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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 111 (2019)

Heft: 3

Artikel: Schneedecke als Wasserspeicher : Drohnen können helfen, die Abschätzungen der Schneereserven zu verbessern

Autor: Noetzli, Christian / Bühler, Yves / Lorenzi, Daniela

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941524

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 13.07.2025

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

Schneedecke als Wasserspeicher

Drohnen können helfen, die Abschätzungen der Schneereserven zu verbessern

Christian Noetzli, Yves Bühler, Daniela Lorenzi, Andreas Stoffel, Mario Rohrer

Zusammenfassung

Präzise Schneemessungen sind auch im Zeitalter der Satellitentechnik und des Einsatzes von Fernerkundungsmethoden eine grosse Herausforderung. Für die Abschätzung der Schneedeckenverteilung stellen dabei moderne Hilfsmittel, wie beispielsweise der Einsatz von Drohnen, die mit digitalen Kameras bestückt sind, eine wertvolle Hilfe dar. Die photogrammetrisch ermittelten Schneehöhen weisen räumlich eine viel höhere Genauigkeit auf als die Interpolation von manuell erfassten Bodenmessungen. Die Befliegung ganzer Einzugsgebiete ist jedoch aufwendig und kostspielig, sodass ein Einsatz dieser Messtechniken genau geplant werden muss. Für die Abschätzung des Schneewasseräquivalents eines Gebietes benötigt man zudem auch die räumliche Verteilung der Schneedichte, eine Messgrösse, die aus Drohnenmessungen nicht eruiert werden kann. Diesbezüglich sind konventionelle Messmethoden, wie sie seit 1943 im Wägital (SZ) vorgenommen werden, von grossem Wert. Solche kontinuierlich erfassten Messdatenreihen leisten einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des hydrologischen Geschehens in Einzugsgebieten. Mit Hilfe dieser Messreihen, die auch vom Klimabeobachtungssystem GCOS (siehe Kasten) als besonders wertvoll eingestuft wurden, können die Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte nachvollzogen werden. Diese Entwicklungen sind für verschiedenste Bereiche der Wirtschaft von grosser Bedeutung und leisten zudem ihren Beitrag zum besseren Verständnis der aktuellen Debatte im Bereich «Climate Change».

1. Klassische Abschätzung der Schneereserven in einem Einzugsgebiet

Um die Schneereserven in einem definierten Einzugsgebiet möglichst genau zu erfassen, werden verschiedene, gemäss GCOS (s. Kasten am Schluss des Beitrags) als «essenzielle Klimavariablen» definierten Messgrössen erhoben: die Ausdehnung der Schneedecke, die Schneehöhe und der Wasserwert bzw. das Schneewasseräquivalent (SWE). Als besonders aussagekräftig und wichtig für die Bestimmung der in der Schneedecke vorhandenen Wassermenge erwiesen sich dabei die Schneedichte und das SWE (*Rohrer et al.*, 2013).

Das SWE beschreibt dabei die Höhe der Wassersäule in Millimeter, die beim kompletten Schmelzen einer Schneedecke von bekannter Höhe und Dichte entstehen würde.

Zur Bestimmung des SWE werden in einem Schneeschacht mittels eines normierten Schneemesszylinders (z. B. ETH-Sonde) über die gesamte Schachthöhe Schneeproben genommen. Die einzelnen Schneeproben werden mit Hilfe von Federwaagen gewogen, die direkt den Wasserwert (SWE) der Schneeprobe liefern. Aus dem Wasserwert und der Höhe der Schneeproben lassen sich schliesslich die Schneedichten für die verschiedenen Schneeschichten sowie deren Mittelwert über die gesamte Schachthöhe bestimmen (*Bild 2*).

Bei der klassischen Abschätzung der Schneereserven für ein ganzes Einzugsgebiet werden an verschiedenen, für das Einzugsgebiet punkto Höhenlage, Exposition und Bodenbedeckung repräsentativen Messorten Werte für die Schneehöhe und das SWE ermittelt. Mittels verschiedener Analysemethoden werden diese Messwerte auf die verschiedenen Höhenstufen und Expositionen des Einzugsgebiets interpoliert und so wird die gesamten Schneereserven des Einzugsgebietes abgeschätzt. Schwierigkeiten liegen dabei in den kleinräumigen Variationen der Schneedecke, bedingt durch Faktoren wie Windverwehung, Abschattung und die saisonale Entwicklung innerhalb der Schneedecke.

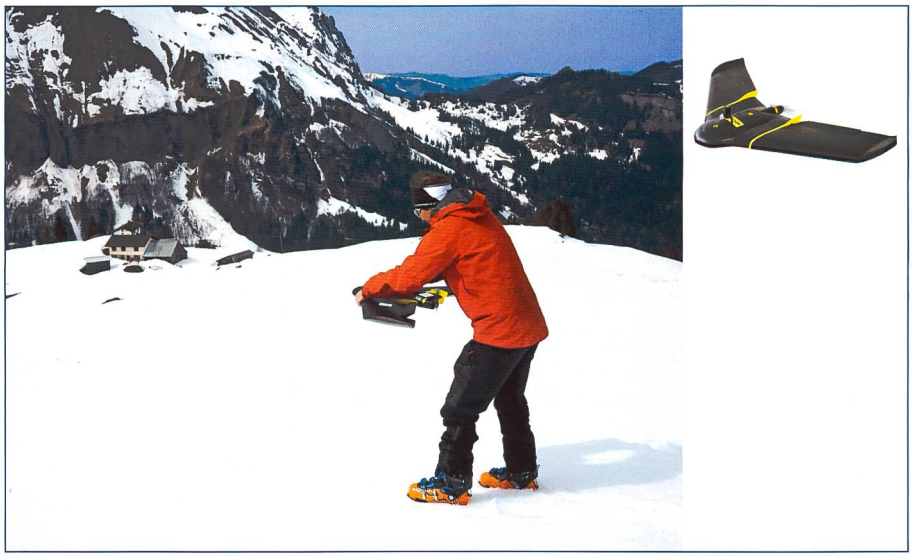

Bild 1. Start der Messdrohne eBee+ RTK von SenseFly während des Einsatzes im Wägital im April 2019 (Foto E. Hafner, SLF)

2. Langjährige Schneemessungen im Wägital

Im Wägital werden seit nunmehr 75 Jahren Schneemessungen durchgeführt. Das Tal liegt in den nördlichen Voralpen auf Schwyzer Kantonsgebiet, umgeben von Zürich-, Walen-, Klöntaler- und Sihlsee. Zu Beginn der 20er-Jahre des letzten Jahr-

Bild 2, oben. Schneedichtemessung mit der sog. ETH-Sonde.

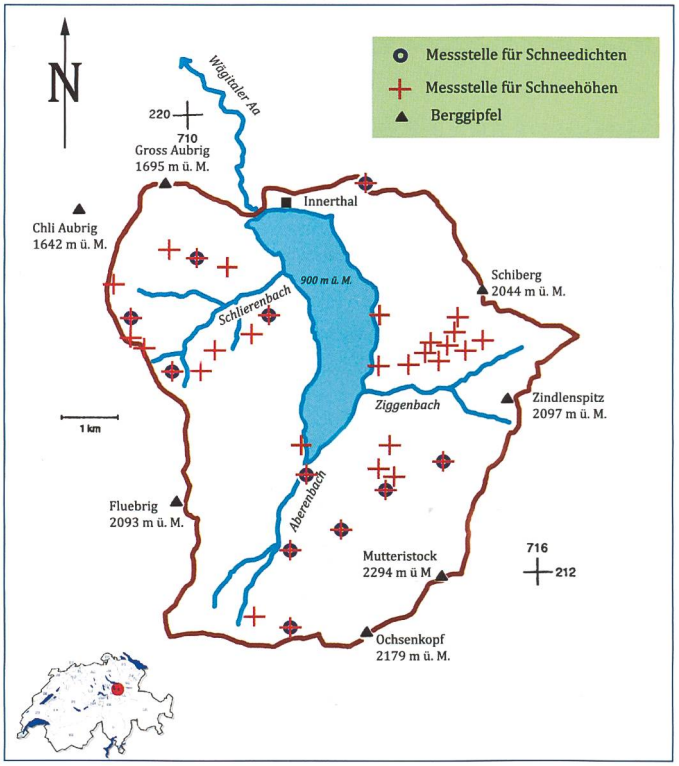

Bild 3, rechts. Einzugsgebiet des Wägitalersees mit dem eingetragenen Schneemessnetz.

hunderts wurde bei Innerthal, an der natürlichen Verengung zwischen Gross-Aubrig und Gugelberg, eine Staumauer errichtet und der Wägitalersee aufgestaut. Die mittlere Höhe seines Einzugsgebiets beträgt 1360 m ü. M. Dadurch bildet der Schneedeckenspeicher eine wichtige Komponente des hydrologischen Kreislaufs in diesem Gebiet und hat einen wesentlichen Einfluss auf das Abflussregime. Das Gebiet ist somit den «pluvio-nivalen Grundwasserregimes» zuzuordnen, zu denen in der Schweiz über zwei Drittel der Regimes zu zählen sind (*BAFU,* 2010).

Im Wägital wurde im Jahr 1943 mit den Schneemessungen begonnen. Sie dienten ursprünglich der Erstellung von Zuflussprognosen zum Pumpspeicherwerk des Wägitalersees, das in seinen ersten Betriebsjahren eines der grössten der Welt war. Die Schneedaten wurden insbesondere für die Abschätzung des hydroelektrischen Potenzials dieses Einzugsgebiets verwendet. Heutzutage erfolgt die Datenerhebung aus wissenschaftlichem Interesse. Mit Hilfe dieser Messreihen, die auch vom Klimabeobachtungssystem GCOS (s. Kasten am Schluss des Beitrags) als besonders wertvoll eingestuft wurden, können die Entwicklungen in den vergangenen Jahrzehnten nachvollzogen werden. Sie dienen aber auch zusätzlich als Messpunkt im schweizweiten Beobachtungsnetz für Schneewasseräquivalent.

Eine Übersicht über die Messstellen des Wägitaler Schneemessnetzes zeigt *Bild 3*.

Die Wasseräquivalents-Messreihe des Wägitals zählt mit ihren über 70 Jahren zu den längsten der Welt. Um den Fortbestand der Messreihe zu sichern, wurde sie vor einigen Jahren in das Global-Climate-Observing-System (GCOS) aufgenommen (s. Kasten am Schluss des Beitrags).

Die Erhebung der Schneemesswerte erfolgt jährlich um den 1. April. Das Einzugsgebiet wurde dabei bereits seit 1943 in zwei Höhenstufen von 900–1500 m ü. M. respektive 1500–2300 m ü. M. eingeteilt. Verschiedene statistische Auswertungen ergaben bloss einen sehr schwachen Negativtrend des Wasserwerts für die tiefer liegende Höhenstufe. Bei der höheren ist kein Trend auszumachen (vergl. *Noetzli und Rohrer*, 2014).

Einen Eindruck von den jährlichen Variationen gibt *Bild 5*. Am Stichtag 1. April zeigt sich in den Jahren 2006 und 2017 eine komplett veränderte Situation für die Messstellen im Bereich des südlichen See-Endes. Von diesen Bildern nun auf eine langjährige drastische Abnahme der Schneedecken-Wasserwerte im Wägital zu schliessen, greift jedoch zu kurz. Kurzfristige Schneefälle und Ausaperungsprozesse sind in dieser Jahreszeit eher die Regel als die Ausnahme im Messgebiet.

3. Drohnengestützte hoch aufgelöste Schneehöhenmessungen im Teilgebiet Rederten

Im Gebirge können die Schneehöhen bereits innerhalb von kurzen Distanzen sehr stark variieren. Deshalb ist die Extrapolation von einzelnen Schneehöhenmessungen auf grössere und komplex strukturierte Flächen schwierig. Im Jahr 2017 wurde vom WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) und der Meteodat GmbH ein GCOS-Projekt lanciert, das

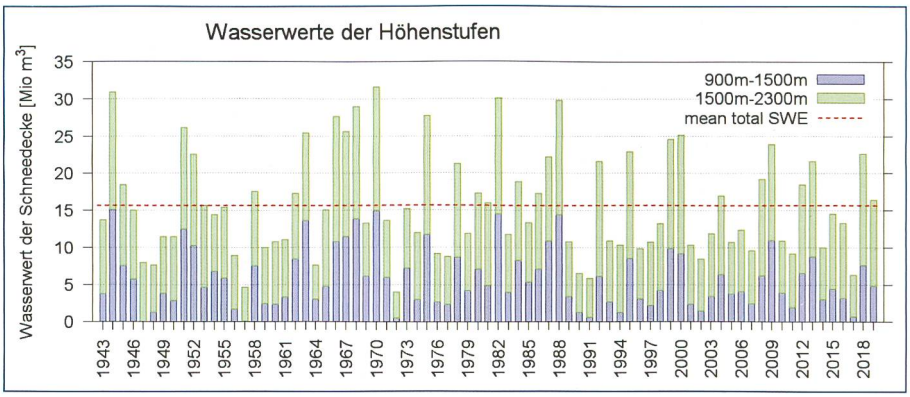

Bild 4. Wasserwerte der Schneedecke im Wägital am 1. April, aufgeteilt in zwei Höhenstufen (900–1500 m ü.M. und 1500–2300 m ü.M.). Rot gestrichelt ist das langjährige Mittel des Wasserwerts von beiden Höhenstufen zusammen dargestellt.

Bild 5. Schnee- und Witterungssituation am jährlichen Messtag (1. April) der Jahre 2006 (links) sowie 2017 (rechts).

untersucht, ob Drohnenmessungen für die Ergänzung von Handmessungen sinnvoll sind oder diese gar in Zukunft ersetzen können. Bei den drohnengestützten Schneehöhenmessungen kommen mit Digitalkameras bestückte Drohnen zum Einsatz. Anhand von Aufnahmen des gleichen Gebiets im Sommer und im Winter lassen sich Oberflächenmodelle ohne Schnee (Referenz) und mit Schnee erstellen. Die drohnenbasierten Schneehöhen werden dann als Differenz der Sommer- und Winter-Oberflächenmodelle berechnet. Erste wissenschaftliche Untersuchungen haben gezeigt, dass dezimetergenaue Schneehöhenmessungen mit Drohnen möglich sind (*Bühler et al.*, 2016, 2017, 2018)

Da es aus rechtlichen und finanziellen Gründen nicht möglich war, für dieses Projekt das gesamte Einzugsgebiet Wägital zu befliegen, wurde das Teilgebiet Rederten *(Bild 6)* ausgesucht, das auch gut mit konventionellen Messungen abgedeckt ist.

Am 5.10.2017 wurde die Sommerbefliegung mit der senseFly-eBee+Drohne durchgeführt. Diese Drohne verfügt über ein präzises Global Navigation Satellite System (GNSS), ein Positionierungssystem mit Echtzeitkorrektur (RTK). Der beflogene Perimeter wird begrenzt durch die Rinderweid im Südwesten, die Farenegg im Norden und das Gebiet Charen im Osten *(Bild 6)*. Die Höhenlage erstreckt sich von 1300 m ü.M. bis 1900 m ü.M. Die Winter-Messkampagnen fanden am 6.4.2018 respektive am 2.4.2019 statt. Dabei wurde derselbe Perimeter nochmals beflogen. Es wurden 5 bis 10 Passpunkte ausgelegt und mit einem Trimble-GeoXH mit Echtzeit-swipos-Korrektur mit einer Genauigkeit besser als 10 cm eingemessen. Diese Passpunkte wurden zur Überprüfung der Genauigkeit des Drohnen-GNSS verwendet. Es hat sich gezeigt, dass die Positionierungsgenauigkeit in x, y und z im Bereich von 5 bis 10 cm war. Zusätzlich wurden durch das SLF an 10 Standorten je 5 manuelle Schneehöhenmessungen als zusätzliche Referenzmessungen durchgeführt und mit GNSS vermessen. Diese Schneehöhenmessungen ergänzen die traditionellen Meteodat-Schneemessungen.

In jeder Flugkampagne wurden 1150 Fotos in einer durchschnittlichen Flughöhe von 150 m aufgenommen; damit wird ein Gebiet von 2.5 km^2 abgedeckt. Aus diesen Fotos wurden mit der Software Agisoft-Metashape-Professional Orthofotos mit 4 cm räumlicher Auflösung *(Bild 7)* und Oberflächenmodelle mit 10 cm räumlicher Auflösung erstellt. Als Differenz der Oberflächenmodelle vom Sommer und vom Winter wurden schliesslich die Schneehöhen berechnet *(Bild 8)*.

Die drohnenbasierten Schneehöhenkarten zeigen die kleinräumig grossen Schneehöhenunterschiede im Gebiet Charen und die relativ homogene Schneehöhenverteilung im Gebiet der Alpweiden. Anfang April 2018 lag im Durchschnitt über das ganze Gebiet 2.1 m Schnee. Anfang April 2019 dagegen lag im selben Gebiet im Durchschnitt nur 1.3 m Schnee. Die Schneehöhen der manuellen Messungen wurden mit den drohnenbasierten Schneehöhen verglichen. Die Abweichungen zwischen den manuell und den mit der Drohne gemessenen Schneehöhen liegen bei 10–20 cm. Dies stimmt mit den Resultaten von *Bühler et al.* (2016) überein.

Die grössten Fehlerquellen sind die Vegetation, z. B. Sträucher (Heidelbeer-, Alpenrosen, usw.) und Erlen. Diese wer-

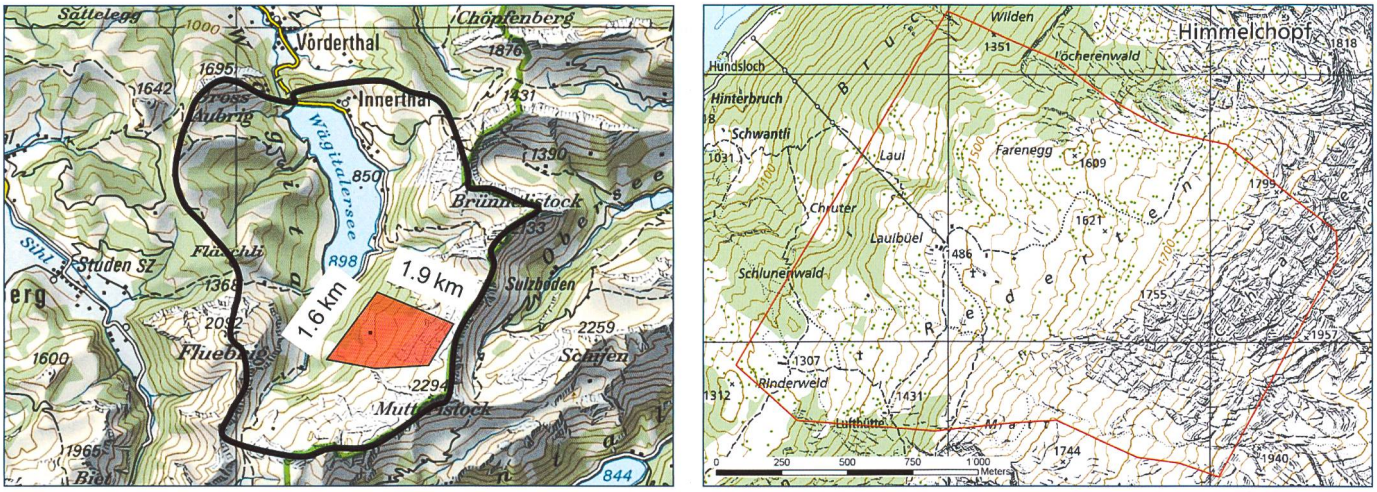

Bild 6. Untersuchungsgebiet Rederten, welches von der Drohne erfasst wurde (rotes Polygon). Hintergrundkarte pixmaps©2019 swisstopo (5704 000 000). Reproduziert mit der Bewilligung von swisstopo (JA100118).

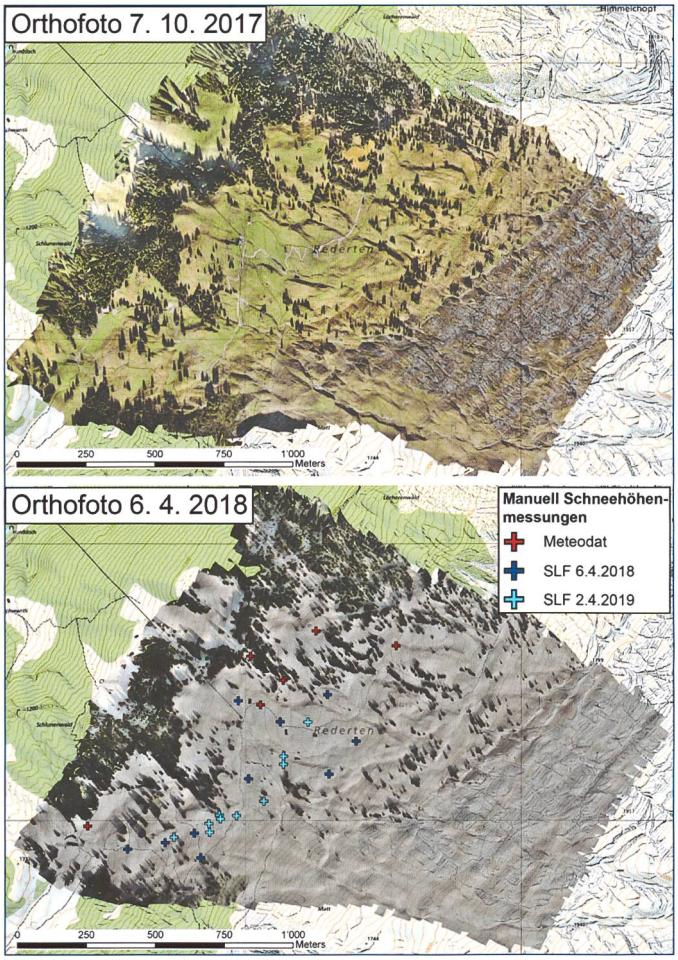

Bild 7. Drohnen-Orthofotos vom Sommer (oben) und Winter (unten) mit den Positionen der manuellen Schneehöhenmessungen. Hintergrundkarte pixmaps©2019 swisstopo (5704 000 000). Reproduziert mit der Bewilligung von swisstopo (JA100118).

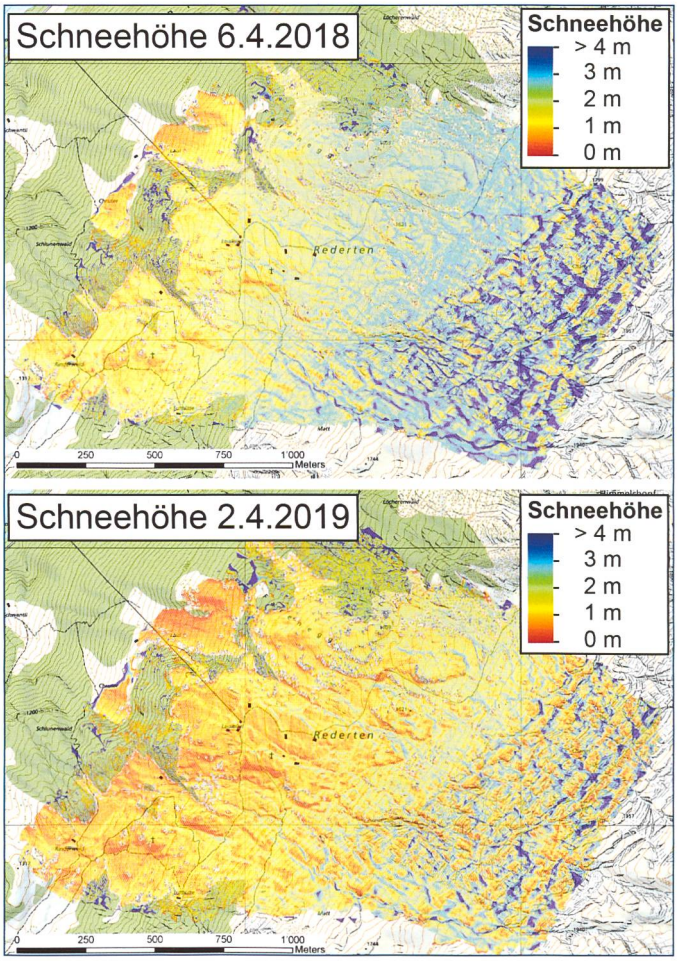

Bild 8. Drohnen-Schneehöhen Anfang April 2018 und 2019. Hintergrundkarte pixmaps©2019 swisstopo (5704 000 000). Reproduziert mit der Bewilligung von swisstopo (JA100118).

den durch den Schneedruck abgelegt und richten sich in der schneefreien Jahreszeit stark auf. Daher werden die Schneehöhen an diesen Standorten durch die drohnenbasierte Schneehöhenkartierung unterschätzt. Weitere Fehlerquellen sind durch den Wald und durch Gebäude verursachte Schatten, welche auch zu einer Unterschätzung der Schneehöhen führen können.

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Resultate des Pilotprojekts aus der Messkampagne 2017–2019 im Wägital zeigen, dass drohnengestützte Abschätzungen der Schneehöhen ein grosses Potenzial aufweisen, zukünftig manuelle Schneehöhenmessungen abzulösen oder mindestens zu ergänzen. Dies deshalb, weil diese Methode die hochvariable Schneehöhenverteilung in extrem hoher räumlicher Auflösung erfassen kann, was manuell unmöglich ist. Allerdings ist es im Moment noch nicht möglich, ein ganzes Tal wie beispielsweise das Wägital, mit einer Drohne des verwendeten Typs zu vermessen, da die Drohne immer «line of sight» geflogen werden muss und somit zu viele verschiedene Startpunkte nötig wären und die Akkuleistung noch ungenügend ist. Fehlerquellen bei der Schneehöhenmessung mit Drohnen in Messgebieten wie dem Wägital sind Vegetationsbedeckung, Schattenwurf und stark variierender Untergrund, wie er zum Beispiel für

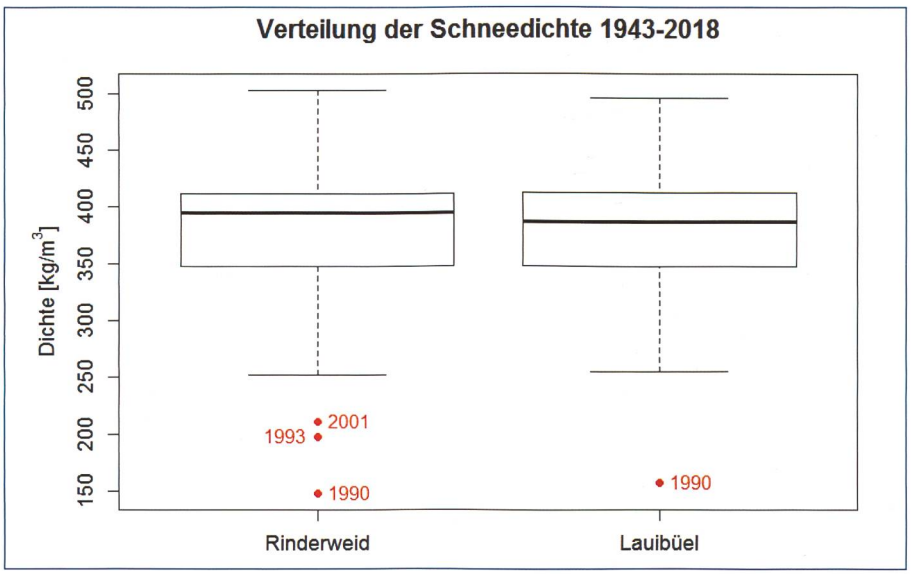

Bild 9. Box-Plot-Darstellung der ermittelten Schneedichten für die Messorte Rinderweid und Lauibüel über die Messreihe 1943–2018 (jeweils am 1. April).

die oberen Bereiche des Einzugsgebiets typisch ist. Der höhere Teil des Inneren Wägitals, v. a. das Gebiet des Schibergs sowie des Lachen- und Redertenstocks, ist von einer typischen Kalk- und Karstlandschaft geprägt, in der sich riesige Karrenfelder neben bis zu 50 m tiefen Dolinen finden (s. *Lepori*, 1993).

Mit der heutigen Drohnentechnologie sind eine genaue Bestimmung der Schneedichte sowie die Abschätzung des Wasseräquivalentes der gesamten Schneeauflage in Einzugsgebieten wie dem Wägital jedoch nicht möglich. Entscheidende Faktoren sind dabei auch topografische und geologische Eigenschaften des Gebiets. So wäre es in Gebieten mit gewissen kristallinen Gesteinen im Untergrund (z. B. Granit) unter Ausnutzung der von ihnen emittierten radioaktiven Strahlung möglich, mittels geeigneter Messtechnik Schneedichten zu bestimmen (s. *Dewalle* und *Rango*, 2008). Im Kalkgebiet des Wägitals ist dies jedoch so nicht umsetzbar.

Bild 9 zeigt die Auswertung der langjährigen Schneedichten für die (manuellen) Messorte Rinderweid und Lauibüel im Wägital in Form einer «Box-Plot»-Darstellung. Es wird deutlich, dass die mittleren Schneedichten (50 % der Werte) sich bei beiden Messstellen in einem ähnlichen Rahmen bewegen, zwischen ca. 350 kg m^3 und 420 kg/m^3. Die Variabilität über die gesamte Messreihe von 1943 bis 2018 ist jedoch durchaus ansehnlich, wurden doch Werte von ca. 250 kg/m^3 bis zu 500 kg/m^3 eruiert.

Zur Bestimmung der gesamten Wasservorräte der Schneedecke im Wägital sind aber neben den möglichst genauen Schneehöhen insbesondere auch möglichst gute Werte für die Schneedichten notwendig. Manuelle Messungen an verschiedenen Messorten (s. *Bild 3*) scheinen diesbezüglich aus heutiger Sicht unabdingbar. Mittels verschiedener Analysemethoden können aus diesen Messdaten sowohl die Höhenabhängigkeit als auch die variierenden Werte je nach Exposition bestimmt werden (vergl. *Noetzli* und *Rohrer*, 2014). Die innovativen und vielversprechenden Messmethoden aus der Luft können diese Schneedichten-Werte mit präzisen Schneehöhenberechnungen ergänzen, um so noch besser auf die Wasservorräte schliessen zu können.

Stichwort «GCOS»: Global Climate Observing System

Als Resultat der 2. Weltklimakonferenz 1990 in Genf etablierten die World Meteorological Organisation (WMO) und andere das Global Climate Observing System (GCOS). Ziel dieses internationalen Programms ist die Sicherung und die Koordination langjähriger Messreihen sowie die Ermöglichung des Zugangs zu den Messdaten für alle Interessenten. Das Klimabeobachtungssystem bezieht sich auf das gesamte Klimasystem und umfasst Daten zur Atmosphäre, den Ozeanen und zur Landoberfläche welche fundierte Aussagen über das Klima ermöglichen. Die Messdaten leisten so auch einen wertvollen Beitrag zum Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Für die Koordination der Klimabeobachtungen in der Schweiz ist das Swiss GCOS Office der MeteoSchweiz zuständig. Infos unter www.gcos.ch und www.meteodat.ch/gcos.

Literatur

M. Rohrer, N. Salzmann, M. Stoffel, A. V. Kulkarni. Missing (in-situ) snow cover data hampers climate change and runoff studies in the Greater Himalayas, Science of the Total Environment, vol. 468–469, pp. S. 60–70, 2013.

C. Noetzli, M. Rohrer. Schneemessungen in alpinen Einzugsgebieten im Zeichen des Klimawandels, «Wasser Energie Luft» – 106. Jahrgang, Heft 4, S. 283–287, 2014.

M. Lepori. Langjährige Halbjahres-Wasserbilanzen im Einzugsgebiet des Wägitals, «Berichte und Skripten», Geographisches Institut der ETH Zürich, 1993.

BAFU, 2010. Grundwasser-Quantität: Grundwasserbulletin. www.umwelt-schweiz.ch Grundwasser-Quantität. Bundesamt für Umwelt, 2010.

D.R. DeWalle , A. Rango. Principles of snow hydrology, Cambridge, Cambridge University Press. S. 118–145, 2008.

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

Y. Bühler, M. S. Adams, A. Stoffel, R. Boesch. 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.

Y. Bühler, M. S. Adams, R. Bösch A. Stoffel. 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.

Anschrift der Verfasser:
Christian Noetzli, noetzli@meteodat.ch
Daniela Lorenzi, lorenzi@meteodat.ch
Dr. *Mario Rohrer*, rohrer@meteodat.ch
Meteodat GmbH, Technoparkstr. 1
CH-8005 Zürich

Dr. *Yves Bühler*, buehler@slf.ch
Andreas Stoffel, stoffel@slf.ch
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF, Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos Dorf

Hydraulische Lösungen - alles aus einer Hand

Planen - entwickeln - produzieren

Als innovatives Schweizer Traditionsunternehmen sind wir spezialisiert auf hydraulische Steuerungs- und Antriebstechnik. Ob grosse, komplexe Herausforderungen oder Einzelkomponenten: Jeder Auftrag ist für uns der Wichtigste.
Bei Fragen, Anliegen oder Projekten freut es uns, für Sie da zu sein.

Hagenbuch Hydraulic Systems AG, Rischring 1, CH-6030 Ebikon, Tel. +41 (0)41 444 12 00, Fax +41 (0)41 444 12 01
info@hagenbuch.ch, www.hagenbuch.ch

HAGENBUCH
Hydraulic Systems

Ihre Anlage
ist wie keine andere.

Wir bringen Ihr Wasserkraftwerk in die Zukunft.
www.rittmeyer.com

Mess- und Leittechnik für die Wasser- und Energiewirtschaft

rittmeyer
BRUGG