Retentionsvorgänge in Speicherseen

Autor(en): **Sinniger, Richard / Hager, Willi H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 26

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75489

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

Retentionsvorgänge in Speicherseen

Von Richard Sinniger und Willi H. Hager, Lausanne

Retentionserscheinungen in Speichern lassen sich durch plausible Vorgabe einer Zuflussganglinie allgemein behandeln. Die Lösung der Retentionsgleichung wird im vorliegenden Fall auf Speicher angewandt, die durch einen freien Überfall begrenzt sind. Die Ausflussganglinie hängt lediglich von einem Retentionsparameter und einer Formgrösse der Zuflussganglinie ab. Es wird zudem gezeigt, dass die Differenz zwischen der angenommenen und tatsächlichen Zuflussganglinie keinen wesentlichen Einfluss auf den maximalen Speicheranstieg und die Ausflussspitze ausübt. Das Berechnungsverfahren wird durch Beispiele erläutert.

Les phénomènes de retention dans des retenues peuvent être traités généralement si on admet une forme plausible pour l'hydrogramme amont. La méthode est appliquée pour des retenues contrôlées par des déversoirs rectangulaires et dénoyés. L'hydrogramme aval ne dépend que d'un paramètre de retention et d'un coéfficient tenant compte de la forme de l'hydrogramme amont. Les comparaisons avec des hydrogrammes réels n'indiquent que des déviations secondaires avec le modèle simplifié. La méthode est expliquée par application à des cas pratiques.

Flood storage problems in artificial lakes are generally treated by assuming a plausible inflow hydrograph. The present study considers lakes, which are controlled by a rectangular, free overflowing spillway. It is shown that the outflow hydrograph solely depends on a storage parameter and a coefficient accounting for the shape of the inflow hydrograph. It is further demonstrated that actual events are realistically simulated. The procedure of computation is illustrated by examples.

Verzeichnis der Abkürzungen

a	(m^{3-b})	Volumenkonstante
b	(-)	Formgrösse
e	(-)	Eulersche Zahl, e = 2,718 . . .
g	(m/s^2)	Erdbeschleunigung $g = 9{,}81\ m/s^2$
n	(-)	Formgrösse des Zuflusshydrographen
q	(-)	dimensionsloser Ausfluss, $q = Q/Q^*$
q_z	(-)	dimensionsloser Zufluss, $q_z = Q_z/Q^*$
t	(s)	Zeit
A	(m^3/s^{1+n})	Zuflusskonstante
B	(1/s)	Formgrösse des Zuflusses
C	($m^{3/2}/s$)	Überfall-Charakteristik
C_d	(-)	Überfall-Koeffizient
F_0	(m^2)	Speicheroberfläche für $H = 0$
H	(m)	Überfallhöhe
H_0	(m)	Tiefe des Speichers
H_{max}	(m)	maximale Überfallhöhe
Q_z	(m^3/s)	Speicherzufluss
Q	(m^3/s)	Speicherausfluss
Q^*	(m^3/s)	Zuflussspitze
Q_{max}	(m^3/s)	Ausflussspitze
R	(-)	Retentionskonstante nach (10)
T	(-)	dimensionslose Zeit $T = t/t^*$
W	(m^3)	gesamtes Abflussvolumen
$\overline{W}$	(-)	dimensionsloses Abflussvolumen $\overline{W} = W/(Q^* t^*)$
Z	(-)	dimensionslose Überfallhöhe $Z = H/(Q^*/C)^{2/3}$
Z_{max}	(-)	maximale, dimensionslose Überfallhöhe, $Z_{max} = H_{max}/(Q^*/C)^{2/3}$.

Einleitung

Unter *Retention eines Speichers* versteht man das Vermögen, eine Veränderung des Speicherzuflusses zu dämpfen. Da die Fliessgeschwindigkeiten in Seen sehr klein sind, lassen sich die allgemeinen Gleichungen für instationäre Fliessbewegungen vereinfachen. Es lässt sich zeigen [1], dass der Bewegungsvorgang allein durch die Kontinuitätsgleichung beschrieben wird; danach entspricht der Speicherrückhalt der Differenz zwischen Zufluss und Ausfluss.

Die mathematische Beschreibung des Retentionsvorgangs wird als bekannt vorausgesetzt [4]. Die vorliegende Untersuchung stellt eine *Weiterführung des Berechnungsverfahrens* dar, indem die allgemeine Lösung des Retentionsproblems für Speicher mit freiem Rechteck-Überfall angegeben wird. Diese erlaubt insbesondere die rasche Bemessung des Überfalls ohne die zeitraubende Integration der Retentionsgleichung. Der zeitliche Verlauf des Speicherzuflusses, die sogenannte *Zufluss-Ganglinie,* wird durch einen plausiblen, mathematischen Ansatz erfasst, der eine allgemeine Lösung der Retentionsgleichung gestattet. Bekanntlich hängt die Zufluss-Ganglinie von einer Vielzahl von Einflüssen im Einzugsgebiet des Speichers ab. Neben den geographischen und geologischen Gegebenheiten spielen dabei insbesondere auch die Frequenz des Niederschlags-Ereignisses sowie die hydrologischen und meteorologischen Bedingungen eine wesentliche Rolle. Im allgemeinen lässt sich die Zufluss-Ganglinie nicht formelmässig beschreiben, vielmehr stellt sie das Resultat hydrologischer Untersuchungen und unter Umständen von durchgeführten Abflussmessungen dar. Im Falle von extremen hydrologischen Ereignissen, die für die Sicherheit des Bauwerks und daher für die Dimensionierung der Hochwasser-Entlastung ausschlaggebend sind, ist man in der Praxis in den weitaus meisten Fällen auf Schätzungen der massgebenden Zufluss-Ganglinie angewiesen. Die im folgenden gewählte Darstellung der Zufluss-Ganglinie trägt diesem Umstand Rechnung.

Kürzlich sind die wesentlichen Berechnungsschritte und die mathematischen Ableitungen im Detail erklärt worden [2]. In der vorliegenden Untersuchung werden deshalb lediglich die wichtigsten Ergebnisse bekanntgegeben, um damit Platz für praxisbezogene Beispiele zu schaffen.

Voraussetzungen der Berechnung

Der Retentionsvorgang in Speichern gehorcht der Beziehung

$$(1) \qquad \frac{dV}{dt} = Q_z - Q$$

mit V als Speichervolumen, t als Zeit, Q_z und Q als Speicher-Zufluss und Ausfluss. Gleichung (1) besagt, dass die zeitliche Volumenänderung gleich der Differenz zwischen Zu- und Ausfluss entspricht. Sie stellt eine Massenbilanz dar und ist mathematisch eine gewöhnliche Differentialgleichung erster Ordnung. Ihre Lösung lässt sich nach Angabe der einzelnen Terme sowie der Anfangsbedingung berechnen.

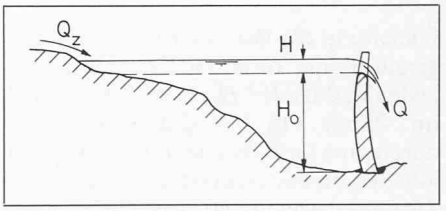

Bild 1. Längsschnitt des Speichers mit der Tiefe H_0 im Ruhezustand und H als Überfallhöhe, Q_z als Zufluss und Q als Ausfluss über den freien Rechteck-Überfall

Die Speichergeometrie

Wie *Kühne* zeigt [3], genügt eine Vielzahl der Schweizer Speicher der Volumen-Höhen-Beziehung

$$(2) \qquad V(H) = a(H_0 + H)^b$$

mit a [m^{3-b}] und b [-] als Kenngrössen der Speicherdimension und der Speicherform und H_0 [m] als Speichertiefe, vgl. Bild 1. Bei gegebener Speichertopographie lassen sich a und b aus einer doppelt-logarithmischen Auftragung $V(H + H_0)$ einfach ermitteln [3].

Kühne fand für die schweizerischen Speicherseen $1{,}4 \leqq b \leqq 3{,}5$ und weist auf eine analoge Untersuchung im süddeutschen Raume hin, die denselben Variationsbereich von b gefunden hat. Die beiden Studien erhalten als Mittelwert für b = 2,3 mit einer Streuung von

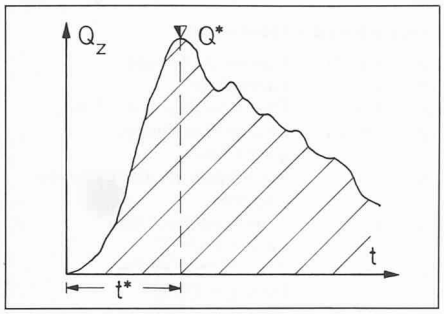

Bild 2. Typische Zufluss-Ganglinie $Q_z(t)$ für einen Speicher mit ausgeprägtem Spitzenabfluss Q^* und zugehöriger Zeit t^*, die vom Beginn des Ereignisses bis zum Erreichen von Q^* verstreicht

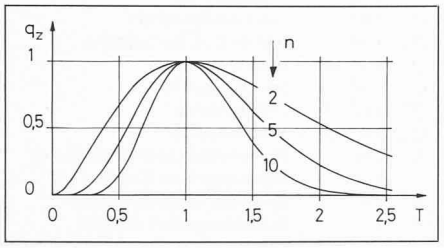

Bild 3. Speicher-Zuflussganglinie $q_z(T)$ in dimensionsloser Darstellung für verschiedene Formgrössen n

$\pm 0{,}5$, was einen Anhaltspunkt für Abschätzungen ergibt.

Gleichung (2) lässt sich für die vorliegende Studie vereinfachen, wenn man bedenkt, dass $|H/H_0| \ll 1$. Sie lässt sich im Punkt (V_0, H_0) genügend genau durch eine Gerade ersetzen, falls Index «0» den bis zur Überfallkrone gefüllten Zustand bezeichnet. Anstelle von (2) gilt folglich

$$(3) \quad V(H) = V_0 + (abH_0^{b-1})\,H$$

und somit für $dV/dt = (abH_0^{b-1})(dH/dT)$. Der Ausdruck $(abH_0^{b-1}) = F_0$ entspricht dabei der Seeoberfläche auf der Höhe $H = 0$.

Der Speicherzufluss

Die Speicherzufluss-Ganglinie ist zeitabhängig, $Q_z = Q_z(t)$. Wie bereits erwähnt, lassen sich keine mathematischen Beziehungen für diese Ganglinie angeben, die der Vielzahl der Einflüsse Rechnung trägt. Meistens kennt man die massgebende Zufluss-Ganglinie nur grössenmässig, entweder durch Abschätzung anhand von hydrologischen Unterlagen oder durch Extrapolation vorhandener Messungen. In erster Linie liegen dann Werte für den massgebenden Maximalzufluss Q^* sowie die zugehörige Zeit t^* vor (Bild 2).

Unter Umständen sind zudem Angaben über die Form der Zufluss-Ganglinie vorhanden, womit sich der zu erwartende, massgebende Verlauf vereinfacht darstellen lässt.

Bekanntlich erreicht der Zufluss relativ rasch den Spitzenabfluss Q^*, um anschliessend eher langsam auf den Ausgangswert zurückzufallen. Als massgebendes Ereignis kann dasjenige betrachtet werden, das von ursprünglich nahezu Null auf das Maximum ansteigt. Dieser Fall entspricht der Abflusserscheinung nach längeren Trokkenperioden in Form eines Starkniederschlages. Ein mathematischer Ansatz, der diese Tendenzen wiedergibt, lässt sich durch

$$(4) \quad Q_z(t) = At^n e^{-Bt}$$

erfassen, wobei A und B zwei Konstanten darstellen, die den Forderungen $Q_z(t = t^*) = Q^*$ zu genügen haben. Wie sich einfach zeigen lässt, findet man für $A = Q^*$ und $B = n/t^*$. Durch Einführung der dimensionslosen Kenngrössen

$$(5) \quad T = t/t^*,\ q_z = Q_z/Q^*,\ q = Q/Q^*$$

ergibt sich anstelle von (4) für

$$(6) \quad q_z(T) = T^n e^{n(1-T)}.$$

Diese Beziehung, die sich auf den Maximalzufluss und die Zeit t^* bezieht, ist in Bild 3 für $n = 2{,}5$ und 10 graphisch dargestellt. Alle Kurven beginnen im Ursprung, steigen je nach Grösse des Formparameters n flacher oder steiler auf das gemeinsame Maximum im Punkt (1,1), um dann je nach n wieder auf $q_z = 0$ zurückzufallen. Alle dargestellten Ganglinien besitzen im Ursprung eine horizontale Tangente, was bei wirklichen Ganglinien häufig zu beachten ist. Durch angepasste Wahl der Formgrösse n lassen sich die meisten extremen Hochwasserabflüsse genügend genau nachbilden. Entsprechende Beispiele werden unten eingehend erläutert.

Der Vorteil der gewählten mathematischen Darstellung der Ersatz-Ganglinie besteht in der einfachen mathematischen Handhabung. Andere Ansätze wie Ganglinien mit Rechteck-, Trapez- oder Dreieck-Form sind *nicht stetig*, die Berechnung des Speicherausflusses muss somit in einzelne Abschnitte zerlegt werden.

Der Speicherausfluss

Eine der vielen an ein Stauwerk gestellte Sicherheitsanforderung verlangt ein schadloses Ableiten jedes möglichen Hochwassers in den vollen Speicher. Um unabhängig von jeder menschlichen und/oder mechanischen Einflussnahme zu bleiben, wird deshalb, wenn immer möglich, eine Hochwasserentlastung in Form eines freien Rechteck-Überfalls angeordnet. Diese beiden Bedingungen, voller Speicher ($H = 0$) und freier Überfall, sollen deshalb im folgenden vorausgesetzt werden. Die zu betrachtende Situation ist vereinfacht aus Bild 1 ersichtlich.

Als Zusammensetzung zwischen dem Speicherausfluss Q und der Überfallhöhe H gilt

$$(7) \quad Q = CH^{3/2}$$

mit C [$m^{3/2}/s$] als Überfall-Beiwert. Er setzt sich bei Rechteck-Überfällen zusammen aus

$$(8) \quad C = C_d \sqrt{2g}\, B_e$$

mit C_d als Durchfluss-Beiwert, $g = 9{,}81$ m/s^2 als Erdbeschleunigung und B_e als effektiv wirksame Überfallbreite. Sie ist meistens geringfügig kleiner als die geometrische Überfallbreite (Summe der lichten Breiten zwischen den Pfeilern), lässt sich jedoch näherungsweise damit ersetzen.

Der Durchfluss-Beiwert C_d hängt von der Überfallgeometrie sowie von den Oberwasser-Verhältnissen ab. Für grössere Bauwerke wird die Überfallkrone meistens nach Standardform ausgebildet, der Durchfluss-Beiwert wird dann noch lediglich vom Verhältnis H/H_d beeinflusst. H_d stellt dabei die Dimensionierungs-Überfallhöhe für die Wehrkrone dar und ist zu unterscheiden von der massgebenden Überfallhöhe H_{max}, die auf den Überfall bei Maximalbelastung wirkt. Für $H = H_d$ entspricht der Druck auf die Überfallkrone dem Atmosphärendruck, für $H < H_d$ stellt sich durchwegs eine positive Druckverteilung längs des Wehrbodens ein, für $H > H_d$ treten jedoch lokale Unterdruckgebiete auf. Diese werden bei entsprechender Ausbildung der Sohle für Spitzenabflüsse zugelassen. Für $H = H_d$ beträgt $C_d = 0{,}494$; dieser Wert kann als Mittelwert eines Hochwasserabflusses näherungsweise angenommen werden. Für genauere Berechnungen wird eine erste Schätzung anhand des angegebenen Wertes durchgeführt, um anschliessend in einer zweiten Iteration den exakteren Wert zu berücksichtigen. In der vorliegenden Untersuchung werden sowohl B_e als auch C_d von der Überfallhöhe unbeeinflusst vorausgesetzt.

Lösung der Retentionsgleichung

Mit Hilfe der Beziehungen (1), (3), (6) und (7) lässt sich nach Vorgabe einer Anfangsbedingung das Retentionsproblem lösen. Da die Zuflussganglinie bekannt ist, bezieht man alle Grössen vorteilhaft auf den Speicherausfluss q. Die zugehörige Überfallhöhe H lässt sich unmittelbar aus Gleichung (7) ermitteln. Mit

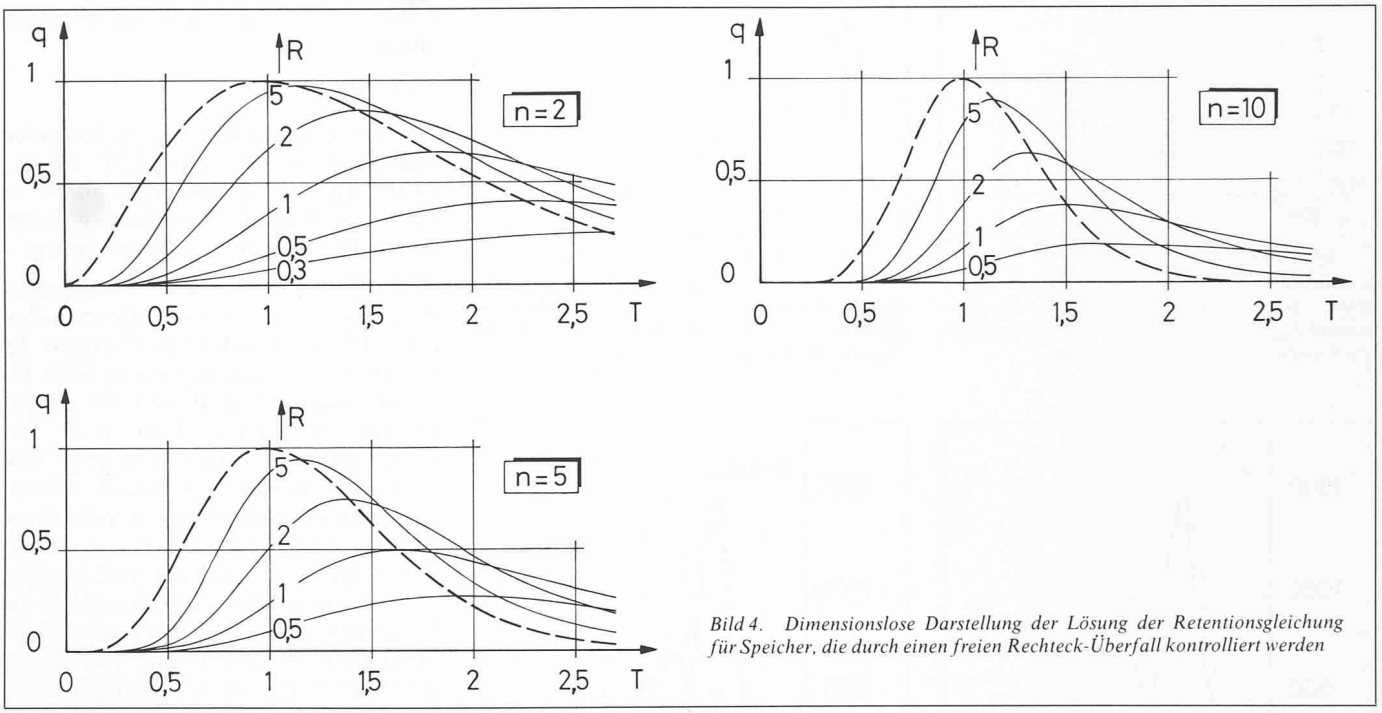

Bild 4. Dimensionslose Darstellung der Lösung der Retentionsgleichung für Speicher, die durch einen freien Rechteck-Überfall kontrolliert werden

(9) $H = (Q/C)^{2/3}$

folgt für

(10) $$dH = \frac{2\,dQ}{3\,C^{2/3}\,Q^{1/3}}.$$

Durch Einsetzen aller oben erwähnten Beziehungen in Gleichung (1) findet man in dimensionsloser Schreibweise für

(11) $$\frac{dq}{dT} = \frac{3}{2} R q^{1/3} (T^n e^{n(1-T)} - q)$$

mit

(12) $$R = \frac{C^{2/3} Q^{*1/3} t^*}{abH_0^{b-1}} = \frac{C^{2/3} Q^{*1/3} t^*}{F_0}$$

als dimensionsloser *Retentionsparameter*. Dieser fasst alle bekannten Ausgangsgrössen zusammen, insbesondere wird der Einfluss der Speichercharakteristik (für $H = H_0$ durch die Speicheroberfläche F_0 ausgedrückt), der Zuflussspitze t^*, Q^* und das Überfalls erfasst. Neben R hängt die gesuchte Ausflussganglinie $q(T)$ noch von der Formgrösse n der Zuflussganglinie ab.

Die Lösung der Differentialgleichung unter der Anfangsbedingung $q(T = 0) = 0$, die einen anfänglich vollen Speicher als ungünstigste Ausgangslage voraussetzt, stösst auf Schwierigkeiten. Die numerische Integration lässt sich nicht initialisieren; aus diesem Grund ist die analytische Lösung für extrem kurze Zeit $|T| \ll 1$ errechnet worden. Als Resultat ergibt sich für $n > 1$, [2]

(13) $$q(T) = \left(\frac{R e^n T^{n+1}}{n+1}\right)^{3/2}, \quad T \to 0,$$

womit sich Gleichung (11) numerisch lösen lässt. Bild 4 zeigt das Resultat für n = 2,5 und 10; für R sind die Werte R = 0,5; 1; 2 und 5 angenommen worden. Offensichtlich entsteht für $R = 0$ die triviale Lösung $q = 0$ und, wie sich einfach zeigen lässt, für $R \to \infty$ das Resultat $q = q_z$. Somit lassen sich die Lösungen für beliebige positive Werte von R durch Interpolation aus den Diagrammen ermitteln.

Normalerweise wird man sich auf einen der untersuchten Werte von n einigen (vgl. die untenstehenden Beispiele), womit Bild 4 der allgemeinen Lösung des vorgegebenen Retentionsproblems entspricht. Konkrete Berechnungen lassen sich bei bekannten Ausgangswerten allein durch Kenntnis des Retentionsparameters R durchführen.

Diskussion der Resultate

Im Zusammenhang mit Retentionsproblemen der Praxis interessiert vorwiegend der Maximal-Speicherausfluss Q_{max} und die zugehörige Überfallhöhe H_{max}. Wie sich einfach zeigen lässt [4], stellen sich die beiden Extremwerte bei Identität von Zu- und Ausfluss ein, $q_z = q$. Die Schnittpunkte einer Ausfluss-Ganglinie $q(T)$ mit der Zuflussganglinie $q_z(T)$ ergeben somit die gesuchten Extremwerte in Abhängigkeit von R und n. Bild 5 zeigt die graphische Auswertung als $q_{max} = Q_{max}/Q^*$ in Abhängigkeit des logarithmisch aufgetragenen Retentionsparameters R und der Formgrösse n der Zufluss-Ganglinie. Daraus geht hervor, dass die maximalen Spitzenausfluss-Schwankungen für die angenommenen Formgrössen n höchstens ±15% betragen. Beachtet

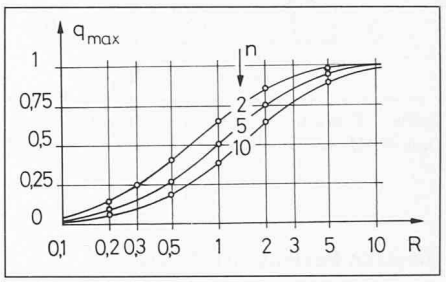

Bild 5. Dimensionslose Darstellung des maximalen Speicherausflusses q_{max} in Abhängigkeit von R und n.

man den unterschiedlichen Verlauf der in Bild 3 dargestellten Zufluss-Ganglinien, so lässt sich ein lediglich untergeordneter Einfluss der Formgrösse n auf den maximalen Speicherausfluss q_{max} folgern. Diese Feststellung rechtfertigt somit ebenfalls den gewählten mathematischen Ansatz für die Zufluss-Ganglinie; wesentlich bei deren Vorgabe sind die beiden Werte Q^* und t^*. Der erste bestimmt bei bekanntem Wert q_{max} den maximalen Speicherausfluss, während t^* proportional zur Retentionskonstanten R in der Rechnung erscheint.

Neben dem maximalen Speicherausfluss interessiert insbesondere der maximale Speicherstand H_{max}, der sich direkt durch (9) zu

(14) $H_{max} = (Q_{max}/C)^{2/3}$

angeben lässt.

Um den Einfluss der Form der Zufluss-Ganglinie auf H_{max} zu ermitteln, betrachte man die neue, dimensionslose Variable

(15) $Z = H/(Q^*/C)^{2/3}$,

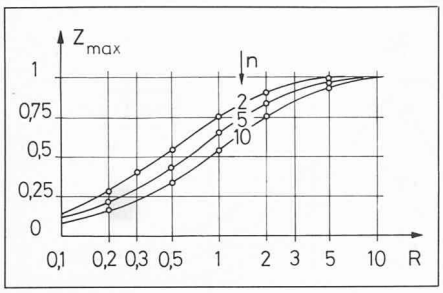

Bild 6. Dimensionsloser, maximaler Speicherzustand $Z_{max} = H_{max}/(Q^*/C)^{2/3}$ in Abhängigkeit von R und n

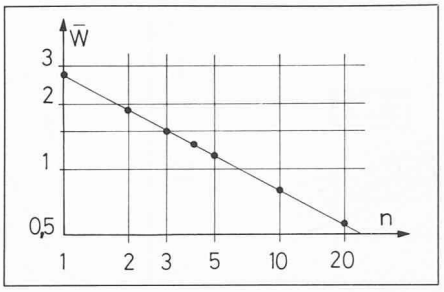

Bild 7. Dimensionsloses, gesamtes Abflussvolumen $\overline{W} = W/(Q^* t^*)$ in Abhängigkeit des Formparameters n. Punkte nach (18) und Linie nach (19)

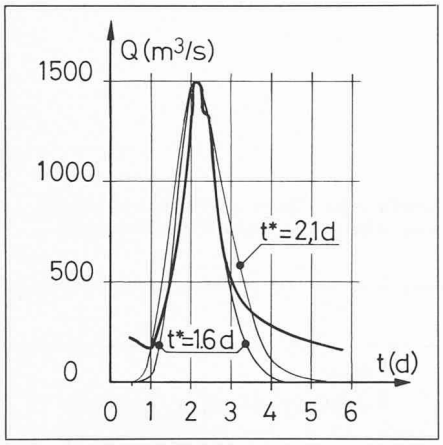

*Bild 8. Typische Zufluss-Ganglinie und Anpassung der Modell-Ganglinie durch Wahl von n und t**

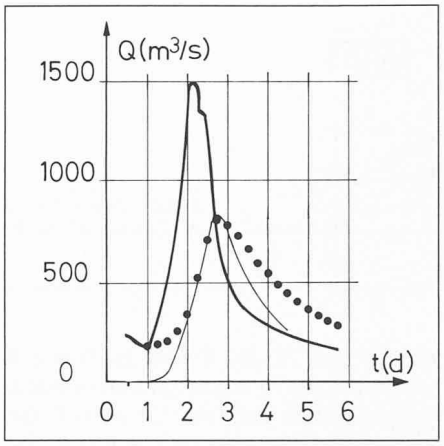

Bild 9. Vergleich der exakten Lösung (Punkte) mit der Lösung nach Bild 4 (dünne Linie); die vorgegebene Zufluss-Ganglinie ist als dicke Linie dargestellt

die nach Beziehung (7) durch

(16) $Z = q^{2/3}$

mit dem Speicherausfluss verknüpft ist. Bild 6 zeigt die mit Hilfe von Bild 5 ermittelte Abhängigkeit zwischen Z_{max} und R, n. Diese Darstellung vermittelt noch klarer die nur geringe Abhängigkeit des maximalen Speicherspiegels Z_{max} vom Formparameter n der Zufluss-Ganglinie. Die maximal zu erwartenden Abweichungen können mit ±10% angegeben werden und sind für Retentionsparameter im Bereich $0{,}5 \leqq R \leqq 2$ zu erwarten. Sie sind jedoch gegenüber den anderen, das Freibord des Speichers mitbestimmenden Faktoren von untergeordneter Bedeutung.

Die graphischen Darstellungen in Bild 5 und 6 erlauben insbesondere eine rasche und sichere Abschätzung der zu erwartenden Retentionsvorgänge für die Praxis. Die Aussagekraft der beiden Diagramme eignet sich vorzüglich für Variantenstudien sowie zur Bemessung der Überfallbreite.

Abflussvolumen

Neben der Kenntnis der Speicherausfluss-Ganglinie $Q(t)$ interessiert man sich hie und da auch für die Grössenordnung des Abflussvolumens. Dieses bestimmt sich durch

(17) $$W_z = W = \int_0^\infty Q_z(t)\,\mathrm{d}t$$

mit W_z als Zuflussvolumen, das nach genügend langer Zeit identisch dem Ausflussvolumen W ist. Durch Einführung der dimensionslosen Zufluss-Ganglinie q_z nach (6) ergibt sich anstelle von (17)

(18) $$W = Q^* t^* \int_0^\infty T^n \mathrm{e}^{n(1-T)}\,\mathrm{d}T.$$

Dieses bestimmte Integral hat trotz einer unendlichen Grenze einen endlichen Wert, nämlich

(19) $$W = Q^* t^* \mathrm{e}^n \cdot \frac{\Gamma(n+1)}{n^{n+1}}, \quad n > -1$$

mit Γ als Gammafunktion. Betrachtet man für n lediglich ganze, positive Zahlen, $n = 0, 1, 2, \ldots$, so lässt sich (19) vereinfachen auf

(20) $$\overline{W} = W/(Q^* t^*) = \frac{\mathrm{e}^n n!}{n^{n+1}}$$

mit $\overline{W}$ als dimensionslosem Abflussvolumen. Beziehung (20) ist in Bild 7 in doppelt-logarithmischem Massstab dargestellt (Punkte); da die Punkte nahezu auf einer Geraden liegen, lässt sich der umständlich zu handhabende Ausdruck (20) näherungsweise ersetzen durch

(21) $$\overline{W} = \mathrm{e} \cdot n^{-0{,}54}$$

Für die Spezialfälle $n = 2, 5, 10$ findet man für $\overline{W} = 1{,}87; 1{,}14; 0{,}78$; die genauere Beziehung (19) ergibt für $\overline{W} = 1{,}85; 1{,}14; 0{,}80$, die Abweichungen der beiden Beziehungen sind somit gering.

$\overline{W} = 1$ entspricht einem Abflussvolumen, das ein konstanter Maximal-Zufluss Q^* während der Zeit t^* ergäbe. Je grösser also n, um so kleiner wird $\overline{W}$. Überschlägig hängt $\overline{W}$ von der umgekehrten Quadratwurzel von n ab. Erwartungsgemäss besteht eine enge Abhängigkeit zwischen n und $\overline{W}$. Dieser Zusammenhang darf jedoch nicht dazu benutzt werden, die anfangs unbekannte Formgrösse n durch das Abflussvolumen W der tatsächlichen Ganglinie zu berechnen. Das Resultat würde nur zufällig einer Ganglinie nach Beziehung (6) entsprechen, die sich im abfallenden Bereich mit der effektiven deckt.

Beispiel 1

Ein Speicher genügt der Volumen-Höhen-Beziehung $V = 500\,(H_0 + H)^3$; das Stauziel $H_0 = 105$ m wird durch einen 30 m breiten, freien Rechteck-Überfall mit dem in einer ersten Iteration festgelegten Durchflussbeiwert $C_d = 0{,}47$ erreicht. Der massgebende Höchst-Hochwasserabfluss zeichnet sich durch eine Abflussspitze von $Q^* = 2500$ m³/s aus, er wird innerhalb von $t^* = 11$ h erreicht. Die Form der Zufluss-Ganglinie lässt sich gut durch den Formparameter $n = 2$ beschreiben. Ermittle die wichtigsten Retentionsgrössen!

Mit $C = 0{,}47\sqrt{19{,}62} \cdot 30 = 62{,}5$ m$^{3/2}$/s ergibt sich für den Retentionsparameter $R = 62{,}5^{2/3}\,2500^{1/3}\,11 \cdot 3600/(500 \cdot 3 \cdot 105^2) = 0{,}51$, womit der Maximal-Speicherausfluss nach Bild 5 $q_{max} = 0{,}4$, entsprechend $Q_{max} = q_{max} Q^* = 0{,}4 \cdot 2500 = 1000$ m³/s wird. Als maximaler Überstau folgt $H_{max} = (Q_{max}/C)^{2/3} = 6{,}35$ m, womit die vereinfachte Beziehung (3) angewendet werden darf. Nach Bild 4 tritt der Maximal-Ausfluss zur Zeit $T_{max} = 2{,}25$, entsprechend $t_{max} = T_{max} t^* = 2{,}25 \cdot 11 = 24{,}75$ h auf. Das gesamte Abflussvolumen lässt sich anhand von Bild 7 zu $\overline{W} = 1{,}85$, entsprechend $W = 1{,}85 \cdot 2500 \cdot 11 \cdot 3600 = 183$ Mio m³ abschätzen.

Beispiel 2

Man betrachte denselben Speicher, dem jedoch nun das in Bild 8 dargestellte Hochwasser mit $Q^* = 1500$ m³/s zufliesst. Es ist ersichtlich, dass für reale Hochwasser kein Nullpunkt definiert ist. Mit Hilfe der beiden noch freien Parameter n und t^* muss deshalb durch Anpassung die effektive Ganglinie möglichst genau erfasst werden. Infolge der relativ steilen Kurve wählt man vorerst

für $n = 10$. Weiter sind die beiden Kurven mit $t^* = 1{,}6$ [d] und $t^* = 2{,}1$ [d] untersucht worden; es fällt auf, dass die erste im massgebenden, abfallenden Ganglinienbereich eine bessere Übereinstimmung als die zweite Kurve ergibt. Da uns hauptsächlich der Maximal-Speicherausfluss interessiert, wählen wir die Kurve mit $t^* = 1{,}6$ [d], die zur Zeit $t = 0{,}5$ [d] beginnt.

Wird dieselbe Speicher- und Überfall-Geometrie wie im Beispiel 1 vorausgesetzt, so findet man für $R = 62{,}5^{2/3}\ 1500^{1/3}\ 1{,}6 \cdot 24 \cdot 3600/(500 \cdot 3 \cdot 105^2) = 1{,}51$; bei Annahme von $t^* = 2{,}1$ [d] ergäbe sich für $R = 2$.

Die zugehörigen Maximalausflüsse betragen nach Bild 5 $q_{max} = 0{,}55$, also $Q_{max} = 825$ m³/s für $t^* = 1{,}6$ [d] und $q_{max} = 0{,}63$, also $Q_{max} = 945$ m³/s für $t^* = 2{,}1$ [d]. Eine Änderung von 30% bezüglich t^* bewirkt somit im vorliegenden Fall eine Verschiebung von Q_{max} um 15%; die entsprechenden, maximalen Überfallhöhen betragen $H_{max}(t^* = 1{,}6\ \text{d}) = 5{,}6$ m und $H_{max}(t^* = 2{,}1\ \text{d}) = 6{,}1$ m, die Abweichungen betragen noch lediglich 8%.

Die vereinfachte Lösung nach Bild 4 ist zur Kontrolle durch exakte Integration der Retentionsgleichung ermittelt worden und in Bild 9 dargestellt. Unter der Annahme eines nahezu konstanten Zuflusses bei zur Zeit $t = 1$ [d] findet man mit Integrationsschritten von $t = 3$ [h] die punktierte Linie; die Zufluss-Ganglinie nach Bild 8 ist als dicke Linie in dieselbe Figur eingetragen.

Nach Bild 8 verlaufen die vorgegebene und die angepasste Ganglinie mit $t^* = 1{,}6$ [d] im Bereich $1{,}5 \leqq t \leqq 3$ d fast identisch. Wie aus Bild 9 hervorgeht, sind in diesem Zeitabschnitt lediglich geringe Abweichungen zwischen den beiden Ganglinien zu verzeichnen. Für die verbleibenden Zeitabschnitte stellen sich jedoch namhafte Differenzen ein, die sich durch die ungenaue Nachbildung der vorgegebenen Zufluss-Ganglinie ergeben.

Im Normalfall interessiert man sich hauptsächlich um den Maximalausfluss, der sich durch exakte Berechnung zu $Q_{max} = 810$ m³/s ergibt; die Abweichungen zwischen den beiden Spitzenabflüssen betragen demnach weniger als 2% bezüglich des Effektivwertes. Für den maximalen Speicherstand erhält man $H_{max} = (810/62{,}5)^{2/3} = 5{,}52$ m, was Abweichungen von weniger als 1% bedingt. Diese hohe Genauigkeit genügt den Ansprüchen der Praxis durchwegs; zieht man zudem in Betracht, dass der Maximal-Speicherzufluss höchstens mit einer Genauigkeit von ±10% vorgegeben werden kann, so treten die Differenzen zwischen einer exakten Integration und den vereinfachten Modellgleichungen vollends in den Hintergrund.

Schlussfolgerungen

Die vorliegende Untersuchung erlaubt die vereinfachte Behandlung von Retentionsproblemen in Speichern, die durch einen freien Rechtecküberfall begrenzt sind. Unter Annahme einer plausiblen Zufluss-Ganglinie, die der effektiven Ganglinie durch einen Formparameter angepasst werden kann, lassen sich die Resultate für beliebige Speicher- und Überfall-Geometrie diagrammhaft angeben. Der Retentionsvorgang wird dabei lediglich durch den erwähnten Formparameter sowie eine Retentionskonstante beeinflusst. Die zweite Grösse berücksichtigt dabei Einflüsse der Zufluss-Ganglinie, der Speichergeometrie und der Ausbildung des Überfalls; allein schon die Grösse dieser dimensionslosen Kennzahl lässt wichtige Folgerungen auf den zu erwartenden Retentionsvorgang zu. Für $R < 0{,}3$ muss mit einschneidenden Retentionserscheinungen gerechnet werden, die Ausflusskurve ist dementsprechend stark gedämpft. Für $R > 5$ hingegen sind sich Zufluss und Ausfluss nahezu identisch.

Mit Hilfe von drei zusätzlichen Diagrammen lassen sich unmittelbar der maximale Speicherausfluss, der zugehörige maximale Speicherstand und das totale Abflussvolumen in Abhängigkeit des Formparameters und der Retentionskonstanten ermitteln. Diese wichtigen Kenngrössen des Abflussvorgangs erlauben insbesondere eine rasche Beurteilung mit der zu rechnenden Situation. Beispielsweise lassen sich Variantenstudien bezüglich der Überfallgeometrie rasch und einfach durchführen. In den Beispielen wird gezeigt, dass die Abweichungen der exakten Lösung der Retentionsgleichung vom vereinfachten Vorgehen im Bereich des Maximalzuflusses vernachlässigbar klein sind.

Literaturnachweis

[1] *Hager, W.H.*, «Beckenretention». Schweizer Ingenieur und Architekt, S. 1150, Heft 48, 1983.

[2] *Hager, W.H.; Sinniger, R.*: «Flood Storage in artificial lakes», Proc. ASCE, Journal of Irrigation and Drainage Division, to be published;

[3] *Kühne, A.*: «Charakteristische Kenngrössen schweizerischer Speicherseen», Geographica Helvetica, Vol. 33, Nr. 4, 1978;

[4] *Vischer, D.*: «Berechnung der Hochwasserretention von Seen», Schweizerische Bauzeitung, Vol. 89, Nr. 12, 1971.

Adresse der Verfasser: Prof. *R. Sinniger* und *W. H. Hager*, Dr. sc.techn., Chaire de Constructions Hydrauliques, CCH, Institut de Travaux Hydrauliques, ITH, EPFL, CH-1015 Lausanne.

Japan auf dem Weg zum Technologiestaat

(mpg). Das *Patentwesen*, das in Japan im Vergleich zu westlichen Industrieländern viel stärker im Blickpunkt des öffentlichen Interesses steht, gilt dort als ein wesentlicher Faktor des Wirtschaftserfolges. Es hat nicht nur die Einführung fortschrittlicher Technologie aus dem Ausland begünstigt, sondern sich darüber hinaus in den japanischen Industriebetrieben als wirksames Instrument zur *Motivierung der Mitarbeiter zu kreativem Denken und innovativem Wettbewerb* erwiesen.

Die wachsende Bedeutung, die dem Patentwesen beigemessen wird, entspricht einem übergeordneten Ziel, das sich Japan für die 80er Jahre gesetzt hat: der Errichtung eines Technologiestaates. Dieses Fazit zog *Guntram Rahn*, Rechtsanwalt und wissenschaftlicher Referent für Japan und Ostasien am *Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Patent-, Urheber- und Wettbewerbsrecht, München*, auf einer Vortragsveranstaltung in der Carl Friedrich von Siemens-Stiftung in München. Japan ist heute, so stellte der dort aufgewachsene und an der Universität Tokio ausgebildete Rechtsforscher dar, das Land mit den *niedrigsten Patentamtsgebühren* und den *meisten Schutzrechtsanmeldungen*. 1980 betrug beispielsweise die Zahl der Patentanmeldungen in Japan 191 020, in den USA zum Vergleich 104 219, in der Bundesrepublik 51 345. Und während die Patentanmeldungen in den westlichen Industriestaaten eher rückläufig sind, nehmen sie in Japan von Jahr zu Jahr weiter zu, so zum Beispiel 1980 gegenüber 1979 um 9,5%. Allerdings sagt ein Vergleich von Patent-Anmeldezahlen noch nichts über die Qualität der Erfindungen, wie ein Blick auf die japanische Patentpraxis zeigt.

Japanische Innovationsstrategie

In Japan hat sich eine regelrechte Innovationsstrategie herausgebildet, die mehrere Systeme miteinander kombiniert, um ein Maximum an innovativer Leistung zu erzeugen. Diese Strategie beginnt mit den sogenannten *Qualitätszirkeln*, aus denen Verbesserungsvorschläge hervorgehen, die auch durch das betriebliche Vorschlagswesen gefördert werden. Sie führen teilweise zu kleinen Erfindungen, die in hohem Ansehen stehen: «Kleine Erfindungen machen neugierig auf den Stand der Technik, deshalb wird Information gesammelt» (*Rahn*). Forschung und Entwicklung werden eingesetzt, um den Stand der Technik zu verbessern und um die Konkurrenz hinter sich zu lassen. Schliesslich werden, gewissermassen als Krönung, *Schutzrechtsanmeldungen* beim Patentamt eingereicht, mit denen man ausschliesslich Rechte erwerben, aber auch die Überlegenheit der eigenen Betriebsgruppe demonstrieren will.