

Hochwasserabfluss in alpinen Einzugsgebieten - hydrologische Standortfaktoren und deren Bewertung

Klaus Klebinder^{1*}, Bernhard Kohl¹, Gerhard Markart¹, Gertraut Meißl¹ und Bernadette Sotier¹

Zusammenfassung

Hochgebirge stellen im hydrologischen Sinn eine komplexe Landschaftseinheit dar. Die heterogene naturräumliche Ausstattung alpiner Einzugsgebiete, welche sich in eng verzahnten Strukturen der Vegetation und Landnutzung, einem inhomogenen Bodeninventar, variationsreichen geologischen Eigenschaften sowie einer hohen Disposition für Hochwässer bei (konvektiven) Starkregenereignissen widerspiegelt, ist nur mit großen Abstrahierungseinbußen in Bewertungsschemata und Modellen abzubilden. Unterschiedliche Methoden zur hydrologischen Bewertung der Standortfaktoren existieren, eine besondere Herausforderung ist dabei die Berücksichtigung des nicht stationären Zustandes des Systems.

Schlagwörter: Oberflächenabfluss, hydrologische Indikatoren, Hydropedologie, hydrologische Bewertung

Summary

High mountain regions are a complex landscape from the hydrological point of view. The heterogeneous environment of alpine catchments is demonstrated in a small-scale pattern of landcover/landuse, an inhomogeneous soil inventory and highly variable geological characteristics. Alpine catchments show a high risk for floods during short term heavy rain events, which can only be assessed with a high degree of generalisation. Different methods are available to estimate the hydrologic behaviour of a site or catchment. A further challenge is to consider the non-stationary state of hydrological parameters.

Einleitung

Mehrere Hochwasserereignisse seit Beginn des dritten Jahrtausend (2000, 2002, 2005 und zuletzt im Frühjahr 2013) haben gezeigt, wie stark der alpine Lebensraum durch hydrologische Naturgefahren bedroht ist. Durch zunehmende menschliche Nutzung von gefährdeten Räumen, insbesondere Schaffung hochwertiger Infrastruktur in exponierten Zonen und vermehrte Präsenz von Menschen in Gefährdungsbereichen, steigt das Schadenspotential deutlich. Schäden an Personen, Gebäuden und Infrastruktur müssen daher zunehmend durch kosten-, erhaltungs- und flächenintensive Schutzmaßnahmen eingedämmt werden.

Vor allem im alpinen Lebensraum stellen Wildbäche, aber auch deren Vorfluter eine besondere Bedrohung dar. Infolge der Hochgebirgstopographie kommt es zu einer raschen Abflusskonzentration des Niederschlages in den Gerinneläufen, was einen raschen und unverzögerten Anstieg der Abflusswelle zur Folge hat. Bedingt durch das alpine Relief und geomorphologische Faktoren können bei Hochwasserereignissen Feststoffe mobilisiert werden, welche zu Murgängen und starkem Geschiebetransport führen. In Wildbacheinzugsgebieten treten unterschiedliche hydrologische Prozesse sowohl in dominanter (z.B. Oberflächenabfluss auf Fels) als auch in komplex verzahnter Form (obenflächennaher Zwischenabfluss, Returnflow) auf. Oberflächenabfluss, der vorwiegend an Zonen mit beschränkter Infiltrationskapazität (Infiltrationsüberschuss)

auftritt, stellt bei konvektiven Niederschlagsereignissen eine bedeutende Prozessform dar. Der Zwischenabfluss hingegen erfährt durch die limitierte Fließgeschwindigkeit im Untergrund eine deutliche zeitliche Verzögerung und wird erst nach Stunden oder Tagen im Gerinne abflusswirksam. Dementsprechend werden diese Prozesse erst bei längeren Niederschlagsereignissen (mehrere Stunden bis Tage) für die Hochwasserentwicklung relevant (MARKART et al. 2013). Niederschlagswasser, das in tiefere Schichten des Untergrundes perkoliert, ist für die Ereignisfracht in den meisten Fällen nicht von Bedeutung.

Die hydrologischen Eigenschaften eines Einzugsgebietes sind nicht stationär, sondern zeitlich variabel. Kaum Änderungen unterworfenen Teile des naturräumlichen Inventares eines Einzugsgebietes können als Grunddisposition bezeichnet werden (BUWAL 1998). In Wildbacheinzugsgebieten können topographische, geologische und pedologische Eigenschaften sowie die grundsätzliche Vegetationsausstattung als stationär betrachtet werden. Die variable Disposition für Hochwasserereignisse wird von der periodischen oder episodischen Änderung der Landnutzung und des Feuchtezustandes gesteuert, z.B. zunehmende Bodenverdichtung durch Weidevertritt im Laufe des Sommerhalbjahres, zyklische forstwirtschaftliche Eingriffe oder episodische Naturereignisse (z.B. Windwurf, Trockenheit) ändern die Gebietseigenschaften ebenso wie das aktuelle Speichervermögen des Bodens, welches maßgeblich durch das Ausmaß des Vorniederschlages bestimmt ist.

¹ Bundesforschungszentrum für Wald (BFW), Institut für Naturgefahren und Gebietswasserhaushalt, Hofburg, Rennweg 1, A-6020 INNSBRUCK

* Ansprechpartner: Mag. Klaus Klebinder, klaus.klebinder@uibk.ac.at



Hydrologische Standortseigenschaften und Einflussfaktoren

Die hydrologische Reaktion einer Einheit auf Starkniederschlagsereignisse ist von einer Vielzahl an Standortseigenschaften abhängig. Grundsätzlich gilt, dass bei kurzen konvektiven Niederschlagsereignissen die oberflächennahen Kompartimente (Vegetationsausstattung, Oberboden) des Bio-, Pedo- und Geoinventars für die Reaktion ausschlaggebend sind, bei langen advektiven Ereignissen gewinnen hydrogeologische Faktoren zunehmend an Bedeutung. Weiters gilt, dass die einzelnen Komponenten des Systems (Topographie, Geologie, Pedologie, Vegetation/Landnutzung) eine starke Abhängigkeit voneinander zeigen, somit ist eine isolierte Betrachtung einzelner Komponenten der naturräumlichen Ausstattung kaum möglich. Stellvertretend kann als Beispiel für die starke Wechselwirkung zwischen den einzelnen Teilbereichen die Stellung des geologischen Substrats als Basis für die Bodenbildung und somit die bodenphysikalischen Eigenschaften angeführt werden (SOTIER et al. 2011). Im Folgenden wird auf die Stellung der einzelnen Teilbereiche in der hydrologischen Standortreaktion eingegangen sowie auf wichtige Wechselwirkungen verwiesen.

Topographie und Relief

Die Topographie und im Speziellen die räumliche Gliederung des Gerinnesystems stellen einen zentralen Steuerungsfaktor für die Geschwindigkeit der Abflussreaktion dar. Kurze Fließwege von der Wasserscheide bis zum Gerinne infolge eines dichten Gerinnenetzes führen ebenso zu rascher Gebietsreaktion wie ein sehr steiles Relief. Die Länge des Fließweges und die Neigung des Gebietes gehen neben der Rauigkeit der Oberfläche (ein Parameter der Vegetation) in zahlreiche bewährte Formeln zur Berechnung der Abflusskonzentrationszeit ein (KOHL 2011). Die Neigung des Standortes ist eng mit Bodenmerkmalen, insbesondere der Bodenmächtigkeit verbunden. Je steiler ein Standort desto geringmächtiger ist im Allgemeinen die Entwicklungstiefe von Böden (TASSER 1998), damit verbunden ist eine zunehmende Häufung vegetationsfreier Felsbereiche.

Geologie und Geomorphologie

Die geologischen Eigenschaften eines Standortes nehmen direkt Einfluss auf die Abflussreaktion, indem sie den Anteil der tiefgründigen Versickerung sowie die Verweildauer des Wassers im Untergrund beeinflussen. Die Klüftigkeit eines Gebirgskörpers und das Einfallen der Schichten sind entscheidende Größen zur Charakterisierung der Perkulationskapazität. Lockergesteinskörper beeinflussen über die Art und Korngrößenverteilung des Substrates die hydrogeologischen Eigenschaften. MARKART et al. (2013) konnten für unterschiedliche Substrate Kennwerte für die laterale Verlagerungsgeschwindigkeit innerhalb des Substrates ableiten. In alpinen Einzugsgebieten können geomorphologische Phänomene wie Moränen, Sturz- und Murschutt oder Massenbewegungen Einfluss auf die Abflussentwicklung nehmen. Beispielsweise wird vielfach der Abfluss aus hoch abflusswirksamen Einheiten (z.B. Felsflanken) in den



Abbildung 1: Der auf den Felsflächen gebildete Oberflächenabfluss wird durch die anschließenden Schuttkörper aufgenommen und erst mit deutlicher Verzögerung an den Vorfluter abgegeben.

darunterliegenden Schuttkörpern aufgenommen und erst verzögert wieder an den Vorfluter abgegeben (*Abbildung 1*).

Das geologische Ausgangsmaterial stellt einen elementaren Bestandteil in der Bodengese dar. Während feinteilreich verwitterndes Ausgangsmaterial (z.B. Phyllite, Tonschiefer, div. Einheiten der Flyschzone) sehr schwere und bindige Böden hervorbringt, kann bei grobkörnig verwitternden Einheiten (z.B. div. Orthogneise, Quarzite, quarzreiche Granite) grundsätzlich von durchlässigeren Böden mit einem hohen Anteil der Sandfraktion und von Grobstoffen ausgegangen werden. SOTIER et al. (2011) konnten für das Bundesland Niederösterreich den Zusammenhang zwischen dem geologischen und dem pedologischen Substrat ableiten (*Abbildung 2*).

Pedologie

Der Boden hat eine Kernfunktion in der hydrologischen Reaktion eines Standortes. Zum einen bestimmt die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens (sowohl in gesättigtem als auch in ungesättigtem Zustand) die Infiltrationskapazität eines Standortes, zum anderen ist das Porenvolumen und dessen Verteilung auf bestimmte Porengrößen eine Kenngröße für die rasche Wasseraufnahme und Speicherung. Die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens (Matrixgeschwindigkeit) ist eine Funktion aus der Verteilung der Korngrößenfraktionen (Textur), dem Gehalt an Grobstoffen, der Lagerungsdichte und dem Anteil an organischer Substanz (STENITZER 1988, RUSS und RIEK 2011). Makroporen, wie Tiergänge oder Wurzelröhren, modifizieren die Leitfähigkeit des Bodens mitunter stark (BEVEN and GERMANN 1982).

Wird die Speicherkapazität eines Standortes für kurzzeitige Starkniederschlagsereignisse betrachtet, so sind in erster Linie die Anteile an Grob- und Gröbstporen ausschlaggebend. Nur diese Speicher können mit entsprechender Geschwindigkeit gefüllt werden und somit Teile des Niederschlages retendieren. Die Funktion der Fein- und Feinstporen liegt vorwiegend in der Speicherung von Wasser für Vegetation

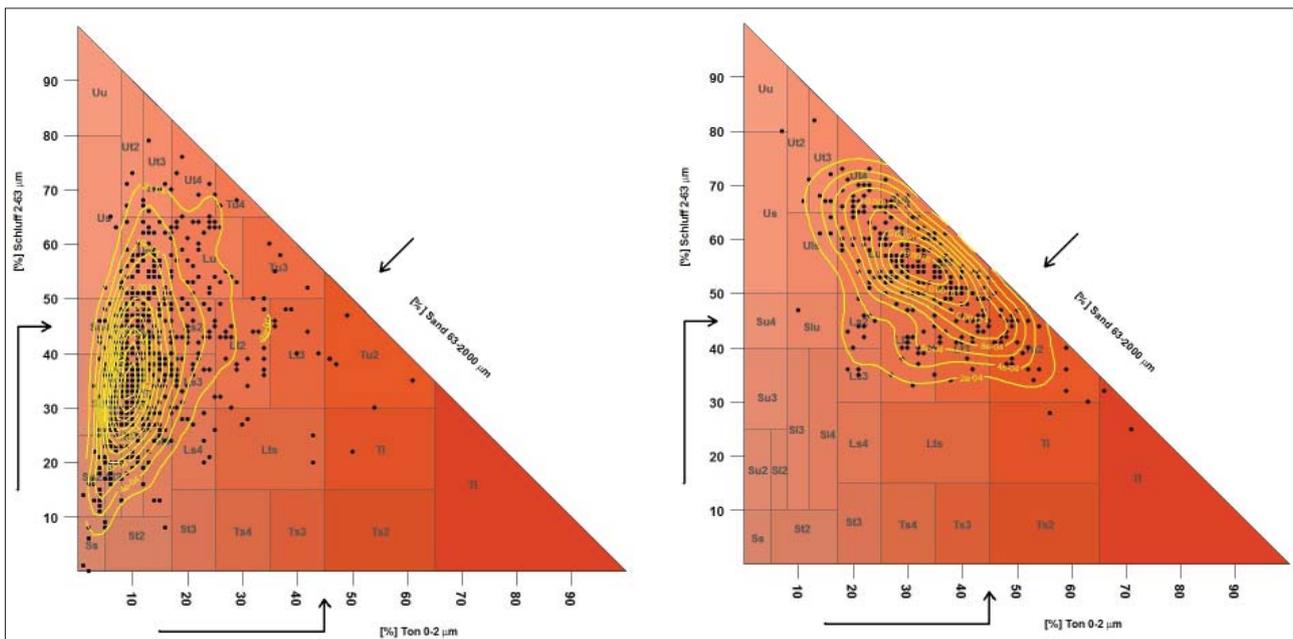


Abbildung 2: Bodenarten bei unterschiedlichen geologischen Einheiten in Niederösterreich. Links bei Gneisen, Graniten und quarzreichen Konglomeraten, rechts bei Mergel- und Flyschserien.

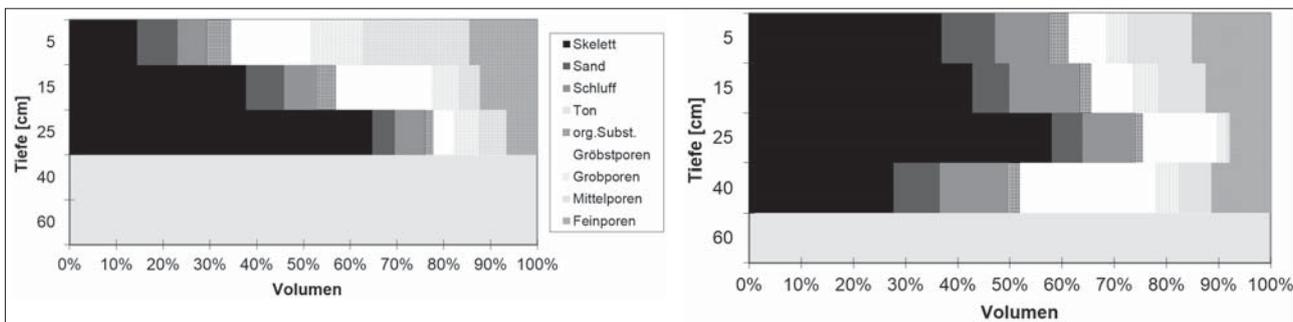


Abbildung 3: Profilgraph eines Waldstandortes (links) und eines Weiderasens (rechts) im Brixental (Tirol).

und Pflanzen. *Abbildung 3* zeigt den Vergleich zwischen einem Waldboden (links) und einem benachbarten Weiderasen (rechts), dabei ist der deutlich höhere Grob- und Gröbtporenraum am Waldstandort zu beachten. Während am Waldstandort im Zuge eines Beregnungsexperimentes kein Oberflächenabfluss auftrat, zeigte der Weiderasen in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte bis zu 60% Oberflächenabfluss (MEISSL et al. 2012).

Der Boden bildet das Bindeglied zwischen der geologischen Situation eines Standortes und der darüber liegenden Vegetation/Landnutzung - dementsprechend unterliegt die Pedosphäre beiden Einflüssen. Während die Korngrößenzusammensetzung stark durch die geologischen Faktoren bedingt wird, sind der Anteil an organischer Substanz, die Bioturbation und der Anteil an Makroporen stark von Vegetationseigenschaften abhängig. Die Lagerungsdichte ist wiederum ein Faktor der Landnutzung und spiegelt sich beispielsweise in Weidestauhorizonten oder Pflugsohlen wieder.

Die Pedosphäre stellt eine komplexe, störanfällige und nach Eingriffen schwer regenerierbare Landschaftskomponente

dar. Anthropogene Eingriffe wie Bodenaustausch, Planie oder Abtrag des humosen Oberbodens stellen vor allem im Hochgebirge mittel- bis langfristige Störungen in den hydrologischen Abläufen dar. Dementsprechend behutsam sollte mit dieser Ressource umgegangen werden (KLEBINDER et al. 2011).

Landbedeckung, Landnutzung und Vegetation

Die oberste Schicht des hydrologischen Gesamtkomplexes ist zum einen einer der maßgeblichsten Faktoren in der hydrologischen Prozesskette, zum anderen aber die dynamischste Komponente in der hydrologischen Charakterisierung eines Standortes (SOTIER et al. 2010). Als bedeutender Faktor im Wasserumsatz (Transpiration, Evaporation) eines Standortes entscheidet die Vegetation nicht zuletzt über den Zeitraum der Regeneration gefüllter Bodenspeicher.

An Waldstandorten spiegelt sich die Form und Intensität der Bewirtschaftung in der Art und Ausprägung der Bodenvegetation wieder. Aufgelockerte Bestände mit unterschiedlicher



Abbildung 4: Waldstandorte mit unterschiedlicher Vegetationsausstattung und hydrologischer Reaktion.

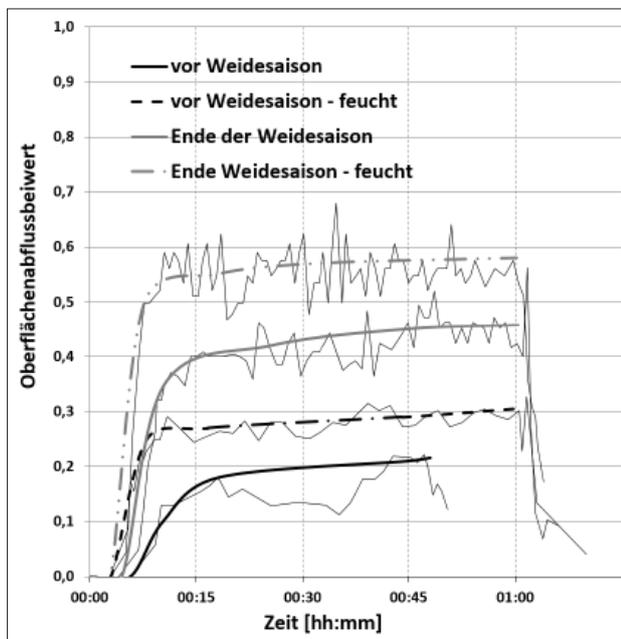


Abbildung 5: Einfluss von Beweidung und Feuchtezustand auf den Oberflächenabfluss am Beispiel einer Weide auf der Brixentalalm (Gem. Brixen im Thale, Tirol). Der Weideeinfluss hat dabei stärkere Auswirkungen auf die Abflussreaktion als der Feuchtezustand.

Altersstruktur führen zu einer Erhöhung des Deckungsgrades der Bodenvegetation, dies fördert eine aufnahmefähige Bodenauflage mit begrenztem Risiko der Ausbildung hydrophoben Effekten an der Oberfläche (Abbildung 4 links). Bewaldete Standorte weisen grundsätzlich eine verhältnismäßig geringe Disposition für Oberflächenabfluss auf.

Die Flächennutzung in alpinen Wildbacheinzugsgebieten ist vielfältig und saisonal variabel. Während Mähwiesen nur über eine kurze Periode (wenige Tage bis Wochen, meist im Spätsommer und Herbst) Beweidung erfahren, werden alpine Weiderasen über mehrere Wochen des Sommers intensiv beweidet. Damit einhergehend kommt es neben einer Verdichtung des Bodens zu Verschiebungen von Biomassenanteilen, zur Veränderung des Deckungsgrades der

Bodenvegetation und zu teilweise massiven Vertrittschäden. Im hydrologischen Sinn wirken sich diese Belastungen durch eine deutliche Erhöhung des Oberflächenabflusses am Ende der Weidesaison aus (Abbildung 5).

Die hydraulische Rauigkeit der Oberfläche wird durch die Art und Ausprägung der Landbedeckung beeinflusst. Im hydraulischen Sinn glatte Flächen wie beispielsweise Asphalt, Flächen mit keiner oder geringer Vegetationsbedeckung führen zu hoher Fließgeschwindigkeit des Wassers an der Oberfläche und damit einhergehender Erosion sowie zu rascher Abflusskonzentration. Raue Flächen, wie beispielsweise Zwergstrauchheiden, verzögern den Abfluss und dämpfen somit Erosion und Abflusskonzentration.

Schemata zur integralen Bewertung von Standortsfaktoren

In zahlreichen Bewertungsschemata wird versucht, die wichtigsten hydrologischen Einflussfaktoren zu integrieren und in eine standardisierte hydrologische Reaktion zu transferieren. Dabei reichen die Methoden von Anleitungen für die praktische Feldkartierung bis hin zu GIS basierten Ansätzen zur automatisierten Ausweisung von Prozessflächen. Hier werden exemplarisch einige Methoden vorgestellt:

Soil Conservation Service – Curve Number-Verfahren

Das vom US Soil Conservation Service (SCS) entwickelte Curve-Number-Verfahren (USDA 2004) ist eine in den 1950er Jahren entwickelte Methode zur Bestimmung der abflusswirksamen Anteile eines Niederschlagsereignisses für kleine Einzugsgebiete. Das in der Praxis sehr häufig angewandte Verfahren basiert auf Untersuchungen des Abflussverhaltens landwirtschaftlich genutzter Flächen. Böden werden hinsichtlich ihrer Infiltrationskapazität (kf-Wert/Durchlässigkeitsbeiwert) in vier hydrologische Bodentypen unterteilt. Aus Bodentyp, Vorfeuchte und Landnutzung wird der CN-Wert (runoff curve-number) ermittelt. Dieser ist ein Maß für das Wasserspeichervermögen eines Bodens und kann Werte zwischen 0 (kein Abfluss) und 100 (vollständiger Abfluss) annehmen. Die Vorfeuchte wird in drei Klassen angegeben und leitet sich aus dem Niederschlag der letzten Tage ab. Untersuchungen von BURLANDO und KUNTNER (2003) zeigen eine beschränkte Anwendbarkeit für den Alpenraum.

Das wissensbasierte System FLAB

Das WBS-FLAB (PESCHKE et al. 1999) verwendet den dominanten Abflussprozess als Abstraktion der hydrologischen Reaktionen in Einzugsgebieten. Aus den Gebietsgrößen Relief (Hangneigung, Hangrichtung), Vegetation und Nutzung (Nutzungsart, Bestandesart und -alter), Boden (Bodentyp, -art, Modifikationen bzgl. Grobanteil, Makroporen, Durchwurzelung) und Gewässernetz wird auf den dominanten Abflussbildungsprozess geschlossen. Dabei wird zunächst ein potentieller dominanter Abflussprozess abgeleitet und anschließend, im Hinblick auf die Modellierung unter Berücksichtigung von Niederschlagsereignissen und Gebietszustand (trocken oder feucht), ein realer dominanter

Abflussprozess bestimmt. Die räumliche Datenerfassung und Datenaufbereitung erfolgt in einem GIS, die Eingangsgrößen werden überlagert und über ein If-Then-Regelwerk einer Klassifizierung zugeführt.

Dominant runoff processes (DRP)

Mit dem DRP-Verfahren (SCHERRER 2006, SCHMOCKER-FACKEL et al. 2007) wird, basierend auf Bodeneigenschaften, Geologie und Nutzungsmerkmalen der dominante Abflussprozess für einen Standort ermittelt. Grundsätzlich unterscheidet dieses Verfahren vier Abfluss-Prozesstypen: Horton'scher Oberflächenabfluss (HOF), Sättigungsabfluss (SOF), Zwischenabfluss (SSF) und Tiefensickerung (DP). Mit Hilfe eines Beurteilungsschemas wird der Wasserfluss von der Bodenoberfläche bis zum geologischen Untergrund nachvollzogen. Es wird entschieden, ob und wie stark das Wasser an der Infiltration gehindert wird (HOF-Prozesse). Bei vermindertem vertikalem Durchfluss bestimmt die Speicherkapazität des Bodens, die über das Bodenwasserregime (durchlässig bis permanent wassergesättigt) und die pflanzennutzbare Bodenmächtigkeit ermittelt wird, ob DP, SOF oder SSF der dominante Abflussprozess ist. Ob Sättigungsabfluss auftritt, wird von Stauschichten im Untergrund und der Hangneigung abhängig gemacht.

Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes

Die Geländeanleitung zur integralen Bewertung der Oberflächenabflussdisposition basiert auf einer Analyse von rund 700 Starkregenexperimenten im Ostalpenraum (MARKART et al. 2004). Als Indikatoren zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes werden die Vegetation, der Boden, die Nutzung, die örtlichen Feuchtverhältnisse sowie weitere standörtliche Besonderheiten (z.B. Zustand der Bodenaufgabe) herangezogen. Die Bewertung erfolgt in einem siebenklassigen System, welches den Oberflächenabflussbeiwert beschreibt. Dem zu bewertenden Standort wird ein realistisch schlechter Systemzustand unterstellt. Dieser bei Kartierarbeiten oftmals nicht vorherrschende Zustand kann durch Interpretation von Zeigerpflanzen (Feuchte- und Weidezeiger) und von definierten Merkmalen (z.B. Vertrittspuren) erkannt werden.

Fazit

In Summe stellen Wildbacheinzugsgebiete äußerst komplexe Systeme dar, die hydrologisch schwer analysierbar und abstrahierbar sind. Dennoch gibt es praktikable Methoden, welche die Reaktion des Gesamtkomplexes (Geologie-Boden-Vegetation/Nutzung) mit ausreichender Genauigkeit beschreiben. Diese Ansätze erlauben vielfach auch die Berücksichtigung einer ein- oder auch mehrdimensionalen Variabilität von Einflussfaktoren. Die durch die Anwendung der einzelnen Bewertungsschemata unterstellte Reaktionscharakteristik einer Einheit kann in weiterer Folge zur Hochwasserabschätzung umgesetzt werden.

Dank

Teile der hier dargestellten Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des vom Österreichischen Klima- und Energiefonds (ACRP-Programm) geförderten Projekt SeRAC-CC (Sensitivity of the Runoff Characteristics of Small Alpine Catchments to Climate Change) erarbeitet.

Literatur

- BEVEN, K. and P. GERMANN, 1982: Macropores and water flow in soils, *Water Resour. Res.*, 18(5), 1311-1325.
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), Hrg., 1998: Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko. Bern.
- KLEBINDER, K., B. KOHL, G. MARKART und B. SOTIER, 2011: Problematik Flächenversiegelung - Möglichkeiten zur Bewertung, Quantifizierung und Steuerung. *Ingenieurbioologie*, Wädenswil, (3): 14-22.
- KOHL, B., 2011: Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST. Entwicklung eines praktikablen Modells zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten. Dissertation an der Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften der Universität Innsbruck.
- KUNTNER, R. and P. BURLANDO, 2003: Parsimonious and Spatially Distributed Modelling of Runoff Generation in Mesoscale Prealpine and Alpine Catchments. In: Proc. of the "International Conference on Flood Estimation", Bern, Switzerland, 6-8 March 2002, CHR-KHR rep. n° II-17, 407-418.
- MARKART, G., A. RÖMER, G. BIEBER, H. PIRKL, K. KLEBINDER, C. HÖRFARTER, A. AHL, A. ITA, B. JOCHUM, B. KOHL, G. MEISSL, K. MOTSCHKA, D. OTTOWITZ, I. SCHATTAUER, B. SOTIER, M. STRASSER, K. SUNTINGER und E. WINKLER, 2013: Abschätzung der Bandbreiten von Fließgeschwindigkeiten des oberflächennahen Zwischenabflusses in alpinen Einzugsgebieten. *Enderbericht 3. Projektjahr zur Projekt Shallow Interflow*, Österreichische Akademie der Wissenschaften.
- MARKART, G., B. KOHL, B. SOTIER, T. SCHAUER, G. BUNZA und R. STERN, 2004: Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW Dokumentation, Nr.3.
- MEISSL, G., K. KLEBINDER, C. GEITNER, F. SCHÖBERL, B. KOHL, G. MARKART, H. FORMAYER, Th. GORGAS und A. BRONSTERT, 2012: Sensitivität der Abflussprozesse kleiner alpiner Einzugsgebiete auf Klimaänderungen. In: *Wasser ohne Grenzen, Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Hennef, (31.12): 121-126.
- PESCHKE, G., C. ETZENBERG, G. MÜLLER, J. TÖPFER und S. ZIMMERMANN, 1999: Das wissenschaftsbasierte System FLAB – ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung. *Internationales Hochschulinstitut. IHI-Schriften*, Heft 10, Zittau.
- RUSS, A. und W. RIEK, 2011: Pedotransferfunktionen zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität – Validierung für Waldböden des nordostdeutschen Tieflands. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 11: 85-91.
- SCHERRER, S., 2006: Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Bericht 18 des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Mainz. http://www.scherrer-hydrol.ch/pdf/scherrer/luwg_bericht_18-2006_ansicht.pdf.
- SCHMOCKER-FACKEL, P., F. NAEF and S. SCHERRER, 2007: Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 891-906, doi:10.5194/hess-11-891-2007, 2007.

- STENITZER, E., 1988: SIMWASSER – Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mitt. aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Nr. 31, Petzenkirchen.
- SOTIER, B., A. EDER, K. KLEBINDER, P. STRAUSS, G. MARKART und J. DORNER, 2010: Erstellung einer Landnutzungskarte als Grundlage hydrologischer Bewertung. In: Strobl/Blaschke/Griesebner (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2010. Beiträge zum 22. AGIT-Symposium, 7.-9. Juli 2010, Salzburg: 316-324.
- SOTIER, B., K. KLEBINDER und A. EDER, 2011: Abteilung von Bodensubstratklassen aus der Geologischen Karte von Niederösterreich. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, Wien (78): 7-14.
- TASSER, E., B. OSTENDORF, U. TAPPEINER, C. PÖTTINGER, W. BITTERLICH and A. CERNUSCA, 1998: Analysis of factors determining soil depth on an Alpine hillslope. HeadWater'98. P. 58-62.
- USDA (United States Department of Agriculture), 2004: National Engineering Handbook Hydrology, Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall.