

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 107 (1989)  
**Heft:** 22

**Artikel:** Abflussmaximum aus kleinen Einzugsgebieten  
**Autor:** Hager, Willi H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-77112>

#### **Nutzungsbedingungen**

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

#### **Conditions d'utilisation**

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

#### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://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 Spitzendurchflusses und eventuelle Verzögerungerscheinungen beantworten sowie das Abflussvolumen bestimmen. Ein Ausfluss-Hydrogramm eines Einzugsgebietes wird massgeblich durch das Zusammenwirken zweier Einzelkomponenten beeinflusst. Einer-

seits 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, evapotransportiert, bleibt auf Oberflächenunebenheiten liegen oder haftet an Pflanzen. Den einfachsten Zusammenhang zwischen den beiden Niederschlagsfraktionen schafft der Volumen-Abflussbeiwert  $\varphi$ , gibt er doch das Verhältnis zwischen gesamtem Oberflächen-Abflussvolumen und totalem Brutto-Niederschlagsvolumen an [6]. Da sich hydrologische Berechnungen haupt-

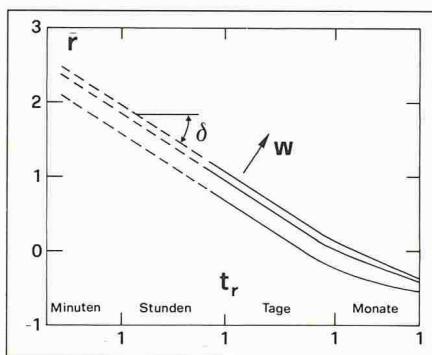


Bild 1. Typische Niederschlagsintensitäts-Regendauer-Kurven für verschiedene Wiederkehrperioden  $w$  [8] (doppelt logarithmische Auftragung)

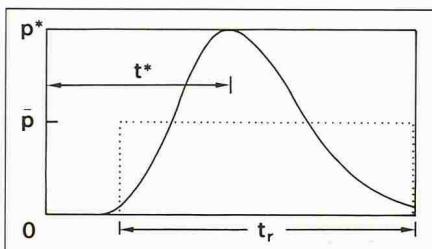


Bild 2. Netto-Hyetogramm, als (...) Blockregen und (—)  $P(T)$  nach Gleichung (3) für  $m = 10$  [3]

#### Bezeichnungen

Verschiedene Bezeichnungen können mit den Indizes «<sub>1</sub>» und «<sub>2</sub>» vorkommen und beziehen sich dann auf die erste und zweite hydrologische Kaskade. Gestrichene Größen wie  $\bar{r}$  deuten auf Mittelwerte, während Zeichen wie  $\bar{Q}$  auf dimensionsbehaftete Terme schliessen lassen. Indizes «<sub>m</sub>» 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.

$A$ [ $m^2$ ]	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
$J_r$ [-]	Reibungsgefälle
$K$ [ $m^{1/3}s^{-1}$ ]	Reibungswert nach der Formel von Strickler
$m$ [-]	Hyetogramm-Formparameter
$M$ [-]	relativer, maximal möglicher Abfluss
$p$ [ $ms^{-1}$ ]	Netto-Niederschlagsintensität
$P$ [-]	$P = p/p^*$
$q$ [ $m^2s^{-1}$ ]	Durchfluss pro Einheitsbreite
$Q$ [ $m^3s^{-1}$ ]	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
$\alpha$ [-]	Substitution nach Gleichung (24)
$\delta$ [-]	Neigung der Intensitätsdauerkurve
$\varphi$ [-]	Abflusskoeffizient
$\chi$ [-]	Kaskadenparameter
$\Phi$ [-]	Hilfsfunktion
$\tau$ [-]	normierte Zeit

sächlich auf die Oberflächen-Abfluss spitze konzentrieren, definiert man den Spitzen-Abflussbeiwert  $\varphi_s$  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 Evapotranspiration vernachlässigbar). Im folgenden werden die Hauptegenschaften des Brutto- und Netto-Niederschlages diskutiert, um anschliessend die Abflussverhältnisse zu erläutern.

system einer Geschwindigkeit [ $ms^{-1}$ ]. Wird für  $t_r$  als Einheit die Stunde gewählt, so ergibt sich für das Niederschlagsmass  $D$  [ $mm \cdot s^{d-1}$ ], 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 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  $50 km^2$  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

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

darstellen.  $\bar{r}$  besitzt die Dimension [mm/h], entspricht also im SI-Mass-

#### Der Netto-Niederschlag

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

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

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

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

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]

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

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

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  $p(t \rightarrow \infty) = 0$  zu fallen.

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

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

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

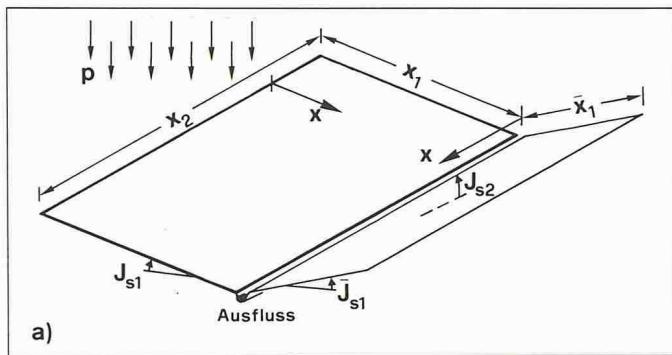
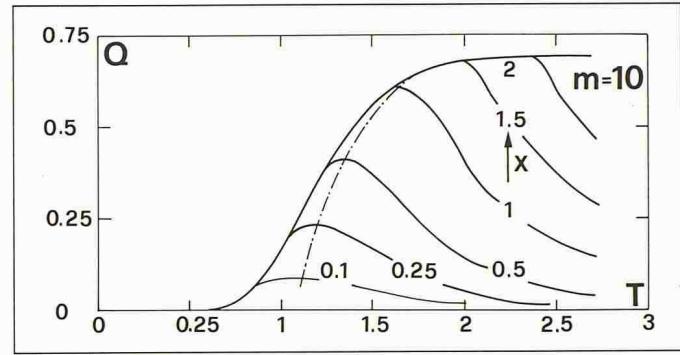


Bild 3. Geometrie des Ersatz-Einzugsgebietes

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

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

nach den Gl. (4 a+b). Eliminiert man  $p^*$  durch Gl. (5), so folgt  $H_r = \varphi D / (8t^*/5)^{d-1}$ . Für fixierte Werte ( $\varphi D$ ) und für  $d = 1$  ( $\delta = 45^\circ$ ) 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.

### 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

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

$$(8) \quad J_s = J_f,$$

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 rauen Oberflächencharakters gilt somit das Gesetz von Manning-Strickler

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

Unter Einführung der dimensionslosen Parameter

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Weiter folgt für die zugehörige Steigzeit des Hydrogramms

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

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]

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

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

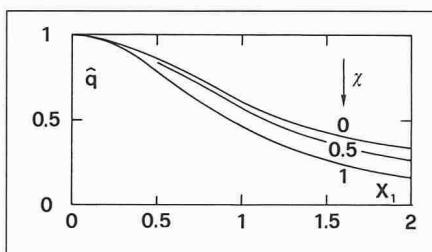


Bild 5. Relativer maximaler Ausfluss aus dem Einzugsgebiet  $\hat{q}$  in Abhängigkeit von  $X_1$  und  $\chi$

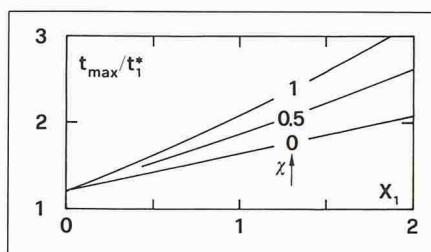


Bild 6. Relative Steigzeit  $t_{\max,2}/t^*$  des Hydrogramms am Ausfluss des Einzugsgebietes in Abhängigkeit von  $X_1$  und  $\chi$

### Beispiel 1

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

#### 1. Eingabeparameter

Nettoregen:  $p^* = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ ,  $t^* = 4500 \text{ s}$ ,  $m = 10$ . Oberfläche:  $x_1 = 3000 \text{ m}$ ,  $J_{s1} = 0,34$ ,  $K = 15 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ .

#### 2. Dimensionslose Abflusscharakteristik

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

#### 3. Das Ausfluss-Hydrogramm

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

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

## 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

bestimmtes Regenereignis, charakterisiert durch  $(p^*, t^* \text{ und } m = 10)$  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  $(K, x_1, J_s)$  auf  $\hat{Q}_{\ext}$  führt. Dieser Frage soll im folgenden nachgegangen werden, und zwar sowohl für eine wie auch für zwei hydrologische Kaskaden.

## Typische Kenngroßen

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  $\alpha$  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  $\hat{Q}$  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  $\tau$  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 ( $\varphi$ ) und dem Einzugsgebiet ( $x, K, J_s$ ) ab.

### Beispiel 3

Für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren betrage  $D = 70 \text{ mmh}^{-1/4}$  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  $D = 70/(1000 \cdot$

## Der extremste Ausfluss

Die in den vorhergehenden Kapiteln hergeleiteten Ausdrücke für den Ausfluss aus dem Einzugsgebiet setzen ein

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

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

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

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

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

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

Nach Gleichung (22) wird weiter  $q_0 = 0,69 \cdot 15 \cdot 0,34^{1/2} \cdot (0,0038 \cdot 4945^{1/4})^{5/3} = 0,0193 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ .

### 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

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

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 mögliche  $\tau^2 < 0$ . Aus einmaligem Differenzieren resultiert die implizite Relation  $\tau(\alpha)$

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

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

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

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

#### Beispiel 4

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

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

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

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

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

hängt lediglich von  $d$ , bzw.  $\alpha$  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

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

#### Beispiel 5

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

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

### Der maximal mögliche Abfluss für zwei Kaskaden

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

Da  $\chi$  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

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

Die in [2] eingeführte Hilfsfunktion

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

mit  $i$  als Indizes für die betrachtete Kaskade wird dann

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

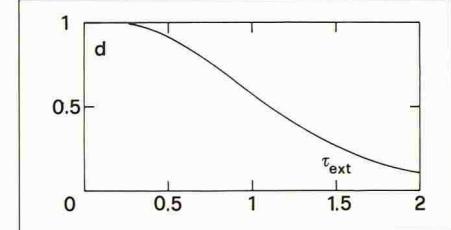


Bild 7. Dimensionslose Regendauer  $\tau_{\text{ext}}$  in Abhängigkeit von  $d$  nach Gleichung (25), die zum maximal möglichen Abfluss in einer hydrologischen Kaskade führt

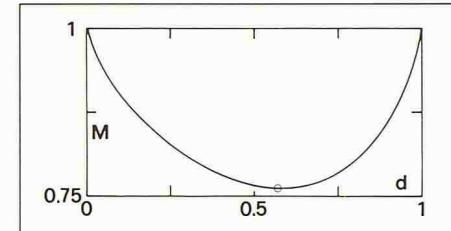


Bild 8. Maximal möglicher Ausfluss  $M = q_{\text{ext}}/q_0$  in Abhängigkeit der Regencharakteristik  $d$

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  $\chi$  im Normalfall sehr klein; asymptotisch wird  $\chi \rightarrow 0$ . Dann folgt  $X_2 = 0$  [3], also  $\Phi_2 = \Phi_2(\tau \rightarrow 0) = 1$  nach Gleichung (31), womit  $\hat{q}_2 = \Phi_1(X_1)$ , oder nach Gleichung (30)

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

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

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

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

Identifiziert man nun

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

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

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

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

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

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

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

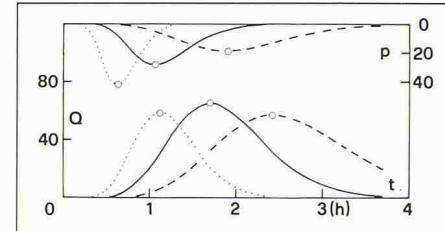


Bild 9. Netto-Hyetogramme  $p(t)$  (oben mit  $p$  [ $\text{mmh}^{-1}$ ]) und zugehörige Hydrogramme  $Q(t)$  mit  $Q$  [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] nach Beispiel 7 für (...)  $t_r = 1\text{h}$ ; (—)  $t_r = 1,71\text{h}$  und (---)  $t_r = 3\text{h}$

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

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

$$(36) \quad t_{\max, 2} / t_0^* = 1,1 [1,1 + 0,4 X_1],$$

also mit den Gleichungen (14, 28)

$$(37) \quad t_{ext, 2} / t_0 = \\ = 1,1 [1,1 \tau_{ext} + 0,276 \tau_{ext}^{2/3(d-1)}] = \\ = 1,21 \tau_{ext} [1 + (1/4) \tau_{ext}^a].$$

dass die Topographie und Geometrie sowie das Rauhigkeitsverhalten der Ebene einen untergeordneten Einfluss auf  $q_{ext}$  besitzen. Eine Schätzung von beispielsweise  $K$  auf  $\pm 10\%$  ergibt lediglich  $\pm 7\%$  Abweichung bezüglich  $q_{ext}$ . Hingegen ist der Einfluss des Nettoregenschlags ganz entscheidend. Sowohl die möglichst gute Wahl der massgebenden Regenstation und die Fixierung der Wiederkehrperiode ( $D$ ) als auch die Schätzung von  $\phi$  sind von markantem Einfluss. Eine Schätzung von beispielsweise  $\phi$  auf  $\pm 10\%$  ergibt bereits  $\pm 15\%$  Abweichungen bezüglich  $q_{ext}$ .

### Beispiel 6

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

## 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  $M = 7/9$ , 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  $q_{ext} \sim (\phi D)^{1/4}$  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,

## Zwei hydrologische Kaskaden

Mit dem im vorhergehenden Kapitel angenommenen Mittelwert  $M = 7/9$  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  $\chi \rightarrow 0$  führt somit auf Resultate bezüglich des maximal möglichen Ausflusses, die identisch mit denjenigen einer Einzel-Kaskade sind. Der Bach übt dann keine Dämpfungsscheinungen aus. Falls  $\chi$  die Grössenordnung von Eins besitzt, müssen die Gleichung (41, 42) entsprechend modifiziert werden. Dieser Fall tritt auf, falls

$$(41) \quad \hat{Q}_{ext, 2} = \frac{7}{9} \cdot \frac{2\phi D A}{(8 t_0/5)^d} = \frac{14}{9} \cdot \frac{\phi D A}{(8/5)^d} \cdot \left\{ \frac{1}{x_1} 0,69 K J_s^{1/2} \left[ \frac{2\phi D}{(8/5)^d} \right]^{2/3} \right\}^{\frac{3d}{5-2d}}$$

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

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

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

## 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., Simniger, R.: «Die Beeinflussung der Speicherretention durch den Netto-Niederschlag», Schweizer Ingenieur und Architekt, 104 (1986) 48, 1241–1248
- [5] Hager, W. H., Simniger, 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 fürstliches Versuchswesen, Vol. I–VI, Birmensdorf, 1976 ff.

## 2. Eingabeparameter Nettoregen

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

## 3. Maximal möglicher Ausfluss

Für  $d = 3/4$  folgt mit Gleichung (42b)  $Q_{\text{ext},2} = 0,997 \cdot 12,9 \cdot 10^6 \cdot 3000^{-9/14} (0,3 \cdot 0,009)^{10/7} \cdot (15 \cdot 0,341^{-2})^{9/14} = 64,8 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ .

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

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

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

mittlung 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 Gewerbegebäuden in Gelände zu planen, das

dern, 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 Wasser technik 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 Grundwasser verhältnisse 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 Magerbeton schicht.

**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

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 wegzuversetzen und anderswo anzu lagern. Das kann die geotechnischen Eigenschaften des Bodens radikal än-