



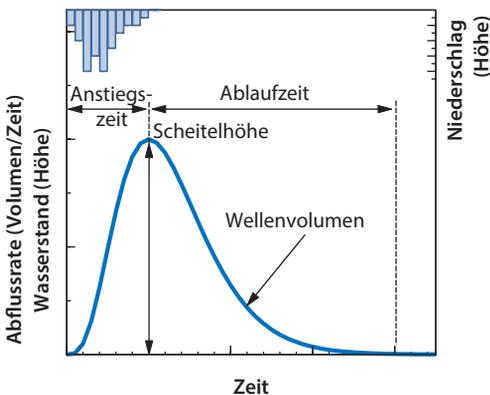
Wellenablauf – wie sich Abflusswellen aufbauen und wie der Scheitel gemindert werden kann

- 3.1 Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen – 34
- 3.2 Methoden zur Abschätzung von Abflussscheitel und -volumen – 37
- Literatur – 58

3.1 Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen

3.1.1 Eigenschaften von Abflusswellen

Abfluss läuft immer in Form einer Welle ab, unabhängig davon, ob es sich um Oberflächenabfluss infolge eines Starkniederschlags in der Fläche (im Wasserhaushaltsgesetz als „wild abfließendes Wasser“ bezeichnet; kann Sturzfluten auslösen) oder um den Abfluss eines ausgedehnten Frontensystems in einem Flusssystem (Flusshochwasser) handelt. Wesentliche Eigenschaften einer Abflusswelle sind Scheitelhöhe, Anstiegs- und Ablaufzeit sowie Wellenvolumen (■ Abb. 3.1). Das Wellenvolumen ergibt sich aus dem Teil des Niederschlags, der nicht im Einzugsgebiet zurückgehalten wird und abfließt – dem effektiven oder abflusswirksamen Niederschlag (N_{eff}). Ein Verfahren zur Ermittlung von N_{eff} ist in ► Kap. 4 beschrieben.



■ **Abb. 3.1** Wesentliche Eigenschaften von Abflusswellen sind Anstiegszeit, Ablaufzeit, Scheitelhöhe und Wellenvolumen. Auf die Darstellung eines Basisabflusses wurde verzichtet, da dieser bei Hochwasserabflüssen meist vernachlässigbar klein ist und Oberflächenabfluss weitgehend über Gerinne ohne dauerhafte Wasserführung abgeleitet wird. Die vertikalen Balken stellen den abflusswirksamen Niederschlag dar

Die (Scheitel-)Anstiegszeit ist die Zeitspanne zwischen dem Abflussbeginn in der Fläche und dem Erreichen des Scheitelabflusses an einem definierten Punkt des Fließpfades. Sie hat eine hohe Bedeutung, da sie direkt gekoppelt ist mit dem Hochwasserscheitel und umgekehrt. Je kürzer die Scheitelanstiegszeit, umso höher der Hochwasserscheitel. Da der tatsächliche Abflussbeginn meist unbekannt ist, existieren zur Beschreibung und Abschätzung der Anstiegszeit unterschiedliche Definitionen und eine Vielzahl meist empirischer Methoden [1]. Letztere sind einfach anwendbar und vor allem in der Ingenieurhydrologie weit verbreitet. Sie können hydraulische Eigenschaften des Einzugsgebietes und damit auch Veränderungen der Fließpfadgeometrie oder Rauheit jedoch nicht explizit abbilden. Die Bestimmung der Anstiegszeit sollte daher die Dauer erfassen, die der Oberflächenabfluss benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Bezugspunkt zu fließen. Ein entsprechender Ansatz – die Geschwindigkeitsmethode – wird bei der Abflusskonzentration in ► Abschn. 5.3.3 beschrieben.

Wellenvolumen und Anstiegszeit sind die wichtigsten Kenngrößen einer Abflusswelle. Sie erlauben es, die Scheitelhöhe zu ermitteln. Am Scheitel sind Abfluss, Wasserstand, Fließgeschwindigkeit und (kurz zuvor) die Transportkapazität des Wassers am größten. Die Zeit vom Scheitel bis zum Abklingen der Welle wird als Ablaufzeit bezeichnet. Zusammen mit der Anstiegszeit und dem Scheitelabfluss definiert sie die Wellenform, weshalb sie in vielen Methoden zur Abschätzung von Welleneigenschaften berücksichtigt wird.

Die Ablaufzeit hängt von den Retentionseigenschaften des Einzugsgebietes ab und ist durch die Schwierigkeit, den Zeitpunkt des Abklingens genau zu bestimmen, ebenfalls nicht einheitlich definiert. Zur Bestimmung der Ablaufzeit aus Messdaten existieren zahlreiche Methoden [2]. In ingenieurhydro-

logischen Verfahren wird die Ablaufzeit oft anhand von Annahmen über die Form der Abflusswelle bzw. die Verteilung des Wellenvolumens vor und nach dem Scheitel geschätzt, wodurch die Ablaufzeit als Vielfaches der Anstiegszeit ausgedrückt werden kann [3]. Wellenvolumen und Scheitelhöhe können nicht nur als Volumen bzw. Volumen pro Zeit, sondern auch als Wiederkehrintervall ausgedrückt werden (z. B. als Wellenvolumen oder Scheitelabfluss, die an einem bestimmten Ort nur alle 30 Jahre oder seltener zu erwarten sind).

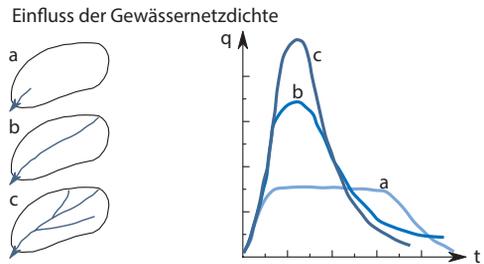
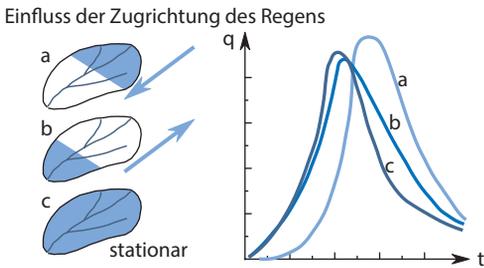
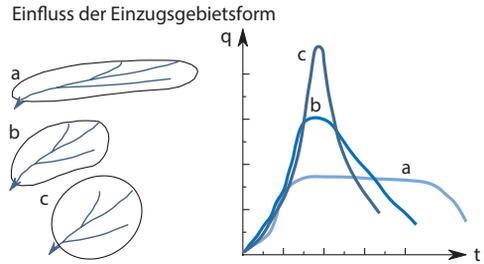
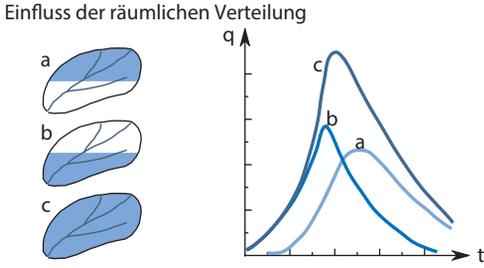
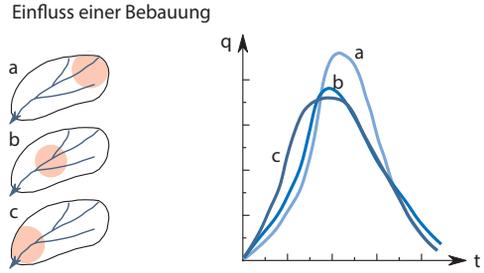
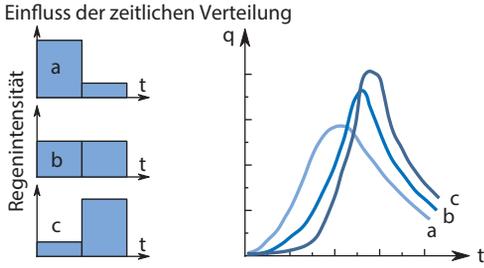
Kenntnisse über Eigenschaften einer Hochwasserwelle sind aus vielen Gründen hilfreich. Beispielsweise können aus dem Scheitelabfluss definierter Starkregenereignisse Wasserstände ermittelt werden und darüber Deich- oder Dammhöhen entlang von Gewässern und Brücken, aber auch Durchlässe oder die Leistung von Entlastungsanlagen oder Schöpfwerken bestimmt werden. Gilt es Polder oder Rückhaltebecken anzulegen, wird das Volumen der Abflusswelle benötigt. Für Standsicherheitsfragen hat die Dauer einer Schwellenwertüberschreitung Bedeutung, z. B. wie lange sind Wasserstände über einem definierten Wert zu erwarten. Je nach Fragestellung sind also unterschiedliche Eigenschaften einer Welle von Interesse. Ähnliches gilt für die Sturzflutvorsorge in der Fläche: Anhand des Scheitelabflusses unterhalb von Ackerflächen kann beispielsweise der erforderliche Querschnitt eines Grabens oder Rohres ermittelt werden. Anhand von Welleneigenschaften können aber auch Kleinstrückhaltebecken oder begrünte Abflussmulden so dimensioniert werden, dass sie einerseits nicht überlaufen und andererseits nicht mehr Fläche als nötig einnehmen. Durch Verfahren zur Bestimmung von Welleneigenschaften kann umgekehrt aber auch der Einfluss bestimmter Maßnahmen auf die Scheitelminderung quantifiziert werden. Oder es kann abgeschätzt werden, wie eine Maßnahme gestaltet sein muss, damit sie eine bestimmte Wirkung erreicht. Methoden

zur Abschätzung von Scheitelabfluss und Wellenvolumen haben daher grundlegende Bedeutung für Bemessungsfragen und die Gestaltung von Maßnahmen zur Abflussminderung, auch wenn in der ländlichen Starkregen- und Sturzflutvorsorge bisher nur selten in Scheitelhöhen und Abflussvolumina gedacht oder damit argumentiert wird.

3.1.2 Einflüsse von Abflussbildung und Abflusskonzentration auf Wellenablauf und Abflussminderung

Die Entstehung und der Ablauf einer Hochwasserwelle ist ein komplexer (instationärer) Prozess, da sich Abflussrate und Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Zeit und Ort ändern. Hinzu kommt, dass die Gestalt einer Abflusswelle von vielen Parametern und Eigenschaften beeinflusst wird. Eine variable, innerhalb eines einzelnen aber auch zwischen unterschiedlichen Regen variierende Größe ist beispielsweise die zeitliche Niederschlagsverteilung. Sie bewirkt, dass sich aus einem Regen mit konstanter Intensität eine andere Abflusswelle ergibt als aus einem Regen mit gleicher Niederschlagshöhe, aber anderem zeitlichen Intensitätsverlauf. Ähnliches gilt beispielsweise für den Anteil der überregneten Einzugsgebietsfläche oder die Zugrichtung des Niederschlagfeldes, deren Auswirkungen auf die Abflusswelle in **Abb. 3.2** schematisch dargestellt sind.

Zusätzlich zu den variablen Regeneigenschaften prägen gebietspezifische Kenngrößen wie die Lage bebauter Flächen, die Form des Einzugsgebietes oder die Dichte des Entwässerungsnetzes die Gestalt einer Abflusswelle (**Abb. 3.3**). Die Dichte des Entwässerungsnetzes ist dabei von besonderer Bedeutung für die Geschwindigkeit und damit für die Höhe, die eine Hochwasserwelle erreicht. Diese Dichte ergibt sich nicht nur aus der Dichte der permanenten Fließgewässer. Bei Stark-



■ **Abb. 3.2** Schematische Darstellung zum Einfluss von Regeneigenschaften auf die Form der Abflusswelle. (Nach [4], verändert)

■ **Abb. 3.3** Schematische Darstellung zum Einfluss von Einzugsgebieteigenschaften auf die Form der Abflusswelle. (Nach [4], verändert)

regenereignissen wird durch den Oberflächenabfluss zusätzlich auch das Netz der (Wegseiten-)Gräben aktiviert, das vielfach länger ist als die permanenten Fließgewässer. Insbesondere dieses periodische Entwässerungsnetz wurde durch den Menschen engmaschig geknüpft (s. ► Kap. 7) und dadurch die Hochwasserscheitel in der ländlichen Flur verschärft.

Durch diese Einflüsse können Berechnungsergebnisse nicht ohne Weiteres von einem Gebiet auf ein anderes oder von einem Regen auf einen anderen übertragen werden. Auch folgen daraus bereits (inhärente) Unsicherheiten jeder quantitativen Schätzung von Welleneigen-

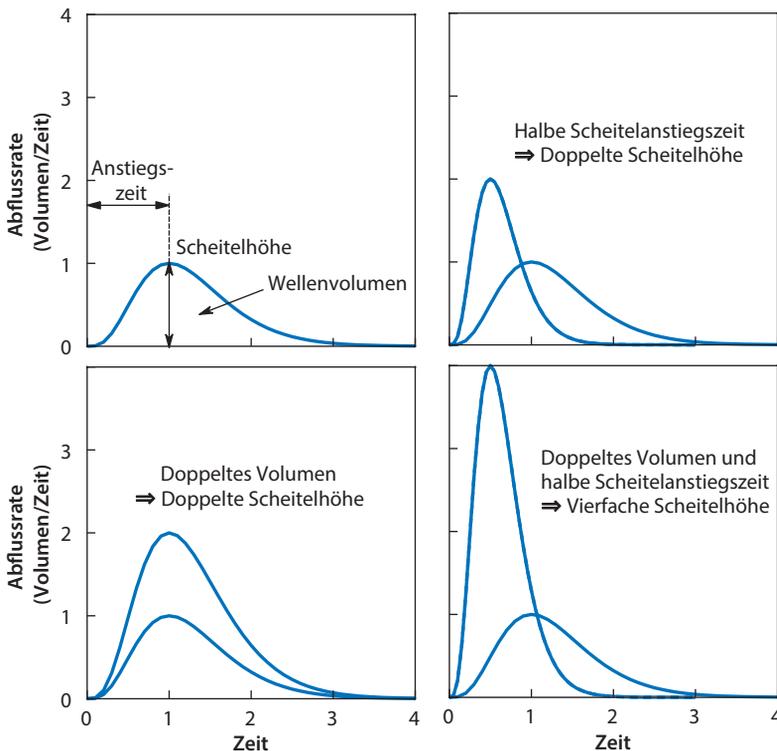
schaften. Die im Folgenden dargestellten Methoden bilden diese verschiedenen Einflüsse hinreichend nach, sofern die Berechnungen räumlich und zeitlich hoch genug aufgelöst werden. Gerade für Planungen sind dem aber Grenzen gesetzt, da z. B. Regeneigenschaften nur retrospektiv bekannt sind und da der Aufwand für eine räumlich hochauflösende Berechnung in normalen Planungsverfahren den zeitlichen und finanziellen Rahmen sprengt. Einfache Annahmen zur Abschätzung von Welleneigenschaften sind daher notwendig, auch wenn dies der Genauigkeit klare Grenzen setzt und nur wesentliche, planungsrelevante Prozesse berücksichtigt werden können. Zur

Bestimmung von Welleneigenschaften kleiner, homogener Gebiete ($<1 \text{ km}^2$) haben sich daher in der Praxis Annahmen wie eine einheitliche Überregnung und ein klar definierter Intensitätsverlauf etabliert. Gleichmaßen vereinfachen viele Bemessungsansätze den Abflussvorgang auf eine reine zeitliche Verschiebung (Translation), bei der Rückhalteeffekte entlang des Fließweges (Retention) entweder vernachlässigt oder stark vereinfacht abgebildet werden (Translationsmodelle). Dazu wird meist eine einheitliche Form der Abflusswelle angenommen und die Scheitelhöhe anhand von Wellenvolumen und Anstiegszeit bestimmt. Der Wellenscheitel wird umso höher, je größer das Wellenvolumen und je kürzer die Anstiegszeit sind. Umgekehrt bedeutet dies, dass der Hochwasserscheitel sowohl durch den Rückhalt von Volumen als auch durch

die Verzögerung des Abflusses vermindert werden kann (■ Abb. 3.4).

3.2 Methoden zur Abschätzung von Abflussscheitel und -volumen

In der ingenieurwissenschaftlichen Literatur sind zahlreiche Ansätze zur Abschätzung von Abflusswelleneigenschaften beschrieben. Eine der einfachsten, etablierten Methoden zur Bestimmung der Scheitelhöhe ist das Verhältnisverfahren, das im angelsächsischen Sprachraum als „rational method“ Ende des 19. Jahrhunderts bekannt geworden ist [6, 7]. Varianten der Methode sind weltweit verbreitet und werden aufgrund ihrer einfachen Handhabung noch heute angewendet, z. B. bei der Ermittlung von Scheitelabflüssen



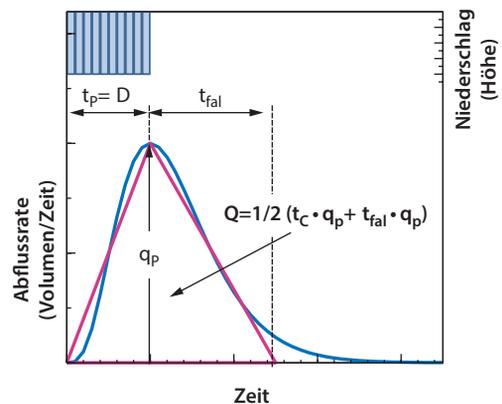
■ **Abb. 3.4** Grundlegende Zusammenhänge zwischen Wellenvolumen, Anstiegszeit und Scheitelhöhe nach dem Einheitsganglinienverfahren, wenn keine weiteren Prozesse hinzukommen [3, 5]

für die Dimensionierung von Kanalnetzen oder bei Entwässerungsmaßnahmen an technischen Bauwerken [8], aber auch bei der Modellierung von Sturzfluten [9]. In Deutschland sind Varianten der Methode unter anderem als Abflussbeiwert- oder Flutplanverfahren bekannt [4, 10]. Das Grundprinzip besteht darin, dass der Scheitelabfluss aus dem Produkt einer kritischen Niederschlagsintensität, der Einzugsgebietsfläche und einer Verhältniszahl ermittelt wird. Der Ansatz fasst damit alle Gebiets- und Standorteigenschaften in einem einzigen Parameter – der Verhältniszahl – zusammen und berücksichtigt weder die Abflussbildung noch die Abflusskonzentration explizit. Entsprechend handelt es sich um ein sehr grobes, überschlägiges Verfahren. Es sollte nur in kleinen (<100 ha), einheitlich strukturierten Gebieten mit kurzer Konzentrationszeit angewendet werden. Gilt es lediglich, den Abflussscheitel von sehr kleinen, einheitlichen Flächen (z. B. Parkplätze, Gewerbegebiete, ...) abzuschätzen, reicht der Verhältnisansatz oft aus. Das Verfahren wird in ► Anhang 8.3 beschrieben, da es die Grundlage von Isochronenansatz, Laufzeit-Flächen-Diagrammen [4, 10, 11] und dem Dreiecksganglinienverfahren bildet. Letzteres wird, ebenso wie das Einheitsganglinienverfahren, im Folgenden ausführlicher beschrieben. Beide berücksichtigen sowohl die Abflussbildung als auch die Abflusskonzentration explizit, wodurch sie dem einfachen Verhältnisansatz überlegen sind. Sie zählen heute zu den Standardbemessungsverfahren in kleinen Einzugsgebieten [12]. Grundsätzlich richtet sich die Auswahl des Verfahrens nach den Anforderungen: Genügt Kenntnis über die zu erwartende Scheitelhöhe, ist das Dreiecksverfahren hinreichend. Ist eine komplette Ganglinie erforderlich, beispielsweise zur Dimensionierung einer Drossel oder eines Rückhaltebeckens, ist ein aufwendigerer Ansatz wie das Einheitsganglinienverfahren erforderlich. In beiden Fällen besteht die wesentliche Herausforderung darin, Abflusshöhe und Anstiegszeit möglichst genau zu bestimmen.

3.2.1 Das Dreiecksganglinienverfahren

Dreiecksganglinien bilden Hochwasserwellen vereinfacht als (schiefe) Dreiecke ab (► Abb. 3.5). Sie zählen zu den ältesten Verfahren, die Scheitelhöhe einer Abflusswelle zu prognostizieren, und werden auch heute noch für die Ermittlung von Scheitelabflüssen in kleinen Einzugsgebieten verwendet, da dort bislang keine robusten Alternativen verfügbar sind [12].

Beim Dreiecksganglinienverfahren bestimmen Abflussvolumen, Anstiegs- und Ablaufzeit die Scheitelhöhe. Das Abflussvolumen kann aus der Höhe des effektiven Niederschlags und der Einzugsgebietsfläche abgeschätzt werden, wobei der effektive Niederschlag beispielsweise mit dem CN-Verfahren ermittelt werden kann (vgl. ► Kap. 4). Die Summe von Anstiegs- und Ablaufzeit ergibt die Dreiecksbasis (► Abb. 3.5). Die Anstiegszeit (t_p = time to peak) wird



► **Abb. 3.5** Konzeptionelle Darstellung, wie eine Ganglinie (blau) vereinfacht als Dreieck (lila) abgebildet werden kann. In dem gezeigten Fall entspricht die Scheitelanstiegszeit (t_p) der Dauer (D) des Regens (vertikale Balken) und die Zeit des fallenden Wellenastes (auch Ablaufzeit; t_{fal}) dem 1,5-Fachen von t_p . Das Wellenvolumen (Q) des Dreiecks lässt sich trigonometrisch über den Flächeninhalt des anlaufenden und ablaufenden Dreiecks ermitteln. Sind Q , t_p und t_{fal} bekannt, lässt sich durch Umstellung der Gleichung die Scheitelhöhe (q_p) ermitteln

beim Dreiecksganglinienverfahren der Konzentrationszeit ($t_C = \text{time to concentration}$) des Gebietes gleichgesetzt ($t_p = t_C$). Die Konzentrationszeit entspricht der Dauer, die Oberflächenabfluss benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Punkt zu fließen. Die Ablaufzeit t_{fal} hängt vom Retentionsverhalten des Gebietes ab. Sie ist fast immer unbekannt und wird üblicherweise anhand der Landnutzung geschätzt (typische Wertebereiche $t_p < t_{\text{fal}} < 2 t_p$). Analog zum Verhältnisverfahren ist der Ansatz dafür konzipiert, den für ein bestimmtes Wiederkehrintervall höchstmöglichen Scheitelabfluss zu ermitteln. Dieser ergibt sich, wenn ein Bemessungsregen (Erklärung s. unten) von einer Dauer der Konzentrationszeit des Gebietes angesetzt wird, da die Niederschlagsintensität mit zunehmender Regendauer abnimmt.

Für die Anwendung sind im Allgemeinen folgende Schritte notwendig, die im Anschluss detaillierter beschrieben werden:

1. Festlegen von Bezugspunkt, topographischer Wasserscheide und Bestimmung der Einzugsgebietsgröße (A_{EZG})
2. Abschätzen der Konzentrationszeit (t_C)
3. Bestimmung der Bemessungsniederschlagshöhe (N_B)
4. Ermittlung des Wellenvolumens (Q) durch Multiplikation der Einzugsgebietsfläche (A_{EZG}) mit der abflusswirksamen Niederschlagshöhe (N_{eff}).
5. Abschätzen der Ablaufzeit (t_{fal})
6. Berechnung der Scheitelabflusshöhe (q_p) und Plausibilisieren der Ergebnisse

■ Schritt 1: Festlegen von Bezugspunkt, topographischer Wasserscheide und Bestimmung der Einzugsgebietsgröße

Die an einem Punkt des Fließpfades zu erwartende Scheitelhöhe gilt immer nur für den definierten Punkt. Wenige hundert Meter vorher oder nachher gelten durch die veränderte Größe des Einzugsgebietes und

die abweichende Fließzeit andere Werte. Der erste wesentliche Schritt besteht daher darin, den Bezugspunkt für den Abfluss zu definieren. Als Bezugspunkte sind prinzipiell alle Punkte entlang des Fließpfades wie Hangfüße, Grabenabschnitte, Durch- oder Rohreinlässe, Zusammenflüsse oder Pegel (in größeren Gewässern) geeignet, insofern sich das Einzugsgebiet des gewählten Punktes gut abgrenzen lässt. Dazu ist, ausgehend vom Bezugspunkt, die topographische Wasserscheide und damit die Größe des oberirdischen Einzugsgebietes zu bestimmen. Bei Gebietsgrößen von wenigen Hektar kann die Abgrenzung oft einfach von Hand durchgeführt werden. Übersteigt die Fläche mehrere Hektar, bietet sich eine Abgrenzung mithilfe eines Geländemodells (Auflösung ≤ 5 m) in einem Geographischen Informationssystem an. In den meisten GIS-Anwendungen ist eine Abgrenzung der Wasserscheide mit wenigen Mausklicks möglich.

■ Schritt 2: Abschätzung der Scheitelanstiegszeit

Für die Bestimmung der Scheitelanstiegszeit bei Starkregen in kleinen Gebieten wird die Scheitelanstiegszeit (t_p) der Konzentrationszeit des Gebietes gleichgesetzt (bei anderen Verfahren oder Fragestellungen gelten oft andere Konventionen). Die Konzentrationszeit beschreibt die Zeit, die Oberflächenabfluss benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Bezugspunkt, z. B. einem Hangfuß, Grabenabschnitt oder einer Ortschaft, zu fließen. Das Mittel der Wahl zur Bestimmung von t_C in kleinen Einzugsgebieten ist die Geschwindigkeitsmethode [13]. Dabei wird zunächst der (hydraulisch) längste Fließpfad zwischen Bezugspunkt und Wasserscheide bestimmt und hinsichtlich der Form des Fließens und den hydraulischen Eigenschaften des Fließpfades in ähnliche Abschnitte untergliedert. Anschließend wird für jeden Abschnitt des Fließpfades die Fließzeit bestimmt. Die Konzentrationszeit

ergibt sich dann aus der Summe der Fließzeiten in den einzelnen Abschnitten (► Abschn. 5.3.3). Die wesentliche Stärke der Geschwindigkeitsmethode besteht darin, dass der Fließweg und seine hydraulischen Eigenschaften explizit abgebildet werden. Daher lassen sich auch Änderungen dieser Eigenschaften durch Eingriffe quantifizieren. Stärker empirische Ansätze sind dazu nicht in der Lage. Daher wird die Geschwindigkeitsmethode zur Bestimmung von t_C empfohlen.

Wenn die Geschwindigkeitsmethode nicht angewendet werden kann oder für eine erste überschlägige Bestimmung der Konzentrationszeit eignet sich die empirische, modifizierte Kirpich-Gleichung [12]. Sie verwendet nur die Fließweglänge und die dazugehörige Höhendifferenz und wurde an Gebieten von 25–150 km² kalibriert. Gerinneigenschaften wie Querschnittsgeometrie oder Rauheit können hier nicht berücksichtigt werden:

$$t_C = 277 \cdot \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (3.1)$$

wobei

t_C - Konzentrationszeit (min)

L - Länge des Fließweges zwischen dem Bezugspunkt, für den der Scheitelabfluss zu ermitteln ist, und dem entferntesten Punkt auf der Wasserscheide, der über einen durchgehenden Pfad zum Bezugspunkt entwässert (km)

Δh - Höhendifferenz des Fließweges zwischen Bezugspunkt und dem entferntesten Punkt auf der Wasserscheide, der über einen durchgehenden Pfad bis zu diesem Punkt hin entwässert (m)

■ Schritt 3: Bemessungsniederschlag

Die Wahl der maßgebenden Niederschlagshöhe richtet sich nach der Problemstellung: Bei der Nachrechnung historischer Ereignisse ist die Niederschlagshöhe vorgegeben. Bei Bemessungsaufgaben müssen die Eigenschaften des Regens entsprechend des angestrebten (oder realisierbaren) Ausbaus oder Schutzgrades definiert werden. Wesentliche Eigenschaften solcher Modellregen

sind das statistische Wiederkehrintervall (je seltener, desto größer die Regenmenge) und die Regendauer. Zusammen bestimmen sie, mit welcher Niederschlagshöhe in einer definierten Zeitspanne, in einem definierten Wiederkehrintervall und an einem bestimmten Ort zu rechnen ist (vgl. auch ► Abschn. 4.4 und ► Anhang 8.4).

Klassische Bemessungsaufgaben orientieren sich an den ungünstigsten Bedingungen. Maßgebend sind dann beispielsweise das größte zu erwartende Abflussvolumen oder der höchste zu erwartende Wellenscheitel. Der höchste Wellenscheitel wird für den größten Regen erwartet, dessen effektive, d. h. abflussliefernde Dauer der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes entspricht. Dies liegt daran, dass die durchschnittliche Intensität eines Regen sinkt, je länger er dauert, auch wenn lange Regen im Schnitt eine höhere Regenmenge haben als kurze. Ist ein Regen daher kürzer als die Konzentrationszeit, liefert nie das gesamte Gebiet gleichzeitig und der Wellenscheitel bleibt gering. Ist ein Regen länger als die Konzentrationszeit, liefert zwar das gesamte Gebiet gleichzeitig, aber der Wellenscheitel wird durch die geringere Regenintensität gemindert. Beispiel: Wurde die Konzentrationszeit eines Gebietes mit $t_C=44$ min bestimmt, sollte ein Bemessungsregen herangezogen werden, dessen Dauerstufe (D) die nächsthöhere von t_C ist, z. B. $D=60$ min. Die nächsthöhere Dauerstufe wird deshalb gewählt, weil es bei jedem Regen zu Anfangsverlusten kommt, die Konzentrationszeit aber erst einsetzt, wenn Abfluss auftritt. Dies lässt sich pragmatisch berücksichtigen, indem die nächsthöhere Dauerstufe gewählt wird, während die korrekte Bestimmung der Summe aus Anfangsverlustzeit und Konzentrationszeit ein aufwendiges, iteratives Verfahren notwendig machen würde, das in Anbetracht der großen Klassenabstände der Dauerstufen nicht gerechtfertigt ist. Wird von diesem Vorgehen abgewichen und bei einer Konzentrationszeit von 44 min beispielsweise ein Modellregen mit einer Dauer von 2 h gewählt, resultiert daraus zwar ein höheres

Abflussvolumen, aber wegen der geringeren durchschnittlichen Regenintensität dennoch ein geringerer Wellenscheitel.

Die Wahl des statistischen Wiederkehrintervalls richtet sich nach dem angestrebten Ausbau- oder Schutzgrad. Als Orientierung werden für ländliche Räume mit fehlender oder geringer Bebauung Jährlichkeiten zwischen 10 und 30 Jahren empfohlen. Ereignisse dieser Größenordnung lassen sich mit dezentralen Maßnahmen zum Wasserrückhalt wirksam beeinflussen, und diese sind meist mit überschaubarem Aufwand realisierbar. Bei der Wahl seltener Ereignisse (z. B. Wiederkehrintervalle von 50 oder 100 Jahren, wie sie üblicherweise für Bemessungsaufgaben in besiedelten Räumen gewählt werden) ergeben sich oft enorme Abflussvolumina und Scheitelhöhen, deren Minderung meist aufwendige, flächenintensive und genehmigungspflichtige Ingenieurmaßnahmen erfordert. Um die Spannweite möglicher Ereignisse einzuschätzen, empfiehlt es sich unterschiedliche (häufigere wie seltenere) Extreme zu betrachten. Als Übersicht typischer Werte sind in [Tab. 3.1](#) KOSTRA-Starkniederschlagssummen für unterschiedliche Konzentrationszeiten bzw. Niederschlagsdauern und Wiederkehrintervalle zusammengefasst. Praktische Ansätze zur Ermittlung der konkreten, in einem

Gebiet maßgebenden Niederschlagshöhe stehen in [Abschn. 4.4](#).

■ Schritt 4: Ermittlung des Wellenvolumens

Aus der Bemessungsniederschlagshöhe kann die zu erwartende abflusswirksame Niederschlagshöhe (N_{eff} , beides in mm) mit dem CN-Verfahren bestimmt werden. Dazu müssen die Landnutzung und die hydrologische Bodengruppe im Einzugsgebiet festgelegt werden. Das Verfahren und seine Anwendung sind in [Abschn. 4.3](#) beschrieben. Das Wellenvolumen ergibt sich dann durch Multiplikation der abflusswirksamen Niederschlagshöhe mit der Einzugsgebietsfläche.

■ Schritt 5: Abschätzen der Ablaufzeit (t_{fal})

Die Ablaufzeit hängt von den Retentionseigenschaften des Einzugsgebietes ab und kann über einen Formfaktor F ([Tab. 3.2](#)) und die Konzentrationszeit des Gebietes abgeschätzt werden ([Gl. 3.2](#)). Je höher der Formfaktor und damit die Retention, desto länger die Ablaufzeit und desto geringer der Wellenscheitel.

$$t_{\text{fal}} = F \cdot t_c \quad (3.2)$$

wobei

t_{fal} - Wellenablaufzeit (min)

F - Empirischer Formfaktor (-)

t_c - Konzentrationszeit (min)

■ **Tab. 3.1** Starkniederschlagshöhen in mm für unterschiedliche Wiederkehrintervalle und Niederschlagsdauerstufen D nach KOSTRA [14] für kurze, in kleinen Einzugsgebieten typische Konzentrationszeiten. Die dargestellten Werte können näherungsweise für weite Teile Mittel- und Süddeutschlands verwendet werden. Davon ausgenommen sind Mittelgebirgslagen und Alpenraum, wo im Durchschnitt etwa 10 % bzw. 20 % größere Werte anzusetzen sind. In der Norddeutschen Tiefebene gelten verbreitet 10–20 % geringere Werte

Niederschlagsdauerstufe D (min)	Wiederkehrintervall (a)			
	10	20	30	50
20	23	27	29	31
30	27	31	34	37
60	34	40	43	47
120	38	44	48	52

Tab. 3.2 Formfaktor F zur Bestimmung der Ablaufzeit einer Dreiecksganglinie in Abhängigkeit von der Landnutzung im Einzugsgebiet [12]

Landnutzung	Wasserableitende Wirkung	Formfaktor F
Siedlungsgebiete mit hohem Anteil versiegelter Oberflächen	Sehr schnelle Ableitung durch hohen Versiegelungsgrad, ausgedehntes, künstliches Entwässerungsnetz und hydraulisch glatte Oberflächen	1
Aufgelockerte Bebauung, Wechsel aus versiegelten und unversiegelten Flächen, z. B. Wohngebiete oder Ortsrandlagen (Versiegelungsgrad 10–40 %)	Schnelle Ableitung durch mittleren Versiegelungsgrad, künstliches Entwässerungsnetz und zum Teil hydraulisch glatte Oberflächen	1,25
Ländliche Räume, Dominanz von Wald-, Acker- und Grünlandflächen (Versiegelungsgrad < 10 %)	Mäßige Ableitungsgeschwindigkeit durch Ackerbau und Infrastruktur. Künstliche Fließpfade (z. B. Gräben) sind vorhanden	1,5
Naturnahe Wald- und Feuchtgebiete, intakte Moore, keine oder sehr geringe Versiegelung	Langsame Ableitung und hohe Retention durch raue Verhältnisse und geringen Anteil künstlicher Entwässerungswege	2

▪ **Schritt 6: Berechnung der Scheitelabflusshöhe und Plausibilisieren der Ergebnisse**

Sind alle erforderlichen Parameter und Größen bekannt, lässt sich die Scheitelabflusshöhe (q_p) mithilfe von ► Gl. 3.3 ermitteln. Sie ergibt sich trigonometrisch aus dem Abflussvolumen und der Zeit des ansteigenden und ablaufenden Dreieckswellenteils:

$$q_p = \frac{N_{eff}}{0,5 \cdot (t_c + t_{fal}) \cdot 0,06} \cdot A_{EZG} \quad (3.3)$$

wobei

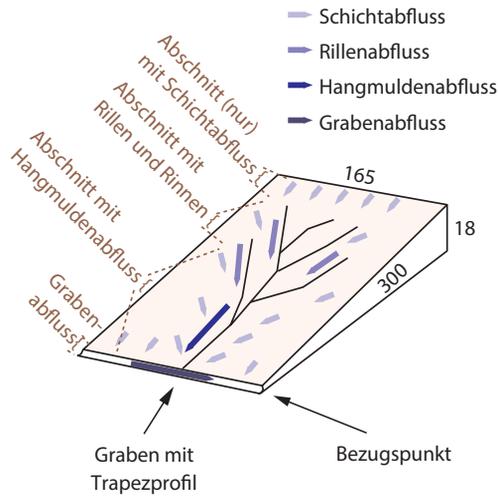
- q_p - Scheitelabflusswert ($m^3 s^{-1}$)
- N_{eff} - Abflusswirksame Niederschlagshöhe (mm)
- A_{EZG} - Einzugsgebietsfläche (km^2)
- t_c - Konzentrationszeit (min)
- t_{fal} - Wellenablaufzeit (min)

Da es sich bei dem Dreiecksganglinienverfahren um ein relativ grobes Schätzverfahren handelt, sollten die Ergebnisse nach Möglichkeit plausibilisiert werden. Dazu

dienen beispielsweise Resultate aus anderen, vergleichbaren Gebieten oder Schätzungen mit anderen Verfahren (z. B. Einheitsganglinienverfahren). In größeren Gebieten können Pegeldaten (oder Extrapolationen daraus), Abflussspendendiagramme oder Schätzungen aus Regionalisierungsverfahren genutzt werden.

▪ **Anwendungsbeispiel**

Aufgabenstellung: Zur Dimensionierung eines Durchlasses (Bezugspunkt) ist die zu erwartende Scheitelabflusshöhe in einem Graben unterhalb einer 5 ha großen Ackerfläche mit einer mittleren Neigung von 6 % bei einem Starkregen mit einem Wiederkehrintervall von 30 Jahren zu ermitteln (► Abb. 3.6). Die Bewirtschaftungsrichtung erfolgt entlang der längeren Seite in Gefälgerichtung; der obere Feldrand deckt sich mit der Wasserscheide, es erfolgt kein Zu- oder Abfluss aus benachbarten Flächen. Zusätzlich soll der Effekt unterschiedlicher Bewirtschaftungspraktiken auf die Scheitelhöhe



■ **Abb. 3.6** Schematische Darstellung des 5 ha großen Feldes. Die Zahlen an den Rändern beziffern Länge, Breite und Höhenunterschied in Meter, die Neigung entspricht 6 %. Die Linien kennzeichnen das zu erwartende Fließpfadmuster aus Schichtabfluss, Abfluss in Rillen und Rinnen, Hangmuldenabfluss und Abfluss im Graben unterhalb des Feldes entlang der Feldkante. In dem Beispiel soll exemplarisch ein Durchlass am Ende des Grabens bemessen werden, der den Bezugspunkt darstellt. Die Abschnitte, für die getrennt gerechnet wird, richten sich nach dem dort dominierenden Abflusstyp

abgeschätzt werden. Dazu sollen die Oberflächen eines konventionellen Reihenkultursaatbeetes (Bodenbedeckung $\leq 5\%$) mit einem konsequent umgesetzten, nichtwendenden Mulchdirektsaatverfahren (Bodenbedeckung = 30 %) verglichen werden.

Die Lösung erfolgt mit dem Dreiecksganglinienverfahren nach dem skizzierten Vorgehen:

1. Bestimmung der Gebietsmerkmale: Einzugsgebietsgröße, Verlauf der Wasserscheide und Bezugspunkt am Hangfuß sind durch ■ Abb. 3.6 gegeben.
2. Abschätzung der Konzentrationszeit: Es wird davon ausgegangen, dass sich bei einem Starkregen die typischen, in ■ Abb. 3.6 skizzierten Fließpfadmuster aus Schichtabfluss, Abfluss in Rinnen und Rillen und Hangmuldenabfluss

ausbilden (vgl. ► Abschn. 5.2), wobei die Streckenanteile der einzelnen Fließpfade in Abhängigkeit von der Bedeckung variieren (vgl. ► Gleichungen 8.1 und 8.2). Um die Fließzeit für die beiden Fälle (konventionelles Saatbett vs. Mulchdirektsaat) zu bestimmen, wird die Geschwindigkeitsmethode angewendet (s. ► Abschn. 5.3.3). Um nur den Einfluss des Fließvorgangs auf die Konzentrationszeit zu illustrieren, wird in beiden Fällen von einem abflusswirksamen Niederschlag mit 15 mm in 30 min ausgegangen, auch wenn eigentlich bei gleichem Niederschlag der abflusswirksame Niederschlag bei Mulchdirektsaat wesentlich geringer ist als bei konventionellem Saatbett. Als Rauheitswerte werden für das Saatbett 17 und für Mulchdirektsaat $5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ entsprechend ■ Tab. 8.2 verwendet. Die Eigenschaften des Grabens sind ohne Bedeutung, da für beide Fälle gleiche Bedingungen angesetzt wurden (zur Berechnung wurde ein Trapez mit einer Sohlbreite von 0,3 m, einer Böschungsneigung von $m = 1,5$, ein geräumter Graben mit einer Rauheit von $k = 35 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ und eine Neigung von 1 % angenommen). Die Auswertung (■ Tab. 3.3) ergibt einen bemerkenswerten Unterschied (Faktor 3) in den Konzentrationszeiten für konventionelle Saatbettbedingungen (Index KSB) bzw. Mulchdirektsaat (Index MDS) mit $t_{\text{C,KSB}} = 21$ bzw. $t_{\text{C,MDS}} = 68$ min. Die Berechnung verdeutlicht den Einfluss der Oberflächenrauheit und die Größenordnung der Einflussmöglichkeiten. Als Vergleich wurde die Konzentrationszeit zusätzlich anhand der modifizierten Kirpich-Formel (► Gl. 3.1) berechnet. Sie ergibt, da sie der Rauheit der Oberfläche und die sich ändernden Bedingungen entlang des Fließpfades unberücksichtigt lässt, einen einheitlichen Wert von 30 min.

Tab. 3.3 Anhand der Geschwindigkeitsmethode geschätzte Fließzeit in Minuten für einen abflusswirksamen Niederschlag von 15 mm in 30 min auf einem 5 ha großen Feld in den unterschiedlichen Fließabschnitten (s. **Abb. 3.6**). Die Konzentrationszeit ergibt sich aus der Summe der einzelnen Abschnitte

Fließabschnitt	Konventionelles Saatbett (KSB) (Bedeckung < 5 %)	Mulchdirektsaat (MDS) (Bedeckung = 30 %)	Anmerkung
Schichtabfluss	11,8	44,7	MDS rauer und daher langsamer und längere Wegstrecke
Rinnen und Rillen	4,5	19,5	MDS rauer und daher langsamer und längere Wegstrecke
Hangmulde	3,3	1,9	MDS kürzer, da Gesamtfeldlänge identisch
Graben	1,6	1,9	MDS langsamer, da langsamere Anlieferung von oben
Konzentrationszeit	21	68	

3. Bestimmung der maßgebenden Bemessungsniederschlagshöhe: Entsprechend der ermittelten Konzentrationszeiten werden KOSTRA-Werte der Dauerstufe 30 und 120 min jeweils für ein Wiederkehrintervall von 30 Jahren als Bemessungsniederschlagshöhen verwendet. Es ergeben sich $N_{B,KSB} = 34$ bzw. $N_{B,MDS} = 48$ mm. Der Regen, bei dem das konventionelle Saatbett den höchsten Abflussscheitel produziert, ist also ein anderer, als der, der bei Mulchdirektsaat den höchsten Abflussscheitel produziert. Es werden also nicht beide Verfahren beim gleichen Regen verglichen, sondern beide Verfahren bei dem für sie jeweils ungünstigsten Regen. Aus der großen Diskrepanz im Bemessungsniederschlag folgt unmittelbar, dass vielfältige Nutzung in einem Einzugsgebiet zu niedrigem Scheitelabfluss führt, weil ein Regen dann nicht für alle Flächen gleichermaßen ungünstig sein kann. Anmerkung: Würde man genauer rechnen und die Zeit des Anfangsverlustes auch noch mitberücksichtigen, kämen beim

konventionellen Saatbett noch knapp 10 min zur Konzentrationszeit hinzu, sodass die Gesamtdauer des Regens, der den größten Abflussscheitel erzeugt, 30 min beträgt, was genau der gewählten Dauerstufe entspricht. Im Fall der Mulchdirektsaat kämen noch ca. 40 min für die Anfangsverluste hinzu, sodass der größte Abflussscheitel bei einem Regen von ca. 108 min Dauer zu erwarten wäre. Auch in dem Fall wäre also die gewählte Dauerstufe von 120 min am nächsten dem rechnerisch optimalen Wert, der aber in KOSTRA nicht enthalten ist. Die pragmatische Regel, die nächsthöhere Dauerstufe zu wählen, führt also in beiden Fällen zum optimalen Ergebnis. Die Regel gilt allerdings nur für kleine Gebiete, in denen die Konzentrationszeit nicht durch die Fließzeit in Gerinnen und Gewässern dominiert wird. In diesen Fällen, bei denen dann auch die Konzentrationszeit größer als zwei Stunden wird, ist die Dauer der Anfangsverluste meist zu vernachlässigen.

4. Die Abflusshöhe wird mit dem CN-Verfahren ermittelt. Als

Modelleingangsgrößen dienen die unter (3) genannten Niederschlagshöhen, der CN-Wert für konventionellen Mais, wie er Ende Mai bei der hydrologischen Bodenklasse C zu erwarten ist (82; ■ Tab. 4.2). Bei Mulchdirektsaat könnte die Bedeckung Ende Mai schon von > 30 % auf < 30 % gesunken sein. Für eine Bodenbedeckung von 28 % beträgt der CN-Wert 72 (■ Abb. 4.3). Damit ergeben sich Abflusshöhen von $N_{\text{eff,KSB}} = 6,6$ bzw. $N_{\text{eff,MDS}} = 6,3$ mm, was Abflussbeiwerten von $\Psi_{\text{KSB}} = 0,19$ bzw. $\Psi_{\text{MDS}} = 0,13$ entspricht.

5. Die Abschätzung der Ablaufzeit erfolgt nach ■ Tab. 3.2. Für beide Fälle wird einheitlich der Formfaktor $F = 1,5$ gewählt, wodurch sich $t_{\text{fal,KSB}} = 32$ bzw. $t_{\text{fal,MDS}} = 102$ min ergeben.
6. Einsetzen der ermittelten Werte beider Varianten in ► Gl. 3.3 ergibt Scheitel-

abflusshöhen von $q_{\text{p,KSB}} = 201 \text{ l s}^{-1}$ und $q_{\text{p,MDS}} = 77 \text{ l s}^{-1}$, was einer Minderung durch Mulchdirektsaat von rund 60 % entspricht. Zur besseren Übersicht sind Zwischenwerte und Ergebnisse in ■ Tab. 3.4 zusammengestellt. Aus der Gegenüberstellung der beiden Varianten (sehr geringe vs. hohe Bedeckung) wird auch der Einfluss deutlich, der mit der Bewirtschaftung genommen werden kann. Um die Unsicherheit und die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber den Modellannahmen einschätzen zu können, sollten immer einige Varianten gerechnet und verglichen werden, z. B. durch die Wahl anderer Starkregenwiederkehrintervalle, Formfaktoren zur Bestimmung der Ablaufzeit oder Modellparameter bei der Bestimmung der Konzentrationszeit und Abflusshöhe.

■ **Tab. 3.4** Zusammenfassung der Parameter und Berechnungsschritte zur Ermittlung der Scheitelabflusshöhe mithilfe des Dreiecksganglinienverfahrens unterhalb einer 5 ha großen Ackerfläche bei einem Starkregen, der nur alle 30 Jahre zu erwarten ist. Dargestellt sind die Berechnungen für Mais unter Bedingungen, wie sie Ende Mai zu erwarten sind, bei zwei Anbauvarianten, nämlich konventioneller Saattbettbereitung (Bedeckung < 5 %) und Mulchdirektsaat (angenommene Bodenbedeckung: 28 %)

Arbeitsschritt	Parameter	Symbol	Einheit	Konventionelles Saattbett	Mulchdirektsaat
(1)	Gebietsgröße	A_{EZG}	ha	5	5
(2)	Konzentrationszeit (Geschwindigkeitsmethode)	t_{C}	min	21	68
(3)	Gewähltes KOSTRA Starkregenwiederkehrintervall	T_{n}	1 a^{-1}	30	30
	Maßgebende Niederschlagsdauerstufe	D	min	30	120
	Maßgebende Niederschlagshöhe	N_{B}	mm	34	48
(4)	Gesamtabflussbeiwert (CN-Verfahren)	Ψ	–	0,19	0,13
	Abflusshöhe	N_{eff}	mm	6,6	6,3
(5)	Ablauffaktor	F	–	1,5	1,5
	Ablaufzeit	t_{fal}	min	32	102
(6)	Scheitelabflusshöhe	q_{p}	l s^{-1}	201	77

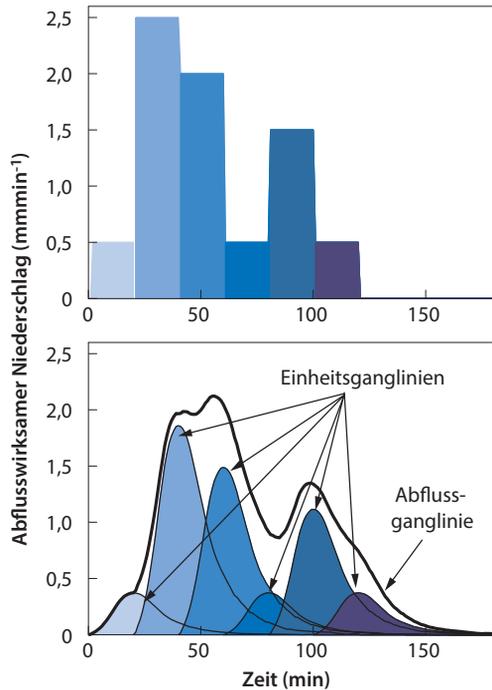
3.2.2 Das Einheitsganglinienverfahren

Im Gegensatz zum Dreiecksganglinienverfahren, mit dem nur die Scheitelhöhe bestimmt werden kann, erlaubt das Einheitsganglinienverfahren die Konstruktion einer kompletten Abflussganglinie, die das hydrologische Verhalten von Einzugsgebieten widerspiegelt. Im Prinzip können damit selbst komplexe Regen und komplexe Einzugsgebiete nachgebildet werden. Gleichzeitig ist das Verfahren einfach genug, um für Planungen eingesetzt zu werden. Mit ihm lässt sich der Einfluss von Landnutzung, Klimawandel oder Infrastrukturmaßnahmen auf das Abflussverhalten abschätzen, und es ermöglicht die Planung und Dimensionierung von Hochwasserschutzmaßnahmen.

Das Konzept der Einheitsganglinie basiert auf Sherman [5] und ist seit vielen Jahrzehnten weltweit verbreitet. Mathematisch kann es über unterschiedliche Ansätze dargestellt werden [15]. In Deutschland haben vor allem analytische Formen, sogenannte lineare Speicherkaskaden, Eingang in die wasserwirtschaftliche Praxis gefunden [17, 18]. In Süddeutschland ist heute vor allem die Adaption von Lutz verbreitet [12, 16, 19], in (vor-)alpinen Gebieten wird oft die analytische Lösung der SCS-Einheitsganglinie [20] verwendet. International ist das Verfahren des amerikanischen NRCS bedeutsam [3, 21], das hier beschrieben wird.

3.2.2.1 Grundlagen und Definitionen

Die Modellvorstellung des Einheitsganglinienverfahrens (EGL-Verfahren) beruht darauf, dass aus einem abfließenden Niederschlagsteil von 1 mm und Dauer ΔD immer die gleiche, für einen Bezugspunkt typische, über die Zeit verteilte Abflussreaktion entsteht. Eine Einheitsganglinie beschreibt daher, wie innerhalb eines Gebietes ein Niederschlagseingangsimpuls in eine Abflussantwort



■ **Abb. 3.7** Beispielhafte Darstellung, wie aus einem 2-stündigen Regen mit variabler Intensität (Balken unterschiedlicher Höhe) (oben) mithilfe einzelner, entsprechend der Höhe des abflusswirksamen Niederschlags skaliertes Einheitsganglinien (dünne schwarze Linien) eine Abflussganglinie (dicke schwarze Linie) konstruiert wird (unten). Die Niederschlagseingangsimpulse und die daraus resultierende Abflussantwort wurden jeweils im gleichen Blauton gezeichnet, um die zeitliche Zugehörigkeit zwischen Eingangs- (Niederschlag) und Ausgangssignal (Abfluss) zu veranschaulichen

übersetzt wird. Bei dem Verfahren wird davon ausgegangen, dass die Abflussantwort linear von der Höhe des Niederschlagsimpulses abhängt. Bei einer abflusswirksamen Niederschlagshöhe von 2 mm ist die Abflussantwort daher doppelt so hoch, bei 3 mm dreimal so hoch, wie bei 1 mm. Aus den einzelnen, zeitlich versetzten Einheitsganglinien kann durch Überlagerung und Addition (Superposition) schließlich die Abflussganglinie des Gebietes bzw. des Gesamtregens konstruiert werden (mathematisch handelt es sich um ein Faltungsintegral) (■ Abb. 3.7).

3.2.2.2 Ableitung gebietsspezifischer Abflussganglinien aus dimensionslosen Einheitsganglinien

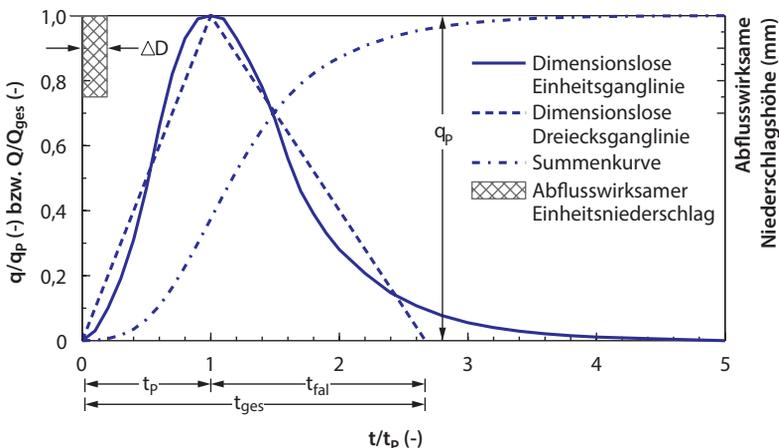
Dieses Kapitel stellt das vom amerikanischen NRCS verwendete Verfahren vor [3, 21]. Dabei wird die gebietsspezifische Einheitsganglinie (EGL) aus einer dimensionslosen Einheitsganglinie (DEGL) abgeleitet. Das Vorgehen hat sich in kleinen landwirtschaftlichen Einzugsgebieten und in Kombination mit der Geschwindigkeitsmethode zur Abschätzung der Konzentrationszeit über viele Jahrzehnte bewährt.

Das Verfahren des NRCS fußt auf einer DEGL, die experimentell aus einer Fülle unterschiedlicher Einzugsgebiete und Einheitsganglinien abgeleitet wurde und die als „Konstruktionsgrundlage“ zur Ableitung beliebiger, gebietsspezifischer EGLs verwendet werden kann. Die DEGL wurde dimensionslos formuliert, indem alle Abflusswerte durch den Scheitelabfluss (q_p) und alle Zeitinkremente durch die Scheitelanstiegszeit (t_p) dividiert wurden. Dadurch liegt der Scheitelabfluss bei $q_p = t_p = 1$ (■ Abb. 3.8). Die Form der DEGL ist so festgelegt, dass 37,5 % ihres

Volumens auf der steigenden und 62,5 % auf der fallenden Seite liegen. Dadurch verfügt die DEGL über eindeutig definierte Eigenschaften und sie kann vereinfacht als Dreieck mit äquivalenten Einheiten bzw. Volumen und Volumenanteilen dargestellt werden. Letzteres birgt den Vorteil, dass sich die Basislänge des Dreiecks und die Scheitelhöhe geometrisch bestimmen lassen. Umgekehrt können diese Zusammenhänge genutzt werden, wenn q_p und t_p bekannt sind, um aus der DEGL eine spezifische EGL für beliebige Gebiete abzuleiten, indem q/q_p mit q_p und t/t_p mit t_p multipliziert werden.

Damit unter dem Dreieck der Gesamtabfluss $Q=1$ wird, muss das Ende der Dreiecksganglinie aus geometrischen Gründen beim 2,67-Fachen der Scheitelanstiegszeit liegen. Aus der Dreiecksform lässt sich weiterhin eine Gleichung zur Bestimmung der Scheitelhöhe ableiten. Für die Berechnung der Dreiecksfläche, die der Abflusssumme (Q) entspricht, gilt:

$$Q = \frac{1}{2}q_p t_p + \frac{1}{2}q_p t_{fal} = \frac{1}{2}q_p (t_p + t_{fal}) \quad (3.4)$$



■ **Abb. 3.8** Dimensionslose Einheitsganglinie, Dreiecksganglinie und Summenkurve. Die Abflusswerte (q) wurden durch die Scheitelhöhe (q_p), die Abflusssummen (Q) durch den Gesamtabfluss (Q_{ges}) und die Zeitinkremente t durch die Scheitelanstiegszeit (t_p) dividiert, wodurch $q_p = t_p = Q_{ges} = 1$. Zusätzlich gekennzeichnet sind die Zeit des fallenden Wellenastes (t_{fal}), die Breite der Dreiecksganglinie (t_{ges}) und die Dauer des abflusswirksamen Einheitsniederschlags (ΔD) (verändert nach NRCS 2007)

Aufgelöst nach dem Scheitelabfluss resultiert:

$$q_p = \frac{2Q}{t_p + t_{fal}} = \frac{2}{1 + \frac{t_{fal}}{t_p}} \cdot \frac{Q}{t_p} \quad (3.5)$$

Der linke Term dieser Gleichung lässt sich nun als dimensionsloser Formparameter K (-) formulieren:

$$K = \frac{2}{1 + \frac{t_{fal}}{t_p}} \quad (3.6)$$

und ► Gl. 3.5 kann vereinfacht werden zu

$$q_p = \frac{K \cdot Q}{t_p} \quad (3.7)$$

Bei einer DEGL, die 37,5 % ihres Volumens auf der steigenden und 62,5 % auf der fallenden Seite hat, ergibt sich der Formparameter K zu 0,75. Solange sich die Volumenanteile auf der steigenden bzw. fallenden Seite nicht ändern, ist K konstant. Mit K und ► Gl. 3.7 kann nun der Scheitelabfluss q_p (in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) eines Gebietes in Abhängigkeit von der Scheitelanstiegszeit t_p (in h) ermittelt werden. Der Gesamtabfluss Q wird dabei aus dem Produkt von Einzugsgebietsfläche A (in km^2) und abflusswirksamer Niederschlagshöhe N_{eff} (in mm) bestimmt:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot A_{\text{EZG}} \cdot N_{\text{eff}}}{t_p} \quad (3.8)$$

wobei

q_p - Scheitelabfluss ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

0,208 - Umrechnungsfaktor

$$\left(\frac{\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \text{h}}{\text{km}^2 \cdot \text{mm}} = \frac{\text{m}^3 \cdot \text{h}}{\text{km}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{s}} = \frac{\text{m} \cdot \text{h}}{\text{km} \cdot \text{s}} \right)$$

A_{EZG} - Einzugsgebietsfläche (km^2)

N_{eff} - Abfließender Teil des Niederschlags bzw. abflusswirksame Niederschlagshöhe (mm)

t_p - Scheitelanstiegszeit (h)

Im Umrechnungsfaktor stecken sowohl die Umrechnung der Einheiten als auch der Formparameter K . Veränderungen in der Form der DEGL, durch Veränderung der Volumenanteile auf der steigenden bzw. fallenden Seite der Dreiecksganglinie

resultieren unweigerlich in einer Veränderung des Umrechnungsfaktors. Aus amerikanischen Einzugsgebieten ist bekannt, dass K in flachen Einzugsgebieten mit hoher Gebietsfeuchte (z. B. Moore) deutlich niedriger und in steilen, alpinen Gebieten höher sein kann [3]. Die Verwendung einer vom Standard abweichend definierten dimensionslosen Einheitsganglinie, z. B. zur Abbildung spezieller Verhältnisse, ist daher möglich, setzt aber eine begründete Wahl der Parameter voraus.

Zur Bestimmung der abflusswirksamen Niederschlagshöhe (N_{eff}) können das CN- (vgl. ► Kap. 4) oder das Lutz-Verfahren (s. ► Anhang 8.5) genutzt werden. Diese berücksichtigen den Niederschlag und standort- sowie ereignisspezifische Eigenschaften des Bodens und der Landnutzung. Die Scheitelanstiegszeit t_p wird üblicherweise aus der Konzentrationszeit t_C des Einzugsgebietes abgeleitet. Letztere ist nicht einheitlich definiert und in der Literatur sind zahlreiche Verfahren zur Bestimmung von t_C dokumentiert [1]. In Folge variiert die Definition von t_C (und damit von t_p) zwischen einzelnen Einheitsganglinienverfahren.

Das hier vorgestellte Verfahren definiert die Scheitelanstiegszeit als Zeit vom Abflussbeginn bis zum Wellenscheitel (vgl. ► Abb. 3.5). Abflussbeginn ist, wenn die Rückhaltemöglichkeiten auf Pflanzen und Boden erschöpft sind oder wenn die Niederschlagsintensität größer als die Infiltrationsrate in den Boden ist. Beim CN-Verfahren (► Abschn. 4.3) wird davon ausgegangen, dass der Abfluss einsetzt, wenn der Regen 20 % der Maximalretention erreicht hat. Unter abflussfördernden Bedingungen (z. B. wenig Bodenbedeckung) beginnt der Abfluss meist nach 10 bis 20 mm Regen (bei einem Niederschlag von 50 mm in 1 h ist dies nach 10, spätestens 20 min der Fall). Weiter wird davon ausgegangen, dass der höchste Abfluss an einem Bezugspunkt erreicht wird, wenn ihm aus dem kompletten Einzugsgebiet Abfluss zufließt. Unter diesen Bedingungen folgt, dass die Scheitelanstiegszeit der Konzentrationszeit entspricht. Letztere wird als die Zeit definiert, die Oberflächenabfluss

benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Bezugspunkt zu fließen. Das Mittel der Wahl zur Bestimmung von t_C in kleinen Einzugsgebieten ist die Geschwindigkeitsmethode [13] (vgl. ▶ Abschn. 5.3.3). Sie kann, im Gegensatz zu empirischen Ansätzen, Einflüsse des Fließpfades (z. B. Querschnitt oder Rauheit) und mögliche Veränderungen des Fließpfades bei anderen Szenarien abbilden.

Das DEGL-Verfahren erlaubt es, im Gegensatz zum Verhältnisansatz (s. ▶ Anhang 8.3), den Einfluss komplexer Regen auf die Abflusskurve abzuschätzen. Dazu muss der Regen in mehrere Abschnitte ΔD eingeteilt werden, für die getrennt der Abfluss vorhergesagt wird. Anschließend werden diese Vorhersagen zur Gesamtabflusskurve überlagert (■ Abb. 3.7). Für die praktische Anwendung muss das Zeitintervall ΔD (auch Einheitsniederschlagsdauer genannt) definiert werden. Die Empfehlung ist, $\Delta D \leq 0,2 t_p$ zu wählen bzw. die Werte in ■ Tab. 3.5 zu verwenden. Kleine Überschreitungen dieser Empfehlung sind zulässig. ΔD sollte aber nicht größer als $0,25 t_p$ sein, da andernfalls die Form der DEGL und insbesondere der meist kurze, ansteigende Ast der Abflusswelle nicht mehr adäquat abgebildet wird (die zeitliche Auflösung der DEGL ist mit $0,1 t_p$ definiert, s. ■ Tab. 3.6). Beispiel: Bei $\Delta D = 0,3 t_p$ würde nur noch jeder dritte Punkt der DEGL zur Ableitung der EGL herangezogen und in Folge eine ungleichmäßige Ganglinie mit schlecht definiertem Scheitel entstehen.

Die Werte der dimensionslosen Einheitsganglinie können ■ Tab. 3.6 entnommen oder über eine Gammafunktion angenähert werden (▶ Gl. 3.9), die eine sehr hohe Ähnlichkeit mit dem Verlauf der DEGL aufweist.

$$\frac{Q}{Q_P} = e^m \cdot \left(\frac{t}{t_P}\right)^m \cdot \left(e^{-m \frac{t}{t_P}}\right) \quad (3.9)$$

wobei

Q/Q_P - Dimensionsloser Abfluss (-)

t/t_P - Dimensionslose Zeit (-)

e - Eulersche Zahl (2,718)

m - Dimensionsloser Formfaktor der Gammafunktion, wobei sich für $m = 3,9$ eine Kurve ähnlich der dimensionslosen Einheitsganglinie ergibt

Die wesentliche Stärke des Verfahrens liegt darin, dass es prinzipiell für beliebige Gebiete angewendet werden kann, sobald t_p und q_p bestimmt wurden. Durch die Abhängigkeit des Verfahrens von diesen Variablen beruht es außerdem auf physikalisch gut interpretierbaren Größen, wodurch Änderungen in der abflusswirksamen Niederschlagshöhe und Änderungen in der Abflusskonzentration gleichermaßen und unmittelbar abgebildet werden können.

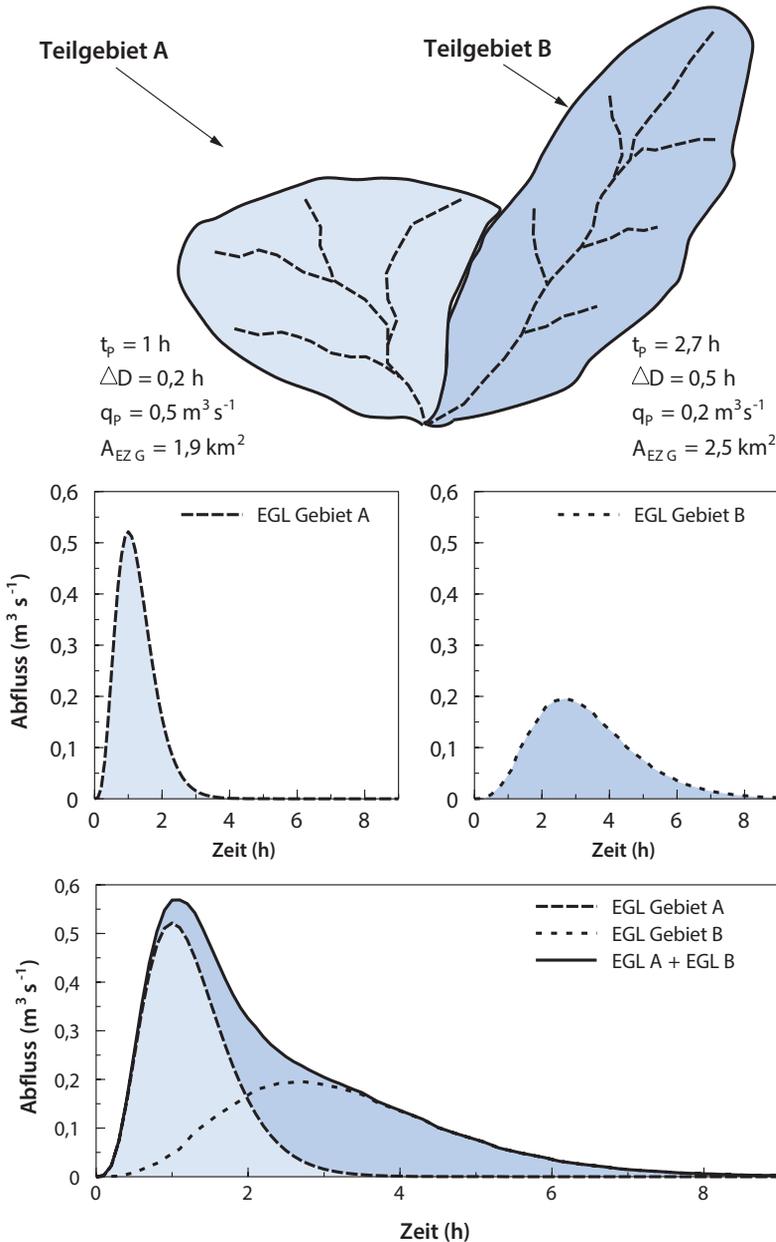
Eine wichtige Voraussetzung für die Ableitung von Abflussganglinien mit dem EGL-Verfahren ist ein relativ homogenes Einzugsgebiet. Falls das Einzugsgebiet aus unterschiedlichen Teileinzugsgebieten besteht, die hinsichtlich Größe, Form und Scheitelanstiegszeit stark voneinander abweichen, sollten die Teileinzugsgebiete zunächst getrennt betrachtet und individuelle Einheitsganglinien ermittelt werden. Diese können dann in einem zweiten Schritt kombiniert werden, um eine Einheitsganglinie für das Gesamtgebiet abzuleiten (■ Abb. 3.9). Die Aufteilung eines großen in mehrere kleine Gebiete ist allerdings sorgfältig abzuwägen. Da die Konzentrationszeit kleinerer Teileinzugsgebiete geringer ist als die des Gesamtgebietes, entstehen mehrere, stärker gestauchte

■ Tab. 3.5 Empfohlene Dauer des Einheitsniederschlags (ΔD) in Abhängigkeit von der Konzentrationszeit des Oberflächenabflusses (t_C) im Einzugsgebiet

Konzentrationszeit (t_C)	min	< 60	60–120	120–180	> 180
Empfohlene Dauer (ΔD)	min	5	10	20	30

Tab. 3.6 Zeit- und Abflusswerte der dimensionslosen Einheitsgangline (DEGL). Die Werte wurden dimensionslos definiert, indem die Zeit t durch die Konzentrationszeit (t_c) des Gebietes und der Abfluss (q) durch den Scheitelabfluss (q_p) dividiert wurden. Die Form der DEGL entspricht näherungsweise einer Gammafunktion mit Formfaktor $m=3,9$ (► Gl. 3.9), deren Werte, zur Veranschaulichung der Ähnlichkeit, in der 3. Spalte dargestellt sind

Dimensionslose Zeit ($t t_c^{-1}$)	Dimensionsloser Abfluss ($q q_p^{-1}$)	Gammafunktionswert (bei $m=3,9$)	Dimensionslose Abflusssumme ($Q_a Q^{-1}$)
0	0	0,00	0
0,1	0,03	0,00	0,001
0,2	0,10	0,04	0,006
0,3	0,19	0,14	0,017
0,4	0,31	0,29	0,035
0,5	0,47	0,47	0,065
0,6	0,66	0,65	0,107
0,7	0,82	0,80	0,163
0,8	0,93	0,91	0,228
0,9	0,99	0,98	0,300
1	1	1	0,375
1,1	0,99	0,98	0,450
1,2	0,93	0,93	0,522
1,3	0,86	0,86	0,589
1,4	0,78	0,78	0,650
1,5	0,68	0,69	0,705
1,6	0,56	0,60	0,751
1,7	0,46	0,52	0,790
1,8	0,39	0,44	0,822
1,9	0,33	0,37	0,849
2,0	0,280	0,30	0,871
2,2	0,207	0,20	0,908
2,4	0,147	0,13	0,934
2,6	0,107	0,08	0,953
2,8	0,077	0,05	0,967
3,0	0,055	0,03	0,977
3,2	0,040	0,02	0,984
3,4	0,029	0,01	0,989
3,6	0,021	0,01	0,993
3,8	0,015	0,00	0,995
4,0	0,011	0,00	0,997
4,5	0,005	0,00	0,999
5,0	0	0	1



■ **Abb. 3.9** Schematische Darstellung eines Einzugsgebietes, das aus zwei ungleichförmigen Teileinzugsgebieten mit voneinander abweichenden Scheitelanstiegszeiten besteht (oben). Entsprechend den Gebiets-eigenschaften resultieren unterschiedliche Einheitganglinien (EGL A bzw. EGL B) (Mitte), die überlagert und zu einer Einheitganglinie für das Gesamtgebiet (EGL A + EGL B) kombiniert wurden (unten). (verändert nach [3])

Einheits- und in Folge Abflussganglinien mit höherem Scheitel. Die Abflussreaktion der Teileinzugsgebiete wird durch dieses Vorgehen

zwar korrekt beschrieben, die Reaktion des Gesamtgebietes kann allerdings nicht mehr ohne Weiteres aus den Abflussganglinien

der Teileinzugsgebiete (z. B. durch Addition) gebildet werden. Sowohl die Abflachung der Welle entlang der Fließstrecke, die Retention in der Fläche als auch die Verbreiterung der Welle im Hauptgerinne durch einen seitlichen Zufluss können erheblich sein. Konzeptionell wird die Verwendung von Einheitsganglinienverfahren für räumlich differenzierte Modellierungen daher schnell anspruchsvoll.

Aus der praktischen Anwendungen von Einheitsganglinienverfahren ist bekannt, dass die Unsicherheit einer solchen einfachen Niederschlag-Abfluss-Modellierung selten kleiner als 25 % ist [12]. Ursache sind die konzeptionellen Annahmen, die dem EGL-Verfahren und der Geschwindigkeitsmethode zugrunde liegen, als auch Unsicherheiten in der praktischen Bestimmung von t_p und q_p .

3.2.2.3 Anwendungsbeispiel

Zur Illustration wird die Abflussganglinie eines 2,5 km² großen Einzugsgebietes für einen Regen mit 70 mm in 4 h konstruiert. Diese Niederschlagshöhe entspricht in vielen Regionen einem etwa 100-jährlichen Starkregenereignis. Das Einzugsgebiet ist landwirtschaftlich geprägt, weshalb von einem Gesamtabflussbeiwert von $\Psi = 0,4$ (-) ausgegangen wird. Eine gebietsspezifische Bestimmung von Ψ wäre mit dem CN-Verfahren (vgl. ▶ Abschn. 4.3) oder dem Ansatz von Lutz (▶ Anhang 8.5) möglich, wird hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Detail durchgeführt. Gleiches gilt für die

Ermittlung der Konzentrationszeit, die hier mit $t_C = 2$ h gegeben ist, aber mithilfe der Geschwindigkeitsmethode (s. ▶ Abschn. 5.3.3) ermittelt werden könnte. ■ Tab. 3.7 fasst die erforderlichen Kenngrößen zusammen.

Zur Ableitung der Abflussganglinie wird zunächst die Einheitsganglinie (EGL) des Gebietes durch Skalierung der dimensionslosen Einheitsganglinie (DEGL) mit dem gebietsspezifischen Scheitelabfluss (q_p) und der gebietsspezifischen Scheitelanstiegszeit (t_p) ermittelt. Im Anschluss wird eine Ganglinie des abflusswirksamen Niederschlags abgeleitet und auf die EGL angewendet. Durch Überlagerung der Einzelwellen wird schließlich die Abflusswelle ermittelt. Das Vorgehen gliedert sich in fünf Teilschritte:

■ Teilschritt 1: Ableitung der Einheitsganglinie aus der dimensionslosen Einheitsganglinie

Zunächst müssen t_p und q_p bestimmt werden, um die dimensionslose Einheitsganglinie zu skalieren. Für kurze, schauerartige Starkregen kann die Scheitelanstiegszeit der Konzentrationszeit gleichgesetzt werden. Dadurch ist t_p bekannt und die Dauer des Einheitsniederschlags, ΔD , kann bestimmt werden. ΔD legt den Rechenzeitschritt und die zeitliche Auflösung der Niederschlags- und Abflussganglinie fest. Nach ■ Tab. 3.5 wird für $t_p = t_C = 2$ h, ein ΔD von 10 bis maximal 20 min empfohlen. 20 min entsprechen also der größtmöglichen zeitlichen Auflösung, bei

■ Tab. 3.7 Kenngrößen des Einzugsgebietes und des Bemessungsniederschlags

Parameter	Einheit	Wert
Gebietsgröße A_{EZG}	km ²	2,5
Gesamtabflussbeiwert Ψ	-	0,4
Konzentrationszeit t_C	h	2
Bemessungsniederschlagshöhe N_B	mm	70
Bemessungsniederschlagsdauer D	h	4
Zeitliche Niederschlagsverteilung	-	Mittenbetont (s. ▶ Anhang 8.4.5)

der eine Skalierung der DEGL gerade noch akzeptabel ist. Zu genaueren Ergebnissen führt $\Delta D = 10$ min (entspricht 0,167 h).

Mit der Scheitelanstiegszeit t_p , der Gebietsgröße A und ► Gl. 3.8 kann der Scheitelabfluss der Einheitsganglinie für eine Effektivniederschlagshöhe von $N_{\text{eff}} = 1$ mm ermittelt werden:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot A \cdot N_{\text{eff}}}{t_p} = \frac{0,208 \cdot 2,5 \cdot 1}{2} = 0,26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Damit lässt sich nun eine gebietspezifische Einheitsganglinie ableiten, indem die dimensionslose Zeit und der dimensionslose Abfluss der DEGL mit t_p bzw. q_p multipliziert werden (■ Tab. 3.8).

■ Teilschritt 2: Erstellung der Effektivniederschlagsganglinie

Anhand des Gesamtabflussbeiwertes von $\Psi = 0,4$ und der Bemessungsniederschlagshöhe von $N_B = 70$ mm in 4 h wird nun mit der Auflösung ΔD eine abflusswirksame Niederschlagsganglinie erstellt. Dazu wird zunächst die abflusswirksame Niederschlagshöhe (N_{eff}) ermittelt.

$$N_{\text{eff}} = N_B \cdot \Psi = 70 \cdot 0,4 = 28 \text{ mm}$$

Zur Ableitung der N_{eff} -Ganglinie wird von einem mittenbetonten Verlauf des Effektivniederschlags ausgegangen. Das heißt, in den ersten 30 % der Niederschlagsdauer fallen 20 % der Niederschlagssumme, in

■ **Tab. 3.8** Ableitung der gebietspezifischen Einheitsganglinie (EGL) aus der dimensionslosen Einheitsganglinie (DEGL) durch Multiplikation der dimensionslosen Zeiten mit t_p und der dimensionslosen Abflusswerte mit q_p

$t t_p^{-1}$ (-)	$q q_p^{-1}$ (-)	Zeit (h)	EGL ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	$t t_p^{-1}$ (-)	$q q_p^{-1}$ (-)	Zeit (h)	EGL ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
(1)	(2)	(3)	(4)	Fortsetzung			
0	0,00	0	0,00	1,7	0,52	2,2	0,13
0,1	0,00	0,1	0,00	1,8	0,44	2,3	0,11
0,2	0,04	0,3	0,01	1,9	0,37	2,4	0,10
0,3	0,14	0,4	0,04	2	0,30	2,6	0,08
0,4	0,29	0,5	0,08	2,1	0,25	2,7	0,06
0,5	0,47	0,6	0,12	2,2	0,20	2,8	0,05
0,6	0,65	0,8	0,17	2,3	0,16	3	0,04
0,7	0,80	0,9	0,21	2,4	0,13	3,1	0,03
0,8	0,91	1	0,24	2,5	0,10	3,2	0,03
0,9	0,98	1,2	0,25	2,6	0,08	3,3	0,02
1	1,00	1,3	0,26	2,7	0,06	3,5	0,02
1,1	0,98	1,4	0,26	2,8	0,05	3,6	0,01
1,2	0,93	1,5	0,24	2,9	0,04	3,7	0,01
1,3	0,86	1,7	0,22	3	0,03	3,9	0,01
1,4	0,78	1,8	0,20	3,1	0,02	4	0,01
1,5	0,69	1,9	0,18	3,2	0,02	4,1	0,00
1,6	0,60	2,1	0,16				

Tab. 3.9 Aufteilung des Effektivniederschlags von $N = 28 \text{ mm}$ in $D = 4 \text{ h}$ in einen mittenbetonten Verlauf (s. auch ► Anhang 8.4). Als Kontrolle wurden in der untersten Zeile die Spaltensummen ergänzt

Relative Intervaldauer (%)	Relativer Niederschlagsanteil (%)	Absolute Intervaldauer (h)	Absoluter Niederschlagsanteil (mm)
0,3	0,2	1,2	5,6
0,2	0,5	0,8	14
0,25	0,15	1	4,2
0,25	0,15	1	4,2
1	1	4	28

3

den nächsten 20 % der Niederschlagsdauer 50 % und im dritten und vierten Viertel der Niederschlagsdauer je 15 % der Niederschlagssumme (vgl. auch ► Anhang 8.4.5). Angewendet auf den konkreten Fall ergibt sich für das erste Bemessungsintervall von $4 \text{ h} \cdot 0,3 = 1,2 \text{ h}$ Dauer eine Menge von $28 \text{ mm} \cdot 0,2 = 5,6 \text{ mm}$. Für das zweite Bemessungsintervall von $4 \text{ h} \cdot 0,2 = 0,8 \text{ h}$ Dauer resultiert eine Menge von $28 \text{ mm} \cdot 0,5 = 14 \text{ mm}$, usw. (► Tab. 3.9).

Um eine N_{eff} -Ganglinie in der gewünschten zeitlichen Auflösung zu erzeugen, wird die abflusswirksame Niederschlagssumme im Bemessungsintervall durch die Anzahl der ΔD -Intervalle geteilt. Beispiel: Das erste Bemessungsintervall besteht aus $1,2 \text{ h} / 0,167 \text{ h} = 7,2$ Intervallen mit einer Dauer von $\Delta D = 10 \text{ min}$ ($\approx 0,167 \text{ h}$). Innerhalb dieser Zeitschritte fließen jeweils $5,6 \text{ mm} / 7,2 = 0,78 \text{ mm}$ Niederschlag ab. Die Ermittlung der abflusswirksamen Niederschlagshöhen für die anderen Zeitschritte erfolgt analog. Spalte 2 in ► Tab. 3.10 zeigt die ermittelten Werte in einem tabellarischen Rechenschema mit Intervallen von $\Delta D = 10 \text{ min}$.

■ Teilschritt 3: Übertragung der Einheitsganglinienwerte

Für die vorgegebenen Zeitintervalle werden nun die entsprechenden EGL-Werte ermittelt. Dazu werden die Werte aus ► Tab. 3.8 (Spalte 4) nach ► Tab. 3.10

übertragen. Bei Bedarf wird zwischen einzelnen Zeitschritten interpoliert.

■ Teilschritt 4: Plausibilitätskontrolle

Zur Kontrolle kann an dieser Stelle das Volumen unter der Einheitsganglinie (Spalte 3 in ► Tab. 3.10) ermittelt und mit ΔD multipliziert werden:

$$4,03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 0,167 \text{ h} = 0,67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ h}$$

Für einen Niederschlag von 1 mm muss der resultierende Wert mit dem Produkt aus dem Umrechnungsfaktor aus ► Gl. 3.8 und der Gebietsgröße, dividiert durch den dimensionslosen Formparameter K aus ► Gl. 3.6 übereinstimmen:

$$0,208 \frac{\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ h}}{\text{km}^2 \text{ mm}} \cdot \frac{2,5 \text{ km}^2}{0,75} \cdot 1 \text{ mm} = 0,69 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ h}$$

Der Unterschied der beiden Werte beträgt knapp 3 %. Differenzen von bis zu 5 % können toleriert werden. Bei größeren Abweichungen sollte die zeitliche Auflösung angepasst werden, bis die Volumina hinreichend genau übereinstimmen.

■ Teilschritt 5: Berechnung der Ganglinie

Nun wird für jeden Zeitschritt der Ganglinie von N_{eff} eine Abflussreaktion berechnet. Dazu wird N_{eff} eines Zeitschritts durch Multiplikation mit den Werten der Einheitsganglinie auf die folgenden Zeitschritte

■ **Tab. 3.10** Erstellung eines Rechenschemas mit einer einheitlichen zeitlichen Auflösung von $\Delta D = 10 \text{ min}$ ($= 0,167 \text{ h}$). Die Spalten zeigen die Zeit (1), die abflusswirksame Niederschlagshöhe (N_{eff}) (2) sowie den entsprechenden Einheitsganglinienwert (3)

Zeit (h)	N_{eff} (mm)	EGL ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Zeit (h)	N_{eff} (mm)	EGL ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
0,00	0,00	0,00	3,33	0,70	0,14
0,17	0,78	0,00	3,50	0,70	0,12
0,33	0,78	0,01	3,67	0,70	0,11
0,50	0,78	0,02	3,83	0,70	0,09
0,67	0,78	0,05	4,00	0,70	0,08
0,83	0,78	0,08	4,17	0,0	0,07
1,00	0,78	0,12	4,33	0,0	0,06
1,17	0,78	0,16	4,50	0,0	0,05
1,33	2,49	0,20	4,67	0,0	0,04
1,50	2,92	0,22	4,83	0,0	0,03
1,67	2,92	0,24	5,00	0,0	0,03
1,83	2,92	0,26	5,17	0,0	0,02
2,00	2,92	0,26	5,33	0,0	0,02
2,17	0,70	0,26	5,50	0,0	0,01
2,33	0,70	0,25	5,67	0,0	0,01
2,50	0,70	0,23	5,83	0,0	0,01
2,67	0,70	0,22	6,00	0,0	0,01
2,83	0,70	0,20	6,17	0,0	0,01
3,00	0,70	0,18	6,33	0,0	0,01
3,17	0,70	0,16	6,50	0,0	0,00

verteilt (Spalte 3 in ■ Tab. 3.10). Dies wird für alle Zeitschritte des Niederschlags wiederholt (Spalten 3 bis 13 in ■ Tab. 3.11). Und schließlich werden alle so erhaltenen Abflüsse der verschiedenen Niederschlagszeitschritte, die zum gleichen Zeitpunkt fließen (d. h. in einer gemeinsamen Zeile in ■ Tab. 3.11 stehen), aufsummiert und bilden

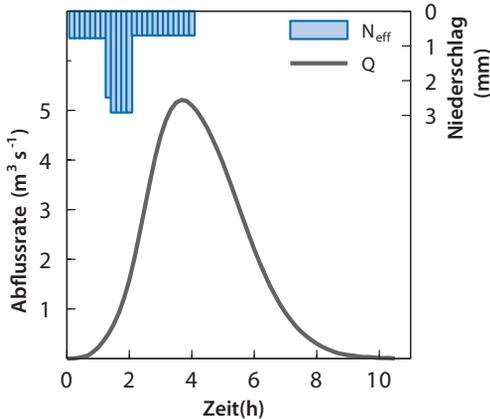
über die Zeit die Abflussganglinie (Spalte 14 in ■ Tab. 3.11), die in ■ Abb. 3.10 zusammen mit Verlauf des Effektivniederschlags dargestellt ist.

Das Gesamtvolumen des Abflusses ergibt sich aus der Summe von Q multipliziert mit ΔD .

3 **Tab. 3.11** Illustration des Rechenschemas zur Ermittlung der Abflussganglinie (Q) aus der Zeitreihe des abflusswirksamen Niederschlags (N_{eff}) und der Einheitsganglinie (nicht dargestellt) für die ersten neun Zeitintervalle. Zur besseren Lesbarkeit wird auf eingeklammerte Zeilen- (Z) und Spaltennummern (S) verwiesen. Die N_{eff} -Ganglinie aus **Tab. 3.10** ist im Kopfbereich dargestellt (Zeile 1–3, Spalte 3–13). Aus ihr entsteht durch Multiplikation mit den Werten der Einheitsganglinie (vgl. **Tab. 3.8** Spalte 4) in jedem Zeitintervall eine Abflussreaktion (Zeile 5–40, Spalte 3–13). Die einfach umrahmten Zellen markieren die Abflussreaktion im ersten Intervall, umgerechnet in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. Die doppelt umrahmten Zellen sind der Abfluss, der im dritten Zeitschritt entsteht. Die dreifach umrahmten Zellen sind der Abfluss des fünften Zeitschritts. Die Abflussreaktionen der einzelnen Zeitintervalle (Zeile 5–40) ergeben zusammen (Spaltensummen) die Abflussganglinie am Ende des Fließpfades (Spalte 14). Für die technische Umsetzung dieser Rechenoperation bieten sich Tabellenkalkulationsprogramme an. Dort kann die Umsetzung eleganter und ohne die vielen „Hilfsspalten“, z. B. über Summenproduktformeln, erfolgen oder über analytische Näherungen [z. B. **19, 20**]

Z/S	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
(1)	I		1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	25	
(2)	Zeit (h)	0,17	0,33	0,5	0,67	0,83	1,0	1,17	1,33	1,5				
(3)	N_{eff} (mm)	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	2,49	2,92	...	0,7	
(4)	I	Zeit (h)	Abflussreaktionen in den einzelnen Intervallen											Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
(5)	0	0,00	0,00											0,00
(6)	1	0,17	0,00	0,00										0,00
(7)	2	0,33	0,01	0,00	0,00									0,01
(8)	3	0,50	0,02	0,01	0,00	0,00								0,03
(9)	4	0,67	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00							0,06
(10)	5	0,83	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00						0,13
(11)	6	1,00	0,10	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00					0,22
(12)	7	1,17	0,13	0,10	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00				0,35
(13)	8	1,33	0,15	0,13	0,10	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00			0,50
(14)	9	1,50	0,17	0,15	0,13	0,10	0,06	0,04	0,02	0,02	0,00			...
(15)	10	1,67	0,19	0,17	0,15	0,13	0,10	0,06	0,04	0,06	0,02			
(16)	11	1,83	0,20	0,19	0,17	0,15	0,13	0,10	0,06	0,12	0,07			
(17)	12	2,00	0,20	0,20	0,19	0,17	0,15	0,13	0,10	0,21	0,14			
(18)	13	2,17	0,20	0,20	0,20	0,19	0,17	0,15	0,13	0,30	0,24			
(19)	14	2,33	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19	0,17	0,15	0,40	0,36			
(20)	15	2,50	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19	0,17	0,49	0,47			

(Fortsetzung)



▣ **Abb. 3.10** Ganglinie des Abflusses (Q) für den mittenbetonten Effektivniederschlag (N_{eff}) aus **Tab. 3.9**. Der infiltrierende Teil des Bemessungsniederschlags wurde ebenso wie der Basisabfluss ausgeblendet. Anmerkung: Jeder Zeitschritt des Niederschlags (0,167 h) ist als schmaler Balken dargestellt. Der achte schmale Balken, der einen Zwischenwert einnimmt, kommt daher, dass dieser Zeitschritt einen Teil des ersten Intervalls eines mittenbetonten Niederschlags (erste Zeile in **Tab. 3.9**) und einen Teil des zweiten Intervalls (zweite Zeile in **Tab. 3.9**) enthält

Literatur

1. Gericke OJ, Smithers JC (2014) Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. *Hydrol Sci J* 59:1935–1971. ▶ <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866712>
2. Blume T, Zehe E, Bronstert A (2007) Rainfall-runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. *Hydrol Sci J* 52:843–862. ▶ <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.843>
3. Natural Resources Conservation Service (2007) Hydrographs. In: *National engineering handbook*. Part 630 hydrology, chapter 16. US Department of Agriculture, Washington
4. Dyck S, Peschke G (1995) *Grundlagen der Hydrologie*. Verlag für Bauwesen, Berlin
5. Sherman LK (1932) Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Eng News-Record* 108:501–505
6. Kuichling E (1889) The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. *Trans Am Soc Civ Eng* 20:1–56
7. Cleveland G, Thompson DB, Fang X (2011) Use of the rational and modified rational methods for hydraulic design. *Res Rep 0-6070-1*: Texas Tech Center for Multidisciplinary Research in Transportation, Lubbock
8. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (2006) *Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen*. Arbeitsbl DWA-A 118: Hennef
9. Bronstert A, Agarwal A, Boessenkool B et al (2018) Forensic hydro-meteorological analysis of an extreme flash flood: The 2016-05-29 event in Braunsbach, SW Germany. *Sci Total Environ* 630:977–991. ▶ <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.241>
10. Maniak U (2016) *Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Springer, Berlin
11. Patt H, Jüpner R (2013) *Hochwasser-Handbuch Auswirkungen und Schutz*. Springer, Berlin
12. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016) *Loseblattsammlung Hydrologische Planungsgrundlagen*. Augsburg
13. Natural Resources Conservation Service (2010) Time of concentration. In: *National engineering handbook*. Part 630 hydrology, chapter 15. US Department of Agriculture, Washington
14. Deutscher Wetterdienst (2017) *Raster der Wiederkehrintervalle für Starkregen (Bemessungsniederschläge) in Deutschland (KOSTRA-DWD)*, Version 2010R. Climate Data Center, Offenbach am Main
15. Maidment D (1993) *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill Education, New York
16. Lutz W (1984) *Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen*. Mitt Inst Hydrol Wasserwirt 24: Universität Karlsruhe
17. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1982) *Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten*. Teil I: Analyse. Regeln zur Wasserwirtschaft 112: Paul Parey, Hamburg
18. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1999) *Hochwasserabflüsse*. Schriften 124: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn
19. Caspary HJ (1987) Näherungslösung für regionalisierte Einheitsganglinien mit Hilfe linearer Speicherkaskaden. *Wasserwirtschaft* 77:19–23
20. Caspary HJ (1987) Analytische Lösung für die regionalisierte Einheitsganglinie des U.S. Soil Conservation Service. *Wasser & Boden* 39:623–626
21. Mockus V (1957) Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application. American Geophysical Union, Sacramento

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

