
Bericht Nr. 1418139.20

Einwohnergemeinde Kandersteg

**Kandersteg Rutschung "Spitze Stei",
Modellierung oberflächlicher
Wassereintrag**

Kurzbericht

Zollikofen, 8. Oktober 2021

GEOTEST AG
BERNSTRASSE 165
CH-3052 ZOLLIKOFEN
T +41 (0)31 910 01 01
F +41 (0)31 910 01 00
zollikofen@geotest.ch
www.geotest.ch

1418139.20

Kandersteg Rutschung "Spitze Stei", Modellierung oberflächlicher Wassereintrag

GEOTEST

GEOLOGEN / INGENIEURE /
GEOPHYSIKER /
UMWELTFACHLEUTE

Autor(en)	Bearbeitete Themen / Fachbereiche
Christian Kienholz	Modell, ganzer Bericht
Supervision	Visierte Inhalte
Rachel Riner	Ganzer Bericht
Hinweise	

GEOTEST AG



Rachel Riner



Christian Kienholz

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage	4
2. Übersicht Prozessierungsschritte	4
3. Kalibrierung Schneeschmelzmodell	5
4. Berechnung räumlicher Temperatur- und Niederschlagsfelder	7
5. Klassifizierung der Schneebedeckung / Abminderung Schneesmelze	7
6. Räumliche Aufsummierung / Postprozessierung	10
7. Abschliessende Bemerkungen und Ausblick	13
8. Quellen	14

1. Ausgangslage

Der Wassereintrag in die Rutschung Spitze Stei ist ein wichtiger Antriebsfaktor für die Aktivität der Rutschung ([1], [2]). Bisher wurde der Wassereintrag basierend auf den Daten der umliegenden Wetterstationen grob abgeschätzt. Während solche Abschätzungen für den Regenanteil des Wassereintrages recht gut möglich sind, sind Abschätzungen des Wassereintrages durch Schneeschmelze mit grossen Unsicherheiten behaftet [3].

Nachfolgend wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem der Wassereintrag in die Rutschung standardisiert und automatisiert quantifiziert werden kann. Der Ansatz soll die Voraussetzungen für ein verbessertes Prozessverständnis schaffen und in der operativen Anwendung die Überwachung der Rutschung unterstützen.

2. Übersicht Prozessierungsschritte

Die Prozessierung greift auf die Daten verschiedener Überwachungsinstrumente zurück und lässt sich in vier Hauptschritte einteilen:

1. Mit den Temperatur-, Niederschlags- und Schneemächtigkeitsdaten der IMIS-Station Fisistock wird ein Temperatur-Index-Schmelzmodell kalibriert.
2. Mit den Temperatur- und Niederschlagszeitreihen weiterer Meteostationen (Kandersteg, Oeschinen) und einem digitalen Höhenmodell (DHM) des Gebietes werden vierdimensionale Temperatur- und Niederschlagsfelder (Dimensionen x, y, z, t) erstellt. Diese Felder dienen der flächigen Anwendung des Schmelzmodelles sowie der Berechnung des Regenanteiles im Niederschlag.
3. Basierend auf den Aufnahmen der Überwachungskamera Rosshubel wird die Schneebedeckung im Rutschgebiet klassifiziert. Die anteilmässige Schneebedeckung pro Höhenstufe dient der Abminderung der modellierten Schneeschmelze.
4. Mittels Aufsummierung über die Rutschhypsometrie (Höhenverteilung) von a) den abgeminderten Schneeschmelzraten und b) dem Regenanteil des Niederschlages wird der oberflächliche Wassereintrag berechnet.

3. Kalibrierung Schneeschmelzmodell

Bei Temperatur-Index-Modellen wird die Schneeschmelze (mm) via Degree Day Factor (DDF, $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$) an Gradtage ($^\circ\text{C d}$) gekoppelt ([4], [5]). Trotz ihrer Einfachheit können Temperatur-Index Modelle Schnee- und Eisschmelze recht zuverlässig quantifizieren, dies auch im Vergleich zu komplexeren Energiebilanzmodellen, welche zahlreiche Inputparameter benötigen ([4], [6]).

Für die Modellkalibrierung wird auf Temperatur-, Niederschlags- und Schneemächtigkeitsdaten der IMIS-Station Fisistock (2155 m ü. M.) zurückgegriffen. Die Station Fisistock ist bezüglich Höhe repräsentativ für den untersten Bereich der Rutschung Spitze Stei (Abbildung 1). Da per Herbst 2021 keine weiteren Kalibrierungsdaten vorliegen, wird der an der Station Fisistock kalibrierte DDF für den ganzen Rutschperimeter verwendet.

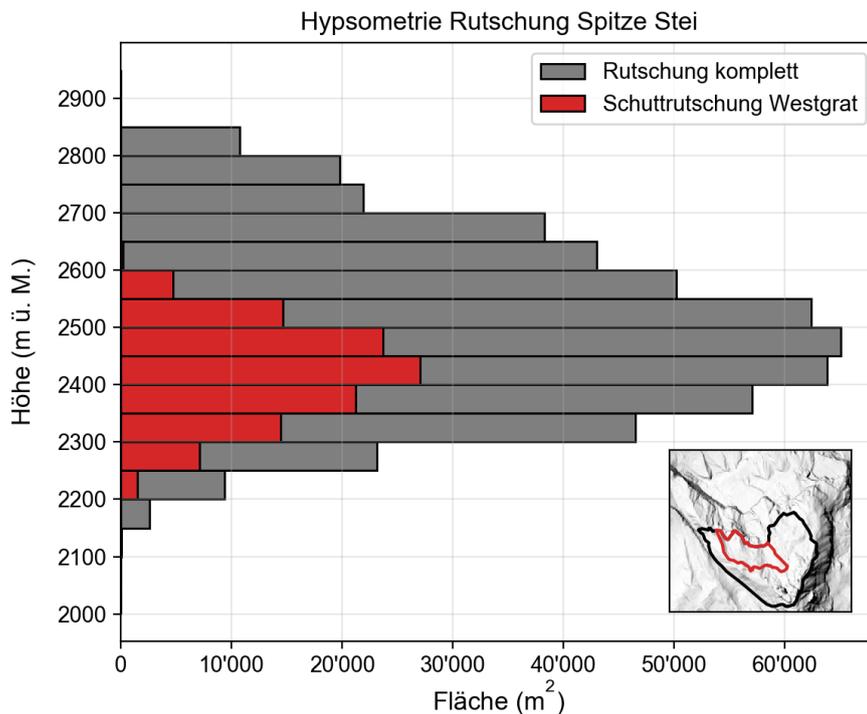


Abbildung 1: Höhenverteilung der Rutschung Spitze Stei (grau, Fläche total 0.51 km^2) sowie der Schuttrutschung Westgrat (rot, Fläche total 0.11 km^2).

Bei der Kalibrierung wird der DDF iterativ optimiert, um eine maximale Übereinstimmung zwischen modellierter und gemessener Schneeschmelze zu erreichen. Im Falle der Station Fisistock wird die Referenz-Schneesmelzrate mittels der Parameter Schneedeckenmächtigkeit sowie Schneeanteil des Niederschlages berechnet. Zur Quantifizierung des Schneeanteils im Niederschlag wird zwischen Lufttemperaturen von 0.5 und 2.0°C ein linearer Übergang vom festen zum flüssigen Phasenzustand implementiert [5].

Für die Kalibrierung wurde die Zeitperiode Ende Mai 2021 bis zur Ausaperung Mitte Juni 2021 gewählt, da die Schneedecke zu diesem Zeitpunkt den Schmelzpunkt erreicht hat und somit ein Wiedergefrieren des perkolierenden Schmelzwassers in der Schneedecke ausgeschlossen werden kann¹. Für die Modellkalibrierung muss ein Wiedergefrieren ausgeschlossen werden können, da dieser Prozess in den Referenzdaten berücksichtigt ist, in der aktuellen Version des Schmelzmodelles hingegen nicht (vgl. abschliessende Bemerkungen).

Der optimierte DDF (4.2 mm °C⁻¹ d⁻¹) führt zu einer guten Übereinstimmung mit den Messdaten (Abbildung 2). Der ermittelte DDF liegt im physikalisch plausiblen Bereich für Schneeoberflächen ([4], [7]).

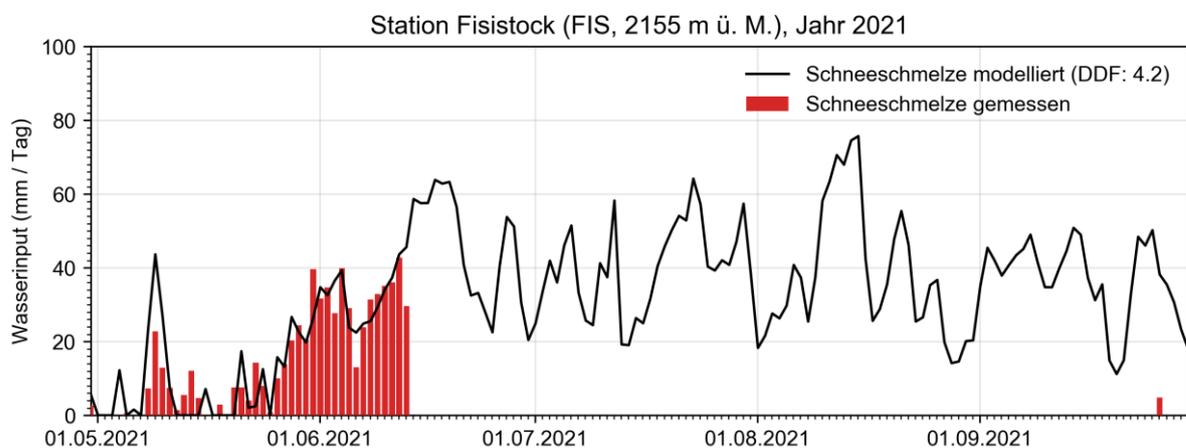


Abbildung 2: An der Station Fisistock gemessene Schneeschmelzrate (rote Säulen) vs. modellierte Schneeschmelzraten (schwarze Linie, tägliche Auflösung) für den Sommer 2021. Die Station aperte am 13. Juni komplett aus. Die Überschätzung der modellierten Schmelzraten Anfang Mai ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass ein Teil des oberflächlich anfallenden Schmelzwassers nach Perkolation in den

¹ Temperaturmessungen im Bohrloch Westgrat (2562 m ü. M.) bestätigen dies: Schmelzwasser hat dort Ende Mai bereits mindestens 3 m Tiefe erreicht.

kalten Schneekörper erneut gefror. Der Prozess des Wiedergefrierens ist im aktuellen Schmelzmodell nicht berücksichtigt.

4. Berechnung räumlicher Temperatur- und Niederschlagsfelder

Temperatur- und Niederschlagsdaten der auf verschiedenen Höhen installierten Wetterstationen (Kandersteg, Oeschinensee, Fisistock), ermöglichen eine laufende Berechnung von Temperatur- und Niederschlagsgradienten. Diese Gradienten werden mit einem Höhenmodell kombiniert, um vierdimensionalen Temperatur- und Niederschlagsfelder (Dimensionen x, y, z, t) zu erstellen. Die Felder dienen der flächigen Anwendung des Schmelzmodelles sowie der Berechnung des Regenanteiles im Gesamtniederschlag.

Niederschläge liegen für jede 5 m Rasterzelle des Höhenmodelles als Tagessummen, Temperaturen als Tagesdurchschnitte vor. Mit dem vorliegenden Modell kann damit für jede Zelle die theoretische tägliche Schneeschmelzrate (bei 100% Schneebedeckung) sowie der tägliche Regenwasserinput bestimmt werden.

5. Klassifizierung der Schneebedeckung / Abminderung Schneeschmelze

Die Schneebedeckung der Rutschung wird via Klassifikation der Schrägaufnahmen Rosshubel bestimmt. Die klassifizierten Aufnahmen werden mittels Kameramodell in Kartengeometrie projiziert (Abbildung 3).



16.06.2021

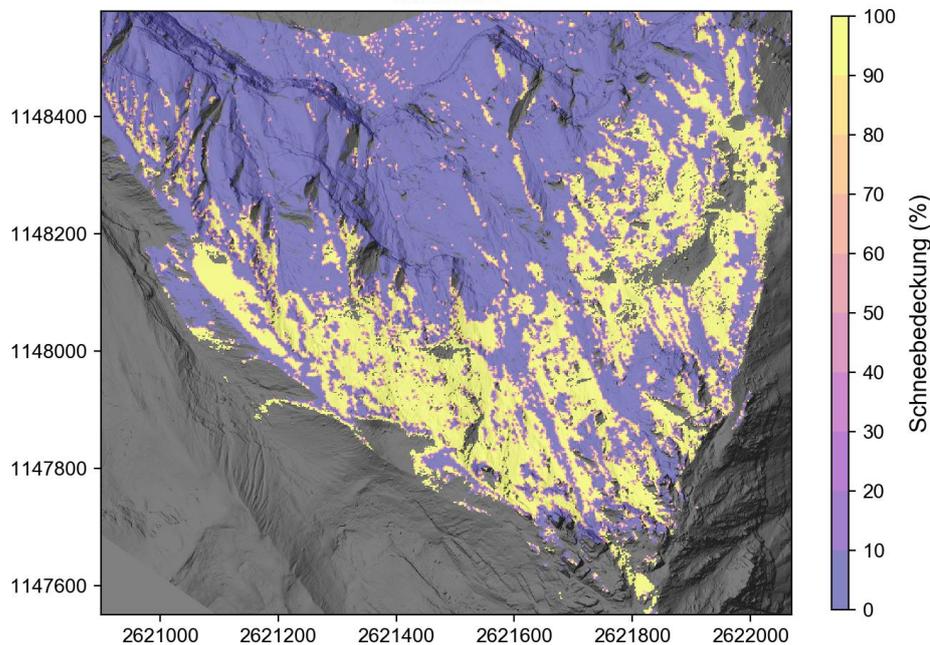


Abbildung 3: Oben: Schrägaufnahme des Rutschgebietes vom 16. Juni 2021, Kamera Rosshubel. Unten: Projiziertes Raster mit klassifizierter Schneebedeckung. Dunkelgraue Flächen umfassen Bereiche, die vom Standort Rosshubel nicht eingesehen werden können. Mittels DTM wird die Information zur Schneebedeckung mit der Geländehöhe kombiniert.

In der Kartengeometrie wird die anteilmässige Schneebedeckung diskreter 25 m Höhenbänder berechnet. Diese Information wird benötigt, um die Schneebedeckung in Bereiche zu extrapolieren, welche von der Kamera Rosshubel nicht eingesehen werden können (dunkelgraue Bereiche in Abbildung 3 unten) und um das Modell integriert per Höhenstufe (anstelle individueller Rasterzellen) anzuwenden.

Abbildung 4 zeigt die resultierende Zeitserie der Schneebedeckung für den Frühsommer 2021. In der Abbildung erkennbar ist z.B. die rasch fortschreitende Ausaperung des Gebietes im Juni sowie Schneefälle im oberen Bereich der Rutschung Mitte Juli.

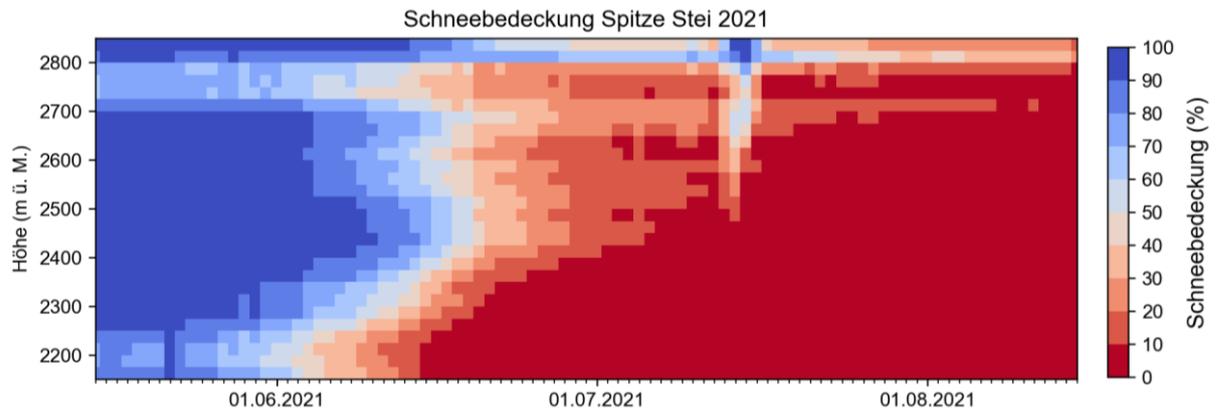


Abbildung 4: Prozentuale Schneebedeckung pro 25 m Höhenstufe für den Frühsommer 2021. Für die Zeitserie wurde täglich mindestens ein Foto ausgewertet. Für Tage ohne klassifizierbare Fotos wurden die Resultate benachbarter Tage interpoliert.

Mit dem Schmelzmodell wird die Schneeschmelzrate für diskrete Höhenstufen der Rutschung bestimmt. Via Schneebedeckung der Höhenstufe (Abbildung 4) wird die Schneeschmelze abgemindert (z.B. Abminderung um 30% bei 70% Schneebedeckung). Die Berechnung des Regenanteiles des Niederschlages erfolgt über die Temperatur (linearer Übergang zwischen Schnee und Regen zwischen 0.5 und 2°C). Abbildung 5 zeigt die Resultate für eine Geländehöhe von 2400 m ü. M.

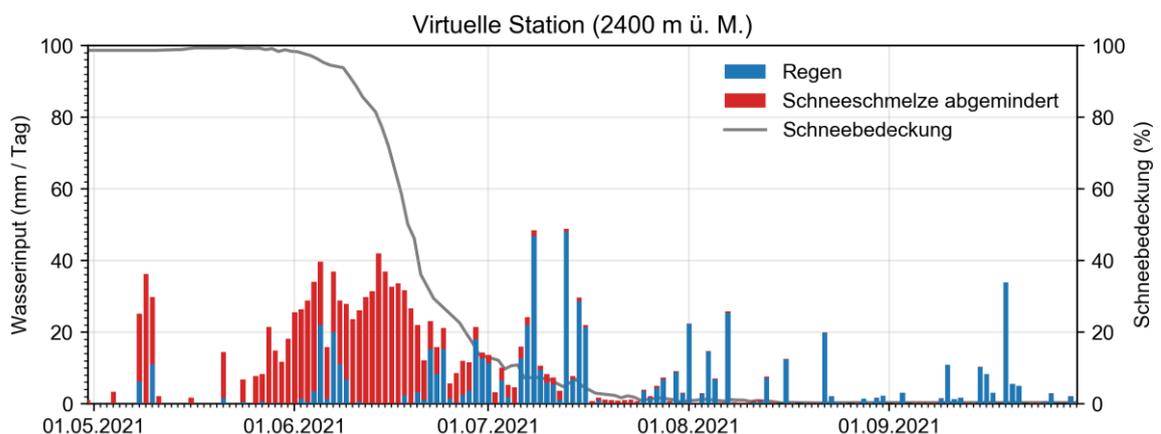


Abbildung 5: Modellierte Schneeschmelzraten (rote Säulen) und Regenanteil des Niederschlages (blaue Säulen) für eine Geländehöhe von 2400 m ü. M. Die Abminderung des modellierten Schmelzwasserinputs erfolgt über die prozentuale Schneebedeckung (graue Linie). Der Regenanteil des Niederschlages wird via Lufttemperatur berechnet. Die Säulen von Regen und Schneeschmelze sind gestackt, d.h. das obere

Ende der roten Säulen entspricht dem totalen täglichen Wassereintrag durch Regen und Schneeschmelze.

6. Räumliche Aufsummierung / Postprozessierung

Via Hypsometrie (Fläche pro Höhenstufe, Abbildung 1) der Gesamtrutschung bzw. Teilbereichen der Rutschung wird der modellierte Wassereintrag ($\text{mm d}^{-1} = \text{l m}^{-2} \text{d}^{-1}$) zu Volumina ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) aufsummiert. Zeitserien mit den täglichen Wassereinträgen für die Gesamtrutschung bzw. die Schuttrutschung Westgrat sind in Abbildung 6 dargestellt.

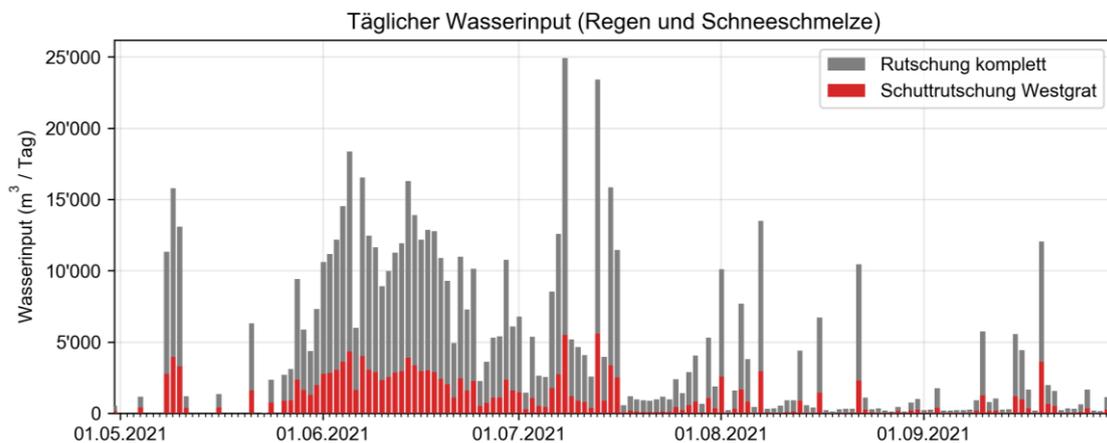


Abbildung 6: Täglicher Wassereintrag (Summe Regen und Schneeschmelze) für den Perimeter der Gesamtrutschung Spitze Stei (grau) sowie der Schuttrutschung Westgrat (rot).

Eine Kumulierung der Wassereinträge über längere Zeiträume ist für Vergleiche mit weiteren Messdaten (z.B. Rutschgeschwindigkeiten) zielführend. Solch kumulative Wassereinträge für Gesamtrutschung und Schuttrutschung Westgrat sind in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt.

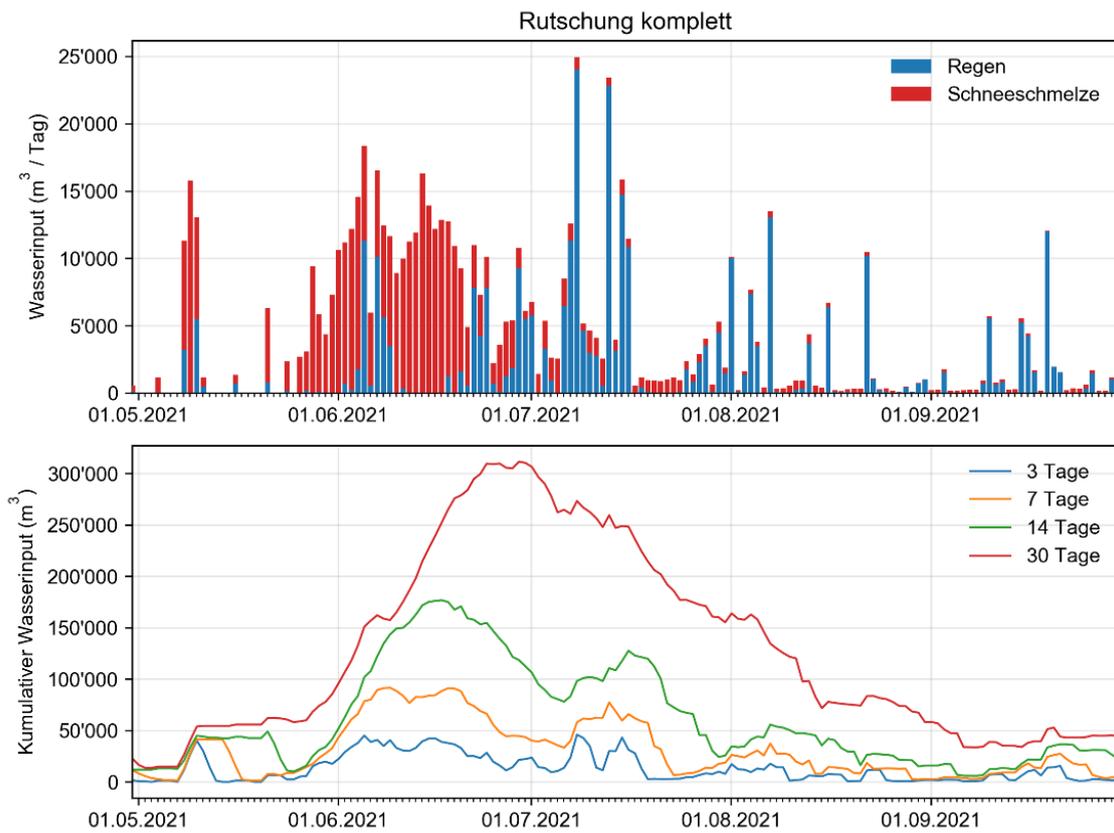


Abbildung 7: Oben: Wasserinput (Anteil Regen und Schneeschmelze separat ausgewiesen) integriert über den Gesamtperimeter der Rutschung Spitze Stei. Unten: Wasserinput (Regen plus Schneeschmelze) kumuliert über Perioden der Länge 3, 7, 14 und 30 Tage.

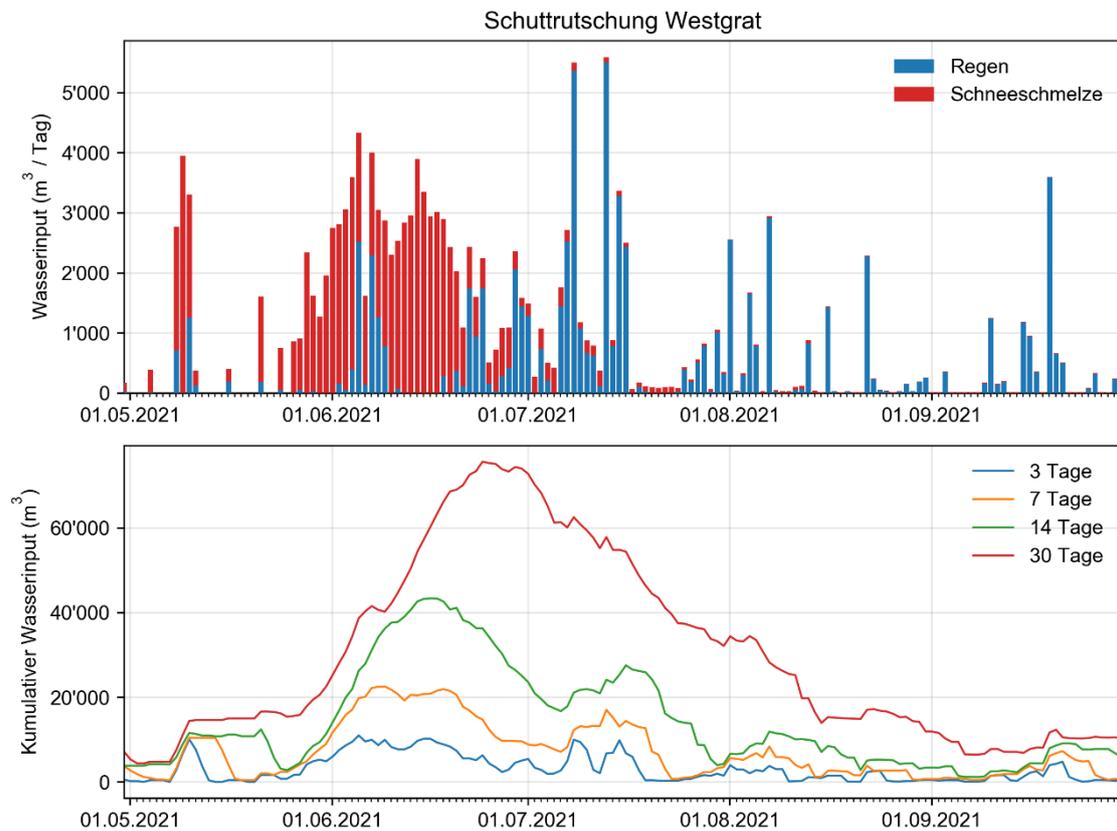


Abbildung 8: Oben: Wasserinput (Anteil Regen und Schneeschmelze separat ausgewiesen) integriert über den Perimeter der Schuttrutschung Westgrat. Unten: Wasserinput (Regen plus Schneeschmelze) kumuliert über Perioden der Länge 3, 7, 14 und 30 Tage.

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen, dass die Schneeschmelze im Frühjahr 2021 auf Tagesbasis knapp nicht zu Spitzeneinträgen geführt hat. Zwei primär durch Regen verursachte Tageseinträge im Juli waren etwas höher. Der im Vergleich zu Regenereignissen kontinuierlichere Charakter der Schneeschmelze führte hingegen zu Spitzeneinträgen über längere Zeiträume (z.B. 7 Tage, 14 Tage). Diese grossen Wassereinträge ab Juni verändern die variable Disposition der Rutschung hin in einen kritischeren Bereich, welche sich in den beobachteten starken Beschleunigungen der Rutschung manifestierte.

7. Abschliessende Bemerkungen und Ausblick

Mit dem vorgestellten Ansatz kann der oberflächliche Wassereintrag in die Rutschung Spitze Stei standardisiert und automatisiert berechnet werden. Weiterhin nicht berücksichtigt sind Wassereinträge durch die Schmelze von Permafrosteis im Untergrund sowie Wasserzuflüsse von ausserhalb der definierten Einzugsgebiete (z.B. entlang von Schichtgrenzen). Während der Wassereintrag durch Schmelze von Permafrosteis als gering eingeschätzt wird (generell träge Temperaturveränderungen in den entsprechenden Tiefen, Zero-Curtain Effekt), dürfte den lateralen Wasserzuflüssen eine grössere Bedeutung zukommen. Der Quantifizierung ist ohne entsprechende Messkampagne nach wie vor nicht möglich.

Das Modell kann neben den rückwirkenden Analysen (bisher für das Jahr 2021) auch für die operationelle Anwendung im Rahmen des Monitorings eingesetzt werden. Mit den via Monitoring verfügbaren Temperatur- und Niederschlagsprognosen wird es damit möglich sein, den Wassereintrag in die Rutschung mit einigen Tagen Vorlauf zu prognostizieren und damit auch mögliche Entwicklungen besser abzuschätzen. Die Genauigkeit der berechneten Temperatur- und Niederschlagsfelder wird im Vergleich zum Jahr 2021 weiter verbessert werden, da die Meteodaten der Wetterstationen Doldenstock und Westgrat nach den lawinenbedingten Ausfällen von 2021 wieder verfügbar sind. Verbesserungen werden insbesondere bei den Niederschlagsfeldern erwartet.

Die aktuelle Modellversion kann ein mögliches Wiedergefrieren des perkolierenden Schmelzwassers in der Schneedecke nicht berücksichtigen, u.a. wegen der fehlenden Informationen zur Schneedeckenmächtigkeit². Mittels eines einfachen Akkumulationsmodelles könnte die Schneemächtigkeit im Bereich der Rutschung Spitze Stei zukünftig modelliert werden. Aufgrund der komplexen Topografie, des Einflusses von Wind und Lawinen wäre dazu jedoch ein Schnee Redistribution-Raster nötig ([7], [8]). Mit solchen Rastern wird der an den Wetterstationen gemessene Niederschlag basierend auf Schneemächtigkeitsmessungen räumlich verteilt. Dabei wird ausgenützt, dass die Verteilung von Schnee räumlich zwar variabel, zeitlich aber relativ konstant ist. Die Schneedeckenmächtigkeit als Grundlage für Redistribution-Raster kann z.B. mittels Drohnenbefliegungen im Winter bestimmt werden.

Alternativ bzw. als Zwischenlösung könnte der Temperaturzustand der Schneedecke mittels Thermistoren direkt gemessen werden (z.B. bei den vorhandenen

² Die Bildklassifizierung liefert einzig die Information, ob das Terrain schneebedeckt ist oder nicht.

Bohrlöchern). Mit diesen Temperaturinformationen aus der Schneedecke könnte zumindest abgeschätzt werden, ob ein Refreezing in der Schneedecke wahrscheinlich ist oder nicht.

8. Quellen

- [1] GEOTEST AG (2020): Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement 2020, Datenerhebungen und Auswertungen 2020, Bericht Nr. 1418139.12, 30.12.2020, Zollikofen.
- [2] CSD AG & SLF (2020): Zweitmeinung zu geologischem Modell, Szenarien und Wirkungsbereiche «Spitze Stei», Kandersteg, Bern. Bericht BR 09940.100, Liebefeld.
- [3] KAWA, Abt. Naturgefahren (2020): Einflussfaktoren auf Bewegungsraten 2020.
- [4] Hock R. Glacier melt: a review of processes and their modelling. *Progress in Physical Geography*. 2005 Sep;29(3):362-91.
- [5] Huss M, Hock R. A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science*. 2015 Sep 30;3:54.
- [6] Ohmura A. Physical basis for the temperature-based melt-index method. *Journal of Applied Meteorology*. 2001 Apr;40(4):753-61.
- [7] Gabbi J, Carenzo M, Pellicciotti F, Bauder A, Funk M. A comparison of empirical and physically based glacier surface melt models for long-term simulations of glacier response. *Journal of Glaciology*. 2014;60(224):1140-54.
- [8] Sold L, Huss M, Hoelzle M, Anderegg H, Joerg PC, Zemp M. Methodological approaches to infer end-of-winter snow distribution on alpine glaciers. *Journal of Glaciology*. 2013;59(218):1047-59