Abflussmaximum aus kleinen Einzugsgebieten

Autor(en): **Hager, Willi H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **107 (1989)**

Heft 22

PDF erstellt am: **15.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-77112

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

- unterstützt den Bauherrn durch umfassende interdisziplinäre Zusammenarbeit im Planungsteam bei der Erstellung des Pflichtenheftes
- garantiert eine innovative Zusammenarbeit im Planungsteam bei der Projektierung, unter Berücksichtigung neuester Technologien
- stellt eine zweckmässige Qualitätskontrolle sicher, in Absprache mit dem Planungsteam, und assistiert die Bauherrschaft in der Anfangsphase nach Betriebsaufnahme
- informiert den Bauherrn rechtzeitig über mögliche Befangenheiten und Abhängigkeiten.

Die ASIC:

- setzt bei ihren Mitgliedern Allgemeinbildung, Fachkenntnis, technisches Können und Ehrenhaftigkeit als selbstverständlich voraus
- fördert die interdisziplinäre Weiterbildung ihrer Mitglieder
- schafft Voraussetzungen, welche die Generalplanungstätigkeiten ihrer Mitglieder erleichtern
- setzt sich für Massnahmen ein, welche zur Beschleunigung der Baubewilligungsverfahren beitragen.

Ein Berufsverband mit solchen Grundsätzen, welcher sich von anderen damit auch abhebt, könnte manchen Bauherrn ansprechen.

Adresse des Verfassers: *Dr. P. Lampert*, Direktor, Schweizerische Bankgesellschaft, 8021 Zürich

Abflussmaximum aus kleinen Einzugsgebieten

Der maximal mögliche Oberflächen-Abfluss aus einem kleinen Einzugsgebiet wird anhand eines vereinfachten hydrologischen Modells ermittelt. Dabei wird der Netto-Niederschlag in Abhängigkeit der Niederschlagsdauer in Rechnung gestellt. Sind einmal die Niederschlags-Charakteristik sowie die Geometrie, Topographie und Oberflächenstruktur des Einzugsgebietes bekannt, so lassen sich direkte Schlüsse auf das Ausfluss-Hydrogramm mit maximal möglichem Durchfluss ziehen.

The maximum of possible surface runoff from a small watershed is investigated using a simplified hydrological model. The excess precipitation is thereby related to the time of precipitation. Once the characteristics of the excess precipitation as well as geometry, topography and surface structure of the watershed are known, a direct prediction of the outlet hydrograph with the maximum possible discharge can be deduced.

Die Abflussermittlung aus Einzugsgebieten bildet häufig den Ausgangspunkt der hydraulischen Berechnungen

VON WILLI H. HAGER, LAUSANNE

für Bauwerke des Wasserbaus. Im einfachsten Fall besteht die Aufgabe, den zu einem wohldefinierten Niederschlagsereignis zugehörigen Maximaldurchfluss an einer Stelle des Einzugsgebietes zu ermitteln. Im allgemeinen genügt diese Information jedoch nicht, und es stellt sich die Frage nach dem zeitlichen Verlauf des Durchflusses, also dem Hydrogramm [7]. Damit lassen sich Fragen bezüglich des zeitlichen Auftretens des Spitzenabflusses und eventuelle Verzögerungserscheinungen beantworten sowie das Abflussvolumen bestimmen. Ein Ausfluss-Hydrogramm eines Einzugsgebietes wird massgeblich durch das Zusammenwirken zweier Einzelkomponenten beeinflusst. Einerseits handelt es sich dabei um die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs des Niederschlaganteils, der zu direktem Abfluss führt. Zum zweiten ist die Geometrie, die Topographie und der Oberflächencharakter des Einzugsgebietes in Rechnung zu stellen [1]. Sind einmal diese Eingabeparameter bekannt, so lässt sich der Abflussprozess anhand hydraulischer Modellgleichungen ermitteln.

In Einzugsgebieten, in denen die Abflusscharakteristika vorhergesagt werden sollen, ist der massgebende Netto-Niederschlag in Abhängigkeit des Ortes und der gewählten Wiederkehrperiode anzusetzen. Für Teile der Schweiz und Deutschlands liegen dabei Handbücher vor, die die mittlere Regenintensität $\bar{r}$ in Abhängigkeit der Regendauer t_r angeben. Wird eine bestimmte Regendauer gewählt, so kann der daraus resultierende Abfluss anhand der Fliesszeit-Methode oder komplizierterer Verfahren ermittelt werden. Das Resultat stellt dabei jedoch nicht den maximal möglichen Durchfluss am Ausgang des Einzugsgebietes dar, da dieser je nach Regendauer (und somit nach der Netto-Regenintensität) kleiner oder grösser ausfällt.

Die vorliegende Untersuchung beschäftigt sich mit der Ermittlung des *maximal möglichen Abflusses* aus einem Einzugsgebiet. Das hydrologische Modell ist dabei soweit vereinfacht, dass lediglich die wesentlichen Fliesseigenschaften wiedergegeben werden. Es ist an anderer Stelle ausführlich erläutert [3]. Das Resultat dieser Studie erlaubt deshalb, den maximal möglichen Ausfluss *direkt*, also ohne zeitraubende Iteration, vorherzusagen. Das Berechnungsverfahren wird durch Beispiele erläutert und schrittweise vorgestellt.

Der massgebende Niederschlag

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Brutto- und Nettoniederschlag. Unter dem Brutto-Niederschlag versteht man alles auf die Erdoberfläche fallende Wasser in festem (Schnee, Eis), flüssigem (Regen) und gasförmigem (Dunst, Nebel) Zustand. Im Gegensatz dazu stellt der Netto-Niederschlag denjenigen Teil des Brutto-Niederschlags dar, der zu direktem Oberflächenabfluss gelangt. Der Rest versickert, evatransporiert, bleibt auf Oberflächenunebenheiten liegen oder haftet an Pflanzen. Den einfachsten Zusammenhang zwischen den beiden Niederschlagsfraktionen schafft der Volumen-Abflussbeiwert φ, gibt er doch das Verhältnis zwischen gesamtem Oberflächen-Abflussvolumen und totalem Brutto-Niederschlagsvolumen an [6]. Da sich hydrologische Berechnungen haupt-

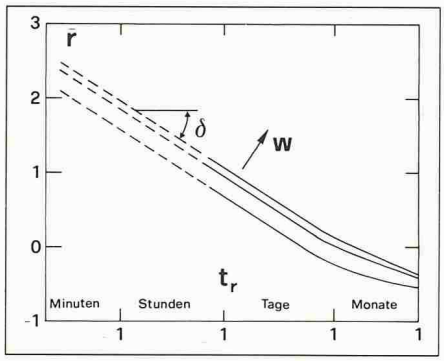

Bild 1. Typische Niederschlagintensitäts-Regendauer-Kurven für verschiedene Wiederkehrperioden w [8] (doppelt logarithmische Auftragung)

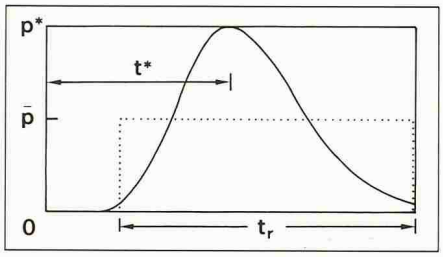

Bild 2. Netto-Hyetogramm, als (...) Blockregen und (—) P(T) nach Gleichung (3) für m = 10 [3]

Bezeichnungen

Verschiedene Bezeichnungen können mit den Indizes «1» und «2» vorkommen und beziehen sich dann auf die erste und zweite hydrologische Kaskade. Gestrichene Grössen wie $\bar{r}$ deuten auf Mittelwerte, während Zeichen wie $\hat{Q}$ auf dimensionsbehaftete Terme schliessen lassen. Indizes «n» beziehen sich auf den Netto-Blockregen, während (*) auf die Spitzenwerte des zeitlich variablen Ersatz-Hyetogramms hinweisen. «max» und «ext» schliesslich entsprechen dem Maximalwert bzw. dem maximal möglichen Wert des Hydrogramms.

A	[m²]	Oberfläche des Einzugsgebietes
b	[m]	Breite des Baches bezüglich einer Talflanke
B	[m]	Gesamtbreite des Ersatzbaches
d	[-]	Änderung der Intensitäts-Dauerkurve
h	[m]	Abflusstiefe
H_r	[m]	Netto-Regenhöhe
J_s	[-]	Sohlengefälle
J_f	[-]	Reibungsgefälle
K	[m$^{1/3}$s^{-1}]	Reibungsbeiwert nach der Formel von Strickler
m	[-]	Hyetogramm-Formparameter
M	[-]	relativer, maximal möglicher Abfluss
p	[ms^{-1}]	Netto-Niederschlagsintensität
P	[-]	$P = p/p^*$
q	[m²s^{-1}]	Durchfluss pro Einheitsbreite
Q	[m³s^{-1}]	Durchfluss
r	[ms^{-1}]	Brutto-Niederschlagsintensität
t	[s]	Zeit
T	[-]	normierte Zeit
V	[ms^{-1}]	mittlere Fliessgeschwindigkeit
w	[s]	Wiederkehrperiode
x	[m]	Lagekoordinate, Länge
X	[-]	relative Lagekoordinate
Y	[-]	relative Abflusstiefe
α	[-]	Substitution nach Gleichung (24)
δ	[-]	Neigung der Intensitätsdauerkurve
φ	[-]	Abflusskoeffizient
χ	[-]	Kaskadenparameter
Φ	[-]	Hilfsfunktion
τ	[-]	normierte Zeit

sächlich auf die Oberflächen-Abflussspitze konzentrieren, definiert man den Spitzen-Abflussbeiwert φ_s als Verhältnis des maximalen Durchflusses (an einer Stelle des Einzugsgebietes) und der maximalen Niederschlagsintensität multipliziert mit der zugehörigen Oberfläche. Es gilt $0<\varphi<\varphi_s<1$. Für $\varphi=0$ fliesst überhaupt kein Oberflächen-Wasser ab, während für $\varphi=1$ alles Wasser darauf zum Abfluss gelangt (Asphaltplätze ohne Lachenbildung, Einfluss der Evatranspiration vernachlässigbar). Im folgenden werden die Haupteigenschaften des Brutto- und Netto-Niederschlages diskutiert, um anschliessend die Abflussverhältnisse zu erläutern.

Der Brutto-Niederschlag

Niederschlags-Ereignisse sind physikalisch äusserst komplex und hängen von den vorherrschenden Zustandsbedingungen der Luft, der Winde, der Topographie, der Tages- und Jahreszeit ab. Die Erfassung und insbesondere die Vorhersage des wohlbekannten Phänomens ist heute nur näherungsweise möglich. Im Hinblick auf die Bemessung von Bauwerken des Wasserbaus bedient man sich deshalb statistischer Methoden; diese gestatten die Extrapolation der wichtigsten Eigenschaften der Modellregen. Handbücher wie beispielsweise [8] geben für die Schweiz eine Fülle von Information. Trotz der jahrzehntelangen Messungen stellt die Auswertung jedoch eine grosse Vereinfachung des effektiven Niederschlagvorgangs dar. Mit einem Netz von rund einer Regenmessstation pro 50 km² liegen für viele kleinere Täler keine Angaben vor. Der örtliche Niederschlagscharakter lässt sich demnach nur ungenau erfassen. Weiter ist für eine vorgegebene Regenmessstation lediglich die zu einer Wiederkehrperiode w zugehörige mittlere Regenintensität $\bar{r}$ in Abhängigkeit der Regendauer t_r angegeben. Das Brutto-Hyetogramm entspricht demnach einem Blockregen der Intensität $\bar{r}$ während der Regendauer t_r aufgrund der oben erwähnten statistischen Auswertung. Die Wiederkehrperiode variiert dabei zwischen 2 und 1000 Jahren.

Bild 1 zeigt eine typische (Brutto-) Niederschlags-Intensitätskurve nach [8]. Die Kurven $\bar{r} = \bar{r}(t_r)$ mit dem Scharparameter w entsprechen in der doppelt-logarithmischen Auftragung abschnittsweise Geraden, sie lassen sich durch

$$(1) \qquad \bar{r} = \frac{D}{t_r^d}$$

darstellen. $\bar{r}$ besitzt die Dimension [mm/h], entspricht also im SI-Masssystem einer Geschwindigkeit [ms^{-1}]. Wird für t_r als Einheit die Stunde gewählt, so ergibt sich für das Niederschlagmass D [mm·s^{d-1}], im SI-System folgt jedoch D [ms^{d-1}]. d [-] schliesslich ist die Niederschlagscharakteristik und stellt das Gefälle der Kurve $\bar{r}(t_r)$ dar, $d = \tan(\delta)$. Bekanntlich nimmt $\bar{r}$ mit zunehmender Regendauer t_r ab, also $d > 0$.

Für die meisten Regen-Messstationen sind die doppelt-logarithmisch aufgetragenen Kurven $\bar{r}(t_r)$ im Bereich $t_r<1$ Tag Geraden [8]). Für diese Niederschlagsdauer treten die massgebenden Hochwasser in relativ kleinen Einzugsgebieten auf. Gleichung (1) lässt sich deshalb für die nachfolgenden Berechnungen direkt anwenden.

Der Netto-Niederschlag

Bezüglich eines nicht zu grossen Einzugsgebietes stellt die mittlere Netto-Niederschlagsintensität

$$(2) \qquad \bar{p} = \varphi \cdot \bar{r}$$

die massgebende Ausgangsgrösse für die Abflussberechnung dar. Wie an anderer Stelle ausführlich erläutert [4], treten aber reale Niederschläge nie als Blockregen auf. Deshalb, und um ebenfalls den mathematischen Formalismus zu wahren, gehen die vorliegenden Untersuchungen vom Ersatz-Hyetogramm $p(t)$ aus. Es handelt sich dabei um einen zeitlich zentrierten Netto-Niederschlag, der sich durch

$$(3) \qquad P = (Te^{1-T})^m$$

ausdrücken lässt (Bild 2). $P = p/p^*$ ist dabei die auf die maximale Netto-Niederschlagsintensität p^* normierte Ordinate, und $T = t/t^*$ die auf die Steigzeit t^* bezogene dimensionslose Zeit. m schliesslich ist der Netto-Hyetogrammformparameter. Im folgenden wird $m = 10$ gesetzt. Mit [4]

$$(4a) \qquad p^* = 2\,\bar{p} = 2\bar{r}\varphi$$

$$(4b) \qquad t^* = 5\,t_r/8$$

ist dann eine volumenkonsistente Niederschlagssimulation hergestellt. Der Modellregen beginnt also zur Zeit $t = 0$ mit $p = 0$, steigt kontinuierlich auf den Maximalwert $p^* = p(t = t^*)$, um anschliessend auf den Ausgangswert $p(t \to \infty) = 0$ zu fallen.

Setzt man die Gleichungen (1) und (4b) in Gleichung (4a) ein, so folgt

$$(5) \qquad p^* = \frac{2\varphi D}{(8t^*/5)^d};$$

p^* ist für ein bestimmtes Einzugsgebiet (φ, d und Ortskonstante in D) und eine festgelegte Wiederkehrperiode w (in D) lediglich abhängig von t^*.

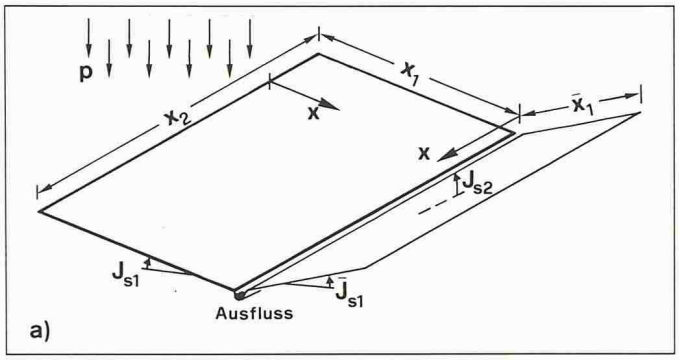

Bild 3. Geometrie des Ersatz-Einzugsgebietes

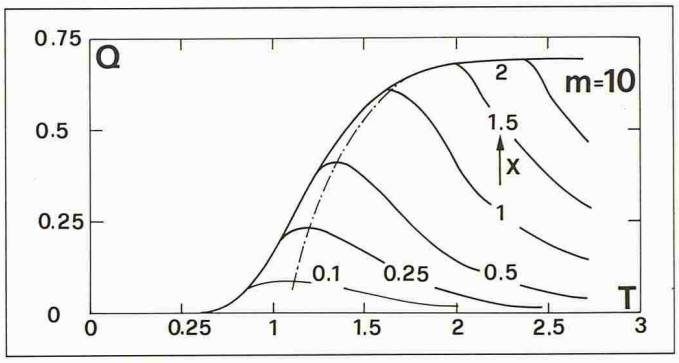

Bild 4. Dimensionslose Hydrogramme Q (T) in Abhängigkeit der Lage X für Formparameter m = 10; (-·-) Abflussmaxima $Q_{max}(X)$

Unter der Netto-Regenhöhe H_r versteht man das Produkt von mittlerer Netto-Regenintensität $\bar{p} = (\varphi \bar{r})$ multipliziert mit der Regendauer t_r, also

(6) $H_r = \bar{p}\, t_r = (p^*/2) \cdot (8t^*/5)$

nach den G1n. (4 a+b). Eliminiert man p^* durch G1. (5), so folgt $H_r = \varphi D/(8t^*/5)^{d-1}$. Für fixierte Werte ($\varphi D$) und für $d = 1$ ($\delta = 45°$) ist H_r somit unabhängig von der Regendauer t_r, während für $d > 1$ ($0 < d < 1$) H_r mit t_r abnimmt (zunimmt). In den Auswertungen nach [5] gilt $0 < d < 1$, womit $H_r \sim t_r^{1-d}$, also H_r mit t_r zunimmt.

Das hydrologische Ersatzsystem

Die vorliegenden Untersuchungen basieren auf dem vereinfachten hydrologischen Modell nach [2, 3]. Das relativ kleine Einzugsgebiet setzt sich danach aus zwei Ebenen zusammen, entlang deren Schnittlinie ein Bach oder kleiner Fluss fliesst. Die Geometrie dieses Ersatz-Einzugsgebietes ist demnach charakterisiert durch die Längen x_1 und $\bar{x}_1$ der Talflanken und der Länge x_2 des Baches, der zugehörigen mittleren Gefälle J_{s1}, $\bar{J}_{s1}$ und J_{s2}, und den entsprechenden Reibungsbeiwerten K_1, $\bar{K}_1$ und K_2 nach der Formel für Strickler, vergleiche Bild 3.

Der Bach wird als prismatisches Gerinne der Breite B betrachtet [3]. Die Oberflächen der Talflanken sind $A_1 = x_1 x_2$ und $\bar{A}_1 = \bar{x}_1 x_2$, womit die gesamte Oberfläche des Einzugsgebietes $A = A_1 + \bar{A}_1$ wird. Die zur massgebenden Talflanke 1 zugeordnete Bachbreite ist demnach $b = (A_1/A)B$. Die erste Kaskade des hydrologischen Modells besteht folglich aus dem Nettoregen auf die Talflanken bis zum seitlichen Zufluss in den Bach, während die zweite Kaskade den Bachabfluss bis zum Auslauf aus dem Einzugsgebiet einschliesst.

Modellierung des Oberflächenabflusses für eine hydrologische Kaskade

Die Abflusscharakteristika entlang einer schiefen Ebene lassen sich infolge der Seichtwasserbedingung und des durchwegs strömenden Abflusszustandes mit der kinematischen Wellentheorie ermitteln [3]. Im Vergleich zu den Gleichungen nach de Saint-Venant wird die Kontinuitätsgleichung beibehalten, während sich die dynamische Gleichung auf den Pseudo-Normalabflusszustand reduziert. Mit h als Wassertiefe und q als Durchfluss pro Einheitsbreite gilt demnach

(7) $$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = p,$$

(8) $J_s = J_f$,

wobei t der Zeit, x der Lagekoordinate mit Ursprung am höchsten Punkt, p der seitlichen Zuflussintensität, J_s dem Sohlengefälle und J_f dem Reibungsgefälle entsprechen. Für Oberflächenabflüsse infolge Starkregens ist das Abflussregime voll-turbulent; aufgrund des rauhen Oberflächencharakters gilt somit das Gesetz von Manning-Strickler

(9) $$J_f = \frac{q^2}{K^2 h^{10/3}}.$$

Unter Einführung der dimensionslosen Parameter

(10a) $X = x/(K J_s^{1/2} p^{*2/3} t^{*5/3})$

(10b) $T = t/t^*$

(10c) $Q = q/(K J_s^{1/2} p^{*5/3} t^{*5/3})$

(10d) $Y = h/(p^* t^*)$

folgt dann unter Elimination von h aus den Gleichungen (7, 8, 9) für den dimensionslosen Abfluss Q [2]

(11) $$\frac{3}{5} Q^{-2/5} \frac{\partial Q}{\partial T} + \frac{\frac{\partial}{\partial}}{\frac{\partial}{X}} Q = P.$$

Diese partielle Differentialgleichung wird unter der Randbedingung $Q(X = 0, T) = 0$ (kein Abfluss am höchsten Punkt) und unter der Anfangsbedingung $Q(X, T = 0) = 0$ (kein Abfluss zu Regenbeginn) gelöst. Die numerische Integration von Gleichung (11) führt dann auf die dimensionslosen Hydrogramme $Q(T)$ an beliebigen Orten X des Ersatz-Einzugsgebietes für verschiedene Hyetogramm-Formparameter m [2].

Bild 4 zeigt die Lösung für $m = 10$, die fortan verwendet wird. Stellt $P = P(T)$ den zeitlichen Verlauf des Nettoregens dar, so entspricht $Q(T)$ an der Stelle X dem Hydrogramm des seitlichen Bachzuflusses.

Es ist auffallend, dass der Kurvenverlauf von $P(T)$ nach Bild 2 und ein Hydrogramm $Q(T)$ für eine fixierte Lage X nach Bild 4 sich qualitativ ähnlich sind. Die Idee liegt somit nahe, die beiden Kurven durch eine Ähnlichkeits-Transformation in einander übergehen zu lassen. Dieses Vorgehen ist mathematisch zwar nicht ganz exakt [2], lässt sich aber durch den Näherungscharakter des zugrunde liegenden hydrologischen Modells rechtfertigen.

Mit den neuen Parametern

(12a) $\bar{X} = X/0{,}69$

(12b) $\bar{Q}_{max} = Q_{max}/0{,}69$,

wobei Indizes «*max*» das Abfluss-Maximum in Bild 4 bezeichnet, wird [2]

(13) $\bar{Q}_{max} = \mathrm{Tanh}(\bar{X})$.

Weiter folgt für die zugehörige Steigzeit des Hydrogramms

(14) $T_{max} = 1{,}1 + 0{,}4\, X$

mit $T_{max} = t_{max}/t^*$. Die Gleichungen (13, 14) erlauben die Ermittlung der Koordinaten des Hydrogramm-Maximums am Ausfluss der Talflanke. Das Hydrogramm selbst folgt dann der modifizierten Gleichung (3) [2]

(15) $\tilde{Q} = [\tilde{T} e^{1-\tilde{T}}]^m$

mit $\tilde{Q} = Q/Q_{max}$, $\tilde{T} = t/t_{max}$.

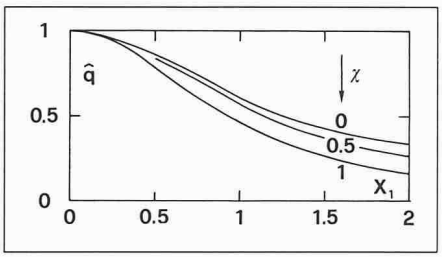

Bild 5. Relativer maximaler Ausfluss aus dem Einzugsgebiet $\hat{q}$ in Abhängigkeit von X_1 und χ

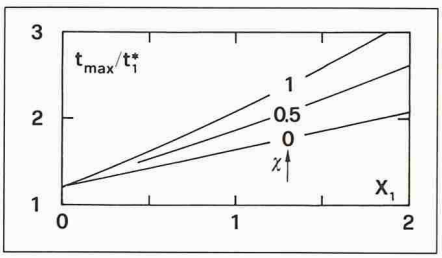

Bild 6. Relative Steigzeit $t_{max,2}/t^*$ des Hydrogramms am Ausfluss des Einzugsgebietes in Abhängigkeit von X_1 und χ

Beispiel 1

Man betrachte ein symmetrisches Einzugsgebiet mit der Länge $x_1 = \bar{x}_1 = 3000$ m, dem Gefälle $J_{s1} = 34\% = 0{,}34$ und dem Rauhigkeitsbeiwert $K = 15$ $m^{1/3}s^{-1}$. Der Niederschlag sei charakterisiert durch $\bar{r} = 33$ mm/h $= 9{,}2 \cdot 10^{-6}$ ms^{-1}, $m = 10$ und $t_r = 2$ h; der Abflussbeiwert betrage $\varphi = 0{,}3$, womit $\bar{p} = 2{,}75 \cdot 10^{-6}$ ms^{-1}, also $p^* = 5{,}5 \cdot 10^{-6}$ ms^{-1} und $t^* = 1{,}25$ h $= 4500$ s nach den Gleichungen (4). Wie verläuft das Hydrogramm am Ausfluss des Einzugsgebietes?

1. Eingabeparameter

Nettoregen: $p^* = 5{,}5 \cdot 10^{-6}$ ms^{-1}, $t^* = 4500$ s, $m = 10$. Oberfläche: $x_1 = 3000$ m, $J_s = 0{,}34$, $K = 15$ $m^{1/3}s^{-1}$.

2. Dimensionslose Abflusscharakteristik

Mit $X_1 = 3000/(15 \cdot 0{,}34^{1/2} \cdot [5{,}5 \cdot 10^{-6}]^{2/3}\, 4500^{5/3}) = 0{,}9$ nach Gleichung (10a) und $\bar{X}_1 = 0{,}9/0{,}69 = 1{,}3$ nach Gleichung (12a) wird $Q_{max} = \mathrm{Tanh}(1{,}3) = 0{,}86$, also $Q_{max} = 0{,}86 \cdot 0{,}69 = 0{,}59$. Nach Gleichung (14) ergibt sich für $T_{max1} = 1{,}1 + 0{,}4 \cdot 0{,}9 = 1{,}46$.

3. Das Ausfluss-Hydrogramm

Durch Rücktransformation folgt mit Gleichung (10c) für $q_{max} = 0{,}59 \cdot 15 \cdot 0{,}34^{1/2}\,(5{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 4500)^{5/3} = 0{,}0108$ m^2s^{-1} als seitlicher Zufluss pro Einheitsbreite in den Bach. Mit Gleichung (10b) ergibt sich für die zugehörige Steigzeit $t_{max} = 4500 \cdot 1{,}46 = 6570$ s $= 1{,}82$ h. Das Hydrogramm schliesslich folgt aus Gleichung (15). Das wichtigste Resultat ist demnach

$q_{max} = 10{,}8$ l/s, $t_{max} = 1{,}82$ h.

Modellierung des Oberflächenabflusses für zwei Kaskaden

Dank der Eigenschaft, dass sich Zufluss und Ausfluss aus der ersten Kaskade durch dieselbe Grundbeziehung ausdrücken lassen, Gleichungen (3) und (15), kann der seitliche Zufluss zum Bach als äusserst konzentrierter Regen auf den Bach betrachtet werden. Mit anderen Worten führt der physikalische Niederschlag auf das Terrain (1. Kaskade) grundsätzlich zu derselben Gleichung des Abflussvorgangs wie der seitliche Zufluss zum Bach (2. Kaskade). Dabei müssen lediglich die entsprechenden Eingabeparameter modifiziert werden.

Die mathematischen Ableitungen für den Abfluss im Bach sind lange und umständlich [2], die erzielten Resultate lassen sich jedoch einfach mitteilen. Der maximale Ausfluss am unteren Ende des Einzugsgebietes hängt lediglich von der dimensionslosen Länge X_1 der massgebenden Talflanke sowie vom Kaskadenparameter χ ab mit

$$(16a)\quad X_1 = \frac{x_1}{K_1 J_{s1}^{1/2}\, p_1^{*2/3}\, t_1^{*5/3}}$$

$$(16b)\quad \chi = \frac{x_2}{x_1}\left(\frac{b_1}{x_1}\right)^{2/3}\left(\frac{K_1 J_{s1}^{1/2}}{K_2 J_{s2}^{1/2}}\right).$$

Der maximale Ausfluss $\hat{q}$ aus dem Einzugsgebiet und die zugehörige Steigzeit $\hat{t} = t_{max,2}/t^*$ gehen aus den Bildern 5 und 6 hervor mit

$$(17)\quad \hat{q} = \frac{q_{max,2}\, b_1}{p_1^*\, x_1 x_2}.$$

Beispiel 2

Die Länge des Einzugsgebietes nach Beispiel 1 betrage $x_2 = 2{,}15$ km, das Sohlengefälle des Baches $J_{s2} = 2\%$ und der zugehörige Rauhigkeitsbeiwert $K_2 = 22$ $m^{1/3}s^{-1}$. Die Bachbreite sei $B = 10$ m, also $b = 5$ m. Wie gross ist dann der Ausfluss aus dem Einzugsgebiet?

1. Eingabeparameter

Nettoregen: $p^* = 5{,}5 \cdot 10^{-6}$ ms^{-1}, $t^* = 4500$ s, $m = 10$; Oberfläche: $x_1 = 3000$ m, $J_{s1} = 0{,}34$, $K_1 = 15$ $m^{1/3}s^{-1}$; Bach: $x_2 = 2150$ m, $J_{s2} = 0{,}02$, $K_2 = 22$ $m^{1/3}s^{-1}$.

2. Dimensionslose Abflusscharakteristik

Nach Beispiel 1 gilt für $X_1 = 0{,}90$. Der Kaskadenparameter wird $\chi = (2150/3000) \cdot (5/3000)^{2/3}\,(15 \cdot 0{,}34^{1/2}/22 \cdot 0{,}02^{1/2}) = 0{,}03 \approx 0$. Folglich gilt

$X_1 = 0{,}90$, $\chi = 0$.

3. Das Ausfluss-Hydrogramm

Mit den Bildern 5 und 6 folgt für $\hat{q}(X_1 = 0{,}9, \chi = 0) = 0{,}66$ und $t_{max,2}/t^* = 1{,}60$, also $q_{max,2} = 0{,}66 \cdot 5{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 3000 \cdot 2150/5 = 4{,}7$ m^2s^{-1}, womit $\hat{Q}_{max,2} = B \cdot q_{max,2} = 46{,}8$ m^3s^{-1}. Die Steigzeit ist $t_{max,2} = 1{,}6 \cdot 4500$ s $= 7200$ s $= 2$ h. Das zugehörige Hydrogramm ergibt sich durch Anwendung von Gleichung (15). Die Hauptresultate sind somit

$\hat{Q}_{max,2} = 46{,}8$ m^3s^{-1}, $t_{max,2} = 2$ h.

Der extremste Ausfluss

Die in den vorhergehenden Kapiteln hergeleiteten Ausdrücke für den Ausfluss aus dem Einzugsgebiet setzen ein bestimmtes Regenereignis, charakterisiert durch (p^*, t^* und $m = 10$) voraus. Der damit ermittelte Maximal-Abfluss $\hat{Q}_{max}$ wird dabei aber nicht unbedingt dem maximal möglichen Durchfluss $\hat{Q}_{ext}$ entsprechen. Es stellt sich demnach die Frage, welche Regendauer t_r für eine bestimmte Region bei einer vorgegebenen Wiederkehrperiode (w) und einem bekannten Einzugsgebiet (K, x, J_s) auf $\hat{Q}_{ext}$ führt. Dieser Frage soll im folgenden nachgegangen werden, und zwar sowohl für eine wie auch für zwei hydrologische Kaskaden.

Typische Kenngrössen

Wie aus den vorhergehenden Kapiteln folgt, beeinflussen in einem vorgegebenen Einzugsgebiet lediglich die typischen Grössen des Netto-Hyetogramms (p^*, t^*) den maximal möglichen Ausfluss. Sowohl für eine als auch für zwei Kaskaden handelt es sich dabei um die Grössen X_1 und Q_{max}.

Unter Zuhilfenahme der Gleichungen (5), (10a) und (12a) folgen mit α nach Gleichung (24) die Gleichungen (18) und (19) (siehe Kästchen).

t_0 ist somit eine typische Zeit, die massgebend den maximal möglichen Ausfluss charakterisiert. Das in Gleichung (18) angegebene Zeitverhältnis soll im folgenden als

$$(20)\quad \tau = t^*/t_0$$

bezeichnet werden.

Ist einmal der Durchfluss $\bar{Q}$ ermittelt, so folgt nach den Gleichungen (10c, 12a) für den dimensionsbehafteten Abfluss q_{max} pro Einheitsbreite die Gleichung (21) (siehe Kästchen).

Eliminiert man t^* in Gleichung (19) durch τ nach Gleichung (20), so folgt für den typischen Durchfluss die Gleichung (22) (Siehe Kästchen) mit t_0 nach Gleichung (19). Die Grössen t_0 und q_0 hängen lediglich von der geographischen Lage des Einzugsgebietes und der Wiederkehrperiode (D), dem Abflusskoeffizienten (φ) und dem Einzugsgebiet (x, K, J_s) ab.

Beispiel 3

Für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren betrage $D = 70$ $mmh^{-1/4}$ und $d = 3/4$. Alle anderen Werte seien identisch mit Beispiel 1. Wie gross ist dann t_0 und q_0?

Es ist zweckhaft, alle Parameter auf die SI-Einheiten (m,s) umzurechnen. Dann wird $D = 70/(1000 \cdot$

$$(18)\quad \bar{X} = x\left\{0{,}69\, K J_s^{1/2}\left[\frac{2\varphi D}{(8/5)^d}\right]^{2/3} t^{*-\alpha}\right\}^{-1} = (t_0/t^*)^{-\alpha}$$

$$(19)\quad t_0 = \left[\frac{x}{0{,}69\, K J_s^{1/2}\left[\frac{2\varphi D}{(8/5)^d}\right]^{2/3}}\right]^{-1/\alpha}$$

$$(21)\quad q_{max} = 0{,}69 \cdot \bar{Q}_{max} \cdot K J_s^{1/2} \left[\frac{2\varphi D}{(8/5)^d}\right]^{5/3} t^{*5(1-d)/3}.$$

$$(22)\quad q_0 = 0{,}69 \cdot K J_s^{1/2} \left[\frac{2\varphi D t_0^{1-d}}{(8/5)^d}\right]^{5/3}$$

$3600^{1/4}) = 0{,}009\ ms^{-1/4}$, also $[2\varphi D/(8/5)^d] = [2 \cdot 0{,}3 \cdot 0{,}009/(8/5)^{3/4}] = 0{,}0038\ ms^{-1/4}$.

Nach Gleichung (19) ergibt sich $t_0 = [3000/(0{,}69 \cdot 15 \cdot 0{,}34^{1/2} \cdot 0{,}0038^{2/3})]^{1/(5/3-1/2)} = 4945\ s = 1{,}37\ h$. Nach Gleichung (22) wird weiter $q_0 = 0{,}69 \cdot 15 \cdot 0{,}34^{1/2} \cdot (0{,}0038 \cdot 4945^{1/4})^{5/3} = 0{,}0193\ m^2s^{-1}$.

Der maximal mögliche Abfluss für eine Kaskade

Unter Berücksichtigung von Gleichung (13) folgt nach Elimination von $\bar{X}$ durch Gleichung (18) direkt Gleichung (21). Diese kann unter Zuhilfenahme von Gleichung (22) zu

$$(23)\quad q_{max} = q_0 \tau^{-5(1+\alpha)/2} \cdot \mathrm{Tanh}(\tau^\alpha)$$

geschrieben werden mit

$$(24)\quad \alpha = \frac{2d}{3} - \frac{5}{3}.$$

In Gleichung (23) lässt sich nun der Einfluss der Regendauer auf den Ausfluss aus dem Einzugsgebiet einfach verfolgen. Im speziellen unterliegt der maximal mögli$\partial\tau^2 < 0$. Aus einmaligem Differenzieren resultiert die implizite Relation $\tau(\alpha)$

$$(25)\quad \frac{5(1+\alpha)}{2\alpha} \cdot \frac{\mathrm{Tanh}(\tau^\alpha) \cdot \mathrm{Cosh}^2(\tau^\alpha)}{\tau^\alpha} = 1.$$

Wie sich durch nochmalige Differentiation nachweisen lässt, entspricht der in Gleichung (25) ermittelte Wert $\tau = \tau_{ext}$ der Zeit, die q_{max}/q_0 maximalisiert. $\tau_{ext}(\alpha)$ ist in Bild 7 graphisch dargestellt. Im Bereich $0<d<0{,}9$ gilt die Approximation

$$(26)\quad \tau_{ext} = \left[\frac{3}{2}\left(\frac{2\alpha}{5(1+\alpha)} - 1\right)\right]^{1/2\alpha} \left[1 + \frac{d^2}{3}\right].$$

Ist also einmal die Neigung der Geraden $\bar{r}(t_r)$ im doppelt-logarithmischen Diagramm nach [8] bekannt, so lässt sich unmittelbar τ_{ext} berechnen.

Beispiel 4

Nach Beispiel 3 ist $d = 0{,}75$, also $\alpha = (2/3)(3/4) - (5/3) = -7/6$ nach Gleichung (24), womit $\tau_{ext} =$

$$\left[\frac{3}{2}\left(\frac{-2 \cdot 7/6}{5(1-7/6)} - 1\right)\right]^{-3/7} [1 + 0{,}75^2/3] = 0{,}776$$

nach Gleichung (26). Der exakte Wert nach Gleichung (25) ist $\tau_{ext} = 0{,}766$ (−1,3%).

Der maximal mögliche Ausfluss aus der hydrologischen Kaskade ergibt sich nun durch Einsetzen von Gleichung (26) in Gleichung (23). Der dimensionslose Ausdruck

$$(27)\quad M = q_{ext}/q_0$$

hängt lediglich von d, bzw. α nach Gleichung (24) ab und ist in Bild 8 dargestellt. Diese Funktion nimmt für $d = 0{,}57$ den Minimalwert $M = 0{,}762$ an.

Nach Gleichung (14) folgt für die zugehörige Steigzeit des Hydrogramms

$$(28)\quad t_{ext}/t_0 = 1{,}1\,\tau_{ext} + 0{,}276\,\tau_{ext}^{2(d-1)/3}.$$

Beispiel 5

Mit $\tau_{ext} = 0{,}766$ nach Beispiel 4 ergibt sich $M = 0{,}766^{0{,}42} \cdot \mathrm{Tanh}(1{,}36) = 0{,}79$, also mit q_0 nach Beispiel 3 für $q_{ext} = 0{,}0193 \cdot 0{,}79 = 0{,}0152\ m^2s^{-1}$. Mit $t_0 = 1{,}37$ h nach Beispiel 3 wird $t^* = 0{,}766 \cdot 1{,}37 = 1{,}05$ h nach Gleichung (20), also $t_r = (8/5) \cdot 1{,}05 = 1{,}68$ h. Die zugehörige Regenintensität ist nach Gleichung (1) $\bar{r}_{ext} = 70/1{,}68^{3/4} = 47{,}5\ mmh^{-1}$.

Für die Steigzeit ergibt sich nach Gleichung (28) $t_{ext}/t_0 = 1{,}1 \cdot 0{,}766 + 0{,}276 \cdot 0{,}766^{-1/6} = 1{,}13$, also $t_{ext} = 1{,}13 \cdot 1{,}37 = 1{,}55$ h.

Der maximal mögliche Abfluss für zwei Kaskaden

Der Maximalausfluss $\hat{q}_{ext}$ aus dem Einzugsgebiet bestehend aus zwei hydrologischen Kaskaden hängt lediglich von X_1 und χ nach der Gleichung (16) ab.

Da χ unabhängig von der Regencharakteristik ist, muss in der folgenden Rechnung lediglich der Einfluss von X_1 berücksichtigt werden. In Analogie zu Gleichung (19) betrage die typische Zeit bezüglich der ersten Kaskade

$$(29)\quad t_{01} = \left[\frac{X_1}{0{,}69\,K_1 J_{s1}^{1/2} \left[\frac{2\varphi D}{(8/5)^d}\right]^{2/3}}\right]^{-1/\alpha}.$$

Die in [2] eingeführte Hilfsfunktion

$$(30)\quad \Phi_i = \frac{\mathrm{Tanh}(X_i/0{,}69)}{(X_i/0{,}69)}$$

mit i als Indizes für die betrachtete Kaskade wird dann

$$(31)\quad \Phi_i = \frac{\mathrm{Tanh}(\tau_i^\alpha)}{\tau_i^\alpha}.$$

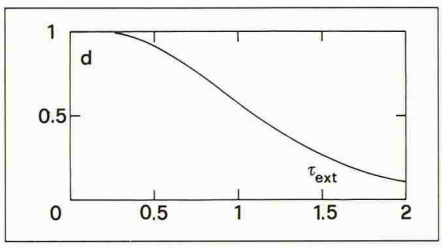

Bild 7. Dimensionslose Regendauer τ_{ext} in Abhängigkeit von d nach Gleichung (25), die zum maximal möglichen Abfluss in einer hydrologischen Kaskade führt

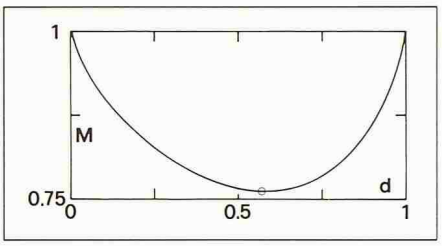

Bild 8. Maximal möglicher Ausfluss $M = q_{ext}/q_0$ in Abhängigkeit der Regencharakteristik d

Für den in Gleichung (17) eingeführten maximalen, dimensionslosen Ausfluss $\hat{q}$ aus dem Einzugsgebiet gilt [2]

$$(32)\quad \hat{q}_2 = \Phi_1(X_1) \cdot \Phi_2(X_2)$$

wobei $X_2 = X_2(\chi, X_1)$.

Wie bereits aus Beispiel 2 hervorgegangen und auch allgemeiner gezeigt werden kann, ist der Kaskadenparameter χ im Normalfall sehr klein; asymptotisch wird $\chi \to 0$. Dann folgt $X_2 = 0$ [3], also $\Phi_2 = \Phi_2(\tau \to 0) = 1$ nach Gleichung (31), womit $\hat{q}_2 = \Phi_1(X_1)$, oder nach Gleichung (30)

$$(33)\quad \hat{q}_2 = \frac{\mathrm{Tanh}(\tau_1^\alpha)}{\tau_1^\alpha}.$$

Für den maximalen Ausfluss gilt also $q_{max,2} = \hat{q}_2 \cdot p_1^* A_1/b_1$ nach Gleichung (17), womit $\bar{Q}_{max,2} = \hat{q}_2 \cdot \bar{p}^* A$ mit A als Oberfläche des gesamten Einzugsgebietes, siehe dazu Kapitel über das hydrologische Ersatzsystem.

Eliminiert man p_1^* mit Gleichung (5), so wird

$$(34)\quad \hat{Q}_{max,2} = \frac{2\varphi DA}{(8t^*/5)^d} \cdot \frac{\mathrm{Tanh}(\tau^\alpha)}{\tau^\alpha} = \frac{2\varphi DA}{(8t_{01}/5)^d} \cdot \frac{\mathrm{Tanh}(\tau^\alpha)}{\tau^{5/2(1+\alpha)}}.$$

Identifiziert man nun

$$(35)\quad q_{01} = \frac{2\varphi DA}{(8t_{01}/5)^d}$$

als modifizierten typischen Durchfluss, so folgt die Identität mit Gleichung (23). Alle weiteren Resultate, insbesondere die Gleichungen (27, 28), lassen

$$(38)\quad q_{ext} = (7/9)\, q_0 = 0{,}535 \cdot K J_s^{1/2} \left[\frac{2\varphi D t_0^{1-d}}{(8/5)^d} \right]^{5/3}$$

$$(39)\quad q_{ext} = 0{,}535\, K J_s^{1/2} \left[\frac{2\varphi D}{(8/5)^d} \right]^{5/3} \left[\frac{x}{0{,}69 \cdot K J_s^{1/2} \left[\frac{2\varphi D}{(8/5)^d} \right]^{2/3}} \right]^{\frac{5(1-d)}{5-2d}}.$$

$$(40a)\quad q_{ext} = 1{,}066 x^{5/11} \cdot (\varphi D)^{15/11} \cdot (K J_s^{1/2})^{6/11}, \quad d = 2/3$$

$$(40b)\quad q_{ext} = 0{,}997 x^{5/14} \cdot (\varphi D)^{10/7} \cdot (K J_s^{1/2})^{9/14}, \quad d = 3/4$$

$$(40c)\quad q_{ext} = 0{,}926 x^{1/4} \cdot (\varphi D)^{3/2} \cdot (K J_s^{1/2})^{3/4}, \quad d = 5/6$$

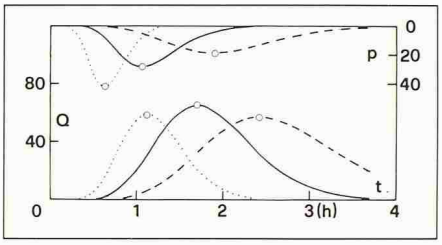

Bild 9. Netto-Hyetogramme p(t) (oben mit p [mmh⁻¹]) und zugehörige Hydrogramme Q(t) mit Q [m³ s⁻¹] nach Beispiel 7 für (...) t_r = 1 h; (—) t_r = 1,71 h und (---) t_r = 3 h

sich somit bezüglich des maximal möglichen Durchflusses nach 2 Kaskaden übernehmen.

Mit $X_2(\chi = 0) = 0$ wird [3]

$$(36)\quad t_{max,2}/t_1^* = 1{,}1\,[1{,}1 + 0{,}4\, X_1],$$

also mit den Gleichungen (14, 28)

$$(37)\quad t_{ext,2}/t_{01} = 1{,}1\,[1{,}1\, \tau_{ext} + 0{,}276\, \tau_{ext}^{2/3(d-1)}] = 1{,}21\, \tau_{ext}\,[1 + (1/4)\, \tau_{ext}^{\alpha}].$$

Eine hydrologische Kaskade

In der Schweiz variiert der Parameter d mit wenigen Ausnahmen im Bereich $0{,}56 < d < 0{,}85$, womit $0{,}77 < M < 0{,}80$ nach Bild 8. Als Mittelwert gilt deshalb $\bar{M} = 7/9$, womit nach Gleichung (22) für q_{ext} Gleichung (38) folgt (siehe Kästchen). Einsetzen von Gleichung (19) ergibt dann Gleichung (39) (siehe Kästchen). Für verschiedene Werte d folgt weiter die Gleichung (40a, b, c) (siehe Kästchen).

Der maximal mögliche Ausfluss aus einer Kaskade setzt sich demnach aus drei Einflusstermen zusammen. Der erste bezieht sich auf die Länge x, im Mittel gilt $q_{ext} \sim x^{1/3}$. Der zweite berücksichtigt den Nettoregen; als Mittelwert kann $q_{ext} \sim (\varphi D)^{1.4}$ angegeben werden. Der dritte Faktor schliesslich schliesst das Gefälle und das Rauhigkeitsverhalten der Ebene ein; der Mittelwert folgt der Funktion $q_{ext} \sim (K J_s^{1/2})^{2/3}$.

Aus dieser Diskussion der einzelnen Einflussfaktoren geht eindeutig hervor, dass die Topographie und Geometrie sowie das Rauhigkeitsverhalten der Ebene einen untergeordneten Einfluss auf q_{ext} besitzen. Eine Schätzung von beispielsweise K auf ±10% ergibt lediglich ±7% Abweichung bezüglich q_{ext}. Hingegen ist der Einfluss des Nettoregens ganz entscheidend. Sowohl die möglichst gute Wahl der massgebenden Regenstation und die Fixierung der Wiederkehrperiode (D) als auch die Schätzung von φ sind von markantem Einfluss. Eine Schätzung von beispielsweise φ auf ±10% ergibt bereits ±15% Abweichungen bezüglich q_{ext}.

Beispiel 6

Mit x = 3000 m, φ = 0,3, d = 3/4, D = 70 mmh$^{-1/4}$ = 0,009 ms$^{-1/4}$, K = 15 m$^{1/3}$s^{-1}, J_s = 0,34 folgt aus Gleichung (40b) für $q_{ext} = 0{,}997 \cdot 3000^{5/14}\,(0{,}3 \cdot 0{,}009)^{10/7}\,(15 \cdot 0{,}34^{1/2})^{9/14} = 0{,}0152$ m^{2}s^{-1}, entsprechend dem Wert nach Beispiel 5.

Zwei hydrologische Kaskaden

Mit dem im vorhergehenden Kapitel angenommenen Mittelwert $\bar{M} = 7/9$ folgt, nach Berücksichtigung von Gleichung (19), für $\hat{Q}_{ext,2}$ die Gleichung (41) (siehe Kästchen). In Analogie zu den Gleichungen (40) folgen die Gleichungen (42a, b, c) (siehe Kästchen).

Die Annahme $\chi \to 0$ führt somit auf Resultate bezüglich des maximal möglichen Ausflusses, die identisch mit denjenigen einer Einzel-Kaskade sind. Der Bach übt dann keine Dämpfungserscheinungen aus. Falls χ die Grössenordnung von Eins besitzt, müssen die Gleichung (41, 42) entsprechend modifiziert werden. Dieser Fall tritt auf, falls

- das Einzugsgebiet lang und schmal ist ($x_2 \gg x_1$),
- der Bach relativ breit ist,
- die Rauhigkeit von Terrain und Bach etwa gleich sind,
- das Gefälle der Talflanken sehr viel grösser als das des Baches ist.

Nach Bild 5 ist jedoch der maximale, relative Ausfluss $\hat{q}$ bei fixierter Länge X_1 der massgebenden Talflanke für χ = 0 maximal. Die Gleichung (42) gibt deshalb Werte an, die bemessungstechnisch auf der «sicheren Seite» liegen. Gemessen an den Unsicherheiten bezüglich des Nettoregens (φD) dürfte der Einfluss von χ auf $\hat{q}$ gering sein.

Beispiel 7

Man berechne den maximal möglichen Ausfluss, dessen Eingabeparameter bezüglich Einzugsgebiet in Beispiel 2 gegeben sind. Als Nettoregen liege der Verlauf nach Beispiel 3 vor.

1. Eingabeparameter Einzugsgebiet

$x_1 = \bar{x}_1$ = 3000 m, $K_1 = \bar{K}_1$ = 15 m$^{1/3}$ s^{-1}, $J_{s1} = \bar{J}_{s1}$ = 0,34, x_2 = 2150 m, K_2 = 22 m$^{1/3}$s^{-1}, J_{s2} = 0,02.

Die Oberfläche des Einzugsgebietes ist $A = (x_1 + \bar{x}_1) x_2 = 6000 \cdot 2150 = 12{,}9 \cdot 10^6$ m^2. Nach Beispiel 2 ist χ = 0,03 «1, das vorliegende Berechnungsverfahren lässt sich somit anwenden.

$$(41)\quad \hat{Q}_{ext,2} = \frac{7}{9} \cdot \frac{2\varphi D A}{(8 t_{01}/5)^d} = \frac{14}{9} \cdot \frac{\varphi D A}{(8/5)^d} \cdot \left\{ \frac{1}{x_1} 0{,}69 K_1 J_{s1}^{1/2} \left[\frac{2\varphi D}{(8/5)^d} \right]^{2/3} \right\}^{\frac{3d}{5-2d}}$$

$$(42a)\quad Q_{ext,2} = 1{,}066\, A \cdot x_1^{-6/11} \cdot (\varphi D)^{15/11} \cdot (K_1 J_{s1}^{1/2})^{6/11}, \quad d = 2/3$$

$$(42b)\quad Q_{ext,2} = 0{,}997\, A \cdot x_1^{-9/14} \cdot (\varphi D)^{10/7} \cdot (K_1 J_{s1}^{1/2})^{9/14}, \quad d = 3/4$$

$$(42c)\quad Q_{ext,2} = 0{,}926\, A \cdot x_1^{-3/4} \cdot (\varphi D)^{3/2} \cdot (K_1 J_{s1}^{1/2})^{3/4} \quad d = 5/6$$

Literatur

[1] *Dracos, T.*: «Hydrologie», Springer-Verlag, Wien-New York, 1980

[2] *Hager, W. H.*: «Analysis of non-linear rainfall-runoff process», J. Nordic Hydrology, Vol. 16 (1985) 291–308

[3] *Hager, W. H.*: «Der nicht-lineare Regen-Oberflächenabfluss», Wasserwirtschaft, Vol. 76 (1986) 7/8, 334–339

[4] *Hager, W. H., Sinniger, R.*: «Die Beeinflussung der Speicherretention durch den Netto-Niederschlag», Schweizer Ingenieur und Architekt, 104 (1986) 48, 1241–1248

[5] *Hager, W. H., Sinniger, R.*: «Reservoir Storage effect on design flood», Commission Internationale des Grands Barrages, 16e Congrès, Q. 63, R. 80, 1375–1399, San Francisco, 1988

[6] *Raudkivi, A. J.*: «Hydrology», Pergamon-Press, Oxford-New York, 1979

[7] *Vischer, D., Huber, A.*: «Wasserbau», Springer, Wien-New York, 1982

[8] *Zeller, J., Geiger, H., Roethlisberger, G.*: «Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes», Eidg. Anstalt forstliches Versuchswesen, Vol. I–VI, Birmensdorf, 1976 ff.

2. Eingabeparameter Nettoregen

$w = 100$ Jahre, $D = 70\ \mathrm{mmh^{-1/4}} = 0{,}009\ \mathrm{ms^{-1/4}}$, $d = 3/4$, $\varphi = 0{,}3$ also auch den Gleichungen (19, 24, 26), siehe Beispiele 3 und 4, $t_{01} = 4945$ s, $\tau_{ext} = 0{,}776$, $\alpha = -7/6$, womit $\tau^{\alpha} = 1{,}344$.

3. Maximal möglicher Ausfluss

Für $d = 3/4$ folgt mit Gleichung (42b) $Q_{ext,2} = 0{,}997 \cdot 12{,}9 \cdot 10^6 \cdot 3000^{-9/14} (0{,}3 \cdot 0{,}009)^{10/7} \cdot (15 \cdot 0{,}34^{1/2})^{9/14} = 64{,}8\ \mathrm{m^3s^{-1}}$.

Als zugehörige Steigzeit gilt nach Gleichung (37) $t_{ext,2}/t_{01} = 1{,}21 \cdot 0{,}776[1 + 0{,}25 \cdot 1{,}344] = 1{,}24$, also $t_{ext,2} = 1{,}24 \cdot 4945 = 6120$s $= 1{,}7$ h. Das resultierende Hydrogramm berechnet sich schliesslich durch Anwendung der Gleichung (14). Bild 9 zeigt die Lösung.

Mit $\tau = \tau_{ext} = 0{,}776$ und $t_0 = 4945$s wird $t^* = \tau \cdot t_0 = 3840$s $= 1{,}07$ h. Die massgebende Niederschlagsdauer beträgt demnach $t_r = (8/5) \cdot 1{,}07 = 1{,}71$ h, womit $\bar{r} = D/t_r^d = 46{,}9\ \mathrm{mmh^{-1}}$. Das massgebende Netto-Hyetogramm, charakterisiert durch $(p^*, t^*) = (28{,}1\ \mathrm{mmh^{-1}}, 1{,}07\ \mathrm{h})$, ist ebenfalls in Bild 9 eingetragen.

Weiter in Bild 9 gezeichnet sind Netto-Hyetogramme und zugehörige Hydrogramme für $t_r = 1$ h und $t_r = 3$ h. Daraus ist ersichtlich, das zwar das Abflussvolumen mit zunehmender Regendauer t_r zunimmt, dass jedoch die Abflussspitze den Maximalwert für $t_r = 1{,}71$ h annimmt.

Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Untersuchung wird durch Extremalanalyse dasjenige Regenereignis ermittelt, welches bei vorgegebener Regencharakteristik und bekanntem Einzugsgebiet zum maximal möglichen Abfluss führt. Ausgehend von einem vereinfachten hydrologischen Modell sowie einem Ersatz-Nettohyetogramm werden vorerst Beziehungen abgeleitet, die die direkte Ermittlung des resultierenden Hydrogramms am Ausfluss des Einzugsgebietes erlauben.

Für ein geographisch fixiertes Einzugsgebiet und eine angenommene Wiederkehrperiode wird der maximal mögliche Oberflächen-Abfluss dann in Abhängigkeit der variablen Niederschlagsdauer ermittelt. Die wesentlichen Resultate sind graphisch ausgewertet, womit eine direkte Anwendung auf Probleme der Praxis sichergestellt ist. Die Berechnungsmethode wird schrittweise durch Beispiele erklärt.

Adresse des Verfassers: Dr. sc. tech., dipl. Bauing. ETH, *W. H. Hager*, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL - DGC, 1015 Lausanne.

Feststofftransport durch Grundwasserströmung

Bautechnische Auswirkungen

Bautechnische Eingriffe bewirken oft Strömungsveränderungen im Grundwasser, was unter Umständen zu einem unerwünschten Feststofftransport führen kann (Erosion, Suffosion, Kolmatation, hydraulischer Grundbruch). Das kann Setzungen oder Verstopfungen von Böden oder sogar den Zusammenbruch von Bauwerken zur Folge haben. Bei grösseren Bauwerken, wie beispielsweise bei Staudämmen, ist die Vermeidung solcher Auswirkungen erstes Gebot. Aber auch bei Tiefbauarbeiten kleineren Massstabs können, wie nachfolgende Beispiele zeigen, bedeutende Schäden eintreten. Empfehlungen zur Vorabklärung und für Massnahmen bei Tiefbauprojekten sollen helfen, solche Schäden zu vermeiden.

Der Ingenieur ist oft gezwungen, Strassen, Kanalisationen, Wohn- und Gewerbebauten in Gelände zu planen, das

SIA-KOMMISSION FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND WASSERTECHNIK

wegen seiner heiklen Untergrundverhältnisse bisher gemieden wurde.

Eine der Schwierigkeiten ist der Wassergehalt des Bodens. In solchem Gelände können bereits unbedeutende Eingriffe oder Belastungsveränderungen Grundwasserflüsse erzeugen oder ändern. Die neue Wasserströmung vermag feste Teile des Untergrundes zu transportieren, d.h. sie von einem Orte wegzuschwemmen und anderswo anzulagern. Das kann die geotechnischen Eigenschaften des Bodens radikal ändern, das heisst, feste Böden verlieren ihre Tragfähigkeit und durchlässige Böden verstopfen.

Feststofftransport durch Wasserströmungen im Untergrund kann auch bei kleineren Bauten grosse Schäden auslösen. Deshalb hat die SIA-Kommission für die Wasserwissenschaft und Wassertechnik eine Schrift verfasst, die es dem Ingenieur ermöglichen soll, diese Phänomene kennenzulernen.

Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass nur aufgrund der Klassifikation der Böden keine Voraussage über die möglicherweise auftretenden Probleme gemacht werden kann. Bereits in der Projektierungsphase eines Bauobjektes gehört es zur Sorgfaltspflicht des Ingenieurs, Architekten usw., ausser den geotechnischen Bodeneigenschaften auch die Grundwasserverhältnisse mittels Sondierungen und entsprechenden Versuchen abzuklären.

Der Ingenieur ist verpflichtet, den Bauherrn von der Notwendigkeit dieser Voruntersuchungen zu überzeugen und darauf hinzuweisen, dass Sparen in dieser Phase falsch ist und dass im Falle eines Schadens weit höhere Kosten entstehen können.

Im folgenden soll ein Einblick in die Problematik gegeben werden, damit man sich der Schwierigkeiten bewusst wird. Er beschränkt sich auf die bei der Strömung von neutralem Grundwasser möglichen Erscheinungen und klammert chemische und bakteriologische Wirkungen aus, welche die Schäden noch verschlimmern können.

Beispiele

Kanalisationsrohre in feinsandigen Böden

Phase I: Die Verlegung der Leitung erfolgt fachgerecht auf einer Magerbetonsohle. Die Arbeitsfugen der Betonsohle sind stark durchlässig.

Phase II: Nach einigen Jahren werden die Rohrverbindungen undicht, und das austretende Abwasser (Schmutzwasser, Fremdwasser, Grundwasser) bewirkt eine Ausspülung des sandigen Untergrundes unter der Magerbetonschicht.

Phase III: Bei starken Niederschlägen ist das Kanalisationsrohr fast gefüllt und auch die austretende Abwassermenge erhöht. Der Abfluss ausserhalb des Rohres beginnt sich bemerkbar zu