

## Von der Starkregensimulation zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen kleiner Einzugsgebiete

Bernhard Kohl, Gerhard Markart

### Zusammenfassung

Die Grundlage zur Festlegung von Bemessungshochwässern mit hundert- bzw. hundertfünfzigjähriger Auftretswahrscheinlichkeit (z.B. für die Gefahrenzonenplanung) bilden vordergründig die statistischen Auswertungen von Abflusspegeln. Allerdings werden in Österreich nur sehr wenige Wildbacheinzugsgebiete ausreichend untersucht.

In der langen Geschichte des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung (FTD f. WLW) in Österreich, aber auch in vergleichbaren Institutionen der Schweiz und Deutschland, wurden aus diesem Grund zahlreiche Rechen- und Modellierungsansätze zur Abschätzung von Abflussspitzen in Wildbacheinzugsgebieten entwickelt. Das Gros solcher empirischer „Faustformeln“ enthält, neben der Einzugsgebietsgröße, nur sehr wenige andere Parameter, meist ohne jeglichen Prozessbezug. Der Einsatz von N/A-Modellen in Österreich ist weit verbreitet, findet allerdings für die Bestimmung von Hochwasserabflüssen in kleinen Wildbacheinzugsgebieten noch selten Anwendung. Ursache ist meist nicht das Fehlen von Modellen, die Anzahl und Vielfalt ist groß und kaum überschaubar. Vielmehr liegt der Grund oft in der aufwendigen Ermittlung, meist schlecht reproduzierbarer Eingangsparameter.

Die Auswahl und Festlegung der Modellparameter ist jedoch ein entscheidender Schritt in der N/A-Modellierung. Informationen über Anfangsverluste, Oberflächenabfluss und Infiltration, Oberflächenrauheit und Fließgeschwindigkeit sind für alpine Boden-/ Vegetationskomplexe eine Seltenheit. Die Auswertung von Starkregensimulationen, zusammengefaßt in einer Datenbank mit über 700 Experimenten, erlaubt es, wesentliche Größen für die N/A-Modellierung nachvollziehbar und mit einem für den Praktiker vertretbaren Aufwand zu bestimmen. Die Implementierung dieser Parameter in ein modifiziertes Laufzeitverfahren ermöglicht die nachvollziehbare Berechnung plausibler Spitzenabflüsse.

### 1. Einleitung

In Österreich gibt es laut digitalem Wildbach und Lawinenkataster (SCHNETZER 2009, schriftliche Mitteilung) insgesamt 12.171 Wildbäche. Die durchschnittliche Größe eines österreichischen Wildbacheinzugsgebietes liegt bei 4,7 km<sup>2</sup>. Beobachtete Wildbacheinzugsgebiete dieser Größenordnung, also jene, die mit einem Messpegel ausgestattet sind, bestehen dagegen lediglich 13 (BMLFUW 2007). Dementsprechend sind die österreichischen Wildbacheinzugsgebiete fast zur Gänze unbeobachtet (Abbildung 1).

### 2. Experimentelle Abflussuntersuchungen - Geländeanleitung

Die Abschätzung von Abflussbeiwerten beitragender Flächen im Starkregenfall erfolgt in der Praxis vielfach nur anhand ungenauer bzw. nicht gebietsspezifischer Literaturangaben. So finden sich in vielen Publikationen tabellarische Angaben, wie beispielsweise in dem von ZELLER (1974, 1981) vorgestellten Laufzeitverfahren, die nur eine stark eingeschränkte Differenzierung der Einheiten nach ihrem Abflussbeiwert C (Synonym: Wasserverlust-

koeffizient) erlauben. Mit diesen unpräzisen Angaben werden dann oft mit Hilfe von Faustformeln Gebietsabflüsse berechnet (HAGEN et al. 2007). Zwar publizierten seit den 70er Jahren des 20. Jh. verschiedenste Institutionen in Mitteleuropa laufend Ergebnisse von Starkregensimulationen (FBVA bzw. BFW in Österreich, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft bzw. LFU in Bayern oder Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH in der Schweiz), es blieb jedoch weiterhin das Problem der Generalisierung und der Übertragbarkeit dieser Resultate auf andere Einzugsgebiete bestehen (MARKART et al. 2006).

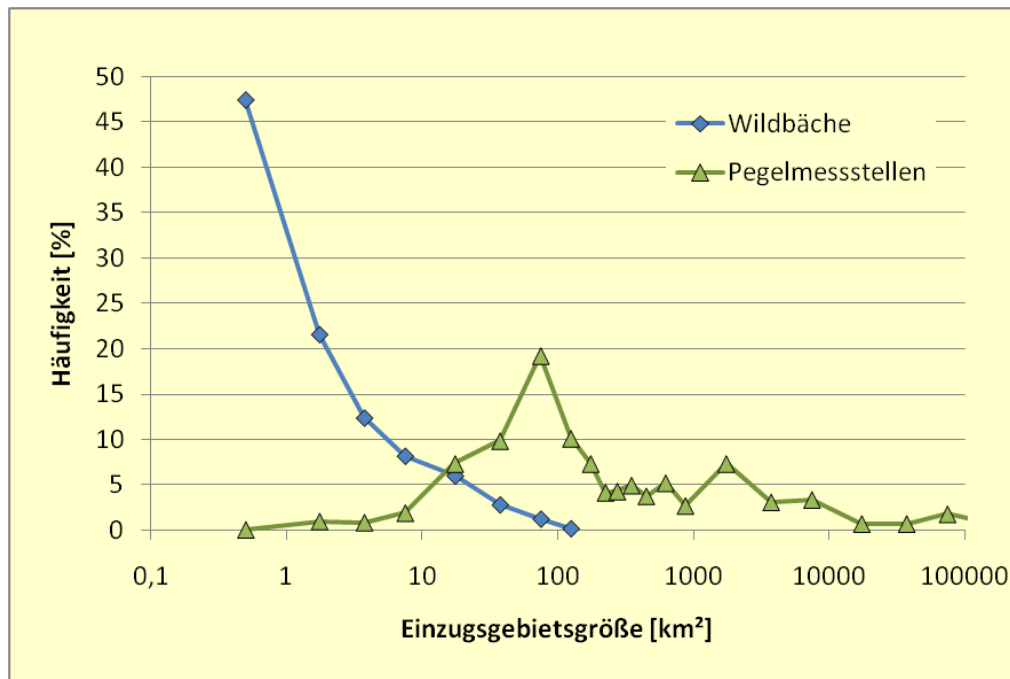


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung österreichischer Wildbäche und Pegelmessstellen nach ihrer Einzugsgebietsgröße.

Ansätze zu Wegleitungen für die Abschätzung von Abflussbeiwerten für beitragende Flächen im Starkregenfall finden sich bereits bei RICKLI & FORSTER (1997) oder LÖHMANNSRÖBEN et al. (2000). Gerade in Österreich wurde aber der Bedarf nach nachvollziehbaren und einfach umsetzbaren Angaben zum Abflussverhalten von der Praxis mit großem Nachdruck geäußert. Daher werden am Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen des BFW in Innsbruck und Wien seit den 1970er Jahren Beregnungen mit Großregenanlagen (50 bis 100 m<sup>2</sup>) auf verschiedenen alpinen Boden-/Vegetationseinheiten mit Blockregen ( $i_T = 100$  mm/h, an vielen Standorten auch  $i_T = 30$  und 60 mm/h) durchgeführt. Der Versuchsaufbau einer derartigen Anlage ist bei MARKART & KOHL (1995) beschrieben. Im Rahmen solcher Starkregensimulationen erfolgen i.d.R. auch umfangreiche Begleituntersuchungen, wie das Monitoring der Bodenfeuchte an mehreren Profilen und in verschiedenen Tiefenstufen über TDR-Sonden, die Charakterisierung der wichtigsten bodenphysikalischen Kennwerte (Lagerungsdichte, Porenvolumina, Textur u.a.) oder die Beschreibung von Vegetation sowie Art und Intensität der Landnutzung.

Zurzeit liegen am BFW Ergebnisse von mehr als 300 Starkregensimulationen vor. Um eine möglichst breite Datenbasis zu erreichen, wurde der Datenpool des BFW um Ergebnisse von ca. 420 Einzelberechnungen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LFU) ergänzt und die Berechnungsanlagen der beiden Institutionen in gemeinsamen Feldversuchen abgeglichen (KOHL et al. 1997, 2002). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Vergleichsberechnungen wurden die Daten in einer mit Unterstützung des BMLFUW erstellten Datenbank zusammengeführt.

Jede einzelne Starkregensimulation stellt trotz der standardisierten Versuchsanordnung ein Unikat dar (variabler Systemzustand aufgrund der Vorfeuchte, saisonal wechselnde Nutzungseinflüsse, saisonale Änderung der Eigenschaften der Vegetationsdecke, der Humusaufgabe und der Bodenkrume, etc.). Es zeigte sich rasch, dass über eine rein statistische Auswertung des Datenpools viele abflussrelevante Faktoren nicht erfasst werden konnten. Daher wurde der Datenpool nach einzelnen Kriterien von Spezialisten mit langjähriger Erfahrung ausgewertet und in intensiver Kooperation zwischen BFW und LFU eine praxistaugliche Anleitung zur Abschätzung des Abflussverhaltens bei konvektiven Starkregen für die wichtigsten Vegetationskomplexe des Ostalpenraumes entwickelt (MARKART et al. 2004).

Die Geländeanleitung ist für die Abschätzung des potenziellen Oberflächenabflusses typischer alpiner Vegetations-/Bodeneinheiten unter realistisch schlechten Vorbedingungen bei Starkregen vorgesehen (Regenintensität = 100 mm/h), und soll auf ein realistisches Worst-Case-Ereignis für das jeweils zu beurteilende Einzugsgebiet ausgerichtet sein. Der Anwender muss also vor Zuordnung der Abflussbeiwerte abklären, in welchem Systemzustand er die zu beurteilende Einheit zum aktuellen Zeitpunkt antrifft und wie der realistisch schlechte Systemzustand eigentlich aussehen könnte (MARKART et al. 2006).

Der Anwender ermittelt im Feld die Größen  $C$  (Abflussbeiwert  $\Psi_{100}$  bei Abflusskonstanz) und  $c$  (Oberflächenrauheit). Im Gelände ist die entsprechende Vegetationsform auszuwählen und über die Indikatoren des Abflussverhaltens (Spalten 2 - 4 in Tabelle 1) eine entsprechende Abflussklasse zuzuordnen.

Ähnlich wie bei der Beurteilung der Abflussbeiwerte wird auch bei der Abschätzung der Rauheit von einer sehr groben Einteilung nach den wichtigsten Oberflächenbedeckungstypen ausgegangen. Die effektive Klassifizierung der Rauheit richtet sich nach Art und Qualität des Bewuchses bzw. der Bodendeckung (Beurteilungsschema siehe Abbildung 2). Die Rauheit wird vereinfachend für die Dauer eines Niederschlagsereignisses als konstant angesehen. Das bedeutet, dass Änderungen von Eigenschaften während des Niederschlagsereignisses unberücksichtigt bleiben; z.B. mit zunehmender Ereignisdauer abnehmende hydrophobe Wirkung organischer Substanzen, etc.

Aus dem zur Verfügung stehenden Datenpool ließen sich Beurteilungskriterien für die folgenden, im Ostalpenraum vorkommenden hydrologischen Einheiten entwerfen: verschiedene alpine Zwergstrauchheiden, Mähwiesen und Rasen, Rohböden und Planien, verschiedene Nadelwälder, Laubwälder, Hochstaudenfluren und Grünerlengebüsch. Als maßgebliche Indikatoren für die Bereitschaft eines Standortes zur Bildung von Oberflächenabfluss können die Faktorengruppen Bodeneigenschaften, Art und Intensität der Landnutzung, standörtliche Besonderheiten und Pflanzen als Standortsindikator angesehen werden.

Tab.1: Schema für die Zuordnung von Abflussbeiwertklassen AKL  
(tr-mf = trocken bis mäßig frisch; n = nass)

Vegetations- einheit	Boden	Nutzung Besonderheiten	Zeigerwert Feuchte	AKL	$\Psi_{100}$
Hydrologische Vegetationsform (Zwergstrauchheide, Wald, Rasen,...)	Grob-Boden, locker	Keine Nutzung / Belastung, keine Vernässung, kein Kleingerinnenetz	tr - mf	0	0
				1	0,05
				2	0,2
	Fein-Boden, bindig, dicht	Intensive Belastung, Intensivweide, Häufung von Tiefenlinien, ...	n	3	0,4
				4	0,625
	dicht	Offene Wasserflächen, Asphalt, Beton, Fels, ...	n	5	0,875
			6	1	

Die mit der Geländeanleitung ermittelten Parameter Abflussbeiwert und Oberflächenrauheit können zur Parametrisierung einfacher N/A-Ansätze herangezogen werden, beispielsweise indirekt über Fließgeschwindigkeitsansätze oder direkt für den Einsatz in Modellen wie ZEMOKOST (STEPANEK et al. 2004) oder HEC-HMS.

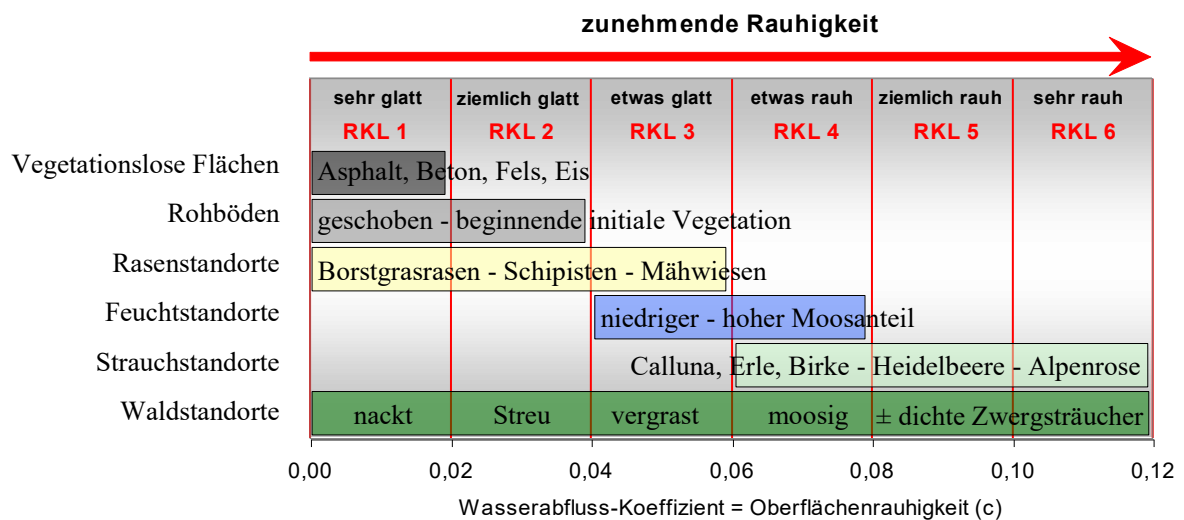


Abb.2: Schema zur Klassifizierung der Oberflächenrauheit für verschiedene Vegetations- bzw. Bodenbedeckungstypen

### 3. Das N-A-Modell ZEMOKOST

ZELLER veröffentlichte erstmals 1974 ein hydrologisches Modell zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten, 1981 wurde das Werk erneut aufgelegt. Das resultierende als „Laufzeitmethode“ bezeichnete Verfahren trägt der Vorstellung Rechnung, dass ein Einzugsgebiet dann die maximale Abflussspitze einer definierten Jährlichkeit liefert, wenn die Niederschlagsdauer der totalen Laufzeit entspricht und die in dieser Zeit maximal mögliche Intensität (bei definierter Wiederkehrwahrscheinlichkeit) auf das Einzugsgebiet auftrifft. Unter totaler Laufzeit wird dabei die Zeit verstanden, die ein imaginärer Wassertropfen vom entferntesten Punkt der Wasserscheide bis zur Beobachtungsstelle benötigt. Diese Laufzeit des Tropfens („Laufzeitmethode“) setzt sich aus der Oberflächenlaufzeit und der Gerinnelaufzeit zusammen.

Unter dem Titel ZEMOKOST wurde am Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen (BFW) gemeinsam mit Praktikern des österreichischen FTD f. WLW dieses Laufzeitverfahren modifiziert und ein neues Modell zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten entwickelt und getestet (KOHL & STEPANEK, 2005).

Die wesentlichen Bausteine und Parameter der Laufzeitmethode ZEMOKOST sind in Abbildung 3 und Tabelle 2 dargestellt.

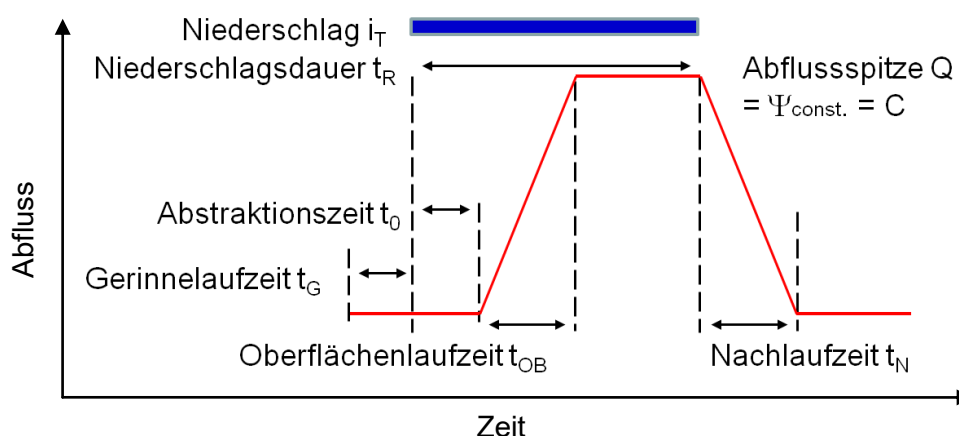


Abb. 3: Bausteine der Laufzeitmethode ZEMOKOST.

Eine hydrologische Reaktionseinheit (Berechnungsfläche bzw. Teileinzugsgebiet) erzeugt eine Abflussspitze  $Q$  als Produkt aus Fläche  $A$  und Effektivregen. Letzterer ist über den Abflussbeiwert  $C$  und den Niederschlagsinput  $i_T$  definiert (Rationalformel).

$$Q = A \cdot (C \cdot i_T) \quad (1)$$

Die Abstraktionszeit  $t_0$  ist jener Zeitraum, der von Beginn des Niederschlagsereignisses verstreicht, bis sich der erste Oberflächenabfluss bildet. Der Anfangsverlust entspricht demnach jener Niederschlagsmenge, die erforderlich ist, um einen Direktabfluss zu erzeugen. Auswertungen aus Starkregensimulationen bilden die Grundlage für eine standardisierte Berechnung der Anfangsverluste. Kapitel 3.4.2 behandelt diese Auswertungen im Detail.

Der Anstieg der Abflusswelle ist neben dem Effektivregen und der Geländetopologie (Fließlänge am Hang und Hangneigung) von der Oberflächenrauheit  $c$  (Synonym: Wasserabflusskoeffizient) abhängig. Die Oberflächenlaufzeit  $t_{OB}$  wird in ZEMOKOST laut IZZARD (1946) berechnet:

$$t_{OB} = \frac{527 \cdot c \cdot L_{OB}^{1/3}}{J_{OB}^{1/3} \cdot (C \cdot i_T)^{2/3}} \quad (2)$$

An Homogenstandorten ist dieses Abflussschema für Starkregensimulationen sehr gut reproduzierbar. Abweichungen von der Trapezganglinie haben ihre Ursache einerseits durch Veränderungen im Abflussprozess und liegen andererseits an der vereinfachten Vorstellung einer konstanten Oberflächenrauheit. Ein Linearspeicheransatz mit definiertem Retentionskoeffizienten ( $k = t_{OB}$ ) trägt dem Umstand der nicht konstanten Oberflächenrauheit und Inhomogenitäten der Standorte Rechnung und erzeugt naturnähere Abflusswellen.

Tab. 2: Wesentliche Eingangsgrößen für das N/A Modell ZEMOKOST

Niederschlag	T	Wiederkehrzeit [a]
	$t_R$	Regendauer [min]
	$i_T$	Gebietsniederschlag - Intensität [mm/h]
Abflussbildung Oberfläche und Zwischenabfluss	A	Fläche der Teileinzugsgebiete [km <sup>2</sup> ]
	$L_{OB}$	projizierter Oberflächenfließweg [m]
	$J_{OB}$	Hangneigung [-]
	AKL	Abflussbeiwertklassen [ha oder %]
	RKL	Rauheitsklassen [ha oder %]
	$A_{ZA}$	Beitragende Fläche zum Zwischenabfluss [%]
	ZAI	Durchlässigkeitsindex für den Zwischenabfluss [-]
SZI	Systemzustandsindex [min]	
Gerinnerouting	$L_G$	Gerinnelänge (Hauptabschnitt - TEZG) [m]
	$J_G$	Gerinneneigung (Hauptabschnitt - TEZG) [°]
	D90	Gerinnerauheit – 90% Korndurchmesser [m]

Die Fließgeschwindigkeit im Gerinne  $v_G$  wird in ZEMOKOST nach RICKENMANN (1996) berechnet. Sie wird durch die Gerinneneigung, den Korndurchmesser D90, den Spitzenabfluss  $Q$  und die Erdbeschleunigung  $g$  definiert.

$$v_G = \frac{0,96 \cdot g^{0,36} \cdot Q^{0,29} \cdot J_G^{0,35}}{D90^{0,23}} \quad (3)$$

Das Programm ZEMOKOST ist in MS EXCEL programmiert und in einzelne Arbeitsblätter gegliedert. Die folgenden Kapitel führen durch diese Arbeitsblätter und erläutern ihren Inhalt.

### 3.1. Niederschlag

Die Abschätzung des Niederschlags ist für die N/A-Modellierung sehr entscheidend, insofern als kein Modell, sei es physikalisch fundiert oder empirisch begründet, in der Lage sein wird akkurate Abflussprognosen zu erzeugen, wenn die Eingangsgrößen ins Modell den

Niederschlagsinput nicht angemessen charakterisieren. Es gilt das gängige GIGO Prinzip „garbage in, garbage out“ (BEVEN 2001).

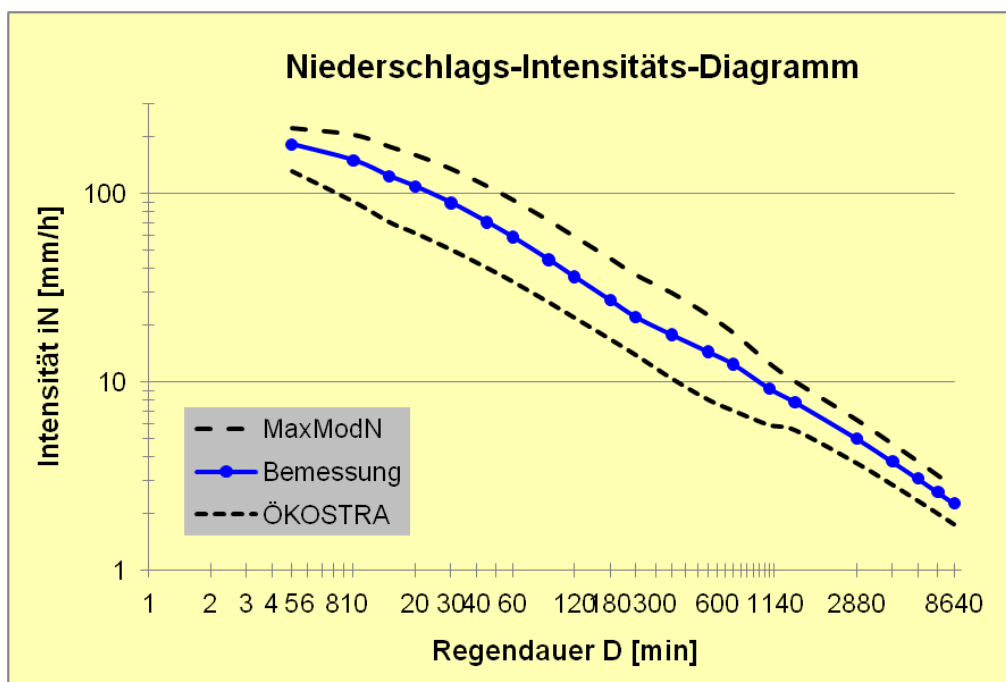


Abb. 4: Niederschlags-Intensitätsdiagramm für drei unterschiedliche Niederschlagsauswertungen.

Seit 01.02.2009 bietet das Bundesministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft BMLFUW, Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt, im Internetportal für hydrographische Daten Österreichs (eHYD) Bemessungsniederschläge zur Verwendung an (<http://gis.lebensministerium.at/ehyd>). Österreichweit stehen hier 3 Typen von Niederschlagsauswertungen für Dauerstufen von 5 Minuten bis 6 Tagen und Jährlichkeiten bis 100 zur Verfügung, die als Grundlage für Bemessungsaufgaben verwendet werden können. Es handelt sich dabei um interpolierte, extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen (ÖKOSTRA), maximierte Modellniederschläge (MaxModN) und die Bemessungsniederschläge. Der Hydrographische Dienst Österreichs empfiehlt, für Bemessungsaufgaben die Bemessungsniederschlagswerte zu verwenden. Für die Detailplanung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen sind diese (Basis-) Bemessungsniederschläge mit aktuellen Auswertungsergebnissen zu vergleichen und – wenn notwendig – zu modifizieren. Aus Abbildung 4, welche im Niederschlags-Intensitäts-Diagramm die drei verschiedenen Niederschlagsauswertungen an einem Gitterpunkt extrapoliert auf die Jährlichkeit 150 gegenüberstellt, ist die große Spanne deutlich erkennbar. Alle drei Niederschlagswerte (ÖKOSTRA-, MaxModN- und Bemessungsdaten) sind Punktniederschlagswerte. Der Gitterpunktbereich in dem die jeweiligen Niederschlagswerte an jedem beliebigen Punkt auftreten können beträgt rund 6 x 6 km. Für größere Einzugsgebiete sind flächengewichtete Mittelwerte zu bilden.

Für die N/A-Modellierung in ZEMOKOST wird die Niederschlagsmenge  $hN$  als Funktion der Dauerstufe  $D$  und der Wiederkehrzeit  $T$  über die Ausgleichsparameter  $u$  und  $w$  angegeben:

$$hN(D, T) = u(D) + w(D) * \ln(T) \quad (4)$$

In dieser Form können Dauerstufen von 5 Minuten bis 6 Tagen beliebiger Jährlichkeit modelliert werden. ZEMOKOST arbeitet mit Blockniederschlägen, was in Bezug zu den zugrundeliegenden Starkregensimulationen und den sonstigen großen Unsicherheiten betreffend Niederschlag gerechtfertigt erscheint. Eine flächenabhängige Abminderung des Niederschlags kann für das Gesamtgebiet über eine Reduktion der Regenintensität (LORENZ & SKODA, 2000) oder auf Teileinzugsgebietsebene prozentuell erfolgen.

### 3.2 Parameter für den gerinnelosen, oberflächlichen Abfluss

Die räumliche Differenzierung erfolgt in ZEMOKOST nach Teileinzugsgebieten. Mit steigender Einzugsgebietsgröße gewinnt die Frage, wie sich die Hochwasserwellen aus den verschiedenen Teilgebieten überlagern, an Bedeutung. Hydrologische Teileinzugsgebiete werden anhand der hydrographischen Verhältnisse (Hauptknotenpunkte, Homogenbereiche Vegetation-Boden-Landnutzung) ermittelt und über eine Knotentopologie miteinander verbunden.

Neben der Knotentopologie sind in diesem Arbeitsblatt „Topo OA“ die Teileinzugsgebietsfläche  $A$ , die Weglänge des gerinnelosen Abflusses  $L_{OB}$  und die mittlere Hangneigung  $J_{OB}$  als obligatorische Parameter enthalten. Der gerinnelose Fließweg ist definiert als durchschnittlicher maximaler Fließweg an der Oberfläche des Teileinzugsgebietes (geländeparallel). Das entspricht dem Mittelwert der Fließwege aller Wasserscheidpunkte eines Gebietes bis zu einem Gerinnepunkt. Diese durchschnittliche maximale Fließlänge ist somit direkt von der Detailliertheit des Gewässernetzes abhängig. Sehr detaillierte Gerinne führen zu kürzeren Fließwegen an der Oberfläche, dafür aber längeren Fließstrecken im Gerinne. Da der Abfluss im Gerinne rascher erfolgt, resultieren daraus kürzere Konzentrationszeiten (schnellere Abflussreaktion) und höhere Abflussspitzen. Die Verwendung eines geographischen Informationssystems GIS ist für die Ermittlung der Parameter für den gerinnelosen, oberflächlichen Abfluss nicht unbedingt notwendig jedoch hilfreich.

Optional können in diesem Arbeitsblatt für jedes Teileinzugsgebiet weitere Einflussfaktoren festgelegt werden (Flächenabminderung, Retention, Speicher, Basisabfluss u.a.).

### 3.3 Parameter für den Abfluss im Gerinne

Im Arbeitsblatt „Topo G“ sind für jedes Teileinzugsgebiet die Länge des Hauptgerinneastes  $L_G$ , das mittlere Sohlengefälle  $J_G$  und der Korndurchmesser des Sohlenmaterials  $D_{90}$ , der von 90 Prozent der Körner unterschritten wird anzugeben. Letzterer wird für jedes Hauptgerinne der Teileinzugsgebietsgliederung im Gelände abgeschätzt. Im Zuge dieser Geländebegehung ist es sinnvoll Gerinnequerschnitte, Durchlässe, Anschlaglinien und andere „Stumme Zeugen“ des Abflussgeschehens zu dokumentieren sowie für die Plausibilisierung der Modellrechnungen aktuelle Abflüsse und mögliche Abflussspitzen zu schätzen.

### 3.4 Flächenanteile an Abflussbeiwert- und Rauheitsklassen für Starkregen

Anhand der, nach Geländeanleitung beurteilten und kartierten hydrologischen Reaktionseinheiten (vgl. Kapitel 2) werden im Arbeitsblatt „Fläche AKL“ die Flächenanteile an Abflussbeiwertklassen als Flächeneinheit (ha oder km<sup>2</sup>) oder als Prozentanteile für jedes Teilgebiet angegeben. Abbildung 5 zeigt beispielhaft eine Abflussbeiwertkartierung und Teileinzugsgebietsgliederung eines Wildbacheinzugsgebietes.

Analog zur Eingabe der Abflussbeiwerte erfolgt jene für die Flächenanteile an Rauheitsklassen RKL im Blatt „Fläche RKL“. Daraus resultiert eine flächengewichtete mittlere Oberflächenrauheit  $c$  für jedes Teileinzugsgebiet.

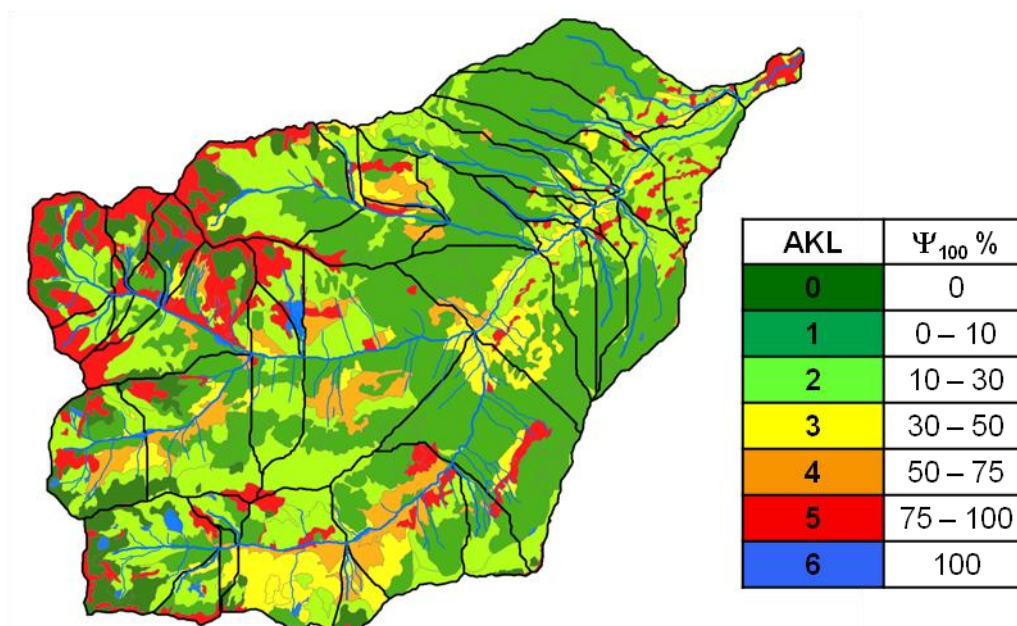


Abb. 5: Abflussbeiwertkartierung und Teileinzugsgebietsgliederung am Beispiel Weerbach (Tirol / Österreich, 70 km<sup>2</sup>) – AKL = Abflussbeiwertklasse.

#### 3.4.1 Berechnungsgrundlagen: Niederschlagsintensität und Abflussbeiwert

Die Abflussbeiwerte nach Geländeanleitung sind definiert als Verhältniszahl zwischen Niederschlag und Oberflächenabfluss im Zustand der Sättigung bei einer Regenintensität von 100 mm/h. Mit zunehmender Regenintensität steigt die Bedeutung von Oberflächenabfluss an (KIRNBAUER et al. 2009). Die Abhängigkeit des Abflussbeiwerts von der Niederschlagsintensität wurde an 37 Standorten mittels Regensimulationen unterschiedlicher Stärke experimentell überprüft. Abbildung 6 illustriert den empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und Abflussbeiwert. Für jedes Teileinzugsgebiet wird ein flächengewichteter mittlerer Abflussbeiwert  $\Psi_{100}$  errechnet und dieser an die entsprechende Niederschlagsintensität  $i_T$  der Eingangsdaten angepasst  $\varnothing\Psi_{NS}$ .

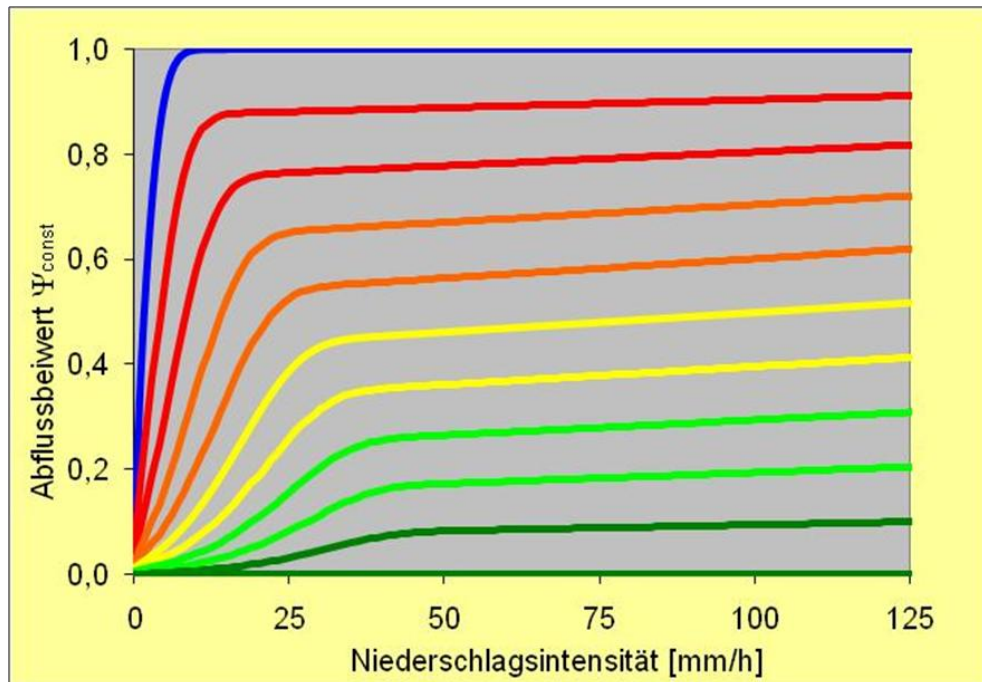


Abb. 6: Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und Abflussbeiwert.

$$\Psi_{NS} = (0,3 \cdot \Psi_{100}^2 + 0,7 \cdot \Psi_{100}) \cdot (1 - \text{EXP}(-0,03 \cdot \text{EXP}((0,1 \cdot \text{EXP}(3,3 \cdot \Psi_{100})) \cdot i_T^{-(0,7 \cdot \Psi_{100} + 1)})) + (-0,0035 \cdot \Psi_{100} + 0,0035) \cdot i_T) \quad (5)$$

### 3.4.2 Berechnungsgrundlagen: Initialabstraktion

Optional beinhaltet das Arbeitsblatt „Fläche AKL“ auch die Eingabe eines Index für den Systemzustand. Die Vorbefeuchtung bzw. der Systemzustand beeinflusst die Abflussbildung maßgeblich. Feuchtere Vorbedingungen verkürzen die Abflussbildungszeit (NAEF et al. 1998). Die Abstraktionszeit  $t_0$  ist jener Zeitraum, der von Beginn des Niederschlagsereignisses verstreicht, bis sich der erste Oberflächenabfluss bildet (vgl. Abbildung 3). Der Anfangsverlust entspricht demnach einer Niederschlagsmenge, die erforderlich ist, um einen Direktabfluss zu erzeugen. Die Initialabstraktion beinhaltet all jene Wasserverluste, welche für die Bestimmung extremer Hochwässer zu berücksichtigen sind. Zu den Wasserverlusten von Niederschlägen zählen: das Haftwasser an Boden und Vegetation (Interzeption), die Verdunstung von Boden und an der Vegetation (Evaporation), der aktive Wasserverbrauch der Pflanzendecke (Transpiration), der Wasserrückhalt in Bodenebenenheiten (Mulden-speicher), das Versickern (Infiltration) und schließlich der unterirdische Abfluss.

Nachdem die genannten Verluste nur extrem schwer zu quantifizieren sind und sich sehr stark mit der Niederschlagsdauer ändern, wurden und werden sie meist nur in sehr generalisierter Form berücksichtigt. Dies bringt große Unsicherheit in der Hochwasserberechnung. Größe und Dauer der Initialabstraktion werden von einer Reihe von Einflussfaktoren bestimmt, wie Vegetation, Boden, Relief, Vorbedingungen etc.

In Abbildung 7 ist eine Auswertung von 254 Niederschlagssimulationen (160 Standorte) des Institutes für Lawinen- und Wildbachforschung (BFW) dargestellt, in welcher die mittleren Abstraktionszeiten den in Klassen zusammengefassten Abflussbeiwerten gegenübergestellt

werden. Die Bandbreite der Abstraktionszeiten spiegelt die, den Berechnungsversuchen zugrundeliegenden, unterschiedlichen Systemzustände wider. In dieser Form konnte ein Zusammenhang zwischen geschätzter Abflussklasse und zu erwartender durchschnittlicher Abstraktionszeit formuliert werden. Dieser mittlere Systemzustand ist als Systemzustandsindex  $SZI=0$  festgesetzt und wird für die Bemessungsberechnungen empfohlen. Für die Nachrechnung von Ereignissen kann dieser Index und damit die Abstraktionszeit je nach Vorbedingungen um  $\pm 6$  Minuten variiert werden.

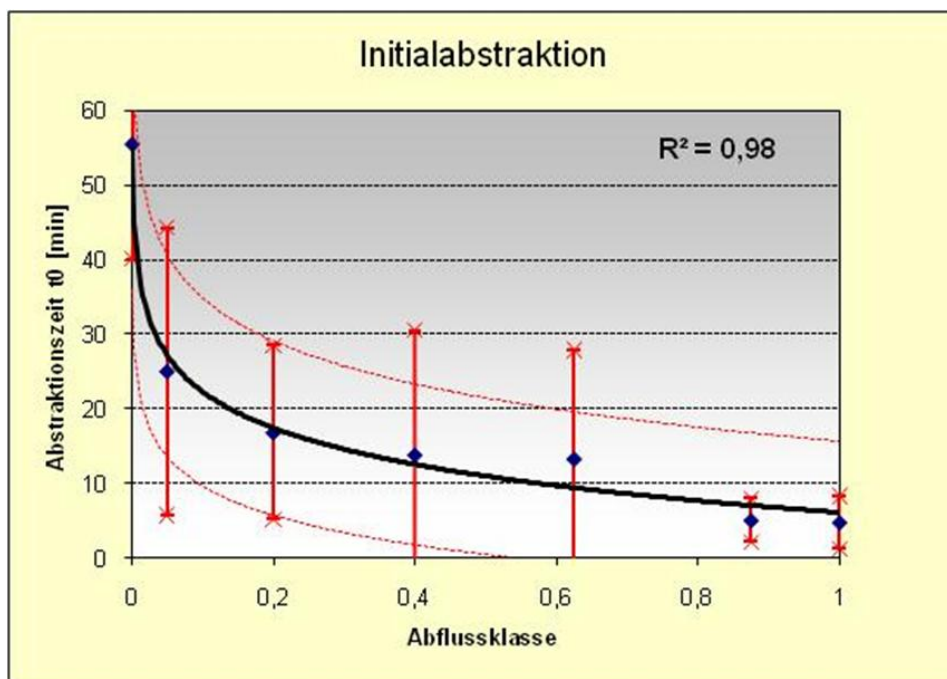


Abb. 7: Zusammenhang zwischen Abflussklasse und Abstraktionszeit.

$$t_0 = -7,05 \cdot \ln(\Psi_{100}) + 6,14 + SZI \quad (6)$$

### 3.5 Berechnung

Das ursprüngliche Laufzeitverfahren geht von der Annahme aus, dass das am entferntesten liegende Teileinzugsgebiet die Konzentrationszeit und damit die maßgebliche Regendauer bestimmt. Iterativ wird die Regendauer an die resultierende Konzentrationszeit angepasst und daraus das gesuchte Höchsthochwasser berechnet. Die wesentlichste Modifikation von ZEMOKOST betrifft diese Iterationsschleife. Nachdem obige Annahme bei Weitem kein Naturgesetz ist, in vielen Fällen stimmen mag, aber in sehr vielen Fällen nicht zutrifft (KIRNBAUER 2002, schriftliche Mitteilung), verzichtet ZEMOKOST auf diese Iteration. Alle dem Modell zur Verfügung stehenden Dauerstufen einer gewählten Jährlichkeit werden für die Bemessung durchgerechnet und mittels Half-Split-Verfahren jene Dauerstufe ermittelt, die das Höchsthochwasser erzeugt.

Zusätzlich zur Bemessung können Einzelereignisse beliebiger Dauerstufe und Jährlichkeit kalkuliert werden. Als Resultat liegen Abflussganglinien, Spitzendurchflüsse und Frachten für alle Teileinzugsgebiete und den gewählten Hauptknoten vor.

### **3.6 Plausibilitätsprüfung**

Gemäß dem Verwendungszweck, der Abschätzung von Hochwasserabflüssen unbeobachteter Einzugsgebiete, sind Messdaten zur Modellprüfung bzw. Ergebnisverifikation solchen Gebieten nicht vorhanden. Umso wichtiger ist die Plausibilisierung berechneter Bemessungsereignisse. Modellrechnungen mit Regendaten der Jährlichkeit 1 und längerer Regendauer (z.B. 12 Stunden) bieten, im Vergleich mit den im Gelände erhobenen aktuellen Abflüssen (Kapitel 3.3), die Möglichkeit die unterschiedlichen Abflussreaktionen der Teilgebiete zu prüfen und gegebenenfalls Fehler korrigieren. Die Ergebnisse der Bemessungsrechnung können über die einzelnen Teileinzugsgebiete mit geschätzten maximalen Abflüssen und historischen Ereignissen verglichen werden. Eine Gegenüberstellung der Resultate mit gebräuchlichen empirischen Ansätzen zur Hochwasserabschätzung ist zur Plausibilisierung ebenfalls hilfreich, sowohl betreffend der Abflusskonzentration als auch der Abflussspitze.

Die größten Unsicherheiten des dargestellten Ansatzes liegen im Bereich des Niederschlagsinputs (Regenintensität, flächige Abminderung, Beziehung Niederschlag- / Abfluss-Jährlichkeit) sowie im Bezug auf den Interflow (bodennaher Abfluss). Mit zunehmender Gebietsgröße verschärfen sich sowohl die meteorologischen als auch die hydrogeologischen Unsicherheiten. Unterschiedliche Bemessungsszenarien (Teilüberregnung, etc.) werden hier erforderlich und der Plausibilisierung kommt ein noch höherer Stellenwert zu.

### **4. Resümee**

Basierend auf jahrzehntelanger Felderfahrung hydrologischer Reaktionen unterschiedlicher Vegetations-Bodenkomplexe wurde eine Geländeanleitung und ein N-A-Modell entwickelt, welche in kombinierter Anwendung die Abschätzung von Hochwasserabflüssen in unbeobachteten Einzugsgebieten ermöglicht.

Ein wesentlicher, mit sehr vielen Unsicherheiten behafteter, und im ursprünglichen Laufzeitverfahren nicht implementierter Aspekt ist der Abfluss im Untergrund. ZEMOKOST bietet die Möglichkeit prozentual Flächen zu definieren, die zum Zwischenabfluss (Interflow) beitragen und diesen Beitrag entsprechend einer definierten Durchlässigkeit zu addieren. Ein Ziel weiterer Forschungsarbeiten ist das Entwickeln eines praktikablen Verfahrens zur nachvollziehbaren Bewertung des Beitrags von Interflow. Dazu ist der Modellansatz zu erweitern, zusätzliche Feldarbeiten sind notwendig.

Die Geländeanleitung und das Modell ZEMOKOST stellen für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen in unbeobachteten Einzugsgebieten eine praktikable und nachvollziehbare Lösung dar.

Die Geländeanleitung steht auf der Homepage des BFW gebührenfrei zur Verfügung (<http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=4343>).

Das MS-EXCEL Programm ZEMOKOST kann ebenfalls kostenlos über Mailanfrage an den Autor bezogen werden (bernhard.kohl@uibk.ac.at).

### Literatur

- BEVEN K.J. (2001): Rainfall-Runoff Modelling : The Primer, Wiley, Chichester. 372 S. Runoff Modelling : The Primer, Wiley, Chichester. 372 S.
- BMLFUW (2007): Hydrographisches Jahrbuch von Österreich 2006. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) Abteilung VII/3-Wasserhaushalt.
- HAGEN, K. et al. (2007): Analyse und Evaluierung von gebräuchlichen empirischen Ansätzen zur Hochwasserabschätzung in Wildbächen. BFW-Bericht Nr. 137.
- IZZARD, C.F. (1946): Hydraulics of runoff from developed surfaces, in Proc. Highway Research Board. Proc., Vol.26, 129-150.
- KIRNBAUER R. et al. (2009): Hochwasserauslösende Prozesse. Wiener Mitteilungen, 216: 21-44.
- KOHL, B. & L. STEPANEK (2005): ZEMOKOST – neues Programm für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen. BFW-Praxis Information Nr. 8., S.21-23.
- KOHL, B. et al. (1997): Abfluss- und Infiltrationsverhalten von Böden unter Fichten-Altbeständen in der Gleinalm (Steiermark) - Vergleich zweier Großregenanlagen. Beiträge zur Wildbachforschung, FBVA-Bericht Nr. 96, 27-32.
- KOHL, B. et al. (2002): Vergleich zweier Großregenanlagen zur Abschätzung des Abfluss- und Infiltrationsverhaltens von unterschiedlichen Boden-/Vegetationskomplexen. BFW-Bericht Nr. 127., 31-44.
- LÖHMANNSRÖBEN, R. et al. (2000): Geländeanleitung zur Abschätzung des Abfluss- und Abtragsgeschehens in Wildbacheinzugsgebieten. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Materialien Nr. 87.
- LORENZ, P. & G. SKODA (2000): Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ( $D \leq 12$  Stunden) mit inadäquaten Daten. Wiener Mitteilungen Band 164: S.179-200.
- MARKART, G. & B. KOHL (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. FBVA-Bericht Nr. 89, 38 Seiten.
- MARKART, G. et al. (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwerts auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW Dokumentation, Nr.3.
- MARKART, G. et al. (2006): Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwerts bei Starkregen - Grundzüge und erste Erfahrungen. ÖWAV-Seminar „Methoden der hydrologischen Regionalisierung“ im Lebensministerium, 18.-19.5.2006, Wiener Mitteilungen, Band 197, 159-178.
- NAEF, F. et al. (1998): Die Auswirkungen des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei Starkniederschlägen auf die Grösse extremer Hochwasser. Schlussbericht NFP 31.

- RICKENMANN (1996): Engineering 117(11): 1419-1439. Rickenmann, D. (1996): Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. Wasser, Energie, Luft 88 (11/12): S.298-304.
- RICKLI, C. & F. FORSTER (1997): Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schweiz. Zeitschr. f. Forstwesen. Vol. 148, Heft 5, 367-385.
- SCS, (1985): National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology. Soil Conservation Service. USDA. Washington D.C.
- STEPANEK, L. et al. (2004): Von der Starkregensimulation zum Spitzenabfluss. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – Garda / Italien, Tagungspublikation, Bd. 1, Thema II / 101-112.
- ZELLER, J. (1974, 1981): Starkniederschläge und ihr Einfluss auf Hochwasserereignisse. Eidgen. Anst. Forstl. Versuchsw., Bericht Nr. 126., 1. und 2. Auflage.