

VALIDIERUNG VON SENTINEL-1 SAR-DATEN MIT IN SITU GEMESSENEN SCHNEEPARAMETERN AM ZUGSPITZPLATT ZUR PROGNOSE DER SCHNEESCHMELZDYNAMIK

KERSTIN HÜRKAMP¹, CARLO MARIN², VALENTINA PREMIER², MATTIA CALLEGARI², CHRISTIAN BRIDA³,
GIACOMO BERTOLDI³, CLAUDIA NOTARNICOLA², MARC ZEBISCH², JOCHEN TSCHIRSCH¹

¹HELMHOLTZ ZENTRUM MÜNCHEN, INSTITUTE OF RADIATION MEDICINE (IRM)

INGOLSTÄDTER LANDSTRASSE 1, 85764 NEUHERBERG, GERMANY

EURAC RESEARCH, ²INSTITUTE FOR EARTH OBSERVATION AND ³INSTITUTE FOR ALPINE ENVIRONMENT,

VIALE DRUSO 1, 39100 BOLZANO, ITALY

E-MAIL: KERSTIN.HUERKAMP@HELMHOLTZ-MUENCHEN.DE

Zusammenfassung: Prognosen der Schneeschmelzdynamik sind wichtig für die Quantifizierung zu erwartender Abflüsse und assoziiertem Stofftransport. In einer Pilotstudie am Zugspitzplatt wurden aus Sentinel-1 Daten über das Rückstreusignal unterschiedliche Schmelzphasen abgeleitet und durch In-situ-Messungen vom Schnee-Wasser-Äquivalent und modelliertem Flüssigwassergehalt in der Schneedecke validiert. Dies ermöglicht die alpenweite Extrapolation der Daten zum einsetzenden Schmelzwasserabfluss, bei dem der Großteil der im Schnee akkumulierten Stoffe (z. B. Radionuklide) in kurzer Zeit freigesetzt wird.

Abstract: Prognoses of the snowmelt dynamics are important for the quantification of expected water discharge and associated mass transport. In a pilot study at Zugspitzplatt, from the backscattering signal of Sentinel-1 data, different melt phases were distinguished and validated by in situ measurements of snow water equivalent and modeled liquid water content in the snow cover. This enables an alpine-wide extrapolation of the onset of meltwater runoff accompanied by the short-term release of accumulated contaminants (e.g. radionuclides) in the snowpack.

Langzeitige Wasserspeicherung in der alpinen Schneedecke ist besonders relevant für Timing und Menge des Wasserabflusses nach einsetzender Schmelze sowie den Transport enthaltener Stoffe, z. B. Radionuklide. Mit dem ersten Schmelzwasserabfluss ist aber auch das Risiko von Hochwässern stark erhöht und ein Großteil der über den Winter im Schnee akkumulierten Stoffe wird bereits mit den ersten Schmelzwassermengen kurzfristig freigesetzt (Hürkamp et al., 2017). Daher sind die Kenntnis über die Phasen der Schneeschmelzdynamik und eine Prognose des beginnenden Schmelzwasserabflusses von besonderer Wichtigkeit.

Fernerkundung hat sich als hilfreiches Tool zur Unterstützung von hydrologischen Modellinputs in Bezug auf die räumlich-zeitliche Schneedeckenvariabilität erwiesen. Insbesondere mit Hilfe der Analyse von Synthetic Aperture Radar (SAR) Daten der ESA Sentinel-1 Mission können Schneealterationsprozesse und beginnender Schmelzwasserabfluss prognostiziert werden. Die Methode identifiziert Nassschnee, indem Änderungen des Radar-Rückstreusignals zeitlich ausgewertet werden. Es können die typischen Phasen der Schneealterationsprozesse Isothermie und Durchfeuchtung, Reifung sowie Schmelzwasser-

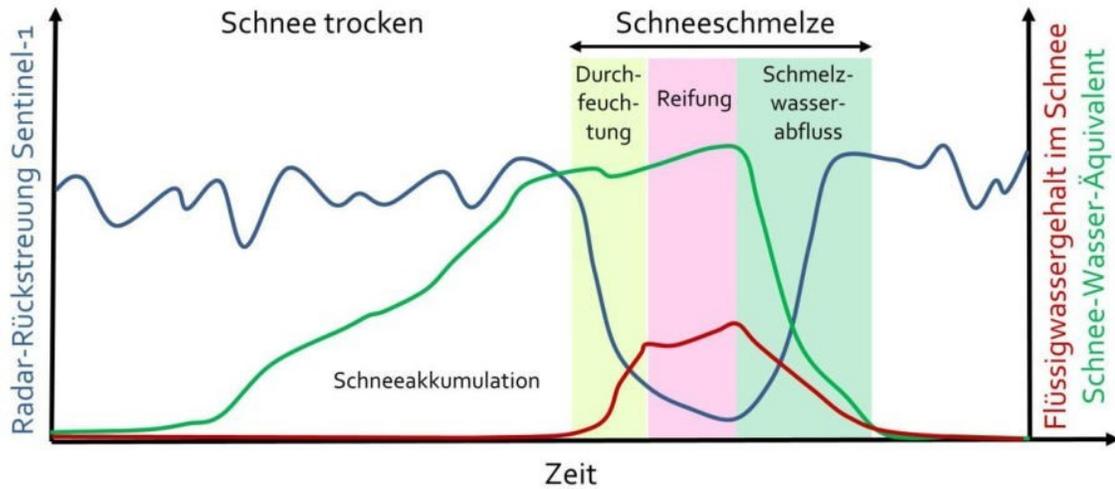


Abb. 1: Schematische Darstellung der Entwicklung der Schneeparameter und des gemessenen Radar-Rückstreusignals und daraus abgeleitete Phasen der Schneeschmelzprozesse. Grundlage der idealisierten Darstellung sind die Beobachtungen am Zugspitzplatt seit 2014 (Start Sentinel-1 Mission). Die Abbildung wurde verändert nach Marin et al. (accepted).

serabfluss unterschieden und zeitlich begrenzt werden (Abbildung 1).

Zur Validierung fließen In-situ-Messungen des Schnee-Wasser-Äquivalents und der Flüssigwassergerhalte in der Schneedecke ein, die mit Hilfe einer Schneewaage und eines Snow Pack Analyzers am zentral-westlichen Zugspitzplatt (2420 m ü. NN) seit 2012 kontinuierlich aufgezeichnet werden (Abbildung 2). Letzterer misst die komplexe Impedanz zweier Frequenzen entlang von drei horizontal gespannten 5 m langen Flachbandsensoren in 10 cm, 20 cm und 30 cm Schneehöhe. Die Impedanz wird über die dielektrische Konstante bestimmt, die sich für Flüssigwasser, Schnee und Eis unterscheidet. Auf Grund der noch ausstehenden Kalibrierung des Snow Pack Analyzers wurden für die Pilotstudie Zugspitzplatt 2016-2018 die Flüssigwassergerhalte mit dem Schneedeckenmodell SNOWPACK (WSL-SLF, Lehning et al., 2002) modelliert (Marin et al., accepted).

Die punktuellen Messungen können im Gegenzug über die Fernerkundungsdaten in die Fläche extrapoliert werden, damit der Beginn des Schmelzwasserabflusses für das gesamte

Zugspitzplatt und auch alpenweit prognostiziert werden kann. Das Zugspitzplatt (11,4 km²) wird ausschließlich über die Partnach ins Reintal entwässert, sodass eine Bilanzierung des Radionuklidtransports mit beginnender Schneeschmelze und deren Freisetzung mit dem Schmelzwasser möglich wird.



Abb. 2: Schnee-Messfeld am zentralen Zugspitzplatt (2420 m ü. NN) mit Instrumentierung zur Bestimmung meteorologischer und Schneeparameter (Ultraschall-Schneehöhensensor, Schneewaage, Snow Pack Analyzer). Die Station wird seit 2012 gemeinsam mit dem Bayerischen Lawinenwarndienst genutzt (Foto H. Schmölz, 21.11.2012).

Pilotstudie Zugspitzplatt 2016-2018

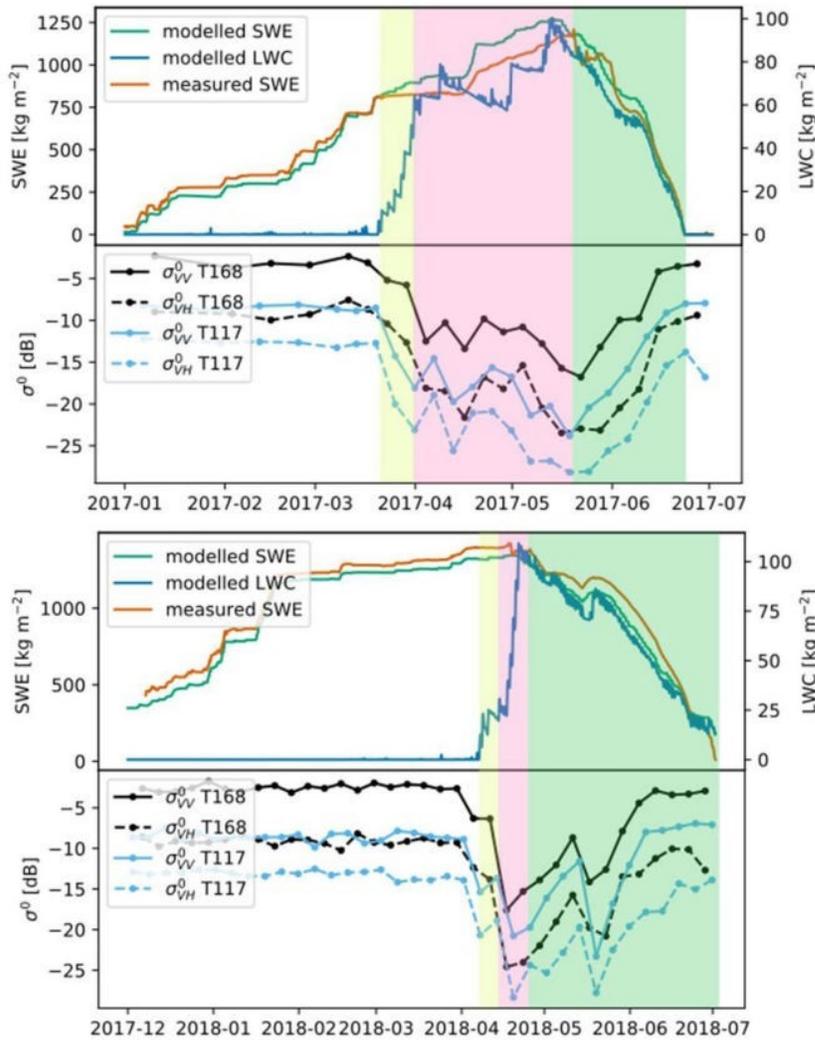


Abb. 3: Gemessene Schnee-Wasser-Äquivalente (SWE), modellierte Flüssigwassergehalte (LWC) in der Schneedecke sowie Rückstreusignale (σ^0) aus den doppelt polarimetrischen (VV und VH) C-Band SAR Sentinel-1 Daten (T168 5:00 UTC, T117 17:00 UTC) für das Zugspitzplatt in den Schneesaisonen 2016/2017 und 2017/2018. Die ermittelten Phasen der Schneeschmelze sind farblich hinterlegt: Durchfeuchtung der Schneedecke (gelb), Schneereifung (rot), Schmelzwasserabfluss (grün). Die Abbildung stammt aus Marin et al. (accepted).

Die doppelt polarimetrischen C-Band Sentinel-1 SAR-Daten für das Zugspitzplatt sind alle 6 d zweimal täglich mit einer räumlichen Auflösung von 20 m erhältlich. Wie in Abbildung 1 idealisiert dargestellt lassen sich auch an den gemessenen und modellierten

Schneeparametern in Kombination mit den Rückstreusignalen der SAR-Daten aus den beiden Schneesaisonen 2016/2017 und 2017/2018 die Phasen der Schneereifungsprozesse ableiten und zeitlich begrenzen (Abbildung 3).

Die Phase der Durchfeuchtung beginnt von der Oberfläche her und geht mit einem Anstieg des Flüssigwassergehalts in der Schneedecke und einer gleichzeitigen Abnahme des Radar-Rückstreusignals einher. Der Beginn der Reifungsphase ist durch die vollständige Isothermie der Schneedecke (Temperatur von 0°C über die gesamte Tiefe) gekennzeichnet. Die Reifungsphase endet mit dem

ersten Masseverlust auf der Schneewaage, d. h. einer Abnahme des Schnee-Wasser-Äquivalents, die den Abfluss von Schmelzwasser anzeigt. Gleichzeitig nimmt der Flüssigwassergehalt durch den Ablauf des Flüssigwassers ab. Während der Schneereifung ist das Rückstreusignal durchgehend gering und erreicht bei vollkommener Wassersättigung der basalen Schneeschicht das Minimum. Mit dem Schmelzwasserabfluss steigt es dann wieder an, da der Wassergehalt im Schnee abnimmt, sich die Korngröße und Struktur der Schneekristalle verändert und die Schneeoberfläche zunehmend rau wird. Zum Ende der Abflussphase ist der Anstieg der Radar-Rückstreuung auch auf die zunehmend

schmutzigere Schneeoberfläche und später das Vorhandensein von nur noch kleinen residualen Schneeflecken auf der Felsoberfläche zurück zu führen.

Der Beginn des Schmelzwasserabflusses am oberen Zugspitzplatt (2420 m ü. NN) und damit einhergehend für die Freisetzung von in der Schneedecke akkumulierten Stoffen war im Frühjahr 2017 am 20.5. und in 2018 am 18.4.. Die Daten decken sich in beiden Jahren sehr gut mit dem Wiederanstieg des Radar-Rückstreuensignals in den Sentinel-1-Daten nach dessen jeweiligem Minimum (Abbildung 3). Der unterschiedlich lange Zeitraum der Schneeschmelze in beiden Saisonen ist eine Folge der vorherrschenden Wetterbedingungen. Maßgeblich sind hierfür Temperatur und Einstrahlung während der einsetzenden Schneeschmelze, d. h. Länge und Intensität der ersten Tauphase.

Die Studie wurde gleichzeitig noch für vier weitere Standorte in den Berchtesgadener Alpen (Kührint) und in Südtirol (Malga Fanner, Clozner Loch und Alpe del Tumulo) durchgeführt, die auf Grund geringerer Höhenlage keine kontinuierliche Schneeakkumulation während des Winters haben (Marin et al., in prep). Auch hier haben die Ergebnisse gezeigt, diesen Forschungsansatz weiter zu verfolgen.

Zusammenfassung

Die Validierung der SAR-Daten mit den Punktmessungen der Schneeparameter zeigt vielversprechende Ergebnisse. Mit der überflugbedingten Unsicherheit der Fernerkundungsdaten von ± 6 d kann im Abgleich mit den in situ-Messungen der Zeitpunkt der Schneeschmelze zuverlässig bestimmt und annähernd sogar prognostiziert werden. Die mit dem Schmelzwasserabfluss einhergehende Freisetzung von akkumulierten Schadstoffen, z. B. Radionukliden, ist dadurch über eine

große räumliche Ausbreitung zeitlich vorher-sagbar und über zusätzliche Aktivitätsmessungen werden Abschätzungen zu potentiellen Strahlenexpositionen für die Bevölkerung im Ereignisfall quantifizierbar.

Literatur

Hürkamp, K., Tafelmeier, S. und Tschiersch, J.: Influence of melt-freeze-cycles on the radionuclide transport in homogeneous laboratory snowpack, *Hydrological Processes*, 31, 1360-1370, DOI 10.1002/hyp.11110, 2017.

Lehning, M., Bartelt, P.B., Brown, R.L., Fierz, C. and Satyawali, P.: A physical SNOWPACK model for the Swiss Avalanche Warning Services. Part II: Snow Microstructure, *Cold Regions Science and Technology*, 35, 147-167, DOI 10.1016/S0165-232X(02)00073-3, 2002.

Marin, C., Bertoldi, G., Premier, V., Callegari, M., Brida, C., Hürkamp, K., Tschiersch, J., Zebisch, M. and Notarnicola, C.: The relationship between the multi-temporal Sentinel-1 backscattering and the snow melting dynamics in alpine regions, *IEEE Xplore*, accepted.

Marin, C., Bertoldi, G., Premier, V., Callegari, M., Brida, C., Hürkamp, K., Tschiersch, J., Notarnicola, C. and Zebisch, M.: The relationship between the multi-temporal Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar measurements and the snow melting dynamics in mountain regions, *The Cryosphere*, in prep.

Danksagung

Teile der Studie wurden im Rahmen des Verbunds Virtuelles Alpenobservatorium (VAO) vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert. Es wurde auch auf meteorologische Daten vom Bayerischen Lawinenwarndienst zurückgegriffen.