Schneekartierung aus dem All : das Potenzial frei verfügbarer Satellitendaten

Autor(en): **Leiterer, Reik / Wulf, Hendrik / Milani, Gillian**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **112 (2020)**

Heft 3

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941695

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Schneekartierung aus dem All – das Potenzial frei verfügbarer Satellitendaten

Reik Leiterer, Hendrik Wulf, Gillian Milani, Bernhard Sassik, Yves Bühler, Jan D. Wegner

Zusammenfassung

In dieser Studie wird ein neuer Ansatz für eine satellitengestützte Kartierung der Schneebedeckung und der Schneehöhen vorgestellt. Die resultierenden Karten geben die Schneebedeckung und die Schneehöhen für ganze Gebirgsketten auf täglicher Basis mit einer räumlichen Auflösung von 20 m wieder. Die Validierung des entwickelten geostatistischen Modells erfolgte auf der Grundlage von über 60 flugzeuggestützten Messungen in den europäischen Alpen und den Rocky Mountains. Die daraus resultierenden Korrelationskoeffizienten für die Schneehöhenabschätzungen variieren zwischen 0,13 und 0,73 und weisen einen durchschnittlichen RMSE von 0,53 m auf. Die grossen Variationen im Korrelationskoeffizienten sind durch die eingeschränkt verfügbaren Satellitendaten bei starken Neuschneefällen in Kombination mit langanhaltender Wolkenbedeckung bedingt. Das Verfahren zur Kartierung der Schneebedeckung resultierte in einer Overall Accuracy von 94 %. Angesichts der dynamischen und komplexen Natur der Schnee- und Schneehöhenverteilung sind diese Ergebnisse ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu einer verbesserten, flächendeckenden Schneekartierung in alpinen Regionen.

1. Methoden der Schneekartierung

Schnee gehört zu den sogenannten essenziellen Klimavariablen (ECV – *siehe Infobox*) und trägt somit entscheidend zur Charakterisierung des Klimas und diesbezüglicher Veränderungen bei. Hierbei wird die Variable Schnee in die Produkte Schneebedeckung, Schneehöhe und Schneewassergehalt differenziert *(GCOS, 2020)*. Diese Produkte sind nicht nur für die Klimaforschung von besonderem Interesse, sondern auch für viele Interessengruppen in Tourismus, Risikomanagement und Wasserkrafterzeugung *(Gonseth, 2013; Cherry et al., 2010)*.

Die präzise Detektion und Charakterisierung der Schneedecke ist aufgrund deren hoher zeitlicher und räumlicher Variabilität eine grosse Herausforderung *(Grünewald et al., 2010; Anderton et al., 2004)*. Diese Variabilität wird mit den bestehenden Ansätzen nur bedingt abgebildet – sei es in Bezug auf die räumliche Detailgenauigkeit, die Aktualität der Messungen oder die Widerspiegelung topografischer Variationen. Stationsmessungen, wie z. B. durch IMIS (= Interkantonales Mess- und Informationssystem, betrieben durch das WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF) zur Verfügung gestellt, erlauben hoch präzise Messungen und können die zeitliche Variabilität sehr gut abbilden, sind aber nur Messungen an einem Punkt und sind aufgrund der geografischen Verteilung der Stationen für eine Charakterisierung der kleinräumlichen Variabilität des Schneedecke bzw. der Schneehöhen nur sehr eingeschränkt geeignet *(Noetzli et al., 2019; IMIS, 2020)*. Mithilfe geostatistischer Methoden und unter Verwendung geeigneter Atmosphären- und Schneeverteilungsmodelle ist eine Interpolation zwischen den jeweiligen Stationen zwar möglich *(vgl. Mott et al., 2010)*, aber die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der interpolierten Werte sind insbesondere für kleinräumliche Variationen aufgrund der hohen Komplexität der Wechselwirkungen von Topografie, Vegetationsbedeckung und mikrometeorologischer Prozesse nur

Essential Climate Variables – ECV

Eine ECV ist laut dem Global Climate Observing System (GCOS) eine physikalische, chemische oder biologische Variable oder Variablengruppe, die zur Charakterisierung des Erdklimas beiträgt. Eine ECV muss dementsprechend eine Klimarelevanz aufweisen und operationell auf globaler Ebene kosteneffizient erfassbar sein. Die Erfassung der ECVs hilft, aktuelle und zukünftige Entwicklungen des Klimas zu verstehen, diesbezügliche Risikoanalysen durchzuführen und Anpassungsstrategien zu entwickeln. *(GCOS, 2020)*

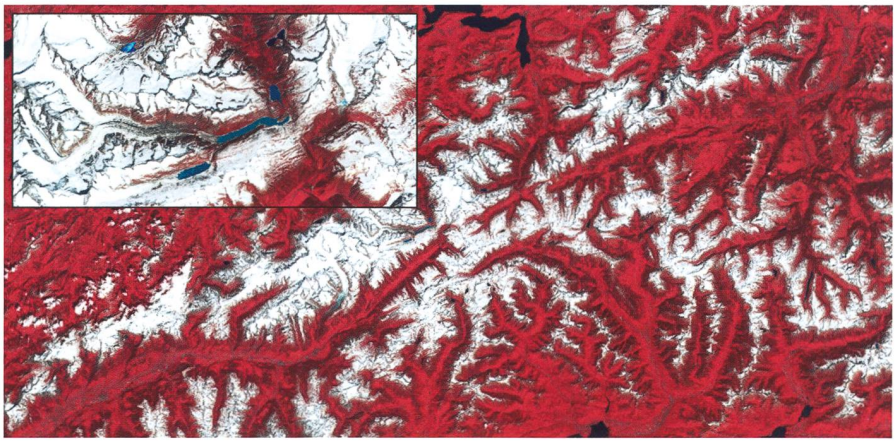

Bild 1: Falschfarben-Darstellung der Schweizer Alpen, basierend auf den frei verfügbaren Daten von Sentinel-2, einer Satellitenmission der Europäischen Raumfahrtsorganisation ESA, die eine wöchentliche Abdeckung mit bis zu 10 m räumlicher Auflösung ermöglicht. Detail: Die Wasserspeicher Grimselsee, Oberaarsee, Gelmersee und Räterichsbodensee in der Region Grimsel.

bedingt gegeben *(Grünewald et al., 2013)*. In diesem Zusammenhang werden zunehmend Daten der Erdbeobachtung (EO) integriert, da diese die notwendige hohe räumliche und zeitliche Auflösung für eine flächendeckende Kartierung der Schneedecke aufweisen *(Noetzli et al., 2019; Wang et al., 2018; Liu et al., 2013)*. Während für lokale Auswertungen vor allem flugzeuggestützte Verfahren und Drohnenbefliegungen Anwendung finden, ermöglicht die aktuelle Generation von Satelliten die Kartierung der Schneebedeckung für ganze Gebirgsketten *(Bild 1)*.

Nachfolgend wird ein innovativer Ansatz vorgestellt, wie mit der synergetischen Verwendung verschiedener Satellitendaten eine signifikante Verbesserung der Schneebedeckungs- und Scheehöhenkartierung erzielt werden kann. Der Fokus liegt hierbei vor allem auf der präzisen räumlichen Repräsentation der Variationen in der Schneedecke und auf einer möglichst aktuellen Abbildung der Schneesituation vor Ort. Die erzielten Ergebnisse wurden mit aussagekräftigen Referenzdaten, die mit Flugzeugen in der Schweiz und in den Vereinigten Staaten erhoben wurden, validiert.

2. Daten

2.1 Netzwerke von Bodenstationen

In vielen Ländern, in denen Schnee eine relevante Grösse ist, werden umfangreiche Netzwerke mit stationären Messungen betrieben. In der Schweiz umfasst dies neben IMIS (182 Stationen) auch das von MeteoSchweiz betriebene SwissMetNet mit ca. 160 Stationen *(SwissMetNet, 2020)*. In den Vereinigten Staaten bieten die National Centers for Environmental Information (NCEI) freien Zugang zu einem dichten landesweiten Netzwerk an Stationen, und das NRCS National Water and Climate Centre betreibt zusätzlich automatisierte Stationen in den abgelegenen und unzugänglichen Regionen *(NRCS, 2020)*. Obwohl insbesondere die Schneehöhen hohe räumliche Schwankungen aufweisen können und insbesondere bei den automatisierten Stationen auch Fehlfunktionen und -messungen nicht auszuschliessen sind, liefern diese Netzwerke wertvolle Informationen über die aktuellen Schneeverhältnisse und deren Veränderung in Raum und Zeit.

2.2 Flugzeuggestützte Messungen

Eine hoch präzise Erfassung räumlicher Schneehöhenveränderungen ist auf Grundlage von Airborne-Laserscanning-Flugkampagnen (ALS) oder über fotogrammetrische Auswertung von Luftbildern möglich *(Bühler et al., 2015)*. Diese Verfahren sind jedoch dadurch limitiert, dass sie nur in unregelmässigen Abständen und nur für begrenzte Flächen umsetzbar sind. Darüber hinaus ist die Durchführung der Flugkampagnen mit zum Teil hohen Kosten verbunden. Das am weitesten fortgeschrittenen Projekt für ALS-basierte Schneekartierungen ist das Airborne Snow Observatory (ASO) der NASA *(Painter et al., 2016)*. Zu den Standardprodukten des ASO gehören regionale Kartierungen von Schneehöhen, Schneewassergehalt und Schneealbedo in einer räumlichen Auflösung von 3 bis 50 m. In der Schweiz hat das SLF regionale Schneehöhenerfassungen mit einer räumlichen Auflösung von 2 m, basierend auf der fotogrammetrischen Auswertung von flugzeuggestützten ADS-80/100-Erhebungen, im Sommer und im Winter erstellt *(Marty et al., 2019)*. Die ASO-Daten wurden in dieser Studie zur Analyse des Zusammenhanges zwischen Schneehöhenverteilung und kleinräumlicher Topografie (d. h. Reliefelemente wie Sattel, Kessel oder Ebenen) verwendet, während die ADS-80/100-Kartierungen primär als unabhängige Validierungsquelle dienten.

2.3 Digitale Gelände- und Oberflächenmodelle

Die Grundlage für die topografischen Auswertungen bilden die verschiedenen frei verfügbaren Gelände- und Oberflächenmodelle. Primär fand hierbei das Global Digital Surface Model «ALOS World 3D–30 m» Verwendung, da bisherige Studien auf die bessere Qualität gegenüber den ebenfalls gebräuchlichen «SRTM GL1–30 m» und «ASTER GDEM–30 m» verweisen *(Florinsky et al., 2018)*. In Regionen mit deutlichen Anomalien in dem ALOS World 3D, wurde ein Modell entwickelt, um ein synergetisches Produkt, basierend auf den SRTM GL1 und dem ASTER GDEM, zu berechnen.

2.4 Satellitendaten

Satellitendaten bieten eine einzigartige Datenquelle, um die räumliche und zeitliche Dynamik der Schneebedeckung auch für grossflächige Fragestellungen abbilden zu können. Dabei unterscheiden sich die jeweiligen Aufnahmesysteme hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie in dem ableitbaren Informationsgehalt der jeweiligen Messungen. Um diese Eigenschaften optimal zu kombinieren, wurde eine Multi-Sensor-Modell mit Methoden des maschinellen Lernens entwickelt. Dies erlaubt nicht nur, Einschränkungen durch intensive Wolkenbedeckung oder Sensorartefakte auszugleichen, sondern auch eine Produktgenerierung mit 20 m räumlicher Auflösung und in Near Real Time (NRT), d. h. mit einer zeitlichen Differenz zwischen Satellitenaufnahme und Produktgenerierung von weniger als 1 Tag. *Tabelle 1* listet die verwendeten Satelliten mit den jeweiligen räumlichen und zeitlichen Spezifikationen auf.

Satellit (Sensor)	Räumliche Auflösung (Pixeldimension in m)	Zeitliche Auflösung (Aufnahmeintervall am Äquator)
Sentinel –1 A/B (C-SAR)	30 m	alle 6 Tage
Sentinel –2 A/B (MSI)	10 / 20 m	alle 5 Tage
Landsat –7 (ETM+)	30 m	alle 16 Tage
Landsat –8 (OLI)	30 m	alle 16 Tage
Terra / Aqua (MODIS)	500 m	täglich
SUOMI NPP (VIIRS)	500 m	täglich

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Satellitendaten und deren raum-zeitlichen Auflösung.

3. Methodik

Der entwickelte Ansatz zur grossflächigen Erfassung der Schneebedeckung und zur räumlich hochaufgelösten Kartierung der Schneehöhen verknüpft die verschiedenen Satellitendaten *(vgl. Tabelle 1)* mit den Informationen aus den meteorologischen Netzwerken unter Berücksichtigung der topografischen Einflüsse auf die Schneeverteilung.

In einem ersten Schritt wurde ein Basismodell, basierend auf den digitalen Gelände- und Oberflächenmodellen, berechnet, welches den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Reliefelementen und der Schneehöhenverteilung widerspiegelt. Zu diesem Zweck wurden die Schneehöheninformationen aus den ASO-Datensätzen *(vgl. 2.2)* mit verschiedenen topografischen Merkmalen (z. B. Hangneigung, Hangorientierung und Windexposition) räumlich verschnitten. Dabei fanden 58 verschiedene ASO-Datensätze aus den Jahren 2013 bis 2018 Verwendung. Die resultierenden Regressionsmodelle verdeutlichen die jeweiligen durchschnittlichen Zusammenhänge. In *Bild 2* ist beispielhaft der Zusammenhang zwischen der Hangneigung / Hangexposition und den Schneehöhen wiedergegeben, wobei die Graphen sich aus der mittleren Korrelation der jeweils einzeln durchgeführten Auswertungen der 58 ASO-Datensätze ergeben. Basierend auf den absoluten Schneehöhen, wurde hierbei der Normalisierungskoeffizient berechnet.

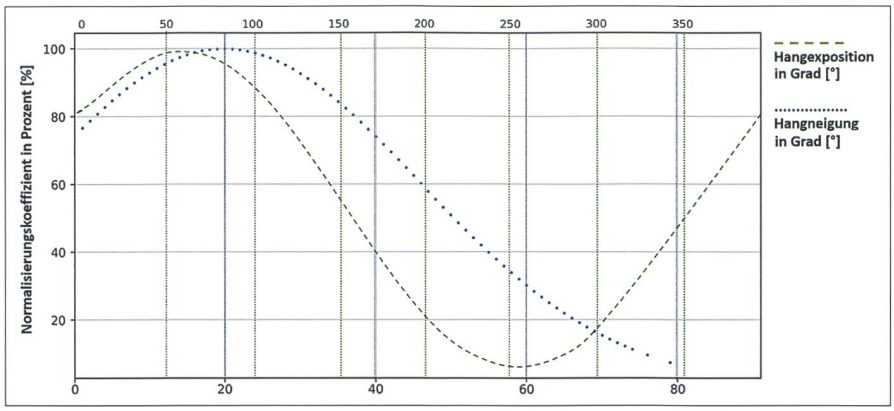

Bild 2: Empirisch abgeleiteter Zusammenhang zwischen Schneehöhen und der Hangneigung/Hangexposition. Der darauf basierende Normalisierungskœffizient (Y-Achse) fungiert als Indikator für die Gewichtung der absoluten Schneehöhen.

Dieser gibt an, ob und in welcher Grössenordnung die Verteilung der Schneehöhen in Hinblick auf den Einfluss der Hangneigung/Hangexposition optimiert werden können.

Dieses Vorgehen wurde für alle topografischen Merkmale bzw. Reliefelemente durchgeführt. Die resultierenden Informationsebenen der Normalisierungskoeffizienten wurden nachfolgend kombiniert, womit für jeden Bildpunkt (= Pixel) die Information über die mittlere Schneehöhenabweichung in Bezug auf die kleinräumliche Topografie berechnet werden konnte. Dieser Kombinationslayer wurde dann als statische Eingangsgrösse in den Algorithmus zur Schneehöhenbestimmung integriert.

In einem weiteren Schritt wurde ein Modell entwickelt, welches die einzelnen Schneehöhenmessungen aus den Bodennetzwerken in eine flächendeckende Repräsentation überführt. Dieser Vorgang basierte auf einem generalisierten additiven Modell (GAM) unter Berücksichtigung der digitalen Gelände- und Oberflächenmodelle, des topografischen Kombinationslayers und der klimatischen sowie aktuellen Schneegrenze, basierend auf den Satellitendaten. Um die kleinräumlichen Variationen in der Schneebedeckung abzubilden, wurde in einem letzten Schritt die räumlich hochaufgelöste direkte Kartierung mittels Satellitendaten integriert. Damit konnten nicht nur vereinzelte Schneeflächen unterhalb bzw. schneefreie Gebiete oberhalb der Schneegrenze detektiert werden, sondern auch die Erfassung und Charakterisierung möglicher Schneebedeckung in Waldgebieten (d.h. unter dem Kronendach) erfolgen.

Die Abschätzung der Zuverlässigkeit der so generierten Schneebedeckungs- und Schneehöhenprodukte erfolgte über unabhängige Datensätze des ASO sowie die Schneehöhenkarten, basierend auf ADS-80/100-Befliegungen des SLF *(vgl. 2.2)*. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Auflösung dieser Referenzdaten wurde der Vergleich mit den ASO-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 50 m, und der Vergleich mit den SLF-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 2 m durchgeführt. Die statistische Auswertung umfasste hierbei die Metriken Root Mean Square Error (RMSE), Standardabweichung (StdDev) und Pearson-Korrelationskoeffizient (Corr. Coef.).

4. Ergebnisse

Der vorgestellte Ansatz ermöglicht die Generierung von Karten, in denen die Schneebedeckung und die jeweiligen Schneehöhen ersichtlich sind. Diese Karten werden täglich erstellt, haben eine räumliche Auflösung von 20 x 20 m (Pixeldimension) und können grundsätzlich für jede Region auf der Erde berechnet werden. Die Kartierung der Schneebedeckung resultierte hierbei in einer Overall Accuracy von 94 %. Die Qualität der Kartierung der Schneehöhen zeigte eine hohe Abhängigkeit von den verfügbaren Stationsdaten, da diese einen signifikanten Einfluss auf die Kalibrierung der satellitengestützten Kartierung der Schneehöhenverteilung haben. In *Bild 3* ist ein Ausschnitt der Schneehöhenkarte für die Region Aletsch visualisiert.

Im Schneehöhenprodukt wird hierbei gut sichtbar, wie die topografischen Eigenschaften sich in der Ausprägung der Schneehöhen widerspiegeln und wie die generelle Verteilung der Schneebedeckung mit dem Echtfarbenbild korreliert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch bei den Bodenstationen die jeweiligen topografischen Bedingungen als beschreibende Variablen in Bezug auf die Stationsmessungen in den Modellansatz übernommen wurden. Um die absoluten Schneehöhenwerte zu validieren, erfolgte ein punktueller Vergleich, basierend auf einem stratifizierten Stichprobenansatz, mit den Schneehöhenwerten der ASO-Datensätze sowie den SLF-Schneehöhenkarten. In *Bild 4* sind

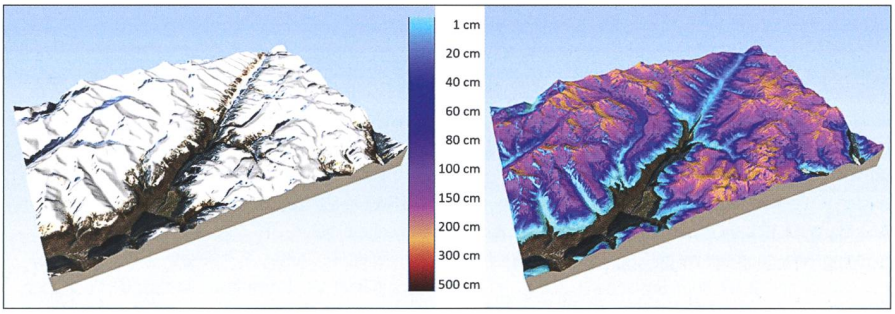

Bild 3: Die Region Aletsch in einer Echtfarben-Darstellung, aufgenommen durch den Satelliten Sentinel-2 (links), und die daraus abgeleitete Karte der Schneebedeckung und Schneehöhenverteilung (rechts). Aufnahmezeitpunkt: 3.12.2019.

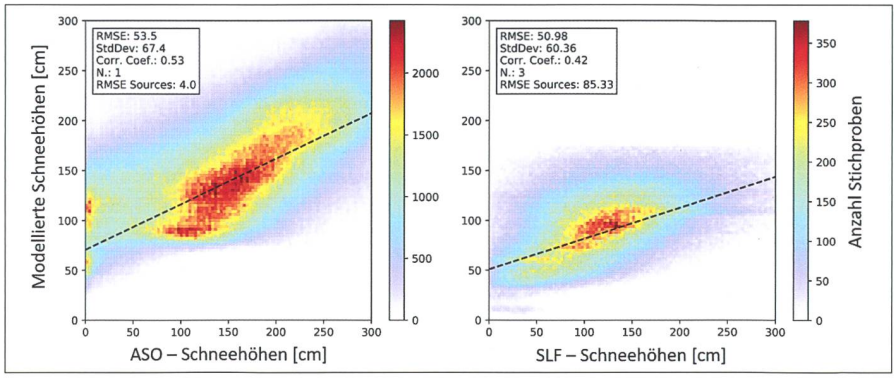

Bild 4: Beispiele für die berechneten Streudiagramme der Schneehöhenkorrelation für das Gebiet der Sierra Nevada (links) und für Davos (rechts).

exemplarisch zwei Streudiagramme dargestellt, die den Zusammenhang zwischen den absoluten Schneehöhenwerten, berechnet mit der vorgestellten Methodik, und den Schneehöhenwerten, basierend auf den ASO-Daten (für das Gebiet Sierra Nevada) bzw. den SLF-Daten (für das Gebiet Davos), aufzeigen.

Im Vergleich zu den hoch genauen ASO-/SLF-Referenzdaten wird deutlich, dass insbesondere in Bereichen mit Schneehöhen >200 cm der neu entwickelte Ansatz tendenziell die tatsächlichen Schneehöhen unterschätzt. Mit einem mittleren RMSE über alle Datensätze von 52,6 cm zeigt der hier vorgestellte satellitengestützte Ansatz jedoch grundsätzlich eine gute Übereinstimmung mit den Referenzdaten. Auch wenn mittels Drohnenbefliegung oder flugzeuggestützten Methoden aktuell RMSE-Werte von bis zu 10 cm und über die räumlich höchstauflösenden Daten der kommerziellen Satellitenmissionen ein mittlerer RMSE von 50 cm erreicht werden kann (vgl. *Bühler et al., 2020*), so sind diese Verfahren jedoch in ihrer räumlichen und zeitlichen Abdeckung limitiert und häufig mit einem vergleichsweise hohen Kostenaufwand verbunden.

5. Diskussion/Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie wurde aufgezeigt, wie Ansätze der geostatistischen Modellierung in Kombination mit direkten, satellitengestützten Messungen vielversprechende Ergebnisse liefern, um die Schneebedeckung und die Schneehöhe über Gebirgsketten in einer hohen räumlichen (20 m) und zeitlichen (täglich) Auflösung zu gewährleisten. Die so erstellten operativen Produkte erlauben eine bessere Abschätzung der Risiken im Hinblick auf das Wassermanagement, aber auch mit Bezug auf die Infrastrukturplanung oder den Tourismus. Eine räumlich präzise und zeitlich hochaufgelöste Kartierung der Schneehöhenverteilung bleibt aber nach wie vor eine grosse Herausforderung. Um den vorgestellten Ansatz weiter zu verbessern, sind die Integration von lokalen Windmustern und der tages- und jahreszeitlichen Dynamiken der Sonneneinstrahlung logische nächste Schritte. Hierfür werden aber zunächst räumlich hochauflösende Zeitserien der Schneebedeckung und der räumlichen Muster der Schneehöhenverteilung benötigt, welche wir in Zukunft vermehrt mit Drohnen erreichen wollen *(Bühler et al. 2016; Noetzli et al., 2019)*. Um den Schneewassergehalt zu bestimmen, welcher für die Wasserwirtschaft von besonderem Interesse ist, muss zusätzlich zu den Schneehöhen auch noch die Einbindung der Schneedichte berücksichtigt werden. Für Risikoabschätzungen in Bezug auf die Schneedecke sind zudem detaillierte Informationen über die unterschiedlichen Schichten notwendig. Diese Informationen werden aktuell mit Messungen am Boden erhoben. Erste Verknüpfungen der so erhobenen Daten mit den Informationen aus den Satellitendaten waren vielversprechend, für eine aussagekräftige Auswertung sind bisher aber noch nicht genügend heterogene Flächen erfasst worden. Die Schweizer Erdbeobachtungfirma «ExoLabs» arbeitet diesbezüglich mit den Forschungspartnern ETHZ (EcoVision Lab) und SLF im Innosuisse Projekt «DeepSnow» an Methoden der künstlichen Intelligenz, um die operative Beobachtung der Schneehöhen und des Schneewassergehalts weiter voranzutreiben. Auch die Integration von physikalischen Schneemodellen und innovativen mobilen Bodensensoren spielt hierbei eine zentrale Rolle und wird in Kooperationen mit Europäischen Partnern umgesetzt werden.

Danksagung

Diese Studie wurde vom Swiss Space Center im Rahmen des «Call for Ideas»-Programms unterstützt. Die meteorologischen und Luftbilddaten zur Schneehöhenbestimmung wurden durch die NOAA National Centers for Environmental Information, das NRCS National Water and Climate Center, dem SLF und das ASO zur Verfügung gestellt.

Quellen:

Anderton, S., S. White, S. & Alvera, B. (2004). Evaluation of spatial variability in snow water equivalent for a high mountain catchment. Hydrological Processes, Vol. 18 (3), 435–453.

Bühler, Y., Eberhard, L., Sirguey, P., Miller, A., Stoffel, A. & Marty, M. (2020). Photogrammetric snow depth mapping: How good can we get?. 9th EARSeL workshop on Land Ice and Snow, Bern, Switzerland, 2020.

Bühler, Y., Marty, M., Egli, L., Veitinger, J., Jonas, T., Thee, P. & Ginzler, C. (2015). Snow depth mapping in high-alpine catchments using digital photogrammetry. Cryosphere, Vol. 9 (1), 229–243.

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

Cherry, J.E., Walker, S., Fresco, N., Trainor, S. & Tidwell, A. (2010). Impacts of climate change and variability on hydropower in southeast alaska: Planning for a robust energy future. 2010. https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/17388

Florinsky, I., Skrypitsyna, T. & Luschikova, O. (2018). Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: A case study on the zaoksky testing ground, central european Russia. Remote Sensing Letters, Vol. 9 (7), 706–714.

GCOS (2020). Essential Climate Variables. https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/about (Zugriff: 17/06/2020).

Gonseth, C. (2013). Impact of snow variability on the swiss winter tourism sector: implications in an era of climate change. Climatic change, Vol. 119 (2), 307–320.

Grünewald, T., Schirmer, M., Mott, R. & Lehning, M. (2010). Spatial and temporal variability of snow depth and SWE in a small mountain catchment. The Cryosphere, Vol. 4, 215–225.

Grünewald, T., Stötter, J., Pomeroy, J. W., Dadic, R., Moreno Baños, I., Marturià, J., Spross, M., Hopkinson, C., Burlando, P. & Lehning, M. (2013). Statistical modelling of the snow depth distribution in open alpine terrain, Hydrol. Earth Syst. Sci., Vol. 17, 3005–3021.

IMIS (2020). Beschreibung automatischer Stationen https://www.slf.ch/de/lawinenbulletin-und-schneesituation/messwerte/beschreibung-automatische-stationen.html (Zugriff: 13/06/2020)

Liu, Y., Peters-Lidard, C.D., Kumar, S., Foster, J.L., Shaw, M., Tian, Y. & Fall, G.M. (2013). Assimilating satellite-based snow depth and snow cover products for improving snow predictions in Alaska. Advances in Water Resources, Vol. 54, 208–227.

Marty, M., Bühler, Y. & Ginzler, C. (2019). Snow Depth Mapping. EnviDat. doi:10.16904/envidat.62.

Mott, R., Schirmer, M., Bavay, M., GrünewaLd, T. & Lehning, M. (2010): Understanding snow-transport processes shaping the mountain snow-cover. Cryosphere, Vol. 4 (4), 545–559.

Noetzli, C., Bühler, Y., Lorenzi, D., Stoffel, A., & Rohrer, M. (2019). Schneedecke als Wasserspeicher. Wasser Energie Luft, Vol. 111 (3), 153–157.

NRCS (2020). Snow Survey and Water Supply Forecasting Program. https://www.wcc.nrcs.usda.gov/about (Zugriff: 13/06/2020).

Painter, T., Berisford, D., Boardman, J., Bormann, K., Deems, J., Gehrke, F., Hedrick, A., Joyce, M., Laidlaw, R., Marks, D., Mattmann, C., Mcgurk, B., Ramirez, P., Richardson, M., Skiles, S.M., Seidel, F. & Winstral, A. (2016). The airborne snow observatory: Fusion of scanning lidar, imaging spectrometer, and physically-based modeling for mapping snow water equivalent and snow albedo. Remote Sensing of Environment, Vol. 184, 139–152.

SwissMetNet (2020). Automatic Monotoring Network https://www.meteoswiss.admin.ch/home/measurement-and-forecasting-systems/land-based-stations/automatisches-messnetz.html (Zugriff: 13/06/2020).

Wang, Y., Huang, X., Liang, H., Sun, Y., Feng, Q. & Liang, T. (2018). Tracking Snow Variations in the Northern Hemisphere Using Multi-Source Remote Sensing Data (2000–2015). Remote Sensing, Vol. 10, 136.

Autoren:

Dr. Reik Leiterer, Dr. Hendrik Wulf, Dr. Gillian Milani, Bernhard Sassik, ExoLabs GmbH, Hegibachstrasse 48, CH-8032 Zürich

Dr. Yves Bühler, WSL-Institut für Schnee-und Lawinenforschung SLF, Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos Dorf

Dr. Jan D. Wegner, ETH Zürich, Department D-BAUG, IGP, Stefano-Franscini-Platz 5, CH-8093 Zürich