



Räumliche Differenzierung der Abflussbildungsprozesse im Brixenbachtal (Tirol)

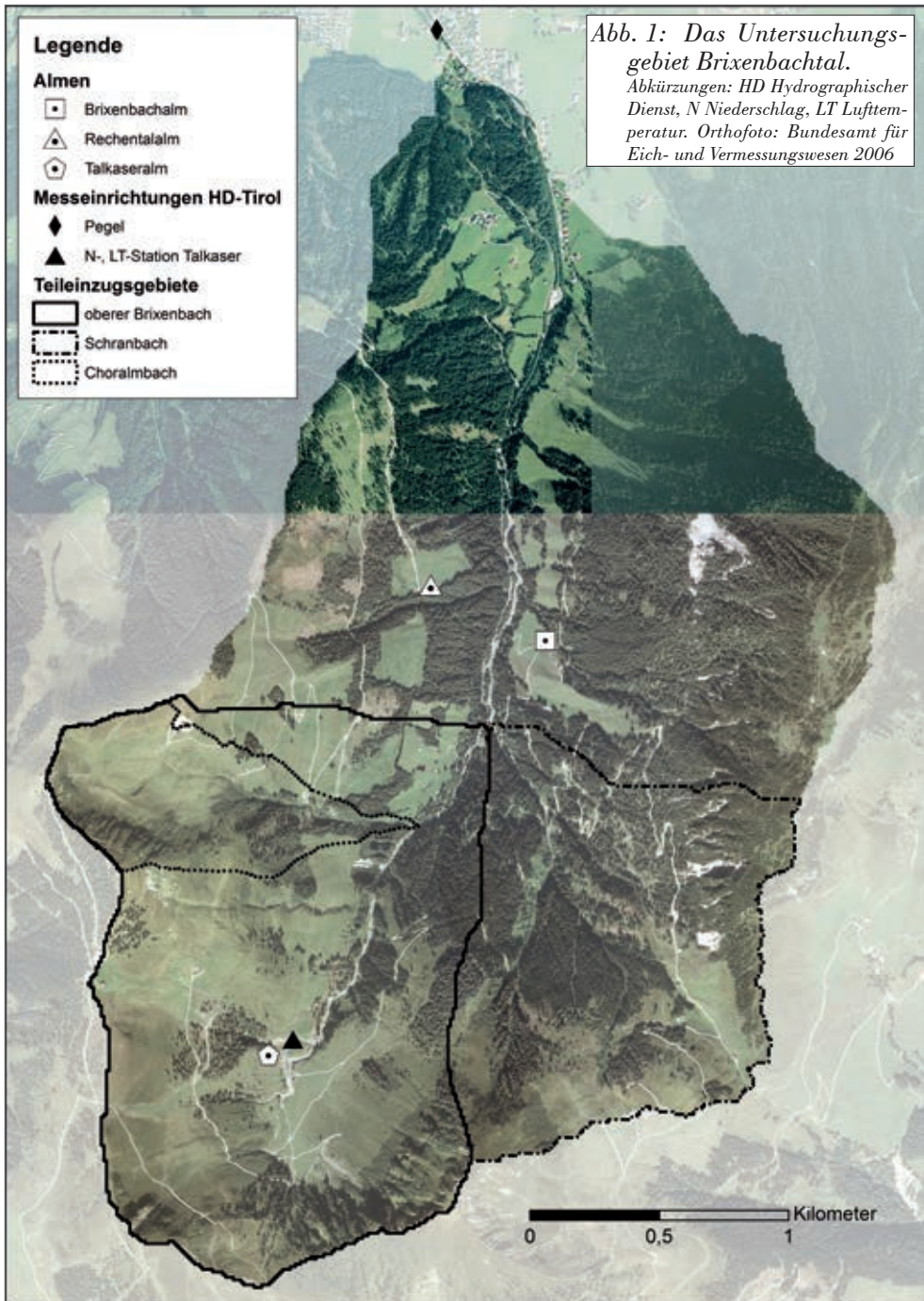
von Gertraud Meißl, Klaus Klebinder, Clemens Geitner, René Schader, Florian Kerl und Gerhard Markart

1 Motivation und Fragestellung

Hochwasserereignisse werden von mehreren Faktoren gesteuert. In kleinen ($< 10 \text{ km}^2$) Einzugsgebieten spielen neben den Niederschlagsseigenschaften vor allem die Gebietscharakteristika eine große Rolle (Spreafico et al. 2003). Die Beschaffenheit des geologischen Untergrunds, die Eigenschaften der Böden und Vegetation und deren aktueller Systemzustand (Bodenporenfüllung durch vorangegangene Niederschläge, saisonale Blattentwicklung etc.) entscheiden, welcher Anteil des auf einen Standort auftreffenden Niederschlags versickern kann bzw. oberflächlich abfließt. Am Standort gebildeter Oberflächenabfluss und rascher, in Makroporen fließender, hangparalleler Zwischenabfluss führen den Niederschlag bei entsprechender Anbindung des Standorts an das Gerinnenetz innerhalb kurzer Zeit dem Vorfluter zu (Bronstert 2005). Bäche aus Einzugsgebieten mit einem großen Anteil an Flächen, die vor allem Oberflächenabfluss und/oder raschen Zwischenabfluss erzeugen, reagieren daher sehr schnell auf Niederschlagsereignisse. Bei Extremereignissen kann das aufgrund der kurzen Vorwarnzeit in den häufig auf den Schwemmkegeln am Gebietsauslass situierten Siedlungen zu großen Schäden führen. Gebiete mit einem großen Anteil an Flächen, auf denen verzögerter Zwischenabfluss und/oder Tiefenversickerung/Grundwasserneubildung dominieren, sind in diesem Fall begünstigt. Zur Beurteilung des Gefahrenpotentials, z.B. am Schwemmkegel, ist daher die Kenntnis der Abflussbildungsprozesse im Einzugsgebiet essentiell (Scherrer 2006).

Seit 2008 werden am Institut für Geographie zahlreiche Forschungsprojekte im Brixenbachtal (Gemeinde

Auf Grundlage der im letzten Jahresbericht dargestellten interdisziplinären Ergebnisse im Brixenbachtal wurden die Prozesse der Abflussbildung und -konzentration experimentell vertieft untersucht. Dabei erwies sich die Zusammenarbeit mit Mitarbeitern des Bundesforschungszentrums für Wald, Abteilung Gebietswasserhaushalt, als sehr erfolgreich. Im Gelände, bei der Auswertung und Diskussion erschlossen sich neue spannende Einblicke in die Abflussreaktion kleiner alpiner Einzugsgebiete.



Brixen im Thale, Kitzbüheler Alpen, Tirol) durchgeführt, in deren Rahmen unterschiedliche, insbesondere auch hydrologische Fragestellungen untersucht wurden (vgl. auch Geitner et al. 2011). Das Einzugsgebiet des Brixenbaches (Abb. 1) umfasst rund 9 km² Fläche und erstreckt sich von etwa 819 m (Pegel des hydrographischen Dienstes, HZB-Nr. 202663, <http://www.tirol.gv.at/themen/umwelt/wasser/wasserkreislauf/hydro-online/>) bis auf 1956 m ü.d.M. (Gampenkogel). Das Brixenbachtal befindet sich in der geologischen Einheit der Grauwackenzone. Während die Gipfelbereiche der westlichen und südlichen Kammumrahmung aus Porphyroid aufgebaut werden, stehen im Talgrund leicht metamorphe Sand-, Silt- und Tonsteine der Schattberg- und Löhnersbachformation („Wildschönauer Schiefer“) an. Der Gipfelbereich des Gaisbergs im östlichen Teil des Einzugsgebiets wird aus Hauptdolomit einer hier anstehenden isolierten kalkalpinen Scholle gebildet (GBA 2008). Die Böden entwickelten sich großteils auf quartären Sedimenten unterschiedlicher Genese; es handelt sich vor allem um Braunerden, in höheren Lagen um Podsole, im Bereich des Gaisbergs um Rendzinen und in vernässten Zonen um Hangleye (Geitner et al. 2011). Das Brixenbachtal ist zu gut 50 % bewaldet (großteils altershomogene Fichtenwälder, stellenweise auch Lärchen), der übrige Teil des Einzugsgebiets wird vor allem von Almweiden, Schutt- und Felsflächen eingenommen, kleinere Flächen am Talausgang werden als Mähwiesen genutzt. Der mittlere jährliche Niederschlag im Einzugsgebiet beträgt an der Station Talkaser (1450 m ü.d.M., HZB-Nr. 197267) ca. 1440 mm, die Jahresmitteltemperatur liegt dort bei ca. 4,4 °C (HD Tirol, Zeitraum 2009–2012).

Das Brixenbachtal ist ein typischer Repräsentant kleiner Einzugsgebiete mittlerer Höhenlage mit großflächiger alm- und waldwirtschaftlicher Nutzung und einem dicht besiedelten Schwemmkegel am Gebietsauslass. Im Zentrum der hier vorgestellten Arbeiten steht die Untersuchung der Abflussreaktion von Flächen, die schon seit langer Zeit einer Beweidung durch Rinder unterliegen (derzeit Galtvieh, die Milchviehhaltung wurde vor mehreren Jahrzehnten aufgegeben). Aufgrund des hohen Anteils dieser Flächen am untersuchten und an vergleichbaren Einzugsgebieten hat ihre Abflussreaktion auf Niederschlagsereignisse große Bedeutung für die Abschätzung der Hochwasserdisposition.

Zur Analyse des Gefahrenpotentials bei Starkniederschlägen (kurze Niederschläge mit hoher Intensität, z.B. Gewitter) wurden folgende Forschungsfragen in zwei Skalen bearbeitet:

a) Plotskala:

- Welche Abflussbildungsprozesse dominieren auf den Almweiden?
- Auf welchen Standorten ändert ein erhöhter Bodenfeuchtegehalt aufgrund von Vorniederschlägen die Abflussreaktion?

b) Teileinzugsgebietsskala:

- Welche Prozesse dominieren auf der Teileinzugsgebietsskala?

2 *Plotskala: Welche Abflussbildungsprozesse dominieren auf Almweiden?*

Die Beweidung von (sub)alpinen Rasenstandorten kann einen gravierenden Einfluss auf die Boden- und Vegetationseigenschaften des Standorts haben (Markart et al. 2004):

- o Die Artenzusammensetzung kann verändert werden, weil „unbeliebte“ und daher nicht gefressene Grasarten, z.B. Borstgras (*Nardus stricta*), sich stärker ausbreiten können. Borstgras wächst in horstartigen Büscheln und hat aufgrund seines dichten Wurzelfilzes und des hohen Anteils an abgestorbenen Blattscheiden eine stark infiltrationshemmende Wirkung.
- o Je nach Beweidungsintensität wird die Vegetationsdecke unterschiedlich stark beschädigt, Trittschäden können zum Freilegen der Bodenoberfläche und zur Entstehung von Mikroterrassen (Viehgangeln) führen. Während Bodenoberflächen mit reduzierter Vegetationsdeckung (< 70 %) wegen ihrer Verschlammungsneigung verstärkt Oberflächenabfluss fördern, können Mikroterrassen aufgrund des erhöhten Muldenrückhalts zumindest in der Frühphase des Ereignisses abflussverzögernd wirken.
- o Bei starker Beweidung kann Viehtritt auch die Lagerungsdichte des Oberbodens wesentlich erhöhen. Durch die Verringerung des Porenvolumens sinkt damit die Infiltrationskapazität des Oberbodens.

All diese Veränderungen wirken sich auf die Abflussreaktion der betroffenen Fläche aus. Insbesondere bei Starkniederschlägen können die beweidungsbedingten Veränderungen zu verstärktem Oberflächenabfluss führen, der aufgrund seiner höheren Fließgeschwindigkeit im Vergleich zum Zwischenabfluss im Boden rascher das nächste Gewässer erreicht. Gebiete mit hoher Oberflächenabflussdisposition und engem Gerinnenetz reagieren daher auf Starkniederschlagsereignisse mit raschem Anstieg des Abflusses und hoher Abflussspitze.

Die im Brixenbachtal bearbeiteten Forschungsfragen lauten daher:

- i) Welche Standortscharakteristika führen auf Weideflächen zu Oberflächenabfluss?
- ii) Welche Bandbreiten des Abflussbeiwertes (Verhältnis von Oberflächenabfluss zu aufgebrachtem Niederschlag) treten auf?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden an mehreren repräsentativen Standorten Starkregensimulationen durch Mitarbeiter des Bundesforschungszentrums für Wald (BFW) durchgeführt. Dabei wurden Flächen in der Größe von 40 bis 100 m² (Flächengröße abhängig von Topographie und Wasserverfügbarkeit) mit einer Intensität von ca. 100 mm/h eine Stunde lang beregnet, was einem Niederschlagsereignis mit einer Wiederkehrdauer von über 100 Jahren entspricht (Beschreibung der Beregnungsanlage vgl. Markart und Kohl 1995, Abb. 2 links). Die genannte Niederschlagsintensität wurde gewählt, um die Ergebnisse mit jenen aus zahlreichen weiteren durch Mitarbeiter des

BFW durchgeführten Starkregensimulationen vergleichen zu können. Versuche mit unterschiedlichen Intensitäten hatten zudem ergeben, dass die Oberflächenabflussbeiwerte, die sich bei einstündiger Beregnung mit Niederschlagsintensitäten zwischen 30 mm/h und 100 mm/h gegen Versuchsende meist einstellen, nur geringfügig voneinander abweichen (Kohl 2011, Kohl und Markart 2002). Ergänzende bodenphysikalische Analysen helfen bei der Interpretation der Befunde.

Im Folgenden werden stellvertretend die an den Standorten Rechental- und Talkaseralm erzielten Ergebnisse vorgestellt. Um die Fließwege im Boden darstellen zu können, wurden an beiden Standorten zusätzlich im Rahmen von zwei Abschlussarbeiten Infiltrationsmessungen und Kleinberegnungssimulationen (1 m² Fläche, Abb. 2 rechts) durchgeführt, bei denen das aufgebrauchte Wasser mit der Lebensmittelfarbe Brillantblau gefärbt wurde (Schader 2013, Mayerhofer 2012). Am folgenden Tag wurden die gefärbten Bodenprofile aufgegraben und in mehreren Vertikalschnitten fotografiert.

Die Untersuchungsfläche im Bereich der Rechentalalm (Abb. 3) liegt in ca. 1210 m ü.d.M. auf einem ca. 29° geneigten Hang. Die extensiv genutzte Fläche ist durch Weiderasen mit Borstgras und Farnen bewachsen und zeigt deutliche Beweidungsspuren in Form von Trittschäden. Der Boden wurde als eine mittelgründige, karbonatfreie, pseudovergleyte Braunerde (Schader 2013) mit trittverdichtetem Oberboden angesprochen. Der geologische Untergrund wird aus Porphyroid aufgebaut (GBA 2008).

Die Untersuchungsfläche auf der Talkaseralm (Abb. 4) liegt etwas höher (ca. 1470 m ü.d.M.) im Bereich des Talschlusses und weist eine ähnliche Vegetationsbedeckung (Weiderasen mit Borstgras) auf, allerdings weniger Farnbewuchs. Die Almfläche zeigt



Abb. 2: Starkregensimulationen auf der Talkaseralm: links Großberegnungsversuch (BFW, 50 m²), rechts Kleinberegnungsversuch (1 m²), Wasser mit Brillantblau gefärbt, um die Fließwege im Boden sichtbar zu machen (Fotos: links R. Ruggenthaler, rechts C. Mayerhofer).

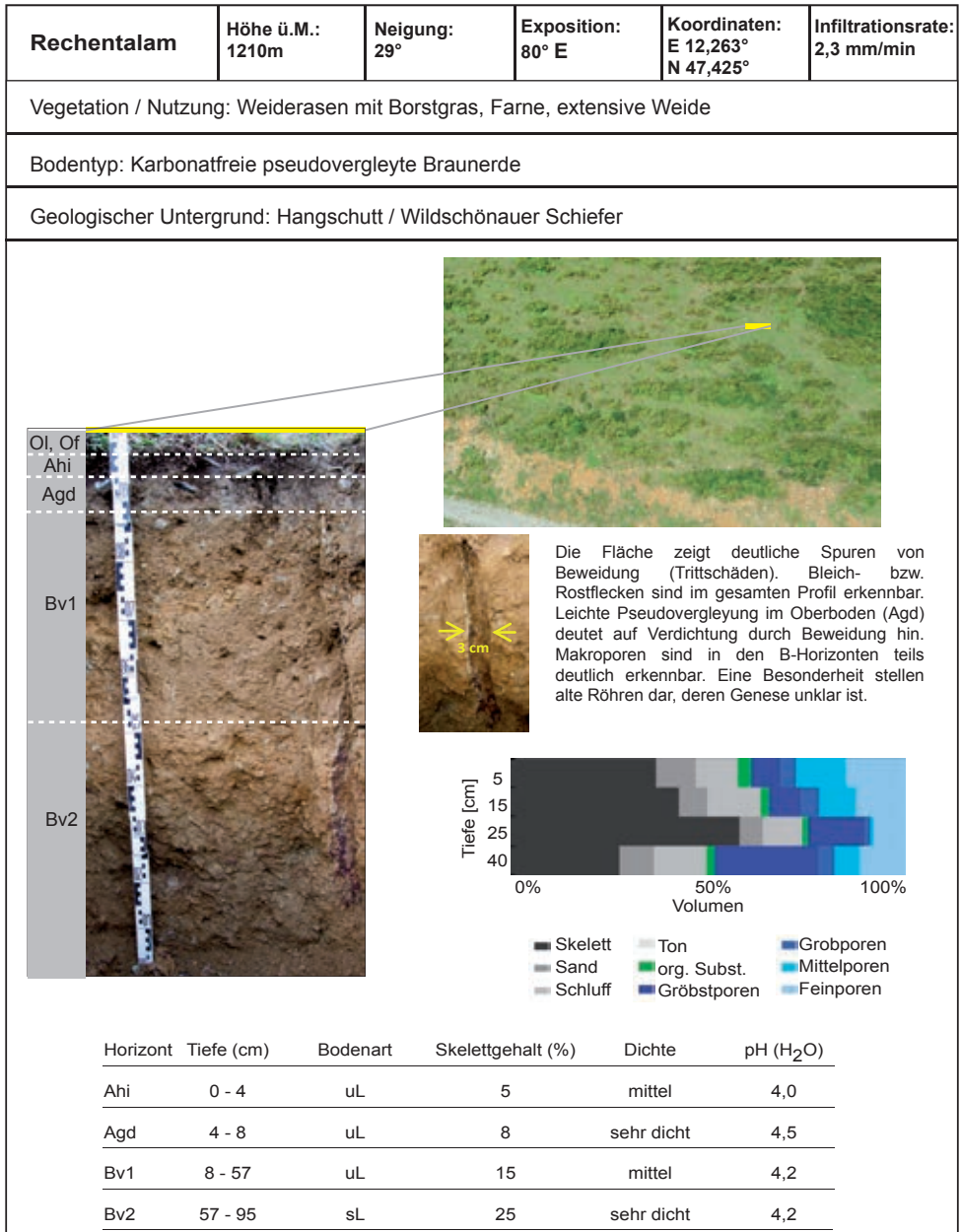


Abb. 3: Steckbrief Untersuchungsfläche Rechentalam (Foto oben: K. Klebinder, Mitte: R. Schader). Die Skelettanteile wurden einerseits bei der Profilsprache horizontweise abgeschätzt, andererseits nach Tiefenstufen im Labor gemessen. Die erheblichen Unterschiede sind durch die wenige Meter getrennten Profilstellen und die unterschiedlichen Verfahren erklärbar.

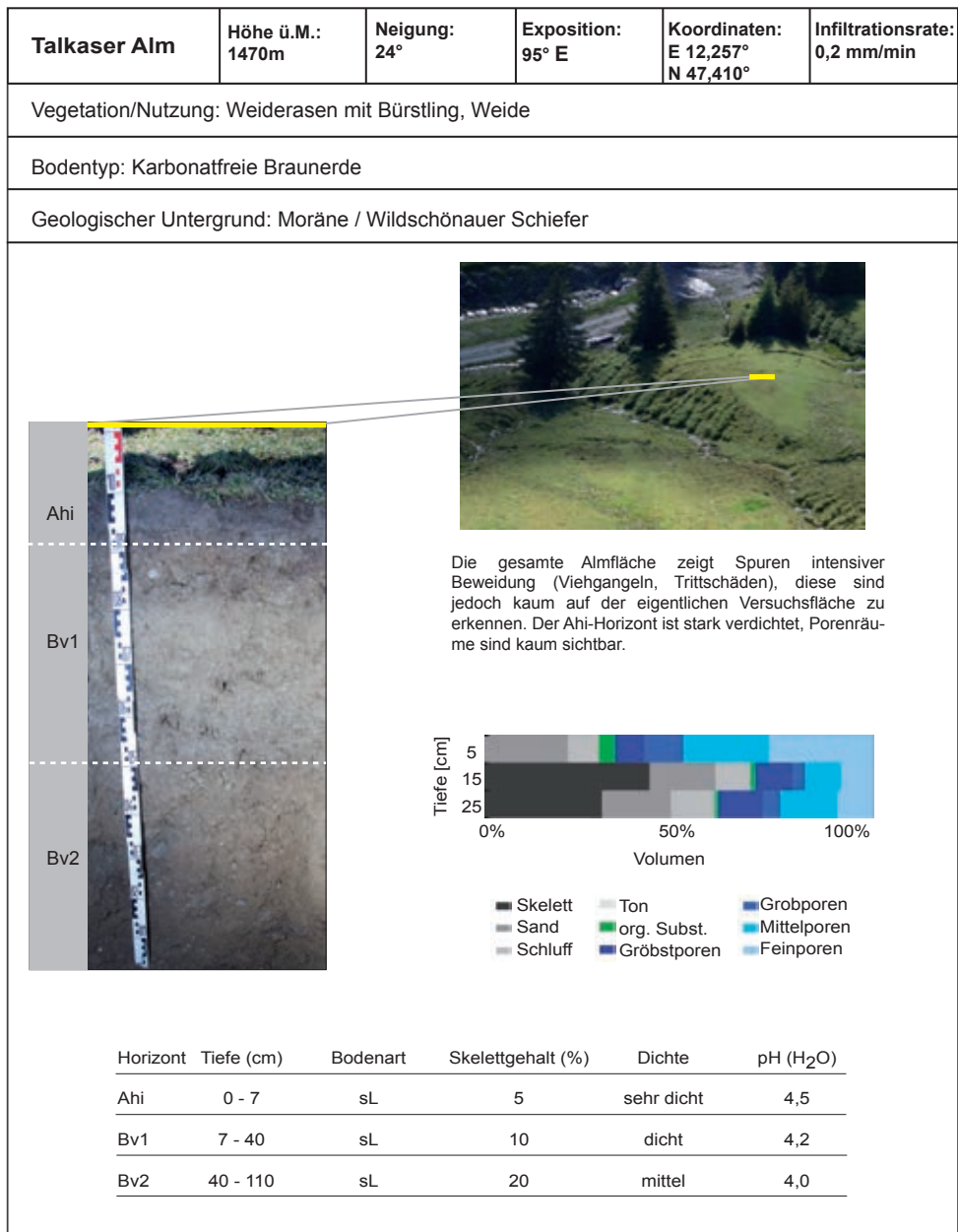


Abb. 4: Steckbrief Untersuchungsfläche Talkaseralm (Foto oben: K. Klebinder, links: R. Schader). Die Skelettanteile wurden einerseits bei der Profilansprache horizontweise abgeschätzt, andererseits nach Tiefenstufen im Labor gemessen. Die erheblichen Unterschiede sind durch die wenige Meter getrennten Profilstellen und die unterschiedlichen Verfahren erklärbar.

Spuren intensiver Beweidung (Viehangeln, Trittschäden), diese sind jedoch kaum auf der eigentlichen Versuchsfläche zu erkennen. Die auf Moränenmaterial (GBA 2008) ausgebildete karbonatfreie Braunerde am Standort weist eine vermutlich auch durch das Ausgangsmaterial bedingte hohe Lagerungsdichte über das gesamte Profil auf (Schader 2013).

Die Beregnungsversuche mit der Großberegnungsanlage am 6.7.2011 (Rechental, 40 m², 102 mm/h) bzw. 12.7.2011 (Talkaseralm, 50 m², 100 mm/h) zeigen, dass die beiden Flächen trotz ähnlicher Vorbedingungen deutlich unterschiedlich auf Starkregenereignisse reagieren (Abb. 5). Während auf der Rechentalalm gegen Ende der Beregnungssimulation 33 % des pro Zeitschritt aufgebrauchten Niederschlags oberflächlich abfloss, waren es auf der Talkaseralm 61 %.

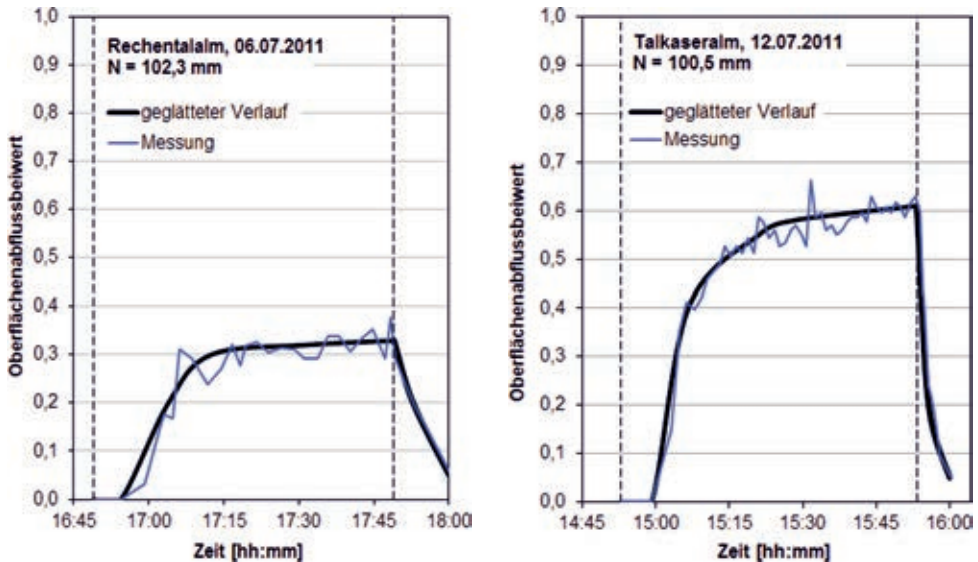


Abb. 5: Abflussbeiwerte während einer Starkregensimulation mit der Großberegnungsanlage (100 mm/h, 1 h) auf der Rechentalalm (links) und Talkaseralm (rechts). Die senkrechten gestrichelten Linien zeigen den Beginn und das Ende der künstlichen Beregnung an.

Ähnliche Oberflächenabflussbeiwerte liefern die zur Einfärbung der Fließwege durchgeführten Kleinberegnungsversuche auf einer Fläche von 1 m² mit einer Intensität von ca. 100 mm/h. Die aufgegrabenen Profilschnitte (Abb. 6) zeigen auf beiden Flächen einen intensiv eingefärbten Ah-Horizont. Durch die Weidenutzung ist der Oberboden an beiden Standorten trittverdichtet und daher arm an Grobporen. Das Wasser sickert daher relativ gleichmäßig durch die Bodenmatrix. Das stellenweise Fehlen der Färbung kann durch infiltrationshemmende Borstgrasbüschel erklärt werden.

Unterhalb des Ah-Horizonts ändert sich das Fließmuster grundlegend: Das Profil auf der Rechentalalm lässt deutlich präferentielle Fließwege erkennen. Diese sind

Grobporen, wie z.B. Regenwurmgänge, Wurzelkanäle und Zwischenräume zwischen Bodenmatrix und größeren eingelagerten Steinen, die das Wasser effizient in die Tiefe leiten und aus denen das Wasser auch in die angrenzende Bodenmatrix eindringt. Die aufgetragene Wassermenge (100 mm) dringt bis in eine maximale Tiefe von ca. einem Meter vor. Die im Bv-Horizont festgestellten Bleichflecken könnten ein Indiz für einen Hangwasserzug bzw. dafür sein, dass einzelne Makroporen in diesem Bereich enden und eine schnelle Versickerung in größere Tiefen nicht möglich ist.

Auch im Profil auf der Talkaseralm sind unterhalb des Ah-Horizonts präferentielle Fließwege zu erkennen, die allerdings – weil wegen des deutlich höheren Oberflächenabflusses weniger Wasser in das Profil eindringen kann – nur bis ca. 50 cm Tiefe reichen. Eine dreidimensionale Betrachtung der Profilschnitte zeigt zudem, dass die Makroporen hier sehr ungleich verteilt sind (vgl. Schader 2013).

Zählt man im Profilmfoto die Anzahl der blaugefärbten Pixel und stellt sie in Form einer Häufigkeitsfunktion dar (Abb. 6 rechts), so zeigt sich im Profil der Rechentalalm ein deutlicher Knick unterhalb des verdichteten Ah-Horizonts, während die Anzahl der gefärbten Pixel auf der Talkaseralm gleichmäßig mit der Tiefe abnimmt, weil hier der Boden durchgehend dichter ist.

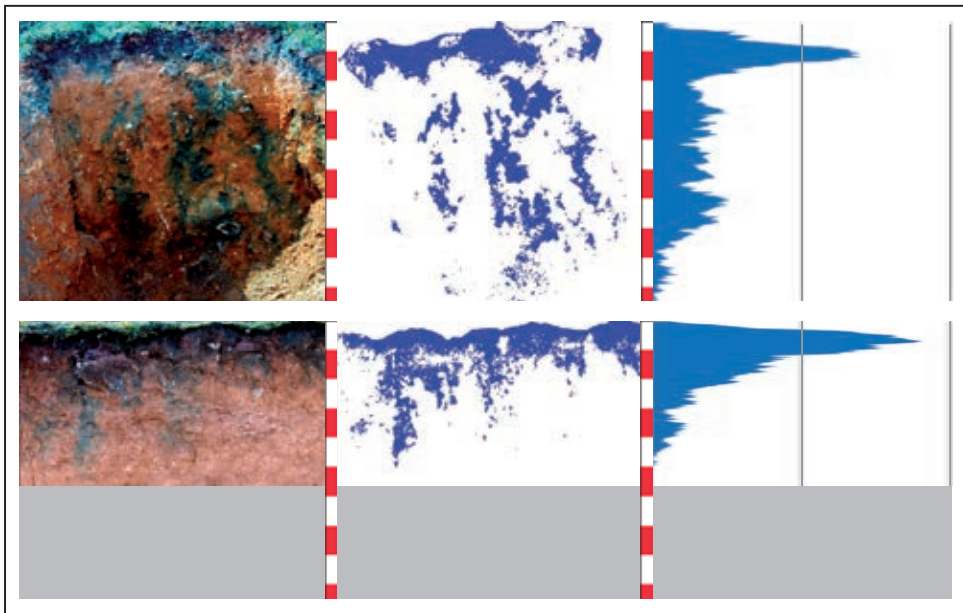


Abb. 6: Ergebnisse der Einfärbung der Fließwege mit Brillantblau während einer Beregnung mit einer Kleinberegnungsanlage (1 m², 100 mm/h, 1 h), Profilschnitte am nächsten Tag aufgegraben (oben Rechentalalm, unten Talkaseralm). Links: Fotos (R. Schader), Mitte: mit digitaler Bildanalyse erzeugtes Bild, rechts: Häufigkeitsfunktion.

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Analysen, der Beregnungsexperimente und der Fließwegfärbungen lassen den Schluss zu, dass der Grad der Auswirkung der Beweidung vom Ausgangssubstrat des Bodens abhängig ist. In skelettreichen Böden auf gut durchlässigem Hangschutt, wie auf der Rechentalalm, führt weidebedingte Verdichtung im Ah-Horizont zu einem Wechsel von der schnellen Makroporen- zur langsameren Matrixinfiltration und damit zu höherem Oberflächenabfluss gegenüber dem unbeweideten Zustand. Der fast doppelt so hohe Oberflächenabflussanteil auf der Talkaseralm ist hingegen nur zu einem geringen Anteil durch die Beweidung zu erklären, hier dürften das dicht gelagerte Moränenmaterial als Ausgangssubstrat des Bodens und der geringere Skelettanteil hauptverantwortlich sein. Beweidung kann somit die Abflussreaktion auf Starkregen bei Standorten mit hohem Infiltrationsvermögen verschärfen, bei dicht gelagerten Substraten mit geringem Infiltrationsvermögen ist ihre Auswirkung gering.

3 Plotskala: Auf welchen Standorten ändert ein erhöhter Bodenfeuchtegehalt aufgrund von Vorniederschlägen die Abflussreaktion?

Im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen, wie jenem Anfang Juni 2013 im Tiroler Unterland, Bayern, Salzburg, Ober- und Niederösterreich, wird häufig darauf hingewiesen, dass vorangegangene Niederschläge zu einer Vorsättigung der Böden führten und für die hohe Abflussspitze verantwortlich waren. Kleine Einzugsgebiete wie das Brixenbachtal liefern die höchsten Abflussspitzen bei konvektiven Starkregenereignissen. Bei derartigen Ereignissen wird der Spitzenabfluss vor allem vom Oberflächenabfluss gebildet. Zur Frage, inwiefern das Volumen des produzierten Oberflächenabflusses von der Bodenvorfeuchte gesteuert wird, gibt es in der Literatur unterschiedliche Angaben, insbesondere für Standorte, bei denen Oberflächenabfluss durch Infiltrationsüberschuss (Hortonscher Oberflächenabfluss) entsteht. Markart et al. (2004) schlossen aus zahlreichen Beregnungsversuchen, dass das Niveau, auf dem sich der Oberflächenabfluss beiwert bei einstäündigem Starkregen meist einpendelt, unabhängig von der Ausgangsfeuchte des Standorts gleich hoch ist, dass sich jedoch die Anlaufzeit, d.h. die Zeitspanne zwischen Regenbeginn und erstem Auftreten von Oberflächenabfluss, bei hoher Vorfeuchte verkürzt. Scherrer et al. (2007) fanden an Standorten, deren dominanter Abflussprozess Oberflächenabfluss durch Infiltrationsüberschuss war, ebenfalls nur eine geringe Abhängigkeit der Abflussreaktion von der Vorfeuchte. Zehe et al. (2007) beobachteten hingegen einen vorfeuchteabhängigen Wechsel von hydrophoben zu hydrophilen Bedingungen an oberflächenabflussproduzierenden Standorten und somit einen Einfluss der Vorfeuchte auf die Wirksamkeit von Benetzungshemmnissen. Nach Merz und Blöschl (2009) reduziert erhöhte Vorfeuchte die Infiltrationskapazität und erhöht damit das Abflussvolumen an Standorten, die Oberflächenabfluss durch Infiltrationsüberschuss erzeugen. Während also für Standorte, die Hortonschen Oberflächenabfluss produzieren, unterschiedliche Aussagen über den Einfluss der aktuellen Bodenfeuchte zu Ereignisbeginn gefunden werden können, be-

steht über die Abhängigkeit des Sättigungsflächenabflusses von der Vorfeuchte aufgrund der Reduktion des effektiven Porenvolumens Einigkeit (Merz und Blöschl 2009).

Ob und in welchem Ausmaß erhöhte Vorfeuchte zu einer Veränderung des Oberflächenabflussbeiwerts führt, scheint somit stark von den Flächeneigenschaften abzuhängen. Zur Identifizierung der steuernden Parameter auf Weideflächen wurden im Sommer 2011 und 2012 Mehrfachberegnungen mit der Großregenanlage durchgeführt:

- Am Standort Rechentalm wurden drei Starkregensimulationen vorgenommen. Der erste, in Abb. 5 dargestellte Beregnungsversuch am 6.7.2011 fand bei trockenen Verhältnissen nach mehreren niederschlagsfreien und warmen Vortagen, einem trockenen Frühjahr und einem schneearmen Winter statt. Der zweite Versuch wurde 20 Tage später am 26.7.2011 durchgeführt, mit geringen Niederschlagsmengen in den Vortagen (Dreitagesniederschlagssumme 24,1 mm). Am selben Tag erfolgte eine dritte Beregnung; bis zu deren Beginn waren innerhalb von drei Stunden insgesamt 244 mm Vorniederschlag mit der Starkregenanlage aufgebracht worden (zweiter Beregnungsversuch sowie eine Zwischenberegnung, danach 30-minütige Regenpause). Der Oberflächenabfluss nahm dabei vom ersten zum dritten Versuch deutlich zu (Abb. 7). Begleitende Bodenfeuchtemessungen mit TDR-Sonden in mehreren Tiefenstufen zeigten, dass das Niveau der Ausgangsbodenfeuchte beim ersten Versuch am niedrigsten und daher die Differenz zur maximalen, während des Versuchs erreichten Bodenfeuchte am größten war. Bei der dritten Simulation blieb die Bodenfeuchte zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende konstant, der verfügbare Porenraum

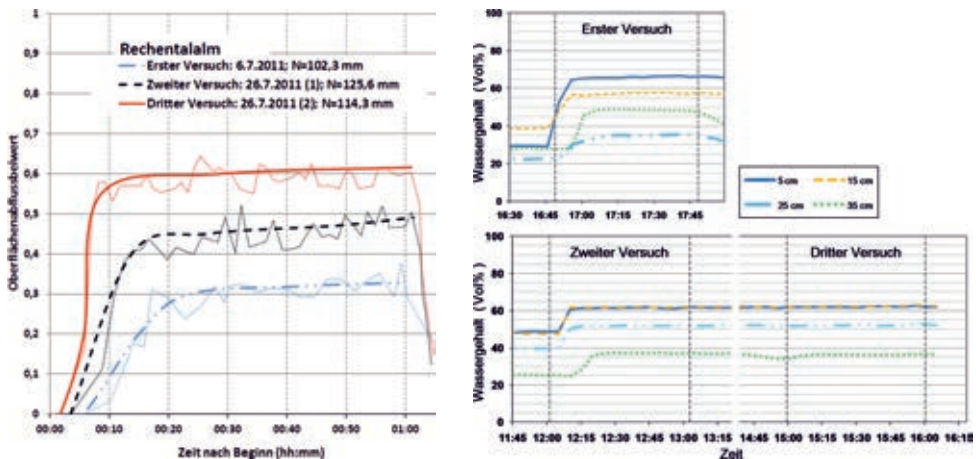


Abb. 7: Links: Oberflächenabfluss bei drei Starkregensimulationen auf einem Versuchsplot auf der Rechentalm, rechts: Bodenfeuchteverlauf während der Starkregensimulationen. Gestrichelte vertikale Linien markieren den Beregnungszeitraum. Durch den Neueinbau der TDR-Sonden am 2. Versuchstag war ihre Position gegenüber dem 1. Versuchstag geringfügig verändert. (Meißl et al. 2012 verändert)

des Oberbodens (bis ca. 20 cm Bodentiefe) war durch die extrem hohe Vorniederschlagssumme weitgehend gefüllt (Meißl et al. 2012).

- Eine weitere Doppelberechnung wurde im Bereich der etwas tiefer gelegenen Brixenbachalm durchgeführt. Bei der westexponierten Versuchsfläche handelt es sich um Weiderasen auf Pseudogley. Die bodenphysikalischen Analysen zeigten eine, durch die das schluffreiche Ausgangssubstrat und die intensive Beweidung bedingte, hohe Lagerungsdichte insbesondere in 8 bis 40 cm Tiefe. Die Fläche lieferte schon bei der ersten Starkregensimulation 96 % Oberflächenabfluss pro Zeitschritt nach Einstellen eines mehr oder weniger konstanten Oberflächenabflusses gegen Versuchsende. Der Gesamtabflussbeiwert (aufgefangener Oberflächenabfluss / aufgebrachte Regenmenge * 100 über den gesamten Versuchszeitraum) betrug 83 %. Beim zweiten Versuch verringerte sich die Zeit bis zum Auftreten von Oberflächenabfluss, weshalb der Gesamtabflussbeiwert auf 90 % anstieg. Die Oberflächenabflusskurve pendelte sich jedoch auch beim zweiten Versuch bei ca. 96 % (aufgefangener Oberflächenabfluss / aufgebrachte Regenmenge * 100 pro Zeitschritt gegen Ende des Experiments) ein (Abb. 8).
- Die in Abb. 5 dargestellte Starkregensimulation am Standort Talkaseralm spiegelt die Standortsreaktion bei trockenen Bedingungen wieder. Zur Analyse feuchter Verhältnisse wurde hier eine zweite Berechnung wenige Meter südlich auf einer – aufgrund eines Quellaustritts – vernässten Fläche durchgeführt. Auch hier konnte festgestellt werden, dass auf der nassen Fläche sich zwar der Gesamtabflusskoeffizient wegen des rascheren Eintretens des Oberflächenabflusses erhöhte (von 48 % auf 60 %), sich die Abflussbeiwertkurve aber auf ähnlichem Niveau (gut 62 %) einpendelte (Abb. 8).

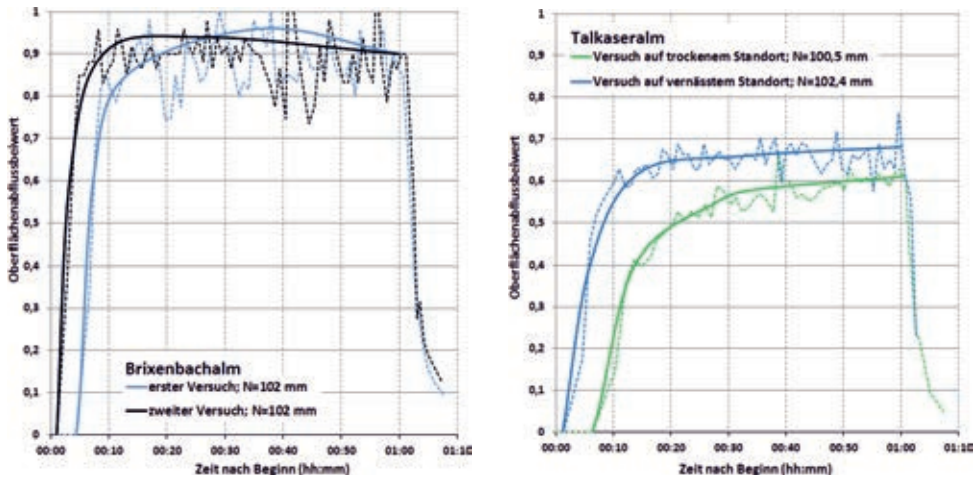


Abb. 8: Oberflächenabfluss bei zwei Starkregensimulationen auf einem Versuchsplot auf der Brixenbachalm (links) und auf zwei Versuchsplots auf der Talkaseralm (rechts).

Die Ergebnisse zeigen somit, dass Standorte wie jene auf der Brixenbach- und Talkaseralm, die eine hohe Oberflächenabflussdisposition aufweisen, bei höherem Vorfeuchtegehalt aufgrund vorangegangener Niederschläge zwar schneller Oberflächenabfluss produzieren als bei trockenen Bedingungen, dass sich der Oberflächenabflussanteil aber gegen Versuchsende unabhängig von den Vorbedingungen auf einem bestimmten, für den Standort charakteristischen Niveau einpendelt. Auch bei Standorten mit sehr hoher Infiltrationskapazität, z.B. Waldstandorten, ist anzunehmen, dass die Abflussreaktion eher unabhängig vom Bodenfeuchtegehalt zu Ereignisbeginn ist. Hingegen hat die Ausgangsbodenfeuchte bei „mittleren“ Standorten wie jenem auf der Rechentalalm einen sehr starken Einfluss auf die Abflussreaktion. Je nach Vorfeuchteniveau und damit verfügbarem Porenvolumen produzieren solche Flächen unterschiedlich hohe Anteile an Oberflächenabfluss.

Auf der Rechentalalm war der Oberflächenabfluss bei trockenen Versuchsbedingungen am geringsten. Bei hydrophoben Auflagen (z.B. Moderhumusaufgaben, Fichtennadelstreu) können trockene Bedingungen aber auch zu einer Erhöhung des Oberflächenabflusses führen (Markart et al. 2004). Derartige Standorte wurden im Zuge der beschriebenen Untersuchungen im Brixenbachtal nicht untersucht.

4 Welche Prozesse dominieren auf Teileinzugsgebietsskala?

Die beschriebenen Starkregensimulationen mit teilweiser Fließweegeinfärbung helfen bei der Identifizierung der dominanten Abflussbildungsprozesse auf der Plot-skala. Ob der am Standort auftretende Prozess aber auch für die Teileinzugsgebietsskala von Relevanz ist, hängt u.a. von der Anbindung des Standorts an das Gerinnenetz ab (Chiffard et al. 2011). Bei guter Anbindung haben Sättigungsflächen in alpinen Einzugsgebieten besonders große Bedeutung, wie Kirnbauer et al. (2009) im Einzugsgebiet des Löhnersbachs nachwiesen. Je nach Ereignischarakteristik (Niederschlagsintensität und -dauer) können aber auch gerinnenaher Flächen mit flachgründigem, raschem Zwischenabfluss einen hohen Anteil am Ereignis-Direktabfluss erzeugen (Bronstert 2005).

Um herauszufinden, welche Teileinzugsgebiete hohe bzw. niedrige Abflusspenden liefern, wurden zahlreiche Durchflussmessungen mit der Salzverdünnungsmethode sowie Messungen der elektrischen Leitfähigkeit, des Silikatgehalts und der Wassertemperatur durchgeführt. Dabei wurden drei Teileinzugsgebiete untersucht (vgl. Abb. 1, Tab. 1):

- das relativ kleine Einzugsgebiet des Choralmbachs, dessen oberer Teil – im Abrissbereich einer tiefgründigen aktiven Massenbewegung (Markart et al. 2013) – von einer ausgedehnten Sättigungsfläche eingenommen wird;
- das Einzugsgebiet des Schranbachs, das im Quellgebiet ebenfalls Sättigungsflächen aufweist, ein großer Teil der Fläche wird aber von steilen fichtendominierten Wäldern eingenommen;

- das Einzugsgebiet des Brixenbachs oberhalb der Einmündung des Schranbachs (inkludiert das Teileinzugsgebiet des Choralmbachs), das vor allem von ausgedehnten Weideflächen, durchsetzt mit infiltrationshemmenden Borstgrashorsten, geprägt wird.

Teileinzugsgebiet	Choralmbach	Schranbach	Brixenbach ¹
Größe [km ²]	0,48	1,61	2,98
Geologischer Untergrund	Porphyroid, teilw. Moränenauflage	Porphyroid, Sand-, Silt- u. Tonsteine der Schattberg- u. Löhnersbachformation, Haupt- und Wettersteindolomit	Porphyroid, teilw. Moränenauflage, Hang-/ Murschutt
Waldanteil (ca.) [%]	18	70	27
Mittlere elektrische Leitfähigkeit ² [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	106,1	159,1	111,3
Mittlerer Silikatgehalt ² [mg/l SiO ₂]	4,41	3,54	5,20
Abflusspende nach mehrtägiger Trockenperiode, gemessen am 26.8.2009 [$l/(s \cdot \text{km}^2)$]	15	9	23
Abflusspende während des Niederschlagsereignisses am 3.6.2010 [$l/(s \cdot \text{km}^2)$]	13:10 Uhr 353	11:25 Uhr 322	12:00 Uhr 243

Tab. 1: Charakteristika der Teileinzugsgebiete: ¹ Brixenbach oberhalb der Einmündung des Schranbachs, ² gemessen an 12 Terminen zwischen 16.6.2012 und 24.10.2012

Exemplarisch wird hier das Niederschlag-Abflussereignis am 2./3.6.2010 diskutiert. Nach 34,3 mm Vorregen zwischen 31.5.2010 0:30 Uhr und 1.6.2010 22:45 Uhr begann es am 2.6.2010 um 0:30 Uhr erneut zu regnen. Bis 3.6.2010 13:15 Uhr fielen 39,7 mm Niederschlag, die mittlere Niederschlagsintensität betrug somit 1,5 mm/h. Die maximale Niederschlagsintensität wurde am 3.6.2010 von 1:45 bis 2:45 Uhr gemessen (4,4 mm/h), in der Folge erreichte der Durchfluss am Pegel in Brixen um 3:15 Uhr den Maximalwert von 2,8 m³/s (Daten HD Tirol, Niederschlagsmessstation Talkaseralm und Pegel Brixen im Thale). Die Schneefallgrenze lag während des Ereignisses über den höchsten Erhebungen im Tal.

Gegen Mittag des 3.6.2010 wurden am Schranbach, Brixenbach und Choralmbach Durchflussmessungen mit der Salzverdünnungsmethode durchgeführt; zu diesem Zeitpunkt lag der Durchfluss am Pegel in Brixen im Thale mehrere Stunden lang bei ca. 1,4 m³/s (das entspricht einer Spende von 155 l/(s*km²)) (HD Tirol). Dabei zeigte das Teileinzugsgebiet des Choralmbachs die höchste Abflusspende der drei untersuchten Teileinzugsgebiete (Tab. 1). Dies war aufgrund des großen Anteils an Sättigungsflächen im Einzugsgebiet zu erwarten. Der hohe Anteil an Oberflächenabfluss im Bereich der

Choralm wurde auch von Kerl (2013) bestätigt. Eine Abflusskomponentenseparierung am talseitigen Ende der Sättigungsfläche anhand des SiO_2 -Gehalts bzw. der elektrischen Leitfähigkeit lieferte während Niederschlagsereignissen einen bis zu 69 %igen Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss.

Auffallend war am 3.6.2010 die auch bei anderen Ereignissen gemessene hohe Abflussspende des Teileinzugsgebiets des Schranbachs, die auf den ersten Blick wegen des hohen Waldanteils im Teileinzugsgebiet (ca. 70 %) überraschen mag. Sie kann durch die Gebietscharakteristika erklärt werden: Große Flächen des Einzugsgebiets werden von steilen Flanken eingenommen, die zwar bewaldet sind, aber nur flachgründige Böden auf relativ undurchlässigem Substrat (leicht metamorphe Silt- und Tonsteine der Löhnersbachformation) aufweisen. Auf diesen Flächen entsteht insbesondere bei längeren Niederschlagsereignissen rascher Zwischenabfluss, der wegen der kurzen Hanglängen auch relativ schnell in den Vorfluter gelangt.

Ähnliches berichten auch Lana-Renault et al. (2012). Sie beobachteten beim Vergleich eines bewaldeten und eines extensiv bewirtschafteten landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebietes sehr rasche und hohe Abflussspenden aus dem waldlosen Gebiet bei geringer Vorfeuchte, bei hoher Vorbefeuchtung war jedoch die Abflussspende aus dem Wald deutlich höher, allerdings mit deutlicher Verzögerung gegenüber dem waldfreien Gebiet. Die Autoren führen diese Reaktion des bewaldeten Einzugsgebietes auf zusätzliche Beiträge einer langsamen Zwischenabflusskomponente zurück. Eine weitere Ursache könnte im Erreichen eines Schwellenwertes liegen, ab dem die hydrologische Konnektivität im bewaldeten Einzugsgebiet rasch ansteigt und damit größere Teile des Systems zum Abfluss beitragen.

Abfluss-, Silikat- und Leitfähigkeitsmessungen von Kerl (2013) zeigten, dass der Schranbach auch auf konvektive Ereignisse mit einer hohen Abflussspende reagiert. Verantwortlich dafür sind die Sättigungsflächen im Bereich der Wiegalm im oberen Teil des Einzugsgebiets. Für detailliertere Aussagen über Oberflächen- und Zwischenabflussanteile sind aber weitere Feldversuche notwendig.

Bei Niedrigwasser, dargestellt durch Messungen am 26.8.2009 (Tab. 1), zeigt das Einzugsgebiet des Brixenbachs die größte Abflussspende. Das lässt auf eine größere Speicherkapazität dieses Bereichs schließen, die in der oben beschriebenen etwas geringeren Abflussdynamik während der Ereignisse resultiert (Pirkl 2012, Markart et al. 2013).

Tab. 2: Regeln zur Durchführung einer hydrologischen Raumgliederung für Starkniederschläge (in der Reihenfolge ihrer Abfrage). Flächen der genannten Eigenschaften wird ein wahrscheinlicher dominanter Abflussprozess bei Starkregen zugeordnet: HOF = Hortonscher Oberflächenabfluss (Infiltrationsüberschuss), SOF = Oberflächenabfluss von Sättigungsflächen, SSF1 = schneller Zwischenabfluss, SSF2 = langsamer Zwischenabfluss, DP = Tiefenversickerung (Meißl et al. 2011 verändert)

Flächeneigenschaften	Dominanter Abflussprozess	Begründung bzw. Quelle, aus der die Regel übernommen wurde
Asphalt-, Almstraßen, Gebäude	HOF	Tilch et al. (2006)
Planierungen	HOF	Verdichtung des Oberbodens
Felsausbiss, Felswand	HOF	Tilch et al. (2006)
Vegetationslose Flächen (Rutschungsanbruch, Uferanbrüche)	HOF	Verschlämmungsneigung aufgrund des hohen Schluffanteils
Geologie = Dolomit ohne vegetationslose Flächen, Neigung > 28°	HOF	Oberflächenabfluss auf Felsflächen (Pirkl 2012). Die Flächen, wurden in der Vegetationskartierung aufgrund ihres schütterten Latschenbewuchses nicht als Felsflächen kartiert.
Geologie = Dolomit (Wettersteindolomit, Hauptdolomit) ohne vegetationslose Felsflächen, Neigung ≤ 28°	DP	Durchlässiges Gestein, unterhalb dessen sich ein unterirdischer See befindet, der die Trinkwasserversorgung von Brixen im Thale sicherstellt. Wasserrückhalt im kleinbuckeligen Relief und Tangelhumus unter dem Latschenbewuchs erhöht den zur Infiltration zur Verfügung stehenden Zeitraum.
Flächen auf Hanggleyen	HOF/ SOF	Beurteilung nach dem Entscheidungsbaum von Scherrer (2006) auf Grundlage der Geländeerhebungen
Stehende Gewässer	SOF	Tilch et al. (2006)
Fels mit geringer Schuttauflage (nicht Dolomit)	SSF1	Geländebefunde, es handelt sich durchwegs um feuchte Hänge
Sturzhalden	SSF1	Tilch et al. (2006)
Bacheinhänge	SSF1	Feuchte, steile Flächen. Die Ergebnisse der Abflussmessungen zeigen, dass sie rasch zum Abfluss beitragen
Auenablagerungen	SSF1	Tilch et al. (2006)
Flächen mit dichtem Erlenbewuchs (Grünerlen, Grauerlen)	HOF	Markart et al. (2004)
Wiesen mit Borstgras (Wurzelfilz)	HOF	Sehr geringe Infiltrationskapazität bei Infiltrationsversuchen festgestellt, auch wenn die Intensität des Oberflächenabflusses in Abhängigkeit von der Dichte des Borstgrases und von der Durchsetzung mit Sträuchern variiert.
Zwergstrauchheide mit Borstgras, auch mit lockerem Baumbestand	HOF/ episod. SSF1	Nach Tilch et al. (2006) kann in der Rohhumusauflage unter Zwergstrauchheide bei Starkregeneignissen episodisch schneller Zwischenabfluss auftreten, der im Brixenbachtal auch beobachtet werden konnte. Borstgrasrasen unter den Zwergsträuchern führt jedoch auf denselben Flächen zu HOF aufgrund der geringen Infiltrationskapazität, so dass beide Prozesse nebeneinander ablaufen.
Feuchtfleichen	HOF/ SOF	Tilch et al. (2006)
Wiesen ohne Borstgras	SSF2/DP	Beurteilung nach dem Entscheidungsbaum von Scherrer (2006) auf Grundlage der Geländeerhebungen
Mähwiesen	SSF2/DP	Beurteilung nach dem Entscheidungsbaum von Scherrer (2006) auf Grundlage der Geländeerhebungen
Wald auf Löhnernbach- und Schattbergformation	SSF1	Dichtes Gerinnenetz, Ergebnisse der Abflussmessungen
Wald auf Hanggleyen	SSF1	Dichtes Gerinnenetz
Wald, gerodete Flächen	SSF2/DP	Beurteilung nach dem Entscheidungsbaum von Scherrer (2006) auf Grundlage der Geländeerhebungen; keine größere Änderung des Bodenzustands bei kürzlich gerodeten Flächen

Da Gewitterniederschläge vor allem am späten Nachmittag und in der Nacht stattfinden und die Anreise aus Innsbruck meist nicht so kurzfristig geplant werden kann, konnten bisher, abgesehen von einem konvektiven Ereignis (Kerl 2013), nur langanhaltende Niederschlagsereignisse untersucht werden. Zudem fanden die Messungen meist erst statt, nachdem die Spitzenabflussmenge den Pegel passiert hatte. Dabei zeigt sich, dass vor allem die Sättigungsflächen und die steilen, zwischenabflussproduzierenden Waldhänge die größten Abflussmengen erzeugen. Bei konvektiven Starkregenereignissen dürften, nach den Ergebnissen der Beregnungsversuche und auch zahlreicher Doppelringinfiltrationsmessungen, ebenfalls die Sättigungsflächen, aber auch die Weideflächen mit Borstgrasrasen und verdichtetem Oberboden, die größten Abflussmengen produzieren.

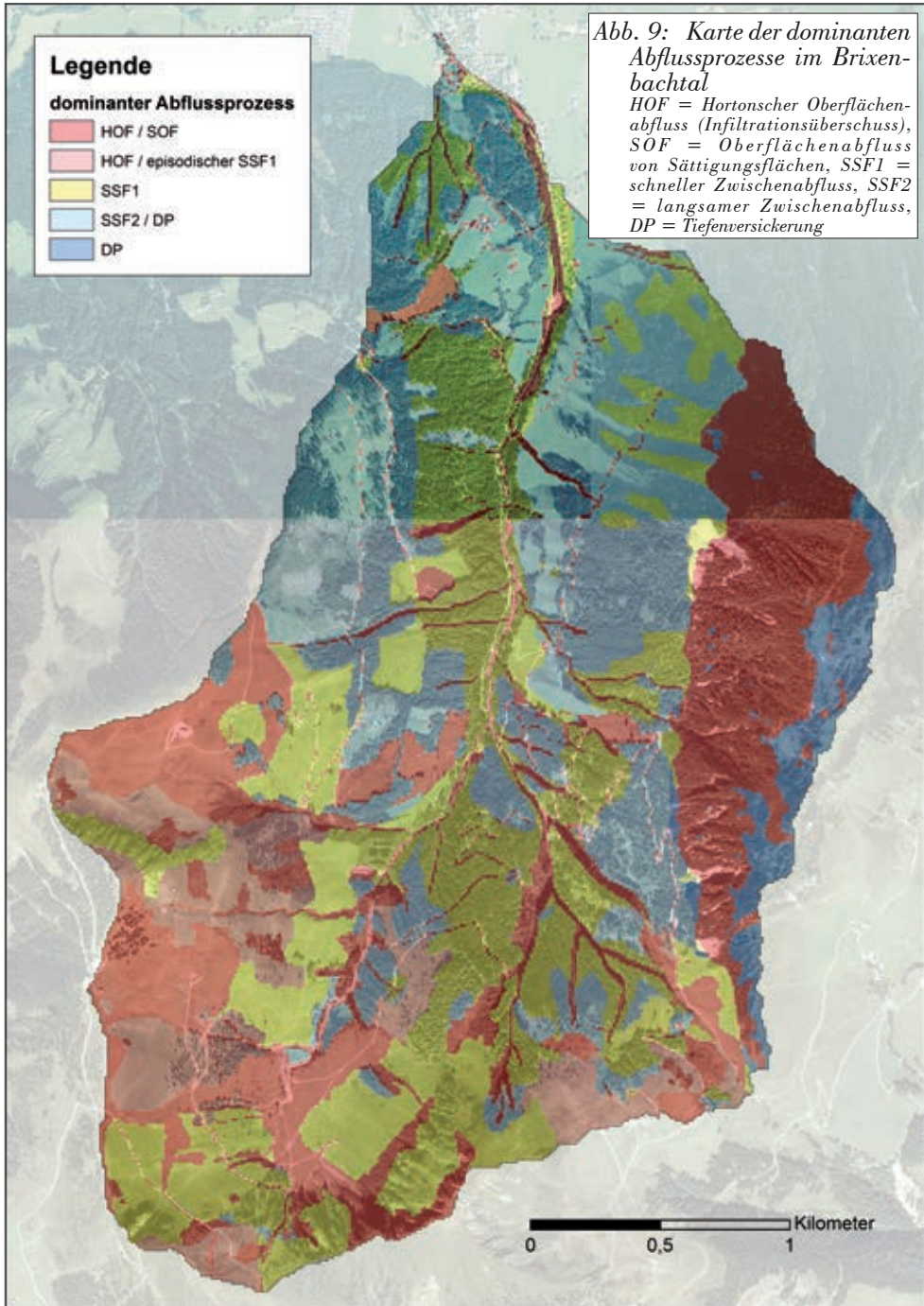
5 *Synthese: Karte der dominanten Abflussbildungsprozesse*

Die auf Plot- und Teileinzugsgebietsskala gewonnenen Erkenntnisse können in Form einer Abflussprozesskarte dargestellt werden. Diese weist Teilflächen aus, in denen jener Abflussbildungsprozess dominiert, der die relativ größte Abflussmenge auf der jeweiligen Fläche erzeugt (Tilch et al. 2006, Schmocker-Fackel et al. 2007, Klebinder et al. 2012a). Abflussprozesskarten liefern eine räumliche Gliederung des Einzugsgebiets und helfen bei der Parametrisierung von Niederschlags-Abflussmodellen (Peschke 1999, Tilch et al. 2006).

Zur Erstellung der Abflussprozesskarte für Starkniederschlagsereignisse im Brixenbachtal wurde ein regelbasiertes Verfahren angewendet und mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems umgesetzt. Die Regeln (vgl. Tab. 2) wurden teilweise publizierten Verfahren (Tich et al. 2006, Markart et al. 2004, Scherrer 2006) entnommen, teilweise auf Basis der Kartierungen, Messergebnisse und sonstigen Geländebefunde formuliert. Die resultierende Karte (Abb. 9) zeigt, dass sich die stark abflussbildenden Flächen (HOF/SOF, SSF1) vor allem in Gerinnenähe befinden, was die rasche Reaktion des Pegelstands auf Niederschlagsereignisse erklärt.

6 *Zusammenfassung und Ausblick*

Durch die intensive Forschungsarbeit im Brixenbachtal konnten wichtige Fragestellungen zur Abflussbildung in kleinen Einzugsgebieten mittlerer Höhenlage mit vorwiegender Weide- und Waldnutzung geklärt werden. So zeigt sich beispielsweise eine erhöhte Sensitivität von Teilflächen mit mittlerer Oberflächenabflussdisposition (30 bis 70 % Oberflächenabfluss) gegenüber Änderungen des Systemzustandes. Teilflächen mit sehr hoher oder geringer Oberflächenabflussdisposition reagieren hingegen nicht oder kaum auf Zustandsänderungen. Mit Hilfe von Färbeversuchen konnte der Einfluss der Beweidung auf das Infiltrationsverhalten visuell bestätigt werden. Während im obersten Bodenkomplex eines beweideten Standortes die Infiltration gleichmäßig über die verdichtete Bodenmatrix erfolgt, ändert sich mit der Tiefe die Fließbewegung hin



zu linearen Prozessen entlang bevorzugter Fließwege. Die Erkenntnisse der Feldexperimente konnten in einer, durch Messung der Abflussspenden, elektrischen Leitfähigkeit, Wassertemperatur und des Silikatgehalts plausibilisierten Karte der dominanten Abflussprozesse für das Einzugsgebiet des Brixenbachs abgebildet werden.

Neben den hier beschriebenen Untersuchungen wurden im Berichtszeitraum weitere Informationen generiert und Analysen durchgeführt, wie zum Beispiel geophysikalische Messungen aus dem Hubschrauber sowie Messungen der Zwischenabflussgeschwindigkeiten auf Schutthängen (Markart et al. 2013), Kartierung der untergrundabhängigen Abflusstypen (Pirkl 2012), Kartierung der Oberflächenabflussbeiwerte und Modellierung von Bemessungsereignissen mit Hilfe des ereignisbasierten Niederschlags-Abflussmodell ZEMOKOST (Klebinder 2012b) sowie kontinuierliche Niederschlags-Abflussmodellierungen mit HQSim. An der Zusammenführung aller Ergebnisse wird noch gearbeitet.

Jede Forschungsarbeit wirft jedoch auch eine Reihe neuer Fragen auf. Zwei der noch offenen Punkte werden beispielhaft hier genannt.

- Abflussmessungen auf Teileinzugsgebietsebene zum Zeitpunkt des Spitzenabflusses sowie bei Starkniederschlagsereignissen waren bisher aus logistischen Gründen nicht möglich. Diese Messungen würden aber zu einer weiteren Verbesserung des Verständnisses und der Objektivierung der Ergebnisse der hydrologischen Modellierung beitragen (welche Teileinzugsgebiete reagieren aufgrund welcher Gebietseigenschaften wie auf extreme Niederschlagscharakteristika).
- Der ca. 1 km² große Talschluss im Bereich der Talkaseralm entwässert in den oberen Brixenbach, der ein sehr grobblockiges Bachbett aufweist, in dem das Wasser rasch versickert. Nach Abschluss der Schneeschmelze ist dieser Teil bei Trockenwetter oberirdisch vom Rest des Brixenbachtals abgekoppelt. Nach Auskunft des Almhirtens am Talkaser Niederleger, Herrn Martin Ziepl, führt das Bachbett bei Starkregen Wasser. Es stellt sich daher die Frage, ob ein Schwellenwert für die Niederschlagsintensität gefunden werden kann, bei dessen Überschreitung der Talschluss durch oberirdischen Gerinneabfluss an den Rest des Brixenbachtals angekoppelt ist. Die Ankopplung müsste auch durch eine erhöhte Durchflussmenge am Pegel sichtbar sein.

Eine weitere Herausforderung bietet auch die Überprüfung der Gültigkeit der gewonnenen Erkenntnisse für andere kleine Einzugsgebiete. Dazu werden derzeit auch das tiefer gelegene Ruggbachtal (Pfänderstock, Vorarlberg) und das hochalpine Längental (Kühtai, Tirol) hinsichtlich ihrer Abflussreaktion auf unterschiedliche Vorbedingungen untersucht. Fernziel ist die Vergrößerung der Anzahl gut untersuchter kleiner Einzugsgebiete in den Alpen, die zur Entwicklung von Klassifizierungssystemen – wie von

McDonnell und Woods (2004) gefordert – führen soll. Derartige Typisierungen können die hydrologische Modellierung und Hochwassergefahrenabschätzung unterstützen.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten fanden im Rahmen des Projekts SeRAC-CC (Sensitivity of the runoff characteristics of small Alpine catchments to climate change), gefördert durch den österreichischen Klima- und Energiefonds im Rahmen des ACRP-Programms, statt. Wir danken dem Bürgermeister von Brixen im Thale, Herrn DI Ernst Huber, für die jahrelange logistische Unterstützung und den Grundbesitzern im Brixenbachtal für ihr Verständnis. Zur Vertiefung der Gebietskenntnis im Brixenbachtal haben insbesondere auch die Kartierungen von Dr. Herbert Pirkl (Pirkl 2012), die Messungen im Rahmen des ÖAW-Projektes Shallow Interflow (Kooperation BFW, GBA und Büro für Geologie Dr. Pirkl; Markart et al. 2013), die Masterarbeiten von Christine Ehrne (2011) und Christine Gruber (2011) und die Diplomarbeit von Christoph Mayerhofer (2012) beigetragen. Wir danken A.Univ.Prof. Dr. Fritz Schöberl und Dr. Katrin Schneider für ihre Anregungen und Diskussionsbeiträge.

Literatur:

- Bronstert A. (Hg.) (2005): Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele, DWA, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Forum Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Band 13.
- Chiffard P., Köchling M., Didszun J. und Zepp H. (2011): Die flächenhafte Ausweisung von Bodenfeuchteregimes – Eine Methode im Rahmen des pre-processing für die Modellierung des Landschaftswasserhaushaltes. In: Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften 32/33, S. 97–112.
- GBA (2008): Geofast Karte Blatt 121 Neukirchen am Großvenediger. Kompilation O. Kreuss, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Ehrne C. (2011): Quellkartierung und Quellschüttungsanalyse im Brixenbachtal (Tirol). Masterarbeit am Institut für Geographie der Universität Innsbruck.
- Geitner C., Meißl G., Mätzler A., Ruggenthaler R., Tusch M. und Meyer E. (2011): Untersuchungen zur Variabilität und biologischen Aktivität der Böden im Brixenbachtal (Tirol) und zu ihrem Einfluss auf die Abflussentstehung. In: Jahresbericht der Innsbrucker Geographischen Gesellschaft 2008–2010. Innsbruck, S. 157–173.
- Gruber C. (2011): Statistische Auswertung von Niederschlags- und Abflussereignissen im Brixenbachtal (Mai 2004 bis Dezember 2009). Masterarbeit am Institut für Geographie der Universität Innsbruck.
- Kerl F. (2013): Anwendung der Tracer elektrische Leitfähigkeit und Silicat zur Bestimmung der Fließwege im Brixenbachtal, Tirol. Masterarbeit am Institut für Geographie der Universität Innsbruck.
- Kirnbauer R., Haas P., Chiffard P., Tilch N., Zillgens B., Johst M. und Steidl R. (2009): Hochwasserentstehung in der nördlichen Grauwackenzone – Beobachtung Messung Modellierung. Wiener Mitteilungen, Band 213. (http://www.hydro.tuwien.ac.at/uploads/media/Wiener_Mitteilungen-Band-213_02.pdf, abgerufen am 27.6.2013)
- Klebinder K., Sotier B., Eder A., Strauss P, Markart G., Aigner H., Holzinger G. und Krammer Ch. (2012a): Hydrologische Bodenkennwerte und Abflussreaktionstypen für Niederösterreich. Wildbach- und Lawinenverbau, Jg. 76; Heft Nr. 169, 114–123.
- Klebinder K., Kohl B., Markart G., Sotier B. & Suntinger K. (2012b): Hochwasserabflussbemessung Brixenbach. Unveröffentlichter Bericht an die Wildbach- und Lawinenverbauung Gebietsbauleitung Unteres Inntal.
- Kohl B. und Markart G. (2002): Dependence of surface runoff on rain intensity – Results of rain simulation experiments. In: International Commission for the Hydrology of the Rhine basin: Proceedings of the International Conference on Flood Estimation, March 6-8, Berne, Switzerland, 139–146.

- 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.
- Lana-Renault, N., J. Latron, D. Karssenberg, P. Serrano, D. Regüés und M.F.P. Bierkens (2012): Seasonal differences in runoff between forested and non-forested catchments: a case study in the Spanish Pyrenees. In: Revisiting Experimental Catchment Studies in Forest Hydrology (Proceedings of a Workshop held during the XXV IUGG General Assembly in Melbourne, June–July 2011), IAHS Publ. 353, 58–63.
- Markart G. und 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 Salzb. Wien: Forstliche Bundesversuchsanstalt Wien. Waldforschungszentrum. FBVA-Berichte.
- Markart G., Kohl B., Sotier B., Schauer T., Bunza G., Stern R. (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW-Dokumentation, Schriftenreihe des Bundesforschungszentrums für Wald 3, Wien. (<http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=4343>, abgerufen am 27.6.2013)
- Markart G., Klebinder K., Kohl B. und Sotier B. (2011): Niederschlagsretention und Abflussbildung in alpinen Einzugsgebieten. Ingenieurbiologie, Mitteilungsblatt Nr. 3, 4–13.
- Markart G., Römer A., Bieber G., Pirkl H., Klebinder K., Hörfarer C., Ahl A., Ita A., Jochum B., Kohl B., Meißl G., Motschka K., Ottowitz D., Schattauer I., Sotier B., Strasser M., Suntinger K. und Winkler E. (2013): Abschätzen der Bandbreiten von Fließgeschwindigkeiten des oberflächennahen Zwischenabflusses in alpinen Einzugsgebieten. Endbericht zum Projekt Shallow Interflow im Auftrag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Nationalkomitee Hydrologie Österreichs, <http://epub.oeaw.ac.at/ihp>
- Mayerhofer C. (2012): Identifizierung von Abflussbildungsprozessen. Vergleich einer Klein- und Großregnungsanlage. Diplomarbeit für den Studiengang Umweltsicherung an der Hochschule Weihenstephan Triesdorf, durchgeführt am Institut für Geographie der Universität Innsbruck.
- McDonnell, J.J. und Woods R. (2004): Editorial: On the need for catchment classification. In: Journal of Hydrology 299, Heft 1–2, p. 2–3.
- Meißl G., Geitner C., Tusch M., Schöberl F. und Stötter J. (2011): Reliefparameter und abflusssteuernde Flächeneigenschaften: Statistische Analyse ihres Zusammenhangs in einem kleinen alpinen Einzugsgebiet. In: Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband, Band 55, Heft 3, S. 293–313.
- Meißl G., Klebinder K., Geitner C., Schöberl F., Kohl B., Formayer H., Gorgas Th. und Bronstert A. (2012): Sensitivität der Abflussprozesse kleiner alpiner Einzugsgebiete auf Klimaänderungen. In: Weiler M. (Hg. 2012): Wasser ohne Grenzen. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 31.12, S. 121 – 126. (<http://tdh2012.uni-freiburg.de/download/tagungsband>, abgerufen am 27.6.2013)
- Merz R. und Blöschl G. (2009): A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. In: Water Resources Research Vol. 45, W01405, doi: 10.1029/2008WR007163
- Peschke G., Etzenberg C., Müller G., Töpfer J. und Zimmermann S. (1999): Das wissenschaftliche System FLAB – ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten gleicher Abflussbildung. IHI_Schriften 10.
- Pirkl H. (2012): Untergrundabhängige Abflussprozesse. Kartierung und Quantifizierung für das bundesland Tirol. Flächendeckende Aufnahme Osttirols. Bericht an den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol und Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Hydrographie und Hydrologie, unveröffentlicht.
- Schader R. (2013): Untersuchung zu Versickerungseigenschaften von Almflächen mittels Färbeversuchen. Masterarbeit am Institut für Geographie der Universität Innsbruck.
- Scherrer S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Berichte des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz 18/2006. (http://www.scherrer-hydrol.ch/pdf/scherrer/luwg_bericht_18-2006_ansicht.pdf, abgerufen am 1.7.2013)
- Scherrer S., Naef F., Faeh A.O. und Cordery I. (2007): Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. In: Hydrology and Earth System Sciences, vol. 11, p.907–922.
- Schmocker-Fackel P., Naef F. und Scherrer S. (2007): Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. In: Hydrology and Earth System Sciences 11, 891–906.
- Tilch N., Zillgens B., Uhlenbrook S., Leibundgut C., Kimbauer R. und Merz B. (2006): GIS-gestützte Ausweisung von hydrologischen Umsatzräumen und Prozessen im Löhnersbach Einzugsgebiet (Nördliche Grauwackenzone, Salzburger Land). In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, vol. 58 no. 9–19, p. 141–151.