

Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Band: 119 (2021)

Heft: 9-10

Artikel: Grossflächige Schneehöhen-Kartierung mit Flugzeug und Satellit

Autor: Bühler, Yves / Bühle, Leon / Eberhard, Lucie

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-976781>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.11.2024

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

Grossflächige Schneehöhen-Kartierung mit Flugzeug und Satellit

Die räumliche Verteilung der Schneehöhen (HS) und damit einhergehend das im Schnee gespeicherte Wasser (Snow Water Equivalent SWE) sind zentrale Parameter für Fragestellungen im Gebirge. Beispielsweise für die Auslösung und Dynamik von Lawinen, zur Abschätzung des verfügbaren Wassers für die Wasserkraftgewinnung aber auch für Hochwasserwarnungen sowie ökologische Fragestellungen zur Verbreitung von Pflanzen- und Tierarten ist die räumliche und zeitliche Verteilung von Schneehöhen ein zentraler Parameter. Traditionell wird die Schneehöhe im Gebirge an einzelnen Punkten, sei es mit automatischen Wetterstationen (AWS) oder mit manuellen Messungen, erhoben. Allerdings können diese Punktmessungen die räumlich sehr variable Verteilung der Schneehöhen nicht erfassen. Oft ist es nicht bekannt, für welche Gebiete die Punktmessungen repräsentativ sind. Grossflächig-flächendeckende Schneehöhenkartierungen helfen uns dabei, die Repräsentativität dieser Punktmessungen zu überprüfen.

La répartition spatiale des hauteurs de neige (HS) et en conséquence l'eau emmagasinée (Snow Water Equivalent) sont des paramètres centraux pour les questions qui se posent dans les montagnes. Par exemple concernant le déclenchement et la dynamique d'avalanches, l'évaluation de l'eau disponible pour l'acquisition des forces hydrauliques mais également pour l'alerte des hautes eaux et des questions écologiques au sujet de la propagation d'espèces végétales et animales la répartition spatiale et temporelle des épaisseurs de neige est un paramètre central. Traditionnellement dans les montagnes la hauteur de la neige est mesurée à des points singuliers soit par des stations météorologiques automatiques (AWS) ou des mesures manuelles. Cependant ces mesures de points ne permettent pas de saisir la répartition spatiale très variable des hauteurs de neige. Souvent on ne connaît pas pour quels endroits ces mesures de points sont représentatives. Des cartographies de hauteurs de neige de surfaces d'envergure nous aident à contrôler la représentativité de ces mesures de points.

La ripartizione spaziale dell'altezza della neve (HS) e quindi dell'acqua stoccata nella neve (Snow Water Equivalent SWE) sono dei parametri fondamentali per capire le problematiche relative alle montagne. Tale ripartizione è, per esempio, l'elemento centrale per lo staccamento e il dinamismo delle valanghe oppure per la valutazione delle risorse idriche disponibili per l'energia idroelettrica nonché per gli allarmi delle piene nonché le questioni ecologiche legate alla diffusione di specie animali e vegetali. Nelle regioni montagnose l'altezza della neve è tradizionalmente rilevata in singoli punti sia con stazioni meteorologiche automatizzate (AWS) sia con misurazioni manuali. Tuttavia, queste misurazioni di punti non riescono a rilevare la distribuzione spaziale molto variabile dell'altezza del manto nevoso. Spesso risulta impossibile sapere quali misurazioni di punti siano rappresentative per quali regioni. A questo riguardo la cartografia dell'altezza della neve su tutte le superfici ci aiuta a verificare la rappresentatività di queste misurazioni di punti.

Y. Bühler, L. Bühler, L. Eberhard,
M. Marty, A. Stoffel

Seit dem Jahr 2010 führt das WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF photogrammetrische Schneehöhenkartierungen mit optischen Fernerkundungsdaten über dem Gebiet des Dischmats bei Davos durch. Gestartet wurde mit Daten des Scanners ADS40 von swisstopo, welcher auf einem bemannten Flugzeug montiert wurde. Zudem wurden ab 2015 Drohnen für die Aufnahme von kleinräumlichen Einzugsgebieten verwendet. Ab 2017 wurde der Scanner durch die verbesserten Vermessungskameras Vexcel UltraCam X (2017) und M3 (2018–2021) ersetzt, welche durch eine deutlich höhere Auflösung gekennzeichnet sind. Zudem testeten wir im Jahr 2018 Daten des Satelliten Pléiades. Diese optischen Bilddaten ermöglichen, bei wolkenfreien Bedingungen, eine genaue und grossflächige Kartierung der Schneehöhenverteilung im Gebirge. Der Detaillierungsgrad und die Länge dieser Zeitreihe sind einzigartig. Die berechneten Schneehöhen- daten erweisen sich als sehr wertvoll für die Validierung von neuen Ansätzen zur Schneehöhenmodellierung.

Photogrammetrische Schneehöhenmessungen im Testgebiet Dischma, Davos

Das Dischmatal, ganz in der Nähe der SLF Gebäude, ist seit mehreren Jahrzehnten ein wichtiges Testgebiet für wissenschaftliche Untersuchungen. Es erstreckt sich vom Talgrund des Landwassertals auf 1550 m ü. M. bis zu den Gipfeln des Grialetschgebietes (Piz Grialetsch 3130 m ü. M.). Im nördlichen Teil sind die tieferen Hanglagen mit Fichten- und Lärchenwäldern bedeckt. Der sanft ansteigende Talboden wird bis auf 2000 m ü. M. landwirtschaftlich genutzt. Im südlichen Teil existieren noch einige kleinere Gletscher. Dank der langjährigen Forschungstätigkeit im Dischmatal ist die Dichte an

verfügbaren Messungen (automatische Wetterstationen, Messungen von Beobachtern, Webcam-Systeme, Fernerkundungsdaten etc.) sehr hoch, daher eignet sich dieses hochalpine Tal sehr gut für das Testen und Validieren von Schneehöhenverteilungen mit Fernerkundungsmethoden.

Ein erster Versuch wurde im Jahr 2010 mit dem Pushbroom-Scanner ADS40 in Zusammenarbeit mit Leica Geosystems gestartet. Mit den Daten des Nachfolgers ADS80 wurde eine aufwändige Analyse der erreichten Genauigkeiten im Vergleich zu Handmessungen mit Lawinensonden, Global Navigation Satellite System (GNSS) Messungen, Terrestrischem Laser Scanning (TLS) und Ground Penetrating Radar (GPR) durchgeführt (Bühler et al., 2015b). Die erreichte räumliche Auflösung der Schneehöhenkarten von 2 m und die Genauigkeit von 0.3 m (root mean square error RMSE) waren sehr vielversprechend. Die photogrammetrische Schneehöhenkartierung wurde damit zu einem wertvollen Instrument,

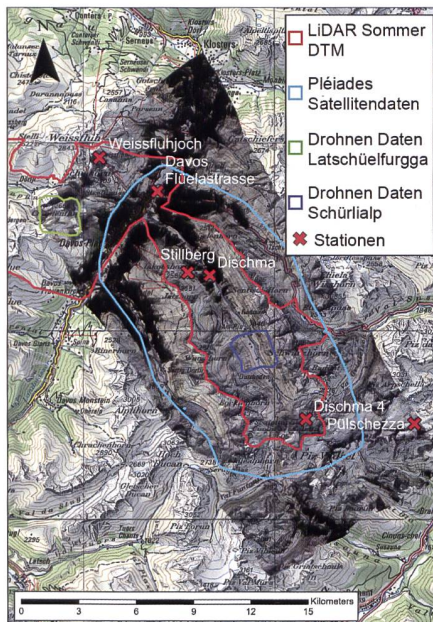


Abb. 1: Untersuchungsgebiet Dischma mit den Abdeckungen der einzelnen Datensätze und der automatischen Messstationen (rote Kreuze). Das Orthophoto des UltraCam Fluges von 2021 ist der Karte überlagert (Quelle: Bundesamt für Landestopografie).

um die Schneehöhenverteilung grossflächig (> 100 km²) und räumlich zusammenhängend zu kartieren. Ab 2012 wurde das Gebiet Dischma (Abb. 1) mindestens einmal pro Jahr mit der ADS80/100 befliegen und daraus wurden detaillierte Schneehöhenkarten erstellt. Ab 2017 wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Flotron AG mit den Vermessungskameras UltraCam X (2017) und in den darauffolgenden Jahren mit der UltraCam Eagle M3 (ab 2018) geflogen. Diese moderne 450 Megapixel Frame-Kamera mit einer Brennweite von 122 mm wurde auf einer mittleren Höhe von 6100 m über Meer (2018 nur 3800 m ü. M.) mit einer Überlappung von 80% in und 50% quer zur Flugrichtung geflogen und liefert 14-bit RGB und nahinfrarot (NIR) Daten mit einer Auflösung (Ground Sampling Distance GSD) von 0.1–0.15 m sowie GNSS und IMU basierte Bildpositionierung mit einer Genauigkeit von besser als 0.2 m. Dies ermöglicht eine deutlich verbesserte Schneehöhenkartierung mit einer räumlichen Auflösung von 0.5 m. Ab 2015 wurden am SLF auch intensiv Drohnen eingesetzt, um die Schneehöhenverteilung zu messen (Bühler et al., 2015a; Bühler et al., 2016; Bühler et al., 2017; Bühler et al., 2018; Noetzi et al., 2019). Damit konnten Genauigkeiten im Bereich von 0.1 m erreicht werden. Somit stand ein geeignetes Instrument zur Verfügung, um die Messungen der flugzeug- und satellitengestützten Daten sinnvoll zu validieren. Im Jahr 2018 wurde eine grossangelegte Studie durchgeführt, bei der Pléiades Satellitendaten (GSD 0.5 m) mit den UltraCam Daten (GSD 0.1 m) und eBee+ RTK Drohnen Daten (GSD 0.03 m) sowie bodengestützter Photogrammetrie (GSD 0.05 m) verglichen wurden. Zusätzlich wurden die Resultate mit Handmessungen sowie Messungen von fest installierten Schneepegeln validiert (Eberhard et al., 2021). Für die Berechnung der Schneehöhen wird als schneefreies Terrain-Modell ein flugzeuggestützter Laserscan verwendet, der im August 2015 mit dem LiDAR LMS-Q 780 der Milan Geoservice GmbH geflogen wurde. Für das kleinräumige Gebiet Schürlialp steht

zudem ein weiteres hochaufgelöstes DSM von einem Drohnenflug aus dem Sommer zur Verfügung (Abdeckung siehe Abb. 1). Diese Studie ermöglicht erstmals einen aussagekräftigen Vergleich zwischen verschiedenen photogrammetrischen Plattformen.

Resultate

Die Schneehöhenkartierungen mit dem Satelliten (Abb. 2) ergaben eine Genauigkeit von ca. 0.5 m RMSE. Dies dürfte für viele Anwendungen nicht genügend präzise sein. Wo aber keine Drohnen- oder Flugzeugdaten erhoben werden können, ist dies immer noch die beste

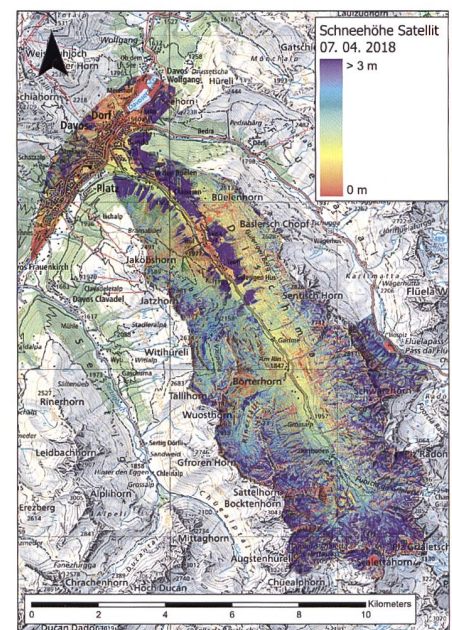


Abb. 2: Schneehöhenkarte berechnet aus den Winter-Satellitendaten von Pléiades und dem schneefreien ALS. Deutlich erkennbar sind die Waldgebiete um Davos (stark positive Werte in Blau aufgrund der Bäume) und die Gletschergebiete ganz im Süden beim Scalettahorn und dem Piz Grialetsch (stark negative Werte in Rot aufgrund des Eisschwundes zwischen 2015 und 2018). Diese Gebiete müssen ausmaskiert werden, da es sich nicht um reale Schneehöhenwerte handelt (Pléiades data© CNES 2018, Distribution Airbus DS, Quelle: Bundesamt für Landestopografie).

Wahl und es können sehr grosse Gebiete kartiert werden, ohne dass Personen im Feld eingesetzt werden müssen.

Die grossflächigen Befliegungen mit dem ADS Sensor von Leica Geosystems ergaben Genauigkeiten im Bereich von 0.3 m (Bühler et al., 2015b). Allerdings ist dies aber abhängig von der GSD der Inputdaten und damit von der Flughöhe über Grund. Die GSD lag bei den ADS Befliegungen im Bereich von 0.25 m.

Dank verbesserter Bildpositionierung (GNSS/IMU) und weiterentwickelten Datenprozessierungs-Methoden konnten mit den UltraCam Genauigkeiten besser als 0.2 m erreicht werden (Eberhard et al., 2021), was in Kombination mit der verbesserten Ausmaskierung von vegetationsbedeckten Gebieten und einer NDSI (Normalized Difference Snow Index) basierten Klassifikation der schneefreien Flächen die Zuverlässigkeit der Schneehöhenmessungen deutlich verbessert. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser Daten liegen nur geringfügig hinter den Resultaten, welche mit Drohnenkartierungen (ca. 0.1–0.15 m RMSE) erreicht werden (Eberhard et al., 2021; Bühler et

al., 2016). Allerdings sind die Kosten für eine Befliegung mit einem bemannten Flugzeug deutlich höher als für die Datenaufnahme mit Drohnen. Andererseits können auch mit RTK/PPK Starrflügler-Drohnen (z. B. Wingtra oder eBee+) und mehreren Batterien nur Flächen in der Grössenordnung von 5 km² mit vertretbarem Aufwand erfasst werden.

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der Schneehöhen im südlichen Dischmatal vom April 2020 zum April 2021, dem jeweiligen Zeitpunkt der maximalen Schneehöhen in dieser Höhenlage (peak of winter). Obwohl die meisten Verteilungsmuster in beiden Jahren ähnlich sind, treten auch einige Unterschiede zu Tage. Diese werden zum Beispiel durch unterschiedliche Lawinenabgänge verursacht. Insgesamt hatte es im Winter 2021 (Mittelwert HS = 1.55 m) deutlich mehr Schnee im Testgebiet als 2020 (Mittelwert HS = 1.19 m).

Abbildung 4 zeigt den Vergleich der mittleren UltraCam Schneehöhen aller fünf Jahre mit den Messwerten der manuellen Messfelder und der automatischen Stationen am entsprechenden Tag über das

gesamte Untersuchungsgebiet (ca. 100 km²). Während die Winter 2017 und 2020 relativ schneearm waren, zeigt sich deutlich, dass der Winter 2019 extrem schneereich war. Dies hat sich auch darin bestätigt, dass extreme Lawinenperioden mit vielen grossen Staublawinen auftraten, welche auch Schäden am Wald und an Gebäuden verursacht haben (Zweifel et al., 2019). Es zeigt sich sehr schön, wie gut der Mittelwert der Schneehöhe abgeleitet aus den fünf Stationen mit dem Mittelwert abgeleitet aus den UltraCam Daten übereinstimmt. Einzig im Jahr 2018 gibt es eine kleinere Abweichung von ca. 0.2 m. Allerdings wurden zu diesem Zeitpunkt nur ca. 60% des Gebietes mit der UltraCam erfasst, da tiefliegende Wolken vorhanden waren. Betrachtet man die einzelnen Stationen, f llt die hohe Korrelation der Schneehöhe der automatischen Messstation Stillberg (2087 m  . M.) mit dem Mittelwert der UltraCam Daten auf (Abb. 4).

Schlussfolgerungen und Ausblick

Photogrammetrische Oberflächenmodelle aufgenommen von Satelliten und insbesondere von Drohnen und bemannten Flugzeugen ermöglichen eine flächendeckende und sehr detaillierte sowie genaue Kartierung der Schneehöhenverteilung im Gebirge. Solche Daten konnten zuvor nur mit Airborne Laser Scanning (ALS) erstellt werden, was aufgrund der hohen Kosten nur sehr selten durchgeführt werden konnte. Umfangreiche Validierungskampagnen haben gezeigt, dass die Genauigkeiten der Schneehöhenkarten mit Satellitendaten bei ca. 0.5 m, beim flugzeugbasierten System ADS im Bereich von 0.3 m, beim neuen flugzeugbasierten System UltraCam bei ca. 0.2 m und bei den Drohnen Daten im Bereich von 0.1 m liegen (Bühler et al., 2015b; Bühler et al., 2016; Eberhard et al., 2021). Sobald die neuen LiDAR Daten von swissSURFACE3D von swisstopo für den Kanton Graubünden zur Verfügung stehen werden, können wir die Schneehöhen für den gesamten Abdeckungsbereich der UltraCam

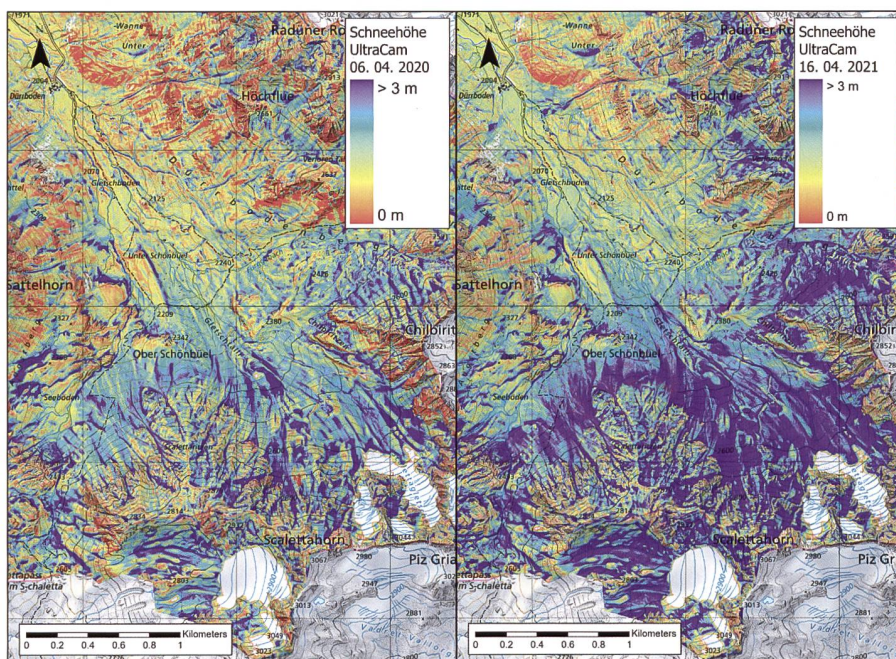


Abb. 3: Vergleich der UltraCam Schneehöhenkarten von April 2020 (links) und April 2021 (rechts) im südlichen Dischmatal. Dies zeigt eindrücklich die räumliche Variabilität der Schneehöhenverteilung, welche durch diese Daten visualisiert werden können (Bundesamt für Landestopografie).

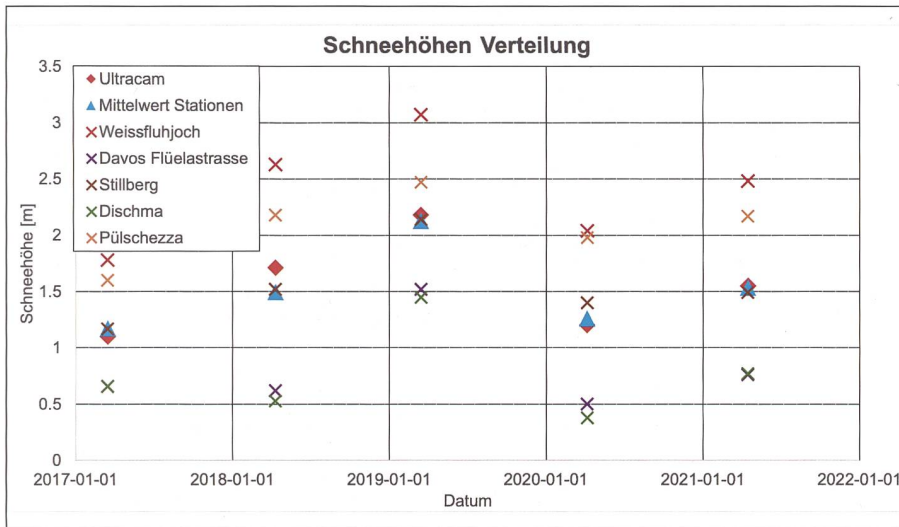


Abb. 4: Vergleich der durchschnittlichen Schneehöhe über das gesamte Erfassungsgebiet der UltraCam (roter Kasten) mit den Stationswerten im Gebiet (Kreuze, SLF Stationen) und dem Durchschnittswert dieser Stationen (blaues Dreieck).

Flüge berechnen, was die erfasste Fläche ungefähr verdreifachen wird (ca. 300 km²). Die einzigartige Zeitreihe flächendeckender Schneehöhenkarten von 2010 bis 2021, welche nun am SLF über dem Dischmatal erstellt worden sind, bergen grosses Potenzial für unterschiedliche Anwendungen. So kann zum Beispiel evaluiert werden, für welche Flächen die Schneehöhenmessungen an einem Punkt (automatische Wetterstationen oder Messungen von Beobachtern) repräsentativ sind. Zudem kann die Schneeverteilung in potenziellen Lawinenanrissgebieten genau untersucht oder aber die Auswirkungen von Geländeeigenschaften auf die Schneeablagerung genauer analysiert werden. Den grössten Nutzen aber bringen diese Messungen wohl als zuverlässige Validierungsdaten für hydrologische- und Satellitendatenbasierte Schneehöhenmodelle (Leiterer et al., 2020), die zur Zeit von verschiedenen Akteuren in der Schweiz entwickelt werden (z. B. www.

exolabs.ch oder www.wegaw.com). Denn nur wenn die tatsächliche Verteilung der Schneehöhen mit einer genügend hohen Genauigkeit gemessen werden kann, ist es möglich, solche Modelle zu entwickeln und auch sinnvoll zu validieren.

Literatur:

Bühler, Y., Bösch, R., Stoffel, A., and Adams, M.: Geodatenerfassung im hochalpinen Gelände mittels Drohnen, *Geomatik Schweiz*, 9/2015, 366–370, 2015a.

Bühler, Y., Marty, M., Egli, L., Veitinger, J., Jonas, T., Thee, P., and Ginzler, C.: Snow depth mapping in high-alpine catchments using digital photogrammetry, *The Cryosphere*, 9, 229–243, 10.5194/tc-9-229-2015, 2015b.

Bühler, Y., Adams, M. S., Bösch, R., and Stoffel, A.: Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UASs): potential and limitations, *The Cryosphere*, 10, 1075–1088, 10.5194/tc-10-1075-2016, 2016.

Bühler, Y., Adams, M. S., Stoffel, A., and Boesch, R.: Photogrammetric reconstruction of

homogenous snow surfaces in alpine terrain applying near-infrared UAS imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 8-10, 3135–3158, 10.1080/01431161.2016.1275060, 2017.

Bühler, Y., Stoffel, A., Eberhard, L., Feuerstein, G. C., Lurati, D., and Guler, A.: Drohneneinsatz für die Kartierung der Schneehöhenverteilung, *Bündner Wald*, 71, 2018.

Eberhard, L. A., Sirguey, P., Miller, A., Marty, M., Schindler, K., Stoffel, A., and Bühler, Y.: Intercomparison of photogrammetric platforms for spatially continuous snow depth mapping, *The Cryosphere*, 15, 69–94, 10.5194/tc-15-69-2021, 2021.

Leiterer, R., Wulf, H., G., M., Sassik, B., Bühler, Y., and Wegner, J. D.: Schneekartierung aus dem All – das Potenzial frei verfügbarer Satellitendaten, *Wasser Energie Luft*, 112, 4, 2020.

Noetzli, C., Bühler, Y., Lorenzi, D., Stoffel, A., and Rohrer, M.: Schneedecke als Wasserspeicher - Drohnen können helfen, die Abschätzungen der Schneereserven zu verbessern, *Wasser, Energie, Luft*, 111, 2019.

Zweifel, B., Lucas, C., Hafner, E., Techel, F., Marty, C., and Stucki, T.: Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. *Hydrologisches Jahr 2018/19*, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF; Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Davos; Birmensdorf, 134, 2019.

Yves Bühler
Leon Bührle
Lucie Eberhard
Andreas Stoffel
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
Flüelastrasse 11
CH-7260 Davos Dorf

Mauro Marty
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf