

Planungstools für den Gletscherschutz durch ein bodenunabhängiges Beschneiungssystem

Felix Keller, Christine Seupel, Marin Deflorin, Johannes Oerlemans, Peter Stuber, Dieter Müller

Zusammenfassung

In ariden Gebirgsregionen hängt die Existenz von mehreren Millionen Menschen weltweit vom Schmelzwasser der Gletscher ab. Das Projekt «MortAlive» entwickelt eine Methode, um das Abschmelzen der Gletscher durch die Produktion von künstlichem Schnee zu verlangsamen. Dadurch soll den betroffenen Siedlungen eine «Verschnaufpause» verschafft werden, bis globale Klimaschutzmassnahmen greifen.

Dafür ist eine verlässliche Planung auf Grundlage der natürlichen Rahmenbedingungen von entscheidender Bedeutung. Dieser Beitrag stellt zwei Planungstools vor, die die Schneeproduktion eines Schneiseils simulieren und deren Auswirkungen auf die Massenbilanz eines Gletschers berechnen. Am Beispiel des Morteratschgletschers wird deren Einsatz gezeigt. Die entscheidende Innovationen des Beschneiungssystems ab einem Seil liegen in seiner Bodenunabhängigkeit und seiner massiv erhöhten Schneieleistung ohne Einsatz von elektrischem Strom. Angesichts der grossen Dynamik der zurzeit ablaufenden Klimaveränderungen gibt es noch weitere Einsatzszenarien wie z.B. die Beschneiung im kriechenden Permafrost oder die Erstellung von grossflächigen Schneedepots. Dank der Unterstützung durch die Schweizerische Innovationsförderagentur Innosuisse ist es gelungen, die dazu notwendige Technologie inkl. der beiden hier vorgestellten Dimensionierungstools COSIPY ArtSnow und SnowCableSim zu entwickeln, die nun für die Praxis einsatzbereit sind.

Résumé

Dans les régions montagneuses arides, l'existence de plusieurs millions de personnes dans le monde dépend de l'eau de fonte des glaciers. Le projet « MortAlive » développe une méthode permettant de ralentir la fonte des glaciers en produisant de la neige artificielle. L'objectif est de permettre aux populations concernées de « souffler » jusqu'à ce que les mesures globales de protection du climat fassent effet.

Une planification fiable basée sur les conditions naturelles est essentielle à cet effet. Cet article présente deux outils de planification qui simulent la production de neige à partir d'une corde à neige et calculent ses effets sur le bilan de masse d'un glacier. Leur utilisation est illustrée à l'aide de l'exemple du glacier de Morteratsch. Les principales innovations du système d'enneigement à partir d'une corde à neige résident dans son indépendance au sol et dans sa capacité d'enneigement considérablement accrue sans utilisation d'énergie électrique. Compte tenu de la grande dynamique des changements climatiques en cours, il existe encore d'autres scénarios d'application, comme l'enneigement dans le pergélisol fluant ou la création de dépôts de neige à grande échelle. Grâce au soutien d'Innosuisse, l'agence suisse pour l'encouragement de l'innovation, il a été possible de développer la technologie nécessaire à cet effet, notamment les deux outils de dimensionnement présentés ici, COSIPY ArtSnow et SnowCableSim, qui sont désormais prêts à être utilisés dans la pratique.

1. Einleitung

Schnee ist ein hervorragender Gletscherschutz (Oerlemans, Haag & Keller, 2017). Die Herstellung von technischem Schnee mit herkömmlichen Schneerzeugern ist insbesondere in Skiregionen weit verbreitet, erfordert jedoch einen stabilen Untergrund. Im Rahmen eines Innosuisseprojekts wurde nun erstmals ein bodenunabhängiges Beschneiungssystem (Bild 1) entwickelt, welches u.a. zum Schutz von Gletschern eingesetzt werden kann. Ein solches System, bestehend aus Schneerzeugern ab Seil, muss neben den baulichen und geotechnischen Herausforderungen auch hohe Ansprüche hinsichtlich der Schnee-Produktionsmengen und des Energieverbrauchs erfüllen. Die nachhaltige und umfangreiche Schneeproduktion ist für den Schutz von gefrorenen



Bild 1: Testinstallation der Beschneiung ab Seil (bodenunabhängiges Beschneiungssystem) während der Versuche im Winter 2020/21 und 2022/23 (Bild: A. Bachmann).

Süßwasserspeichern in ariden Gebirgsregionen von zentraler Bedeutung (Pritchard, 2019). So wird beispielsweise beim Gletscherschutzprojekt MortAlive von einer Produktivität von ca. 30 000 Tonnen Schnee pro Tag, notabene ohne Einsatz von elektrischem Strom, ausgegangen (Keller, Müller, Levy & Seupel, 2021).

Bevor ein solches Vorhaben realisiert werden kann, müssen bereits bei der Planung eines bodenunabhängigen Beschneiungssystems die natürlichen Rahmenbedingungen sorgfältig überprüft werden. Hierzu wurden im Rahmen eines Innosuisseprojekts (Projekt Nr. 32024.1) an der Fachhochschule Graubünden (FHGR) und an der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) zwei Tools entwickelt, welche hier vorgestellt werden. Ziel ist es, für einen spezifischen Standort/Gletscher zu ermitteln, ob dieser mit einer Beschneiung mittels eines bodenunabhängigen Systems gepflegt werden und so als gefrorener Süßwasserspeicher über eine gewisse Zeitspanne länger erhalten bleiben kann. Zudem soll abgeschätzt werden, wie die technischen Komponenten der Beschneiungsanlage auszulegen sind, um den Gletscher über den gesamten Sommer schneedeckt zu halten. Dabei stellen sich folgende konkrete Fragen:

- Sind die meteorologischen Bedingungen für eine ausreichende Schneeproduktion gegeben und welche Fläche des Gletschers soll beschneit werden (Standort und Grösse)?
- Ist ausreichend Wasser für die Beschneiung verfügbar und woher wird es bezogen?
- Wie muss die technische Auslegung der Anlage gewählt werden, um ausreichend Schnee zu produzieren?
- Welchen Effekt hat die Schneeproduktion auf die Massenbilanz des Gletschers?

2. Planungstools für eine Gletscherbeschneiung

2.1 Vorgehensweise

Die beiden entwickelten Tools sind COSIPY ArtSnow, eine Weiterentwicklung der FHGR des von Sauter (2020) entwickelten «open-source COupled Snowpack and Snow and Ice surface energy and mass balance model in PYthon» (=COSIPY), sowie das an der FHNW mit Matlab entwickelte Simulationstool SnowCableSim. Die oben aufgeführten Fragestellungen können nur vollständig geklärt werden, wenn diese Modelle zusammenspielen, da beide Modelle auf Inputs des jeweils anderen Programms angewiesen sind.

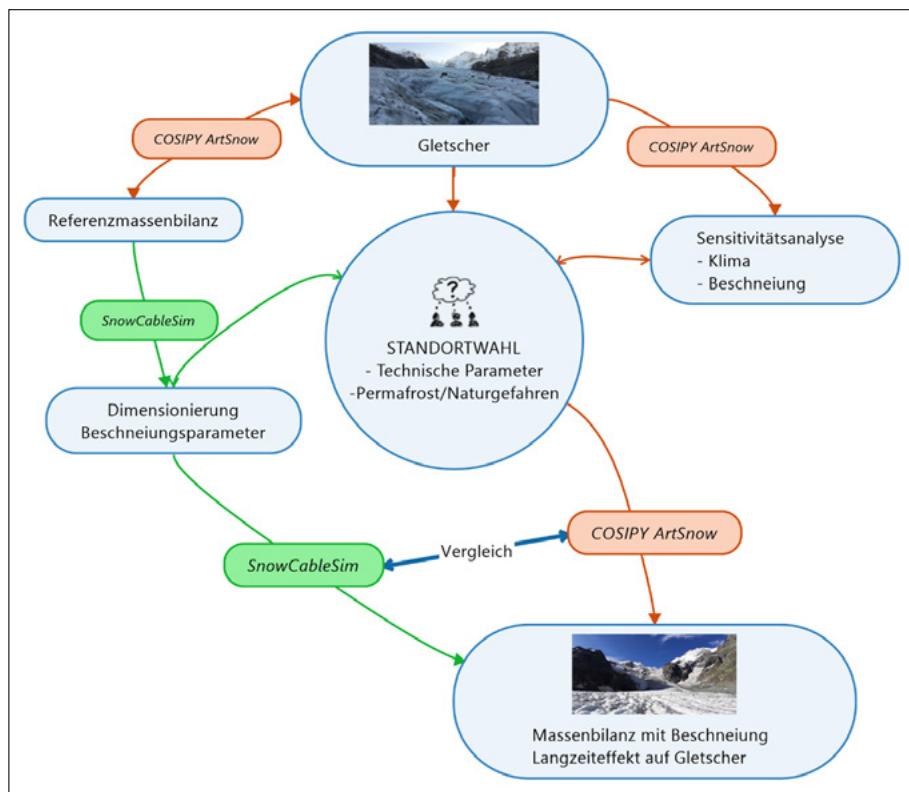


Bild 2: Vorgehensweise der Gletscheranalyse. Rote Kästchen beinhalten Arbeitsschritte mit COSIPY ArtSnow, grüne Kästchen mit dem SnowCableSlim.

Bild 2 zeigt schematisch die Vorgehensweise der Gletschermodellierungen. Zuerst wird mit COSIPY ArtSnow eine Referenzmassenbilanz für den betroffenen und die umliegenden Gletscher berechnet. Diese wird anhand von gemessenen meteorologischen Daten, Ablationsmessungen und allenfalls bereits vorliegenden glaziologischen Studien kalibriert und ihre Sensitivität auf Klimaänderungen getestet. Aus dieser Massenbilanz kann der Abfluss des gesamten Gletschers (Schmelzwasser) oder eines bestimmten Einzugsgebiets bestimmt werden. Das Wasservolumen wird dann als Inputparameter für die Beschneiung im Tool SnowCableSim genutzt. Das Tool SnowCableSim ist hingegen auf die Dimensionierung der Beschneiungsanlage fokussiert. SnowCableSim berücksichtigt alle technischen Parameter der Beschneiung und modelliert auf der Grundlage der COSIPY Ergebnisse eine Massenbilanz einschliesslich Schneehöhe und Schneeverteilung auf der für die Beschneiung vorgesehenen Fläche. Um die Dimensionierung der Beschneiungsanlage zu ermitteln, werden mehrere Modellierungen mit dem SnowCableSim inklusive einer Parameteranalyse vorgenommen. So kann die minimale Schneemenge abgeschätzt werden, die für den Gletscherschutz notwendig ist. Diese Schneemenge wird wiederum für die COSIPY-ArtSnow-Berechnungen gebraucht, um auch mit diesem Modell die Massenbilanz mit der zusätzlichen

Beschneiung zu berechnen, sodass die Ergebnisse der beiden Modelle miteinander verglichen werden können. Eine Abschätzung des Langzeiteffekts der Beschneiung auf die Gletschergrösse ist mit diesen beiden Programmen noch nicht möglich, könnte aber in der Zukunft mit einem Gletscherfliessmodell, wie z.B. dem OGGM «Open Global Glacier Model (OGGM, 2020)», durchgeführt werden.

Die beiden hier vorgestellten Tools reichen für die Bestimmung eines günstigen Standorts und die Dimensionierung einer Beschneiungsanlage noch nicht aus. Es müssen auch die bautechnischen Rahmenbedingungen abgeklärt werden (Bild 2), wobei insbesondere auch Permafrostvorkommen und Naturgefahren zu beachten sind.

2.2 Gletschermodellierung mit COSIPY ArtSnow

Grundlage für COSIPY ArtSnow ist das COSIPY-Modell, welches von einer breit abgestützten internationalen Community entwickelt und als Open Source Modell genutzt werden kann (Sauter, 2020; COSIPY Tutorial, 2021). Der Programmcode (inklusive der für dieses Projekt vorgenommenen Ergänzungen für die Beschneiung) ist open source auf GitHub verfügbar (GitHub COSIPY, 2021).

COSIPY ArtSnow ist ein mehrschichtiges Energie- und Massenbilanzmodell für Schneedecke und Eisoberfläche, basierend

auf Python. Es berechnet die Energiebilanzen an der Schnee- bzw. Eisoberfläche und ist mit einem adaptiven vertikalen Mehrschichtmodul für den Untergrund gekoppelt. Mit COSIPY ArtSnow wird also in einem ersten Schritt eine Referenzmassenbilanz im Sinne der aktuellen Massenbilanz des ganzen zu analysierenden Gletschers berechnet. Daraus kann das Schmelzwasser des ganzen Gletschers oder von bestimmten Einzugsgebieten (z.B. oberhalb eines Speichersees) und daraus das verfügbare Wasservolumen abgeleitet werden. Im nächsten Schritt können dann mit dem Zusatzmodul COSIPY ArtSnow Modellierungen der Massenbilanz mit Beschneiung durchgeführt werden, um die lokale Wirkung der Beschneiung auf den Gletscher zu bestimmen.

COSIPY ArtSnow benötigt meteorologische wie auch statische topographische Eingangsdaten. Zur Modellierung wird ein digitales Höhenmodell (DEM) zur Berücksichtigung von topographischen Effekten auf die kurzwellige Strahlungsbilanz sowie die Gletscherfläche benötigt. Weiter werden Daten zu Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, kurzwelliger Strahlung und Bewölkung von möglichst nahegelegenen Wetterstationen oder aus Modellen spezifisch für das COSIPY ArtSnow Modell aufbereitet.

2.3 Dimensionierung der Beschneiungstechnik mit SnowCableSim

Das Matlab-Programm SnowCableSim wurde entwickelt, um die künstliche Beschneiung spezifischer Gletscherabschnitte mit Hilfe von Schneiseilen zu simulieren. Mit Hilfe der Simulationsresultate kann eine Beschneiungsanlage dimensioniert werden. Bei Bedarf kann zudem ein Speichersee mitsimuliert werden, der das nötige Wasser für die Beschneiung liefert. Das in den See fliessende Schmelzwasser wird mit dem oben beschriebenen COSIPY-ArtSnow-Modell berechnet.

Das Programm SnowCableSim ermöglicht es, die folgenden Größen respektive Eigenschaften der Gletscherbeschneiung zu bestimmen:

- Zuwachs von Schnee, natürlich und künstlich, zeitlich und örtlich aufgelöst
- Abschmelzen von Schnee und Eis, zeitlich und örtlich aufgelöst
- resultierende örtliche und zeitliche Verteilung der Schneemasse auf dem Gletscherfeld
- Wasserverbrauch

Das geometrische Setup des Modells ist in Bild 3 dargestellt. Die Input-Parameter wer-

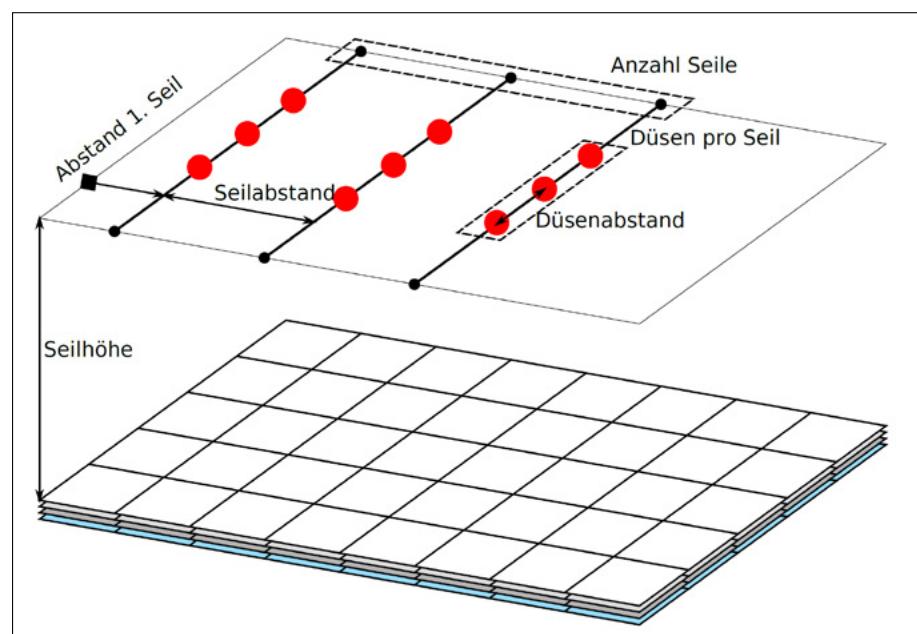


Bild 3: Positionierung der Düsen in der Applikation SnowCableSim.

den in einem CSV-File zusammengestellt und eingelesen. Es sind dies:

- Meteorologische Daten von mindestens einem Jahr: Luft-Temperatur, -Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung, kurz- und langwellige Strahlung in/out, natürlicher Schneefall, Luftdruck und Eisschmelze (optional)
- Setup des Beschneifeldes: Größe und Ausrichtung des Feldes, Anzahl und Höhe der Schneiseile, Anzahl und Position der Düsen (siehe Bild 3), Gletscherbewegung (Minium & Maximum)
- Düsen und Tropfen: Düseneigenschaften (Durchfluss, Sublimationsanteil, ...), Spektrum der Tropfengrößen, Standardabweichung der Position der auftreffenden Schneekügelchen (in Abhängigkeit der Flugdistanz)

- Beschneiungskriterien: Feuchtkugelgrenztemperatur, Windgeschwindigkeit (optional), Wassertemperatur (optional, noch nicht implementiert)
- Speichersee (optional, verfügbares Wasservolumen mit COSIPY ArtSnow berechnet)

Neben den oben genannten Parametern können weitere Einstellungen vorgenommen werden. So kann beispielsweise die Simulation eines Speichers ein- und ausgeschaltet werden oder es kann ausgewählt werden, ob der Tropfenflug vereinfacht durch eine rechenzeitsparende Approximation berechnet werden soll.

Die Berechnung erfolgt in den durch das Meteo-File vorgegebenen Zeitschritten. Für jedes Seil wird geprüft, ob die Beschnei-

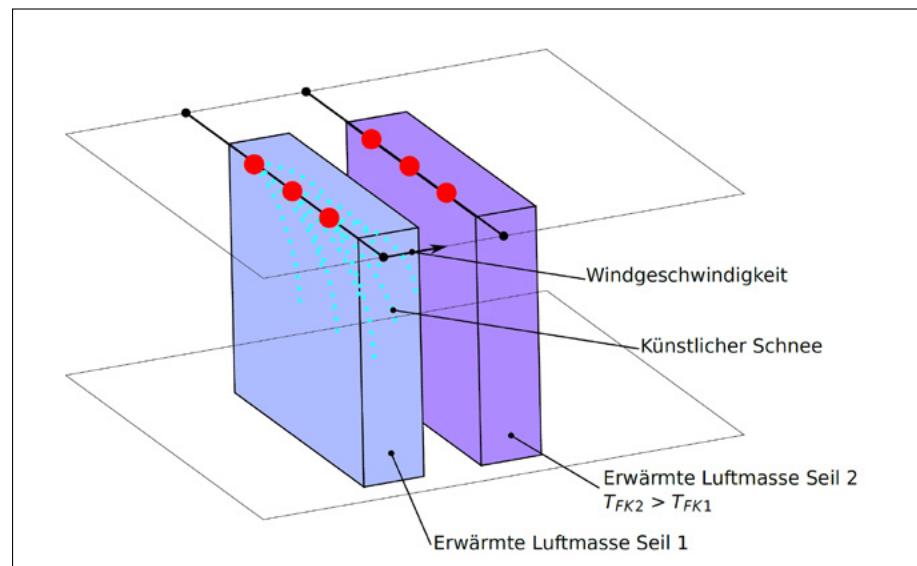


Bild 4: Erhöhung der Feuchtkugeltemperatur durch die Beschneiung und die Beeinflussung der nachfolgenden Seile.

ungskriterien erfüllt werden. Die relevanten Kriterien sind dabei die lokale Feuchtkugeltemperatur, die Wasserverfügbarkeit und eine ausreichende Windgeschwindigkeit. Aufgrund der Temperaturerhöhung bei der Eisbildung kann die Schneeproduktion der Düsen eines Seils die Schneeproduktion der Düsen auf den nachfolgenden Seilen beeinflussen. Die Beschneiungskriterien werden somit für jedes Seil individuell geprüft. Bild 4 zeigt schematisch, wie dies im Modell berücksichtigt wird (gegenseitige Beeinflussung optional auch abschaltbar).

Anschliessend wird die Flugdistanz der Tropfen respektive der Eiskügelchen berechnet. Dies geschieht entweder über eine Differentialgleichung oder vereinfacht mittels einer Approximation. Die Landepositionen der Schneekügelchen werden diskretisiert und die Schneekügelchen werden auf das zugehörige Feld addiert. Parallel zur künstlichen Schneebildung wird mithilfe der Energiebilanz und anhand der Sonneneinstrahlung berechnet, wie viel Schnee und Eis abschmilzt respektive wie viel bei natürlichem

Schneefall dazukommt. Da das Modell in Schichten aufgebaut ist (siehe Bild 3), kann auch die Albedo abhängig vom Schnee-Alter berücksichtigt werden. Die Gletscherbewegung variiert entlang der Breite des Gletschers und wird mittels einer Parabel angenähert. Diese wird durch den maximalen Wert in der Mitte des Gletschers (zentrale Fliesslinie) und dem minimalen Wert am Rand definiert.

Mit dem für die Beschneiung berechneten Wassermassenstrom kann zusammen mit dem aus COSIPY ArtSnow berechneten Massenstrom des nachfliessenden Schmelzwassers der zeitliche Verlauf des Seestands bestimmt werden.

3. Anwendungsbeispiel Morteratschgletscher

3.1 Ausgangslage

Was passiert, wenn man den Morteratschgletscher mit künstlichem Schnee schützt? Diese zentrale Frage steht seit 2015 im Raum

und wurde im Auftrag der Gemeinde Pontresina genauer untersucht. Wenn man das massenweise im Sommer anfallende Schmelzwasser des Gletschers möglichst hoch oben sammeln könnte und im Winter in Form von Schnee dem Gletscher im sogenannten Zehrgebiet zurückgeben würde, könnte das Gletscherschmelzen verzögert werden – der Begriff «Schmelzwasser-Recycling» entstand. Dabei wirkt der Schnee infolge seiner Reflexions- und Isolationswirkung als lokaler 100-prozentiger Schutz vor der Eisschmelze. Es folgten weitere Studien und Feldversuche im Oberengadin, insbesondere wurde eine glaziologische Machbarkeitsstudie durchgeführt (Oerlemans, Haag & Keller, 2017). In Bild 5 ist eine 3D-Ansicht für die Situation gemäss dieser Studie im Jahre 2040 mit und ohne Beschneiung ersichtlich. Am Morteratschgletscher (im Bild rechts) besteht die Möglichkeit, das Schmelzwasser des Persgletschers (links) rund 200 Höhenmeter über einer möglichen Beschneiungsfläche von ca. 0,8 km² in einem Gletschersee zu sammeln. Die gewählte Beschneiungs-

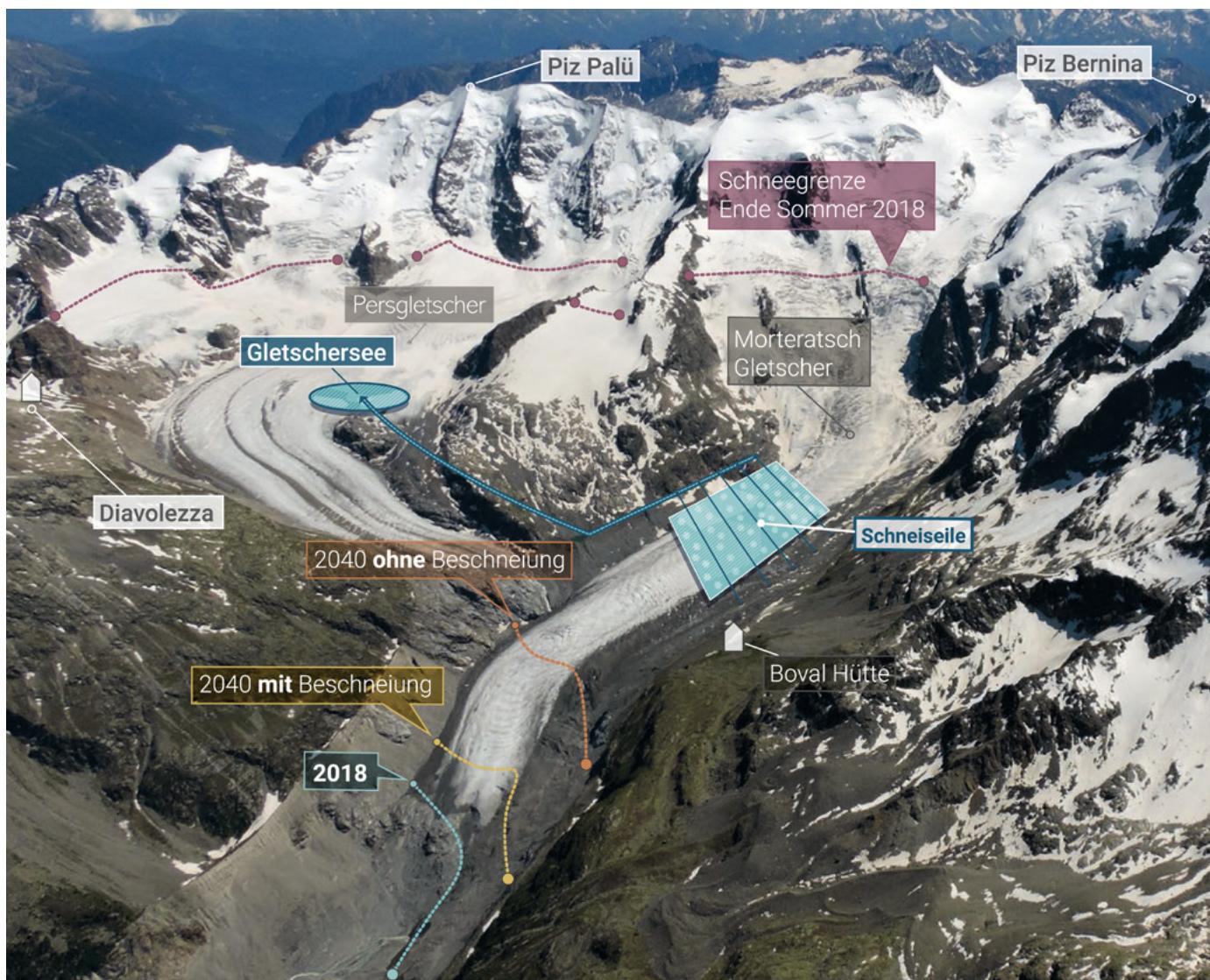


Bild 5: 3D-Ansicht der Ergebnisse der glaziologischen Machbarkeitsstudie (Oerlemans, Haag, & Keller, 2017).

fläche liegt im Schmelzgebiet des Gletschers. Durch die Beschneiung soll ein Wechsel der Oberflächeneigenschaften von Eis zu Schnee erreicht werden, was die Albedo erhöht. Aus baulicher Sicht wurde ein möglichst flaches Gelände gewählt.

3.2 Ergebnisse und Erkenntnisse der Modellierung

Im Rahmen ihres 150-jährigen Jubiläums finanzierte die Graubündner Kantonalbank die sogenannte «MortAlive Vorstudie» (Keller, Müller, Levy & Seupel, 2021) bei welcher unter anderem die beiden hier vorgestellten Tools SnowCableSim und COSIPY ArtSnow zum Einsatz kamen. Dabei wurde rechnerisch überprüft, ob unter den vorliegenden natürlichen Rahmenbedingungen die von Oerlemans, Haag & Keller (2017) gemachte Annahme einer ganzjährigen Schneedeckung durch technische Beschneiung erfüllt werden kann. Folgende Fragen wurden beantwortet:

1. Welche Schmelzwassermengen stehen zu welchem Zeitpunkt zur Verfügung?

2. Wieviele Schneitage sind unter Berücksichtigung der vorliegenden meteorologischen Bedingungen und der gegenseitigen Beeinflussung der Schneiseile notwendig, damit das zur Verfügung stehende Schmelzwasser in der vorgesehenen Fläche verschneit werden kann?
3. Können mit den produzierten Schneemassen die unter der beschneiten Fläche liegenden Eismassen ganzjährig und flächendeckend geschützt werden?

Zur Frage 1 (Wasserverfügbarkeit): Bild 6 zeigt das im Sommer 2017 angefallene Schmelzwasser, welches vorwiegend in der Zeit von Juni bis September/Oktober anfiel (blaue Linie). Eine Beschneiung ist aber aufgrund der meteorologischen Bedingungen grundsätzlich nur in den Monaten Oktober/November bis April/Mai möglich (orange Linie). Für die Wasserversorgung ist deshalb ein Speicherbecken vorgesehen. Nicht berücksichtigt wurde das Regenwasser, welches durchaus relevant ist, jedoch ebenfalls in den Sommermonaten anfällt.

Zur Frage 2 (Schneeproduktion): Entsprechend den technischen Spezifikationen der neu entwickelten Schneiseile wird davon aus-

gegangen, dass das Gletscherfeld mit acht Seilen à je 100 Schneiddüsen (Massenstrom pro Düse bei 0,5 kg/s) bei einer max. Feuchtigkeitstemperatur von -2 Grad beschneit wird. Die mit SnowCableSim berechnete Schneeproduktion ist in Bild 7 (grüne Linie) ersichtlich. Demnach wird bei der vorgesehenen Konfiguration das zur Verfügung stehende Wasser in 72 Tagen verschneit. Damit kann auch unter den zu erwartenden wärmeren Klimabedingungen davon ausgegangen werden, dass genügend Reserven zur Schneeproduktion vorliegen. Über den Vergleich mit dem natürlichen Schneefall (rote Linie) wird auch die Größenordnung des Einflusses ersichtlich: Mit dem angestrebten Gletscherschutz wird auf dieser ca. 10 Prozent des gesamten Gletschers umfassenden Fläche etwas mehr als der doppelte jährliche natürliche Schneefall produziert.

Damit kann nun die Frage 3 (Gletscherschutz erfüllt?) beantwortet werden: Die blaue Linie in Bild 7 zeigt die auf dem Gletscher resultierende Schneemenge. So bleibt während der ganzen Zeitspanne (Sommer 2017, 2018 und 2019) die Fläche schneedeckt, womit der Gletscher zuverlässig geschützt ist. Dies wurde mit dem in COSIPY

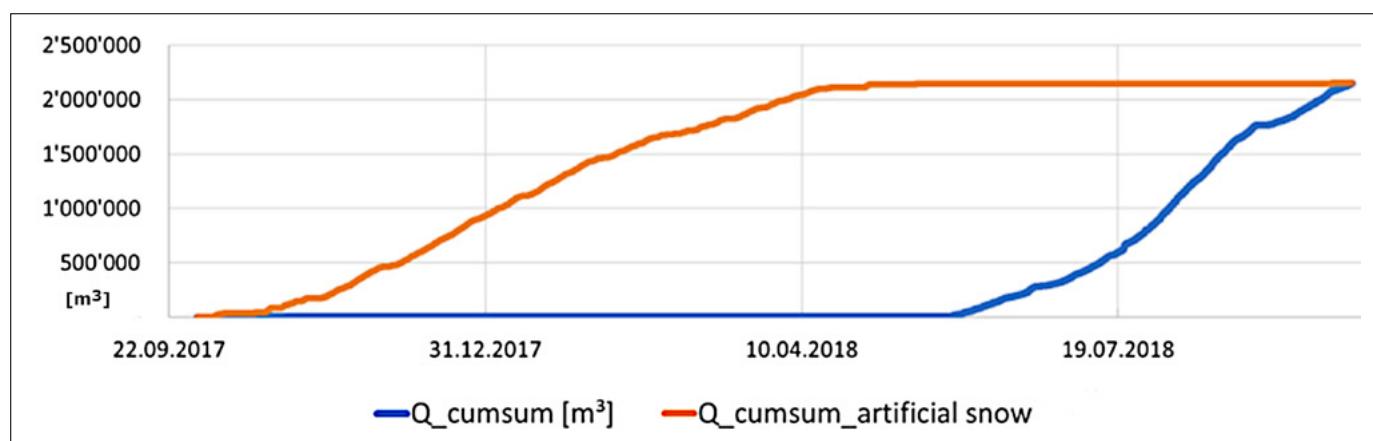


Bild 6: Summenkurven (in m^3) des anfallenden Schmelzwassers (blau) und des verbrauchten Beschneiungswassers (orange) für das hydrologische Jahr 2017/2018.

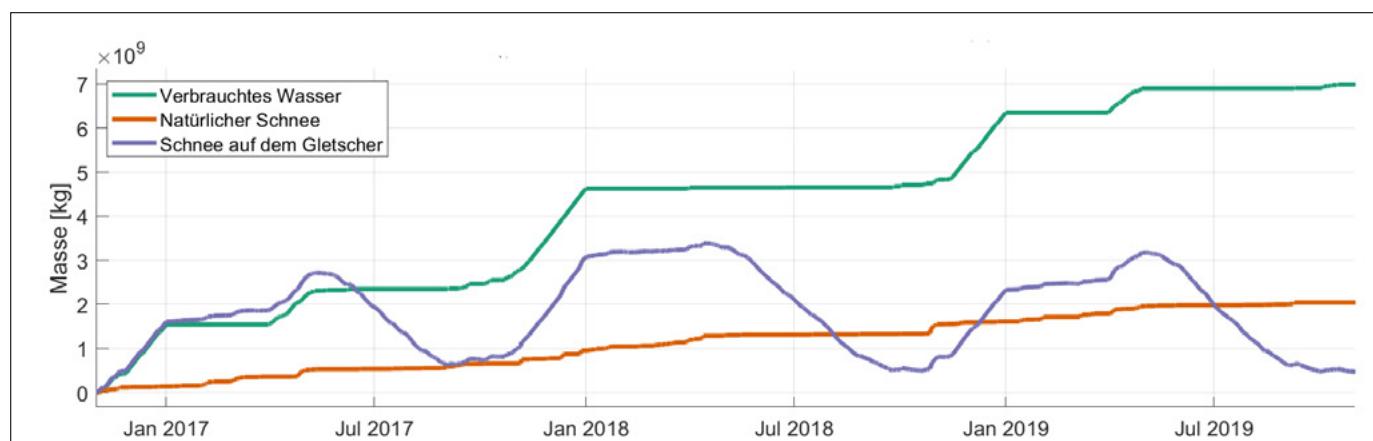


Bild 7: SnowCableSim: Entwicklung der Schneedecke vom 11.2016 bis 10.2019 mit auf der Grundlage des Wasserverbrauchs und dem natürlichen Schneefall.

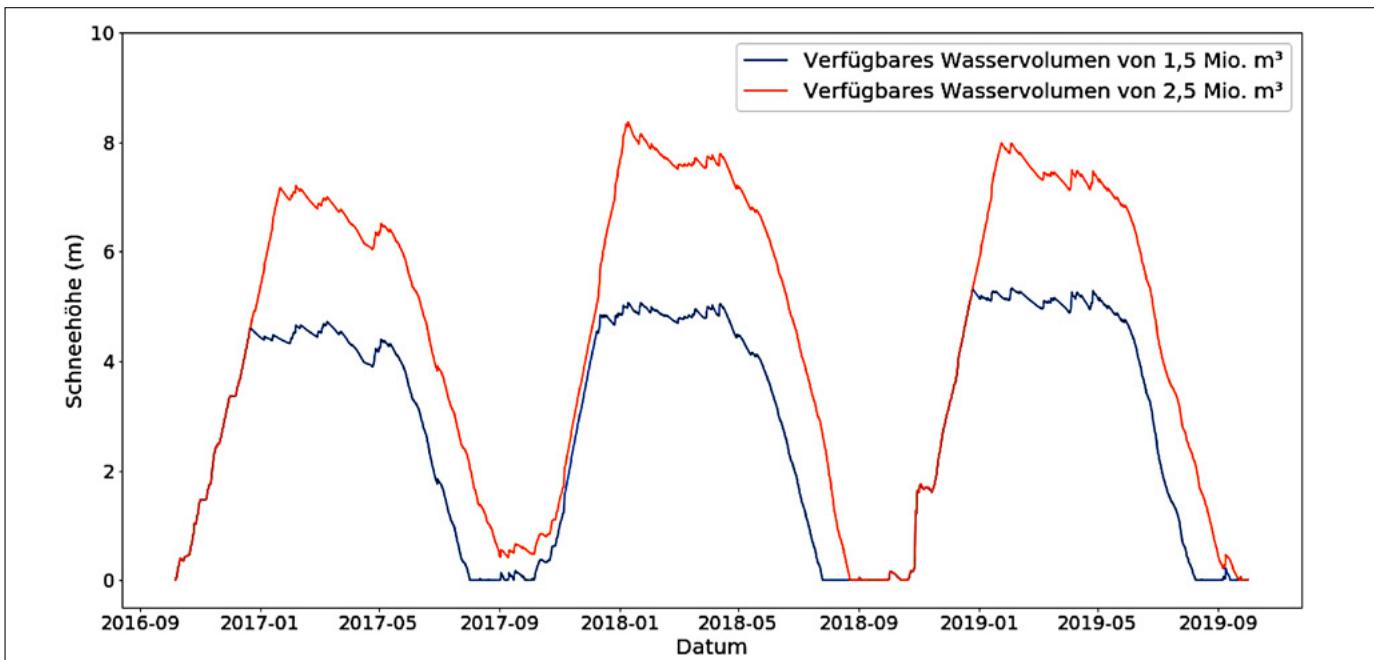


Bild 8: Modellierte Schneehöhen mit COSIPY ArtSnow mit Beschneiung für ein verfügbares Wasservolumen von 1,5 Mio. m³ und 2,5 Mio. m³ an der Lokation der Wetterstation für drei hydrologische Jahre.

ArtSnow wesentlich differenzierteren Massenbilanzmodell überprüft. Bild 8 zeigt die daraus abgeleitete Entwicklung der Schneehöhen mit den Wasservolumina von 1,5 und 2,5 Mio. m³. Größtenteils in Übereinstimmung mit SnowCableSim (Bild 7) wäre mit einem Wasservolumen von 2,5 Mio. m³ mit Ausnahme des sehr warmen Sommers 2018 eine durchgängige Schneeabdeckung möglich. Hingegen reichen die tiefer angesetzten 1,5 Mio. m³ Wasser für eine durchgängige Schneebedeckung der vorgesehenen Fläche nicht aus.

Abschliessend wird mit SnowCableSim überprüft, ob am Ende des Simulationszeitraums am 31. Oktober 2019 der Schnee unter Berücksichtigung der Gletscherbewegung einigermaßen gleichmässig verteilt

ist (Bild 9). Zwischen den Seilen werden kleinere Mulden prognostiziert, welche durch die Gletscherbewegung nur teilweise ausgeglichen werden.

Auf den Grundlagen diverser Modellierungen ergab sich eine Beschneiungswassermenge von ca. 2,5 Mio. m³, um die Fläche von 0,8 km² des Morteratschgletschers ganzjährig mit Schnee bedeckt zu halten und somit den Abschmelzprozess effektiv zu verzögern.

Huss, Mattea, Linsbauer & Hoelzle (2023) untersuchten anhand der Klimaprognosen 2018, ob bereits mit dem vorliegenden Setting des Morteratschgletschers auch längerfristig erhalten werden könnte. Dabei konnten sie zeigen, dass die beschneite Fläche bis ungefähr 2060 erhalten bleiben würde. Obwohl die regionalen Niederschlags-

prognosen sehr unsicher sind, wird damit nachvollziehbar, dass das Ziel der Entwicklung des vorgestellten Verfahrens, nämlich die Sicherung von gefrorenen Süsswasserspeichern in ariden Gebirgsregionen auch über mehrere Jahrzehnte funktioniert. Es zeigt sich aber auch, dass falls der Morteratschgletscher trotz der heutigen Einschätzung für die Wasserversorgung des Oberengadins plötzlich entscheidend würde, das gewählte Setting noch nicht reichen würde und weitere Installationen in höher gelegenen Zonen nötig würden.

4. Einsatzmöglichkeiten des Schneiseils

Grundsätzlich liegen die entscheidenden Innovationen des beschriebenen Beschneiungssystems ab einem Seil in seiner Bodenunabhängigkeit und seiner massiv erhöhten Schneileistung im Vergleich zu konventionellen Beschneiungssystemen. Es kann ausschliesslich mit potenzieller Energie betrieben werden, d.h. praktisch ohne elektrischen Strom, was aber auch zum Teil mit herkömmlichen Beschneiungssystemen möglich ist. Die drei Faktoren (Bodenunabhängigkeit, grosse Produktivität, effizienter Energieeinsatz) müssen gleichzeitig erfüllt sein, um bei einem Gletscher die Eisschmelze wirksam einzämmen zu können und damit für zukünftige Generationen einen gefrorenen Süsswasserspeicher zu erhalten oder einem Skigebiet seine Existenz zu sichern.

Angesichts der grossen Dynamik der zurzeit ablaufenden Klimaveränderungen gibt es noch weitere Einsatzszenarien:

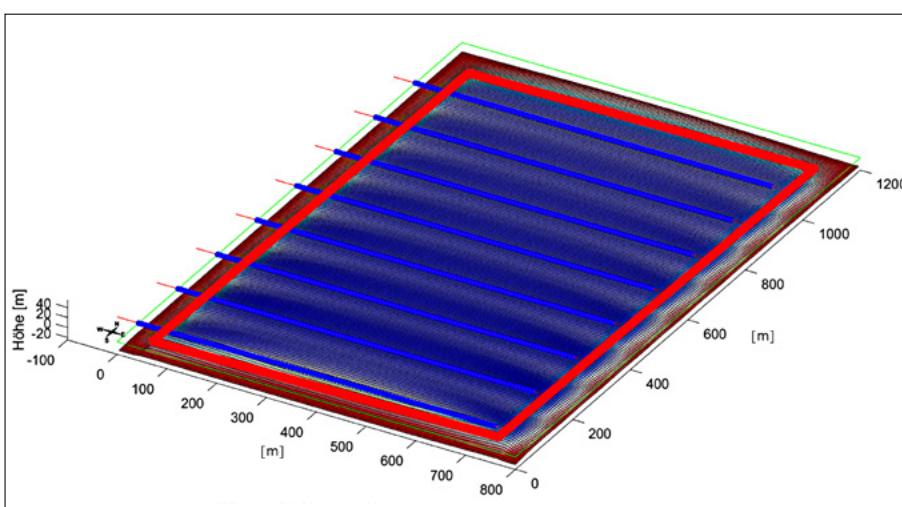


Bild 9: 3D-Ansicht der Schnee- (blau) und Eisoberfläche (braun) am Ende der Simulation (31. Oktober 2019). Rote Linie: Beschneite Fläche. Blaue Linien: Lage der Schneiseile.

- a) Beschneiung im kriechenden Permafrost: Bei den herkömmlichen Beschneiungssystemen für Skipisten werden die Verbindungsleitungen zwischen Wasserreservoir und Schneidüsen praktisch ausschliesslich im Boden verlegt. Dies kann im kriechenden Permafrost sehr problematisch sein und zu massiven Mehrkosten mit regelmässigen Sanierungsarbeiten führen. In solchen Situationen sind Schneiseile attraktive Alternativen.
- b) Bedarf nach viel Schnee in kurzer Zeit: Angesichts der abnehmenden Zeitfenster für die Beschneiung könnten in Zukunft diese Anlagen, die in kürzester Zeit ohne grossen Installationsaufwand grosse Schneemengen produzieren können, an Bedeutung gewinnen. Besonders interessant sind sie z. B. für kritische Pistenabschnitte, Half Pipes oder Langlaufloipen. Dies insbesondere, wenn die Schneeproduktion in Konkurrenz mit der Nutzung des Geländes steht.
- c) Erstellung von grossflächigen Schneedepots für Snowfarming für Bewässe-

rungszwecke in ariden Gebirgsregionen: In den vergangenen Jahren wurden an verschiedenen Orten Schneedepots für Snowfarming erstellt. Mit Schneiseilen könnte dank der grossen Produktivität der Aufwand stark reduziert werden.

- d) Nutzung des Herbstschneeffekts zur Stabilisierung von degradierenden Permafrostküsten: Gemäss dem von (Keller, 1994) postulierten Herbstschneeffekt kann eine periodisch auftretende dünne, noch wenig isolierende Schneedecke, die in gewissen Schattenlagen im Gebirge im Herbst regelmässig auftritt, den Untergrund effektiv kühlen. Solche Situationen könnten auch mittels Schneiseilen erzeugt werden, um entlang von Küstenlinien mit degradierendem Permafrost Siedlungen vor Erosion zu schützen.

5. Schlussfolgerungen

Die beiden gut aufeinander abgestimmten Tools COSIPY ArtSnow und SnowCableSim erlauben das Potenzial eines Gletscherschut-

zes zur Sicherung von gefrorenen Süßwasserreserven zuverlässig abzuschätzen. Insbesondere können so auch Regionen profitieren, deren Existenz primär von Schmelzwasser abhängig ist. Auch wenn der Weg bis zur praktischen Umsetzung der Gletscherpflege durch ein bodenunabhängiges Beschneiungssystem noch weit ist, sollte dieser Ansatz weiterverfolgt werden. Gemäss Pritchard (2019) sind zum Beispiel in der Region Himalaya ca. 220 Mio. Menschen direkt vom Schmelzwasser der Gletscher abhängig. Damit könnte diese Technologie einen Beitrag für den Umgang mit sehr anspruchsvollen Klimafolgen und daraus resultierenden möglichen Migrationsströmen leisten. Die Entwicklung eines bodenunabhängigen Beschneiungssystems als Lösungsansatz zur Umsetzung des Gletscherschutzgedankens des MortAlive-Projekts betritt technisch gesehen Neuland. Dank der Unterstützung durch die Schweizerische Innovationsförderagentur Innosuisse ist es gelungen, die dazu notwendige Technologie inkl. der dazu notwendigen Dimensionierungstools zu entwickeln, die nun für die Praxis einsatzbereit sind.

Quellen:

- COSIPY Slack. (2021). Von [https://cosipy.slack.com/](https://cosipy.slack.com) abgerufen
 COSIPY Tutorial. (2021). Von <https://cosipy.readthedocs.io/en/latest/index.html> abgerufen
 Deflorin, M. a. (2021). Dokumentation: Matlab Simulationstool Gletscherbeschneiung.
 GitHub COSIPY. (2021). Von <https://github.com/cryotools/cosipy> abgerufen
 Huss, M., Mattea, E., Linsbauer, A., & Hoelzle, M. (2023). Kann künstliche Beschneiung die Gletscherschmelze bremsen? Wasser Energie Luft, Heft 1, S. 7 - 12.
 Keller, F. (1994). Interaktionen zwischen Permafrost und Schnee - Eine Grundlagenstudie im Oberengadin. Zürich: Dissertation ETH-Zürich.
 Keller, F., Müller, D., Levy, C., & Seupel, C. (2021). Vorstudie MortAlive. Samedan: Academia Engiadina.

- Oerlemans, J., Haag, M., & Keller, F. (2017). Slowing down the retreat of the Morteratsch glacier, Switzerland, by artificially produced summer snow: a feasibility study. *Climatic Change*.
 OGGM. (2020). Von <https://oggm.org/> abgerufen
 Pritchard, H. D. (2019). Aisa's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. *Nature*, 569(7758), S. 649-654.
 Sauter, T. A. (2020). Sauter, Tobias, Anselm Arndt, COSIPY v1.3-an open-source coupled snowpack and ice surface energy and mass balance model. *Geoscientific Model Development*, S. 5645-5662

Autorinnen und Autoren:

- Felix Keller, Dr. sc. nat. ETH, Gletschervision GmbH, c/o Academia Engiadina, 7503 Samedan, felix.keller@glaciervision.com
 Christine Seupel, Fachhochschule Graubünden, aktuell: WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, 7260 Davos Dorf, christine.seupel@slf.ch
 Marin Deflorin, Martinsbergstrasse 20, 5400 Baden, marin.deflorin@gmail.com
 Johannes Oerlemans, Em. Prof. Dr. Dr. hc., c/o Universität Utrecht, 3584 CS Utrecht, Niederlande, j.oerlemans@uu.nl
 Peter Stuber, Prof. Dr. FHNW, Hochschule für Technik, Klosterzelgstrasse 2, 5210 Windisch, peter.stuber@fhnw.ch
 Dieter Müller, Dr. sc. techn. Dipl. Bauing. ETH, Fachhochschule Graubünden, aktuell: Hochschule Luzern, Technik & Architektur, 6048 Horw, dieter.mueller@hslu.ch