

Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten

Autor(en): **Rickli, Christian / Forster, Felix**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal
= Journal forestier suisse**

Band (Jahr): **148 (1997)**

Heft 5

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-765461>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten

Von *Christian Rickli* und *Felix Forster*

Keywords: Peakflow; runoff coefficient; site characteristics; infiltration condition; water uptake capacity.

FDK 114.1: 116.2

1. Einleitung

Der Schutz vor Naturgefahren und damit auch der forstliche Bachverbau gehört zu den Aufgabenbereichen des Forstdienstes. Im Zusammenhang mit der Planung und Bemessung von Schutzmassnahmen in Wildbächen sowie bei Gefahrenkartierungen müssen häufig Hochwasserabflüsse abgeschätzt werden. In kleinen Einzugsgebieten, wie sie der Forstdienst üblicherweise zu beurteilen hat, entstehen extreme Hochwasserspitzen mehrheitlich durch oberflächennahen Abfluss nach intensiven Starkniederschlägen. Für die Abschätzung dieser Hochwassermengen werden in der Regel einfache Ansätze verwendet, bei denen als Faktoren die Fläche des Einzugsgebietes, der zu erwartende Niederschlag sowie die örtlichen Standortseigenschaften einfließen.

Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf die Standortseigenschaften. Diese bestimmen die Reaktion der Fläche auf einen bestimmten Regen. Sie müssen – wie auch der zu erwartende Niederschlag – in jedem Einzugsgebiet separat beurteilt werden. Im Rahmen einer einfachen Hochwasserschätzung basiert diese Beurteilung heute für gewöhnlich auf Grundlagen, die einerseits nicht alle massgebenden Elemente berücksichtigen und andererseits auch das komplexe Zusammenwirken verschiedener Einflüsse von Standortseigenschaften nicht ausreichend einbeziehen.

Das Ziel der nachfolgenden Ausführungen besteht darin, die Grundlagen für Standortsbeurteilungen bei einfachen Hochwasserabschätzungen zu erweitern. Es wird versucht, die für die Hochwasserentstehung relevanten

Eigenschaften eines Standortes zu definieren und ihren Einfluss auf die Abflussreaktion zu quantifizieren. Im Vordergrund steht dabei nicht die aufwendige Klärung einzelner Detailfragen bei der Abflussbildung. Es geht vielmehr darum, aufbauend auf den bestehenden Grundlagen, einen Schritt weiter zu kommen in Richtung einer Standortsbeurteilung, die den natürlichen Vorgängen Rechnung trägt. Zu diesem Zweck werden anhand der Literatur Ergebnisse von Infiltrations- und Beregnungsversuchen ausgewertet. Darauf basierend wird ein Vorgehen erarbeitet, das eine angemessene und nachvollziehbare Beurteilung und Bewertung der Standorte hinsichtlich der Hochwasserentstehung erlauben soll. Das Verfahren wird in fünf kleinen Einzugsgebieten getestet, in denen langjährige Abflussmessreihen vorliegen.

2. Grundlagen

Zu den häufig verwendeten Hochwasserbemessungsansätzen in forstlichen Einzugsgebieten gehören Verfahren, bei denen ein sogenannter Abflusskoeffizient ψ als wesentliches Element in die Berechnung einfließt. Zu erwähnen sind hier beispielsweise die modifizierte Formel von Melli-Müller (*Böll*, in Vorbereitung) oder auch ein vereinfachtes Fließzeitverfahren (*Forster*, 1992, unveröffentlicht).

Melli-Müller, modifiziert:	$Q = \psi \cdot \lambda \cdot E^{2/3}$
Fließzeitverfahren:	$Q(x) = 0,278 \cdot \psi \cdot i(T_c, x) \cdot E$

dabei bedeuten:	Q : Hochwasserabfluss [m ³ /s]
	ψ : Abflusskoeffizient [dimensionslos]
	λ : Niederschlagskoeffizient [dimensionslos]
	E : Einzugsgebietsfläche [km ²]
	x : Wiederkehrdauer in Jahren
	i (T _c , x): Niederschlagsintensität [mm/h] in Abhängigkeit der Konzentrationszeit T _c und der Wiederkehrdauer

Der Abflusskoeffizient ψ umschreibt das Verhältnis zwischen abfließendem und gefallenem Niederschlag. Er wird neben der klimatischen Vorgeschichte massgeblich durch die örtlichen Standortseigenschaften bestimmt. Bereits seit langer Zeit werden Anstrengungen unternommen, die Auswirkungen von Vegetation, Boden, Topographie und weiteren Merkmalen auf die Infiltration bzw. die Abflussbildung zu untersuchen. Beispielsweise hat sich Burger an der ehemaligen Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen während mehrerer Jahrzehnte mit bodenphysikalischen Untersuchungen beschäftigt. In diesem Zusammenhang führte er eine Vielzahl klein-

flächiger Infiltrationsversuche durch, um die Durchlässigkeit und Infiltrationsrate in gewachsenen Böden zu untersuchen. Im Verlauf der letzten zwei Jahrzehnte wurden an verschiedenen Instituten Beregnungsversuche mit dem Ziel durchgeführt, die massgebenden Abflussprozesse besser verstehen und quantifizieren zu können (*Karl und Toldrian, 1973, Schwarz, 1985, Bunza und Schauer, 1989, Naef et al., 1994, Markart und Kohl, 1995, Faeh et al., 1996*). Das bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft veröffentlichte in einem Bericht die Auswertungen von zahlreichen Beregnungsversuchen (*Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1996*).

In den folgenden Kapiteln werden einige Ergebnisse der Infiltrationsversuche von *Burger (1922, 1927, 1937)* sowie jene der grossflächigeren Beregnungsversuche zusammengefasst und hinsichtlich der Abflussbildung in kleinen Einzugsgebieten interpretiert. Daraus resultiert ein Vorschlag, wie die auf kleinen und kleinsten Versuchsflächen gemachten Erfahrungen auf Einzugsgebiete übertragen werden können.

3. Die Infiltrationsversuche von Burger

3.1. Methodik

Burger (1922) entnahm im Rahmen seiner bodenphysikalischen Untersuchungen mit dem sogenannten «Burger-Zylinder» Bodenproben von 1000 cm³ und analysierte sie anschliessend im Labor. Neben der Dichte, dem Wassergehalt, dem Skelettanteil und dem Gesamtporenvolumen ermittelte er auch die sogenannte Luftkapazität. Burgers Luftkapazität beschreibt dasjenige Porenvolumen, das nach vollständiger Sättigung der Bodenprobe und einer anschliessenden, einstündigen Vertropfzeit entleert ist. Es handelt sich dabei also um eine Art Grobporenvolumen. In unmittelbarer Umgebung der Probeentnahmestellen führte er Einsickerungsversuche durch. Zu diesem Zweck schlug er ein Stahlrohr mit einem Innendurchmesser von 11,3 cm 10 cm tief in den Boden ein. Der Infiltrationsversuch bestand darin, einen Liter Wasser in den luftseitigen Teil des Rohres einzugiessen und die Zeit bis zur vollständigen Einsickerung des Wassers zu messen. Die Böden und die Vegetation der entsprechenden Standorte wurden mit den damals üblichen Bezeichnungen beschrieben.

3.2 Ergebnisse und Interpretation

In *Abbildung 1* ist ein Teil der Ergebnisse der Einsickerungsversuche von *Burger (1922, 1927 und 1937)* dargestellt. Die gemessenen Einsickerungszeiten sind in Funktion der Luftkapazität aufgetragen und zudem nach Wald und Freiland sowie nach vernässten und nicht vernässten Standorten aufgeschlüsselt.

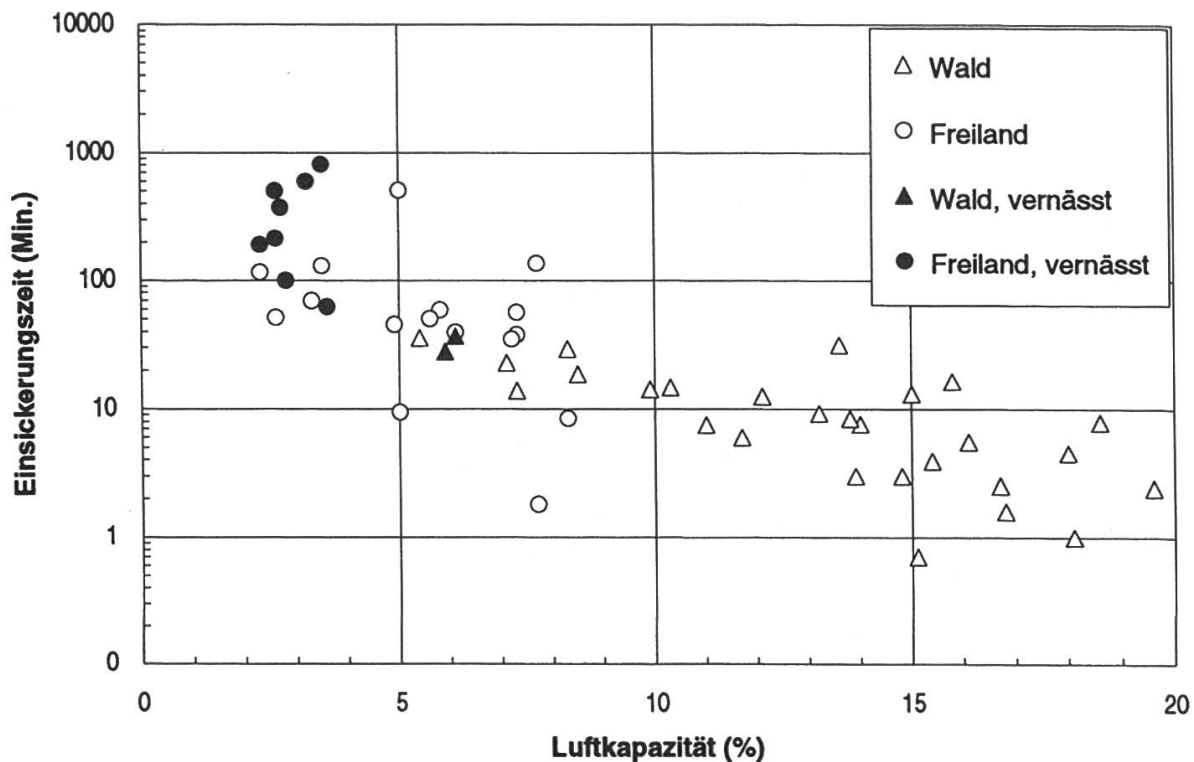


Abbildung 1. Einsickerungszeit in Minuten für 1 Liter Wasser auf einer Fläche von 100 cm² in Abhängigkeit der Luftkapazität (Groporenvolumen) des Oberbodens. Daten aus *Burger* (1922, 1927 und 1937).

- Einfluss der Vegetation: Auf Freilandstandorten wurde im allgemeinen eine geringere Luftkapazität und eine höhere Einsickerungsdauer gemessen als auf den Waldstandorten. Eine Waldbestockung scheint sich somit positiv auf das Groporenvolumen und damit auf die Infiltrationsrate auszuwirken.
- Einfluss der Bewirtschaftung: Der Einfluss der Bewirtschaftung kann aufgrund der vorliegenden Daten nicht eindeutig von jenem der Vegetation unterschieden werden. Anhand von einigen Beispielen beschreibt *Burger* (1922) jedoch den negativen Einfluss einer bewirtschaftungsbedingten Verdichtung und weist auf den Zustand der Bodenoberfläche als massgebende Einflussgröße für die Infiltrationsverhältnisse hin. Unter anderem beschreibt er die negativen Auswirkungen einer durch ungünstige Bewirtschaftung bedingten Bodenverschlammung mit oberflächlichem Verschluss der Groporen. Auch nach *Zuidema* (1985) wird durch eine derartige Oberflächenverschlammung die Infiltration drastisch reduziert.
- Einfluss der Bodeneigenschaften: Mit zunehmender Luftkapazität nimmt die Einsickerungszeit ab, d.h. je grösser das Groporenvolumen ist, desto grösser wird die Infiltrationsrate. Im Gegensatz dazu ist jedoch in den Daten von *Burger* zwischen der Einsickerungszeit und dem Gesamtporenvolumen kein Zusammenhang erkennbar. Offenbar wird die Infiltrationsrate vorwiegend

durch das Grobporenvolumen und weniger durch das Gesamtporenvolumen bestimmt. Eine mögliche Erklärung für die weite Streuung in *Abbildung 1* liegt im unterschiedlichen Probenmaterial, das für die Einsickerungsversuche und die Ermittlung des Grobporenvolumens verwendet wurde. Die Infiltrationsversuche wurden in unmittelbarer Nachbarschaft der Entnahmestellen der Proben für die physikalischen Untersuchungen durchgeführt. Die ebenfalls gemessenen Parameter Skelettgehalt, Dichte und Anteil Wurzeln üben im Gegensatz zu heutigen Erkenntnissen gemäss den Untersuchungsergebnissen von Burger keinen Einfluss auf die Einsickerungszeit aus. Diesbezüglich muss jedoch neben dem beschränkten Datenumfang auch das geringe Probenvolumen von nur 1000 cm^3 berücksichtigt werden. An vernässten Standorten ermittelte *Burger* (1937) in der Regel längere Einsickerungszeiten als an vergleichbaren, jedoch trockeneren Standorten. Damit wird neben dem Grobporenvolumen auch der Sättigungsgrad des Bodens als Einflussgrösse deutlich. Eingeschränkte Tiefensickerung kann zu stehendem Wasser in den Grobporen führen und dadurch die Infiltration vermindern. Die Bodenbeschreibungen der untersuchten Standorte lassen keine weiteren Beurteilungen zu.

Burger hat die Böden nicht nach heute üblichen Klassifikationssystemen beschrieben. Seine Ergebnisse können deshalb nur ansatzweise auf die heutige Boden-Systematik übertragen werden. Als eine der wichtigsten Einflussgrössen für die Infiltrationsrate führte er die Luftkapazität auf. Diese kann in grober Näherung mit dem Porenvolumen V_1 (Saugspannungsbereich 0–80 hPa) der Lokalformen (*Richard et al.* 1978–1987) verglichen werden. Für die Beschreibung der Lokalformen wurden die Wasserleitfähigkeiten (k-Werte, gesättigt) im Labor horizontweise bestimmt. Diese zeigen eine ähnliche Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom Grobporenvolumen wie die Ergebnisse von Burger in *Abbildung 1*. Die k-Werte werden mit zunehmendem Grobporenvolumen V_1 grösser. Beim Gesamtporenvolumen kann sowohl bei den Lokalformen als auch bei den Daten von Burger kein Einfluss auf die Durchlässigkeit beobachtet werden. Die Daten der Lokalformen zeigen zudem, dass Rendzinen eher grosse Durchlässigkeiten aufweisen, Braunerden und Parabraunerden eine Mittelstellung einnehmen und Nassböden, insbesondere Pseudogley und Stagnogley, relativ undurchlässig sind. Die Untersuchungen von *Richard et al.* (1978–1987) bestätigen damit in einem erweiterten Rahmen die Ergebnisse von Burger, wonach das Grobporenvolumen Hinweise bei der Beurteilung der Infiltration gibt. Da sich das Grobporenvolumen in gewachsenen Böden nur mit erheblichem Aufwand bestimmen lässt, kann der Bodentyp als Indiz für eine erste Feldschätzung des Grobporenvolumens dienen.

Aus den Ergebnissen der Einsickerungsversuche hat Burger geschlossen, dass Standortcharakteristika wie Bewirtschaftung, Vernässung, Grobporenvolumen und oberflächlicher Bodenverschluss einen Einfluss auf die Infiltrationsverhältnisse ausüben. Diese Zusammenhänge decken sich mit den heuti-

gen Erkenntnissen. Sie können jedoch durch die in letzter Zeit durchgeführten und im Kapitel 4 beschriebenen Berechnungsversuche bei weitem nicht so eindeutig nachgewiesen werden, wie dies Burger offenbar gelang. Im weiteren zeigen seine Ergebnisse deutlich, dass sich die Infiltrationsrate an einem untersuchten Ort praktisch nie nur durch eine einzige Einflussgrösse erklären lässt.

4. Berechnungsversuche

4.1 Methodik

Bei den eingangs erwähnten Berechnungsversuchen wurden Flächen von 60 bis 100 m² durch künstlichen Starkniederschlag aus Sprinkleranlagen mit einer Intensität von rund 100 mm/h beregnet. Der resultierende Oberflächenabfluss wurde mittels Spatenblechen und leicht in den Boden versenkten Blechtrichtern aufgefangen und gemessen. Falls zusätzlich der Abfluss im Boden interessierte, wurden beide Abflusskomponenten in einem unterhalb der beregneten Fläche ausgehobenen Graben getrennt aufgefangen und gemessen. Eine allfällige Interzeptionswirkung der Baumschicht kann mit Hilfe der Berechnungsanlagen nicht ermittelt werden.

4.2 Ergebnisse und Interpretation

- Einfluss der Vegetation: Aufgrund der Ergebnisse zahlreicher Berechnungsversuche scheint die häufig zitierte Aussage, dass Oberflächenabfluss auf Waldböden unter natürlichen Bedingungen so gut wie ausgeschlossen sei (Schwarz, 1985), nicht allgemeingültig zu sein. Die Ergebnisse von Bunza und Schauer (1989) sowie Markart und Kohl (1995) ermöglichen unter Berücksichtigung der Vegetation und des Bodens eine klare Präzisierung des Sachverhaltes: Im Misch- und Fichtenaltbestand mit gut entwickelter Strauch- und Krautschicht (ohne Vernässungs- und Verdichtungszeiger) auf siltig-sandigen Böden ist tatsächlich kein Oberflächenabfluss zu erwarten. Fehlt jedoch bei gleichen Bodenverhältnissen in einem Fichtenjungwald der Unterwuchs ganz oder teilweise, muss nach Bunza und Schauer (1989) bereits mit einem geringen Oberflächenabfluss gerechnet werden. In jungen Fichtenbeständen mit einem hohen Anteil an Feuchte- und Staunässezeigern sowie in erlenreichen Gehölzbeständen ist mit mittleren Oberflächenabflüssen zu rechnen, wenn sich diese Standorte über siltig-tonigen oder Silt-Sand-Böden mit mittlerem Tongehalt befinden. Hohe Oberflächenabflüsse sind in Fichtenjungwäldern über Böden mit hohem Feinanteil und ungenügendem Porenraum insbesondere dann zu erwarten, wenn diese Flächen beweidet werden oder in der Vergangenheit beweidet wurden. Im weiteren zeigen Bunza und Schauer (1989),

dass durch eine intensive Durchwurzelung die Bildung von Oberflächenabfluss reduziert wird. Kritische Bereiche bezüglich Abflussdisposition sind vegetationslose Flächen und solche mit einem geringen Deckungsgrad (z.B. Grabeneinhänge). Erosion und Verschlammung des obersten Bodenhorizontes ist die Folge. Auf diesen Flächen ist daher schon bei sehr geringen Intensitäten mit hohen Oberflächen- und Zwischenabflüssen zu rechnen (*Markart und Kohl, 1995*).

- Einfluss der Bewirtschaftung: Die Auswertungen in *Bunza und Schauer* (1989) sowie *Markart und Kohl* (1995) geben deutliche Hinweise auf die negativen Auswirkungen von Beweidung und Kahlschlagwirtschaft auf das Abflussverhalten. Je nach Bodenverhältnissen kann sich die Bodenverdichtung durch Viehtritt oder durch intensives Befahren mit schweren Maschinen auch auf bereits wieder aufgeforsteten Flächen nachhaltig negativ auswirken. Mit geringen bis mittleren Oberflächenabflüssen ist auf Kahlschlagflächen über Böden mit mittlerem Feinanteil zu rechnen. Mit zunehmendem Tongehalt und abnehmendem Grobporenvolumen nimmt der Oberflächenabfluss auf kahlgeschlagenen oder beweideten Flächen zu. Generell kann festgehalten werden, dass grobtexturierte Böden durch Belastungen wie Kahlschlag und Beweidung weniger verdichtet werden als solche mit hohem Feinanteil (*Proffitt et al., 1993*).

Bei den Berechnungsversuchen von *Lang* (1995) ging es darum, die drei Bewirtschaftungsgruppen Wald, Weide und Skipiste bezüglich ihres Abflussverhaltens zu beurteilen. Die resultierenden Unterschiede zeigten sich sowohl bezüglich Abflussmengen als auch in bezug auf die Zeitspanne zwischen Beginn der Beregnung und Einsetzen des Abflusses. Obwohl der Wald im vorliegenden Fall beweidet war, wurde auf den Waldparzellen am wenigsten Abfluss gemessen. Für die Weide- und Pistenstandorte fielen das Retentionsvermögen und die Dämpfung der Abflussganglinien bedeutend geringer aus.

- Einfluss der Bodeneigenschaften: Aufgrund der verschiedenen Versuchsanordnungen können nur generelle Aussagen gemacht werden: Auf Rohböden, Rendzinen und Braunerden mit hohem Skelettanteil ist kein Oberflächenabfluss zu erwarten. Dabei ist hier die Nutzung von untergeordneter Bedeutung. Hoher bis sehr hoher Oberflächenabfluss ist hingegen auf Böden mit hohem Feinanteil zu erwarten, insbesondere wenn die Flächen zusätzlich beweidet werden. Die Auswertung der Beregnungsversuche von *Bunza und Schauer* (1989) zeigt, dass der Oberflächenabfluss mit zunehmendem Skelettgehalt abnimmt.

Organisches Material im Boden und an der Bodenoberfläche beeinflusst die Abflussbildung in unterschiedlicher Art und Weise. Reine organische Substanz in Auflagehorizonten weist einen hohen Benetzungswiderstand auf.

Nach längeren Trockenperioden kann deshalb zu Beginn des Niederschlagsereignisses durch organische Auflagehorizonte (insbesondere bei dachziegelartiger Anordnung der Pflanzenreste) die Infiltration reduziert werden. In den humushaltigen Mineralerdehorizonten (A-Horizonte) wirkt sich jedoch dieser höhere Benetzungswiderstand des organischen Anteils im Falle von schneller Wassersättigung des Bodens (Gewitter) positiv auf die Aggregatstabilität aus (Sullivan, 1990). Auch nach Scheffer und Schachtschabel (1992) begünstigt die humifizierte organische Substanz in den humushaltigen Mineralerdehorizonten die Bildung und Stabilität eines grobporigen Aggregatgefüges. Damit werden die Voraussetzungen für gute Durchlässigkeit und grosses Wasserrückhaltevermögen geschaffen. Gut ausgebildete, humushaltige Mineralerdehorizonte werden deshalb aus der Sicht der Abflussbildung bei Starkniederschlägen als infiltrationsfördernd beurteilt.

- Einfluss weiterer Parameter: Die Auswertungen der verschiedenen Beregnungsversuche lassen keinen direkten Zusammenhang zwischen Hangneigung und Oberflächenabfluss erkennen. Schwarz (1985) schloss aus seinen Beregnungsversuchen, dass sich ein Einfluss der Hangneigung auf die Abflussbereitschaft nur dann erkennen lässt, wenn die Böden vor Beginn der Starkniederschläge einen verhältnismässig einheitlichen Feuchtezustand aufweisen. Mit zunehmender Hangneigung erhöht sich jedoch grundsätzlich die Abflussgeschwindigkeit des oberflächlich abfliessenden Niederschlagswassers. Dies wirkt sich auf den kleinen Beregnungsflächen nicht messbar aus. Auf der Ebene von Einzugsgebieten hat jedoch eine grössere Abflussgeschwindigkeit einen Anstieg der Abflussspitze zur Folge. Im weiteren vermuten Markart und Kohl (1995), dass ein unregelmässiges Relief durch erhöhten Wasserrückhalt in Flachstellen und Mulden eine abflussverzögernde Wirkung haben könnte. Der Bodenwassergehalt und die Gründigkeit des Bodens sind weitere Einflussgrössen, welche sich direkt auf die Abflussbildung auswirken.

5. Bestimmung des Abflusskoeffizienten

Der Abflusskoeffizient ψ , der in einfachen Hochwasserschätzverfahren wie der modifizierten Formel von Melli-Müller oder dem Fliesszeitverfahren zur Anwendung kommt, soll möglichst objektiv und nachvollziehbar festgelegt werden. Dabei sind die Erkenntnisse aus den oben beschriebenen Infiltrations- und Beregnungsversuchen in die Überlegungen einzubeziehen. Bei der nachfolgenden Beschreibung eines Vorgehens zur Bestimmung von Abflusskoeffizienten liegt das Schwergewicht auf Standorten mit Vegetation. Vegetationsfreie Flächen waren nicht Gegenstand der Untersuchungen, und demzufolge werden diesbezüglich nur einige generelle Hinweise gemacht.

5.1 Abflusskoeffizienten für Standorte mit Vegetation

In den vorangehenden Kapiteln wurden eine Vielzahl von Einflussgrößen aufgeführt, welche die Abflussreaktion eines Standortes beeinflussen. Um dem Zusammenwirken dieser Eigenschaften gerecht werden zu können, werden sie entsprechend der Fliessrichtung des einsickernden Wassers in die Beurteilung eingeführt: zuerst die Vegetation, dann die Bodenoberfläche und schliesslich der Boden. Die aus der Sicht der Abflussbildung wichtigsten Wirkungsweisen dieser Komponenten werden im folgenden zusammengefasst:

- Die Vegetationsdecke fängt die Energie der aufprallenden Regentropfen ab und verhindert so die Zerstörung und Erosion von Bodenaggregaten und damit eine Verkrustung und Verschlammung der Bodenoberfläche. Die Wirkung hängt vom Deckungsgrad ab. Die Vegetation fördert zudem die Infiltration, indem die an die oberirdischen Pflanzenteile anschliessenden Wurzelkanäle das Wasser direkt in den Boden leiten. Lebende und zerfallende Wurzeln bilden im Boden Makroporen unterschiedlicher Grösse (*Zuidema, 1985*). Die Interzeption spielt im Falle von Starkregenereignissen keine massgebende Rolle.
- Der Zustand der Bodenoberfläche bestimmt das Infiltrationsverhalten eines Bodens massgeblich. Nutzung und Bewirtschaftung einer Fläche beeinflussen einerseits den Bewuchs und andererseits die Bodenoberfläche und die Bodenstruktur des Oberbodens. Bei starker Beweidung oder durch Befahren mit schweren Maschinen kann eine Verdichtung der obersten Bodenhorizonte stattfinden, wobei die Infiltration eingeschränkt wird.
- Der Boden beeinflusst über seine Durchlässigkeit und Speicherfähigkeit massgeblich den Anteil des Niederschlagswassers, der am Standort zurückgehalten werden kann (*Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1996*).

Basierend auf diesen Angaben wird nachfolgend ein Weg beschrieben, wie der Abflusskoeffizient ψ aufgrund einer Auswahl der massgebenden Grössen abgeschätzt werden kann. Es handelt sich dabei um ein zweistufiges Verfahren, bei dem einerseits die Infiltrationsbedingungen an der Bodenoberfläche und andererseits die Wasser-Aufnahmefähigkeit des Bodens mit «gut», «mässig» oder «schlecht» beurteilt werden. Die Infiltrationsbedingungen sind im Zusammenhang mit der Frage von Bedeutung, wieviel Niederschlagswasser in den Boden einsickern kann. Sind die Infiltrationsbedingungen schlecht, wird auch bei einem an sich gut aufnahmefähigen Boden nur wenig Wasser aufgenommen. Andererseits kann bei idealen Infiltrationsbedingungen nur wenig Wasser zwischengespeichert werden, falls der Boden eine geringe Wasser-Aufnahmefähigkeit aufweist.

Für die zwei zu beurteilenden Aspekte erfolgt je eine Bewertung entsprechend den in *Abbildung 2* dargestellten Entscheidungswegen. Für die verschiedenen Bewertungskombinationen werden hier zudem unterschiedliche Abflusskoeffizienten für Wald und Freiland vorgeschlagen. Die Grenzwerte der entsprechenden Wertebereiche stützen sich auf Grundlagen von *Müller (1943)* und *Zeller (1975)* ab. Die Abstufung innerhalb der Bereiche wurde aufgrund der Erkenntnisse aus den Infiltrations- und Beregnungsversuchen unter Berücksichtigung der Standortverhältnisse vorgenommen.

Der Grund für die Differenz zwischen Wald und Freiland liegt einerseits in einer positiveren Beurteilung der Evapotranspirationsleistung des Waldes. Andererseits findet aber auch eine tendenziell tiefere Durchwurzelung statt, was die Voraussetzungen für die Makroporenwirkung in Waldböden verbessert. Zudem ist im Wald die Bodenstruktur der obersten Bodenschicht grossflächig kaum je vergleichbar beeinflusst, wie dies auf einer intensiv beweideten Freilandfläche der Fall sein kann.

Die Abflusskoeffizienten sind in Wirklichkeit variabel, in Abhängigkeit des Niederschlagsgeschehens vor und während dem betrachteten Ereignis. Die nachfolgend angegebenen Abflusskoeffizienten sind so festgelegt, dass sie – in einfachen Hochwasserbemessungsansätzen eingesetzt und kombiniert mit einem Extremniederschlag – Hochwasserabflüsse mit geringer Eintretenswahrscheinlichkeit ergeben.

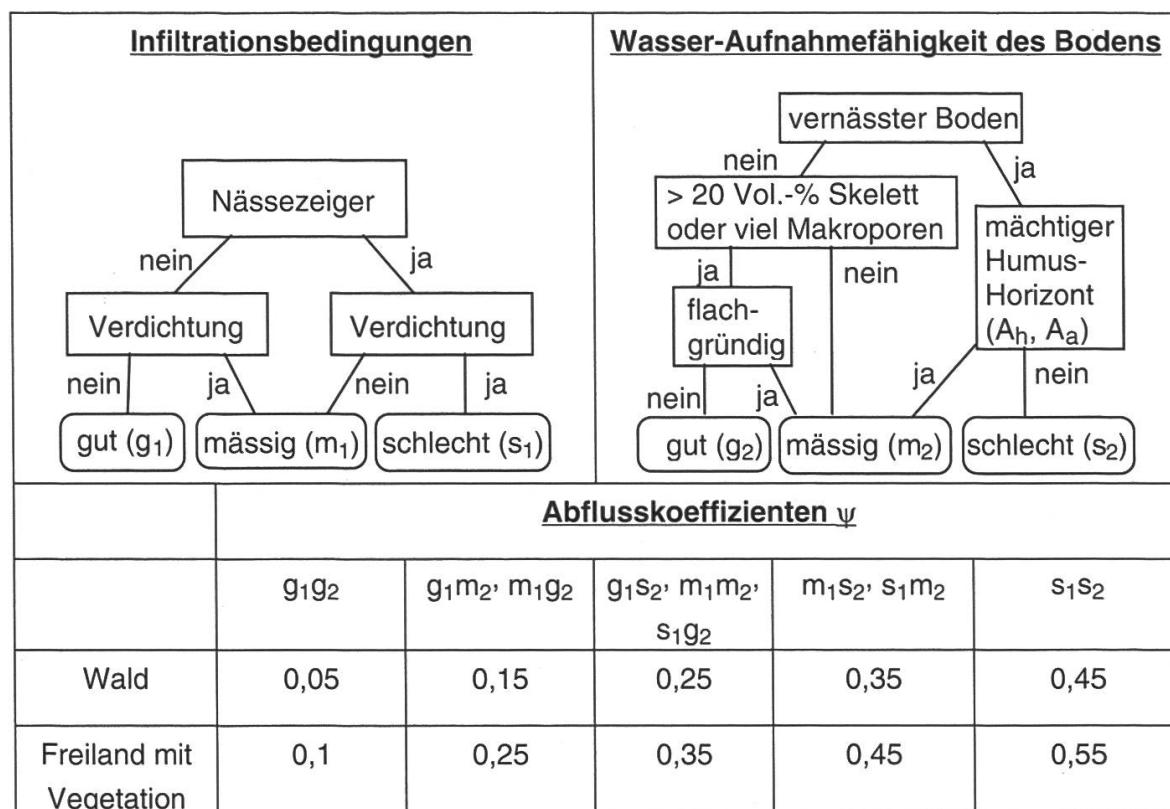


Abbildung 2. Abflusskoeffizienten ψ für den Einsatz in Hochwasser-Bemessungsansätzen. Sie werden für Wald und Freiland in Abhängigkeit von den Infiltrationsbedingungen an der Bodenoberfläche und von der Wasser-Aufnahmefähigkeit des Bodens festgelegt.

a) Beurteilung der Infiltrationsbedingungen an der Bodenoberfläche

Nässezeiger: Bestimmen Nässezeiger den Aspekt der Vegetation, kann von häufiger Sättigung des Bodens ausgegangen werden. Damit wird die Möglichkeit für die Infiltration von Niederschlagswasser eingeschränkt.

Verdichtung: Durch ungünstige Bewirtschaftungsformen wie starke Beweidung, intensives und häufiges, flächendeckendes Befahren oder Skipistennutzung wird die Bodenoberfläche verdichtet. Als Folge werden für die Infiltration wichtige Wassereintrittspforten zerstört. Besonders anfällig auf Verdichtung sind feinkörnige Böden. Merkmale: Verdichtungszeiger, Spuren usw.

Die nachfolgenden Kriterien fließen zwar nicht unmittelbar in das Beurteilungsschema ein, können jedoch im Zweifelsfalle herangezogen werden:

- eine vielfältige und dichte Kraut- und Strauchschicht wirkt sich positiv auf die Infiltrationsbedingungen aus.
- Dachziegelartige Anordnung noch nicht vollständig zersetzter, hydrophob wirkender Pflanzenreste in den Auflagehorizonten kann die Infiltration reduzieren.

b) Beurteilung des Bodens bezüglich der Wasser-Aufnahmefähigkeit

Vernässte Böden wie zum Beispiel Gley, Pseudogley und Stagnogley sind bei Starkniederschlägen schlecht aufnahmefähig, einerseits aufgrund ihrer natürlicherweise hohen Wassersättigung, andererseits aufgrund der zum Teil geringen Durchlässigkeit. Lockere Braunerden und Rendzinen haben im allgemeinen eine gute Durchlässigkeit und ein grosses Wasseraufnahmevermögen. Rohböden sind zwar in der Regel gut durchlässig, können jedoch bei dichtem Untergrund infolge der häufig geringen Mächtigkeit meist nur wenig Niederschlagswasser aufnehmen.

Skelettanteil ($\phi > 2$ mm): selbst feinkörnige Böden sind verhältnismässig gut durchlässig, wenn sie einen entsprechenden Skelettanteil (> 20 Vol.-%) aufweisen.

Makroporen: von Pflanzenwurzeln, Tieren (Regenwürmer) oder durch Schwundrisse gebildete nichtkapillare Hohlräume können Niederschlagswasser schnell von der Bodenoberfläche in grössere Bodentiefen leiten.

Mächtigkeit der aufnahmefähigen und speichernden Horizonte über allfällig undurchlässigen Horizonten: eine geringe Mächtigkeit (< 40 cm) wirkt sich negativ aus.

Humus-Horizonte (Ah oder Aa) über vernässten Böden sind speicherfähig und erhöhen bei ausreichender Mächtigkeit (> 20 cm) die Wasser-Aufnahmefähigkeit.

5.2 Abflusskoeffizienten für vegetationslose Flächen

In Einzugsgebieten im alpinen Bereich können auch vegetationslose Gebiete flächenmässig von Bedeutung sein. Abgestützt auf die erwähnten Grundlagen von Müller (1943) und Zeller (1975) werden für Flächen ohne Vegetation in *Tabelle 1* Bereiche möglicher Abflusskoeffizienten angegeben. Mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Kriterien kann der Abflusskoeffizient genauer eingegrenzt werden.

Tabelle 1. Abflusskoeffizienten für vegetationslose Flächen.

	Abflusskoeffizient ψ
Lockergesteine	$0,05 < \psi < 0,4$
Fels	$0,4 < \psi < 0,8$

Lockergesteine: Unter den Begriff Lockergesteine werden hier Gletscher- und Bachablagerungen, Bergsturzmaterial und Gehängeschutt verstanden. Die Durchlässigkeit der Lockergesteine ist abhängig von der Kornverteilung, der Verdichtung und allenfalls von der Schichtmächtigkeit über dichtem Untergrund. Hohe Abflusskoeffizienten werden beispielsweise für grossen Ton- bzw. Feinanteil, für hohe Lagerungsdichte, für geringe Mächtigkeit der Lockergesteine über kompaktem Fels oder sonst schlecht durchlässigem Untergrund sowie für Permafrost gewählt.

Fels: Kompakter Fels ist in bezug auf die Hochwasserhydrologie undurchlässig. Durch tektonische Beanspruchung sowie Verwitterung an der Oberfläche entstehen jedoch Diskontinuitäten, die einen Teil des Oberflächenwassers in den Untergrund ableiten können. Bei Formationen mit Kalk, Dolomit und Gips können zudem Karsterscheinungen auftreten. Hohe Abflusskoeffizienten werden für kompakten, wenig zerklüfteten Fels und für hangparallele Stauschichtung gewählt.

5.3 Ermittlung eines mittleren Abflusskoeffizienten für ein Einzugsgebiet

Das Abflussverhalten eines Einzugsgebietes kann mit dem hier vorgestellten Ansatz nur mit Hilfe einer Geländebegehung seriös beurteilt werden. Als Vorbereitung hat es sich als sinnvoll erwiesen, das Einzugsgebiet mit Hilfe der Landeskarte provisorisch in Teileinzugsgebiete mit möglichst homogenen Eigenschaften zu unterteilen. Kriterien wie Wald, Freiland, vernässte Stellen, Fels und Schuttflächen, allenfalls Hangneigung und Exposition können dabei berücksichtigt werden. Neben weiteren Grundlagen liefert auch ein Blick in die Bodeneignungskarte der Schweiz (EJPD et al., 1980) einen ersten groben

Eindruck über die zu erwartenden Bodenverhältnisse. Die tatsächlichen Boden- und Bewirtschaftungsverhältnisse gilt es während der Begehung abzuklären. Neben dem Bohrstock haben sich dabei Spaten oder Schaufel als unerlässliche Begleiter erwiesen.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Geländebegehung lässt sich das Einzugsgebiet abschliessend in Teileinzugsgebiete ΔE_i unterteilen, für welche die Abflusskoeffizienten ψ_i nach dem oben vorgeschlagenen Verfahren ermittelt werden. Der mittlere Wert ψ_m des gesamten Einzugsgebietes wird anschliessend durch eine entsprechende Flächengewichtung bestimmt:

$$\Psi_m = \frac{\sum_i (\Psi_i * \Delta E_i)}{\sum_i \Delta E_i} ; \quad E = \sum_i \Delta E_i$$

Einfluss der Hangneigung: Obwohl aus den Berechnungsversuchen auf kleinen Flächen keine direkte Abhängigkeit des Abflusses von der Hangneigung abgeleitet werden kann, sind in steilen Einzugsgebieten grössere Abflussgeschwindigkeiten des Oberflächenabflusses zu erwarten. Dadurch ist eine – wenn auch im Vergleich zu den Angaben von Zeller (1975) geringere – Erhöhung des Abflusskoeffizienten gerechtfertigt: Beträgt die mittlere Neigung der gerinnenahen, massgeblich zum Abfluss beitragenden Einhänge mehr als 60 %, wird der Abflusskoeffizient ψ_m um den Betrag von 0,05 erhöht. Bei Neigungen unter 20% wird ψ_m um 0,03 reduziert. Zwischen 20% und 60% bleibt der Abflusskoeffizient unverändert (Tabelle 2). Für die Beurteilung der Neigungsverhältnisse der Einhänge wird eine an das Gerinne anschliessende Hanglänge von etwa 200 m als massgebend vorgeschlagen.

Tabelle 2. Einfluss der Hangneigung auf den Abflusskoeffizienten.

Hangneigung	ψ_{tot}
J > 60%	$\psi_m + 0,05$
20% > J < 60%	ψ_m
J < 20%	$\psi_m - 0,03$

5.4 Anwendung des Verfahrens in fünf Einzugsgebieten

Das vorgeschlagene Verfahren zur Bestimmung von Abflusskoeffizienten wurde in fünf unterschiedlichen Einzugsgebieten angewendet. Zu jedem dieser Gebiete liegen langjährige Abflussmessreihen vor. In Tabelle 3 sind einige charakteristische Merkmale der untersuchten Einzugsgebiete aufgeführt. Sie unterscheiden sich in wesentlichen Gebietsmerkmalen wie z.B. der Grösse, dem Waldanteil, der Bewirtschaftungsform und dem Vernässungsgrad. Dieser ungleichartige Gebietscharakter spiegelt sich auch in den unterschiedlich

Table 3. Charakterisierung der Untersuchungsgebiete, die im Rahmen des Einzugsgebietstests verwendet wurden. Angaben in Klammern: Beurteilung der Teilflächen gemäss *Abbildung 3*.

	<i>Erlenbach</i>	<i>Vogelbach</i>	<i>Rotenbach</i>	<i>Rietholzbach</i>	<i>Rappengraben</i>
Messperiode [Jahre]	18	26	38	19	92
Fläche [km ²]	0,75	1,55	1,65	3,2	0,60
Anteil Wald	20% (m ₁ s ₂) 20% (g ₁ s ₂)	30% (g ₁ g ₂) 35% (g ₁ s ₂)	6% (g ₁ g ₂) 8% (g ₁ m ₂)	12% (g ₁ g ₂) 17% (g ₁ m ₂)	35% (g ₁ s ₂) –
Anteil Wiese	48% (m ₁ s ₂) –	28% (m ₁ s ₂) –	43% (m ₁ s ₂) –	3% (m ₁ s ₂) 56% (g ₁ m ₂)	10% (m ₁ g ₂) –
Anteil Weide	12% (m ₁ s ₂)	7% (m ₁ s ₂)	43% (m ₁ m ₂)	12% (m ₁ m ₂)	55% (m ₁ g ₂)
Abflusskoeffizient ψ_m	0,39	0,26	0,36	0,23	0,25

hohen Abflusskoeffizienten, die in den verschiedenen Gebieten ermittelt wurden.

Die nach dem vorgestellten Verfahren ermittelten Abflusskoeffizienten ψ_m der fünf Test-Einzugsgebiete fanden Eingang in die Hochwasserschätzungen mit der modifizierten Formel von Melli-Müller sowie mit dem vereinfachten Fließzeitverfahren. In *Abbildung 3* werden die so geschätzten maximalen bzw. 100jährigen Hochwassermengen mit den grössten bisher gemessenen Abflüssen ($Q_{mes, max}$) und dem aus den gemessenen Hochwässern abgeleiteten 100jährigen Hochwasser (HQ100) verglichen.

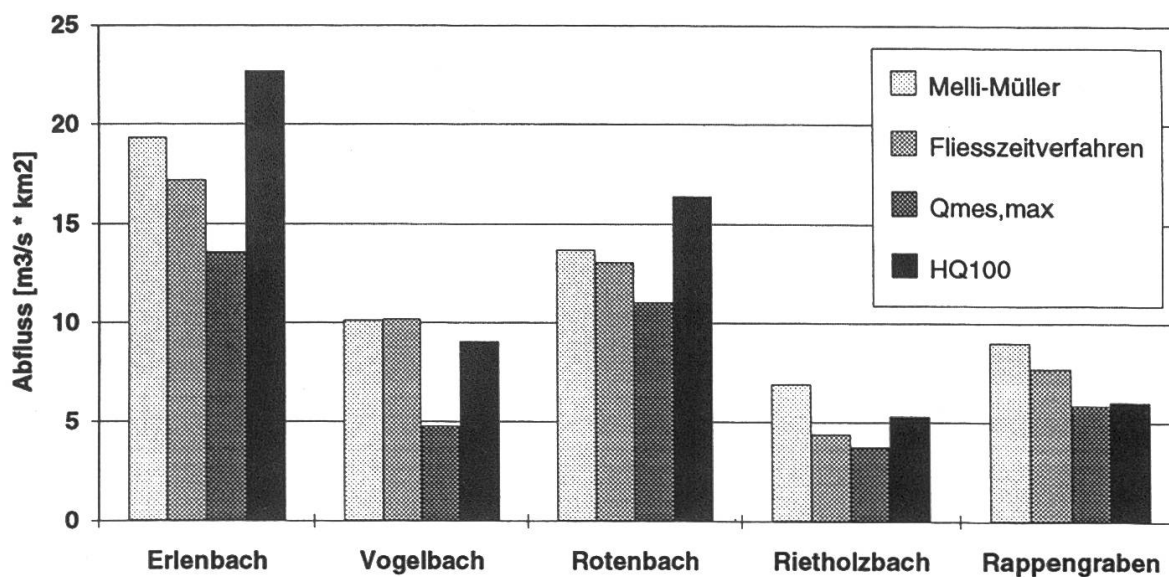


Abbildung 3. Vergleich der Hochwasser-Bemessungsansätze Melli-Müller und Fließzeitverfahren mit den höchsten gemessenen Abflüssen ($Q_{mes, max}$) und aus langjährigen Messreihen abgeleiteten 100jährigen Hochwassermengen (HQ100).

Die ermittelten Hochwasserabflüsse (Melli-Müller, Fliesszeitverfahren) liegen stets über den höchsten gemessenen Werten ($Q_{mes, max}$) sowie teils über, teils unter den aus Messreihen abgeleiteten, 100jährigen Hochwasserabflüssen (HQ100).

Die zur Verfügung stehenden Abflussmessreihen umfassen Perioden zwischen 18 und 92 Jahren. Damit sind die aus den Messungen abgeleiteten 100jährigen Hochwasser statistisch unterschiedlich gut abgestützt und der Vergleich mit den Hochwasserschätzungen ist demzufolge nicht für alle Einzugsgebiete gleich zu gewichten. Für den Rappengraben mit der längsten Messperiode liegen die Hochwasserabschätzungen ebenso wie im Vogelbach über dem statistisch ermittelten 100jährigen Hochwasser. In den drei übrigen Gebieten liegen die Hochwasserabschätzungen eher darunter. Ausgehend vom statistisch ermittelten 100jährigen Hochwasser liegen die Abweichungen der Schätzwerte im Bereich von max. $\pm 25\%$. Berücksichtigt man dabei, dass das statistisch ermittelte 100jährige Hochwasser mit einem Fehler ähnlicher Grössenordnung behaftet ist, kann das vorgeschlagene Verfahren zur Bestimmung der Abflusskoeffizienten als plausibel beurteilt werden.

6. Diskussion

Die Anwendung des Verfahrens in den Testeinzugsgebieten hat gezeigt, dass die Abflusskoeffizienten mit realistischem Aufwand und nachvollziehbar ermittelt werden können. Für die beurteilten Einzugsgebiete wurden je nach Zugänglichkeit ein bis drei Tage für Büro- und Feldarbeiten aufgewendet. Die Verwendung der Abflusskoeffizienten in zwei Hochwasser-Schätzverfahren hat plausible Werte ergeben. Sind Niederschlags- und Abflussdaten von Hochwasserereignissen bekannt, können die entsprechenden Abflusskoeffizienten auch berechnet werden. In den Test-Einzugsgebieten konnten diese Ereignis-Koeffizienten jedoch nicht für eine Eichung der nach dem vorgeschlagenen Verfahren ermittelten Abflusskoeffizienten ψ verwendet werden. In den meisten Fällen ergaben die grössten gemessenen Abflussereignisse nämlich nicht die höchsten Abflusskoeffizienten. Dies ist zu einem massgebenden Teil auf unterschiedliche Sättigungsverhältnisse zum Zeitpunkt des Hochwasserereignisses zurückzuführen. Wenn z.B. kurz vor dem massgebenden Ereignis ein grösserer Niederschlag gefallen ist, reicht ein verhältnismässig kleiner Niederschlag aus, um einen Hochwasserabfluss zu erzeugen. Diese Konstellation führt zu einem hohen Ereignis-Abflusskoeffizienten. Naef *et al.* (1986) berichten von gleichen Erfahrungen auch in grösseren Einzugsgebieten. Die Autoren zeigen auf, dass selbst bei grössten Hochwasserereignissen nie alle bestimmenden Einflussfaktoren (Abflussbereitschaft des Einzugsgebietes sowie Niederschlagsverlauf und -intensität) gleichzeitig den ungünstigsten Wert annehmen. Demzufolge ist für Hochwasserschätzungen, die auf dem Extremnieder-

schlag basieren, nicht der grösste, aus gemessenen Ereignissen abgeleitete Abflusskoeffizient einzusetzen, sondern ein Wert, der aufgrund von Standortseigenschaften bestimmt wird.

Die in *Abbildung 2* für Einzugsgebiets-Teilflächen vorgeschlagenen Abflusskoeffizienten sind grundsätzlich kleiner als jene, die bei Beregnungsversuchen auf Flächen zwischen 60 bis 100 m² gemessen werden können. Der Grund liegt vor allem im Wasserrückhalt in Flachstellen und kleinen Mulden, der sogenannten Geländeretention. Häufig wird zudem die Drainagedichte, d.h. die Länge des Gerinnenetzes pro Flächeneinheit, als aussagekräftiger Parameter für die Beurteilung des Abflussverhaltens eines Gebietes während Starkniederschlägen erwähnt (Zeller, 1995). Die Drainagedichte wird in einem Einzugsgebiet massgeblich durch die Boden- und Vegetationsverhältnisse bestimmt. Sowohl die Geländeretention wie auch die Drainagedichte sind im vorgestellten Abschätzverfahren implizit berücksichtigt.

Das präsentierte Verfahren wurde in fünf Versuchseinzugsgebieten mit Flächen zwischen 0,6 und 3,2 km² überprüft, die sich hauptsächlich im voralpinen Raum befinden. Unseres Erachtens können die Abflusskoeffizienten auch im Alpenraum nach den gleichen Grundsätzen bestimmt werden. Das Verfahren kann in Einzugsgebieten bis zu ungefähr 10 km² rationell eingesetzt werden. Denkbar ist zudem, dass die beschriebenen Beurteilungsgrundlagen für Abflusskoeffizienten nicht nur bei Hochwasserschätzungen für Bemessungszwecke oder bei Gefahrenbeurteilungen eingesetzt werden können, sondern dass sie auch bei Aufgaben wie zum Beispiel der Definition minimaler Pflegemassnahmen in Schutzwäldern einen Beitrag leisten können.

Zusammenfassung

Aufgrund einer Auswahl von aus der Literatur bekannten Infiltrations- und Beregnungsversuchen werden massgebende Standortseigenschaften für die Hochwasserentstehung abgeleitet. Eine Beurteilung der Einflussgrössen Vegetation, Bewirtschaftung und Bodeneigenschaften erlaubt die Bestimmung von angepassten Abflusskoeffizienten, welche ihrerseits eine Hochwasserschätzung ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit wird ein Vorschlag für die Schätzung dieser Abflusskoeffizienten vorgestellt. Dabei werden einerseits die Infiltrationsbedingungen an der Bodenoberfläche und andererseits die Wasser-Aufnahmefähigkeit des Bodens beurteilt. Als Kriterien für die Infiltrationsbedingungen dienen die Vernässung und die Verdichtung. Diese beiden Aspekte lassen sich über Zeigerpflanzen bzw. über Kenntnisse der Bewirtschaftung beurteilen. Bodenverdichtend wirken sich grundsätzlich die Beweidung, das Befahren mit schweren land- und forstwirtschaftlichen Maschinen sowie die Skipistennutzung aus. Für die Beurteilung der Wasser-Aufnahmefähig-

keit dienen die Kriterien der Bodenansprache: Bodenaufbau, Skelettgehalt und die Gründigkeit. Das Verfahren wird in fünf kleinen Einzugsgebieten getestet, in denen langjährige Messreihen vorliegen.

Résumé

Estimation de débits de crues dans des petits bassins versants en fonction de différents paramètres locaux

Les facteurs locaux déterminants pour l'apparition de crues ont été dégagés à partir de publications sur des expériences d'infiltration ou d'aspersion. La végétation, les propriétés du sol et le mode d'utilisation ont une influence sur le coefficient de ruissellement. Quantifier ces effets permet donc d'évaluer les crues possibles. Une telle démarche est proposée ici. Le coefficient de ruissellement est estimé à partir des conditions d'infiltration en surface et d'après la capacité d'absorption hydrique du sol. Les conditions d'infiltration sont elles-mêmes considérées en fonction du degré de tassement du sol et de sa tendance à présenter une humidité stagnante. Ces deux aspects peuvent être évalués soit d'après des plantes indicatrices, soit en fonctions de l'exploitation du sol. La pâture, les machines agricoles ou sylvicoles lourdes ainsi que les pistes de ski sont en principe des facteurs de tassement. Quant à la capacité d'absorption hydrique, elle peut être déduite de l'examen du profil: structure du sol, squelette et profondeur. La méthode proposée ici a été testée dans cinq petits bassins versants dont on dispose de longues séries de mesures.

Summary

Influence of Different Site Characteristics on Estimating Peakflow in Small Catchments

From a selection of infiltration and field sprinkler experiments described in literature, we derive some governing site characteristics for the creation of peakflow. An investigation of vegetation, land use management and soil parameters permits the determination of adapted runoff coefficients which allows an estimation of peakflow. In this paper a method to estimate these runoff coefficients is proposed. Infiltration conditions and water uptake capacity are investigated. Waterlogging and compaction are the primary criteria for the infiltration conditions. These two aspects can be assessed by indicator plants and the knowledge of land use management. Pasturing and riding heavy machinery as well as using the land as ski run have important compacting effects. The water uptake capacity is judged by criteria of soil characteristics such as the structure of the soil layers, skeleton-content and soil depth. The procedure is tested in five small catchments, where a data series over many years exists.

Literatur

- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1996: Abfluss- und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten – Grundlagen zum integralen Wildbachschutz. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (Hrsg.), 27: 92 S.
- Böll, A.: Wildbach- und Hangverbau. Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. (in Vorbereitung).
- Bunza, G.; Schauer, T., 1989: Der Einfluss von Vegetation, Geologie und Nutzung auf den Oberflächenabfluss bei künstlichen Starkregen in Wildbachgebieten der Bayerischen Alpen. Informationsbericht 2/89 des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, München. S.127–150.
- Burger, H., 1922: Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 13, 1: 3–221.
- Burger, H., 1927: Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 14, 2: 201–250.
- Burger, H., 1937: Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 20, 1: 5–100.
- EJPD (Eidgenöss. Justiz- u. Polizeidepartement); Eidgenöss. Volkswirtschaftsdepartement; Eidgenöss. Departement des Innern, 1980: Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200 000. EDMZ, Bern.
- Faeh, A.; Scherrer, S.; Naef, F., 1996: Bodenwasserhaushalt und Hochwasserbildung – Resultate von Beregnungsversuchen. Tagungsunterlagen Internationales Symposium Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen. Vol. 1: 113–124. Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt.
- Forster, F., 1992: Hochwasserabflüsse in kleinen Einzugsgebieten. Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren (FAN). Kursunterlagen vom Oktober 1992 (unveröff.).
- Karl, J.; Toldrian, H., 1973: Eine transportable Beregnungsanlage für die Messung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. Wasser und Boden 25: 63–65.
- Lang, E., 1995: Starkregensimulation – Ein Beitrag zur Erforschung von Hochwasserereignissen. Schriftenreihe der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 90: 70 S.
- Markart, G.; Kohl, B., 1995: Starkregensimulation und bodenphysikalische Kennwerte als Grundlage der Abschätzung von Abfluss- und Infiltrationseigenschaften alpiner Boden-/ Vegetationseinheiten. Ergebnisse der Beregnungsversuche im Mustereinzugsgebiet Löhnersbach bei Saalbach in Salzburg. Schriftenreihe der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 89: 38 S.
- Müller, R., 1943: Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen. Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH Zürich 4: 188 S.
- Naef, F.; Zuidema, P.; Koella, E., 1986: Abschätzung von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie, Bern. 33: 195–233.
- Naef, F.; Scherrer, S.; Faeh, A., 1994: Wie reagiert ein Einzugsgebiet auf extreme Niederschläge? Alte und neue Ideen und Experimente. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz 35: 111–119. Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (Hrsg.), Bern.
- Proffitt, A.P.B.; Bendotti, S.; Howell, M.R.; Eastham, J., 1993: The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a red-brown earth. Aust. J. Agric. Res. 44: 317–331.
- Richard, F.; Lüscher, P.; Strobel, Th., 1978–1987: Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Bd. 1–4. Birmensdorf, Eidgenöss. Anst. forstl. Vers.wes.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P., 1992: Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Aufl. Stuttgart, Enke Verlag. 491 S.
- Schwarz, O., 1985: Direktabfluss, Versickerung und Bodenabtrag in Waldbeständen. Messungen mit einer transportablen Beregnungsanlage in Baden-Württemberg. Beiträge zu Oberflächenabfluss und Stoffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen. DVWK-Schriften 71: 185–230. Hamburg, Parey.
- Sullivan, L.A., 1990: Soil organic matter, Air encapsulation and Water-Stable aggregation. Journal of Soil Science 41: 529–534.
- Zeller, J., 1975: Berechnung der Abflusswassermenge. Vorlesungsunterlagen Wildbach- und Hangverbau, Abteilung VI, ETH-Z. (unveröffentlicht).

- Zeller, J., 1995: Das Gewässernetz, ein quantitativer Indikator für den Charakter von Kleingebieten. Wildbach- und Lawinenverbau 59, Heft 128: 5–64.
- Zuidema, P.K., 1985: Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich 79: 150 S.

Dank

Den Herren G. Röthlisberger und J. Stückelberger sei für ihre Unterstützung bei der Auswertung des Datenmaterials und R. Bart für die wertvollen Diskussionsbeiträge bestens gedankt.

Abbildungen gedruckt mit Unterstützung der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.

Verfasser:

Christian Rickli, dipl. Forsting. ETH, Sektion Verbauwesen und Forsttechnik, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH-8903 Birmensdorf.

Felix Forster, dipl. Bauing. ETH, Sektion Forstliche Hydrologie, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH-8903 Birmensdorf.