

Zeitschrift:	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural
Herausgeber:	Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)
Band:	78 (1980)
Heft:	3: 125 Jahre ETH Zürich : Sonderheft Institut für Kulturtechnik
Artikel:	Zur Berechnung von Hochwassern kleiner Einzugsgebiete aus dem Niederschlag
Autor:	Storchenegger, I.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-230143

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: 15.01.2026

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

[13] *Ewald, K.*: Der Landschaftswandel, zur Veränderung schweizerischer Kulturlandschaften im 20. Jahrhundert, Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf; Bericht Nr. 191 vom Dezember 1978.

[14] z.B. *Aarg. Verwaltungsgericht*: Versuch einer Methodik zur Beurteilung von Landschaftsveränderungen, vorgestellt anlässlich eines landschaftsökologischen Seminars vom 10. Januar 1980 am ORL-Institut ETHZ durch Dr. iur. P. Gysi, Dr. sc. nat. R. Maurer und Dr. iur. Th. Pfisterer, erarbeitet unter Mitwirkung von weiteren Juristen aus verschiedenen Kantonen. Noch nicht publiziert.

[15] S.a.: Schweizerische Bauzeitung, 96. Jahrgang, Heft 47, vom 23. November 1978; Planen und Bauen in der Kulturlandschaft, Weiterbildungskurs des aargauischen Baudepartementes in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich.

[16] *Chervet, A., Flury, U., Schmid, J., Winkler, G.*: Planen und Bauen in der Kulturlandschaft, Fachexkursion von Praktikern und Wissenschaftlern aus der Schweiz nach Bayern. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 51-52/1979.

[17] In diesem Zusammenhang wäre auf die Publikationen *Tanner, E., Gmür, V., Schibli, E., Ursprung, J., Braschler, H. und Weidmann, Th.* ab ca. 1950 bis in die neuere Zeit hinzuweisen.

[18] S.a. Schriftenreihe für Flurbereinigung, Sonderheft: Das neue Flurbereinigungsgesetz. Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup 1976.

[19] *Strössner, G.*: Flurbereinigungsrecht für Bayern, hier Novelle zum Flurbereinigungsgesetz in: Berichte aus der Flurbereinigung 27/1977, herausgegeben vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Abteilung ländliche Neuordnung durch Flurbereinigung.

[20] *Schweizerischer Bundesrat*: Fünfter Bericht über die Lage der schweizerischen Landwirtschaft und die Agrarpolitik des Bundes vom 22. Dezember 1976, EDMZ Bern.

[21] z.B. *Regierungsrat des Kantons Aargau*: Agrarpolitisches Leitbild für den Kanton, Botschaft an den Grossen Rat vom 8. März 1976.

[22] z.B. *Gemeindeverband Surselva*, Kanton Graubünden: Entwicklungskonzept der Region Surselva aus dem Jahr 1975.

[23] u.a. gestützt auf [8] und auf *Wanner, W.*: Güterzusammenlegung und Landschaftsplanung, Arbeit NDS-ORL/ETHZ, Polykopie, Zürich 1979, sowie auf *Jeker, R.*: Güterzusammenlegung – ein Realisierungsinstrument der regionalen Wirtschaftsförderung, erscheint 1980.

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr. Ulrich Flury, Institut für Kulturtechnik, Abteilung Planung und Strukturverbesserung, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich

Zur Berechnung von Hochwassern kleiner Einzugsgebiete aus dem Niederschlag

I. Storchenegger

Es ist naheliegend, Hochwasser aus ihrem hauptsächlichen Verursacher, dem Niederschlag, zu berechnen. Die physikalischen Zusammenhänge sind aber sehr komplex, so dass man die Berechnung nicht ohne grosse Vereinfachung auf sie abstützen kann. Vereinfachungen dieser Art stellen die linearen, zeitinvarianten Niederschlag-Abfluss-Modelle dar. Ihre einfachsten Varianten lassen sich auch ohne Grosscomputer durchrechnen. Der Beitrag will ihren grundsätzlichen Aufbau darlegen, Hinweise für den Rechenweg geben und auf beachtenswerte Randbedingungen aufmerksam machen. Auf rein statistische Verfahren, wie etwa die (Gradex-Methode), wird nicht eingegangen.

Il est presque évident que l'on estime les crues par leur cause principale, c'est-à-dire à partir des précipitations. Mais les relations physiques sont très complexes, ce qui demande de fortes simplifications des calculs, avant que l'on puisse se baser sur ces précipitations. Les modèles pluie – débit linéaires et affines répondent à de telles simplifications. L'application des plus simples de ces modèles ne demande pas l'engagement de gros ordinateurs. Cet article démontre leurs structures fondamentales, donne quelques indications pour le calcul et rend attentif à certaines conditions marginales à considérer.

1. Allgemeines über Modelle

Die Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen (N-A-Modellen) ist eine der vielen Möglichkeiten, Hochwasser zu berechnen. Sie bietet sich vor allem dann an, wenn es gilt, nicht nur die *Abflussspitze* (m^3/s) und/oder die *Abflussfülle* (Abflusssumme in m^3) zu berechnen, sondern nach der ganzen Abflussganglinie gefragt wird. Der Artikel will einige allgemeine Aspekte dieser Modelle aufzeigen, ganz einfache Teilmodelle kurz beschreiben und auf einige Anwendungsmöglichkeiten hinweisen. Hinsichtlich der modell- und systemtheoretischen Rechtfertigung der Modelle sei auf die Literatur verwiesen [6].

Der Begriff Modell steht in enger Beziehung zu den Begriffen Vereinfachung, Verkleinerung und Stellvertretung. Der Ingenieur benutzt die Modelle denn auch meist als Stellvertreter der Natur im Labor, im Rechenautomat oder einfach als Gedankenmodell. Modelle vertreten die Natur und vereinfachen sie meist auch auf das, was in der Fragestellung unmittelbar von Bedeutung ist.

Viele Probleme lassen sich mit einfachen Modellen und ohne Computer lösen. Als Beispiel gelte das Laufzeit-Verfahren und andere anerkannte Formeln der Hochwasserberechnung. Sie alle gründen auf hydrologischen Modellen, seien es nun stochastische oder

deterministische. Irrtümlicherweise betrachtet man in der Hydrologie aber oft nur jene Verfahren als Modelle, welche den zeitlichen Ablauf hydrologischer Prozesse wiederzugeben versuchen. Aber selbst unter diesen gibt es so einfache, dass sie ohne Grosscomputer bewältigt werden können. Zudem nimmt die Leistungsfähigkeit der Taschenrechner in erstaunlichem Tempo zu.

Diese Modelle der Abfluss-Simulation wurden durch die Arbeiten von Sherman und Horton eingeführt. Viele in der folgenden Zeit entstandene Modelle haben mit der eigentlichen Hydrologie nicht viel zu tun, sondern sind über die Systemtheorie zur Hydrologie gekom-

men. Diese besagt, dass der Prozess der Umwandlung einer *Eingangsgrösse* (in der Hydrologie der Niederschlag) in einem *System* (Einzugsgebiet) zur *Ausgangsgrösse* (Abfluss) durch mathematische Formelwerke nachmodelliert werden kann. Um die den Prozessen innewohnenden physikalischen Gesetze braucht man sich bei dieser Betrachtungsweise nicht zu kümmern. Sie werden deshalb auch *Black-Box-Modelle* genannt. Um den Bezug dieser Modelle zur hydrologischen Wirklichkeit herzustellen, müssen sie geeicht werden. Diesen Vorgang nennt man in der Modellhydrologie *Analyse* des Niederschlag-Abfluss-Ereignisses. Wird dann mittels des geeichten Modells ein Bemessungshochwasser berechnet, so heisst diese Arbeit *Synthese*. Im weiteren werden wir das Wort Modell für jede auch noch so einfache gedankliche Abstraktion der Wirklichkeit gebrauchen, um dem Begriff ein wenig den Mythos zu nehmen.

Die Analyse der Ereignisse ist arbeitsintensiv und erfordert seine Zeit, bis sich die erforderliche Anzahl Ereignisse in der Natur abspielen. Ebenso ist der Rechenaufwand viel grösser als bei der Anwendung einfacher Formeln. Sah man noch vor wenigen Jahren die Anwendung der Modelle nur zusammen mit dem Computer, so zeigten sich in den letzten Jahren doch auch Möglichkeiten, sie mit dem Taschenrechner zu bewältigen. Der Arbeitsausschuss 6.3 des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) hat in den letzten Jahren eine Arbeitsanleitung erstellt, worin die Berechnung anhand einfacher Rechenmittel eingehend erläutert wird. Er hat auch eine Reihe von Gebietsparametern für die einzelnen Teilmodelle gesammelt, so dass man bei fehlenden Messungen auf diese zurückgreifen kann. Obwohl in der Schweiz oft andere Verhältnisse massgebend sind, kann die Arbeitsanleitung auch hier sehr empfohlen werden. Sie ist zur Zeit wohl das für die Praxis geeignete deutschsprachige Werk über N-A-Modelle [2].

2. Elemente eines einfachen Niederschlag-Abfluss-Modells

2.1 Grundsätzliche Modell-Vorstellung

Es kommt selten vor, dass bei einem Niederschlagsereignis die gesamte gefallene Regenmenge kurz danach abfließt. Ein Teil verdunstet sogleich. Je nach dem Wassergehalt des Bodens und der Benetzung der Boden- und der Pflanzenoberfläche werden mehr oder weniger umfangreiche Wassermengen auf diesen festgehalten (Interzeption). Bei den meisten Regenfällen ist die Regenmenge ausreichend, um noch

einen Anteil durch Versickerung in die tieferen Bodenschichten eindringen zu lassen. Von da fliesst das Wasser mit Verzögerung in die Oberflächengewässer, wo es den sogenannten *Basisabfluss* bildet. Der Anteil des Niederschlags, welcher sogleich ins Gewässer gelangt, heisst *abflusswirksamer Niederschlag*. Er streut sehr stark, von wenigen Bruchteilen bis fast zur gesamten Menge des am Boden auftreffenden Regens. Er ist es, der, im Gerinne als *direkter Abfluss* bezeichnet, die Wasserführung der Flüsse zu Hochwassern ansteigen lässt. Für die Berechnung der Hochwasser ist daher die Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlages wichtig. Modelle, welche diesen berechnen, heissen Modelle der *Abflussbildung*.

Der zum Abfluss gelangende abflusswirksame Niederschlag läuft je nach Beschaffenheit und Gefälle des Geländes und der Sammelgerinne als direkter Abfluss schnell und massiert bis langsam und gedämpft ab. Diesen Aspekt der Hochwasserbildung untersuchen die *Abflusskonzentrations*-Modelle. Weil Niederschlag, Abflussbildung und Abflusskonzentration Teile des Niederschlag-Abfluss-Geschehens darstellen, sollen deren Modelle künftig Teilmodelle genannt werden. Alle weiteren Ausführungen werden auf dem dargestellten einfachen Modellansatz beruhen. Er ist schematisch auch in der Abbildung 1 verdeutlicht.

Eine eingehendere Schilderung des Niederschlag-Abfluss-Geschehens, welche auf die tatsächlichen Verhältnisse eher eingeht, findet sich bei Zeller [14]. Einfache Modellansätze sind aber durchaus vertretbar. Dies belegt die Untersuchung von Naef [9], welche unter anderem ergab, dass die Genauigkeit der komplizierteren Modelle nicht im Ausmass des erforderlichen Mehraufwandes steigt. Interessenten

komplizierter Modelle seien die Arbeiten von Köhler [6] und Dyck [7] empfohlen.

Der Einsatz der Teilmodelle erfordert je nach Analyse oder Synthese verschiedene Überlegungen. Auch können die einzelnen Teilmodelle nicht in beliebigen Kombinationen eingesetzt werden. Diesen Fragen wird denn im folgenden die Aufmerksamkeit geschenkt. Für die einzelnen Schritte des Rechenweges sei auf die Arbeitsanleitung des DVWK [2] verwiesen.

2.2 Niederschlag

Der Niederschlag ist die Eingangsgröße der N-A-Modelle. Bei der Analyse eines N-A-Ereignisses sieht man sich mit dem Problem konfrontiert, dass man höchstens an einigen Stationen mit verschwindend kleinen Auffangflächen den Niederschlag des Gebietes gemessen hat (Punktmessungen). Dies bedingt sogleich weitere Modellvorstellungen darüber, wie nun der *Gebietsniederschlag* daraus zu extrapolieren sei. Dazu stellen wir uns vor, dass die Niederschlagshöhen punktweise über der Karte des Einzugsgebietes eingetragen seien und dadurch über der Kartenebene eine Fläche aufspannen. Die Modelle unterscheiden sich nun im wesentlichen nur in den Vorstellungen über diesen Flächenverlauf [8]. Dazu seien die einfachsten Annahmen kurz vorgestellt:

- Die Niederschläge sind grundsätzlich gleich verteilt, bilden also eine horizontale Ebene über dem Einzugsgebiet. Die Abweichungen der einzelnen Stationen sind rein zufälliger Art. Folglich ist das *arithmetische Mittel* der wahrscheinlichste Wert des Gebietsniederschlags.
- Der Punktniederschlag entspricht in der näheren Umgebung der Station dem Gebietsniederschlag dieser Umgebung. Er bildet hier ebenso eine waag-

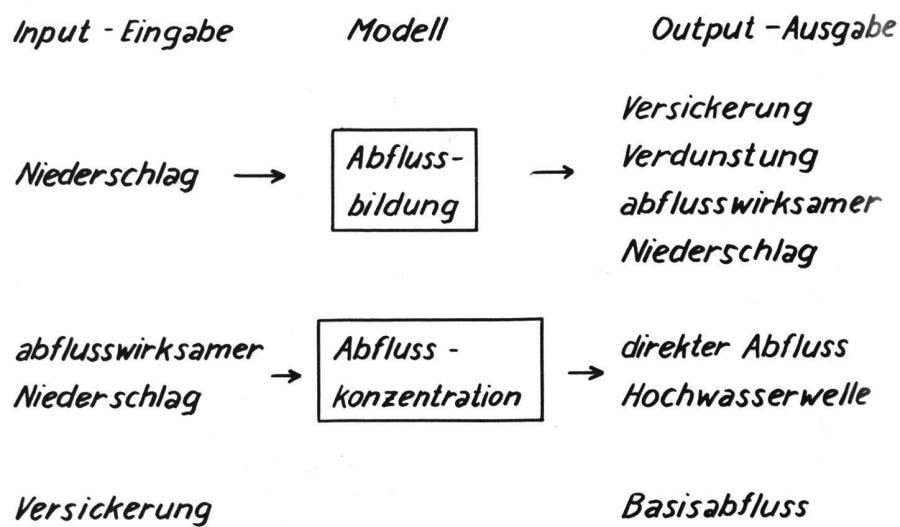


Abb.1 Schematische Übersicht der Modell-Vorstellung betreffend das Niederschlag-Abfluss-Geschehen.

rechte Ebene. Bleibt noch die Frage, was man als nähere Umgebung der Station bezeichnen will. Ein Vorschlag stammt von Horton, ist aber in der Literatur unter dem Namen *Thiessens* bekannt und nebst dem arithmetischen Mittel wohl am weitesten verbreitet. Er ist mit Beispiel in [2] beschrieben. Die den Stationen zugesprochenen Flächen werden als Gewichte den Stationsniederschlägen zugewiesen; man bildet daraus das *Gewichtsmittel* als Gebietsniederschlag auf die ganze Einzugsgebietsfläche.

c) Der Niederschlag verändert sich zwischen den Stationen linear. Die Niederschlagshöhen dreier Stationen spannen also eine schiefe Ebene über dem *Dreieck der Stationen* auf [1]. Legt man nun noch lotrechte Ebenen durch die Seiten des Stationsdreiecks, so entspricht das Volumen des so gebildeten prismatischen Körpers dem Niederschlag auf das Stations-Dreieck. Sind die Koordinaten der Stationen gegeben, so lassen sich die Niederschlagshöhen zu jedem weiteren Koordinatenpaar rechnen nach der Formel:

$$N_{xy} = a + bx + cy$$

Die drei Unbekannten a, b und c erhält man aus den drei Gleichungen für die Dreiecks-Stationen. Bei Rechnung mit Determinanten ergeben sie sich aus:

$$a = \frac{D_a}{D} \quad b = \frac{D_b}{D} \quad c = \frac{D_c}{D}$$

wobei D allein durch die Koordinaten gegeben ist. Den Gebietsniederschlag beliebiger Flächen erhält man, indem man nach obiger Formel die Niederschlagshöhe im Flächenschwerpunkt berechnet. Ist man in der glücklichen aber seltenen Lage, mehr als drei Stationen zur Verfügung zu haben, kann man mehrere Dreiecke bilden und aus deren Schwerpunktsniederschlägen den Gebietsniederschlag des ganzen Einzugsgebietes als Gewichtsmittel bilden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es leicht auch auf Taschenrechnern zu programmieren ist, und kann vor allem dann empfohlen werden, wenn man es mit vielen verschiedenen Einzugsgebieten zu tun hat (Abb. 2).

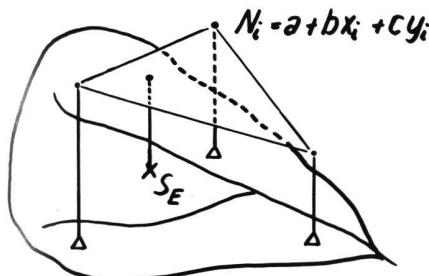


Abb. 2 Aus dem Niederschlag dreier Messstationen lässt sich die Niederschlags-Ebene über dem Einzugsgebiet berechnen. Gebietsniederschlag = Niederschlagshöhe im Schwerpunkt des Einzugsgebietes.

d) Erfahrene Meteorologen interpolieren den Niederschlagsverlauf mehr oder weniger genau zwischen die gemessenen Stationen hinein. Die Verteilung wird durch *Isohyeten*, Linien gleichen Niederschlags, dargestellt. Der Gebietsniederschlag wird durch Planimetrieren der Flächen zwischen den Isohyeten bestimmt. Das Verfahren ist nicht ganz frei von subjektiven Anschaulungen, erfordert einen relativ hohen Aufwand und bringt für die N-A-Modelle wegen anderer Unsicherheiten keine wesentliche Erhöhung der Genauigkeit.

Je nach verwendetem Abflussbildungs- und Abflusskonzentrations-Modell muss nun das Gebietsmittel für jeden Zeitschritt berechnet werden. Der Gesichtspunkt des Rechenaufwandes muss also ebenso berücksichtigt werden wie die zur Verfügung stehenden Rechenmittel. Die Probleme der Synthese liegen anders. Der Niederschlag gilt als Zufallsvariable, deren Extremwerte nun gefragt sind. Die der Eichung zur Verfügung stehenden Ereignisse genügen wegen der beschränkten Anzahl für eine Extremwertstatistik nicht. So ist man meist gezwungen, auf die Extremwerte einer vergleichbaren Station zu greifen. Für die Vergleichbarkeit lassen sich aber noch keine definitiven Richtlinien angeben. Es kann höchstens empfohlen werden, eine nahe Station auf ungefähr gleicher Höhe und vergleichbarer Zugrichtung des Windes zu wählen.

Vorausgesetzt, es bestehe bereits eine Extremwertstatistik oder es werde eine solche nach konventioneller Methode erstellt, so liefert diese Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Punktniederschlägen vorgegebener Niederschlagsdauer. Über die zeitliche wie auch örtliche Verteilung wird nichts ausgesagt. Extreme *Punktniederschläge* dürfen aber nicht ohne weiteres auf beliebig grosse Flächen extrapoliert werden, wie Draschoff [3] für das deutsche Küstengebiet zeigt. Nach ihm müssen solche Niederschläge mit zunehmender Fläche abgemindert werden. Es ist indes noch nicht geklärt, wie der Punktniederschlag einer Talstation in einem gebirgigen Einzugsgebiet extrapoliert, also erhöht oder abgemindert werden soll. Das Problem spielt in kleinen Einzugsgebieten eine untergeordnete Rolle und soll hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt sein.

Wichtiger ist die zeitliche Verteilung der Intensität während des Bemessungsergebnisses. Darüber sind Annahmen zu treffen, da eine gleichmässige Verteilung zu eindeutig niedrigeren Hochwasserspitzen führt als etwa eine Dreiecksverteilung. Wo man dabei die Spitze der Intensität annimmt, hat auf die Hochwasserwelle nicht mehr einen so grossen Einfluss. Hingegen ist darauf zu achten, dass einerseits die Intensität nirgends grösser sein darf, als es die Statistik in den entsprechenden Intervallen zulässt, und dass andererseits die dem Gesamtintervall zustehende Summe nicht überschritten wird. In [2] sind denn auch konkrete Vorschläge für die prozentuale Verteilung der Niederschläge zu finden.

Schliesslich bleibt noch darauf hinzuweisen, dass Hochwasser auch aus *Schneeschmelze* entstehen können. Diese *«Niederschläge»* erscheinen in keiner Statistik. Die Bedeutung dieser Niederschläge wird immer wieder mit



Abb. 3 Drei Hochwasser, grossteils aus Schneeschmelze entstanden, haben ein völlig neues Bachbett im Schwemmkegel ausgehoben. Vallatscha, Münstertal, 1977.

dem Hinweis heruntergespielt, reine Schmelzhochwasser gäbe es nicht. Abbildung 3 zeigt aber die Folgen dreier Hochwasser, von denen das erste gänzlich ohne Niederschlag und das letzte aus Niederschlag und Schneeschmelze zustande kam, wobei der Niederschlag fünf Tage vor dem Hochwasser fiel. Das verheerende Hochwasser selbst kam an einem niederschlagsfreien Tag (Abb. 3).

Will man vor dem Schlimmsten gewappnet sein und rechtfertigt die Bedeutung des Bauwerkes die hohen Investitionen, so beherzige man Zellers Diagramm der Welt- und Schweizer Rekorde für Niederschläge [14].

2.3 Abflussbildung

Diese Teilmodelle lassen sich in zwei Hauptgruppen aufteilen: *Verlustraten* und *Abflussbeiwerte*.

Bei den Verlustraten geht man davon aus, dass ungeachtet der Niederschlagshöhe in jedem Intervall eine bestimmte Menge (Rate) für den direkten Abfluss verloren geht (Versickerung). Diese Verlustrate kann selbstverständlich nie höher als der Niederschlag im Intervall sein.

Die Abflussbeiwerte (Abflusskoeffizienten) besagen, dass immer ein prozentualer Anteil des je Zeitintervall gefallenen Niederschlags abfließt.

Sowohl Abflussbeiwert wie auch Verlustrate werden zeitlich konstant oder variabel angenommen. Um aber den tatsächlichen Verhältnissen eher gerecht zu werden, zieht man zu Niederschlagsbeginn einen sogenannten Anfangsverlust der Größenordnung von 3 mm ab. Damit sollen die Benetzungs- und Muldenverluste abgedeckt werden.

Bei der Analyse werden nun die Parameter des gewählten Ansatzes bestimmt. Der Abflussbeiwert wird bewährterweise durch die *koaxiale graphische Darstellung* analysiert [4] und [10]. Dieses Verfahren setzt die Abflusssumme in eine Beziehung zur Jahreszeit (Wochenummer), zur Niederschlagshöhe, zur Niederschlagsdauer und zum Vorregen (Vorgeschichte).

Gute Resultate erhält man mit dem zeitlich variierenden Abflussbeiwert. Die Analyse besteht darin, dass man die Beiwerte gegen die Dauer der Niederschläge aufträgt. Bei der Synthese setzt man nun die Beiwerte in der gefundenen Zeitabhängigkeit während des Ereignisses ein [9].

Die Analyse der Verlustraten erfordert mehr Aufwand, da sie für jedes Ereignis iterativ erfolgt [2]. Die Iteration wird erst abgebrochen, wenn die Summe der abflusswirksamen Niederschläge mit der Summe des direkten Abflusses übereinstimmt. Dabei kommt bereits eine konstante Verlustrate der Wirklichkeitssimulation [1].

keit näher als ein konstanter Abflussbeiwert. Abbildung 4 zeigt die Auswirkung verschiedener Ansätze der Abflussbildung. Die Summe des abflusswirksamen Niederschlags ist in beiden Fällen gleich. Die Abflusskonzentration wurde unabhängig vom zeitlichen Verlauf des abflusswirksamen Niederschlages durch das Summenlinien-Verfahren (siehe unten) analysiert. Die Unterschiede der synthetischen Abflussganglinien beruhen also allein auf den unterschiedlichen Annahmen über die Abflussbildung (Abb. 4).

Die Synthese der Abflussbildung bleibt so lange einfach, als es gilt, bereits abgelaufene Ereignisse nachzurechnen. Schwierigkeiten entstehen beim Be-

rechnen eines Bemessungshochwassers mit vorgeschriebenem *Wiederkehrintervall* (Jährlichkeit). Es gilt dann, irgendeine der vielen möglichen Kombinationen von zufälligen Parametern zu wählen, welche die gewünschte Jährlichkeit ergibt. Bei Dyck [4] findet sich eine Liste von Abflussbeiwerten mit zugehöriger Jährlichkeit. Es wird aber nichts darüber ausgesagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie gemeinsam mit einem Niederschlag gleicher Jährlichkeit auftreten oder wie die Jährlichkeit des Niederschlages sein muss, um zusammen mit dem Abflussbeiwert die gefragte Hochwasser-Jährlichkeit zu bewirken. Auch beziehen sich die Werte auf Gebiete grösser als 200 km^2 .

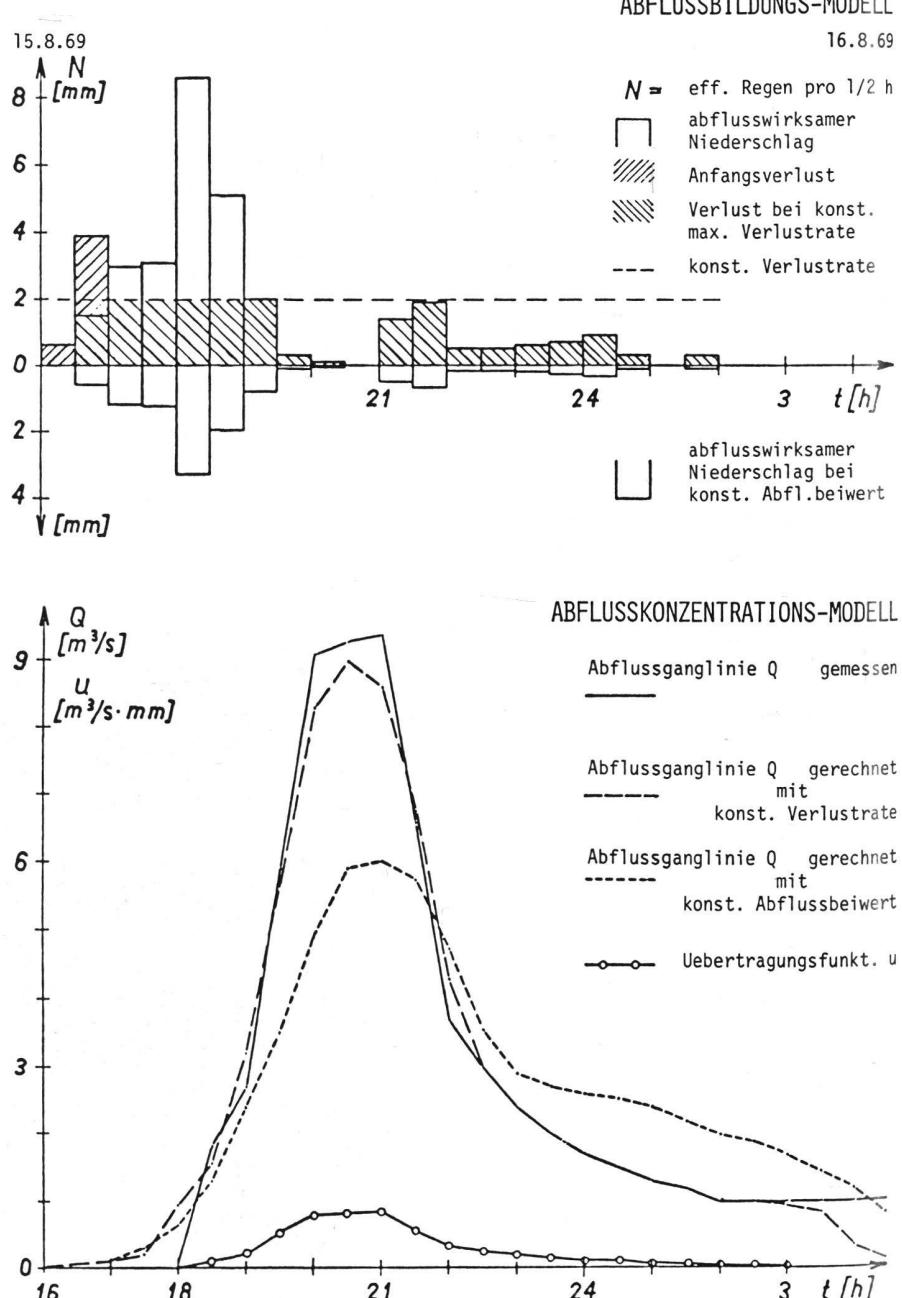


Abb. 4 Unterschied der Abflussbildung aus konstanter Verlustrate und konstantem Abflusskoeffizienten, bei gleicher Übertragungsfunktion aus dem Summenlinien-Verfahren.

2.4 Abflusskonzentration

Die *linearen, zeitinvarianten Modelle* der Abflusskonzentration sind wegen ihrer Einfachheit und Zuverlässigkeit sehr beliebt. Sie beruhen auf systemtheoretischen Überlegungen. Nach ihr wird, wie eingangs erwähnt, eine Eingabe (Belastung oder Input) I durch das System auf irgendeine Art in eine Ausgabe (Antwort oder Output) A umgewandelt. Dabei wird angenommen, die Gesetzmässigkeit der Umformung für beliebige Belastungen sei hinreichend beschrieben durch die Ausgabe, welche aus der Belastung durch einen Einheitsimpuls der Dauer Δt resultiert. Diese Ausgabe auf die Einheitsbelastung wird denn auch wegen ihrer Bedeutung *Impulsantwort* oder *Übertragungsfunktion* $w(\Delta t, t)$ genannt und hat die Dimension einer reziproken Zeit (z.B. $1/h$). Ist der Einheitsimpuls eine Niederschlagseinheit, so wird die Übertragungsfunktion zur *Einheitsganglinie* $u(\Delta t, t)$. Ihre Dimensionen sind Niederschlagshöhe je Zeiteinheit oder Abflussvolumen je Zeit- und Niederschlagseinheit.

Zeitinvariant bezeichnet man die Modelle darum, weil $u(\Delta t, t)$ sich während des Vorganges nicht ändert. Linearität bedeutet, dass die Ordinaten von $u(\Delta t, t)$ proportional zur Belastung I in Δt wachsen, die zeitliche Erstreckung aber wegen der Zeitinvarianz erhalten bleibt. Aus Linearität und Zeitinvarianz ergibt sich, dass das Superpositionsprinzip anwendbar ist. Dies besagt, dass die gemäss dem aktuellen Stand von I proportional überhöhten Funktionswerte der Übertragungsfunktion, um die entsprechende Zeit verschoben, einander überlagert werden dürfen. Mit andern Worten, das Hochwasser ist die Überlagerung von Einzelwellen, welche das Ergebnis aus den Niederschlägen in den einzelnen Zeitintervallen sind. Von den linearen zeitinvarianten Modellen seien zwei besonders einfache kurz vorgestellt.

2.4.1 Das Isochronen-Verfahren mit Zeit-Flächen-Diagramm

Dieses Modell ist aus dem Laufzeit-Verfahren entstanden, wurde also nicht aus rein systemtheoretischen Überlegungen abgeleitet, sondern beruht auf folgender Überlegung: Kennt man die Anlaufszeit des Niederschlages aus den einzelnen Flächenelementen und kennt man auch die Summe dF der Flächenelemente, deren Niederschlag gleichzeitig beim beobachteten Gerinnequerschnitt eintrifft, trägt nun Zeit und dazugehörigen Flächenanteil dF/F kontinuierlich gegeneinander auf, so erhält man ein *Zeit-Flächen-Diagramm*. Es entspricht der Übertragungsfunktion eines Einzugsgebietes ohne Speicherwirkung. Denkt man sich einen Niederschlag der Höhe 1 (Einheitsimpuls) in unendlich kurzer Zeit $\Delta t \rightarrow 0$ auf das Gebiet gefallen, so erhält man nach Multiplikation der Übertragungsfunktion $w(\Delta t, t)$ mit diesem Niederschlag die *Momentan-Einheitsganglinie* $u(\Delta t, t)$, in der englischen Literatur *Instantaneous Unit Hydrograph* genannt. Oft multipliziert man die Einheitsganglinie noch mit der Fläche, um die bequemere Dimension $m^3/s \cdot mm$ zu erhalten.

In der Praxis arbeitet man nicht mit diesen infinitesimalen Werten, sondern man unterteilt die Anlaufszeit des entferntesten Flächenelementes in eine bestimmte Anzahl gleicher Zeitschritte und ordnet diesen Zeitschritten die Flächenanteile zu [2]. Linien gleicher Anlaufszeit heißen *Isochronen*. Das detaillierte Vorgehen ist in [2] beschrieben.

In der Analyse gilt es vorerst, die *Anlaufszeit* als Zeitabstand zwischen dem Schwerpunkt des abflusswirksamen Niederschlags und der Abfluss spitze zu bestimmen. Benutzt man den einen Vorteil des Zeit-Flächen-Diagramms, wonach Abflussbeiwerte der entwässerten Flächen miteinbezogen werden können, so folgt nun das *Pröbeln* mit den verschiedenen Ansätzen, in der Fachsprache Parameteroptimierung genannt. Auf die gleiche Art und Weise kann auch eine unterschiedliche Überregnung eingeführt werden. Diese beiden zusätzlichen Informationen über das System sollen aber nur eingeführt werden, wenn die Angaben auch zeitinvariant bleiben. Sonst verlässt man die Theorie der zeitinvarianten Modelle und arbeitet dann mit dem *Abflusskonzentrations-Diagramm*. In [2] wird empfohlen, dem Zeitflächendiagramm noch einen *linearen Speicher* nachzuschalten. Darauf kann in der Schweiz weitgehend verzichtet werden, es sei denn, im Einzugsgebiet lägen ausgedehnte Grundwasserspeicher, welche mit den Oberflächengewässern in Verbindung stehen. In den übrigen Gebieten ist die Speicherwirkung bei N-A-Ereignissen sehr gering.

Ein besonderer Vorteil des Modells liegt aber darin, dass es auch ohne Analyse gemessener Ereignisse angewandt werden kann; dann allerdings mit der entsprechend grösseren Unsicherheit behaftet. Denn es gibt eine ganze Reihe von Formeln, mittels derer man die Anlaufszeit aus topographischen Werten berechnen kann, wie Widmoser zeigt [13]. Das Modell leistet auch dann gute Dienste, wenn es gilt, die Auswirkungen zu erwartender Veränderungen in den Abflussbeiwerten einzelner Teilflächen (Überbauung, Kahlschlag usw.) abzuschätzen. Auch hier ist die Zuverlässigkeit des Modells natürlich höher, wenn der bestehende Zustand analysiert werden kann.

Wegen der genannten Vorteile und besonders, weil man sich eine Genauigkeitssteigerung durch den Bezug der Karte statt durch eine Erhöhung des Messaufwandes im Felde verspricht, geniesst das Verfahren in der Forschung des Instituts für Kulturtechnik (IfK) besonderes Interesse [12].

2.4.2 Das Summenlinien-Verfahren

Die Abflussganglinie eines Hochwassers wird mit der Abflusssumme dividiert und dann als Summenlinie aufgetragen. Die so erhaltene Summenlinie wird nun, um den für die Berechnung gewählten Zeitschritt Δt verschoben, nochmals aufgetragen. An beliebigen Stützpunkten t werden nun die $u(\Delta t, t)$ als Differenz zwischen den Summenlinien herausgegriffen. Der Rechenaufwand ist gering. Fast alle Werte können graphisch bestimmt werden. Über die Verteilung der abflusswirksamen Niederschläge muss man keine Angaben machen. In unseren steilen, rasch reagierenden Einzugsgebieten sollte man mit diesem Verfahren allerdings nur *schöne* Hochwasser analysieren. Denn bei mehrgipfligen Wellen aus zeitlich stark variierenden Niederschlägen ergeben sich Einheitsganglinien, welche zu stark vom aktuellen zeitlichen Verlauf des Ereignisses geprägt sind. Das Verfahren wird oft auch benutzt, um eine Übertragungsfunktion $u(\Delta t, t)$ in eine solche der Form $u(\Delta t, t)$ überzuführen.

2.5 Basisabfluss

Dieser Anteil hat in den meisten Fällen nur unbedeutenden Einfluss auf die Hochwasser unserer kleinen Einzugsgebiete, da er, gemessen an der Hochwasserspitze, selten mehr als ein bis zwei Prozente ausmacht. Er kann darum meist vernachlässigt werden, und in der Analyse wird er in der Ganglinie meist durch eine Gerade vom eigentlichen Hochwasserabfluss abgetrennt. Sollte er aufgrund besonderer Verhältnisse einen grösseren Anteil ausmachen, so wird er am ehesten durch einen linearen Speicher simuliert [2]. Das könnte etwa der Fall sein, wenn ein Rückhaltebecken zu dimensionieren ist und der Schmelzwasseranteil bei einem Frühlingsregen als Basisabfluss eingeführt wird. Denn dabei würde ein langandauernder und relativ hoher Basisabfluss eine Summe ergeben, welche berücksichtigt werden muss. Zur Berechnung des Schmelzwasser-Anteils siehe Martinec [7].

3. Anwendungsbereich und Anwendungshilfen

Wie bei andern Berechnungsmethoden entscheidet auch bei den N-A-Modellen einerseits das Verhältnis Aufwand-Nutzen, anderseits das vorhandene Datenmaterial, ob ihr Einsatz gerechtfertigt

bzw. möglich ist oder nicht. Weiter gilt es zu beachten, was die N-A-Modelle gegenüber etwa den rein stochastischen Modellen zu leisten vermögen. Ihnen gegenüber schneiden die N-A-Modelle bezüglich Aussagekraft über das Wiederkehrsintervall (Jährlichkeit) der berechneten Hochwasser bedeutend schlechter ab, es sei denn, dass Ereignisse über eine sehr lange Zeit analysiert werden könnten. Um genügende diesbezügliche Aussagekraft der N-A-Modelle zu erhalten, müsste nebst der Jährlichkeit der eingesetzten Niederschläge auch die bedingte Wahrscheinlichkeit des Abflussbeiwertes bekannt sein. Bis anhin hat man sich damit beholfen, für grosse Wiederkehrsintervalle erfahrungsgemäss grosse Abflusskoeffizienten einzusetzen. Für Probleme, welche einen höheren Rechenaufwand rechtfertigen, hat man aus den vorliegenden Messungen mit den Modellen künstliche Abflussreihen erzeugt und anhand von ihnen Aussagen über die gewünschten Wahrscheinlichkeiten gewonnen. Denn gerade bei der Speicherdimensionierung stammt das Hochwasser mit z-jährlicher Spitze nicht gezwungen genermassen vom gleichen Niederschlag, welcher die z-jährliche Abflusssumme erzeugt, und beide brauchen nicht von einem z-jährlichen Niederschlag zu stammen. Die Berechnung von Speichern aber dürfte auch bei uns eine häufigere Aufgabe werden. Denn aus Gründen des Naturschutzes und der Finanzen wird man auch hier die aus zunehmender Überbauung gestiegenen Hochwasser der Bäche nicht

mehr nur durch deren Ausbetonieren (Erhöhen der hydraulischen Leistungsfähigkeit) abfangen dürfen, sondern eben durch Rückhalteräume. Im Zusammenhang mit dem Bau der Nordumfahrung Zürichs sind denn bereits zwei derartige Anlagen vorgesehen. Zuverlässigkeit und vor allem auch Objektivität der berechneten Hochwasserwahrscheinlichkeit wird aber vermehrt auch dort gefordert, wo die Berechnung der Hochwasser Einfluss auf die Abgrenzung von Gefahrenzonen und somit rechtlich verbindliche – aber auch anfechtbare – Konsequenzen hat. Die Anwendung der N-A-Modelle empfiehlt sich in der Schweiz auch aus dem glücklichen Umstand, dass wir über weitgespannte und jedermann zugängliche Niederschlagsstatistiken verfügen [5], [11], [15], die weitgehend auf die Bedürfnisse der N-A-Modelle abgestimmt sind.

Literatur

- [1] Akin, J.E., 1971: Calculation of mean areal Depth of Precipitation. *Journal of Hydrology*, 12.
- [2] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau DVWK – Regeln für die Wasserwirtschaft: Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Heft 112, 1980; I Analyse. Heft 113, 1980; II Synthese, III Übertragungsfunktionen. Verlag Paul Parey, Hamburg.
- [3] Draschoff, R. 1975: Niederschlagsanalyse für die Norddeutsche Küstenregion zwischen Ems und Weser. *Wasserwirtschaft*, 65, 185–190.
- [4] Dyck, S., 1978: *Angewandte Hydrologie*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- [5] Hörler, A. und H.R. Rhein, 1961: Die Intensitäten der Starkregen der Schweiz. *Schweizerische Bauzeitung*, 80, 559–563.
- [6] Köhler, G., 1976: Niederschlag-Abfluss-Modelle für kleine Einzugsgebiete. *Schriftenreihe des Kuratoriums für Wasser und Kulturbauwesen (KWK, jetzt DVWK)*, 25, Teil II; Verlag Paul Parey, Hamburg.
- [7] Martinec, J., 1975: Snowmelt – Runoff Model for Stream Flow Forecasts. *Nordic Hydrology*, 6, 145–154.
- [8] Mendel, H.G., 1977: Die Berechnung von Gebietsniederschlägen. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 21, 129–141.
- [9] Naef, F., 1977: Ein Vergleich von mathematischen Niederschlag-Abfluss-Modellen. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, VAW-ETH, Zürich, 26.
- [10] Naef, F., 1974: Berechnung von Hochwassern aus Meteorologischen Grössen mittels mathematischer Modelle. *Schweizerische Bauzeitung*, 92, 981–985.
- [11] Vereinigung Schweizerischer Strassenfachmänner (VSS), 1969: SNV 640 350, Regenintensität. *Schweizerische Normenvereinigung (SNV)*, Zürich.
- [12] Storchenegger, I., 1979: Abflussberechnung als Gegenstand von Forschung und Praxis in der Kulturtechnik. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 20, 295–302.
- [13] Widmoser, P., 1978: Zur Berechnung der Anlaufzeit nach Kirpich. *Wasser und Boden*, 30, 16–19.
- [14] Zeller, J., 1974: Starkniederschläge und ihr Einfluss auf Hochwassereignisse. Fortbildungskurs für Hydrologie in Sursee, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, VAW-ETH, Zürich.
- [15] Zeller, J., H. Geiger und Röthlisberger, 1976: Die Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen EAFV.

Adresse des Verfassers:
Isidor Storchenegger, dipl. Kulturing. ETH,
Institut für Kulturtechnik, ETH-Hönggerberg,
CH-8093 Zürich

Integrale und interdisziplinäre Wildbachverbauung

F. Zollinger

Eine umfassende Wildbachverbauung besteht in mehr als nur einer Bachverbauung. Sie sollte möglichst alle am Rande betroffenen Arbeitsbereiche ebenfalls miteinbeziehen: Lawinenverbauung, Alpwirtschaft, Ortsplanung, Tourismus usw. Daraus folgt, dass sich nicht nur die Kulturingenieure und die Förster mit einer umfassenden Wildbachverbauung beschäftigen können und dürfen. Sie müssen für Rand- und Spezialprobleme andere Fachleute beziehen, wie den Bauingenieur, den Geologen und Geotechniker, den Planer, den Juristen und andere. Der vorliegende Beitrag soll aufzeigen, dass es sinnvoll und notwendig ist, jede Wildbachverbauung in einen übergeordneten, integralen und damit interdisziplinären Rahmen zu stellen.

1. Einleitung

1939 schrieb R. Jäger vom kantonalen Meliorationsamt Zürich zu den kulturtechnischen Massnahmen für die Wiederherstellung von beschädigtem Kul-

tland: «Nirgends so sehr wie bei diesen Arbeiten hat man sich von jeder Schablone fernzuhalten» [2]. Der Kantonsoberförster von Uri, M. Ochslin, hält 1947 fest: «Vielmehr müssen wir dieses

La correction intégrale des torrents n'inclut pas seulement les constructions concernant directement un torrent. Elle s'occupe aussi des dangers d'avalanche, d'exploitation alpestre, de la jurisprudence de propriété foncière, du tourisme etc. Les spécialistes de la correction des torrents – le forestier et l'ingénieur du génie rural – doivent consulter des autres experts tels que l'ingénieur civil, le géologue, le juriste et autres. L'article veut attirer l'attention sur les travaux multilatéraux et très variés d'une sérieuse correction intégrale et interdisciplinaire des torrents.

Problem im Gesamtrahmen „Wildbachgebiet“ betrachten...» [4]. Dies sind nur zwei Beispiele, sicher gibt es noch andere, frühere Ansätze zur integralen Wildbachverbauung.