Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 109 (2017)

Heft: 3

Artikel: Der Einfluss von Schneedeckeneigenschaften auf die Abflussgenerierung wärhend Regen-auf-Schnee-Ereignissen

Autor: Würzer, Sebastian / Jonas, Tobias

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941622

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Der Einfluss von Schneedeckeneigenschaften auf die Abflussgenerierung während Regen-auf-Schnee-Ereignissen

Sebastian Würzer, Tobias Jonas

Zusammenfassung

Regen-auf-Schnee-Ereignisse (RAS) haben in der Vergangenheit zu grösseren Hochwasserereignissen im alpinen und subalpinen Raum geführt. Im Oktober 2011 beispielsweise führte ein solches Ereignis zu schweren regionalen Überschwemmungen in der Schweiz. Es stellt nach wie vor eine grosse Herausforderung dar, die Auswirkung der Schneedecke auf die Abflussbildung für ein bevorstehendes RAS-Ereignis vorherzusagen. Einerseits sind die Prozessabläufe sehr komplex und variabel, andererseits fehlen im Normalfall hinreichend genaue Daten, um die Prozessabläufe detailliert beurteilen zu können. In der vorliegenden Arbeit wurde das physikalisch basierte Schneedeckenmodell SNOWPACK verwendet, um Schneedeckenprozesse während mehr als 1000 historischen RAS-Ereignissen an Stationsstandorten bzw. 191 Ereignissen über ganze Einzugsgebiete in der Schweiz nachbilden zu können. Die daraus resultierenden Simulationen der Massen- und Energiebilanz sowie des Flüssigwassertransports wurden dazu verwendet, Abflussbildungs-Charakteristiken während RAS-Ereignissen zu untersuchen. Dabei ist bei den meisten untersuchten Ereignissen die Regenkomponente im Abfluss dominierend, wobei die Schneeschmelze in einzelnen Fällen bis zu 70 % zum Schneedeckenabfluss beitragen kann. Die Hauptenergiequelle für solch hohe Schmelzbeiträge bilden turbulente Wärmeflüsse. Ereignisse mit verstärktem Schneedeckenabfluss waren am häufigsten während der späten Ablationsphase im Frühsommer und teilweise im Herbst zu beobachten. Die Studie zeigt anhand systematischer Analysen verschiedene meteorologische Faktoren wie auch Schneedeckeneigenschaften auf, die eine verstärkte Abflussbildung während RAS-Ereignisse begünstigen.

1. Einleitung

Regen-auf-Schnee-Ereignisse (RAS) wurden schon als ursächlich für einige der grössten Hochwasserereignisse in den USA sowie für einige schwere Hochwasserereignisse in Europa identifiziert. In der Schweiz wurde vor allem das Hochwasserereignis vom Oktober 2011 in mehreren Studien untersucht (*Badoux et al.*, 2013; *Rössler et al.*, 2014; *Wever et al.*, 2014b). Dieses Ereignis hat seinerzeit vor Augen geführt, dass die Auswirkungen von Starkniederschlägen auf eine Schneedecke noch zu wenig verstanden worden sind, um derartige Ereignisse operationell beurteilen und vorhersagen zu können. Die Schwierigkeiten in der Vorhersage solcher Ereignisse bestehen vor allem in der räumlichen Schneedeckenvariabilität, der Unsicherheit in meteorologischen Eingangsgrössen und Defiziten im Prozessverständnis. Erschwerend ist, dass Prozessabläufe komplex und sowohl von Ereignis zu Ereignis als auch räumlich variabel sind. Die meisten RAS-Ereignisse führen nicht zu Hochwasser, und sogar sehr ähnlich ausgeprägte Ereignisse können, bedingt durch Unterschiede in den anfänglichen Schneedeckeneigenschaften, zu sehr unterschiedlichen Antworten im Schneedeckenabfluss führen. Als Prognostiker in der Abflussvorhersage ist es wichtig, schon im Vorfeld eines Ereignisses zu wissen, ob ein RAS-Ereignis im Vergleich zu einem reinen Regenereignis zu mehr oder weniger intensiven Abflussbildung führt. Schneedeckenprozesse wie Schneeschmelze, Wassertransport, Einfrieren infiltrierenden Wassers und die Setzung der Schneedecke formen den Regeneintrag in Schneedeckenabfluss um, welcher sich in Menge, zeitlicher Dynamik und Intensität deutlich von diesem unterscheiden kann. Besorgniserregend für die Schweiz dürfte sein, dass diese Ereignisse in Zukunft vor allem in höheren Lagen häufiger auftreten könnten (*Köplin et al.*, 2014; *Surfleet* and *Tullos*, 2013). Da sich bisherige Studien oftmals auf die selteneren Extremereignisse beziehen, während im Alltag der operationellen Vorhersage meist weniger extreme Szenarien zu beurteilen sind, soll diese Studie den Blick auf die Gesamtheit einer grossen Bandbreite von RAS-Ereignissen erweitern. Diese mit grossem Aufwand auf die vorherrschenden Prozesse hin zu untersuchen, soll ermöglichen, RAS-Ereignisse in einem grösseren Kontext beurteilen zu können.

2. Methodik

In dieser Studie wurden zuerst alle verfügbaren RAS-Ereignisse der letzten 16 Jahre im Schweizer Alpenraum bezüglich ihres zeitlichen und örtlichen Auftretens analysiert. Darauf wurde das Zusammenspiel der einzelnen Schneedeckenprozesse für diese RAS-Ereignisse untersucht. Hierfür wurde die Verwendung eines Schneedeckenmodells gewählt, welches diese anhand physikalischer Prozessbeschreibungen detailliert abzubilden vermag. Entsprechend sind alle Resultate dieser Studie von Simulationen mit dem am SLF entwickelten und vielfach validierten Schneedeckenmodell SNOWPACK abgeleitet. Diese wurden einerseits für Standorte von Messstationen wie auch auf einem Raster für ganze Einzugsgebiete durchgeführt.

Im Folgenden stellen wir die Eingangsdaten für die Simulationen, das verwendete Modell-Set-up und letztlich die hier verwendete Definition von RAS-Ereignissen vor. Eine detailliertere Beschreibung der Eingangsdaten sowie des Modells befindet sich in *Würzer et al.* (2016).

2.1 Datengrundlage

Für die Verwendung prozessorientierter Schneedeckenmodelle bedarf es einer Reihe von Daten, die in der Regel nur an Standorten geeigneter schneemeteorologischer Messstationen verfügbar sind. Als Ausgangspunkt für die Untersuchungen wurden daher Daten von 116 automatischen meteorologischen Flachfeld-Stationen des Interkantonalen Mess- und

Informationssystems (IMIS) verwendet. Da sich diese Stationen ausschliesslich oberhalb 1560 m ü. M. befinden, schliesst dies die Beurteilung von Ereignissen in tieferen Lagen anhand dieser Daten aus. Ein vergleichbares Modell-Set-up wurde schon verwendet, um das intensive RAS-Ereignis im Oktober 2011 zu analysieren (*Badoux et al.*, 2013; *Wever et al.*, 2014b). Für anschliessende Untersuchungen auf Einzugsgebietsebene wurde für insgesamt 58 Einzugsgebiete ein 2-km-Raster an virtuellen Stationen erstellt. Daten für diese virtuellen Stationen wurden mithilfe von METEOIO, einem Produkt zum Preprocessing meteorologischer Daten (*Bavay* and *Egger*, 2014), auf Basis von Daten der umliegenden IMIS-Stationen berechnet.

Das IMIS-Stationsnetz bietet viele meteorologische und Schneedeckendaten wie Windgeschwindigkeit und -richtung, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Schneedeckenoberflächentemperatur, Bodentemperatur, reflektierte kurzwellige Strahlung und Schneehöhe, welche auch operationell für die Lawinenwarnung verwendet werden (*Lehning et al.* 1999). Da das IMIS-Messnetz allerdings nur über unbeheizte Niederschlagsmesser verfügt, können diese Messdaten nicht zur Bestimmung von Schneefall oder Mischniederschlag, welcher häufig während RAS-Ereignissen beobachtet wird, genutzt werden. Deshalb haben wir zur Bestimmung des Niederschlagseintrags ein Gitterprodukt der MeteoSchweiz verwendet (*MeteoSwiss*, 2013), welches für die jeweiligen Standorte der IMIS-Stationen oder die virtuellen Stationen auf Stundensummen disaggregiert wurde (*Würzer et al.*, 2016).

Die verwendeten 58 Einzugsgebiete wurden anhand der Einzugsgebietsgliederung der Schweiz mit der Aggregationsebene von 150 km^2 definiert. Jedes ausgewertete Einzugsgebiet beinhaltet hierbei mindestens eine IMIS-Station, an der ein RAS-Ereignis stattfand.

2.2 Modellbeschreibung und -Set-up

Das physikalisch basierte Schneedeckenmodell SNOWPACK simuliert die Entwicklung der Schneedecke als ein eindimensionales Profil, welches von einer Vielzahl an Schneeschichten aufgebaut ist. Eine detaillierte Beschreibung des Modells findet sich in *Bartelt* and *Lehning* (2002), *Lehning et al.* (1999, 2002a,b) und *Wever et al.* (2014a). Das Modell wird hier durch stündliche Wettervariablen, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, angetrieben. Für jeden Zeitschritt wird Akkumulation, Schmelze und Veränderung der Schneedecke sowie der Wasseraustritt in den Boden berechnet. Schneeschmelze findet statt, wenn die Temperatur einer Schicht bei 0° C ist und zusätzlich Energie zugeführt wird. Der Energieeintrag in die Schneedecke während Schmelzbedingungen berechnet sich aus langwelliger und kurzwelliger Strahlung, sensiblen und latenten Wärmeflüssen sowie Energieeintrag durch Regen. Die verwendeten Parametrisierungen für kurzwellige und langwellige Nettostrahlung und die turbulenten Wärmeflüsse werden in *Würzer et al.* (2016) näher beschrieben. Der vertikale Flüssigwassertransport innerhalb der Schneedecke wird auf Basis der Richards-Gleichung (*Wever et al.*, 2014a; *Wever et al.*, 2015) berechnet. Dieser Ansatz wurde im Verlaufe der Studie noch erweitert und vermag nun zusätzlich auch, präferenzielle Fliesswege im Schnee zu berücksichtigen (*Wever et al.*, 2016; *Würzer et al.*, 2016).

Im Gegensatz zu den Simulationen für virtuelle Stationen stehen für echte Stationsstandorte zusätzlich zu den Niederschlagsdaten noch gemessene Schneehöheinformationen zur Verfügung. An diesen Orten wurden die Niederschlagsdaten wo nötig dynamisch angepasst, um die gemessenen Schneehöhen genau wiederzugeben. Um zwischen Regen, Schneefall oder Mischniederschlag zu unterscheiden, wurde ein Temperaturbereich zwischen 0.7 und 1.7° C angenommen, wo Schnee in Regen übergeht.

2.3 Ereignisdefinition

Die Definition eines RAS-Ereignisses beeinflusst sowohl Anzahl als auch raumzeitliche Charakteristiken eines solchen Ereignisses entscheidend. Eine Studie, welche sich ausschliesslich auf Extremereignisse fokussiert, wird deshalb zu anderen Resultaten führen als eine Studie mit einer sehr weiten Definition von RAS. Oft werden RAS-Ereignisse als Tage definiert, an denen eine bestimmte Regenmenge fällt und zusätzlich ein Rückgang in Schneehöhe oder Schneewasseräquivalent (SWE) zu verzeichnen ist. Da es unser Ziel war, RAS-Ereignisse von der Perspektive der Hochwasservorhersage zu untersuchen, wurde nur eine anfängliche Schneehöhe von 25 cm und ein kumulativer Niederschlag von 20 mm innerhalb von 24 Stunden als RAS-Kriterium gewählt. Wegen potenziellem Einfrieren von Schmelzwasser innerhalb der Schneedecke findet eventuell gar keine Schneeschmelze statt, und im Falle von Mischniederschlag oder einem Übergang von Regen zu Schneefall kann es sogar zu einem Anstieg der Schneehöhe kommen. Der Beginn des Events wurde dann definiert als der Zeitpunkt, an dem 3 mm kumulativer Regen fielen. Die Endbedingungen waren erfüllt, wenn weniger als 3 mm Regen oder weniger als 6 mm Abfluss in 10 bzw. 5 Stunden bestimmt wurden. Diese Kriterien wurden sowohl auf die Stationsstandorte als auch auf ganze Einzugsgebiete angewendet, mit der einzigen Ausnahme, dass im Falle von Einzugsgebieten ein Schneedeckenabfluss von 3 mm als Endkriterium verwendet wurde, um zu berücksichtigen, dass Einzugsgebiete oft nur teilweise schneebedeckt sind.

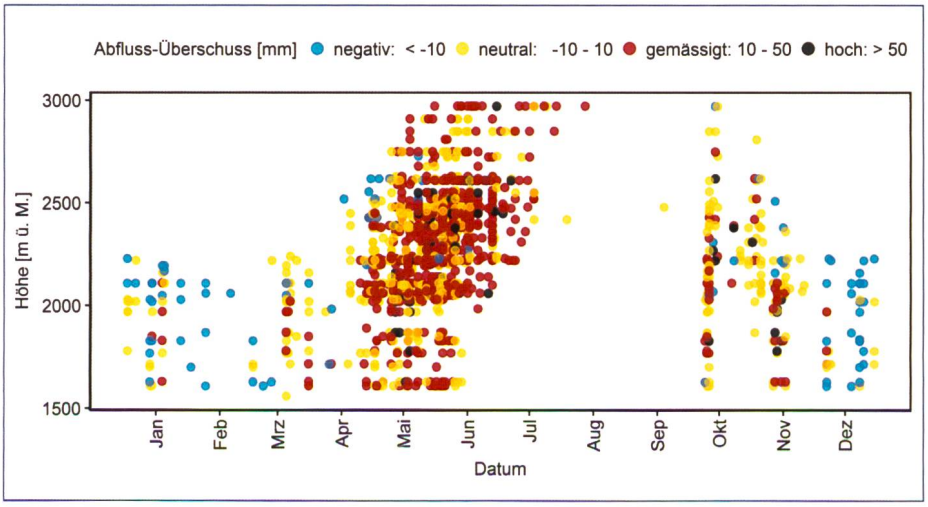

Bild 1. Auftreten von RAS-Ereignissen in Abhängigkeit von Höhe und Jahreszeit. Die Farbskala gibt die Differenz zwischen Schneedeckenabfluss und Regeneintrag wieder. Negative Werte bedeuten entsprechend eine abschwächende Wirkung der Schneedecke auf die Abflussbildung, positive Werte das Gegenteil (nach Würzer et al., 2016).

3. Ergebnisse

3.1 Regen-auf-Schnee-Ereignisse der letzten 16 Jahre in der Schweiz

Zunächst analysierten wir das zeitliche und räumliche Auftreten von RAS-Ereignissen. Unsere Ereignisdefinition führte im Zeitraum 1998–2014 an 116 IMIS-Stationen zu über 1000 individuellen Stationsereignissen (IE), d. h. einzelne RAS-Ereignisse an einer einzigen Station. Dies umfasst auch zahlreiche synchrone Ereignisse (SE), welche an mehreren Stationen gleichzeitig auftreten. Über den gesamten Zeitraum von 16 Jahren wurden 163 SE identifiziert, welche etwa 90 % der IE enthalten. Dies entspricht etwa 10 SE pro Jahr mit durchschnittlicher Beteiligung von 6 Stationen. Erwartungsgemäss kommen Ereignisse mit nur einer beteiligten Station am häufigsten vor, während Ereignisse mit sehr vielen beteiligten Stationen eher selten sind. Für die Untersuchung im Einzugsgebiet wurden 21 dieser SE gewählt, welche möglichst viele IE umfassten, also grösserskalige Ereignisse darstellten. Zu beachten gilt hierbei, dass sich diese Zahlen nur auf den Höhenbereich beziehen, welcher vom IMIS-Stationsnetz abgedeckt wird. Der Abflussüberschuss, die Differenz zwischen kumulativem Schneedeckenabfluss und kumulativem Regeneintrag, ist farblich dargestellt. Negative Werte zeigen dabei an, dass zumindest ein Teil des Regens in der Schneedecke zurückgehalten wurde, während positive Werte zusätzlichen Abfluss durch Schneeschmelze bedeuten. Da sowohl Schneedecken- als auch meteorologische Bedingungen eine starke Saisonalität aufweisen, unterliegt auch der Abflussüberschuss während RAS einer Saisonalität. Wie *Bild 1* zeigt, fanden die meisten RAS-Ereignisse auf Höhe der IMIS-Stationen (1560 und 2972 m ü. M.) in den Monaten Mai bis Juni statt. Zu dieser Jahreszeit ist die Wahrscheinlichkeit erwartungsgemäss am grössten, dass die Lufttemperatur hoch genug ist, damit Regen im Höhenbereich des IMIS-Stationsnetzes auf eine noch bestehende Schneedecke fällt. Ereignisse mit einem hohen Schneeschmelzanteil am Schneedeckenabfluss finden sich jedoch auch im Herbst. Jene Herbstereignisse sind überproportional häufig grösserskalige Ereignisse, welche gleichzeitig mehrere Stationen betreffen (beachte die vertikalen Bänder in *Bild 1*). Eines dieser Ereignisse ist jenes RAS-Ereignis vom Oktober 2011, welches regional schwere Überschwemmungen mit grossen Schäden verursachte und welches Anlass zu dieser Studie gegeben hat. Es stellt sich hier anhand der Anzahl der beteiligten Stationen als das grossräumigste RAS-Ereignis dar. Weitere RAS-Ereignisse zwischen Dezember und April fanden fast ausnahmsweise unterhalb von 2300 m ü. M. statt. Dabei lieferte die Schneedecke nur selten zusätzlichen Schmelzabfluss, sondern hielt in der Regel vermehrt Niederschlag zurück. Die wenigen Ausnahmen betreffen zumeist nur einzelne Stationen. Dies mag in der Schweiz denjenigen erstaunen, der an die sogenannten Weihnachtshochwasser denkt. Jedoch ist zu bedenken, dass unsere Analysen nur für Höhen ab 1560 m ü. M. vorliegen.

3.2 Ursachen der Schneeschmelze während Regen-auf-Schnee-Ereignissen

Der Energieeintrag für die Schneeschmelze setzt sich prinzipiell zusammen aus den Strahlungskomponenten (langwellige und kurzwellige), den turbulenten Flüssen (sensible und turbulente Wärme), dem Bodenwärmestrom und dem Energieeintrag durch den Regen. Man könnte meinen, dass der Regen während RAS-Ereignissen direkt für die Schneeschmelze verantwortlich ist. Die Analyse sämtlicher in *Bild 1* gezeigten Ereignisse hat ergeben, dass die turbulenten Wärmeflüsse hauptverantwortlich für Schneeschmelze bei RAS-Ereignissen mit hohen Schmelzeinträgen waren *(Bild 2)*. Die Wichtigkeit sensibler und latenter Wärme, hauptsächlich verursacht durch die Kondensation von feuchter Luft an der Schneeoberfläche, war während einzelner RAS-Ereignisse in früheren Studien bereits erkannt worden. Hier konnte erstmals an einer grossen Anzahl Ereignisse im Schweizer Alpenraum unter einer grossen Bandbreite von Randbedingungen gezeigt werden, dass beide turbulenten Wärmeströme zusam-

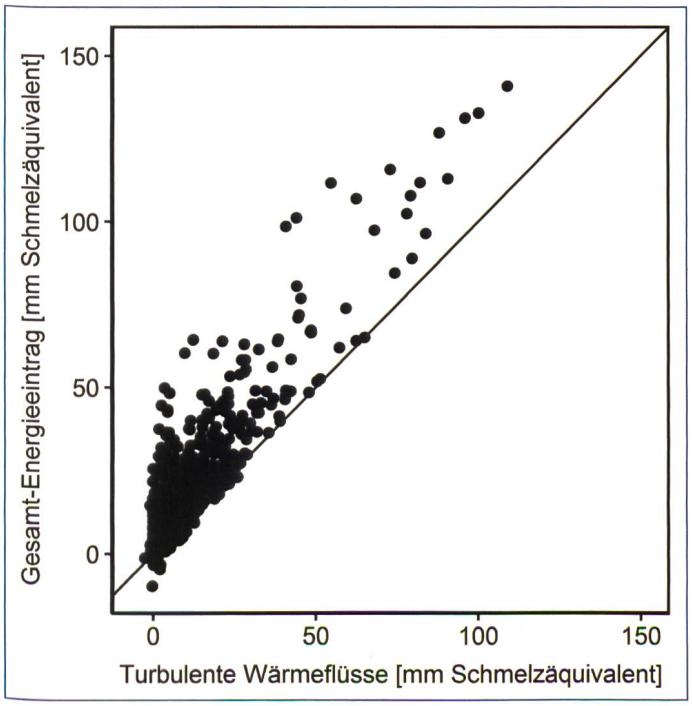

Bild 2. Anteil der turbulenten Wärmeflüsse am für die Schneeschmelze zur Verfügung stehenden Gesamtenergieeintrag.

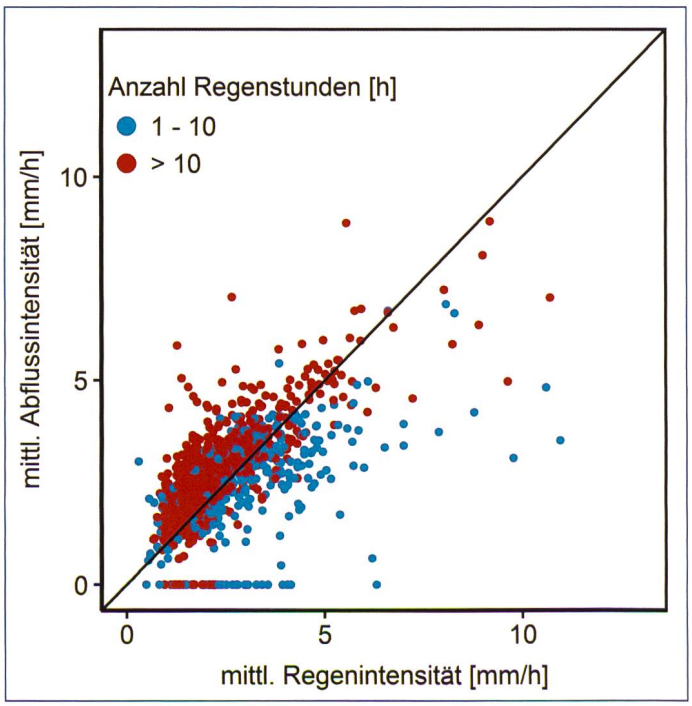

Bild 3. Intensität des Schneedeckenabflusses im Vergleich zur Intensität des Regeneintrags (jeweils gemittelt über die Regen- bzw. Abflussstunden), separat ausgewertet für unterschiedlich lange Regenereignisse.

men einen Grossteil der Schmelzenergie bei RAS-Ereignissen mit grösseren Schmelzmengen lieferten. Im Gegensatz dazu trugen die Strahlungsflüsse im Mittel nur wenig zum Gesamtenergieeintrag bei, unter anderem auch weil diese bei regnerischen Verhältnissen in der Regel klein sind und dazu noch tageszeitlichen Schwankungen unterliegen. Den advektiven Energieeintrag durch Regen lieferte im Schnitt nur 13 % der gesamten Schmelzenergie. Damit ist dieser Beitrag zwar nicht vernachlässigbar, aber im Voraus eines Ereignisses verhältnismässig leicht und mit relativ kleinen Unsicherheiten abzuschätzen. Diese Ergebnisse implizieren, dass in der Beurteilung sich ankündigender RAS-Ereignisse besonders auf die Wind- wie auch auf die Temperaturverhältnisse geachtet werden sollte. Besonders bei windigen Verhältnissen mit Temperaturen weit über dem Nullpunkt ist eine detailliertere Analyse angezeigt.

3.3 Faktoren, die die Intensität des Schneedeckenabflusses beeinflussen

Während RAS-Ereignissen kann man die unterschiedlichen und miteinander wechselwirkenden Prozesse innerhalb der Schneedecke vereinfachend auch als einen integralen Prozess betrachten, der den Regeneintrag in den Schneedeckenabfluss umwandelt. Dieser Abfluss kann sich in der kumulativen Menge, der zeitlicher Dynamik und in seiner Intensität deutlich vom Regeneintrag unterscheiden. Dies ist entscheidend, da bei hohen Schneedeckenabfluss-Intensitäten z. B. die Aufnahmekapazität des darunterliegenden Bodens überschritten werden kann und somit sehr schnelle Abflussprozesse wie lateralen Überlandfluss initialisiert werden können. Deshalb zeigen die Resultate aus *Bild 3* einen interessanten und relevanten Zusammenhang zwischen den Intensitäten des Schneedeckenabflusses und des Regens sowie der Länge des Regenereignisses. Für kurze und intensive Regenereignisse (> 4 mm/h und < 10 h) wirken die Schneedeckenprozesse dämpfend auf die Abflussintensität. Für lange Regenereignisse hingegen (> 10 h) liegt in den meisten Fällen eine erhöhte Abflussintensität vor. Nur bei kurzen und weniger intensiven Regenfällen (< 4 mm/h und < 10 h) ist die Wirkung der Schneedeckenprozesse variabel und muss anhand anderer Faktoren beurteilt werden.

Neben den rein meteorologischen Randbedingungen haben natürlich auch die Schneedeckeneigenschaften einen Einfluss auf die Intensität des Schneedeckenabflusses. Interessant ist vor allem der Einfluss der Schneehöhe *(Bild 4)*. Über alle Ereignisse gesehen, waren die höchsten Schneedeckenabfluss-Intensitäten bei Situationen mit geringen Schneehöhen zu verzeichnen. Umgekehrt führten sehr grosse Schneehöhen in der Regel zu geringen Abflussintensitäten. Dabei lässt sich die grosse Streuung im Zusammenhang zwischen Schneehöhe und Schneedeckenabfluss-Intensitäten auf zusätzliche Abhängigkeiten dieser Variablen auf beispielsweise die Regenintensitäten oder auf Schneedeckeneigenschaften wie den anfänglichen Flüssigwassergehalt zurückführen. Dieser Umstand verdeutlicht einmal mehr die Notwendigkeit einer grossen Anzahl von zu untersuchenden Ereignissen, um verallgemeinerbare Aussagen treffen zu können.

3.4 Regen-auf-Schnee-Ereignisse im Einzugsgebiet

Die obigen Analysen von RAS-Ereignissen an Einzelstandorten lieferten bereits wichtige Einblicke in das Abflussverhalten aus der Schneedecke und in die Faktoren, welche dieses beeinflussen. Nicht minder wichtig ist aus hydrologischer Sicht jedoch auch, welche Auswirkung das Vorhandensein einer Schneedecke auf der Skala ganzer Einzugsgebiete hat. Hier variieren Prozesse und Randbedingungen innerhalb des Gebiets, insbesondere wenn grössere Höhengradienten vorhanden sind. So sind die ganze Schneedeckenentwicklung und auch die Art des Niederschlags stark abhängig von der Lufttemperatur und damit von der Hypsometrie des Einzugsgebiets. Ob Prozesse innerhalb des Gebiets synchron oder asynchron ablaufen, kann für die Abflussbildung im Gesamtgebiet von entscheidender Bedeutung sein. Daher sollte analog zu den Analysen für Stationsstandorte untersucht werden, unter welchen Randbedingungen für ganze Einzugsgebiete Abflussüberschüsse und erhöhte Abflussintensitäten auftreten können. Um diese Fragestellung beantworten zu können, mussten wir mit grossem Aufwand möglichst viele Ereignisse in vielen Einzugsgebieten unter verschiedenen Rahmenbedingungen untersuchen.

Erwartungsgemäss verläuft der Schneedeckenabfluss in den verschiedenen Höhenbereichen in der Regel unterschiedlich ab, wie in *Bild 5* am Beispiel

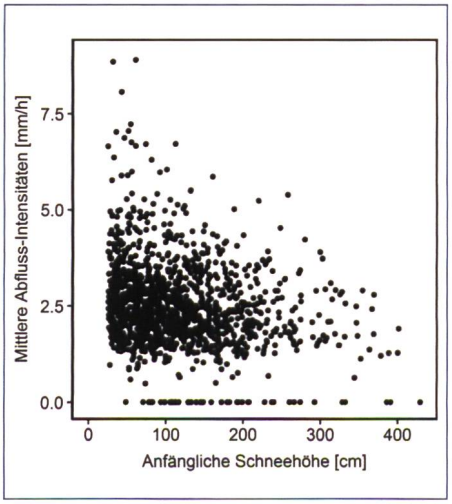

Bild 4. Abflussintensitäten in Bezug zur anfänglichen Schneedeckenmächtigkeit.

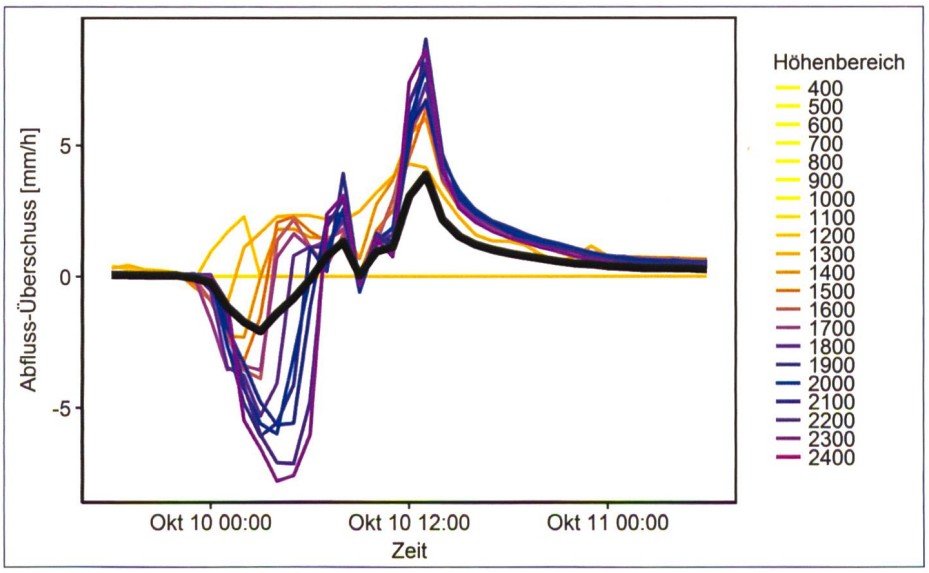

Bild 5. Beispiel für den zeitlichen Verlauf des Schneedeckenabfluss-Überschusses während des Oktober-2011-Ereignisses auf Einzugsgebietsskala für verschiedene Höhenbereiche. Der mittlere Abflussüberschuss des Einzugsgebiets ist hierbei schwarz dargestellt.

des RAS-Ereignisses im Oktober 2011 zu sehen ist. Dies hat Konsequenzen auf den Abfluss im Gesamteinzugsgebiet. Die in *Bild 5* dargestellten Simulationen zeigen, dass zu Beginn des Ereignisses einige Höhenbereiche Regen zurückhalten, während andere Höhenbereiche bereits zusätzliche Schneeschmelze generieren. Erst mit anhaltender Dauer des Regenereignisses liefern die meisten Höhenbereiche zusätzliche Schneeschmelzbeiträge. Dies bedingt, dass die Schneedecke auf die Abflussbildung im Gesamtgebiet zunächst abschwächend wirkt. Erst nach ca. 7 Stunden Regen bewirkt die zunehmende Anzahl Gebietsanteile, die mit Schneeschmelze beitragen, eine relativ zum Regen verstärkte Abflussbildung. Dieser Befund mag darauf hindeuten, dass für Einzugsgebiete mit grösseren Höhenunterschieden gerade lang anhaltende Regenereignisse mit ausreichend hohen Temperaturen als potenziell kritisch einzustufen sind.

Insgesamt konnten 191 derartige Einzugsgebietssimulationen zu RAS-Ereignissen der letzten 16 Jahre realisiert werden. *Bild 6* zeigt die Standardabweichung der Abflussverzögerung (zeitliche Verzögerung des Einsetzens des Schneedeckenabflusses über die Höhenbereiche) als Mass für die Synchronizität des Einsetzens des Schneedeckenabflusses im Einzugsgebiet. Dieses Mass ist in der Abbildung über der mittleren Lufttemperatur während der Ereignisse dargestellt. Dabei ist der anfängliche Flüssigwassergehalt der Schneedecke zusätzlich farblich gekennzeichnet. Wir erkennen, dass die Synchronizität mit steigender mittlerer Lufttemperatur, vor allem aber mit erhöhter Vorfeuchte der Schneedecke zunimmt. Dies ist insofern interessant, als sich bei den Simulationen für Stationsstandorte gezeigt hat, dass Ereignisse mit grosser Vorfeuchte besonders schnell zu Schneedeckenabfluss führen, und zwar unabhängig von der Schneehöhe. Diese beiden Faktoren begünstigen offenbar neben der Dauer des RAS-Ereignisses erhöhte Abflussbildungsraten und stellen in Verbindung ein potenzielles Hochwasserrisiko dar.

3.5 Das Oktober-2011-Ereignis

Das Oktober-2011-Ereignis ist in vielerlei Hinsicht besonders. In Bezug auf die beteiligten Stationen bzw. Einzugsgebiete ist es das grösste Ereignis der untersuchten 16 Jahre. Von den untersuchten Ereignissen für ganze Einzugsgebiete ist es das einzige Event, welches in den drei Tagen vor Einsetzen des Regens Schneefall bis in tiefe Lagen zu verzeichnen hatte. Dies führte dazu, dass betroffene Einzugsgebiete, welche nur Tage davor beinahe schneefrei waren, zu Beginn des Ereignisses zu grossen Teilen mit Neuschnee bedeckt waren (siehe *Bild 7*, farblich dargestellt). Dies hatte zur Folge, dass die Schnee-Eigenschaften innerhalb der einzelnen Einzugsgebiete vergleichsweise homogen waren, als der Regen einsetzte. Derartige Verhältnisse sind bei Regenereignissen auf eine Altschneedecke im Frühling gänzlich ausgeschlossen. Dabei begünstigen sie neben den oben genannten anderen Faktoren, dass gewisse Prozessabläufe innerhalb der betroffenen

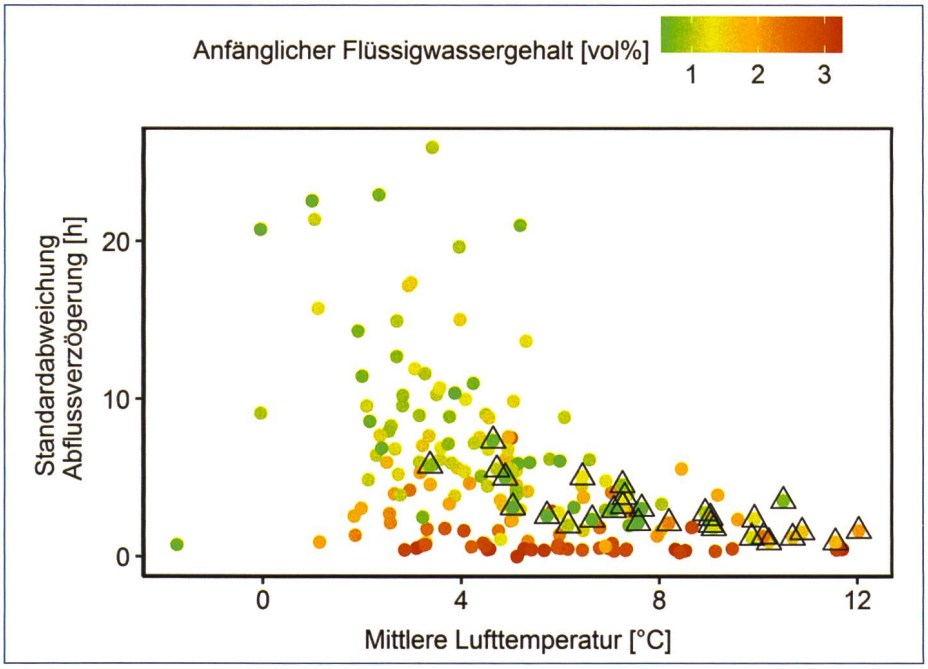

Bild 6. Standardabweichung der Abflussverzögerung (zeitliches Erreichen eines kumulativen Grenzwertes von 1 mm für den Schneedeckenabfluss nach Ereignisbeginn, gemittelt über das Einzugsgebiet) über die Höhenbereiche des Einzugsgebiets. Für hohe Flüssigwassergehalte ist dieses Mass für die Schneedeckenabfluss-Synchronizität besonders nahe bei 0, entspricht also synchron einsetzendem Abfluss. Auch hohe mittlere Lufttemperaturen sind mit einer hohen Synchronizität assoziiert. Einzugsgebietssimulationen des Oktober-2011-Ereignisses sind mit Dreiecken markiert.

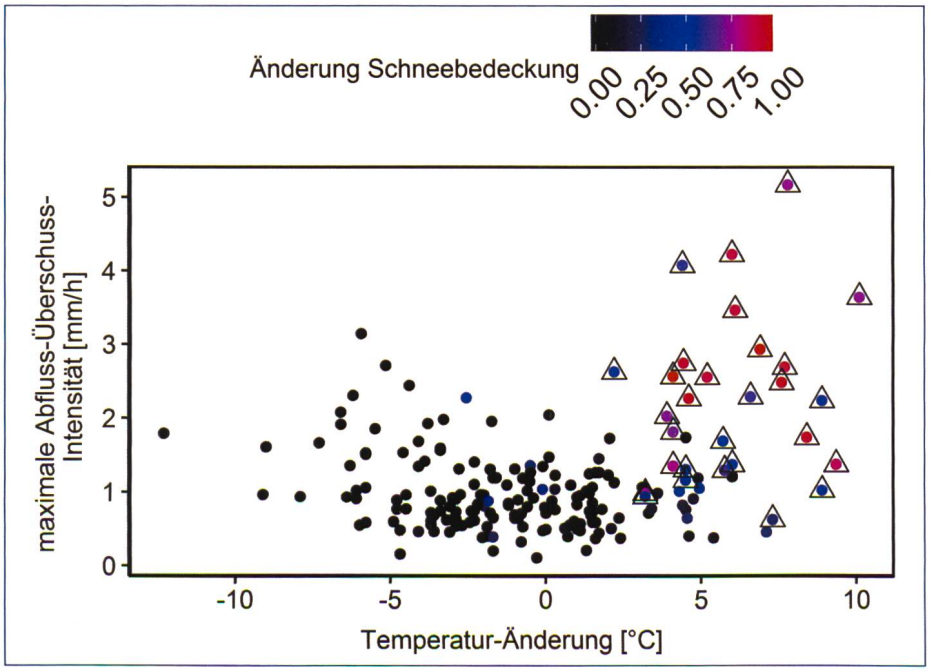

Bild 7. Maximale Intensität des Schneedeckenabfluss-Überschusses, in Abhängigkeit von der Temperaturentwicklung während RAS-Ereignissen in jeweils einem Einzugsgebiet. Farblich dargestellt ist die Zunahme der Schneebedeckung des Einzugsgebiets in den drei Tagen vor Einsetzen des Regens; die Dreiecke markieren Einzugsgebietssimulationen des Oktober-2011-Ereignisses.

Einzugsgebiete synchron bzw. zumindest teilweise zeitgleich ablaufen. Das Ereignis vom Oktober 2011 ist sowohl in *Bild 6* als auch *7* speziell gekennzeichnet, um zu verdeutlichen, wie aussergewöhnlich dieses Ereignis in Bezug auf bestimmte Randbedingungen gewesen sein mag. Dies sicherlich in Bezug auf die Temperaturentwicklung *(Bild 7)*, die innerhalb vieler Einzugsgebiete hohe Synchronizität im Einsetzen des Schneedeckenabflusses *(Bild 6)* und schlussendlich die hohen Abflussüberschüsse.

4. Schlussfolgerungen

Basierend auf meteorologischen und Schneedecken-Messdaten der vergangenen 16 Jahre, konnten 1063 historische RAS-Ereignisse im Schweizer Alpenraum identifiziert und ausgewertet werden. Um die relevanten Schneedeckenprozesse beurteilen zu können, wurden alle Ereignisse mit dem physikalischen Schneedeckenmodell SNOWPACK analysiert. Aufgrund der grossen Bandbreite und Anzahl an Ereignissen und der systematischen Vorgehensweise haben sich interessante und neue Erkenntnisse ergeben, welche sich für eine Vielzahl an RAS-Ereignissen generalisieren lassen. Die gezeigten Resultate führen zu folgenden Schlussfolgerungen:

Im betrachteten Höhenbereich traten die meisten RAS-Ereignisse überwiegend in den Monaten Mai bis Juni auf und führten dabei zu hohem Schneedeckenabfluss-Überschuss. Auch im Herbst gab es einige Ereignisse mit hohen Schmelzbeiträgen und von überregionalem Ausmass. Dabei wurden turbulente Wärmeflüsse (latente und sensible Wärme) in den meisten Fällen als Hauptenergiequelle für die Schneeschmelzanteile identifiziert. Insgesamt begünstigten die folgenden Faktoren eine relativ zum Regen überhöhte Abflussbildung:

- lang anhaltende Ereignisse
- homogene Schneedeckeneigenschaften im Einzugsgebiet zu Ereignisbeginn
- Schneedeckeneigenschaften, die ein schnelles Einsetzen des Schneedeckenabflusses begünstigen
- ausreichend hohe Lufttemperaturen, die auch in höheren Gebietsanteilen Regen und Schmelze ermöglichen
- hohe Windgeschwindigkeiten

Auf das RAS-Ereignis im Oktober 2011 treffen fast alle dieser oben genannten Faktoren zu, sodass dieses über die grosse Anzahl untersuchter Ereignisse als das in mehrerer Hinsicht grösste Ereignis bewertet wird. Wie sich auch gezeigt hat, ergeben sich aus einer Kombination von Regen auf eine Schneedecke nicht zwingendermassen kritische Situationen. Vielmehr ist die Abflussbildung das Resultat aus einer Vielzahl von Prozessen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen. Eigenschaften wie Schneedeckenmächtigkeit, -schichtung und -feuchte haben unter gegebenen meteorlogischen Randbedingungen erhebliche Auswirkungen darauf, ob in einer Schneedecke Regen zurückgehalten wird oder mit zusätzlicher Schmelze die Abflussbildung verstärkt. Daraus ergibt sich, dass die Verwendung hinreichend komplexer schneehydrologischer Modelle für die operationelle Einschätzung herannahender RAS-Ereignisse notwendig ist.

Danksagung

Wir danken dem Bundesamt für Umwelt, BAFU, für die Finanzierung dieses Forschungsprojekts und die damit verbundene Möglichkeit, weitere Erfahrungen im Zusammenhang mit Regen auf Schnee zu sammeln. Niederschlagsdaten wurden von MeteoSchweiz bereitgestellt.

Literatur

Badoux, A., Hofer, M., Jonas, T. Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011, Tech. Rep., WSL/SLF/MeteoSwiss, 92 pp., 2013.

Bartelt, P., Lehning, M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part I: numerical model, Cold Reg. Sci. Technol., 35, 123–145, doi: 10.1016/S0165-232x(02)00074-5, 2002.

Bavay, M., Egger, T. MeteoIO 2.4.2: a preprocessing library for meteorological data, 7, 3135–3151, 10.5194/gmd-7-3135-2014, 2014.

Köplin, N., Schädler, B., Viviroli, D., Weingartner, R. Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change, Hydrol. Process., 28, 2567–2578, doi:10.1002/hyp.9757, 2014.

Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Russi, T., Stockli, U., Zimmerli, M. SNOWPACK model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations, Cold Reg. Sci. Tech., 30, 145–157, doi:10.1016/S0165-232X(99)00022-1, 1999.

Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part III: Meteorological forcing, thin layer formation and evaluation, Cold Reg. Sci. Tech., 35, 169–184, doi: 10.1016/S0165-232x(02)00072-1, 2002a.

Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C., Satyawali, P. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part II: Snow microstructure, Cold Reg. Sci. Tech., 35, 147–167, doi: 10.1016/S0165-232x(02)00073-3, 2002b.

MeteoSwiss. Documentation of meteoswiss grid-data products, daily precipitation (final analysis): RhiresD, Tech. rep., Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, Zürich, Switzerland, 2013.

Rössler, O., Froidevaux, P., Börst, U., Rickli, R., Martius, O., Weingartner, R. Retrospective analysis of a nonforecasted rain-on-snow flood in the Alps-a matter of model limitations or unpredictable nature?, Hydrol. Earth Syst. Sci., 18, 2265–2285, doi:10.5194/hess-18-2265-2014, 2014.

Surfleet, C. G., Tullos, D. Variability in effect of climate change on rain-on-snow peak flow events in a temperate climate, J. Hydrol., 479, 24–34, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.11.021, 2013.

Wever, N., Fierz, C., Mitterer, C., Hirashima, H., Lehning, M. Solving Richards Equation for snow improves snowpack meltwater runoff estimations in detailed multi-layer snowpack model, Cryosphere, 8, 257–274, doi:10.5194/tc-8-257-2014, 2014a.

Wever, N., Jonas, T., Fierz, C., Lehning, M. Model simulations of the modulating effect of the snow cover in a rain-on-snow event, Hydrol. Earth. Sys. Sci., 18, 4657–4669, doi:10.5194/hess-18-4657-2014, 2014b.

Wever, N., Schmid, L., Heilig, A., Eisen, O., Fierz, C., Lehning, M. Verification of the multi-layer SNOWPACK model with different water transport schemes, Cryosphere, 9, 2271–2293, doi: 10.5194/tc-9-2271-2015, 2015.

Wever, N., Würzer, S., Fierz, C., Lehning, M. Simulating ice layer formation under the presence of preferential flow in layered snow covers, Cryosphere, doi:10.5194/tc-10-2731-2016, 2016.

Würzer, S., Jonas, T., Wever, N., Lehning, M. Influence of initial snowpack properties on runoff formation during rain-on-snow events, J. Hydrometeorol., 17, 1801–1815, doi: 10.1175/JHM-D-15-0181.1, 2016.

Würzer, S., Wever, N., Juras, R., Lehning, M., Jonas, T. Modeling liquid water transport in snow under rain-on-snow conditions – considering preferential flow, doi:10.5194/hess-21-1741-2017, 2017.

Anschrift der Verfasser

Sebastian Würzer, Tobias Jonas, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF, Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos Dorf
sebastian.wuerzer@slf.ch
tobias.jonas@slf.ch