgegangen werden. Dies setzt jedoch voraus, dass das Wehrreglement festgelegt wird. Hier sei angenommen, dass der Seespiegel bei einem Abfluss unter 100 m³/s auf dem normalen Stand von 815.00 konstant gehalten wird; bei einem höheren Abfluss soll hingegen ein linearer Überstau gemäss

$$h' = \frac{Q_A - 100}{Q_{AMax} - 100}\, h'_{Max}$$

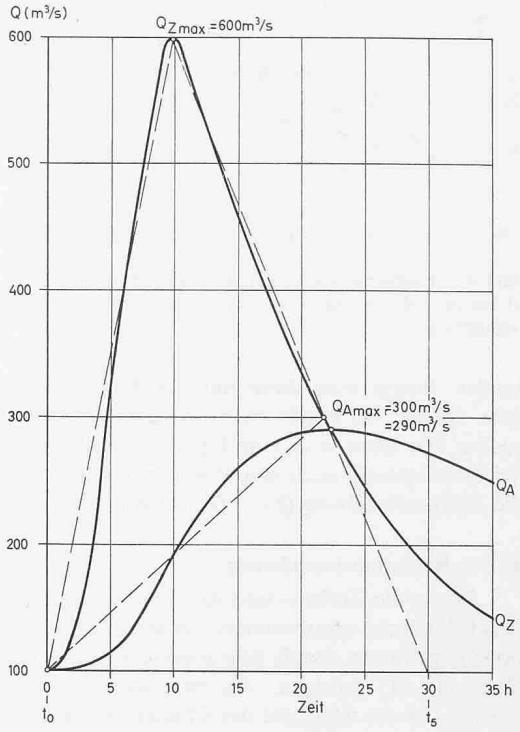

Bild 7. Zu- und Abflussganglinie des Beispiels einer Seeretention

gewährleistet werden. Mit dem überschlägig bestimmten Wert von h'_{Max} ergibt sich die Abflussbeziehung also zu

$$h' = \frac{1{,}62}{200}(Q_A - 100) = 0{,}0081\,(Q_A - 100).$$

Diese ist in Bild 8 eingetragen und dient als erste Annahme für die Retentionsberechnung nach der Methode der Charakteristiken. Als Neigung der Charakteristiken eignet sich mit

$$\Delta t = 1\ \mathrm{h} = 3600\ \mathrm{s}$$

der Wert

$$\mathrm{tg}\,\beta = \frac{3600}{10000000}.$$

Der Zufluss wird nach seiner effektiven Ganglinie berücksichtigt. Wie die Konstruktion in Bild 8 ergibt, weichen die Ergebnisse nicht allzusehr von der Näherungslösung ab, Tabelle 1.

Der Abfluss wird, wie die Retentionsrechnung zeigt, also etwas stärker gedämpft als erforderlich. Es könnte deshalb unter Voraussetzung einer leicht flacheren Abflussbeziehung, beispielsweise mit

$$h' = \frac{1{,}50}{200}(Q_A - 100) = 0{,}0075\,(Q_A - 100)$$

eine zweite, verfeinerte Retentionsrechnung durchgeführt werden.

Tabelle 1. Ergebnisse der Näherungsmethode *N* und der ersten Retentionsrechnung *R* 1.

		N	*R* 1	
Maximaler Ausfluss	$Q_{A\,Max}$	300	290	m³/s
Maximaler Überstau	h'_{Max}	1,62	1,54	m
Entsprechender Zeitpunkt	t_3	21,7	22,3	h

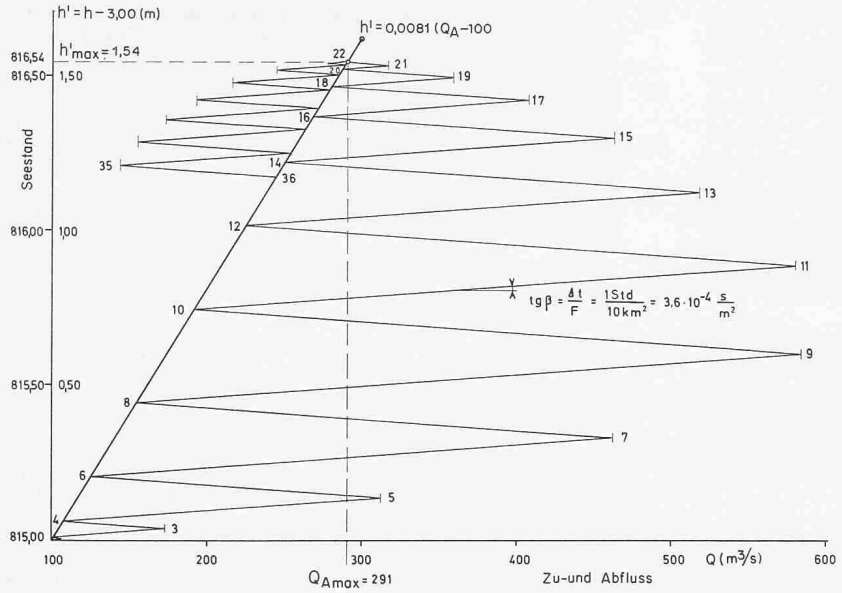

Bild 8. Retentionsrechnung zu Bild 7 im h, Q-Diagramm

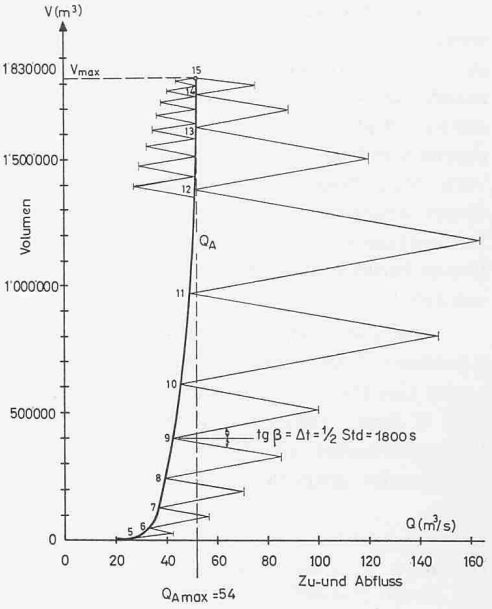

Bild 10. Retentionsrechnung zu Bild 9 im V, Q-Diagramm

7. Das Beispiel eines Hochwasserschutzbeckens

Anstelle einer fiktiven Anordnung wird hier als Beispiel das Hochwasserschutzbecken Orden im Kanton Graubünden betrachtet. Dieses soll rund 500 m südlich des Malojapasses die Fluten der Orlegna dämpfen, damit das Bergell vor Überschwemmungen geschützt wird.

Nach mehreren Voruntersuchungen erarbeitete das Ingenieurbüro *Gregori* und *Hitz* [11] im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Graubünden ein generelles Projekt, das den Abschluss eines natürlichen Beckens durch eine Staumauer mit Grunddurchlass und Kronenüberfall vorsieht. Im Betrieb soll dieser Grunddurchlass offenbleiben und die kleineren und mittleren Zuflüsse ohne Rückstau, also bei leerem Becken, weiterleiten; einzig die grossen Zuflüsse soll er im Becken zurückhalten und auf einen bestimmten Abflusswert mindern. Für die entsprechende Retentionsrechnung wurde die in Bild 9 dargestellte Zuflussganglinie sowie die Abhängigkeit zwischen Beckeninhalt, Durchlassvermögen und Staukote gemäss Tabelle 2 vorausgesetzt.

Für die Lösung der Retentionsgleichung verwendeten die Projektverfasser ein numerisches Differenzverfahren mit Zeitschritten von 0,4 bis 3,0 Stunden. Um nun die gleiche Berechnung nach der Methode der Charakteristiken durchzuführen, muss, da die Stauseefläche offensichtlich stark mit der Höhe variiert, das Verfahren von Abschnitt 5 angewandt werden. Die Kurve $V = V(Q_A)$ kann dabei unmittelbar der Tabelle 1 entnommen und im V, Q-Diagramm, Bild 10, eingetragen werden.

Tabelle 2. Hauptdaten des Rückhaltebeckens Orden

Staukote m ü.M.	Beckeninhalt m³	Durchlassvermögen m³/s
1750	0	0
1754	1 000	17,8
1760	7 000	27,8
1764	34 000	32,8
1768	130 000	37,0
1772	300 000	41,0
1776	560 000	44,8
1780	910 000	48,0
1784	1350 000	51,2
1788	1900 000	54,2

Als Neigung für die Charakteristiken erweist sich der Wert $\operatorname{tg} \beta^* = 0{,}5$ h $= 1800$ s als günstig. Das Ergebnis der einfachen Konstruktion des Retentionsvorganges zeigt dann im Vergleich zur Berechnung von Gregori und Hitz [11] die Werte der Tabelle 3.

Die Ganglinie des Ausflusses ist für beide Methoden in Bild 9 dargestellt. In Anbetracht der Verschiedenartigkeit dieser Methoden kann die Übereinstimmung als befriedigend bezeichnet werden.

Tabelle 3. Ergebnisse der Retentionsberechnung

	nach [11]	nach Bild 10	
Erforderliches Retentionsvolumen	1,67	1,83	Mio m³
Maximaler Ausfluss	53,2	54,0	m³/s
Maximaler Aufstau	36,5	37,6	m
Maximale Staukote	1786,5	1787,6	m ü.M.
Entsprechender Zeitpunkt	14,5	14,5	h

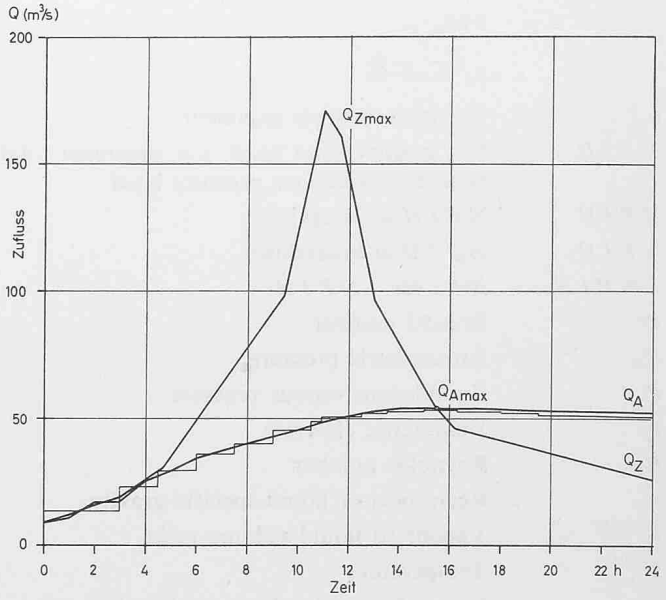

Bild 9. Zu- und Abflussganglinie des Hochwasserretentionsbeckens Orden

Das weiterentwickelte Ausführungsprojekt des Hochwasserschutzbeckens Orden wird vom Ingenieurbüro Maggia in [14] beschrieben. Als Talabschluss dient eine Bogenstaumauer von 40 m Höhe, 180 m Kronenlänge und 10 m Basisstärke (Bild 6b). Der Grunddurchlass weist einen Durchmesser von 1,60 m auf und wird auf der Einlaufseite durch einen vom Mauerfuss bis zur Krone hochgezogenen Grobrechen derart abgeschirmt, dass das Geschiebe durchgeht, dagegen Baumstämme, Wurzelstöcke, Zweige usw. aufgehalten werden. Dieses bemerkenswerte Bauwerk soll in diesem Jahre vollendet werden.

Abschliessend danke ich dipl. Ing. *Ch. Bischoff*, Chef der Abteilung Fluss- und Wildbachverbauungen des Tiefbauamtes Graubünden, für seine Angaben über Orden und dipl. Ing. *R. Sigg*, Assistent im Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETHZ, für die Durchführung der entsprechenden graphischen Retentionsrechnung.

Literaturverzeichnis

[1] *Curti, P.:* Über Seeretention, Hochfluten und das Problem konstanter Wasserführung. Promotionsarbeit, Raustein Zürich, 1911

[2] *Schnyder, O.:* Druckstösse in Pumpensteigleitungen. «Schweizerische Bauzeitung», Bd. *94*, (1929) Nr. 22 und 23

[3] *De Juhasz, K.J.:* Graphical Analysis of Transient Phenomena in Linear Flow. «Journal of the Franklin Institute», Vol. *223*, April, May, June 1937

[4] *Bergeron, L.:* Méthode graphique générale de calcul des propagations d'ondes planes. «Mémoire de la Soc. des Ing. Civils de France». Bulletin Juillet, Août 1937

[5] *De Juhasz, K.J.:* Graphical Analysis of Transient Phenomena in Industrial Processes. «Instruments», Vol. *16*, Aug. 1943

[6] *Bergeron, L.:* Du coup de bélier en hydraulique au coup de foudre en électricité, Paris 1950, Dunod

[7] *Sorensen K.E.:* Graphical Solution of Hydraulic Problems. «Proceedings of the American Society of Civil Engineers», Vol. *78*, Feb. 1952

[8] *Paynter, H.M.:* Methods and Results from M.I.T. Studies in Unsteady Flow. «Journal of the Boston Society of Civil Engineers», Vol. *39*, April 1952

[9] *Paynter, H.M.:* How to Analyze Control Systems Graphically. «Control Engineering», Feb. 1955

[10] *Bock, G.:* Der Ingenieur der Praxis und die Seeretention. «Wasserwirtschaft-Wassertechnik», *12* (1962), H. 3

[11] *Gregori B.* und *Hitz H.:* Generelles Projekt für die Verbauung der Orlegna und Maira im Bergell von Plancanin bis Vicosoprano mit Retentionsbecken in Orden. Projekt z.H. Tiefbauamt GR, Dez. 1964

[12] *Peter, Y.:* A Short Cut in Flood Routing. «Water Power», May 1965

[13] *Press, H.:* Anwendung elektronischer Rechenverfahren in Hydrologie, Wasserwirtschaft und Wasserbau. Berlin 1968, W. Ernst & Sohn

[14] Maggia, Ingenieurbüro: Staumauer zum Hochwasserschutz eines Alpentales. «Schweizerische Wasserwirtschaftsverbandsschrift», Nr. 42, 1970

[15] *Vischer, D.:* Die stetige Regelung eines Flüssigkeitsstandes. «Technische Rundschau», Nr. 53, 18. Dez. und Nr. 54, 24. Dez. 1970.

Cavitation Scale-effects in Pumps

DK 621.67:532.528

By **S. P. Hutton** [1]), D. Eng., Ph. D., and **T. C. Chivers** [2]), Ph. D.

[1]) Professor of Mechanical Engineering, University of Southampton, England

[2]) Berkeley Nuclear Laboratories Central Electricity Generating Board, Gloucestershire, England

Notation

C_{m2}	Radial velocity at impeller exit
C_p	Specific heat of liquid at constant pressure
g	Gravitational constant
H	Pump developed head
H_e	Ideal Euler head
h_{fg}	Latent heat of vapourization
J	Mechanical equivalent of heat
Kr	Non-dimensional parameter defined as $\frac{J\,h^2_{fg}}{v_g^2\,C_p}\,\frac{v_f}{T\,P_s}$
n	Reynolds number exponent
$NPIH$	Net positive inlet head; i. e. upstream total head minus vapour pressure head
$NPIH_i$	$NPIH$ at inception
$NPIH_b$	$NPIH$ at breakdown
$\triangle NPIH$	$NPIH_b - NPIH_i$
Pr	Prandtl number
P_{at}	Atmospheric pressure
P_s	Equilibrium vapour pressure
Q	Volumetric flowrate
Re	Reynolds number
r_f	Reciprocal of liquid specific gravity
r_v	Vapour to liquid volume ratio
T	Temperature
u_2	Circumferential velocity at impeller exit
v_f	specific volume of liquid
v_g	specific volume of vapour
Φ_2	Impeller blade angle at exit
ϕ	Flow coefficient
ψ	Head coefficient
σ	Thoma Cavitation coefficient $\sigma = NPIH/H$
σ_c	Critical Cavitation coefficient $\sigma_c = NPIH_b/H$ (at breakdown)

Introduction

For many years the Thoma cavitation coefficient σ has been widely used for correlating the cavitation performance of water turbines and pumps. For pumps σ is a dimensionless index of the margin between the vapour pressure and the pressure at inlet to the pump. This margin is often called *net positive suction head (NPSH)* or as we prefer to call it the *net positive inlet head (NPIH)* and is made dimensionless by dividing by the *cavitation free pump head, H*, to give $\sigma = NPIH/H$. The critical value, σ_c, may be defined in several ways such as the value of σ when the pump head (or efficiency) breaks down completely ($\sigma_c = NPIH_b/H$) or when the head (or efficiency) decreases say 3 % from its cavitation free value. For convenience it is often easiest to use the breakdown point for head as giving the most clearly defined value of σ_c.

However it has become increasingly obvious that the applicability of σ_c as a scale parameter is restricted to water over a narrow range of temperatures. For example when compared on a σ_c basis, a pump delivering water at 150 °C will have a better cavitation performance than the same pump handling water at 15 °C. Similarly the same pump when pumping kerosene will have a better cavitation per-