



Vom Punkt zur Fläche in der Messung des Wasseräquivalents der Schneedecke – Mehrwert von Cosmic-Ray Neutron Sensoren in der regionalen Schneemodellierung

Paul Schattan · Gabriele Baroni · Sascha Oswald · Christine Fey · Johannes Schöber · Stefan Achleitner

Online publiziert: 9. Juli 2018
 © Der/die Autor(en) 2018

Zusammenfassung In dieser Arbeit wird die Messmethode des Cosmic Ray Neutron Sensing (CRNS) zur Erfassung des Wasseräquivalents der Schneedecke (SWE) in Gebirgsräumen vorgestellt. Dieses kontaktlose und wartungsarme Verfahren ermöglicht die kontinuierliche und zerstörungsfreie Erfassung der Schneedecke in einem Bereich von mehreren Hektar. Im Rahmen einer Messkampagne in den Tiroler Alpen wurde die Methode weiterentwickelt. In der darauf aufbauenden schneehydrologischen Modellierung eines bepegelten Kopfeinzugsgebiets war die Ziel-

setzung, den Skalensprung zwischen Punktmessung und Modellauflösung zu überbrücken. Die räumliche und zeitliche Entwicklung der Schneedecke wurde über drei Wintersaisons hindurch beobachtet. Es wurden (i) kontinuierliche konventionelle SWE-Messungen auf der Punktskala, (ii) insgesamt 17 Messkampagnen (Schneeschnitte, terrestrisches Laserscanning) sowie (iii) kontinuierliche CRNS-Messungen durchgeführt. Der Vergleich mit Laserscan basierten SWE-Werten zeigt, dass CRNS auch in hochalpinem Terrain mit entsprechend hohen Schneemengen eine kontinuierliche und verlässliche Abschätzung des SWE erlaubt. Die Übertragbarkeit zwischen Wintersaisons mit unterschiedlichen Schneeverteilungen ist sehr gut. Kein zeitlich konstanter Zusammenhang wurde dagegen zwischen Laserscan basierten SWE-Werten und der konventionellen kontinuierlichen Messung gefunden. Auch in einem anschließenden Kalibrierexperiment wird der Mehrwert der CRNS Messungen im Vergleich zur konventionellen Messung deutlich. Hierfür wurde ein Energiebilanz basiertes schneehydrologisches Modell in Bezug auf (i) Abflussmessungen, (ii) fernerkundungsbasierte Schneebedeckungskarten (basierend auf Landsat-8 und Sentinel-2A Aufnahmen) und (iii) in-situ Schneemessungen kalibriert. Dabei wurden jeweils konventionelle bzw. auf CRNS basierte SWE-Daten verwendet. Bei der Nutzung des CRNS basierten SWE Datensatzes zeigte sich klar dessen Vorteil. Die gute Übertragbarkeit zwischen Messung und Modell führt zu einer verbesserten Simulation der Schneedecke.

Closing the scale gap in measuring snow water equivalent—the added value of Cosmic-Ray Neutron Sensing for regional snow modelling

Abstract This work presents Cosmic-Ray Neutron Sensing (CRNS) for measuring snow water equivalent (SWE) in mountain regions. The contactless and low-maintenance method allows for continuous and non-destructive monitoring of the snow pack in a footprint of several hectares. A field campaign with the subsequent modelling of a gauged headwater basin was set up to close the gap between point-scale snow observations and the spatial resolution of the snow hydrological model. The spatial and the temporal development of the snow pack was observed over three winter seasons. During this period, (i) continuous conventional SWE measurements, (ii) a total of 17 field campaigns (snow pits and terrestrial laser scanning), and (iii) continuous CRNS measurements were conducted. Comparing laserscan based SWE values with CRNS data confirms its potential for continuous SWE measurements in high alpine areas with deep snow packs. In contrast to conventional point-scale SWE measurements, the transferability between winter seasons with differing snow patterns is very good. The high potential of the CRNS data is also proven in the subsequent calibration experiment. Therein, an energy balance based snow hydrological model was calibrated with regard to (i) runoff observations (ii) remote sensing (Landsat-8 and Sentinel-2A data) based snow covered area maps and (iii) in-situ snow measurements. The in-situ data refer to either conventional, or CRNS based SWE data. Due to the absence of a scale gap between measurements and model resolution, using CRNS based SWE data improves the modelling results and

Dipl.-Geogr. P. Schattan
 alps GmbH,
 Grabenweg 68, 6020 Innsbruck,
 Österreich

Dipl.-Geogr. P. Schattan (✉)
 Institut für Geographie,
 Universität Innsbruck, Innrain
 52 f, 6020 Innsbruck, Österreich
schattan@alps-gmbh.com

Dr. G. Baroni
 UFZ – Helmholtz-Zentrum
 für Umweltforschung,
 Permoserstr. 15, 04318 Leipzig,
 Deutschland

Dr. G. Baroni · Prof. Dr. S. Oswald
 Institut für Erd- und
 Umweltwissenschaften,
 Universität Potsdam,
 Karl-Liebknecht-Str. 24–25, 14476 Potsdam,
 Deutschland

Dipl.-Geogr. C. Fey · Dr. J. Schöber
 TIWAG – Tiroler
 Wasserkraft AG, Eduard
 Wallnöfer-Platz 2, 6020 Innsbruck,
 Österreich

assoz. Prof. DI Dr. S. Achleitner
 Arbeitsbereich Wasserbau, Institut für
 Infrastruktur, Universität Innsbruck,
 Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck,
 Österreich

reduces uncertainties in snow pack modelling.

1 Einleitung

Insbesondere in Gebirgsräumen stellt Schnee eine wichtige Komponente des hydrologischen Kreislaufs dar. Das saisonal im Schnee gespeicherte Wasser trägt während der Schmelze im Frühling und Frühsommer beträchtlich zum Abflussgeschehen bei (Verbunt et al. 2003; Viviroli et al. 2007). Für ein effizientes Management der Wasserressourcen in Gebirgsregionen ist daher eine möglichst präzise Bestimmung des Wasseräquivalents der Schneedecke (SWE) notwendig. Hierzu kann grundsätzlich auf (i) in-situ Beobachtungen, (ii) Fernerkundungsdaten und (iii) schneehydrologische Simulationen zurückgegriffen werden (Sturm 2015).

Schneehöhe (SH) und SWE sind jedoch kleinräumig sehr heterogen verteilt (Winstral and Marks 2014; Grünwald and Lehning 2015). Traditionelle in-situ Messungen wie Schneeschächte (Goodison et al. 1987; Proksch et al. 2016) stören die Schneeschichtung, sind arbeits- und zeitintensiv und bilden dennoch nur einen kleinen Teil der Schneedecke ab. Entsprechend müssen in der Regel Abstriche bei der räumlichen und der zeitlichen Auflösung der Messungen gemacht werden. Konventionelle automatische Messsysteme wie Schneehöhensensoren, Schneekissen oder SnowPackAnalyser (SPA) (Stähli et al. 2004) erfassen die Eigenschaften der Schneedecke kontinuierlich und zeitlich hochaufgelöst, bleiben räumlich allerdings weiterhin auf einen kleinen Messbereich beschränkt (siehe beispielhaft in Abb. 3b). Größere räumliche Einheiten (Einzugsgebiete, Teilflächen von Modellen) können mit solchen punktuellen Messungen daher nur unter hohem Aufwand (große Anzahl an Einzelmessungen) abgebildet werden.

Laserscan basierte Aufnahmen (Deems et al. 2013) und Drohnen gestützte Photogrammetrie (Adams et al. 2017; Bühler et al. 2017) sind grundsätzlich dazu geeignet repräsentative Aufnahmen der Schneehöhenverteilung zu erstellen. Die Anwendbarkeit ist in der Praxis jedoch aus logistischen und finanziellen Gründen auf einzelne Kampagnen beschränkt. Zudem ist zur Bestimmung des hydrologisch relevanten SWE eine Annahme über die Schneedichte notwendig.

Satelliten gestützte Fernerkundungsdaten könnten diese Lücke prinzipiell schließen. Sie werden in regelmäßigen Zeitabständen aufgenommen und sind in der Regel für ein gesamtes Einzugsgebiet verfügbar. Ein grundsätzlicher Nachteil aller auf optischen Satellitendaten gestützten Produkte stellen jedoch Datenlücken bei Bewölkung dar (Dozier 1989; Hall et al. 2002; Nolin 2010; Dietz et al. 2012). Wolkenunabhängig sind lediglich auf Synthetic Aperture Radar (SAR) basierende Nassschneeflächenprodukte (Nagler and Rott, 2000; Pettinato et al. 2013; Nagler et al. 2016; Rondeau-Genesse et al. 2016). Diese können wiederum nicht zwischen trockenem Schnee und schneefreiem Untergrund unterscheiden. Über das Vorhandensein von Schnee hinausgehende Informationen, beispielsweise über das SWE, können aktuell nur mit passiven Mikrowellensensoren mit einer räumlichen Auflösung von mehr als zwanzig Kilometern gewonnen werden (Rott et al. 2004; Liang et al. 2008; Clifford 2010; Nolin 2010; Dietz et al. 2012). Gebirgsräume sind deshalb bei diesen Produkten aufgrund der kleinräumigen Topographie ausgeklammert.

Zur Simulation von schneehydrologischen Prozessen stehen Modelle sehr unterschiedlicher Komplexitätsgrade zur Verfügung (Essery et al. 2013; Avanzi et al. 2016). Die Spanne reicht hierbei von physikalisch basierten bis hin zu konzeptionellen Modellen, wobei die Übergänge fließend sind. Typischerweise sind innerhalb eines Modells sowohl für verschiedene Prozessgruppen, als auch innerhalb dieser, (Sub)module mit unterschiedlich vollständigen physikalischen Prozessbeschreibungen implementiert. Häufig haben daher selbst gemeinhin als physikalisch basiert bezeichnete Modelle sogenannte „versteckte Parametrisierungen“ (Kirnbauer et al. 1994). In diesem Sinne enthalten hydrologische Modelle stets freie Parameter, die für das jeweilige Einzugsgebiet kalibriert werden müssen. Prinzipiell können physikalisch basierte Modelle angesichts sich verändernder Umweltbedingungen robuster sein als konzeptionelle Modelle, wobei zugleich die Anzahl freier Parameter in der Regel größer ist. Ein größerer Parameterraum erhöht grundsätzlich die Anzahl sich gegenseitig ausgleichender Parameterwerte (Equifinalität) (Beven 2012; Efstratiadis & Koutsoyiannis 2010).

Eine Kombination von schneehydrologischen Modellen mit in-situ Messungen und Fernerkundungsdaten sollte dazu führen, dass sich die jeweils immanenten Nachteile gegenseitig aufheben und somit zu den besten Resultaten führen (Sturm 2015). Kombinierte Ansätze wurden beispielsweise in Bezug auf Datenassimilation (Slater and Clark 2006; Thirel et al. 2013; Magnusson et al. 2014), inverse Modellierung des Niederschlags (Shrestha et al. 2014; Ritter et al. 2016) und multi-kriterielle Modellkalibrierung (Kirnbauer et al. 1994; Schöber et al. 2010, 2014; Finger et al. 2011, 2015; Berezowski et al. 2015; Revuelto et al. 2016) genutzt.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Verwendung von in-situ Daten ist dabei die räumliche Repräsentativität der Messung für die entsprechende Simulationseinheit. Neue automatische in-situ Messmethoden mit einem größeren Messbereich von mehreren Hektar wie beispielsweise Gammaskopie (Choquette et al. 2013; Smith et al. 2017) oder die Messung bodennaher kosmogener Neutronen (cosmic ray neutron sensing, CRNS; Desilets et al. 2010) sind daher sehr vielversprechend.

CRNS wurde zunächst zur kontinuierlichen Bestimmung der Bodenfeuchte vorgeschlagen (Zreda et al. 2008) und ist inzwischen auf mehreren Kontinenten im operationellen Einsatz. CRNS wurde auch erfolgreich zur Bestimmung von Bodenparametern genutzt (Rivera Villarreyes et al. 2014; Baatz et al. 2017). Weiters hat sich eine sehr gute Eignung zur Bestimmung des SWE herausgestellt. Erste Studien beschränkten sich dabei auf Regionen mit gering mächtigen Schneedecken in Nordamerika (Desilets et al. 2010; Rasmussen et al. 2012; Sigouin und Si 2016). Aus diesem Grund wurden im Rahmen einer Feldkampagne von März 2014 bis Juni 2016 und einem anschließenden multi-kriteriellen Kalibrierexperiment folgende Forschungsfragen adressiert:

1. Ist CRNS für die Messung von SWE in einer hochalpinen Umgebung geeignet?
2. Bietet CRNS im Vergleich zu einer konventionellen SWE-Messung einen Mehrwert für die multi-kriterielle Kalibrierung eines schneehydrologischen Modells?

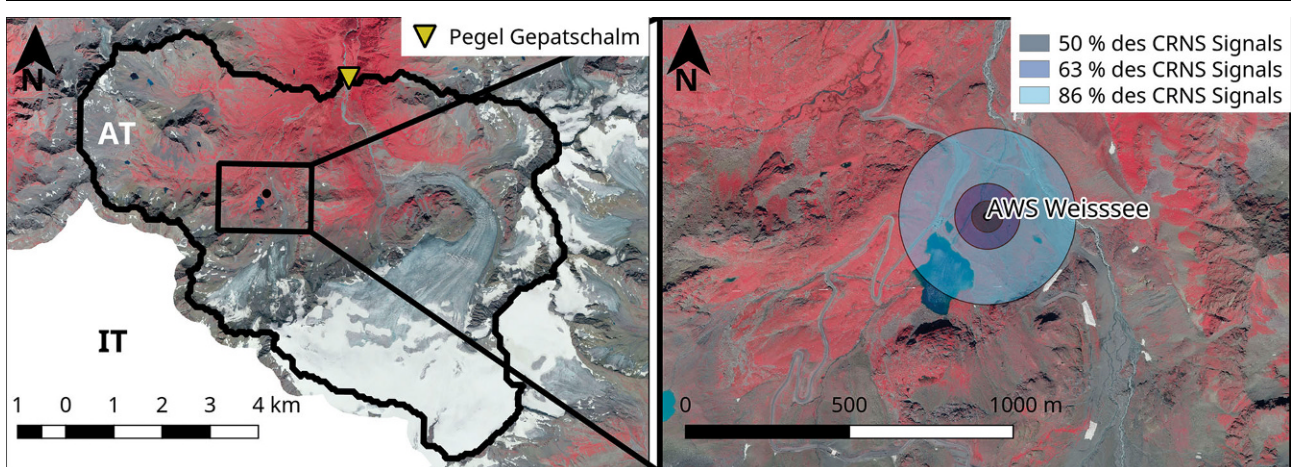


Abb. 1 Einzugsgebiet der Fagge bis zum Pegel Gepatschalm mit der automatischen Wetterstation (AWS) Weißsee (Der Bereich, der zu 50 %, 63 % und 86 % zum CRNS Signal beiträgt, ist in *Blautönen* hinterlegt)

2 Untersuchungsgebiet

In dieser Arbeit wird das Kopfeinzugsgebiet der Fagge, einem der Hauptzubringer zum Tiroler Inn in den österreichischen Alpen untersucht. Am Pegel Gepatschalm entwässert die Fagge ein Einzugsgebiet von 51,85 km². Bei einer mittleren Höhe von 1833 m.ü.A. erstreckt sich dieses von 1915 am Gebietsauslass bis 3509 m.ü.A. am Alpenhauptkamm. Der Vergletscherungsgrad ist mit 39% (Stand 2006) sehr hoch (Abb. 1). Lichter Baumbestand ist in der am tiefsten gelegenen Region in der Nähe des Gebietsauslasses anzutreffen. Darüber hinaus weist das Einzugsgebiet keinen geschlossenen Baumbestand auf. Zudem stellt die Fagge den größten natürlichen Zufluss zum Speicher Gepatsch dar. Dieser wird als Jahresspeicher mit einer installierten Leistung von 325–392 MW betrieben. Das Wissen um den Speicherzustand der Schneedecke ist daher auch aus wasserwirtschaftlicher Sicht sehr wertvoll.

Aus diesem Grund wird in der Nähe des Weißsees, im zentralen Bereich des Einzugsgebiets auf 2470 m.ü.A. gelegen, eine automatische Wetterstation (AWS) betrieben. Im Zeitraum von März 2014 bis Juni 2016 wurde der Zustand der Schneedecke in der Umgebung der AWS im Rahmen von kontinuierlichen Messungen und Feldkampagnen erfasst (siehe Abschn. 3.1). Der Fokus dieser Untersuchungen lag auf einem Bereich von etwa 270 m Radius um die Station, aus dem 86% des Signals des an der Station installierten CRNS stammt (Abb. 1, siehe auch Abschn. 3.1). Dieses Gebiet weist nur spärlichen Bewuchs

auf und ist mit einer mittleren Neigung von 14,5° vergleichsweise flach. Während der Schneebedeckungsgrad im Hochwinter bei nahezu 100% liegt, bilden sich im Frühsommer Ausaperungsmuster aus, die auf eine hohe Variabilität der Schneeakkumulation hindeuten (Abb. 2).

3 Daten und Methoden

3.1 Erhebung von Messdaten im Untersuchungsgebiet Weißsee

An der AWS Weißsee werden, neben der Erfassung der üblichen meteorologischen Parameter, auch kontinuierlich schneehydrologisch relevante Parameter wie Schneehöhe und Schneedichte gemessen (Abb. 3b). Für die Messung der Schneedichte steht ein SnowPack-Analyzer (Stähli et al. 2004) zur Verfügung. In Kombination mit zwei ultraschallbasierten Schneehöhensensoren kann das SWE_{SPA} [mm] anhand von Gl. 1 aus der Schneedichte ρ_{Schnee} [kg m⁻³] und der Schneehöhe SH [m] ermittelt werden:

$$\text{SWE} = \rho_{\text{Schnee}} \cdot SH \quad (1)$$

Durch die Verwendung beider Schneehöhensensoren sollen systematische Abweichungen der SWE-Zeitreihe durch kleinräumige Schneeuumlagerungen am Standort der AWS verringert werden. Der Messbereich, auf dem sich diese kontinuierliche Messreihe stützt, ist im Vergleich zur Auflösung des verwendeten hydrologischen Modells (50 × 50 m) dennoch klein. Eine Übertragbarkeit der Messwerte auf die Skala des hy-

drologischen Modells ist somit nicht unbedingt gegeben. Daher wurde zusätzlich ein CRNS installiert, dessen Messbereich wesentlich größer ist und einer Vielzahl an Modellteilflächen entspricht (Abb. 3a).

Der CRNS zählt kontinuierlich Neutronen des kosmogenen Hintergrundes im Wasserstoff sensitiven Energiebereich von etwa 0,1–10⁶ eV (Desilets et al. 2010; Köhli et al. 2018). Während für (i) die Intensität der eingehenden Neutronen, (ii) die Luftdruck und (iii) die absolute luftfeuchte Korrekturfunktionen angewendet werden, korreliert das verbleibende CRNS-Signal invers mit der in der Umgebung in Form von Bodenfeuchte und SWE gebundenen Menge an Wasserstoff (Zreda et al. 2012). Die Sensitivität nimmt dabei nicht-linear mit der Entfernung zum Sensor ab (Köhli et al. 2015; Abb. 3a). Weitere Faktoren, die den Footprint der Messung beeinflussen, sind der Luftdruck sowie die Gesamtmenge an Wasser in der Umgebung (Köhli et al. 2015).

Flankierend wurden insgesamt 17 Messkampagnen durchgeführt, während derer Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner (TLS) und manuelle Schneedichtemessungen durchgeführt wurden. Aus diesen Daten werden multi-temporale SWE-Karten (SWE_{TLS}) mit einer Auflösung von 1 × 1 m prozessiert. Diese werden für den Vergleich mit den CRNS-Daten gewichtet gemittelt. In die Gewichtungsfunktion nach Köhli et al. (2015) geht der Abstand zur AWS, die aktuelle Luftfeuchte und die Feuchte der Oberfläche ein. Für schneebedeckte

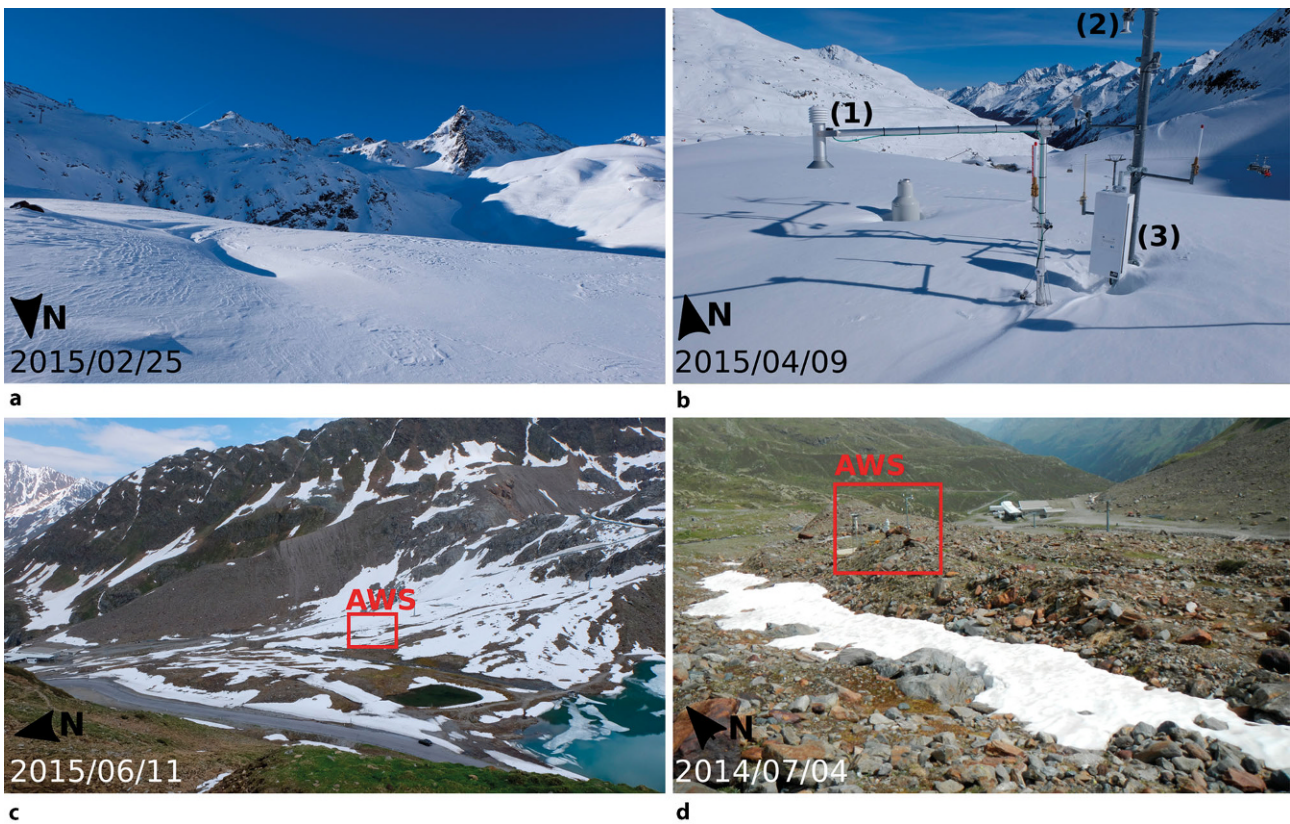


Abb. 2 Das im Detail untersuchte Gebiet um die automatische Wetterstation (AWS) Weißsee: **a** Blick von der Station Richtung Südwesten im Hochwinter, **b** AWS während der höchsten Schneekakkumulation im April 2015. Die beiden Schneehöhensensoren sind mit (1) für den Schneehöhensensor SPA und (2) für den Schneehöhensensor Ost markiert, der Cosmic-Ray Neutron Sensor mit (3), **c**, **d** typische Ausaperungsmuster während der Schneeschmelze. (Schattan et al. 2017a)

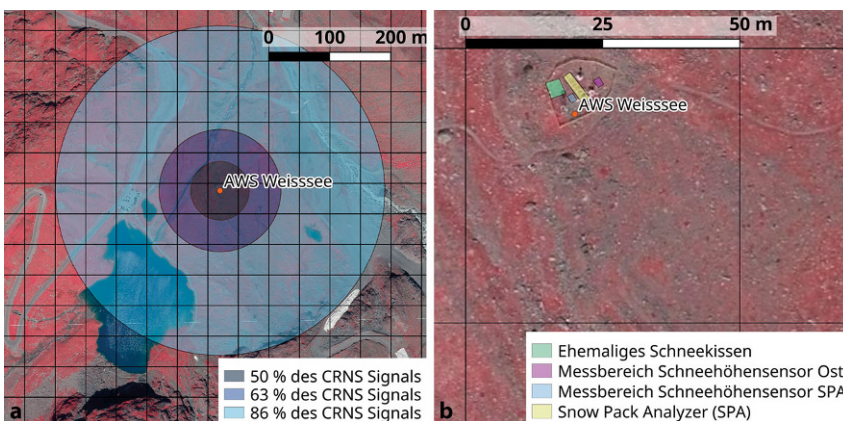


Abb. 3 Messbereiche von (a) Cosmic Ray Neutron Sensing (CRNS) und (b) konventionellen Messinstrumenten an der Automatischen Wetterstation (AWS) Weißsee im Vergleich zur Modellauflösung von 50 × 50 m (Gitternetz)

Flächen wurde 99 % Feuchte eingesetzt, für schneefreie Flächen 20 %. Für Zellen mit schmelzendem Schnee gilt eine Limitierung des SWE mit 200 mm, die für den zusätzlichen Effekt aperer Flächen während der Schneeschmelze empirisch korrigiert (Schattan et al. 2017a).

An diesen Daten wird die folgende Funktion zur Berechnung des CRNS basierten SWE (SWE_{CRNS}) aus der aktuellen Neutronenzählrate N [Neutronen pro Stunde] nach Desilets et al. (2010) mit den dimensionslosen Parametern a_0 , a_1 , a_2 und der Neutronenzählrate bei

trockenen Bedingungen N_0 [Neutronen pro Stunde] gefittet:

$$SWE_{CRNS}(N) = \frac{a_0}{\left(\frac{N}{N_0}\right) - a_1} - a_2 \quad (2)$$

Die empirisch ermittelte Parametrisierung von Gl. 2 wird im Anschluss zur Berechnung von SWE_{CRNS} [mm] verwendet. Bezüglich weitergehender Details zur Messkampagne und der Prozessierung der CRNS- und TLS-Daten wird auf Schattan et al. (2017a) verwiesen.

3.2 Kalibrierung eines Schneemodells unter Berücksichtigung unterschiedlicher Schneemessungen

Im Rahmen eines Kalibrierexperimentes wird im Anschluss der Mehrwert der SWE_{CRNS} -Zeitreihe untersucht. Darin wird die Schneedecke mit dem vollverteilten, Energiebilanz-basierten schneehydrologischen Modell SES (Asztalos 2004; Asztalos et al. 2007) simu-

liert. Dieses rechnet auf einem Raster mit einer Auflösung von $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ und ist mit dem halbverteilten hydrologischen Modell HQsim (Kleindienst 1996; Achleitner et al. 2012) gekoppelt, dessen Module zur Berechnung des Bodenwasserhaushalts und der Abflusskonzentration genutzt werden (Schattan et al. 2017b). Der Modellantrieb basiert auf den Analysedaten des flächigen INCA-Produktes der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis; Haiden et al. 2011). Die Interpolation dieser Daten auf die Modellauflösung sowie weitere Informationen zum Modellaufbau sind in Schattan et al. (2017b) beschrieben. Das Setup des Kalibrierexperiments besteht aus einer einjährigen Einschwingphase (Oktober 2012 bis September 2013), einem zweijährigen Kalibrierzeitraum (Oktober 2013 bis September 2015) und einem anschließenden einjährigen Validierungszeitraum (Oktober 2015 bis September 2016). Die Initialisierung der Modellspeicher zu Beginn der Einschwingphase erfolgt mit einem a priori parametrisierten Modelllauf (ohne Parametervariation) von Oktober 2003 bis September 2012.

Für die Kalibrierung und die Validierung des Modells stehen folgende Datensätze zur Verfügung:

- Durchgehende Abflussmessung am Gebietsauslass in stündlicher Auflösung
- SWE_{SPA} : Kontinuierliche SWE Messung im Zeitraum 10/2014–09/2016 (in stündliche Auflösung)
- SWE_{CRNS} : Kontinuierliche SWE Messung im Zeitraum 03/2014–06/2014 und 10/2014–06/2016 (in 12 h Auflösung)

- Multitemporale binäre, aus Landsat-8 und Sentinel-2A Szenen abgeleitete, Schneebedeckungskarten: 16 Karten im Kalibrierzeitraum und 5 Karten im Validierungszeitraum
- Multitemporale SWE-Karten (SWE_{TLS}): 11 Zeitpunkte im Kalibrierzeitraum und 6 im Zeitpunkte Validierungszeitraum

Die multi-kriterielle Kalibrierung des Modells basiert konzeptionell auf der von Sturm (2015) skizzierten Kombination von schneehydrologischer Modellierung mit Fernerkundungsdaten und in-situ Beobachtungen. Als Fernerkundungsdaten werden die binären, auf die Modellauflösung aggregierten, Schneebedeckungskarten verwendet und mit einer kontinuierlichen in-situ SWE-Zeitreihe entweder basierend dem SnowPackAnalyzer (SWE_{SPA}) oder auf CRNS (SWE_{CRNS}) kombiniert. Zusätzlich wird noch die Abflussmessung am Gebietsauslass verwendet, da sie die Summe aller hydrologisch relevanter Systemzustandsänderungen abbildet.

Die Güte der Simulation bezüglich der einzelnen Aspekte wird jeweils mithilfe eines Gütemaßes bewertet. Die Abflusszeitreihen aus Messung und Simulation werden mit dem Kling-Gupta Efficiency (KGE; Kling et al. 2012) bewertet (KGE_Q). Dieses kombiniert das Bestimmtheitsmaß R^2 mit dem Verhältnis der Variationskoeffizienten und einem Verhältnis der Volumenabweichung. Diese drei Teilaspekte werden zu einem Gesamtgütemaß kombiniert, das durch die schlechteste Teilbewertung dominiert wird. Um die Schneebedeckung zu bewerten wurde aus den Modellsimulationen eine binäre Schneebedeckungskarte ermittelt, wobei Gitter-

zellen mit weniger als 5 mm SWE als schneefrei gewertet wurden. Als Gütemaß dient die Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Schneebedeckung (Accuracy, ACC) nach Zappa et al. 2003. Für die Bewertung der simulierten Schneewasserwerte wird wiederum das Gütemaß KGE verwendet (KGE_{SWE}). Im Fall der konventionellen SWE-Messung (SWE_{SPA}) wird diese mit der Simulationszeitreihe der Gitterzelle, in der die AWS liegt, verglichen. Für den Vergleich von CRNS basiertem SWE werden die simulierten SWE Werte der Rasterpunkte analog zu den Laserscan basierten SWE-Karten gewichtet (vgl. Abschn. 3.1).

Die als Zielfunktion verwendete Gesamtmodelleffizienz E kombiniert die Güte der Abflussdaten, der Schneebedeckungsmuster und der in-situ SWE-Daten:

$$E_i = 1 - \sqrt{(1 - \text{KGE}_Q)^2 + (1 - \text{ACC})^2 + (1 - \text{KGE}_{\text{SWE}_i})^2} \quad (3)$$

Der Index i weist dabei auf die verwendete in-situ SWE-Zeitreihe hin, wobei 1 für die konventionelle SWE-Messung und 2 für die CRNS basierte SWE-Messung steht. Die Zielfunktion orientiert sich dabei am KGE-Gütemaß (Kling et al. 2012; Gupta et al. 2009). Die kombinierte Bewertung ist in dieser Formulierung somit durch das schlechteste einzelne Gütemaß dominiert. Zur Bestimmung der Modellparameter wird ein globaler Optimierungsalgorithmus (Simulated Annealing; Kirkpatrick et al. 1983; Andrieu et al. 2003) genutzt. Hierfür werden zwei separate Optimierungen mit jeweils 2000 Einzelrealisierungen durchgeführt, wobei E_1 bzw. E_2 als Zielfunktion dient.

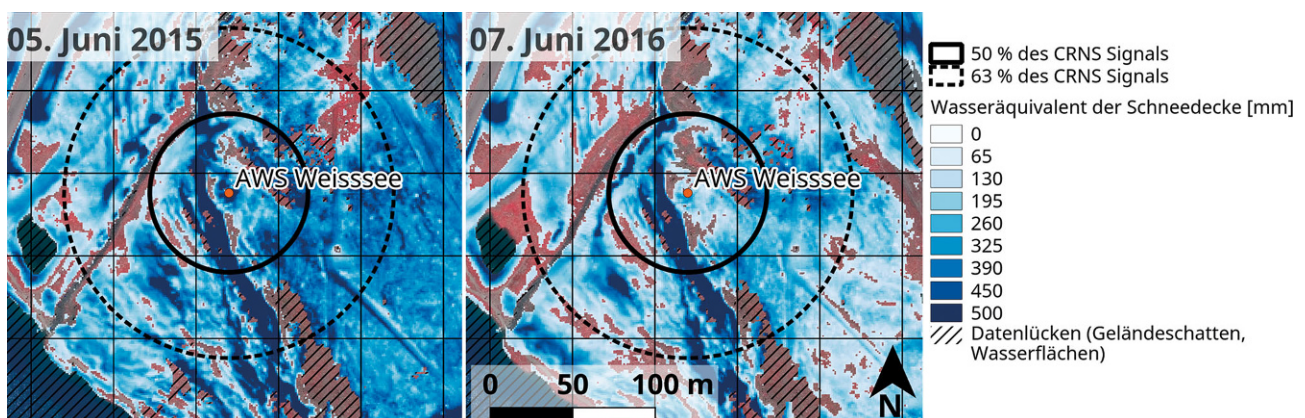


Abb. 4 SWE-Karten während der Schneeschmelze am 05. Juni 2015 und am 07. Juni 2016 im Vergleich zum Messbereich des Cosmic-Ray Neutron Sensors (CRNS) und im Vergleich zur Modellauflösung von $50 \times 50\text{ m}$

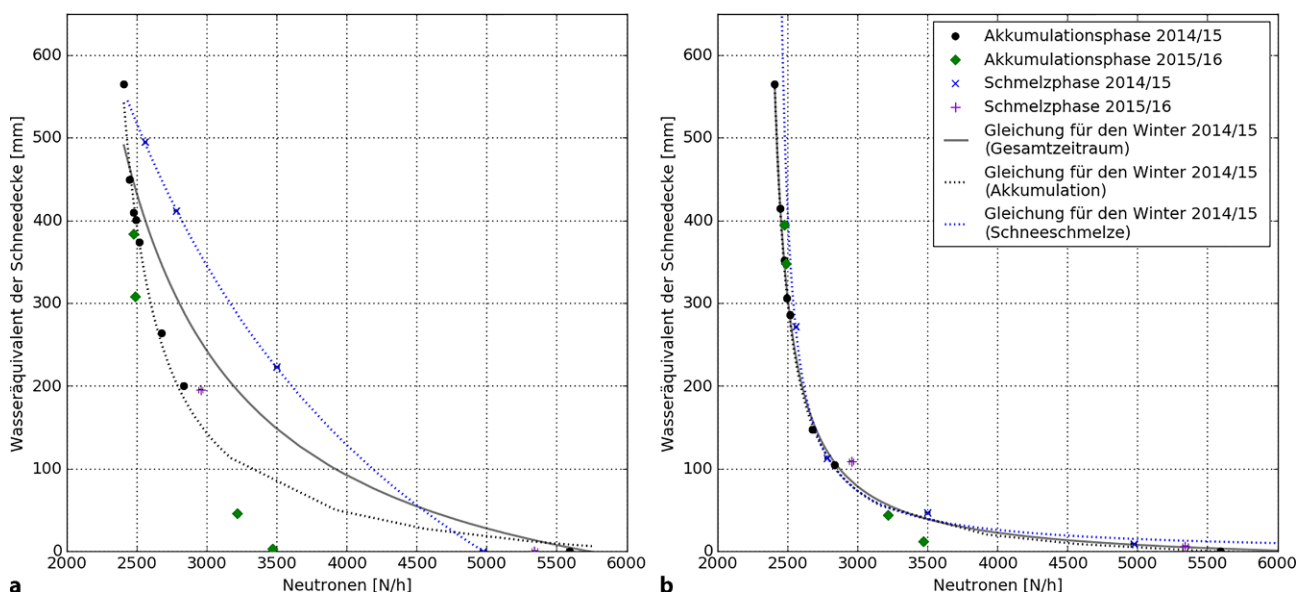


Abb. 5 Scatterplot der Neutronenzählraten zu (a) den konventionellen SWE-Messungen und (b) Laserscan basierten, gewichteten SWE-Werten inklusive aller Korrekturen. (Verändert nach Schattan et al. 2017a)

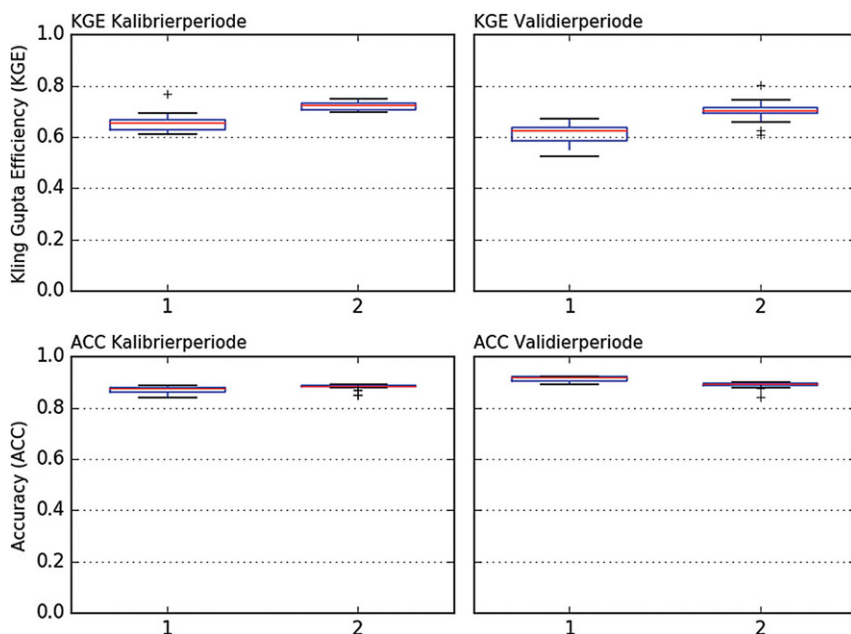


Abb. 6 Gegenüberstellung der Gütemaße KGE und ACC der 20 besten Simulationsläufe bei Verwendung von (1) SWE Punktskale und (2) SWE basierend auf CRNS Messung in der Kalibrierung. (Verändert nach Schattan et al. 2017b)

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ergebnisse der Messkampagne am Weißsee

Der gesamte Zeitraum der Messkampagne am Weißsee (März 2014 bis Juni 2016) deckt Teile der Wintersaison 2013/14 und die gesamten Wintersaisonen 2014/15 und 2015/16 ab. In die-

sem Zeitraum konnten teils wiederkehrende Muster der Schneebedeckung, teils aber auch große Unterschiede beobachtet werden. Abb. 4 zeigt exemplarisch die SWE-Verteilung während der Schmelzsaison im Winter 2014/15, aufgenommen am 05. Juni 2015, und im darauffolgenden Winter 2015/16, aufgenommen am 07. Juni 2016. Ein wiederkehrendes Muster ist beispiels-

weise, dass sich in einer Rinne westlich der AWS Weißsee, unabhängig von der vorherrschenden Windrichtung, mehr Schnee akkumuliert als in der Umgebung. Andere SWE-Muster treten dagegen nur in einem von beiden Jahren auf. So zählt die unmittelbare Umgebung der AWS im Jahr 2015 zu den Teilflächen mit den höchsten SWE-Werten, während sich die SWE-Werte im Jahr 2016 im Mittelfeld bewegen. Auch weist die östliche Hälfte des Kartenausschnittes im Jahr 2015 insgesamt mehr SWE auf als die westliche. Im Jahr 2016 weist der südöstliche Bereich bereits sehr geringe Schneemengen auf, der äußerste östliche Rand des Ausschnittes ist sogar bereits aper. Dies kann mit durch jeweils unterschiedliche dominante Windrichtungen bedingten Schneeverteilungsregimen erklärt werden.

Insgesamt bewirken diese Unterschiede, dass es kein stabiles Verhältnis zwischen der konventionellen SWE-Messung am Standort der AWS (SWE_{SPA}) und der dazugehörigen Gridzelle gibt. Dies wird auch im Vergleich zwischen CRNS-Neutronenzählraten und SWE-Messungen deutlich. In Abb. 5 werden Parametrisierungen der nicht-linearen Gl. 4 zur Berechnung von SWE_{CRNS} aus der Neutronenzählrate dargestellt. Als Grundlage hierfür dienen (i) verschiedene Zeiträume der Wintersaison 2015/16 (nur Akkumulationsphase, nur Schmelzphase, gesamte Wintersai-

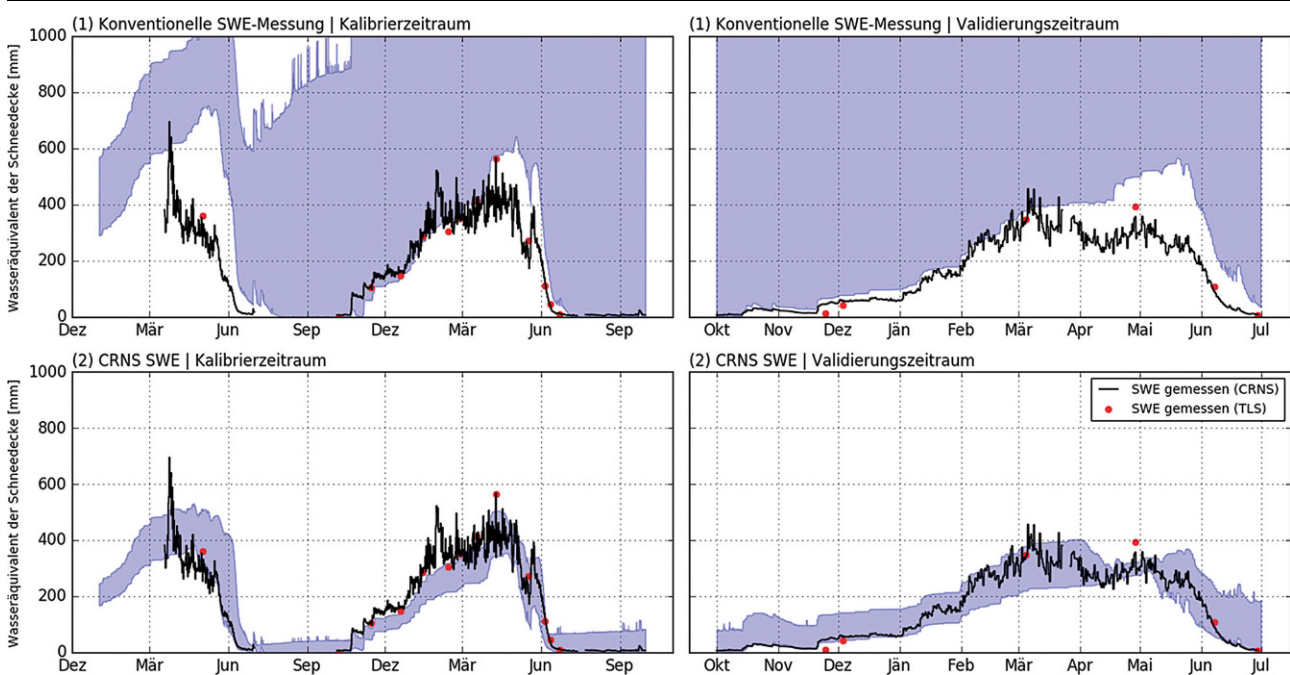


Abb. 7 Gegenüberstellung der zeitlichen Entwicklung des Schneewasserwerts bei Verwendung von (1) SWE Punktskale und (2) SWE basierend auf CRNS Messung in der Kalibrierung. Die dunkelviolette Fläche stellt die Bandbreite der 20 besten Simulationsläufe dar. (Verändert nach Schattan et al. 2017b)

son) und (ii) verschiedene SWE-Datenquellen (SWE_{SPA}, gewichtetes SWE_{TLS}). Das Verhältnis zwischen CRNS-Neutronenzählraten und den konventionellen SWE-Messungen mittels SnowPack-Analyser ist zeitlich nicht stabil (Abb. 5a). Die Gleichungen für die gesamte Wintersaison 2014/15 unterscheiden sich deutlich von den Gleichungen für die Schneeakkumulations- und Schneeschmelzphase. Auch die Messungen in der darauffolgenden Saison 2015/16 weichen teils deutlich von den mit den Daten des Vorjahres ermittelten Gleichungen ab. Vergleicht man dagegen die Neutronenzählraten mit den gewichteten TLS Daten inklusive aller Korrekturen zeigt sich eine sehr gute zeitliche Übertragbarkeit (Abb. 5b). Sowohl einzelne Gleichungen für die Wintersaison 2014/15 als auch die Datenpunkte der Wintersaison 2015/16 liegen nahe beieinander.

Die anhand der Laserscan basierten Daten der gesamten Wintersaison 2014/15 ermittelte Gl. 4 wird in der Folge für die Umrechnung von Neutronenzählraten in SWE_{CRNS} verwendet.

$$\text{SWE}_{\text{CRNS}}(N) = \frac{12.571}{\left(\frac{N}{5307.466}\right) - 0,432} - 16.194 \quad (4)$$

4.2 Mehrwert des Cosmic Ray Neutron Sensors für die Modellkalibrierung

Um einen Unsicherheitsbereich in der Modellierung abzubilden werden aus den beiden in Abschn. 3.2 beschriebenen, nach E₁ (SWE_{SPA} als in-situ Daten) bzw. E₂ (SWE_{CRNS} als in-situ Daten) optimierten Varianten die jeweils 20 besten Simulationsläufe (gemäß Zielfunktion E_j in der Kalibrierperiode) ausgewertet. Beide Varianten zeigen in den 20 besten Läufen zufriedenstellende Bewertungen sowohl in der Abflussmodellierung als auch in der Schneebedeckung. Die Variante E₂ (SWE_{CRNS}) weist dabei eine verbesserte Güte des simulierten Gebietsabflusses auf (Abb. 6).

Ob die verbesserte Kalibriergüte jedoch zufällig ist oder aus gutem physikalischem Grund besser ist, lässt sich durch die Analyse der Schneedeckenentwicklung feststellen. In Abb. 7 sind die zeitlichen Entwicklungen von gemessenen SWE Werten aus TLS Messungen während der Messkampagnen sowie kontinuierliche SWE Messung aus CRNS Messung mit den gleichen Simulationsdaten gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Simulationen basierend auf SWE-CRNS Daten (Variante 2) einen engen Unsicherheitsbereich in der Kalibrierung haben. Die besten Modellläufe geben nicht nur Abfluss und

Schneeausdehnung gut wieder, sondern bilden auch den zeitlichen Verlauf des Schneewasserwerts am Standort Weißsee gut ab. Dies gilt für die Kalibrier- und Validierungsperiode gleichermaßen. Im Unterschied dazu zeigt die Kalibrierung basierend auf Punktmesswerten des SWE (Variante 1) deutlich größere Unsicherheitsbandbreiten über den gesamten Zeitraum. Es kommt durchwegs zu einer Überschätzung bei der Simulation des SWE, speziell in der Saison 2014/15. Zur großen Überschätzung kommt, dass auch eine große Bandbreite gegeben ist. Insgesamt scheinen die auch hier gut simulierten Abflüsse nicht auf korrekt abgebildeten physikalischen Prozessen und Modellzuständen zu basieren. Es kommt modellintern zu einer Kompensation durch andere Parameter und Modellteile.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Messkampagne am Weißsee zeigt, dass CRNS auch in hochalpinen Regionen eine robuste Methode zur Messung des SWE darstellt. Der Messbereich hat dabei einen Radius von etwa 230 bis 270 Metern (Schattan et al. 2017a). Dies erlaubt einen direkten Vergleich von in-situ SWE-Messungen und schneehydrologischen Simulationsergebnissen.

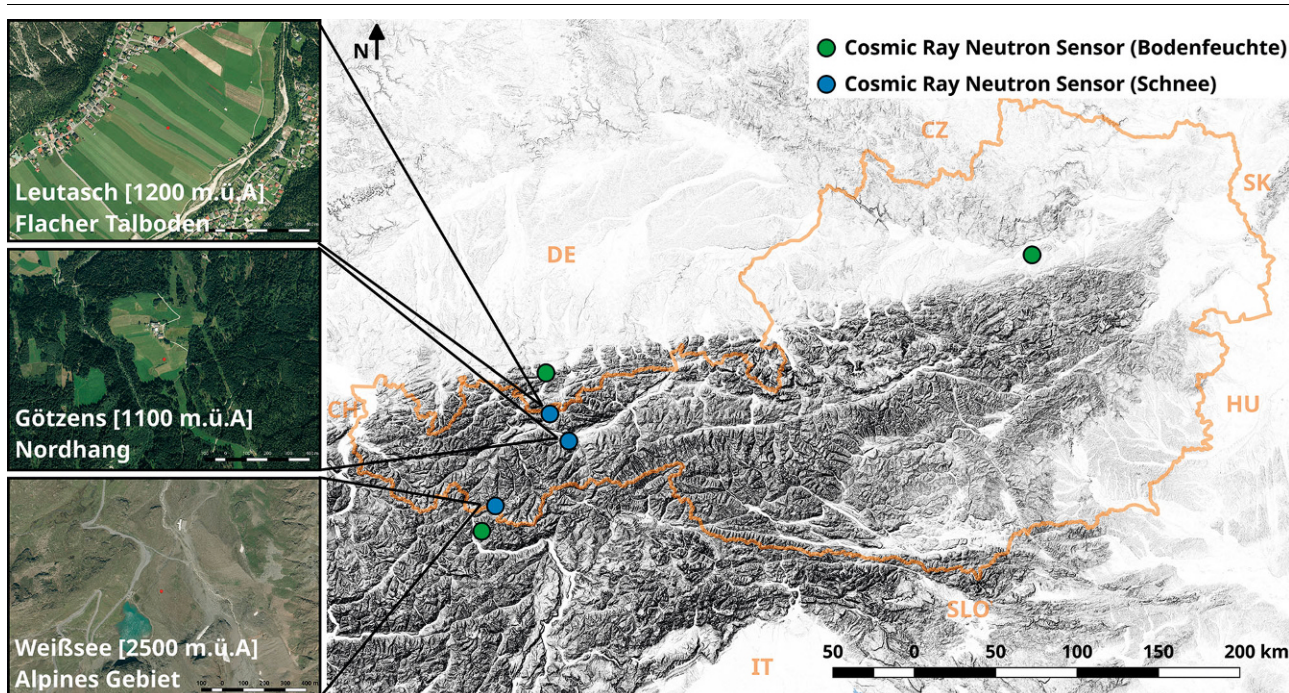


Abb. 8 Übersicht über die geplanten Messstellen Leutasch, Götzens und Weißsee

Die Kombination von physikalisch basierten (Schnee-)modellen mit Fernerkundungsdaten und in-situ Messungen zeigt darüber hinaus großes Potential. Die Resultate zeigen, dass die Wahl der Messdaten auf deren Basis die Kalibrierung erfolgt, einen deutlichen Einfluss auf die Parametrisierung hat. Die Berücksichtigung der SWE-Messung mittels CRNS führt zu besseren Simulationsergebnissen durch eine physikalisch plausible Berücksichtigung der Teilprozesse. Durch den ausbleibenden Skalensprung zwischen in-situ Messung und Simulation wird die Unsicherheitsbandbreite der resultierenden Parametrisierungen geringer. Im Gegensatz dazu führt die Verwendung konventioneller SWE-Messmethoden mit kleinem Messbereich und ausgeprägtem Skalensprung zwar auch zu guten Abflussimulationen, hat allerdings physikalisch unplausible interne Prozessabbildungen zur Folge.

Die vorgestellten Untersuchungen beschränken sich auf einen CRNS Standort. Die Übertragbarkeit der Parameter der Gl. 4 auf andere Standorte ist Gegenstand aktueller Forschung. Neben Neutronensimulationen wird daher aktuell der Standort Weißsee sowie zwei weitere Standorte (Leutasch und Götzens) mit weiteren CRNS ausgerüstet (siehe Abb. 8). Neben der Fortsetzung der bisherigen Zeitreihe

am Weißsee kommen an allen drei Standorten CRNS mit einer höheren Sensitivität zum Einsatz. Zudem ist ergänzend der Einsatz eines auf Gammaskopie basierenden SWE-Sensors geplant. Die drei Standorte, an denen der Zusammenhang zwischen CRNS-Messung und SWE im Fokus steht, unterscheiden sich hinsichtlich Höhenlage, Vegetationsbedeckung und kleinräumiger Topographie im Messbereich. Der Standort Leutasch ist für die Erfassung einer weitgehend homogenen Schneedecke im flachen Terrain vorgesehen. Trotz der vergleichsweise tiefen Höhenlage sind im Gebiet Leutasch große Schneemengen möglich, wodurch eine große Bandbreite an möglichen SWE-Werten abgedeckt werden kann. Der Standort Götzens ist der am tiefsten gelegene Standort mit einem heterogenen Umfeld, flankiert von Schipiste und Waldflächen. Weiters steht eine Anlage zur Messung von Bodenfeuchte und Abflussbildung auf der Plotskala zur Verfügung.

Danksagung Wir bedanken uns bei der Universität Potsdam für die Bereitstellung des durch EFRE-HIP-Brandenburg no. 80158356 geförderten CRNS. Ebenso danken wir der NMDB Datenbank (www.nmdb.eu), gefördert im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Union (Vertragsnum-

mer 213007) und der Universität Bern für die Bereitstellung von Neutronenmonitordaten. Im Rahmen der Studie wurden Umweltdaten der folgenden Institutionen genutzt: Hydrographischer Dienst des Landes Tirol, TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG, European Environmental Agency (EEA), European Space Agency (ESA) und United States Geological Survey (USGS). Besonders möchten wir uns auch bei Sebastian Sprenger (Masterarbeit an der Universität Innsbruck) bedanken, der uns während der Feldarbeit im Winter 2014/15 unterstützte.

Förderung Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „W02 HoPI III—Runoff Forecasting System for the Inn River“ am alpS—Centre for Climate Change Adaptation in Innsbruck, Österreich, durchgeführt. Das K1-Zentrum alpS wurde im Rahmen des COMET-Programms durch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF) und die Bundesländer Tirol und Vorarlberg finanziert. COMET-Programm wird durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt. Das Projekt wurde durch die TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG. G kofinanziert. Die Anschaffung der geplanten Messgeräte an

den Standorten Leutasch, Götzens und Weißsee erfolgt im Rahmen der durch die Universität Innsbruck dem Arbeitsbereich für Wasserbau bereitgestellten Forschungsinfrastrukturmittel (Projekt „moosbeere—Moisture observations based on an intermediate scale sensor network“). G. Baroni wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützt (CI 26/13-1 in the framework of the research unit FOR 2131 „Data Assimilation for Improved Characterization of Fluxes across Compartmental Interfaces“).

Funding Open access funding provided by University of Innsbruck and Medical University of Innsbruck.

Interessenkonflikt

P. Schattan, G. Baroni, S. Oswald, C. Fey, J. Schöber und S. Achleitner geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. ■

Literatur

- Achleitner, S., Schöber, J., Rinderer, M., Leonhardt, G., Schöberl, F., Kirnbauer, R., Schönlaub, H. (2012): Analyzing the operational performance of the hydrological models in an alpine flood forecasting system. *Journal of Hydrology* 412–413: 90–100 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.047>
- Adams, M. S., Bühler, Y., Fromm, R. (2017): Multitemporal Accuracy and Precision Assessment of Unmanned Aerial System Photogrammetry for Slope-Scale Snow Depth Maps in Alpine Terrain. *Pure and Applied Geophysics*, München: online first: 10.1007/s00024-017-1748-y
- Andrieu, C., De Freitas, N., Doucet, A., Jordan, M. I. 2003. An introduction to MCMC for machine learning. *Machine Learning* 50 (1–2): 5–43 <https://doi.org/10.1023/A:1020281327116>
- Asztalos, J. (2004): Ein Schnee- und Eisschmelzmodell für vergletscherte Einzugsgebiete Available at: http://www.hydro.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-hydro/Diverse/Institutsseminar/DA_judit_041013-Abstr.pdf [Accessed 3 April 2013]
- Asztalos, J., Kirnbauer, R., Escher-Vetter, H., Braun, L. (2007): A distributed energy balance snow and glacier melt model as a component of a flood forecasting system for the Inn river. Nationalparkverwaltung Berchtesgaden: Berchtesgaden.
- Avanzi, F., De Michele, C., Morin, S., Carmagnola, C. M., Ghezzi, A., Lejeune, Y. (2016): Model complexity and data requirements in snow hydrology: seeking a balance in practical applications. *Hydrological Processes* 30 (13): 2106–2118 <https://doi.org/10.1002/hyp.10782>
- Baatz, R., Hendricks Franssen, H.-J., Han, X., Hoar, T., Bogena, H. R., Vereecken, H. (2017): Evaluation of a cosmic-ray neutron sensor network for improved land surface model prediction. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(5), 2509–2530. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2509-2017>
- Berezowski, T., Chormański, J., Batelaan, O. (2015): Skill of remote sensing snow products for distributed runoff prediction. *Journal of Hydrology* 524: 718–732 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.025>
- Beven, K. (2012): *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Second Edition. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Second Edition. Oxford: Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781119951001>
- Bühler, Y., Adams, M. S., Stoffel, A., Boesch, R. (2017): Photogrammetric reconstruction of homogenous snow surfaces in alpine terrain applying near-infrared UAS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, (38): 8–10.
- Choquette, Y., Ducharme, P., Rogoza, J. (2013): CS725, An Accurate Sensor for the Snow Water Equivalent and Soil Moisture Measurements. *International Snow Science Workshop Grenoble—Chamonix Mont-Blanc—October 07-11, 2013*: 931–936
- Clifford, D. (2010): Global estimates of snow water equivalent from passive microwave instruments: history, challenges and future developments. *International Journal of Remote Sensing*, 31(14), 3707–3726. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.483482>
- Deems, J. S., Painter, T. H., Finnegan, D. C. (2013): Lidar measurement of snow depth: a review. *Journal of Glaciology* 59 (215): 467–479 <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J154>
- Desilets, D., Zreda, M., Ferré, T. P. A. (2010): Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resources Research* 46 (11): n/a–n/a <https://doi.org/10.1029/2009WR008726>
- Dietz, A. J., Kuenzer, C., Gessner, U., Dech, S. (2012): Remote sensing of snow – a review of available methods. *International Journal of Remote Sensing*, 33(13), 4094–4134. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.640964>
- Dozier, J. (1989): Estimation of properties of alpine snow from landsat thematic mapper. *Advances in Space Research* 9 (1): 207–215 [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(89\)90487-0](https://doi.org/10.1016/0273-1177(89)90487-0)
- Efstratiadis, A., Koutsoyiannis, D. (2010): One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 55(1), 58–78. <https://doi.org/10.1080/02626660903526292>
- Essery, R., Morin, S., Lejeune, Y., B., Ménard, C. (2013): A comparison of 1701 snow models using observations from an alpine site. *Advances in Water Resources* 55: 131–148 <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.07.013>
- Finger, D., Pellicciotti, F., Konz, M., Rimkus, S., Burlando, P. (2011): The value of glacier mass balance, satellite snow cover images, and hourly discharge for improving the performance of a physically based distributed hydrological model. *Water Resources Research* 47 (7): n/a–n/a <https://doi.org/10.1029/2010WR009824>
- Finger, D., Vis, M., Huss, M., Seibert, J. (2015): The value of multiple data set calibration versus model complexity for improving the performance of hydrological models in mountain catchments. *Water Resources Research* 51 (4): 1939–1958 <https://doi.org/10.1002/2014WR015712>
- Goodison, B. E., Glynn, J. E., Harvey, K. D., Slater, J. E. (1987): Snow Surveying in Canada: A Perspective. *Canadian Water Resources Journal* 12 (2): 27–42
- Grünewald, T., Lehning, M. (2015): Are flat-field snow depth measurements representative? A comparison of selected index sites with areal snow depth measurements at the small catchment scale. *Hydrological Processes* 29 (7): 1717–1728 <https://doi.org/10.1002/hyp.10295>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., Martinez, G. F. (2009): Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377 (1–2): 80–91 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Haiden, T., Kann, A., Wittmann, C., Pistotnik, G., Bica, B., Gruber, C. (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. *Weather and Forecasting* 26 (2): 166–183 <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222451.1>
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E., Bayr, K. J. (2002): MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment* 83 (1): 181–194 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000950> [Accessed 10 September 2013]
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P. (1983): Optimization by simulated annealing. *Science* 220 (4598): 671–80 <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Kirnbauer, R., Blöschl, G., Gutknecht, D. (1994): Entering the Era of Distributed Snow Models. *Nordic Hydrology* 25 (May 1993): 1–24 <https://doi.org/10.2166/nh.1994.001>
- Kleindienst, H. (1996): Erweiterung und Erprobung eines anwendungsorientierten hydrologischen Modells zur Gangliniensimulation in kleinen Wildbacheinzugsgebiet. Ludwig Maximilian University of Munich.
- Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M. (2012): Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 424–425: 264–277 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
- Köhli, M., Schrön, M., Zreda, M., Schmidt, U., Dietrich, P., Zacharias, S. (2015): Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. *Water Resources Research* 51 (7): 5772–5790 <https://doi.org/10.1002/2015WR017169>
- Köhli, M., Schrön, M., & Schmidt, U. (2018, eingereicht bei Nuclear Instruments and Methods A): Response Functions for Detectors in Cosmic Ray Neutron Sensing. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/1801.07997.pdf>. Zugegriffen: 23.05.2018
- Liang, T., Zhang, X., Xie, H., Wu, C., Feng, Q., Huang, X., Chen, Q. (2008): Toward improved daily snow cover mapping with advanced combination of MODIS and AMSR-E measurements. *Remote Sensing of Environment*, 112(10),

- 3750–3761. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.05.010>
- Magnusson, J., Gustafsson, D., Hüsler, F., Jonas, T. (2014):** Assimilation of point SWE data into a distributed snow cover model comparing two contrasting methods. *Water* 50: 7816–7835 <https://doi.org/10.1002/2014WR015302>. Received
- Nagler, T., Rott, H. (2000):** Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38 (2): 754–765 <https://doi.org/10.1109/36.842004>
- Nagler, T., Rott, H., Ripper, E., Bippus, G., Hetzenecker, M. (2016):** Advancements for Snowmelt Monitoring by Means of Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing* 8 (4): 348 <https://doi.org/10.3390/rs8040348>
- Nolin, A. W. (2010):** Recent advances in remote sensing of seasonal snow. *Journal of Glaciology* 56 (200): 1141–1150 <https://doi.org/10.3189/002214311796406077>
- Pettinato, S., Santi, E., Brogioni, M., Paloscia, S., Palchetti, E., Xiong, C. (2013):** The Potential of COSMO-SkyMed SAR Images in Monitoring Snow Cover Characteristics. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 10 (1): 9–13 <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2189752>
- Proksch, M., Rutter, N., Fierz, C., Schneebeli, M. (2016):** Intercomparison of snow density measurements: bias, precision, and vertical resolution. *The Cryosphere* 10 (1): 371–384 <https://doi.org/10.5194/tc-10-371-2016>
- Rasmussen, R., Baker, B., Kochendorfer, J., Meyers, T., Landolt, S., Fischer, A. P., ... Gutmann, E. (2012):** How Well Are We Measuring Snow: The NOAA/FAA/NCAR Winter Precipitation Test Bed. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(6), 811–829. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00052.1>
- Reuelto, J., Vionnet, V., López-Moreno, J.-I., Lafayesse, M., Morin, S. (2016):** Combining snowpack modeling and terrestrial laser scanner observations improves the simulation of small scale snow dynamics. *Journal of Hydrology* 533: 291–307 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.015>
- Rittger, K., Bair, E. H., Kahl, A., Dozier, J. (2016):** Spatial estimates of snow water equivalent from reconstruction. *Advances in Water Resources* 94: 345–363 <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.015>
- Rivera Villarreyes, C. A., Baroni, G., Oswald, S. E. (2014):** Inverse modelling of cosmic-ray soil moisture for field-scale soil hydraulic parameters. *European Journal of Soil Science*, 65(6), 876–886. <https://doi.org/10.1111/ejss.12162>
- Rondeau-Genesse, G., Trudel, M., Leconte, R. (2016):** Monitoring snow wetness in an Alpine Basin using combined C-band SAR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 183: 304–317 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.06.003>
- Rott, H., Nagler, T., Scheiber, R. (2004):** Snow mass retrieval by means of sar interferometry. In *Proceedings of FRINGE 2003 Workshop*, Frascati, Italy, 1-5 December 2003 (pp. 187–192). European Space Agency, (Special Publication) ESA SP. Retrieved from http://earth.esa.int/workshops/fringe03/proceedings/papers/46_rott.pdf. Zugegriffen: 23.01.2014
- Schattan, P., Baroni, G., Oswald, S. E., Schöber, J., Fey, C., Kormann, C., Huttenlau, M., Achleitner, S. (2017a):** Continuous monitoring of snowpack dynamics in alpine terrain by above-ground neutron sensing. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2016WR020234>
- Schattan, P., Baroni, G., Oswald, S. E., Schöber, J., Fey, C., Francke, T., Huttenlau, M., Kirnbauer, R., Achleitner, S. (2017b):** Combining an Improved Snow Model With Above-Ground Neutron Sensing and Remote Sensing. In *Proceedings of the 37th IAHR World Congress August 13–18, 2017, Kuala Lumpur, Malaysia* (4937–4944).
- Schöber, J., Achleitner, S., Kirnbauer, R., Schöberl, F., Schönlaub, H. (2010):** Hydrological modelling of glacierized catchments focusing on the validation of simulated snow patterns—applications within the flood forecasting system of the Tyrolean river Inn. *Advances in Geosciences* 27: 99–109 <https://doi.org/10.5194/adgeo-27-99-2010>
- Schöber, J., Schneider, K., Helfricht, K., Schattan, P., Achleitner, S., Schöberl, F., Kirnbauer, R. (2014):** Snow cover characteristics in a glacierized catchment in the Tyrolean Alps—Improved spatially distributed modelling by usage of Lidar data. *Journal of Hydrology* 519: 3492–3510 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.054>
- Shrestha, M., Wang, L., Koike, T., Tsutsui, H., Xue, Y., Hirabayashi, Y. (2014):** Correcting basin-scale snowfall in a mountainous basin using a distributed snowmelt model and remote-sensing data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18 (2): 747–761 <https://doi.org/10.5194/hess-18-747-2014>
- Sigouin, M. J. P., Si, B. C. (2016):** Calibration of a non-invasive cosmic-ray probe for wide area snow water equivalent measurement. *The Cryosphere* 10 (3): 1181–1190 <https://doi.org/10.5194/tc-10-1181-2016>
- Slater, A. G., Clark, M. P. (2006):** Snow Data Assimilation via an Ensemble Kalman Filter. *Journal of Hydrometeorology* 7 (3): 478–493 <https://doi.org/10.1175/JHM505.1>
- Smith, C. D., Kontu, A., Laffin, R., & Pomeroy, J. W. (2017):** An assessment of two automated snow water equivalent instruments during the WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment. *The Cryosphere*, 11(1), 101–116. <https://doi.org/10.5194/tc-11-101-2017>
- Stähli, M., Stacheder, M., Gustafsson, D., Schlaeger, S., Schneebeli, M., Brandelik, A. (2004):** A new in situ sensor for large-scale snow-cover monitoring. *Annals of Glaciology* 38 (1): 273–278 <https://doi.org/10.3189/172756404781814933>
- Sturm, M. (2015):** White water: fifty years of snow research in WRR and the outlook for the future. *Water Resources Research* 51: 4948–4965 <https://doi.org/10.1002/2015WR017242>. Received
- Thirel, G., Salamon, P., Burek, P., Kalas, M. (2013):** Assimilation of MODIS snow cover area data in a distributed hydrological model using the particle filter. *Remote Sensing* 5: 5825–5850 <https://doi.org/10.3390/rs5115825>
- Verbunt, M., Gurtz, J., Jasper, K., Lang, H., Warmerdam, P., Zappa, M. (2003):** The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *Journal of Hydrology* 282 (1–4): 36–55 [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00251-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00251-8)
- Viviroli, D., Dürri, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., Weingartner, R. (2007):** Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research* 43 (7): n/a-n/a <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>
- Winstral, A., Marks, D. (2014):** Long-term snow distribution observations in a mountain catchment: Assessing variability, time stability, and the representativeness of an index site. *Water Resources Research* 50 (1): 293–305 <https://doi.org/10.1002/2012WR013038>
- Zappa, M., Pos, E., Strasser, U., Warmerdam, P., Gurtz, J. (2003):** Seasonal water balance of an Alpine catchment as evaluated by different methods for spatially distributed snowmelt modelling. *Nordic Hydrology* 34 (3): 179–202 Available at: //000184041700003
- Zreda, M., Desilets, D., Ferré, T. P. A., & Scott, R. L. (2008):** Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophysical Research Letters*, 35(21), L21402. <https://doi.org/10.1029/2008GL035655>
- Zreda, M., Shuttleworth, W. J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., & Rosolem, R. (2012):** COSMOS: the Cosmic-ray Soil Moisture Observing System. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 4079–4099. <https://doi.org/10.5194/hess-16-4079-2012>