



# Grundlagen der Abflussentstehung, Sturzfluten und dezentralen Hochwasser- schutzmaßnahmen

- 2.1 **Begriffe und Definitionen des  
Landschaftswasserhaushalts – 12**
  - 2.2 **Starkregen – Auslöser für unterschiedliche  
Hochwasserarten – 15**
  - 2.3 **Ansätze und Wirkung dezentraler Hochwasser-  
schutzmaßnahmen – 24**
- Literatur – 29**

## 2.1 Begriffe und Definitionen des Landschaftswasserhaushalts

Dieses Kapitel beschreibt den Landschaftswasserhaushalt und wesentliche Begriffe, Komponenten und Prozesse, die beim Niederschlag-Abfluss-Prozess von Bedeutung sind. Darüber hinaus werden Einzugsgebiete charakterisiert, da sie die wesentliche räumliche Bezugsgröße zur Bilanzierung von Wasserflüssen darstellen. Eine Übersicht wichtiger, in diesem Handbuch verwendeter Begriffe und Definitionen ist glossarartig in ▶ Abschn. 2.1.4 zusammengestellt. Die Inhalte stützen sich auf etablierte Grundlagenwerke [1–4].

### 2.1.1 Komponenten und Bilanzgleichung des Wasserhaushalts

Für Hochwasserereignisse hat der Niederschlag eine zentrale Bedeutung. Seine Eigenschaften bestimmen in erheblichem Maße die Eigenschaften einer Überflutung. Die Begriffe Überschwemmung, Überflutung und Hochwasser werden hier synonym als Überbegriff für Überschwemmungen aller Art verwendet. Eine Abgrenzung unterschiedlicher Überschwemmungstypen erfolgt in ▶ Abschn. 2.2; dort wird auch auf unterschiedliche Starkregenarten eingegangen. Der Niederschlag ( $N$ ) teilt sich auf in die Komponenten abfließender oder abflusswirksamer oder effektiver Niederschlag ( $N_{\text{eff}}$ ), Evapotranspiration ( $ET$ ) und Änderung des Gebietsrückhalts bzw. Gebietspeichers ( $\Delta S$ ). Zusammen bilden sie eine geschlossene Bilanzgleichung (2.1), die besagt, dass alles Wasser, das sich als Abfluss in einem Gewässer wiederfindet, seinen Ursprung im Niederschlag hat:

$$N_{\text{eff}} = N - ET - \Delta S \quad (2.1)$$

Die Bezeichnungen abfließender oder abflusswirksamer oder effektiver Niederschlag haben sich im deutschen Sprachraum eingebürgert,

da häufig nicht zwischen Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss unterschieden werden kann oder die Unterscheidung nicht zweckmäßig ist. Gleiches gilt für den Begriff Direktabfluss, der ebenfalls den Teil des Niederschlags bezeichnet, der unmittelbar oder nur mit kurzer zeitlicher Verzögerung nach einem Regen einem Gewässer zufließt. Er ist ebenfalls synonym zum effektiven Niederschlag und wird oft verwendet, wenn  $N_{\text{eff}}$  einem Gewässer zugeflossen ist. Trotz des ähnlichen Namens, darf aber  $N_{\text{eff}}$  keinesfalls mit dem Niederschlag  $N$  gleichgesetzt werden, da der Gebietsrückhalt  $\Delta S$  bei den meisten (kleineren und mittleren) Regen wesentlich größer als  $N_{\text{eff}}$  ist und dann  $N_{\text{eff}}$  nur einen kleinen Anteil des Niederschlags ausmacht.

Verglichen mit  $N$  und  $N_{\text{eff}}$  ist  $ET$  bei Hochwasserereignissen üblicherweise sehr klein, weshalb  $ET$  in der quantitativen Betrachtung großer Niederschlag-Abfluss-Ereignisse vernachlässigt werden kann. Die Speicheränderung, d. h. der Teil des Niederschlags, der bei einem Regen im Gebiet zurückgehalten wird, ergibt sich aus der Wassermenge, die infiltriert, und dem Wasser, das an der Oberfläche, z. B. auf Pflanzen oder in Mulden, zurückgehalten wird.  $N_{\text{eff}}$  entspricht also bei kurzzeitiger Betrachtung der Differenz von  $N$  und  $\Delta S$ :

$$N_{\text{eff}} = N - \Delta S \quad (2.2)$$

Die wesentliche Herausforderung bei der Bestimmung von  $N_{\text{eff}}$  liegt daher in der Schätzung des Gebietsrückhalts  $\Delta S$ , der von unterschiedlichen Aspekten abhängt und sich über die Zeit verändert. Sind  $N$  und  $N_{\text{eff}}$  bekannt, lässt sich aus ihrem Quotienten der volumetrische Abflussbeiwert ( $\Psi$ ) bestimmen. Er ist eine dimensionslose Verhältniszahl und variiert zwischen Null und Eins. Ein Wert von  $\Psi = 0,6$  bedeutet, dass 60 % des Niederschlags abfließen.

$$\Psi = \frac{N_{\text{eff}}}{N} \quad (2.3)$$

In der ingenieurhydrologischen Praxis spielen Abflussbeiwerte (und Ansätze, sie zu bestimmen) eine wichtige Rolle, um das zu erwartende Abflussvolumen abzuschätzen. Abflussbeiwerte sind hoch bei flachgründigen Standorten mit geringem Porenvolumen, bei Böden mit hohen Tongehalten, bei hohem Anteil überbauter und versiegelter Flächen im Einzugsgebiet und bei intensivem Ackerbau mit hohem Reihenkulturanteil und wendender Bodenbearbeitung. Umgekehrt treten niedrige Abflussbeiwerte häufig bei geringem Versiegelungsgrad, hohem Waldanteil und auf tiefgründigen, durchlässigen Standorten auf. Auf landwirtschaftlichen Nutzflächen können konservierende Maßnahmen (z. B. Mulchbedeckung  $\geq 30\%$  oder nicht-wendende Bodenbearbeitung) die Abflussbeiwerte deutlich reduzieren (vgl. ► Abschn. 4.5.3).

Wenn hier von Niederschlag gesprochen wird, ist üblicherweise der Gebietsniederschlag gemeint, also die mittlere (abflusswirksame) Niederschlagshöhe eines Einzugsgebietes. Sie ist für den Hochwasserabfluss von grundlegender Bedeutung, da sie multipliziert mit der Einzugsgebietsfläche ( $A_{EZG}$ ) das Abflussvolumen ( $Q$ ) ergibt:

$$Q = N_{eff} \cdot A_{EZG} \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Wichtige Prozesse des Niederschlag-Abfluss-Vorgangs und ihre Terminologie

Der Abflussprozess gliedert sich in drei wesentliche Vorgänge: i) die Bildung von Effektivniederschlag (Abflussbildung) auf der Fläche, ii) die Bündelung des Effektivniederschlags in der Fläche (Abflusskonzentration) und iii) den Fließprozess in Gerinnen und Gewässern (Wellenablauf). Die Vorgänge laufen gleichzeitig ab und können in zahlreiche Unterprozesse aufgegliedert werden. Da der Fokus des Handbuchs auf kleinen Einzugsgebieten und damit vor allem auf den Bereichen oberhalb der Gewässer III. Ordnung

liegt, wird der Wellenablauf in dauerhaften Gewässern weitgehend ausgeblendet. Praxis-taugliche Verfahren zu seiner Beschreibung können beispielsweise den Veröffentlichungen der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg entnommen werden [5–7].

Die Abflussbildung (► Kap. 4) hängt von der Zwischenspeicherung des Niederschlags auf der Vegetation (Interzeption), der Wasserspeicherung auf der Bodenoberfläche und der Infiltration ab. Besonders bedeutsam ist die Infiltration, die ihrerseits von Eigenschaften der Oberfläche und des Bodens bestimmt wird.

Die Abflusskonzentration (vgl. ► Kap. 5) erfolgt, während der abflusswirksame Niederschlag über ober- und unterirdische Fließpfade, die an der Wasserscheide beginnen und bis in die Gewässer reichen, lateral abfließt. Wesentliche Kenn- und Einflussgrößen der Abflusskonzentration sind die Länge und Dichte der Fließpfade sowie deren hydraulische Eigenschaften. Sie beeinflussen die Geschwindigkeit, mit der Wasser aus der Fläche abgeleitet wird, und damit auch die Scheitelhöhe einer Abfluss- oder Hochwasserwelle. Grundsätzlich gilt: Je länger und hydraulisch rauer der Fließweg, desto langsamer der Abfluss und desto geringer der Scheitel einer Abflusswelle. Die Anzahl landschaftsgliedernder Elemente und Strukturen und deren Beziehung zueinander hat daher einen hohen Einfluss auf den Wasser- und Stoffhaushalt eines Einzugsgebietes [8].

Häufig wird Abfluss anhand seiner Fließpfade in (Land-)Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss unterschieden. Oberflächenabfluss im engeren Sinn ist Wasser, das gar nicht in den Boden infiltriert, z. B. weil die Oberfläche versiegelt, verschlammte oder der Bodenporenraum gesättigt ist. Häufig infiltriert Oberflächenabfluss auch entlang des Fließpfades und wird dann zu Zwischenabfluss, häufig auch Interflow genannt, um lateral (oberflächennah) im Boden, z. B. entlang von Horizontgrenzen abzufließen.

Umgekehrt exfiltriert Zwischenabfluss entlang des Fließweges auch häufig z. B. am Hangfuß, weswegen sich beide Abflusskomponenten oft schlecht trennen lassen. Wesentlich ist, dass beide Komponenten im Vergleich zum Grundwasserabfluss hohe Fließgeschwindigkeiten aufweisen. Dadurch sind sie meist gemeinsam für den Abfluss bei starken Niederschlägen verantwortlich. Zusammen werden sie auch als Direktabfluss bezeichnet, da sie zeitlich unmittelbar nach einem Niederschlagsereignis einem Gewässer zufließen. In diesem Handbuch erfolgt keine strenge Trennung zwischen beiden Komponenten. Oberflächenabfluss wird als Synonym für alle Abflussarten verwendet, die mit nur kurzer Verzögerung nach einem Regen an oder nahe der Oberfläche auftreten und in ein Gewässer gelangen bzw. diesem zufließen.

Zur quantitativen Beschreibung der verschiedenen Wasserhaushaltskomponenten hat sich eine bestimmte Terminologie etabliert. Dabei werden Wortverbindungen verwendet, die die jeweiligen Komponenten benennen und diese mit einem Substantiv verbinden, das die Dimension der Komponente oder deren Bezugsgröße beschreibt. Beispielsweise wird häufig von der Niederschlagshöhe oder -intensität und von Abfluss bzw. Abfluss-

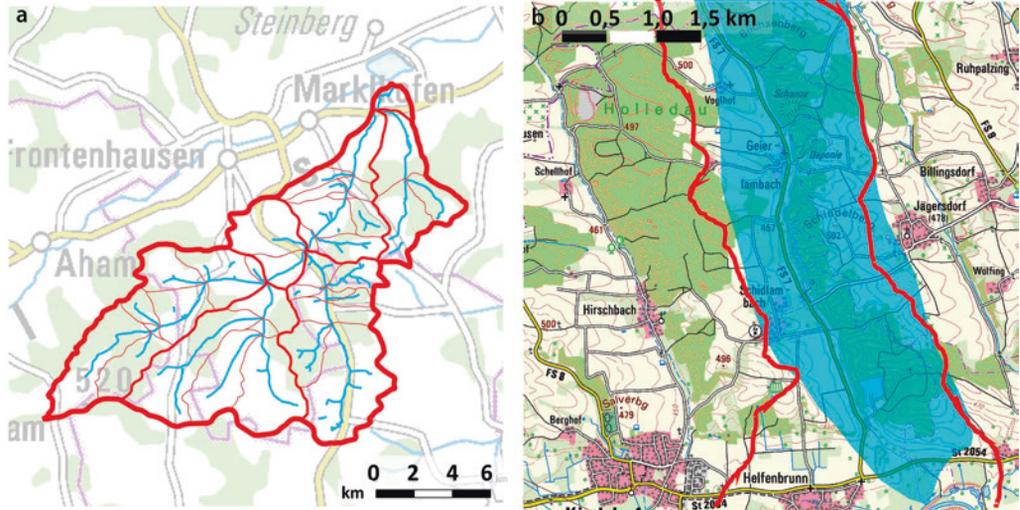
summe oder -spende gesprochen. ■ Tab. 2.1 enthält eine Zusammenfassung dieser Substantive, die die Dimension ausdrücken.

### 2.1.3 Einzugsgebiete und ihre Abgrenzung

Einzugsgebiete sind die zentrale Flächeneinheit zur Beschreibung von Wasserflüssen. Sie werden durch Wasserscheiden begrenzt und umfassen das Gebiet, von dem ein konkreter Bezugspunkt seinen Abfluss bezieht. Solche Bezugspunkte können der Hangfuß eines Ackers, in den die darüber liegende Nutzfläche entwässert, die Mündung eines Baches in ein anderes Gewässer oder eine Ortschaft sein, durch die ein Bach fließt. Einzugsgebiete lassen sich daher beliebig fein in Teil-einzugsgebiete untergliedern, solange bis eine Wasserscheide erreicht ist (■ Abb. 2.1, links). Sie können, abhängig von der Lage des Bezugspunktes, wenige Quadratmeter bis viele tausend Quadratkilometer groß sein. Bei kleinräumiger Betrachtung von Wasserflüssen in der Landschaft müssen neben den natürlichen Wasserscheiden, die sich aus der Topographie bzw. den geologischen Eigenschaften des Untergrunds ergeben, auch alle die Landschaft zerschneidenden Elemente

■ Tab. 2.1 Übliche Wortverbindungen zur Beschreibung von Wasserhaushaltsgrößen und deren Bedeutung

Wortverbindung mit	Einheit	Erklärung
...summe	Menge, z. B. $\text{m}^3$ , l	„...fluss“ summiert über eine bestimmte Zeitspanne; wird oft synonym zu „...volumen“ verwendet
...fluss	Menge pro Zeit, z. B. $\text{l s}^{-1}$ , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Volumen je Zeiteinheit (Volumenstrom); Quotient aus „...summe“ und einer Zeit
...höhe	Längeneinheit, z. B. mm, cm	Quotient aus „...summe“ und einer Bezugsfläche (oft $1 \text{ m}^2$ )
...spende	Menge pro Zeiteinheit und Fläche, z. B. $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$	Quotient aus „...fluss“ und der Fläche des betrachteten Gebiets
...stärke, ...intensität, ...rate	Höhe pro Zeit, z. B. $\text{mm min}^{-1}$ , $\text{mm h}^{-1}$ , $\text{cm d}^{-1}$	Quotient aus „...höhe“ und der betrachteten Zeitspanne



■ **Abb. 2.1** Untergliederung des 46 km<sup>2</sup> großen Schwimmbacheinzugsgebietes bei Marklkofen in Niederbayern (links) anhand der topographischen Wasserscheiden in unterschiedliche feine Teileinzugsgebiete (verschieden starke rote Linien). Die blauen Linien kennzeichnen das Gewässernetz. Die rechte Tafel zeigt einen Landschaftsausschnitt bei Kirchdorf an der Amper mit unterschiedlicher topographischer (rote Linien) Wasserscheide und hydrogeologischem Einzugsgebiet (hellblaue Fläche) (Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung)

der Infrastruktur wie Wege und Straßen, Wälle oder Bahndämme berücksichtigt werden. Sie können zusätzliche, künstliche Wasserscheiden schaffen sowie die natürliche Einzugsgebietsabgrenzung und das Fließpfadmuster ändern.

Darüber hinaus wird zwischen dem oberirdischen bzw. topographischen Einzugsgebiet und dem unterirdischen bzw. hydrogeologischen Einzugsgebiet unterschieden. Beide stimmen in ihrer Größe und Lage nur selten überein (■ Abb. 2.1, rechts). Bei Starkregenereignissen ändert sich der Grundwasserabfluss meist nur langsam. Es kommt vor allem auf den Oberflächenabfluss an, der durch das topographische Einzugsgebiet bestimmt wird. Dies erleichtert die Festlegung des Einzugsgebietes stark, auch wenn es im Bereich der Mikrowasserscheiden, d. h. auf Feld- oder Hangskala, immer noch schwierig sein kann, weil bereits die durch die Bodenbearbeitung verursachte

Rauheit den Wasserfluss leiten kann. Wenn hier Unsicherheiten bestehen und die genaue Abgrenzung wichtig ist, muss eine Kartierung der Fließpfade erfolgen (vgl. ► Anhang 8.8). Auch der meist langandauernde Abfluss bei der Schneeschmelze bietet eine gute Gelegenheit, die Fließpfade zu beobachten. Allerdings können sich die Fließpfade und damit die Einzugsgebietsgrenzen auch während eines Abflussereignisses ändern, z. B. wenn ein zuvor abflussableitender Rain plötzlich bricht oder überflutet wird.

#### 2.1.4 Begriffe, Definitionen, Synonyme und ihre Einheiten und Formelzeichen

Das Handbuch bedient sich vieler Fachbegriffe. Zur einfacheren Handhabung wurden die wichtigsten in ■ Tab. 2.2 glossarartig zusammengefasst.

Tab. 2.2 Beschreibung verwendeter Fachbegriffe, Formelzeichen und übliche Einheiten

Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme
Abflussbeiwert	$\psi$	–	Volumetrischer, meist ereignisspezifischer Quotient aus Direktabfluss- und Niederschlagssumme
Abflussganglinie	–	–	Siehe Ganglinie
Abflusskonzentration	–	–	Gesamtheit der Prozesse, die Abfluss bündeln und über laterale Fließpfade auf und unter der Landoberfläche aus der Fläche in die Gewässer ableiten
Abflusskurve	–	–	Siehe Ganglinie
Abflussminderung	–	–	Überbegriff für Maßnahmen, die zu einer Minderung des Abflusses eingesetzt werden können; Abflussminderung kann sowohl über den Rückhalt von Abflussvolumen als auch durch Verzögerung des Abflusses erreicht werden
Abflussrate	$q$	$l\ s^{-1},$ $m^3\ s^{-1}$	Wasservolumen eines Einzugsgebietes, das pro Zeiteinheit einen definierten Querschnitt passiert (Volumenstrom); Abfluss ist kaum direkt messbar und wird in der Regel indirekt über das Produkt aus Fließgeschwindigkeit und Querschnittsfläche ermittelt
Abflussscheitel	$q_p$	$l\ s^{-1},$ $m^3\ s^{-1}$	Höchster Abfluss einer Abflussschwell
Abflussspende	$q_s$	$l\ s^{-1}\ km^{-2},$ $mm\ h^{-1}$	Die Abflussspende ergibt sich, wenn die Abflussrate durch die Fläche des dazugehörigen Einzugsgebietes geteilt wird. Die Abflussspende quantifiziert den mittleren Abflussbeitrag einer Einheitsfläche (meist $1\ km^2$ oder bei gekürzten Einheiten $1\ m^2$ ). Je nach Einheitsfläche sind verschiedene Maßeinheiten gebräuchlich
Abflussverzögerung	–	–	Oberbegriff für die Wirkung von Maßnahmen, die den Abfluss entlang des Entwässerungsweges bremsen, z. B. durch Bewuchs in Wegseitengraben, der die hydraulische Rauheit erhöht
Abflussvolumen	$Q$	$m^3$	Wasservolumen eines Einzugsgebietes summiert über einen definierten Zeitraum
Abflusswirksamer Niederschlag	$N_{\text{eff}}$	mm	Anteil des Niederschlags, der nicht im Einzugsgebiet zurückgehalten wird und abfließt; Synonym zu Effektivniederschlag
Anfangsverlust	$A_v$	mm	Niederschlagsmenge, bis der erste (Oberflächen-)Abfluss einsetzt

(Fortsetzung)

Tab. 2.2 (Fortsetzung)			
Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme
Bemessung	–	–	Im Ingenieurwesen etablierter Begriff für das Festlegen von Größen, z. B. für den Ausbau eines Gewässers, für den Durchmesser eines Rohrs, für die Dimensionierung eines Rückhaltebeckens usw.
Dezentrale Hochwasserschutzmaßnahme	–	–	Oft kleine, unscheinbare Maßnahme zur Abflussminderung, die an vielzähligen Stellen im Einzugsgebiet und entlang des kompletten Entwässerungsweges umgesetzt werden kann; siehe auch Abflussminderung
Direktabfluss	$q_b$	$m^3 s^{-1}$	Summe aus Oberflächenabfluss und schnellem Zwischenabfluss; siehe Oberflächenabfluss
Drosselabfluss	$q_o$	$m^3 s^{-1}$	Durch ein Auslassorgan z. B. eine Lochblende oder einen Schieber an einem technischen Bauwerk begrenzte Abgabe.
Durchfluss	$q$	$m^3 s^{-1}$ , $l s^{-1}$	Analog zum Abfluss, wenn die genaue Zuordnung des Einzugsgebietes unklar ist
Durchflusskoeffizient	$C_o$	–	Durchflusskoeffizient durch ein Drosselorgan, abhängig von der Geometrie der Drosselöffnung
Durchflussvolumen	$Q$	$m^3$	Siehe Abflussvolumen
Eintrittswahrscheinlichkeit	$P_E$	%	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis definierter Größe erreicht oder überschritten wird. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird i. d. R. durch das mittlere Wiederkehrintervall quantifiziert und mit „einmal pro n Jahre“ oder als „n-jährliches“ Ereignis angegeben; siehe auch Wiederholungszeitspanne
Effektivniederschlag	$N_{eff}$	mm	Siehe abflusswirksamer Niederschlag
Einheitsganglinie	EGL	–	Standardisierte, dimensionslose Form der Abflusswelle, die durch einen Niederschlagsimpuls erzeugt wird; durch Dimensionierung, die die Einzugsgebiets- und Niederschlagsseigenschaften berücksichtigt, kann die zu erwartende, reale Abflussganglinie erzeugt werden
Einzugsgebiet	EZG	–	Durch (oberirdische und unterirdische) Wasserscheiden begrenzte Fläche, aus der ein Gewässer- oder Entwässerungssystem seinen Abfluss bezieht
Einzugsgebietsgröße	$A_{EZG}$	ha, $km^2$	Größe des oberirdischen Einzugsgebietes
Erdbeschleunigung	$g$	$m s^{-2}$	Naturkonstante $g = 9,81 m s^{-2}$
Filterstreifen	–	–	Siehe Grünstreifen

(Fortsetzung)

Tab. 2.2 (Fortsetzung)				
Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme	
Fließgeschwindigkeit	v	m s <sup>-1</sup>	(Durchschnittliche) Fließ- oder Strömungsgeschwindigkeit, mit der sich Abfluss entlang eines Fließpfades oder Gewässerabschnitts fortbewegt	
Fließgewässerlandschaft	–	–	Zusammenfassung von Fließgewässern mit vergleichbaren naturräumlichen und morphologischen Merkmalen (Geologie, Klima, Vegetation) zu Gewässerlandschaften [vgl. 9]	
Fließpfad	–	–	Abschnitt eines Entwässerungsweges, über den Oberflächenabfluss bei Starkregen von der Wasserscheide bis in ein Gewässer gelangt; Fließpfade können vielfältige Gestalt einnehmen und entsprechend des Abflusstyps z. B. in Schichtabflusstpfade, Rinnen und Rillen, Hangmulden, Gräben oder Gewässerteilstrecken unterschieden werden	
Flood-Routing	–	–	Siehe Routing	
Flusshochwasser	–	–	Siehe Flussüberschwemmung	
Flussüberschwemmung	–	–	Ereignis, bei dem vom Gewässer ausgehend das angrenzende Gebiet (Aue) durch große Abflüsse (hohes Flusswasser) überschwemmt wird	
Ganglinie	–	–	Zeitlich sortierte, meist graphisch dargestellte Werte einer Variablen wie Niederschlag oder Abfluss (z. B. Hochwasserwelle)	
Gebietsniederschlag	N	mm	Über eine definierte Fläche (meist ein Einzugsgebiet) gemittelte Niederschlagshöhe (im Gegensatz zum punktuellen Niederschlag an einem Regenmesser) eines festgelegten, oft variablen Zeitraums (z. B. ein Ereignis)	
GIS	–	–	Geographisches Informationssystem	
Grünstreifen	–	–	Meist Grasstreifen von geringer Breite (wenige Meter), die quer durchflossen werden und dazu dienen, die Sedimentkonzentration im Oberflächenabfluss unmittelbar vor einem schutzwürdigen Objekt zu senken; die Begriffe Gras-, Filter- oder Pufferstreifen werden hier synonym verwendet, obwohl sie in der Literatur teilweise unterschiedlich definiert werden	
Hochwasser	–	–	Überbegriff, der für Überschwemmungen aller Art und damit sowohl für Flussüberschwemmungen als auch für Sturzfluten verwendet wird; oberer Teil einer Abflussganglinie im Gegensatz zum mittleren Teil (Mittelwasser) und zum unteren Teil (Niedrigwasser) oder Basisabfluss	

(Fortsetzung)

■ Tab. 2.2 (Fortsetzung)

Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme
Hydrologische Boden- gruppe	HBG	–	Klassifikationsschema für Böden zur Abschätzung ihrer Abflussreaktion bei Regenereignissen. Die Einteilung der Böden erfolgt nach ihrer Korngrößenzusammensetzung und Gründigkeit in vier Klassen (A bis D), wobei Böden der Gruppe A bei Regen am wenigsten und Böden der Gruppe D am meisten Abfluss erwarten lassen
Jährlichkeit	$T_n$	$1 \text{ a}^{-1}$	Siehe Wiederholungszeitspanne
Konzentrationszeit	$t_c$	min	Zeit, die Oberflächenabfluss benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Bezugspunkt, z. B. einem Hangfuß, einem Grabenabschnitt oder einer Ortschaft zu fließen
Landnutzung	–	–	Landnutzung wird synonym zu Flächennutzung verwendet und beschreibt die Art der Inanspruchnahme von Böden und Landflächen durch den Menschen; häufig verwendete Landnutzungsklassen sind Grünland, Wald, Acker, Wasser, Siedlungs- und Infrastrukturfleichen
Mulchsaat	–	–	Eine Zwischenfrucht steht über den Winter auf dem Feld (meist abgestorben) und die folgende Reihenkultur wird mit einer leichten Bodenbearbeitung (je nach Reihenkultur meist Ende März bis Ende April) gesät. Da das Pflügen Ende Oktober/Anfang November entfällt, verkürzt Mulchsaat die Periode, in der der Boden unbedeckt bleibt. Eine durchgehende Bodenruhe wird aber nicht erreicht. Hierfür ist eine Mulchdirektsaat erforderlich. Eine hydrologisch wirksame Mulchschicht sollte die Oberfläche wenigstens zu 30 % bedecken
Mulchdirektsaat	–	–	Einsaat der Hauptfrucht in eine über den Winter abgestorbene Zwischenfrucht oder Untersaat ohne eine vorherige Bodenbearbeitung; wenn die Pflanzenreste von der Vorfrucht stammen, entfällt auch die Bearbeitung unmittelbar nach der Vorfrucht. Dann spricht man von Minimalbodenbearbeitung oder no-till-Verfahren. Die Mulchschicht einer Mulchdirektsaat bedeckt die Oberfläche üblicherweise immer > 30 %
Niederschlag	–	–	Niederschlag wird hier synonym für Regen verwendet (umfasst aber eigentlich alle Arten von flüssigem oder eisförmigem Wasser, das sich auf dem Boden oder der Vegetation absetzt)
Niederschlagsganglinie	–	–	Siehe Ganglinie
Niederschlagshöhe	N	mm	Niederschlagsmenge in $l \text{ m}^2$ für einen definierten, aber meist variablen Zeitraum (z. B. ein Ereignis); durch Kürzen der Einheiten ergibt sich aus $l \text{ m}^{-2}$ eine Höhe in mm
Niederschlagsintensität	–	$\text{mm h}^{-1}$	Niederschlagshöhe pro Zeit, meist $\text{mm d}^{-1}$ , $\text{mm h}^{-1}$ oder $\text{mm min}^{-1}$

(Fortsetzung)

Tab. 2.2 (Fortsetzung)

Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme
Oberflächenabfluss	$q_D$	$m^3 s^{-1}$	Überbegriff für Wasser, das zeitweise auf der Landoberfläche oder außerhalb dauerhaft wasserführender Gewässer z. B. als Schichtabfluss oder als Abfluss in Rinnen, Rillen, Mulden oder Gräben auftritt. Oberflächenabfluss ergibt sich beispielsweise aus der Schneeschmelze oder dem Anteil des Niederschlags, der mit nur kurzer zeitlicher Verzögerung nach einem Regen abfließt. Oberflächenabfluss wird hier synonym zu Effektivniederschlag und Direktabfluss verwendet und enthält üblicherweise auch (exfiltrierenden) Zwischenabfluss Außerhalb bebauter oder befestigter Flächen bezeichnet das Wasserhaushaltsgesetz Oberflächenabfluss aktuell als wild abfließendes Wasser (§ 3 und 37 WHG). Innerhalb bebauter oder befestigter Flächen wird Oberflächenabfluss rechtlich als Niederschlagswasser bzw. Abwasser betrachtet (vgl. § 54 WHG). In diesem Handbuch wird einheitlich der Begriff Oberflächenabfluss verwendet
Oberflächenrouting	–	–	Siehe Routing
Pufferstreifen	–	–	Siehe Grünstreifen
Rauigkeit	$k$	$m^{1/3} s^{-1}$	Siehe Rauheit
Rauheit	$k$	$m^{1/3} s^{-1}$	Rauheit beeinflusst den Abflusswiderstand und wird hier synonym für den Beiwert der Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung verwendet; dieser entspricht dem in der englischsprachigen Literatur verwendeten Kehrwert des Manning-Beiwerts $n$
Routing	–	–	Überbegriff für Verfahren, die die Verlagerung (Translation) und/oder den Rückhalt (Retention) von Abfluss entlang der Fließstrecke berechnen (beispielsweise Auseinander- und Zusammenfließen von Oberflächenabfluss auf der Landoberfläche oder der Ablauf einer Hochwasserwelle in einem Gewässer und der angrenzenden Aue)
Starkregen	–	–	Regen mit großer Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit; der Deutsche Wetterdienst unterscheidet beispielsweise Starkregen, heftigen Starkregen und extrem heftigen Starkregen durch Niederschlagsmengen von 15–25, 25–40 und >40 $mm h^{-1}$ bzw. 20–35, 35–60 und >60 $mm$ in 6 h. Diese Kategorien erlauben allerdings keine Rückschlüsse auf die regionale Häufigkeit eines solchen Regens, weshalb zahlreiche weitere (oft länderspezifische) Definitionen für Starkregen existieren
Sturzflut	–	–	Plötzlich und meist mit großer Wucht auftretender Abfluss, der sich zu Sturzbächen sammelt, die „von oben, aus der Fläche kommend“ in Richtung tiefer gelegener Bereiche und Gewässer strömen; Folge von meist kurzen, besonders heftigen und lokal begrenzten

(Fortsetzung)

Tab. 2.2 (Fortsetzung)

Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme
Teileinzugsgebiet	TEZG	–	Durch Wasserscheiden abgegrenztes Teilgebiet eines größeren Einzugsgebietes
Untersaat	–	–	(Meist temporäre) Einsaat niedrigwüchsiger Pflanzenarten unter eine Hauptfrucht, die mit dieser nicht in Konkurrenz stehen. Untersaaten können zum Schutz des Bodens bei weitem Reihenabstand dienen und nach der Ernte der Hauptfrucht umgebrochen werden (z. B. Wintergetreideuntersaat nach der Saat von Mais), sie können aber auch zu Etablierung der Folgekultur ohne zeitliche Lücke dienen und beginnen dann nach der Ernte der Hauptfrucht stark zu wachsen (z. B. Untersaat von Klee bei Getreide; besonders im organischen Landbau häufig praktiziert)
Wasserrückhalt	–	mm	Summe des Niederschlags, der nicht unmittelbar (als Direktabfluss) abfließt; Differenz aus Gesamtniederschlag und Effektivniederschlag; Wasserrückhalt kann durch Maßnahmen des dezentralen Hochwasserschutzes gefördert werden
Wassersäulenhöhe	$h_o$	m	Höhe der Wassersäule über der Drosselblende eines Rückhaltebeckens
Weillenscheitel	$q_p$	$l\ s^{-1}$	Siehe Abflussscheitel
Wiederholungszeitspanne	$T_n$	a	Durchschnittliche Zeitspanne in Jahren, in dem ein Starkniederschlag oder Hochwasserereignis, dessen Jährlichkeit der Wiederkehrzeit entspricht, statistisch genau einmal auftritt; siehe auch Eintrittswahrscheinlichkeit
Wild abfließendes Wasser	–	–	Siehe Oberflächenabfluss
Wiederkehrintervall	–	–	Siehe Wiederholungszeitspanne
Zwischenfrucht	–	–	Nach der Ernte einer Hauptfrucht zur Bodenbegrünung angebaute, schnell keimende Kultur, die normalerweise nicht genutzt wird und die nur die Lücke zwischen den Kulturen bis zum Anbau der nächsten Hauptfrucht verkleinern soll

## 2.2 Starkregen – Auslöser für unterschiedliche Hochwasserarten

2

Hochwasser heißt zunächst nur, dass die Wasserführung in einem Gewässer – vom zeitweise wasserführenden Graben bis zum Strom – gegenüber dem mittleren Abfluss, der auch null sein kann, erhöht ist. Hier werden speziell die Hochwässer behandelt, die so groß sind, dass sie zu Überflutungen führen, weil die Kapazität der Hauptabflusssrinne überschritten wird. Auch dann ist Hochwasser nicht gleich Hochwasser. Sturzfluten und Flusshochwasser laufen unterschiedlich ab und lassen sich dadurch auch auf verschiedene Art und Weise beeinflussen. Um das Ausmaß einer Überflutung zu mindern, ist es daher wichtig zu wissen, wie ein Ereignis ausgelöst wird, wie Abfluss entsteht und wie er sich sammelt, überlagert und abfließt.

Auslöser einer Überflutung ist immer eine große Niederschlagsmenge. Dabei muss im Wesentlichen zwischen wolkenbruchartigen Schauern hoher Intensität und langanhaltenden, großflächigen Niederschlägen, sogenannten Landregen (bzw. einer Schneeschmelze), relativ geringer Intensität unterschieden werden (■ Tab. 2.3). Auch wenn dies keine eindeutige Trennung ist, sondern Übergänge ebenso auftreten können, ist die Unterscheidung der beiden Niederschlags-

typen wichtig, weil der Niederschlagstyp bestimmt, wie Abfluss entsteht und ob eine Sturzflut oder eine (Fluss-) Überschwemmung folgt. Ebenso unterscheiden sich auch die Maßnahmen zur Abflussminderung.

Ein gemeinsames Merkmal großer Niederschlagsereignisse ist, dass sie selten, aber natürlich sind. In der wissenschaftlichen Literatur herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass im Zuge des Klimawandels von einer weiteren Zunahme und Verschärfung extremer Wetterlagen auszugehen ist [10–13]. Bis 2050 ist mit etwa einer Verdopplung extremer Niederschläge gegenüber 2015 zu rechnen. Starkregen und in Folge Überflutungen sind daher nirgendwo vermeidbar. Es gilt: Nach der (Sturz-)Flut ist vor der (Sturz-)Flut oder anders gesagt, das Auftreten einer Überschwemmung ist immer nur eine Frage der Zeit. Dies gilt grundsätzlich auch dann, wenn Schutzmaßnahmen (Dämme, Retentionsbecken) ergriffen wurden. Schutzmaßnahmen vergrößern nur das Wiederkehrintervall von Überschwemmungen, können sie aber nicht vollständig verhindern [14]. Schutzmaßnahmen können daher auch grundsätzlich nicht versagen, sondern nur die in sie gestellten Erwartungen können falsch sein.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Starkregen, die Sturzfluten bzw. Flussüberschwemmungen verursachen, ist deren räum-

■ Tab. 2.3 Übersicht über Niederschlagshöhe, Ereignisdauer und mittlere Ereignisintensität von Sturzfluten (S) und Bach- bzw. Flussüberschwemmungen (F) in Bayern [15–18]

Hochwasser-typ	Datum	Ort/Gebietsgröße	Niederschlagshöhe (mm)	Ereignisdauer (h)	Mittlere Intensität (mm h <sup>-1</sup> )
F	Mai 1999	Südbayern	40–280	72	0.5–4.2
F	August 2005	Südbayern	60–216	84	0.8–2.6
F	August 2002	Südostbayern	140	72	2
S/F	01.06.2016	Simbach/Inn	167	40	4.2–22
S	25./26.06.2016	Bayerischer Wald	65	3	22
S	29./30.05.2016	Oberzenn	91	1	91

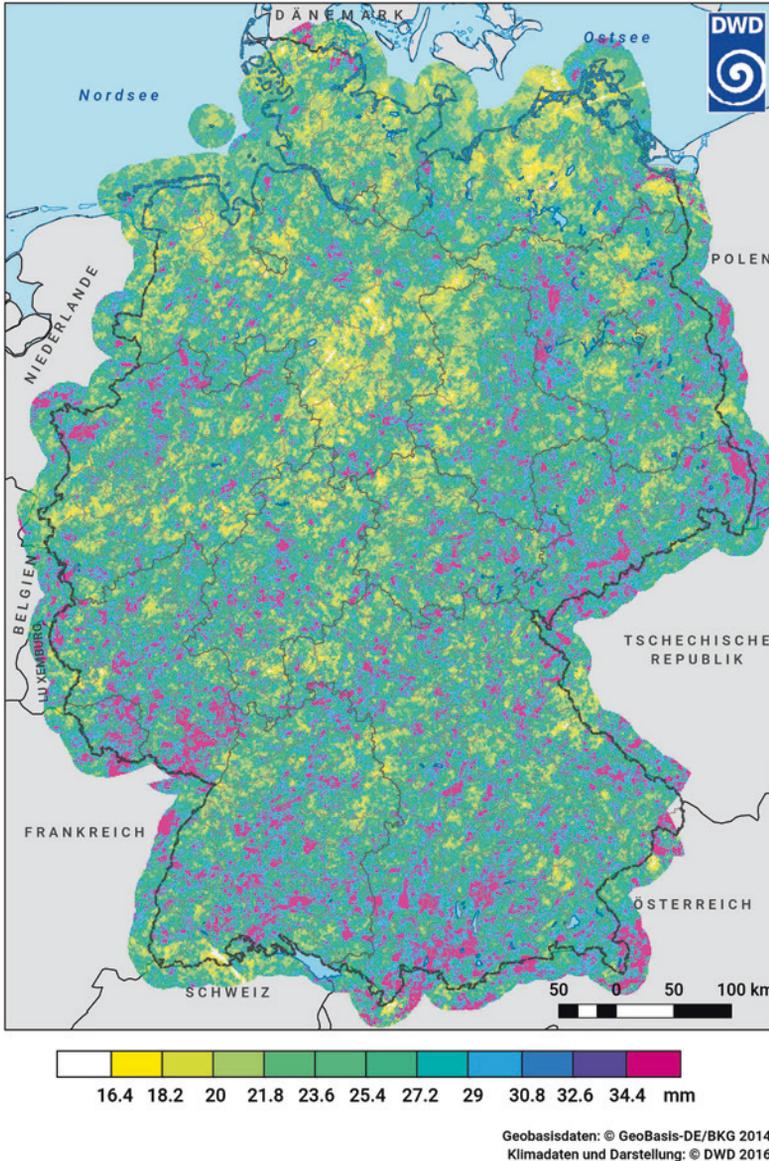
liche Ausdehnung. Flussüberschwemmungen sind die Folge großer Tiefdruckkomplexe oder langsam vordringender Fronten, die große Einzugsgebiete (wenige bis viele tausend km<sup>2</sup>) überregnen und meist an das Auftreten typischer Großwetterlagen gekoppelt sind (z. B. Vb oder Tief Mitteleuropa) [19–21]. Daher treten solche Regen selten überraschend auf. Typische Vorwarnzeiten liegen in der Größenordnung von vielen Stunden bis hin zu wenigen Tagen. Neben ihrer großen Ausdehnung verfügen sie auch über ein typisches räumliches Muster, da Niederschlagsschwerpunkte üblicherweise an die Orographie gekoppelt sind. Demgegenüber entstehen Wolkenbrüche, die Sturzfluten auslösen, durch die rasche Hebung feucht-warmer Luftmassen (Konvektion). Einzelne Gewitterzellen sind immer klein, mit einem Radius von typischerweise unter 5 km [22–24]. Erst durch ihre Zugbahn und die Überlagerung mehrerer Zellen zu Multi- oder Superzellen können größere Gebiete betroffen sein. Durch die geringe Ausdehnung setzt der Niederschlag oft unerwartet und plötzlich ein. Typische Vorwarnzeiten vor Wolkenbrüchen liegen in der Größenordnung von mehreren Minuten bis hin zu wenigen Stunden. Ein weiteres Kennzeichen von wolkenbruchartigen Starkregen ist, dass sie kein typisches räumliches Muster aufweisen. Solche Starkregen und in Folge Sturzfluten können also nicht nur plötzlich, sondern auch überall und unabhängig von der Topographie auftreten. Das wird anhand der Extremwertauswertung radarbasierter Niederschlagsmessungen aus dem Zeitraum von 2001 bis 2018 in [Abb. 2.2](#) deutlich [25, 26]. Die räumliche Vorhersagegenauigkeit beschränkt sich daher bisher auf die Angabe einer Region oder die Ebene von Landkreisen.

Starke, lang andauernde Landregen werden meist als ausgesprochen nasse, aber nur selten als bedrohliche Ereignisse wahrgenommen. Sie können dazu führen, dass Gräben und kleine Gewässer deutlich erhöhte

Abflüsse führen. Auch das Auftreten von Oberflächenabfluss ist möglich. Kritische Abflüsse und größere Überschwemmungen durch Ausuferungen von Gewässern treten aber in der Regel im überwiegenden Teil eines Einzugsgebietes nicht auf. Erst in tief gelegenen Bereichen des Einzugsgebietes werden die Kapazitäten der bestehenden Abflussbahnen überschritten Bach- oder, denn Flussüberschwemmung entstehen durch die Bündelung und Überlagerung von Abfluss aus dem gesamten Einzugsgebiet. Die Aue wird vom Gewässer ausgehend überschwemmt ([Abb. 2.3](#)). Sind Auen vom Gewässer entkoppelt, besteht die Gefahr, dass Dämme oder Deiche brechen. Das gilt vor allem für große Flusssysteme, wo sich der Wellenablauf über viele Tage erstrecken kann, da das Risiko einer Durchweichung des Dammkörpers mit der Dauer des Einstaus steigt.

Sturzfluten (Englisch: flash floods=blitzartige Überflutung) entstehen dagegen durch einen heftigen und wegen der hohen Intensität oft auch als bedrohlich empfundenen Starkregen. Wesentlich ist, dass die Intensität solcher Regen zeitweise größer als die Infiltrationsrate des Bodens ist. Dadurch bildet sich im Bereich der Starkregenzelle schnell und flächig Oberflächenabfluss. Das gilt insbesondere bei hohem Versiegelungsgrad oder wenn die Bodenoberfläche nicht oder nur spärlich bedeckt ist, wie im Mai und Juni, wenn die Pflanzendecke nach einer Frühjahrssaat noch wenig ausgebildet ist. Dann verschlämmt die Bodenoberfläche und wird nahezu wasserundurchlässig ([Abb. 2.4](#)). Entsteht Oberflächenabfluss, folgt er noch in der Fläche dem größten Gefälle und fließt auf dem Landweg über Rinnen und Rillen, Hangmulden und Gräben bis in Vorfluter, Bäche und größere Gewässer. Bei entsprechend hoher Niederschlagsrate und insbesondere bei steilem Relief „stürzt“ das Wasser dabei regelrecht aus der Fläche. Der Abfluss in Tiefenlinien, Sammelgerinnen und Vor-

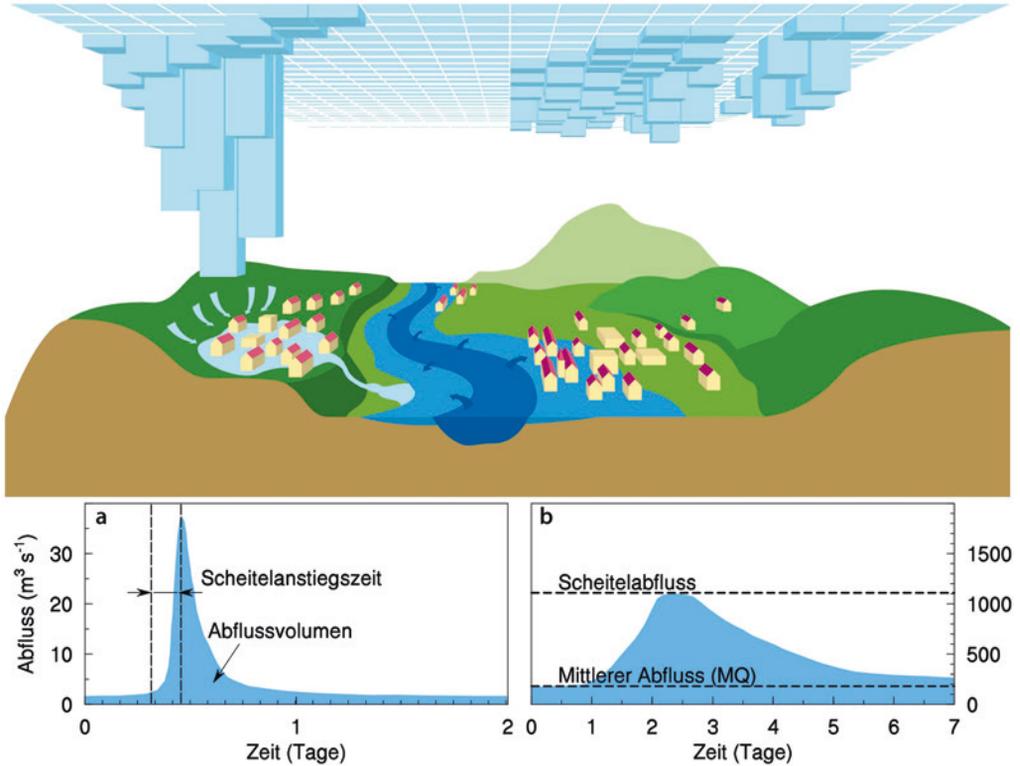
**Extremwert-Auswertung Statistischer Niederschlag in Deutschland  
D=1h T=20a (RADARKLIMATOLOGIE, 2001-2018)  
V2017.002**



**Abb. 2.2** Niederschlagsmenge 20-jährlicher, einstündiger Niederschläge in Deutschland basierend auf Daten der Radarklimatologie. (Quelle: Deutscher Wetterdienst, 2019)

flutern kann binnen kurzer Zeit stark ansteigen (Abb. 2.3, linke untere Tafel). Im Gegensatz zu Fluss- oder Bachüberschwemmungen erwächst das große Schadenspotenzial bei diesen Ereignissen wegen ihrer kleinen räum-

lichen Ausdehnung nicht durch den Einstau gewässernaher Bereiche, sondern vor allem aus der Zerstörung von Infrastruktur und Siedlungsbereichen, die sich in oder entlang von Abflusspfaden befinden. Ein erheb-



■ **Abb. 2.3** Schematische Gegenüberstellung der unterschiedlichen Gefährdungslagen durch Überflutungen infolge von Starkregen (a) und durch Ausuferung von Gewässern (b) [obere Grafik: 27]



■ **Abb. 2.4** Zunehmende Verschlammung einer ungeschützten Bodenoberfläche nach 1 mm, 30 mm, 40 mm und 70 mm Niederschlag (von links nach rechts). (Foto: K. Auerswald)

liches Risiko geht dabei vor allem von der hohen Fließgeschwindigkeit des Wassers aus. Letztere verleiht dem Abfluss zum einen Überraschungspotenzial und zum andern eine

enorme Schleppekraft. Bereits ab wenigen Dezimetern Wasserstand vermag der Abfluss nicht nur beachtliche Schlammfrachten, sondern auch schweres Geröll, Bäume, Strohballen und (ab etwa 50 cm) auch schwere und voluminöse Gegenstände wie größere Geländewagen mitzureißen. Engstellen wie Brücken, Stege, Zäune, Verrohrungen oder Rechen können sich dann zu besonderen Gefahrenpunkten entwickeln, wenn dort Verklausungen auftreten und der Fließquerschnitt durch angeschwemmtes Treibgut verengt wird. Sturzfluten verursachen daher häufig katastrophale Schäden. Ihre Kraft und ihr, im Vergleich zu Flussüberschwemmungen blitzartiges Auftreten, birgt oft nicht nur große Gefahren für Hab und Gut, sondern auch für Leib und Leben.

## 2.3 Ansätze und Wirkung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen

2

Dezentrale Maßnahmen zum Hochwasserschutz sind oft kleine, unscheinbare Maßnahmen, die an einer Vielzahl von Stellen im Einzugsgebiet, oft abseits von Gewässern in der Fläche oder entlang der kompletten Entwässerungswege umgesetzt werden können. Ihre wesentliche Stärke liegt darin, Abfluss am oder nahe des Ortes der Abflusststehung zurückzuhalten oder zu bremsen. Sie schützen bei lokalen Ereignissen ganzheitlich und vermindern, bei konsequenter Umsetzung, hohe Abflüsse und die Verlagerung von Nährstoffen, Pflanzenschutzmitteln und Bodenmaterial. Größere, zentrale Hochwasserschutzmaßnahmen sind in dieser Hinsicht wirkungslos, da sie üblicherweise erst in den Mittel- und Unterläufen von Gewässern vorhanden sind und sich ihre Wirkung zwangsläufig auf den Bereich unterhalb der Maßnahme beschränkt.

Dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen sind Gegenstand vieler Publikationen [z. B. 28–34] und umfassen ein weites Spektrum. Zu ihnen gehören die Förderung der Versickerung auf landwirtschaftlichen Flächen (z. B. durch hohe und kontinuierliche Bodenbedeckung, nicht-wendende Bodenbearbeitung oder die Umwandlung von Acker in Grünland), der Rückhalt von Abfluss in kleinen Speichern und Rückhalteräumen (z. B. Muldenspeicher und Kleinstrückhaltebecken) sowie zahlreiche strukturelle Maßnahmen (z. B. kleinteilige und höhenlinienparallele Flurgliederung, wasserlenkende Strukturen, abflussbremsende Entwässerungswege wie begrünte Abflussmulden und verkrautete, flach gemuldete Wegseitengräben, Vermeidung von Verrohrungen, Versickerungen, z. B. zur Entwässerung von Wegen). Darüber hinaus tragen auch Maßnahmen der Gewässerentwicklung (Verbreiterung des Abflussquerschnitts, Laufverlängerung, Förderung von Ausuferungsmöglichkeiten und Wiederherstellung

natürlicher Retentionsflächen) zur Abflussminderung bei, ebenso wie, die Erhöhung der hochwasserschützenden Wirkung von Wäldern (z. B. durch standortgerechte, stufig aufgebaute und gut strukturierte Mischwälder, kleinflächige Verjüngungsmaßnahmen, die Förderung und Sicherung von Auwäldern) sowie als wichtigste Maßnahme die Beschränkung des Wegebbaus und der Verzicht auf Wege und Gräben, die tiefe Hangeinschnitte erfordern. Für den dezentralen Hochwasserschutz ergeben sich daher nicht nur zahlreiche Ansatzpunkte, die an sehr unterschiedlichen Stellen im Einzugsgebiet und entlang der Entwässerungswege umgesetzt werden können, sie betreffen auch zahlreiche unterschiedliche Akteure (■ Abb. 2.5).

Die bei Weitem wichtigste Maßnahme des dezentralen Hochwasserschutzes ist es aber, auf Maßnahmen zu verzichten, die den Abfluss erhöhen und beschleunigen. Dazu zählen vor allem;

- Versiegelungen (Überbauung, Pflasterung),
- Verrohrungen und Gräben wie Wegseitengräben oder Drainagegräben,
- Hangeinschnitte, besonders im steilen Gelände (Waldbau),
- Verlust an landschaftlicher Vielfalt (Flächengliederung, Strukturelemente, Landnutzungen).

Im Grunde sollte jede dieser abflussfördernden Maßnahmen, wenn sie nicht vermieden werden kann, durch zusätzliche abflussmindernde Maßnahmen aus der oben genannten Liste ausgeglichen werden. Diese Zusammenhänge und die Vielzahl potenzieller Ansatzpunkte verdeutlichen, dass dezentrale Maßnahmen zur Abflussminderung nicht einer einzigen Akteursgruppe zugeordnet werden können, sondern dass vorbeugender Schutz vor Hochwasser als gesamtgesellschaftliche Aufgabe verstanden werden muss. Dies ergibt sich zwangsläufig daraus, dass beispielsweise die Landwirtschaft nicht Aufgaben aus dem Zuständigkeitsbereich der Kommunen



■ **Abb. 2.5** Übersicht typischer Ansätze zum Wasserrückhalt und zum Bremsen des Abflusses in der Flur (weiße Beschriftung) und Akteure (schwarze Beschriftung), deren Beitrag für eine Umsetzung der Maßnahmen unerlässlich ist (Bildquellen von A: W. Bauer (Agroluftbild), B: ► [www.boden-staendig.eu](http://www.boden-staendig.eu), C: [35], D: Illertaler (Wikipedia), E: K. Schneider (USDA Natural Resources Conservation Service), F: [36])

und die Wasserwirtschaft nicht die Aufgaben der Ländlichen Entwicklung übernehmen kann oder umgekehrt.

Dezentrale Maßnahmen unterscheiden sich wesentlich von den klassischen (zentralen) Hochwasserschutzmaßnahmen, die vor allem punktuell auf eine rasche Ableitung oder eine Eindämmung des Gewässers (z. B. durch Deiche) abzielen. Rasche Ableitung und Eindämmung verbessern zwar die Abflusssituation am beabsichtigten Punkt, auf dem weiteren Fließweg steigt dadurch jedoch grundsätzlich die Hochwassergefahr. Zudem kann keine dieser Maßnahmen, nicht einmal Rückhaltespeicher, die aufgrund der hohen Kosten zudem selten gebaut werden, einen Beitrag zum Wasser- und Stoffrückhalt in dem oberhalb der Anlage liegenden Einzugsgebiet leisten. Dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen gehen den entgegengesetzten Weg und versuchen, das Abfließen von Überschusswasser zu verzögern und im Verbund eine große Fläche unterhalb zu schützen. Durch den Klimawandel ist zu erwarten, dass Starkregen zunehmen

und dass ebenfalls lange Wassermangelperioden dazwischen auftreten. Dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen sind auch unter dem Aspekt des Wassermangels die richtige Antwort, weil sie die negativen Wirkungen der Trockenphasen mindern können. Das rasche Ableiten von Überschusswasser verstärkt die Trockenheit dagegen noch weiter.

Zur Wirkung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen liegen inzwischen viele Erfahrungen vor (siehe ■ Tab. 8.1 im Anhang). Sie bestätigen, dass dezentrale Maßnahmen einen deutlichen und positiven Effekt zur Hochwasser- und Sturzflutvorsorge in kleinen Einzugsgebieten (<50 km<sup>2</sup>) leisten können. Insbesondere in Gebieten <10 km<sup>2</sup> kann oft ein Schutz vor 20- bis 30-jährlichen Abflussereignissen erreicht werden. In einzelnen Fällen vermochten dezentrale Maßnahmen sogar, den Scheitel eines HQ100-Ereignisses um bis zu 50 % zu reduzieren. Allgemein gilt, dass dezentrale Maßnahmen eher klein sind und ihre Wirkung auf die Abflüsse direkt unterhalb der Maßnahme beschränkt

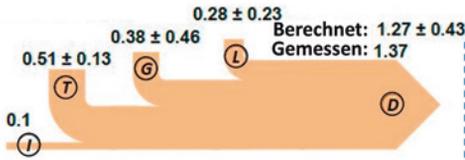
ist. Fließt im weiteren Verlauf weiteres Wasser zu, können sie auf das zusätzliche Wasser keine große Wirkung mehr haben, auch wenn die ursprüngliche Wirkung trotzdem erhalten bleibt. Dies bedeutet, dass viele Maßnahmen im kompletten Einzugsgebiet umgesetzt und kombiniert werden müssen. Durch die Verbundwirkung werden dann aber selbst die Abflüsse größerer Einzugsgebiete beeinflusst.

Die in [Tab. 8.1](#) aufgeführten Studien und Projekte zielen überwiegend auf den dezentralen Rückhalt von Abflussvolumen. Entsprechend werden Rückhaltebecken als effektivste Maßnahme zur Abflussminderung beschrieben [28]. Untersuchungen zur Wirkung abflussverzögernder Maßnahmen erfolgten in der Praxis dagegen bisher nur exemplarisch für wenige Einzelmaßnahmen, z. B. begrünte Abflussmulden [37]. Das liegt daran, dass solche Versuche aufwendig sind, insbesondere, wenn viele dieser Maßnahmen auf Landschaftsebene umgesetzt werden sollen, wodurch Messdaten per se rar sind. Hinzu kommt, dass auch die Abbildung des Oberflächenabflusses bei Starkregen in der Fläche mit hydrodynamischen Modellen in der Vergangenheit nur sehr selten untersucht wurde und hydrologische Modelle das Fließen entlang der Oberfläche (Oberflächenrouting) nicht adäquat abbilden können. Infolge können sowohl viele Einzelansätze als auch deren Verbundwirkung auf Landschaftsebene bislang häufig nicht angemessen beurteilt werden. Aus diesen Gründen wird ihre Bedeutung vermutlich stark unterschätzt. Zu diesem Ergebnis kommt auch eine Metastudie, die die Effektivität von Maßnahmen zum Wasser- und Stoffrückhalt von 101 Studien aus Europa verglichen hat [38]. Dort wird gezeigt, dass der Fokus vielfach auf landwirtschaftlichen Maßnahmen der Bodenbearbeitung liegt, z. B. nichtwendende oder höhenlinienparallele Bodenbearbeitung, obwohl diese wenig effektiv sind. Effektiver wären Maßnahmen zur Boden- und Vegetationsbedeckung und zur Veränderung der Gebietsstruktur, wie die

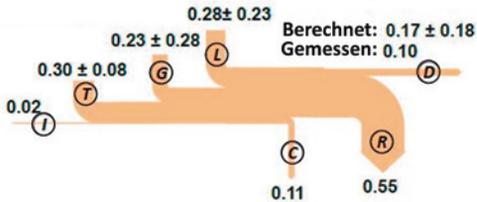
Anlage von Terrassen, die gleichermaßen auf Volumenrückhalt und Abflussverzögerung wirken. Solche Versuche sind aber wesentlich schwieriger umzusetzen als beispielsweise ein Beregnungs- oder Bodenbearbeitungsversuch. Daher mangelt es gerade bei den vermutlich effektivsten Maßnahmen in unseren Breiten gravierend an Erfahrung.

Obwohl bis heute in Deutschland in keinem größeren Gebiet (50–100 km<sup>2</sup>) flächendeckend dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen konsequent umgesetzt wurden, wird häufig angenommen, dass ihre Wirkung zur Abflussminderung mit zunehmender Gebietsgröße abnimmt [28]. Diese Annahme entbehrt einer fachlichen Grundlage, da Feldstudien, bei denen in größeren Gebieten konsequent Maßnahmen zur Abflussminderung in der Fläche umgesetzt wurden, fehlen und die Effekte vieler Maßnahmen in Simulationsstudien nicht explizit berücksichtigt werden [8]. Tatsächlich zeigen Erfahrungen aus China das Gegenteil. Dort werden dezentrale Maßnahmen zum Wasser- und Stoffrückhalt seit den 1950er-Jahren auf politische Anordnung hin großflächig im Lössplateau umgesetzt [39]. In der bisher besten und umfassendsten Studie dazu belegen Messwerte, dass die Sedimentfracht im zweitgrößten Fluss Chinas, dem Gelben Fluss (Huang He), gegenüber früher durch dezentrale Maßnahmen stark reduziert werden konnte. Dazu wurden großflächig Terrassen angelegt und viele kleine (durchströmbare) Querbauwerke (engl. „check dams“) entlang von Entwässerungswegen und kleinen seitlichen Bächen und Zuflüssen geschaffen. Dadurch hat die Sedimentmobilisation deutlich (um 30 %) abgenommen und eine Wiederablagerung (um 10 %) innerhalb der Teileinzugsgebiete konnte erreicht werden ([Abb. 2.6](#)) [40]. Die Sedimentation konnte dadurch in den zur Wassernutzung angelegten großen Staudämmen wesentlich vermindert und deren Wert erhalten werden. Das ist aus zwei Gründen besonders beachtlich: Zum einen wurden bislang nur 39 %

## Sedimentflüsse um 1950 ( $\text{Gt a}^{-1}$ )



## Sedimentflüsse 2005 ( $\text{Gt a}^{-1}$ )



- (I) Sedimentzufluss im Gelben Fluss am Pegel Lanzhou
- (T) Oberbodenabtrag und Einfluss von Terrassen
- (G) Grabenerosion und Einfluss kleiner Querbauwerke
- (L) Muren und Hangrutschungen
- (C) Ablagerung an kleinen Querbauwerken (check dams)
- (R) Ablagerung in Staudämmen
- (D) Sedimentexport im Gelben Fluss am Pegel Huayuankou
- (S) Sedimenteintrag in den Golf von Bohai

**Abb. 2.6** Sedimentbilanzen für das chinesische Lössplateau mit einer Fläche von ca. 500.000  $\text{km}^2$  am Gelben Fluss in China zwischen den Pegeln Lanzhou und Huayuankou für 1950 (oben) und 2005 (unten) nach Anlage von Terrassen auf 39 % der Fläche, der Anlage von Querbauwerken in Rinnen („check dams“) und der Anlage von zwei großen Stauseen [Daten aus 40]

der Fläche terrassiert und auch die Querbauwerke wurden bei Weitem nicht an allen Stellen angelegt, wo dies möglich wäre. Zum zweiten umfasst das chinesische Lössplateau eine Fläche von rund 500.000  $\text{km}^2$  und ist damit wesentlich größer als Deutschland. Dezentrale Maßnahmen sind daher selbst auf größter Skala ebenso effizient wie auf kleiner, sofern sie denn flächendeckend und konsequent etabliert werden. Auch wenn die Wirkung der Maßnahmen auf den Abfluss nicht 1:1 übernommen werden kann, so lässt sich doch die Größenordnung der potenziellen Wirkung kleiner Maßnahmen erahnen. Aus Parzellenversuchen ist beispielsweise bekannt, dass Maßnahmen zum Wasser- und Stoffrückhalt den Bodenabtrag um rund 70 % und den Abflussbeiwert um etwa 50 % reduzieren können [41]. Da zusätzlich zur Senkung des Abflussbeiwertes auch noch die Abflussverzögerung hinzukommt, dürfte die Wirkung auf die Hochwasserwelle mindestens so hoch sein wie auf den Stoffrückhalt. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass es nur an der fehlenden Umsetzung und nicht an der

fehlenden Effizienz liegt, warum verbreitet davon ausgegangen wird, dass dezentrale Maßnahmen in größeren Einzugsgebieten keine Wirkung haben.

## Literatur

1. Wohlrab B, Ernstberger H, Meuser A (1992) Landschaftswasserhaushalt. Paul Parey, Hamburg
2. Dyck S, Peschke G (1995) Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin
3. Patt H, Jüpner R (2013) Hochwasser-Handbuch Auswirkungen und Schutz. Springer, Berlin
4. Maniak U (2016) Hydrologie und Wasserwirtschaft. Springer, Berlin
5. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2003a) Hydraulik naturnaher Fließgewässer. 1: Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren. Karlsruhe
6. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2003b) Hydraulik naturnaher Fließgewässer. 2: Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen. Karlsruhe
7. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2003c) Hydraulik naturnaher Fließgewässer. 3: Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg. Karlsruhe

8. Fiener P, Auerswald K, Van Oost K (2011) Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments – a review. *Earth-Science Rev* 106:92–104. ► <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.004>
9. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2002) Fließgewässerlandschaften in Bayern. München
10. Willner SN, Levermann A, Zhao F, Frieler K (2018) Adaptation required to preserve future high-end river flood risk at present levels. *Sci Adv* 4:1–9. ► <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao1914>
11. Kunz M, Sander J, Kottmeier C (2009) Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *Int J Climatol* 29:2283–2297. ► <https://doi.org/10.1002/joc.1865>
12. Feldmann H, Schädler G, Panitz HJ, Kottmeier C (2013) Near future changes of extreme precipitation over complex terrain in Central Europe derived from high resolution RCM ensemble simulations. *Int J Climatol* 33:1964–1977. ► <https://doi.org/10.1002/joc.3564>
13. Auerswald K, Fischer FK, Winterrath T, Brandhuber R (2019) Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. *Hydrol Earth Syst Sci* 23:1819–1832. ► <https://doi.org/10.5194/hess-23-1819-2019>
14. Di Baldassarre G, Kreibich H, Vorogushyn S et al (2018) Hess Opinions: An interdisciplinary research agenda to explore the unintended consequences of structural flood protection. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:5629–5637. ► <https://doi.org/10.5194/hess-22-5629-2018>
15. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2002) Hochwasser im August 2002. München
16. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2003) Hochwasser Mai 1999 – Gewässerkundliche Beschreibung. München
17. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2007) Gewässerkundlicher Bericht Hochwasser August 2005. München
18. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017) Sturzfluten- und Hochwasserereignisse Mai/Juni 2016 – Wasserwirtschaftlicher Bericht. *UmweltSpezial*. Augsburg
19. Stahl N, Hofstätter M (2018) Vb-Zugbahnen und deren Auftreten als Serie mit Bezug zu den resultierenden Hochwassern in Bayern mit Auswirkungen auf Rückhalteräume im Isareinzugsgebiet. *Hydrol Wasserbewirt* 62:77–97. ► <https://doi.org/10.5675/HyWa>
20. Hofstätter M, Chimani B (2012) Van Bebber's cyclone tracks at 700 hPa in the Eastern Alps for 1961–2002 and their comparison to circulation type classifications. *Meteorol Z* 21:459–473
21. Hofstätter M, Lexer A, Homann M, Blöschl G (2018) Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *Int J Climatol* 38:e497–e517. ► <https://doi.org/10.1002/joc.5386>
22. Lochbihler K, Lenderink G, Siebesma AP (2017) The spatial extent of rainfall events and its relation to precipitation scaling. *Geophys Res Lett* 44:8629–8636. ► <https://doi.org/10.1002/2017GL074857>
23. Fischer FK, Winterrath T, Auerswald K (2018) Temporal- and spatial-scale and positional effects on rain erosivity derived from point-scale and contiguous rain data. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:6505–6518. ► <https://doi.org/10.5194/hess-22-6505-2018>
24. Mahlke H (2017) Mechanismen der Auslösung hochreichender Konvektion im südwestdeutschen Mittelgebirgsraum. Dissertation, Wiss Ber Inst Meteor Klimaforsch 65: Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
25. Winterrath T, Brendel C, Hafer M et al (2018) RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed quasi gauge-adjusted radar data, 5-minute precipitation sums (YW). Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, ► [https://doi.org/10.5676/dwd/radklim\\_yw\\_v2017.002](https://doi.org/10.5676/dwd/radklim_yw_v2017.002)
26. Winterrath T, Brendel C, Hafer M et al (2018) RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed gauge-adjusted radar-data, one-hour precipitation sums (RW). Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, ► [https://doi.org/10.5676/dwd/radklim\\_rw\\_v2017.002](https://doi.org/10.5676/dwd/radklim_rw_v2017.002)
27. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2016) Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe
28. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2015) Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. Merkbl DWA-M 550: Hennef
29. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2016) Dezentraler Hochwasserschutz im ländlichen Raum. Dresden
30. Sieker F, Wilcke D, Reich M et al (2007) Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasser-rückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte – am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen. Abschlussbericht, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Leibniz Universität Hannover. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Projekt AZ 214679), Hannover
31. Assmann A (1999) Die Planung dezentraler, integrierter Hochwasserschutzmaßnahmen – mit dem Schwerpunkt der Standortausweisung

- von Retentionsarealen an der Oberen Elsenz, Kraichgau. LFLBW-Schriftenr 11: Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg, Kornwestheim
32. Rieger W (2012) Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. Mitt Inst Wasserwesen, Wasserwirt Ressourcenschutz 116: Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
  33. Bronstert A, Seiert S, Oberholzer G (1993) Maßnahmen der Flurbereinigung und ihre Wirkung auf das Abflussverhalten ländlicher Gebiete. Schriftenr Landesamt Flurneuord Landent Baden-Württemberg 3: Kornwestheim
  34. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2017) Hochwasserangepasste Waldbewirtschaftung. LWF-Merkbl 36: Freising
  35. Seidler M (2018) Verringerung von Sturzfluten nach Starkregenereignissen – Möglichkeiten und Potentiale der Flurneuordnung durch abflussbremsende Flurgestaltung. Masterarbeit, Lehrstuhl Bodenordnung Landentwicklung, Technische Universität München
  36. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2008) Kooperation bei der Unterhaltung kleiner Gewässer. Beispiele aus Bayern. Gewässernachbarschaften. Umwelt Spezial. Augsburg
  37. Fiener P, Auerswald K (2005) Measurement and modeling of concentrated runoff in grassed waterways. *J Hydrol* 301:198–215. ► <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.030>
  38. Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M (2012) How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? *Earth-Science Rev* 115:21–36. ► <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.003>
  39. Tsunekawa A, Liu G, Yamanaka N, DU S (2014) Restoration and development of the degraded loess plateau, China. Springer, Japan
  40. Zhao J, Van Oost K, Chen L, Govers G (2016) Moderate topsoil erosion rates constrain the magnitude of the erosion-induced carbon sink and agricultural productivity losses on the Chinese Loess Plateau. *Biogeosciences* 13:4735–4750. ► <https://doi.org/10.5194/bg-13-4735-2016>
  41. Zhao J, Yang Z, Govers G (2019) Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: evidence from erosion plot data. *Geoderma* 337:729–741. ► <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.023>

**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.

