c) Die Niederschlagswerte in der Karte sind bezüglich des systematischen Messfehlers nicht korrigiert. Eine ungefähre Fehlergrösse ist hier kaum angebbar.

d) Die Niederschlagswerte sind, trotz der beachtlichen Länge der Messreihen, nicht als eine Art oberer Grenzwerte für Tagesmengen aufzufassen. Am Beispiel der Station Zürich MZA zeigt sich, dass für die meisten Stationen noch durchaus wesentlich höhere Werte möglich sind. Dort wurden 1876 172 mm und 1878 137 mm gemessen (Karte: etwa 110 mm). Da für die Entstehung extremer Niederschlagsmengen die Atmosphäre den wichtigsten Faktor darstellt, kann man im Kanton Zürich für eine erste, grobe Abschätzung des oberen Grenzwertes davon ausgehen, dass der höchste Tageswert in der Karte (Horgen: 192 mm) an jedem Ort auftreten kann.

e) Es handelt sich in der Karte um gemessene Werte oder um rekonstruierte Messwerte der Periode von 1881 bis 1979 und nicht um 99jährige Werte im Sinne der Extremwert-Statistik. Über Auftrittswahrscheinlichkeiten von Niederschlagsmengen können nur entsprechende statistische Analysen Auskunft geben. Sie sind in einer weiteren Bearbeitung vorgesehen. Bereits bestehende statistische Untersuchungen für einige Stationsreihen finden sich in [*Uttinger,* 1962, 1965, 1966, 1970; *Schüepp,* 1976; *Zeller, Geiger, Rötlisberger,* Band 2 1977, Band 3 1978].

Bemerkung

Die umfangreiche Datenverarbeitung wurde von Herrn dipl. Ing. ETH F. Kobelt, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETHZ, ausgeführt. Bei Fragen in der Datenerhebung, insbesondere zu den Stationschroniken erhielten wir von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt stets interessierte Unterstützung. Wir danken für diese Zusammenarbeit sowie den Herren E. Roth und J. Grüninger, Meliorations- und Vermessungsamt des Kantons Zürich, für die Reinzeichnungen und den Herren PD Dr. H. Lang, Dr. U. Moser, VAW der ETHZ, und G. Keller, AGW, für ihre kritischen Anmerkungen.

Adressen der Verfasser: *D. Grebner,* Dipl.-Meteorologe, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich; *Ch. Göldi,* dipl. Ing. ETH, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich, Abt. Gewässerunterhalt, Walchetor, 8090 Zürich.

Beckenretention

Von Willi H. Hager, Zürich

Speicherbecken im Wasserbau, in der Abwasser- und Bewässerungstechnik haben die Aufgabe, anfallende Hochwassermengen aufzunehmen und sicher abzuleiten. Die Retentionsvorgänge werden anhand dreier verschiedener Ausflusstypen studiert, graphisch ausgewertet und anhand eines Beispiels illustriert. Der Begriff der Retentionsfähigkeit wird eingeführt. Er gestattet eine einfache Abschätzung der zu erwartenden Spiegelschwankungen im Becken sowie der Ausflusscharakteristik aus dem Speicher.

Hydraulic aspects of flood routing through a reservoir are presented. The results are shown graphically for three different types of outlet structures. An example illustrates the calculation procedure. The introduced term "critical retention" allows a simple estimation of flood routing effects on the reservoir.

Grossvolumige Behälter spielen in der modernen Wasserwirtschaft eine nicht zu unterschätzende Rolle, sei es als *Speicherbecken im Wasserbau,* als *Ausgleichsbecken in der Bewässerungstechnik* oder als *Regen- oder Klärbecken* in der Abwassertechnik. Die Füllungs- und Leerungsvorgänge in diesen Behältern sind abhängig von der Beckengeometrie, der Zu- und Ausflusscharakteristik sowie der Abflussdynamik. Im folgenden wird versucht, die Beckenretention anhand einfacher Modellvorstellungen nachzubilden, die sich ergebenden Beziehungen zu lösen und sie in einer übersichtlichen Form darzustellen.

Die Retentionsgleichung

Instationäre Bewegungsabläufe in offenen Gerinnen werden bei Annahme hydrostatischer Druckverteilung durch die erweiterten *Gleichungen von de Saint-Venant* für den eindimensionalen Abfluss beschrieben. Sie lauten für verschwindenden seitlichen Zu- oder Ausfluss nach *Dracos.*

$$(1) \quad \frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial x} + g\frac{\partial h}{\partial x} = g\,(J_s - J_r)$$

$$(2) \quad \frac{\partial A}{\partial t} + v\frac{\partial A}{\partial x} + A\frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

mit $v = Q/A$ als mittlerer Geschwindigkeit, Q als zeitlich und örtlich variabler Durchfluss, A als Durchflussquerschnitt, g als Erdbeschleunigung, x als Ortskoordinate, t als Zeit, J_s, J_r als Sohlen- und Energielinienneigung. Für gegebene Rand- und Anfangsbedingungen lassen sich aus den Gleichungen (1) und (2) die beiden Gesuchten $h(x, t)$ und $v(x, t)$ in Funktion von Ort und Zeit angeben.

Retentionsprobleme zeichnen sich durch *instationäre Bewegungen in grossräumigen Behältern* aus. Die mittleren Fliessgeschwindigkeiten v sowie deren örtliche und zeitliche Änderungen sind sehr klein. Gleichung (1) reduziert sich deshalb auf

$$(3) \quad \frac{\partial h}{\partial x} = J_s,$$

der Beckenspiegel ist horizontal.

Gleichung (2) lässt sich auch durch

$$(4) \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

ausdrücken. Die zeitliche Änderung der Durchflussfläche entspricht der negativen örtlichen Änderung des Durchflusses. Da nach Gleichung (3) der Bekkenspiegel horizontal ist, also h und somit auch A lediglich von der Zeit abhängen, lässt sich $\partial A/\partial t$ ersetzen durch dA/dt. Im Becken selbst treten zudem keine Änderungen in Q auf, $\partial Q/\partial x$ lässt sich deshalb umschreiben zu $\Delta Q/\Delta x$, wobei Δx die Beckenlänge bezeichnet und ΔQ gleich der Differenz von Zu- und Beckenausfluss ist. Gleichung (4) lautet deshalb in Retentionsbecken

$$(5) \quad \frac{dA}{dt} = -\frac{\Delta Q}{\Delta x}$$

Diese Beziehung lässt sich noch weiter umformen, wenn man bedenkt, dass die Zunahme der Querschnittsfläche gleich dem Produkt $dA = Bdh$ mit B als Querschnittsbreite auf der Höhe des Wasserspiegels ist. Ausgedehnt auf die gesamte Beckenlänge erhält man somit

$$(6) \quad \frac{dh}{dt} = \frac{Q_z - Q_{ab}}{F}$$

mit $F = F(h)$ als Beckenoberfläche, Q_z als Zuflussmenge und Q_{ab} als Ausflussmenge.

Gleichung (6) besagt, dass die Steiggeschwindigkeit des (horizontalen) Bekkenspiegels $h(t)$ gleich dem Quotienten aus Durchflussänderung und Beckenoberfläche F ist.

Anhand der Ableitung wird ersichtlich, dass die Retentionsgleichung (6) lediglich auf Becken mit sehr geringer Längsgeschwindigkeit angewendet werden darf. Physikalisch ist das Becken auf eine vertikale Linie zusammengestaucht worden, in dem lediglich die Wassertiefe als Funktion der Zeit gesucht wird.

Die Retentionsparameter

Die Lösung der Gleichung (6) bedarf der Spezifikation der drei Grössen Q_z, Q_{ab} und F.

Der *Zufluss zum Speicher* ist von einer Vielzahl von Einflüssen wie der Hydrologie des Oberwassers, der Einleitungscharakteristik und der Gerinnegeometrie abhängig. Im Normalfall tritt eine Zuflussvergrösserung infolge Niederschlags ein. Es ist nicht das Ziel dieser Untersuchung, auf mögliche Abflusskurven einzutreten, sondern es soll versucht werden, eine grosse Anzahl möglicher Ereignisse durch eine relativ einfache Funktion zu erfassen. Im Normalfall ist der Zufluss vor einem Niederschlag zeitlich konstant, nach Einsetzen der Schauer steigt er auf einen Maximalwert an und sinkt schliesslich asymptotisch auf den Grundwert zurück. Dieses grundsätzliche Verhalten lässt sich also durch $Q_z = Q_z(t)$ ausdrücken.

Bei überschlägigen Berechnungen kennt man den Grundabfluss $Q_{z,o}$, den Maximalzufluss Q_z^* sowie die Zeitspanne t^*, die verstreicht, bis der Maximalzufluss eintritt.

Bild 1 zeigt eine nach den oben beschriebenen Kriterien gewählte Zuflusskurve, die den folgenden Berechnungen zugrunde liegt.

Ihre mathematische Schreibweise lautet

(7) $$Q_z(t) = Q_0 + At^2 e^{-at}$$

mit A und a als Koeffizienten, die sich aus den Forderungen $Q_z(t = t^*) = Q_z^*$ zu $a = -2/t^*$, $A = (Q_z^* - Q_0)/(t^{*2} e^{-2})$ ergeben. Mit den dimensionslosen Parametern

(8) $$T = t/t^*, \; q_z = Q_z/Q_z^*,$$
$$q_0 = Q_0/Q_z^*$$

kann die Zuflussfunktion (7) umgeschrieben werden zu

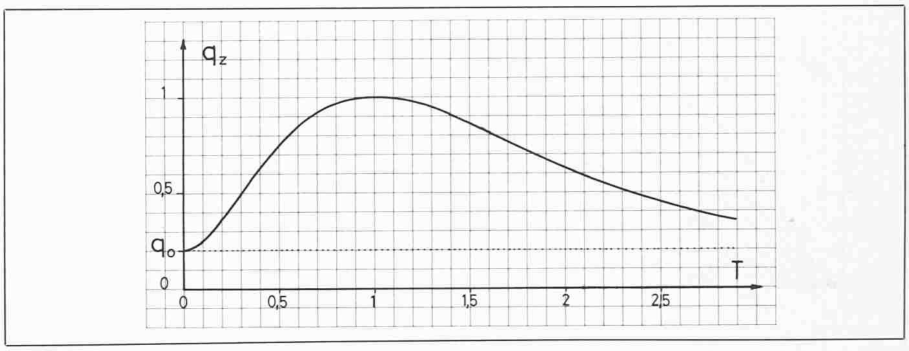

Bild 1. Zuflussfunktion nach Gleichung (9)

(9) $$q_z(T) = q_0 + (1 - q_0)\, T^2 e^{2(1-T)}$$

Wie aus Bild 1 hervorgeht, ist der Übergang von $T < 0$ zu $T > 0$ stetig, $q_z(T = 0)$ besitzt eine horizontale Tangente. Zudem ist der ansteigende Kurvenabschnitt gegenüber dem absteigenden kurz. Für vorgegebene Werte Q_o, Q_z^* und t^* ist die Zuflussfunktion (9) vollständig bestimmt.

Der *Ausfluss aus dem Speicher* ist im Gegensatz zum Zufluss abhängig von der Ausflussgeometrie. Im folgenden seien lediglich drei verschiedene Ausflusstypen betrachtet: der *Grundablass,* der *lineare Ausfluss* sowie der *Überfall.* Alle genannten Regelorgane sind eindeutig vom Wasserstand des Speichers abhängig, also $Q_{ab} = Q_{ab}(h)$. Konkret kann folgendes *Ausflussgesetz* angegeben werden

(10) $$Q_{ab}(h) = Ch^{n/2}$$

Für die oben erwähnten Ausflusstypen gilt

(11) Grundablass: $n = 1 \quad C = \mu f \sqrt{2g}$

(12) linearer Ausfluss: $n = 2$

(13) Überfall: $n = 3,\; C = \frac{2}{3}\, \mu\, b \sqrt{2g}$

Da sich der Beckenstand nur geringfügig ändert, können die Ausflusskoeffizienten μ konstant angenommen werden. In den Ausflussgesetzen bedeuten f die Ausflussfläche, b die Überfallbreite; die Konstante C für den linearen Ausfluss, der ein Zwischenglied darstellt, muss am konkreten Beispiel ermittelt werden. Lineare Ausflüsse stellen sich für beliebige Ausflusstypen bei geringer Wasserstandsänderung ein und sind somit von praktischem Interesse (vgl. Beispiel).

Die *Speichergeometrie* lässt sich immer als Funktion $F = F(h)$ ausdrücken. In natürlichen Becken wird der Speicherquerschnitt meist eine parabelähnliche Form, der Speicherlängsschnitt meist näherungsweise lineare Geometrie aufweisen. Künstliche Becken dagegen werden, von der Bodenzone abgesehen, meist zylindrisch ausgeführt. Sind die Wasserspiegeländerungen nicht extrem, so lässt sich die Speicheroberfläche immerhin näherungsweise als konstant ansehen, F = konst. Es würde im Zusammenhang mit der näherungsweisen Retentionsberechnung zu weit führen, Variationen der Beckenoberfläche zu berücksichtigen.

Diskussion der Retentionsgleichung

Mit der vorangegangenen Bestimmung der Retentionsparameter kann Gleichung (6) folgendermassen umgeschrieben werden

(14) $$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_z(t) - Q_{ab}(h)}{F(h)}$$

Bei vorgegebener Zuflusscharakteristik, Speicher- und Ausflussgeometrie kann der zeitliche Verlauf der Spiegelschwankungen $h(t)$ eindeutig mit (14) ermittelt werden. Als wichtige Eigenschaft aller Retentionskurven erkennt man für identischen Zu- und Ausfluss, $Q_{zu} = Q_{ab}$, einen Extremwert der Wasserspiegelschwankung.

Neben der Retentionsgleichung (14) liesse sich zusätzlich eine Massenbilanzgleichung aufstellen die besagt, dass der totale Zufluss während eines Ereignisses gleich dem totalen Ausfluss plus der Speicherung ist. Diese integrierte Aussage entspricht aber Gleichung (14), welche dieselbe Relation in differenzieller Form angibt.

Die Lösung der Retentionsgleichung

Gleichung (14) ergibt die zeitliche Änderung des Beckenspiegels; häufig interessiert aber nicht der Wasserstand, sondern die Ausflussmenge $Q_{ab}(t)$. Aus Gleichung (10) folgt

(15) $$dQ_{ab} = C \cdot \frac{n}{2} \cdot h^{n/2-1} \cdot dh =$$
$$= C^{2/n} \cdot \frac{n}{2} \cdot Q_{ab}^{1-2/n} \cdot dh,$$

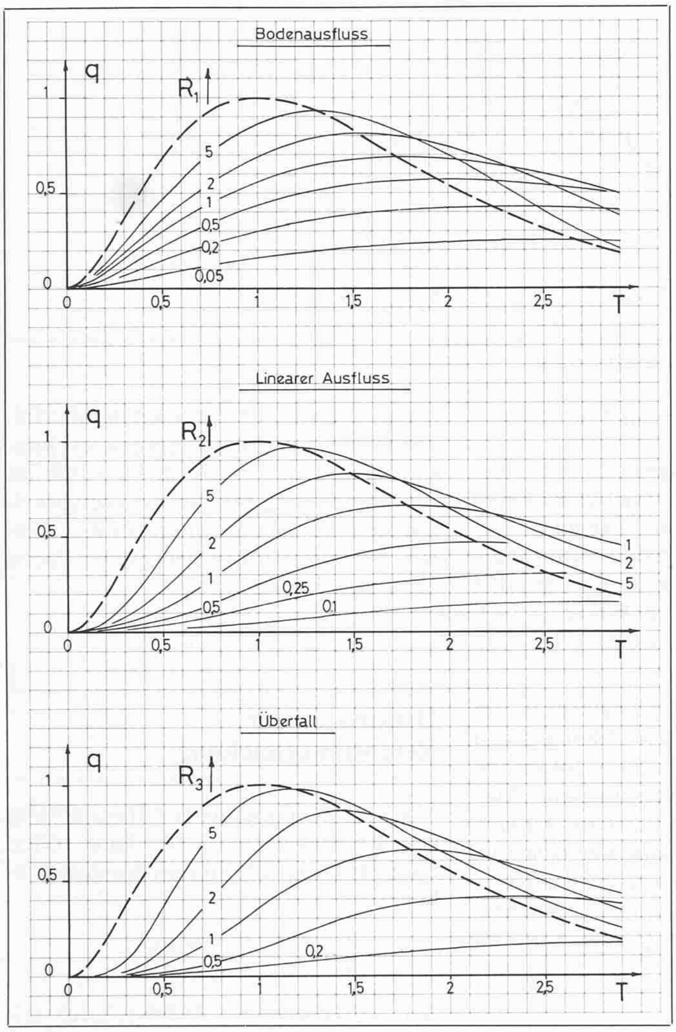

Bild 2. Retentionskurven $q(t)$ für $q_0 = 0$

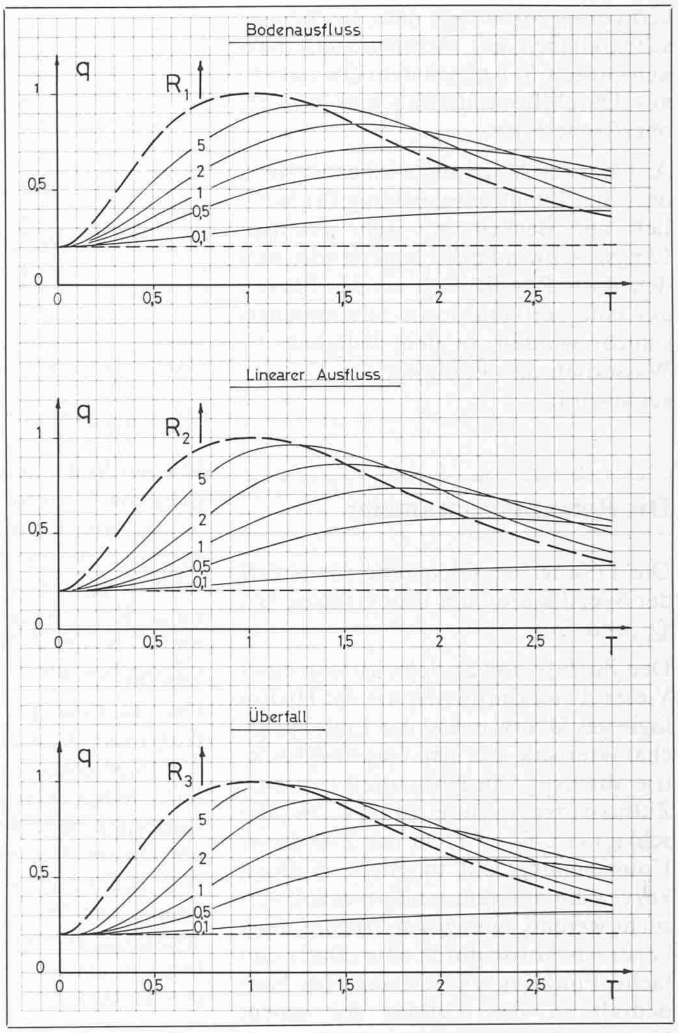

Bild 3. Retentionskurven $q(T)$ für $q_0 = 0{,}2$

womit anstelle von Gleichung (14) folgende Beziehung tritt

$$(16) \quad \frac{2}{n} \cdot \frac{1}{Q_{ab}} \cdot \left(\frac{Q_{ab}}{C}\right)^{2/n} \cdot \frac{dQ_{ab}}{dt} = \frac{Q_z - Q_{ab}}{F}$$

Bezeichnet man mit $q = Q_{ab}/Q^*$, so lautet Gleichung (16) in dimensionsloser Darstellung

$$(17) \quad \frac{dq}{dT} = \frac{nt^* Q_z^*}{2F} \cdot \left(\frac{C}{Q_z^*}\right)^{2/n} \cdot \frac{q(q_z - q)}{q^{2/n}}$$

Für die drei Ausflusstypen heisst Gleichung (17) konkret

$$(18) \quad n = 1: \; \frac{dq}{dT} = R_1 \left(\frac{q_z - q}{2q}\right),$$

$$R_1 = \frac{C^2 t^*}{FQ_z^*}$$

$$(19) \quad n = 2: \; \frac{dq}{dT} = R_2 (q_z - q),$$

$$R_2 = \frac{Ct^*}{F}$$

$$(20) \quad n = 3: \; \frac{dq}{dT} = \frac{3R_3}{2}(q_z - q)\, q^{1/3},$$

$$R_3 = \frac{C^{2/3}\, t^*\, Q_z^{*\,1/3}}{F}$$

Die Lösung der Gleichungen wird durch numerische Integration nach *Runge-Kutta* gefunden. Voraussetzung dazu ist die Festlegungen der Randwerte, die im vorliegenden Problem in $q(T = 0)$ gegeben sein müssen.

Die Ableitungen der Zuflussfunktion (9) für $T = 0$ sind

$$(21) \quad q_z(0) = q_0,\; q_z'(0) = 0,$$
$$q_z''(0) = 2(1 - q_0)\, e^2,$$

wobei ′ und ″ die erste bzw. die zweite Ableitung nach T sind.

Da $q(0) = q_0$, verschwinden alle Differentialquotienten für den Zeitpunkt $T = 0$. Um die numerische Berechnung zu ermöglichen, müssen in der Umgebung $T = 0$ höhere Ableitungen gebildet werden, welche die Aufstellung eines Taylorpolynoms ermöglichen, mit dem die Berechnung für $T \to 0$ begonnen wird (vgl. Anhang).

Diskussion der Resultate

In Bild 2 und Bild 3 sind Retentionskurven $q(T)$ (ausgezogene Linien) in Funktion der Zuflusskurve $q_z(T)$ (gestrichelte Linien) und des Retentionsparameters R_i für $q_0 = 0$ und $q_0 = 0{,}2$ für die drei Beckentypen ausgewertet. Die grafische Darstellung ermöglicht die unmittelbare Festlegung gesuchter Beckenausflüsse bei bekanntem Wert R_i, der mit den Gleichungen (11) bis (13) und (18) bis (20) gegeben ist zu:

Grundablass

$$(22) \quad R_1 = \frac{2g\mu^2 f^2 t^*}{FQ_z^*},$$

linearer Ausfluss

$$(23) \quad R_2 = \frac{Ct^*}{F},$$

Überfall

$$(24) \quad R_3 = \left(\frac{8g\mu^2 b^2 Q^*}{9}\right)^{1/3} \cdot \frac{t^*}{F}$$

Die Bestimmung von C in Gleichung (23) wird anhand des Beispiels illustriert.

Die gefundenen Resultate gestatten die Einführung des Begriffs der *Retentionsfähigkeit eines Speichers.* Diese herrsche gemäss unserer Definition, falls der maximale Ausfluss weniger als die Hälfte des maximalen Zuflusses beträgt, also $q_{max} \leqq (1+q_0)/2$. Wie aus der Auswertung hervorgeht, entspricht der kritische Retentionsparameter R_k (für den das Gleichheitszeichen in der Beziehung gilt) näherungsweise

$$(25)\quad R_k = 1/2$$

Dieser Wert ist nahezu unabhängig vom Ausflusstyp. Das Kriterium der Retentionsfähigkeit erlaubt eine einfache Abschätzung des zu erwartenden Retentionsverhaltens eines Speichers allein auf Grund der Beziehungen (22) bis (25). Ist der Retentionsparameter R_i kleiner als R_k, so ist der Speicher retentionsfähig, eine ausführliche Berechnung muss nicht zwingend durchgeführt werden, da die Wasserspiegel- und Abflussschwankungen relativ gering bleiben. Anderseits sind die Auswirkungen der Zuflussschwankungen auf den Speicherausfluss und dessen Spiegel gross.

Näherungsweise lässt sich das gefundene Kriterium auf beliebige Zuflussfunktionen, Speicherformen und Ausflusstypen ausdehnen. Der Begriff des kritischen Retentionsparameters kann dann als Entscheidungsgrundlage einer vertieften Retentionsberechnung betrachtet werden.

Der Beckenwasserstand lässt sich bei bekanntem Ausfluss $q(T)$ direkt aus Gleichung (10) ermitteln. Der konkrete Berechnungsvorgang wird anhand eines Beispiels erläutert.

Berechnungsbeispiel

Ein quaderförmiges Speicherbecken mit der Oberfläche F = 660 m² erfährt innerhalb von 18 Minuten eine Zuflusssteigerung von $Q = 0$ auf $Q^*_z = 700$ l/s. Das Becken hat einen Ablaufkanal von der Breite b = 1,0 m und ein Gefälle von J_s = 3‰. Die Ausflussebene liegt auf der Höhe des Ruhewasserspiegels des Speichers. Wie gross sind der maximale Ausfluss, wann tritt er ein und wie verläuft der Beckenwasserstand $h(t)$?

Näherungsweise wird angenommen, dass im Ausflusskanal immer Normalabfluss herrsche, dass also nach Strickler

$$(26)\quad Q_{ab} = bh \cdot k\sqrt{J_s} \cdot R^{2/3}$$

gilt. Die Änderung von Q_{ab} in Abhängigkeit von h beträgt

$$(27)\quad dQ_{ab}/dh = \frac{b^{5/3}\,k\sqrt{J_s}\,h^{2/3}}{3\,(b+2h)^{5/3}}\,(6h+5b) = Q_{ab}\cdot\frac{5b+6h}{3h(b+2h)}$$

Bild 4 zeigt die Ausflussmenge $Q_{ab}(h)$ mit einem Rauhigkeitsbeiwert nach *Strickler*, $k = 85\ \mathrm{m}^{1/3}/\mathrm{s}$.

Die maximale Ausflussmenge beträgt $Q_{ab,\,max}$ = 700 l/s, die mittlere also $Q_{ab,\,m}$ = 350 l/s mit der Normalabflusstiefe h_m = 0,249 m. Nach Gleichung (27) ergibt sich für $(dQ_{ab}/dh)_m$ = 2,03 m²/s. Näherungsweise lässt sich nun die Ausflussgleichung (26) durch Gleichung (10) mit n = 2 ersetzen. C ist gleich der mittleren Änderung der Ausflussmenge, C = 2,03 m²/s. Der Retentionsparameter beträgt nach Gleichung (23) R_2 = 2,03 · 18 · 60/660 = 3,32 (-). Da $R_2 > R_k$, ist das Becken relativ retentionsunfähig. Aus Bild 2 folgt $Q_{ab,\,max} = 0{,}9\ Q_{z,\,max}$ = 630 l/s und $t_{ab,\,max} = 1{,}36 \cdot t^*$ = 24,5 min. Der maximale Ausfluss tritt nach rund 25 Minuten ein und beträgt 630 l/s.

Bild 5 zeigt den Verlauf des Beckenwasserspiegels, errechnet aus Bild 2 und Gleichung (26).

Aus der Darstellung geht hervor, dass der maximale Beckenspiegel um Δh_{max} = 0,38 m über dem Ruhewasserspiegel liegt.

Die Annahme, dass im Ablaufkanal näherungsweise Normalabfluss herrscht, gilt nur für $J_s < J_{kr}$, wobei J_{kr} das zum kritischen Abfluss zugehörige Gefälle darstellt. Für $J_s > J_{kr}$ muss die Ausflussgleichung in der Form eines zum Überfallgesetz analogen Ausdrucks ersetzt werden.

Schlussfolgerungen

Retentionsvorgänge entstehen in Speicherbecken mit fast verschwindender Längsgeschwindigkeit. Ihre physikalische Beschreibung lässt sich durch die Retentionsgleichung vornehmen. In der Untersuchung ist das zylindrische Becken, das einen vorgegebenen Zufluss erfährt und drei verschiedene Ausflusstypen aufweisen kann, eingehend betrachtet worden. Die Resultate sind grafisch dargestellt und durch ein Berechnungsbeispiel erläutert worden. Die Einführung des kritischen Retentionsparameters gestattet die unmittelbare Abschätzung der zu erwartenden Retentionsvorgänge.

Verdankungen

Die vorliegende Untersuchung stellt eine Forschungsarbeit des Ingenieurbüros Kuster

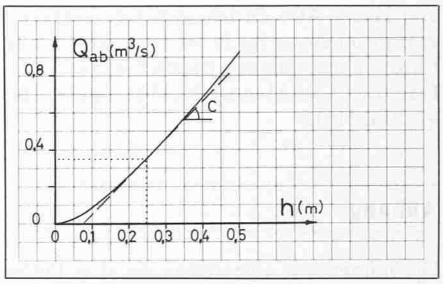

Bild 4. $Q_{ab}(h)$ nach Gleichung (26) und in approximierter Darstellung

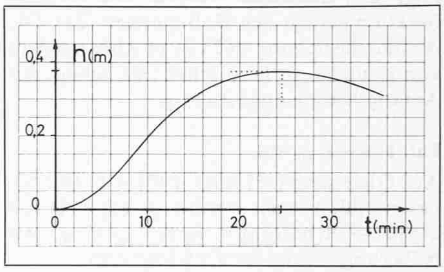

Bild 5. Verlauf des Beckenspiegels

Literaturverzeichnis

Dracos, Th.: «Die Berechnung instationärer Abflüsse in offenen Gerinnen beliebiger Geometrie». Schw. Bauzeitung, 1970, Heft 19, pp. 413–420

Weitere Literaturhinweise, die in der Untersuchung nicht erwähnt sind, aber weitere Informationen über das Retentionsproblem geben:

Appleby, F.V.: «Abflussdynamik», GWF, Vol. 104, 1963, Heft 26, pp. 745–751

Bratránek, A.: «Vliv manipulace s hradicími tělesy na přelivech na odtok vody pod přehradou». Výzkumný ústav Vodohospodářský práce a studie, Sešit 92, 1956, Praha

Dauber, L.: «Ausgleichs- und Speicherbecken in der Abwassertechnik». Schw. Bauzeitung, 1975, Heft 4, pp. 36–41

Frank, J.: «Speicherungsaufgaben beim Entwurf von Staubecken». Der Bauingenieur, Vol. 21, 1940, Heft 23/24, pp. 179–185

Franke, E.: «Die Wasserspiegelbewegung in mehreren, insbesondere zwei hintereinanderliegenden Speicherbecken». Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Dresden, B, Vol. 6, 1956/57, Heft 2, pp. 255–260

Kühne, A.: «Stauregulierung an Flüssen». Wasser- und Energiewirtschaft, Vol. 67, 1975, Heft 4, pp. 85–94

Kühne, A.: «Charakteristische Kenngrössen schweizerischer Speicherseen». Geographica Helvetica, Vol. 33, 1978, Nr. 4, pp. 191–199

Mathieson, R.: «Reservoir regulation problems». Proc. Inst. Civ. Eng., part III, Vol. 5, 1953, pp. 311–326

Mitchell, T.B.: «Lag curves for flood routing through a reservoir». Proc. Inst. Civ. Eng., Vol. 22, July 1962, pp. 309–316. Disc: pp. 168–179

Vischer, D.: «Die stetige Regelung eines Flüssigkeitsstandes». Technische Rundschau, 1970, Nr. 53/54

Vischer, D.: «Berechnung der Hochwasserretention von Seen». Schw. Bauzeitung, Vol. 89, 1971, Heft 12, pp. 279–284

Vischer, D., Moser, U.: «Der instationäre Ausfluss aus Behältern». Schw. Techn. Zeitschrift, 1971, Nr. 28, pp. 609–617

und Hager AG, Zürich, dar. Der Verfasser möchte an dieser Stelle der Geschäftsleitung für die Unterstützung herzlich danken. Die Durchsicht des Manuskripts besorgte *K. Hager*, Ing. HTL.

Anhang

Die numerische Integration der drei Differentialgleichungen (18), (19) und (20) lässt sich nicht unmittelbar durchführen. Aus den Beziehungen lassen sich jedoch Näherungslösungen für $T \to 0$ errechnen, die im folgenden abgeleitet werden. Die Zuflussfunktion genügt den Bedingungen (21). Die Ausflussbeziehung $q(T)$ ist in Abhängigkeit von q_0 und n zu bestimmen; sie genügt der Anfangsbedingung $q(0) = q_0$.

Fall 1: $n = 1$, $q_0 \neq 0$

Aus Gleichung (18) folgt $q'(0) = 0$. Die höheren Ableitungen werden $q''(0) = 0$ und $q'''(0) = R_1 q_z''/(2q) = R_1(1-q_0)e^2/q_0$. Als Näherungslösung für $T \to 0$ folgt also

$$(28) \quad q(T) = q_0 + \frac{R_1 e^2 (1-q_0)}{6q_0} T^3$$

Fall 2: $n = 1$, $q_0 = 0$

Für $q_0 = 0$ wird Gleichung (18) im Ursprung singulär. Als Neigungen erhält man $q_{s1} = 0$ und $q_{s2} = -R_1/2$ (Index «s» bezeichnet Grössen im singulären Punkt), wobei lediglich die erste weiter von Interesse ist. Die zweite Ableitung ergibt $q_s'' = q_z''$, womit für kleine Werte von T folgt

$$(29) \quad q(T) = e^2 T^2$$

Fall 3: $n = 2$

Aus Gleichung (19) folgt unmittelbar $q' = 0$. Die höheren Ableitungen bestimmen sich zu $q''(0) = 0$ und $q'''(0) = 2R_2(1-q_0)e^2$, womit für $T \to 0$ gilt

$$(30) \quad q(T) = q_0 + \frac{R_2 e^2 (1-q_0)}{3} T^3$$

Fall 4: $n = 3$, $q_0 \neq 0$

Gleichung (20) ergibt $q'(0) = 0$. Mit $q''(0) = 0$ und $q'''(0) = 3R_3 q_z'' q^{1/3}/2$ erhält man als Näherungslösung für $T \to 0$.

$$(31) \quad q(T) = q_0 + \frac{R_3 e^2 (1-q_0) q_0^{1/3}}{2} T^3$$

Fall 5: $n = 3$, $q_0 = 0$

Durch Einführung der Substitution $q = y^3$ folgt mit $q_z = e^2T^2 + 0(T^3)$ aus Gleichung (20)

$$(32) \quad y' = \frac{R_3}{2}\left(\frac{e^2T^2 - y^3}{y}\right),$$

eine Beziehung, die im Ursprung wiederum singulär ist. Durch Ableiten findet man $y_s'(0) = 0$, $y_s''(0) = 0$, $y_s'''(0) = 0$. $y(T)$ ist somit für $T \to 0$ sehr viel kleiner als q_z. Der Zähler des Klammerausdrucks von Gleichung (32) lässt sich also vereinfachen zu $(e^2T^2 - y^3)_{(T\to 0)} = e^2T^2$ und

$$(33) \quad y' = R_3 e^2 T^2/(2y)$$

Die Lösung dieser Beziehung lautet $y^2 = R_3 e^2 T^3/3$ oder in den ursprünglichen Parametern

$$(34) \quad q(T) = (R_3 e^2/3)^{3/2} \cdot T^{9/2}$$

Die Gleichungen (28), (29), (30), (31) und (34) gestatten die numerische Berechnung der Beziehungen (18) bis (20).

Adresse des Verfassers: Dr. sc. techn. *W. H. Hager*, dipl. Bau-Ing. ETH, Kuster und Hager AG, Obstgartenstr. 20, 8006 Zürich.

Umschau

Beleuchtungsplanung mit Hilfe des Computers

(pd). Bei der Qualitätsbeurteilung einer Beleuchtungsanlage sind eine Reihe von wichtigen Kriterien zu berücksichtigen. Neben der Angabe der mittleren Beleuchtungsstärke sind dies vor allem lichttechnische Grössen, welche die Qualität unmittelbar am Arbeitsplatz oder in Arbeitszonen beschreiben.

Speziell bei Bildschirmarbeitsplätzen muss dabei dem Problem der möglichen Direktblendung durch Lichtquellen besondere Beachtung geschenkt werden. Mitbeeinflussend sind ausserdem: die Leuchtdichteverteilung im Raum, die Beurteilung der möglichen Kontrastminderung an allen Arbeitsplätzen und schliesslich die Berechnung von vertikaler- bzw. zylindrischer Beleuchtungsstärke, welche eine Aussage über die zu erwartenden Schattigkeitsverhältnisse zulässt.

Der Computer als Planungshilfe

Das Planen einer Beleuchtungsanlage unter Berücksichtigung dieser Gütemerkmale nach konventionellen Methoden ist sehr zeitraubend oder in manchen Fällen überhaupt nicht möglich. Hier bietet sich der Computer als echte Planungshilfe an, wobei sein Hauptanwendungsgebiet in der exakten Analyse eines Beleuchtungsvorschlages liegt.

Die *Zumtobel AG*, eines der grössten Unternehmen in Europa im Bereich technischer Leuchten, hat unter der Bezeichnung «Cophos» ein System entwickelt. Es ermöglicht die Berechung von Beleuchtungsstärke und Leuchtdichteverteilung auf allen Raumumschliessungsflächen, wie auch auf beliebig orientierten und geneigten Flächen im Raum. Dabei können die eingesetzten Lichtquellen jedem Bedarf entsprechend positioniert sein und auch eine beliebige Kombination von Direkt- und Indirektleuchten innerhalb einer Berechnung vorgesehen werden. Zusätzlich ist die Berücksichtigung des einfallenden Tageslichtes und der im Raum befindlichen Objekte möglich. «Cophos» ermittelt aber auch die Verteilung von zylin-

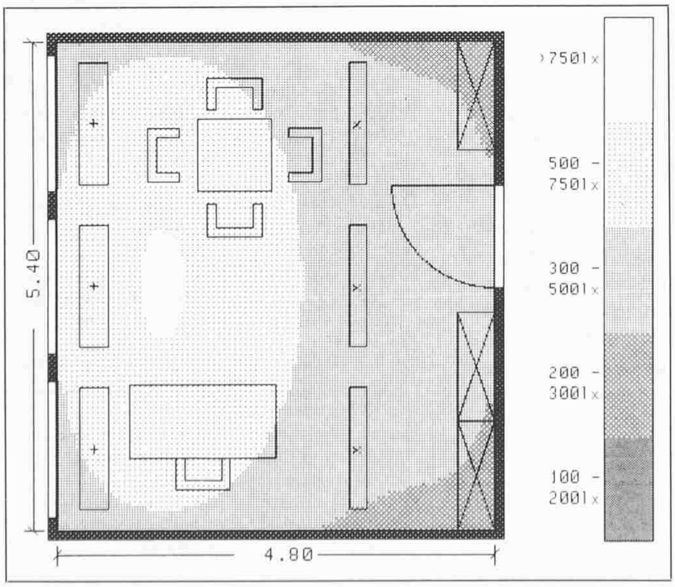

Bild 1 (links). Graphische Darstellung der Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Nutzebene mit Leuchtenanordnung und Möblierung. Projekt: Büro mit 3 Stk. Ram 2/36W Asym + 3 Stk. Ram 1/36W Sym

Bild 2. Graphische Darstellung der Leuchtdichteverteilung in Perspektive für Tageslicht (15. Dezember, 15 Uhr)