
Bericht Nr. 14181391.25

Einwohnergemeinde Kandersteg

**Kandersteg, "Spitze Stei"
Gefahrenmanagement 2021**

Überprüfung Szenarien und Wirkungsräume

Zollikofen, 31. Dezember 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

| Autor(en) | Bearbeitete Themen / Fachbereiche |
|--------------------|--|
| Christian Kienholz | Szenarien, RAMMS-Modellierungen, Bericht |
| Daniel Tobler | Szenarien, RAMMS-Modellierungen |
| Rachel Riner | Szenarien |
| Kaspar Graf | Szenarien |
| Anna Haberkorn | RAMMS-Modellierungen |
| Morgane Surdez | RAMMS-Modellierungen |
| | |
| | |
| Supervision | Visierte Inhalte |
| Kaspar Graf | Gesamter Bericht |
| | |
| | |
| Hinweise | |
| | |

GEOTEST AG



Kaspar Graf



Christian Kienholz

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Ausgangslage | 4 |
| 2. | Hauptkenntnisse | 5 |
| 2.1 | 3D-Modell Gesamtrutschung | 5 |
| 2.2 | Schuttrutschung Westflanke/Zentrum | 6 |
| 2.3 | Gipfelkompartiment | 9 |
| 2.4 | Kompartimente Westgrat | 13 |
| 2.5 | Kompartiment Ost | 15 |
| 3. | Szenarien | 17 |
| 3.1 | Methodik | 17 |
| 3.2 | Resultate | 17 |
| 4. | Wirkungsräume | 21 |
| 4.1 | Methodik | 21 |
| 4.2 | Resultate | 25 |
| 5. | Fazit und Ausblick | 32 |
| 6. | Quellen | 33 |
| | | |
| | Anhang 1 – Übersicht Ereignisse 2021 | 34 |
| | Anhang 2 – Resultate RAMMS-Modellierungen | 52 |
| | Anhang 3 – Übersicht Feldarbeiten 2021 | 76 |

1. Ausgangslage

Basierend auf den weitergeführten Messungen und Feldbeobachtungen wurde das 3D-Modell der Rutschung Spitze Stei im Herbst 2021 überarbeitet [1]. Mit neuen bzw. verbesserten Auswertungsmethoden wurden zudem treibende Faktoren (z.B. Schneeschmelze, [2]) quantifiziert und deren Relevanz für die Rutschung besser eingeordnet. Die neuen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Überprüfung der bisher gültigen Szenarien und Wirkungsräume ([3],[4]) und damit für die Erstellung der Gefährdungskarte der Gemeinde Kandersteg [5].

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die für die Überprüfung der Szenarien wichtigsten Erkenntnisse beschrieben. Danach werden die überprüften Szenarien präsentiert und mit den bisher gültigen Szenarien verglichen. Schliesslich werden die abgeleiteten Wirkungsräume mit Eintretenswahrscheinlichkeiten sowie die resultierende Gefährdungskarte «Primärprozess» präsentiert. Da es sich um den letzten Bericht des Jahres 2021 handelt, werden in den Anhängen die wichtigsten Sturz- bzw. Murgangereignisse des Jahres 2021 sowie alle durchgeführten Feldarbeiten dokumentiert.

Im vorliegenden Bericht nicht enthalten sind die Resultate der fortgeführten Bohrlochmessungen und Permafrostuntersuchungen. Diese werden im ersten thematischen Quartalsbericht des Jahres 2022 abgehandelt.

2. Hauptkenntnisse

Nachfolgend sind für die Überprüfung der Szenarien wichtige Erkenntnisse zusammengefasst. Es werden jeweils zuerst die Messungen/Beobachtungen beschrieben, gefolgt von den Interpretationen.

2.1 3D-Modell Gesamtrutschung

Das aktuell gültige 3D-Modell der Rutschung Spitze Stei, die verwendeten Grundlagendaten sowie die angewendeten Methoden sind in Bericht [1] detailliert beschrieben. Laut dem Bericht besteht die Rutschung aus sechs Hauptkompartimenten, welche sich bezüglich mehrerer Grössen (z.B. Bewegungsrate und Beschleunigung, Bewegungsrichtung, Verlauf Gleitfläche, Geologie und Auflockerungsgrad der Rutschmasse) unterscheiden (Abbildung 1). Die Unterschiede manifestieren sich in teilweise scharfen Grenzen zwischen den Kompartimenten. So ist z.B. das mehrere Meter pro Jahr rutschende Felskompartiment des Gipfelbereiches (gelb in Abbildung 1) von den sich langsamer bewegenden Kompartimenten des Westgrates durch eine steil verlaufende Scherfläche getrennt, welche im Bereich des Westgrates im Gelände deutlich sichtbar ausbeisst (Abbildung 2).

Bericht [1] zeigt auf, dass die Kompartimente des Gipfelbereiches (gelb) sowie des Westgrates (braun, türkis, blau gestrichelt) stratigraphisch auf derselben Ebene liegen, während das Kompartiment im östlichen Bereich der Rutschung (rot) stratigraphisch tiefer liegt. Im Zentrumsbereich sowie in der Westflanke überlagert eine Schuttrutschung (violett) die weiteren Kompartimente oberflächlich und maskiert deren Kompartimentsgrenzen lokal. Bei dem in Abbildung 1 blau gestrichelt eingezeichneten Kompartiment des obersten Westgrates verbleiben aufgrund der geringen Bewegungsrate (wenige cm/Jahr) die grössten Unsicherheiten bezüglich Abgrenzung/Kubatur sowie Beschleunigungsraten.

Generell stützt das überprüfte 3D-Modell bisherige Einschätzungen ([3],[4]), wonach ein zeitlich synchroner Komplettabsturz aller Kompartimente (ca. 20 Mio. m³) unwahrscheinlich ist. So dürfte z.B. die Stabilität der drei Westgrat-Kompartimente aus geometrischen Gründen (steile Scherfläche ca. parallel zur Bewegungsrichtung) nur bedingt von der Aktivität bzw. Stabilität des Gipfelkompartimentes abhängen. Auch die Stabilität des Kompartimentes Ost, welches stratigraphisch zusätzlich tiefer liegt als die benachbarten Kompartimente, ist aus geometrischen Gründen nur bedingt von der kinematischen Entwicklung der Nachbarkompartimente abhängig.

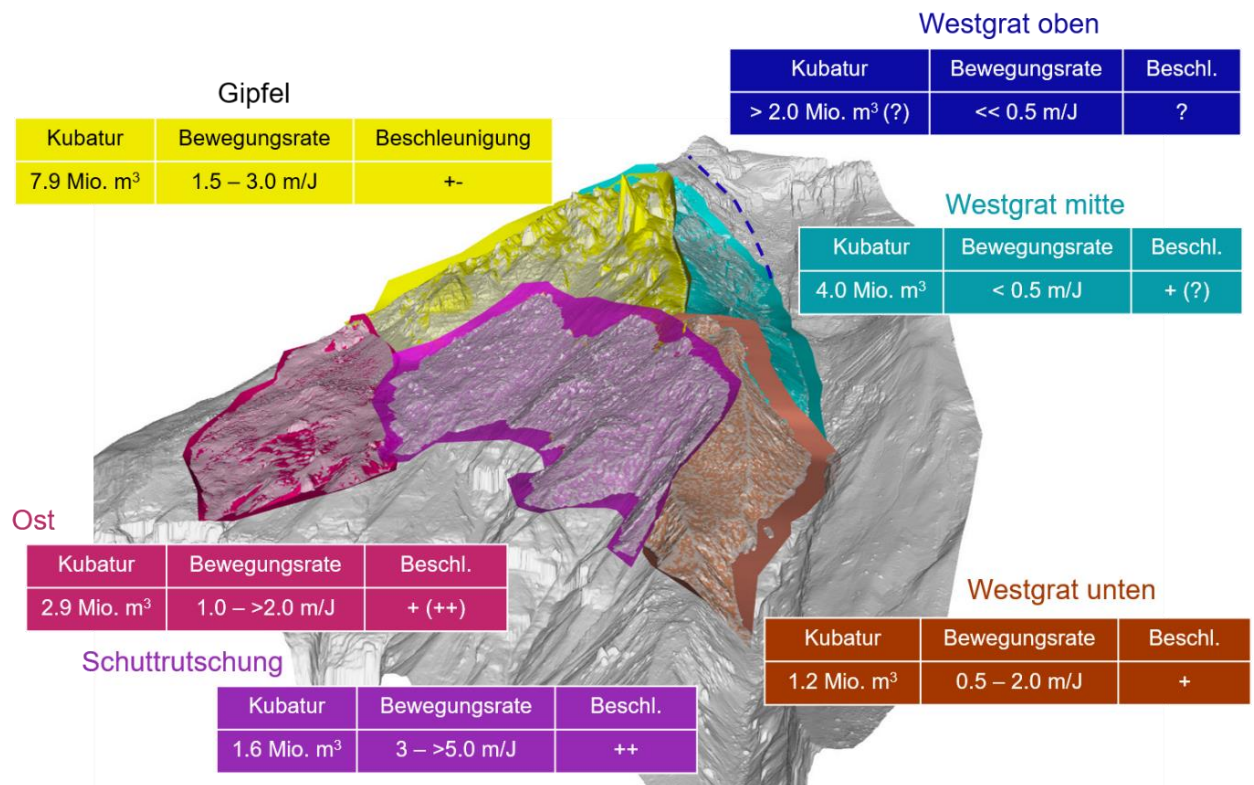


Abbildung 1: 3D-Ansicht der sechs Hauptkompartimente der Rutschung Spitze Stei. Angaben zu den Kubaturen der Kompartimente, deren Bewegungsraten (Jahr 2021) und Beschleunigungen (Vergleich 2021 vs. 2020) sind annotiert.

2.2 Schuttrutschung Westflanke/Zentrum

Die Haupteigenschaften für die Schuttrutschung (violett in Abbildung 1 und Abbildung 2) lauten wie folgt:

- In der Schuttrutschung wurden im Jahr 2021 Rekordgeschwindigkeiten erreicht. Die Bewegungsraten (nur Horizontalkomponente) liegen zwischen 3 und 5 m/J und somit bis zu 60% über denjenigen des Vorjahres. Die Beschleunigung seit 2008 verlief exponentiell [6].
- Trotz grosser Wassereinträge infolge Schneeschmelze und Regen [2] und den daraus resultierenden Rekordgeschwindigkeiten [6] gab es aus der Schuttrutschung auch im Jahr 2021 keine grossen Abstürze. Das grösste Ereignis erfolgte zwischen dem 23. und 24. September 2021 im westlichen, unteren Bereich der Schuttrutschung und umfasste eine Kubatur von

10'000 – 15'000 m³ ([6], Anhang 1). Die über die letzten Jahre dokumentierten Sturzereignisse aus der Westflanke übersteigen damit 15'000 m³ nicht ([4],[6]).

- Mit den sehr hohen und weiter zunehmenden Bewegungsraten gelangen grosse Schuttkubaturen zur Absturzkante, akkumulieren dort und brechen schliesslich infolge Übersteilung paketweise ab. Aufgrund der geringen Sturzaktivität im Jahr 2021 betragen die neu akkumulierten Schuttkubaturen an den Absturzkanten mehrere 10'000 m³.
- Sturzereignisse aus der Schuttrutschung setzten bisher in keinem Fall eine positive Rückkopplung in Gang, d.h. der Absturz eines Schuttpaketes führte nicht zum Absturz weiterer Schuttpakete. Im Gegenteil stürzte in der Regel nur ein Teil des beschleunigten Schuttes ab, während sich das verbleibende Material wieder beruhigte (die entsprechenden Beschleunigungen und Verzögerungen sind in den Radardaten erkennbar). Im Falle des oben genannten Absturzes von 10'000 bis 15'000 m³ aus der unteren Westflanke war die Kubatur des destabilisierten Schuttkörpers um rund einen Faktor 10 grösser als die tatsächlich abgestürzte Kubatur.
- Zwischen dem 26. und 27. August 2021 ([6], Anhang 1) wurde bei den Reflektoren 73 und 75 im Zentrumsbereich eine abrupte Beschleunigung detektiert (ca. 10 cm über 24 Stunden). Wie bei den ähnlich gelagerten Beschleunigungen der Vorjahre [4] kam es wiederum nicht zu einem Sturzereignis. Gemäss Radardaten waren primär die oberen und mittleren Bereiche der zentralen Schuttrutschung von der Beschleunigung betroffen, während die unteren Bereiche nur ein schwaches Beschleunigungssignal zeigten.

Das Lockermaterial in den untersten Bereichen der Schuttrutschung befindet sich generell in einem labilen Zustand und dürfte daher für oben bzw. seitlich angrenzende Schuttpakete nur in wenigen Fällen stabilisierend wirken. Der Abbruch der Pakete infolge der allgemeinen Rutschbewegung führt daher i.d.R. nicht zu einer lateral bzw. longitudinal propagierenden Destabilisierung, welche zum Erreichen sehr grosser Schuttkubaturen nötig wäre. Eine mögliche Ausnahme stellt der Bereich Zentrum dar; die beobachteten abrupten Beschleunigungen bei den Reflektoren 73/75 erfassen gemäss den flächigen Radarmessungen jeweils primär die oberen und mittleren Bereiche der zentralen Schuttrutschung, während die unteren Bereiche keine oder nur eine geringe Beschleunigung erfahren. Entsprechend könnten hier die unteren Schuttpakete stabilisierend bzw. dämpfend wirken und im konkreten Fall dafür sorgen, dass es bisher nie zu einem grösseren Absturz aus

dem Bereich Zentrum gekommen ist. Ein Wegfall dieser Pakete aufgrund der allgemeinen Bewegung hin zur Absturzkante (bzw. eine Überwindung deren Scherfestigkeit während eines Beschleunigungsevents) könnte die Mobilisierung grosser Schuttpakete zukünftig erleichtern. Dass bei entsprechenden Ereignissen Kubaturen von einigen 100'000 m³ mobilisiert werden, kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Generell dürften kleine Sturzereignisse aus der Schuttrutschung bei den sehr hohen und weiter zunehmenden Geschwindigkeiten sowie den sich an der Absturzkante akkumulierenden Geschiebekubaturen in den nächsten Jahren zahlreich sein. Dass Sturzereignisse in den nächsten Jahren grösser ausfallen als die grössten bisher beobachteten Ereignisse (10'000 – 15'000 m³), ist wahrscheinlich. Gemäss den Beobachtungen erreichten lokal beschleunigte Schuttkörper im Frontbereich jeweils Volumen in der Grössenordnung von 100'000 m³. Bisher beruhigten sich grosse Teile des beschleunigten/destabilisierten Schuttes nach einem Teilabsturz wieder. Davon darf in Zukunft jedoch nicht in jedem Fall ausgegangen werden.

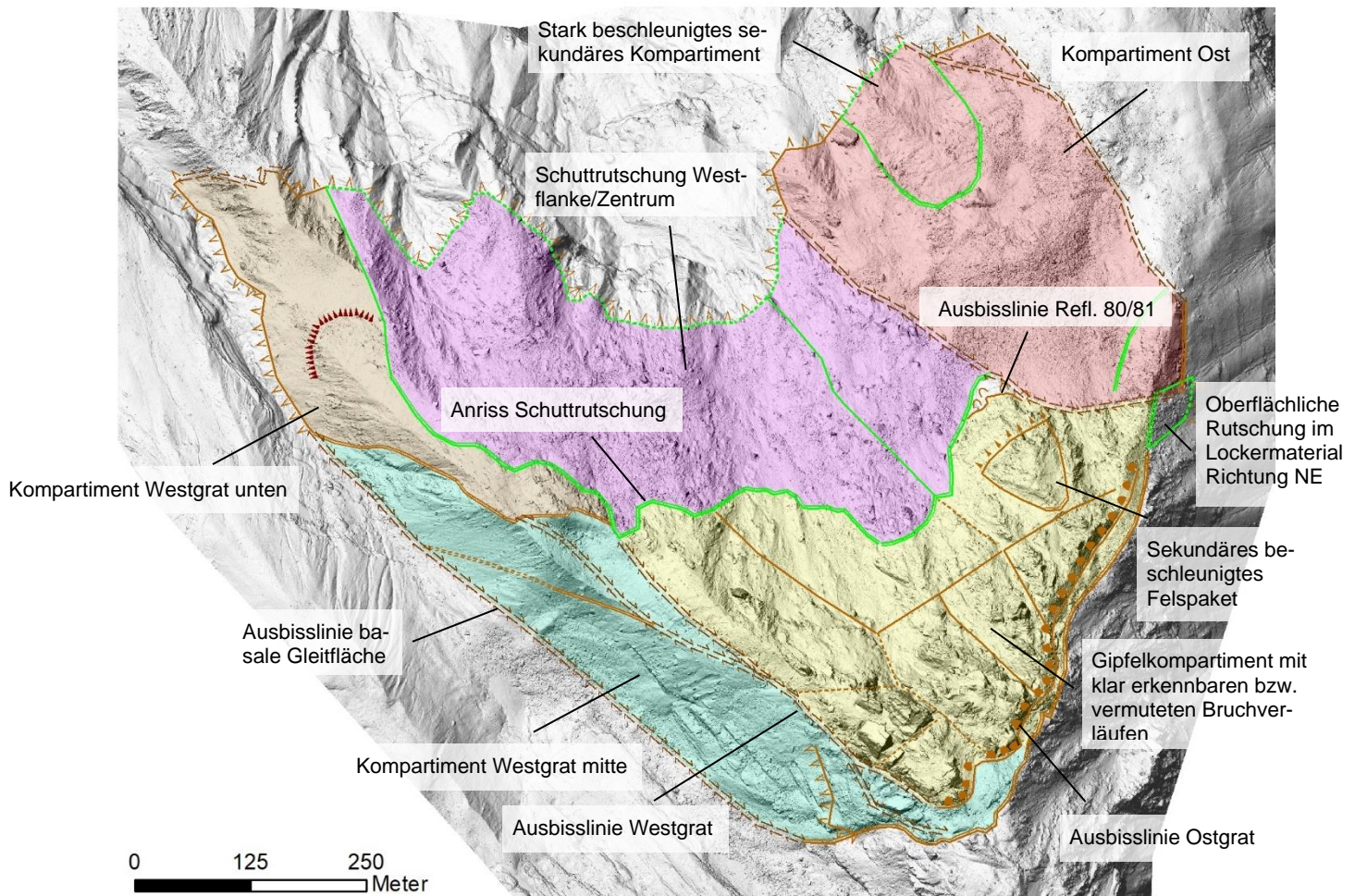


Abbildung 2: Kartierte Phänomene der Rutschung Spitze Stei (aus [1]) Die in Abbildung 1 präsentierten, 3D-modellierten Hauptkompartimente der Rutschung sind zur Referenz mit den entsprechenden Farben hinterlegt und annotiert. Das Kompartiment Westgrat oben ist nicht abgebildet.

2.3 Gipfelkompartiment

Die Haupteigenschaften für das Gipfelkompartiment (gelb in Abbildung 1 und Abbildung 2) sind wie folgt:

- Das Gipfelkompartiment bewegte sich im Jahr 2021 mit einer Geschwindigkeit von 1.5 bis 3.0 m/J und damit ungefähr gleich schnell wie im Jahr 2020 [6]. Der deutliche Beschleunigungstrend der letzten Jahre setzte sich

damit nicht fort, dies trotz der starken Beschleunigung in der nördlich anschließenden Schuttrutschung (Kapitel 2.2).

- Bisher basierend auf geomorphologischen Kriterien kartierte Bruchverläufe konnten mit neu erhobenen kinematischen Daten teilweise bestätigt werden. Aus den Daten ist ersichtlich, dass sich das Gipfelkompartiment in mehrere Subkompartimente unterteilt, welche sich kinematisch unterschiedlich verhalten. Die Unterschiede sind insbesondere im östlichen Teil des Gipfelkompartimentes ausgeprägt (Abbildung 3). Im westlichen Bereich des Gipfelkompartimentes sind die Unterschiede in den Subkompartimentsbewegungen geringer und verbreitet zu klein (bzw. von oberflächlichen Bewegungen zu stark überprägt), als dass Bruchvorgänge in den kinematischen Daten durchgehend verfolgt werden können. Hier basieren die Bruchverläufe teilweise nach wie vor nur auf der Interpretation geomorphologischer Phänomene. In Abbildung 2 sind die entsprechenden Brüche gestrichelt dargestellt. Eine Unterteilung des Gipfelkompartimentes entlang der kartierten Brüche resultiert in Subkompartimenten mit Volumen der Größenordnung 400'000 – 2 Mio. m³ [1].
- Obwohl mehrere Subkompartimente ein individuelles kinematisches Verhalten zeigen, wurden kinematische Interaktionen über die Kompartimentsgrenzen hinweg festgestellt. So zeigten z.B. die auf unterschiedlichen Kompartimenten platzierten GPS 2 und 8 während der Saison 2021 zeitlich synchrone Richtungswechsel (Abbildung 3, Abbildung 4).
- Infolge der hohen Bewegungsraten sowie der zunehmenden Schwächung und Auflockerung des rutschenden Felskörpers ist die Blockschlag- bzw. Felssturzaktivität aus dem Gipfelbereich sehr hoch. Die meisten Ereignisse blieben jedoch auch im vergangenen Jahr klein (einige 10 bis 100 m³, [6]). Das grösste Ereignis aus dem östlichen Bereich des Felskörpers am 23. August 2021 umfasste ein Volumen von rund 3'000 m³ und war damit deutlich kleiner als die grössten Ereignisse der Vorjahre. So wurde allein beim Teilabbruch des Spitze Steis im Dezember 2019 eine Kubatur von rund 15'000 m³ mobilisiert.

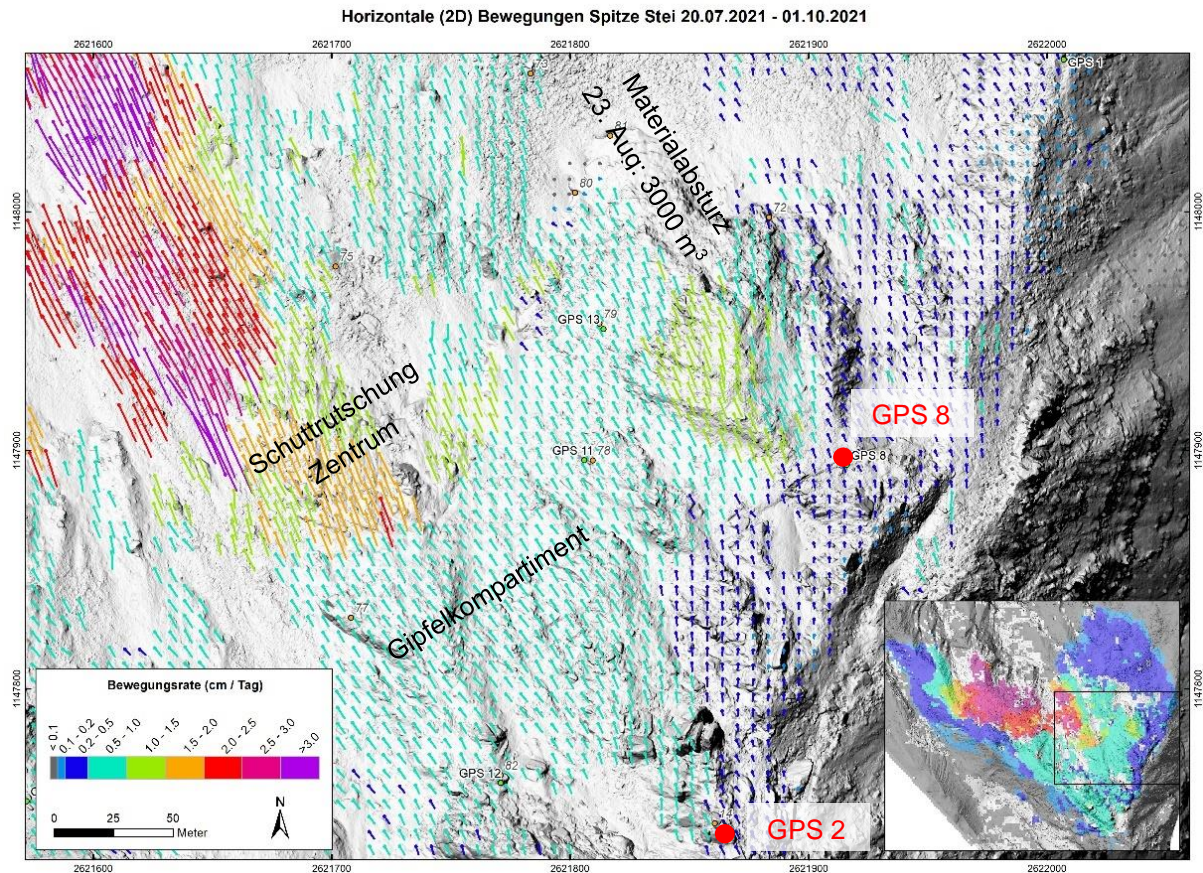


Abbildung 3: Horizontale Verschiebungen im östlichen Gipfelbereich zwischen dem 20. Juli und dem 1. Oktober 2021. Die Bewegungsvektoren sind 10-fach verlängert. Einfärbung nach Bewegungsraten (cm/Tag). Bereiche ohne Bewegungsvektoren waren am 20. Juli noch mit Schnee bedeckt. Mehrere Subkompartimente des Gipfelkompartimentes unterscheiden sich bezüglich Bewegungsrichtung und/oder Bewegungsbetrag deutlich. Vgl. Abbildung 2 für kartierte Brüche.

Die obigen Beobachtungen (ausgeprägte Brüche, stark geschwächter Fels mit fortschreitender Auflockerung) werden dahingehend interpretiert, dass ein kaskadenartiges, zeitlich gestaffeltes Versagen des Gipfelkompartimentes (Kompartimente in der Größenordnung mehrerer 100'000 bis wenige Mio. m³) grundsätzlich wahrscheinlicher ist als ein einmaliges Versagen des ganzen Gipfelbereiches (rund 8 Mio. m³). Die kinematischen Interaktionen über die Subkompartimentsgrenzen hinweg deuten jedoch darauf hin, dass die höher liegenden Subkompartimente von den unten angrenzenden Kompartimenten teilweise gestützt/stabilisiert werden. Der Absturz eines tiefer liegenden Kompartimentes könnte damit den (Teil)Absturz von oben angrenzenden Kompartimenten nach sich ziehen. Wie lange die zeitliche Verzögerung zwischen solchen Abstürzen ausfällt (Minuten bis Wochen) kann zurzeit nicht abschliessend beurteilt werden. Praktisch zeitgleiche Abstürze mehrerer

Subkompartimente sowie ein Gesamtabsturz des Gipfelbereiches müssen daher bei der Szenarienbildung und der Ausscheidung der Wirkungsräume nach wie vor berücksichtigt bleiben.

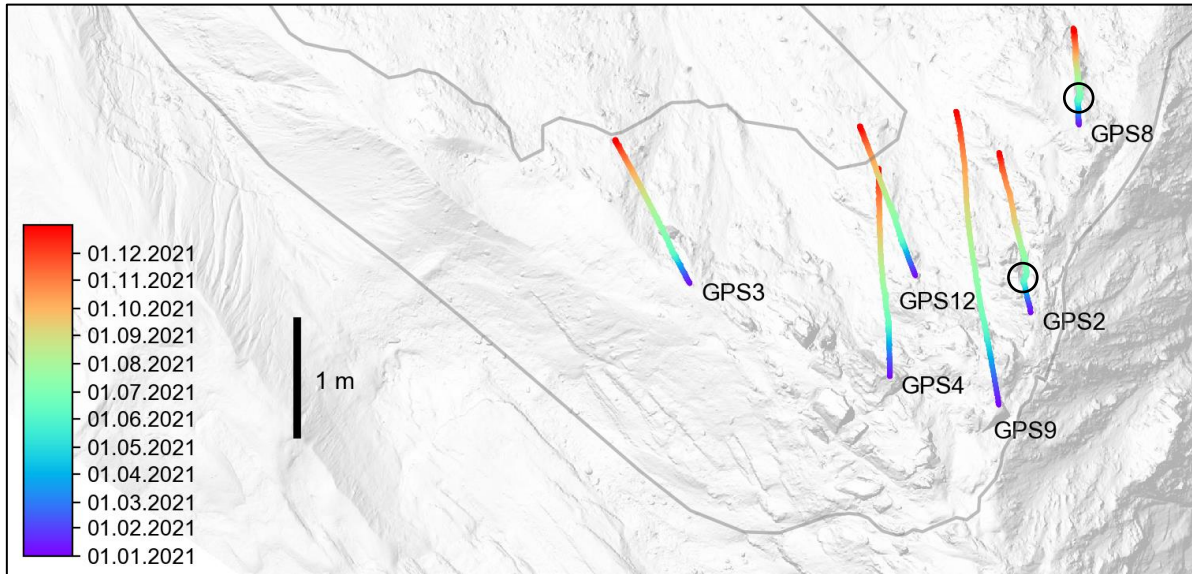


Abbildung 4: Horizontale Verschiebungen der GPS im Gipfelbereich (Jahr 2021, Faktor 100 verlängert, vgl. Massstab). Abrupte Richtungsänderungen fanden im Frühsommer bei GPS 2 und 8 synchron statt (schwarze Kreise). GPS 4 und 9 weisen ebenfalls synchrone Richtungsänderungen auf, diese sind jedoch kontinuierlicher Natur.

Dass sich der Gipfelbereich der Rutschung nicht weiter beschleunigte, obwohl die Verschiebungen in der angrenzenden Schuttrutschung deutlich zunahmten, wird dahingehend interpretiert, dass die positive Rückkopplung zwischen der Schuttrutschung und dem Gipfelbereich (Hangfussentlastung als möglicher Auslöser eines Sturzes aus dem Gipfelbereich [4]) vermutlich weniger relevant ist als zunächst definiert. Um den Einfluss der Rückkoppelung komplett auszuschliessen, ist die Datenlage jedoch noch nicht vollständig genug. So waren die Massenverluste aus der Schuttrutschung und damit die effektive Entlastung im Jahr 2021 eher gering, trotz grosser interner Umlagerungen.

2.4 Kompartimente Westgrat

Die Haupteigenschaften für die Kompartimente des Westgrates (in Abbildung 1 und Abbildung 2 braun, türkis, blau gestrichelt) sind wie folgt:

- Das Kompartiment des unteren Westgrates (braun, Kubatur 1.2 Mio. m³) zeigt eine Bewegungsrate von rund 0.5 – 2.0 m/J, mit Beschleunigungstendenz. Das grataufwärts angrenzende Kompartiment (Westgrat mitte, türkis, Kubatur 4.0 Mio. m³) bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von < 0.5 m/J, ebenfalls mit Beschleunigungstendenz. Die beiden Kompartimente werden durch eine in den kinematischen Daten klar erkennbare Gleitfläche getrennt, welche die Stratigraphie durchschlägt.
- Oberhalb des Kompartimentes Westgrat mitte befindet sich ein drittes Kompartiment (Westgrat oben). Dieses weist die geringsten Bewegungsraten auf; gemäss aktuellen Drohnen- und Radardaten deutlich unter 0.5 m/J. Bei diesem Kompartiment gibt es infolge der geringen Bewegungsrate bzw. ungünstigen Blickwinkeln (Radar) noch beträchtliche Unsicherheiten bezüglich Abgrenzung / Kubatur sowie Beschleunigungsraten.
- Der stabile Bereich des Westgrates unterhalb des unteren Westgratkompartimentes wirkt als keilförmiges Widerlager (Abbildung 5). Direkt oberhalb davon weisen die Bewegungsvektoren aufgrund der asymmetrischen, nach Osten verschobenen Anordnung des Keiles verbreitet eine abgelenkte, nordwestlich bis westliche Orientierung (Richtung Staubbach) auf.

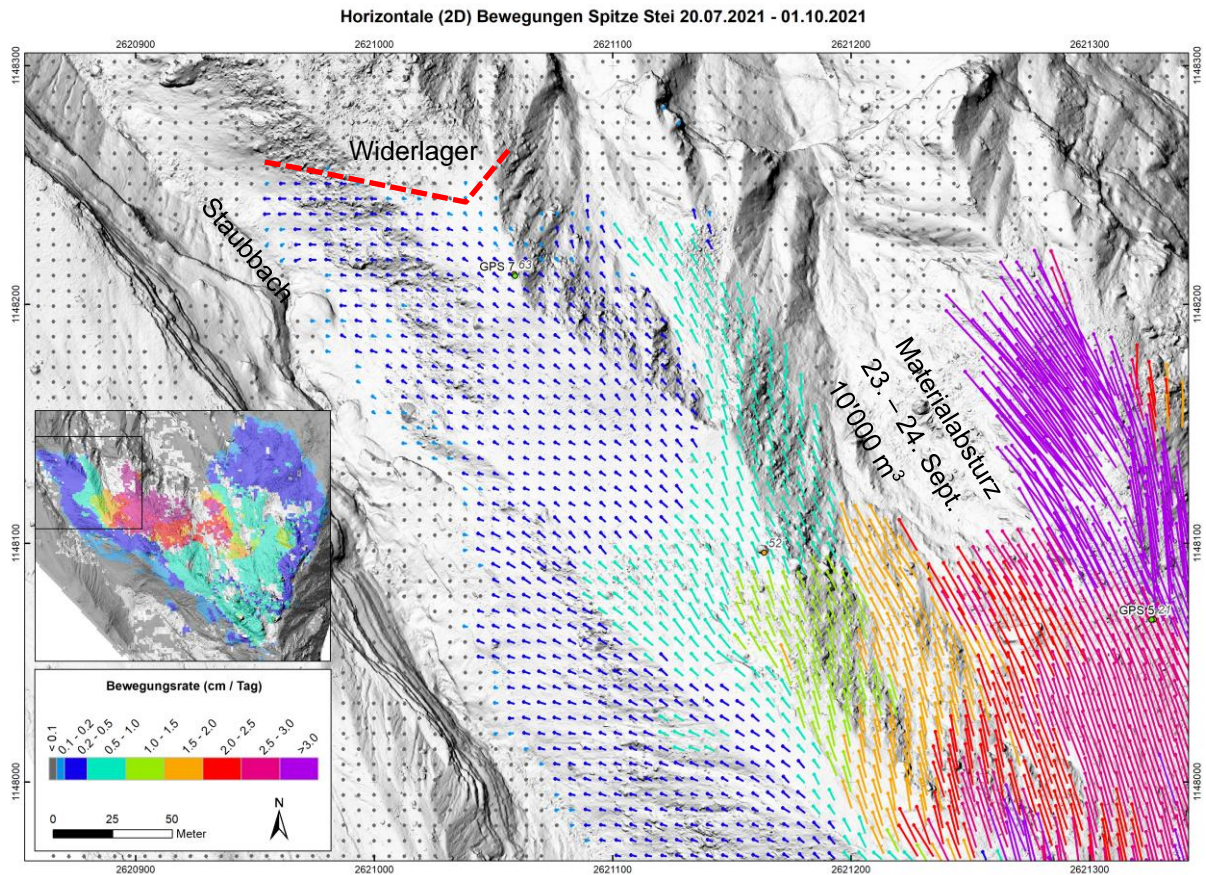


Abbildung 5: Horizontale Verschiebungen für den unteren Bereich des Westgrates zwischen dem 20. Juli und dem 1. Oktober 2021. Die Bewegungsvektoren sind 10-fach verlängert. Einfärbung nach Bewegungsrate (cm/Tag).

Die neu erhobenen Geschwindigkeitsfelder zeigen, dass sich grössere Kubaturen (mehrere Mio. m³) in Richtung Staubbach bewegen als dies basierend auf den bisher verfügbaren kinematischen Daten angenommen wurde. Angesichts der geringeren Bewegungs- und Beschleunigungsraten steht ein Absturz grosser Kubaturen über den massgebenden Zeitraum (10 Jahre) hier zwar nicht im Vordergrund, kann jedoch aufgrund der Beschleunigungen auch nicht ausgeschlossen werden. Dass es in den nächsten Jahren immer wieder zu kleineren, paketweisen Einträgen in den Staubbach kommt, wird aufgrund der vorliegenden Daten als sicher angenommen.

Während das Widerlager im unteren Westgrat die Stabilität des direkt angrenzenden Kompartimentes (braun) erhöht, dürfte es für die Stabilität der Pakete des oberen Westgrates (türkis, blau gestrichelt) von untergeordneter Bedeutung sein, da

sich diese langsamer bewegen (das braune Kompartiment gleitet auf den oben angrenzenden Kompartimenten ab). Im Falle eines (Teil)-Absturzes des braunen Kompartimentes könnten die oben angrenzenden Kompartimente durch die Entlastung des Hangfusses jedoch indirekt aktiviert werden.

2.5 Kompartiment Ost

Die Hauptkenntnisse für den Bereich Ost (rot in Abbildung 1 und Abbildung 2) sind wie folgt:

- Die überprüfte und angepasste Gleitfläche liegt stratigraphisch tiefer als die Gleitfläche der benachbarten Rutschkompartimente ([1],[7]). Der westliche Ausbiss des Kompartimentes verläuft ca. parallel zur Bewegungsrichtung der Rutschung. Das Gesamtvolumen des Kompartimentes Ost beträgt rund 2.9 Mio. m³.
- Die Bewegungsrate betrug im Jahr 2021 rund 1 bis 2 m/J. Ein scharf abgegrenztes Subkompartiment (Volumen rund 0.2 Mio. m³, [1]) im Frontbereich war mit Bewegungsraten > 5 m/J jedoch deutlich schneller unterwegs.
- Das Kompartiment Ost bewegt sich mindestens seit den 1970er-Jahren [8] und damit bereits deutlich länger als die restlichen Teile der Rutschung Spitze Stei. Dessen Beschleunigungsrate über die letzten Jahre (Verdopplung seit 2008) fiel im Vergleich zu den anderen Kompartimenten der Rutschung Spitze Stei jedoch geringer aus.
- Im sich rasch bewegenden, frontalen Subkompartiment nahmen die Bewegungsraten seit 2008 um Faktor 3 – 4 zu. Während des Frühsommers 2021 wurden hier vorübergehend Geschwindigkeiten von fast 0.5 m/Tag erreicht.
- Zusätzlich zur tiefreichenden Rutschbewegung des Felskörpers dürfte im Kompartiment Ost Permafrostkriechen im Schutt eine wichtige Rolle spielen. So befindet sich direkt oberhalb des beschleunigten Subkompartimentes ein kleiner aktiver Blockgletscher. Bei den Bohrungen in dem Bereich wurde eisreicher Permafrost angetroffen [10].

Aufgrund der bereits lange andauernden Rutschaktivität und den geringen Beschleunigungen über die letzten Jahre wird ein Absturz des ganzen Ostkompartimentes (2.9 Mio. m³) in den kommenden Jahren als wenig wahrscheinlich erachtet.

Hingegen wird aufgrund der starken Beschleunigung eine deutlich erhöhte Sturz- bzw. Rutschaktivität aus dem rund 0.2 Mio. m³ umfassenden Frontkompartiment erwartet. Am wahrscheinlichsten sind wiederum paketweise Austräge von Schutt während der Frühsommerphase (Geschwindigkeitsspitze aufgrund hoher Wassereinträge infolge Schneeschmelze und Niederschlag, [6]). Ein Komplettabsturz der gesamten 0.2 Mio. m³ ist nicht ausgeschlossen, wie ähnlich gelagerte Beispiele zeigen (z.B. [9]).

Obwohl es sich beim beschleunigenden frontalen Subkompartiment nicht um einen Blockgletscher handelt (geomorphologische Kriterien nicht erfüllt, Gelände zu steil), kann nicht ausgeschlossen werden, dass im Bereich (reliktischer) Permafrost mit Eiseinschlüssen vorkommt. Die starke Beschleunigung des Subkompartimentes über die letzten Jahre könnte daher mindestens teilweise auf die Erwärmung bzw. Schmelze des verbleibenden Permafrosteises zurückzuführen sein. Während wärmeres Eis zu höheren Kriechraten neigt, fördert schmelzendes Eis die Wasserwegigkeit hin zur Gleitfläche, was indirekt ebenfalls eine Erhöhung der Bewegungsraten bewirken kann. Die Fortführung des bisherigen Erwärmungstrends dürfte eine weitere Beschleunigung (und damit Abstürze) begünstigen, ein komplettes Abschmelzen des Permafrosteises hingegen später eine Beruhigung einleiten. Aktuell gehen wir davon aus, dass eine mögliche Beruhigung noch Jahre entfernt ist und damit genügend Zeit für kleinere und grössere Abstürze verbleibt.

3. Szenarien

3.1 Methodik

Die Arbeiten der letzten Jahre resultierten in acht Primärprozess-Szenarien [4], deren Gültigkeit bzw. Vollständigkeit basierend auf den neuen Erkenntnissen (Kapitel 2) überprüft wurde. Die Überprüfung wurde zunächst von mehreren Fachleuten individuell vorgenommen, gefolgt von Besprechungen, an denen die Resultate gemeinsam diskutiert und definitiv festgelegt wurden. Im Rahmen der Überprüfung wurde die Eintretenswahrscheinlichkeit der Szenarien quantifiziert, d.h. mit einem Wert zwischen 0 und 1 (bzw. 0 und 100%) belegt. Die quantifizierten Eintretenswahrscheinlichkeiten beziehen sich auf den 10-Jahreshorizont, welcher für die Erstellung der Gefährdungskarte massgebend ist ([5],[11]).

Der neue quantitative Ansatz unterscheidet sich vom bisherigen Ansatz, bei dem die Eintretenswahrscheinlichkeiten der Szenarien kategorial (z.B. «möglich» oder «sehr wahrscheinlich») festgelegt wurden ([3],[4],[11],[12]). Die Quantifizierung der Eintretenswahrscheinlichkeiten ermöglicht eine Propagation der Eintretenswahrscheinlichkeiten über alle Prozesse (Primär bis Tertiärprozesse) hinweg, was für die Erstellung der synoptischen Gefährdungskarte von Bedeutung ist.

3.2 Resultate

In Abbildung 6 sind die aktuell gültigen Szenarien für den 10-Jahreshorizont graphisch dargestellt, in Tabelle 1 sind deren Eintretenswahrscheinlichkeiten zusätzlich quantifiziert. Abbildung 7 zeigt die aktuell gültigen Eintretenswahrscheinlichkeiten im Vergleich mit den bisher gültigen Eintretenswahrscheinlichkeiten [4].

Zusätzlich zu den acht bisherigen Szenarien [4] wurden zwei neue Szenarien definiert (Abbildung 6). Zu diesen gehört Szenario S7 (Komplettabsturz des Kompartimentes Ost), welches mit den bisherigen Szenarien nur ungenügend abgedeckt war. Das zweite neue Szenario R3 (Rutschung aus dem Frontbereich Ost, bis 0.2 Mio. m³) wurde bereits bei der Überprüfung des permanenten Sperrgebietes Oeschinensee im Februar 2021 [13] festgelegt. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde eine weitere Beschleunigung des Frontkompartimentes Ost antizipiert, welche in der Folge im Frühsommer 2021 auch eintrat (Kapitel 2.5). Aufgrund der beobachteten Entwicklung wurde dieses Szenario definitiv in die Gruppe der Hauptszenarien aufgenommen.

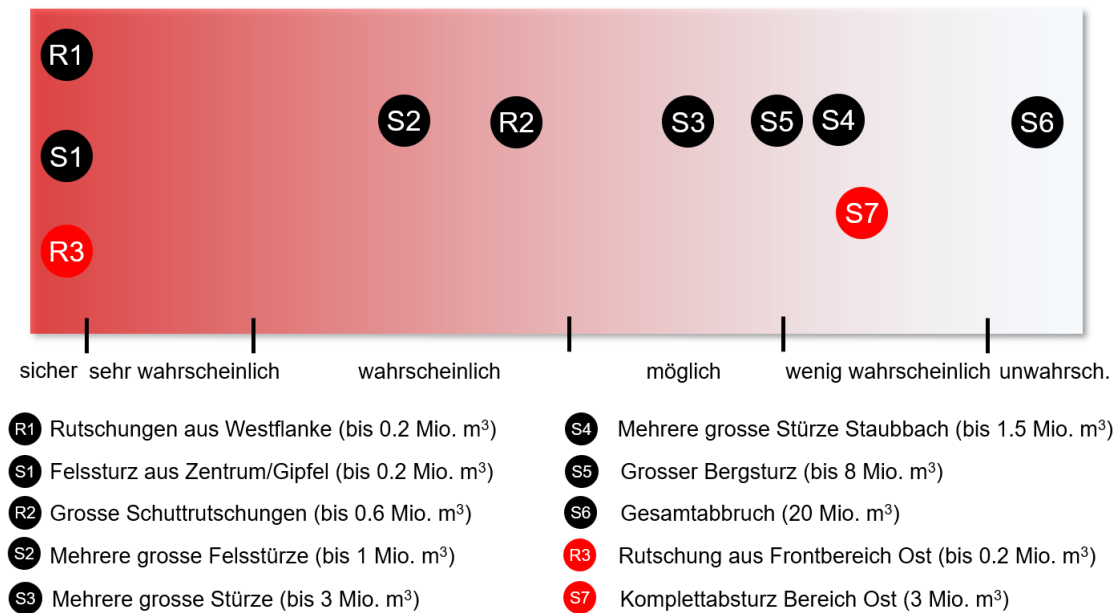


Abbildung 6: Für den 10-Jahreshorizont definierte Szenarien, Rutschung Spitze Stei (schwarz = bisherige Szenarien, rot = neu definierte Szenarien, R = Rutsch, S = Sturz). Vgl. Tabelle 1 für quantifizierte Eintretenswahrscheinlichkeiten.

Tabelle 1: Quantifizierte Eintretenswahrscheinlichkeiten für die zehn Hauptszenarien (Abbildung 6). Die Szenarien sind unabhängig, entsprechend summieren die individuellen Wahrscheinlichkeiten nicht auf 100%.

| Szenario | Eintretenswahrscheinlichkeit 10-Jahreshorizont (%) | Szenario | Eintretenswahrscheinlichkeit 10-Jahreshorizont (%) |
|----------|--|----------|--|
| R1 | 97 | S3 | 40 |
| S1 | 97 | S5 | 33 |
| R3 | 97 | S4 | 23 |
| S2 | 65 | S7 | 21 |
| R2 | 55 | S6 | 5 |

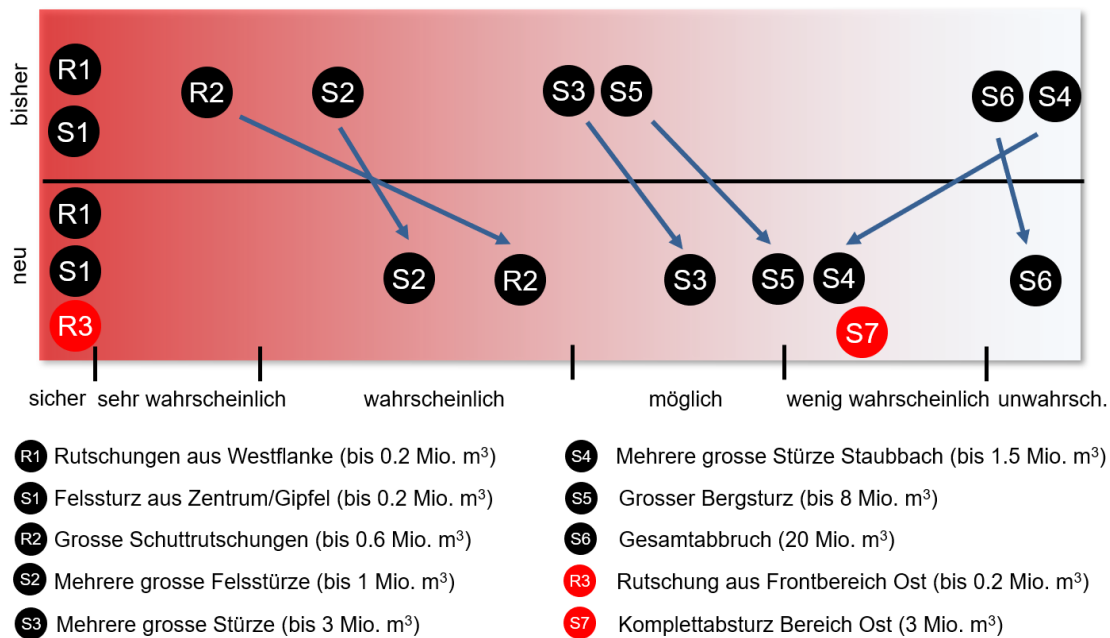


Abbildung 7: Aktuell gültige Szenarien für die Rutschung Spitze Stei (unten) im Vergleich zu den bisher gültigen Szenarien (oben).

Mit 97% über die nächsten 10 Jahre wurde den Szenarien R1, S1 und R3 die höchste Eintretenswahrscheinlichkeit aller Szenarien zugewiesen (Tabelle 1). Im Vergleich zu den Vorjahren blieb die Eintretenswahrscheinlichkeit unverändert (Abbildung 7). Die Kubaturen der drei Szenarien (bis 0.2 Mio. m³) widerspiegeln die aktuelle Einschätzung, wonach häufige Ereignisse über die nächsten Jahre grösser ausfallen könnten als die bisher grössten beobachteten Ereignisse (Kapitel 2). Diese Einschätzung gilt sowohl für Rutschungen aus der Westflanke, Stürze aus dem Gipfelbereich, wie für Rutschungen aus dem Frontbereich Ost.

Den grossen Sturzsznarien aus dem Gipfelbereich S2 (1 Mio. m³), S3 (3 Mio. m³) und S5 (8 Mio. m³) wurden Eintretenswahrscheinlichkeiten von 65%, 40% und 33% zugeordnet. Teilabstürze aus dem Gipfelbereich (d.h. Abstürze eines Teils der ausgeschiedenen Subkompartimente, vgl. Kapitel 2) werden als wahrscheinlicher eingeschätzt (65%, 40%) als ein Absturz des ganzen Gipfelkompartimentes (33%). Ein Komplettabsturz des Gipfelkompartimentes wird u.a. aufgrund der dokumentierten kinematischen Beeinflussungen über die Subkompartimentsgrenzen hinweg (synchrone Richtungswechsel, Kapitel 2) weiterhin als möglich eingeschätzt. Im Vergleich zu den bisher gültigen Szenarien [4] wurden die Eintretenswahrscheinlichkeiten generell reduziert. Ein wichtiger Grund dafür ist der diesjährige Hiatus in

der Beschleunigung des Felskompartimentes, welcher trotz des grossen Wasserdargebotes und einer starken Beschleunigung in der angrenzenden Schuttrutschung (Hangfussentlastung, Kapitel 2) eintrat.

Grosse Schuttrutschungen aus dem Zentrumsbereich (R2) werden nach wie vor als wahrscheinlich eingeschätzt, die aktuelle Eintretenswahrscheinlichkeit (55% über 10 Jahre) wurde im Vergleich zur vorgängigen Einschätzung (Abbildung 7) jedoch ebenfalls reduziert. So deuten die neuen Erkenntnisse darauf hin, dass der Materialaustrag aus der Schuttrutschung häufiger, dafür in Paketen $\ll 0.6 \text{ Mio. m}^3$ stattfinden könnte, dies insbesondere in der Westflanke. Ausbrüche grösserer Pakete dürften am ehesten im Zentrumsbereich auftreten, wo in den Monitoringdaten verschiedentlich abrupte Beschleunigungen festgestellt worden sind, welche sich jedoch nicht bis zur Absturzkante fortsetzen (Kapitel 2).

Die Eintretenswahrscheinlichkeit eines grösseren Sturzes in Richtung Staubbach (S4) wurde von unwahrscheinlich auf wenig wahrscheinlich (23% Eintretenswahrscheinlichkeit über die nächsten 10 Jahre) erhöht. Dieser Erhöhung liegt die Tatsache zu Grunde, dass sich grössere Kubaturen in Richtung Staubbach bewegen als bis anhin bekannt war (Kapitel 2). Aufgrund der nach wie vor relativ geringen Bewegungsraten und Beschleunigungen wurden die Eintretenswahrscheinlichkeiten nicht weiter erhöht.

Ein zeitlich synchroner Gesamtabbruch (S6) der ganzen instabilen Felsmasse wird nach wie vor als unwahrscheinlich eingeschätzt. Im Rahmen der Überprüfung wurde die Eintretenswahrscheinlichkeit des Gesamtabbruches leicht reduziert, auf 5% über die nächsten 10 Jahre. Ein Hauptargument für die gewählte Eintretenswahrscheinlichkeit ist die Beobachtung, dass kinematische Interaktionen zwischen den Hauptkompartimenten gering sind. Diese Einschätzung wurde durch das überarbeitete 3D-Modell bestätigt.

4. Wirkungsräume

Für die Ausscheidung der Wirkungsräume wurden Sturzsimulationen mit dem RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation) Modell durchgeführt. Die Simulationen resultierten in Wirkungsräumen mit dazugehörigen Eintretenswahrscheinlichkeiten, welche als Grundlage für die Erstellung der Gefährdungskarte dienten. RAMMS kam bereits bei früheren Expertisen zum Spitze Stei zur Anwendung (u.a. [3], [13]). Das Modell und dessen wichtigste Inputparameter sind in Bericht [3] beschrieben.

4.1 Methodik

Für die Modellierungen wurde ein 5 m Terrainmodell verwendet, welches den Zustand der Dämme bzw. des Geschiebeablagerungsplatzes vom 24.10.2021 abbildet. Im Vorfeld der Modellierungen wurden für die zehn Hauptszenarien (Kapitel 3.2) mehrere Unterszenarien definiert (Abbildung 8). Mit diesen Unterszenarien wurden räumlich variable Ausbruchgebiete sowie verschiedene Abbruchmuster (z.B. kaskadenartige Abstürze vs. Abstürze «en Bloc») simuliert. Für die kaskadenartigen Unterszenarien (d.h. dem Absturz mehrerer Subkompartimente nacheinander) wurden die Ablagerungen der aufeinanderfolgenden Modellierungen (ein Modellierungslauf pro Absturz) jeweils summiert.

Die potenziell variablen Eigenschaften der Sturzmasse (Dichte, Wassergehalt, Fliesshöhe) wurden über den Parameter der trockenen Reibung (μ) abgebildet. Sämtliche Modellierungen der Unterszenarien wurden mit fünf verschiedenen μ -Werten durchgeführt. Die Gewichtung der μ -Werte wurde basierend auf Feldbeobachtungen und Erfahrungswerten aus der Literatur (vgl. [3]) via Wahrscheinlichkeitsverteilung vorgenommen (Tabelle 2). Definiert wurden zwei verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen, welche in Abhängigkeit des mobilisierten Volumens zur Anwendung kamen (für grössere Ereignisse sind tiefere μ -Werte wahrscheinlicher, [3]).

Geometrie und Rauigkeit des Untergrundes können über den Parameter der turbulenten Reibung (ξ) berücksichtigt werden. Da dieser Parameter die Reichweiten der Sturzmasse kaum beeinflusst, wurde er wie in [3] über alle Modellierungen konstant gehalten (500 m s^{-2}).

| | | | | | |
|----|-----|---|-------------------|----------------------------------|--------|
| R1 | 97% | 3 räuml. Varianten | je 33.3% | μ-Version | 2 |
| S1 | 97% | 1 Variante | 100% | μ-Version | 2 |
| R3 | 97% | 1 Variante | 100% | μ-Version | 2 |
| S2 | 65% | 4 Varianten - 2 Bloc - 2 Kaskaden | je 25% je 25 % | μ-Version - Bloc - Kaskade | 1 2 |
| R2 | 55% | 2 räuml. Varianten | je 50% | μ-Version | 2 |
| S3 | 40% | 2 Varianten - 1 Bloc - 1 Kaskade | 33.3% 66.6% | μ-Version - Bloc - Kaskade | 1 2 |
| S5 | 33% | 2 Varianten - 1 Bloc - 1 Kaskade | 33.3% 66.6% | μ-Version - Bloc - Kaskade | 1 2 |
| S4 | 23% | 2 Varianten - 1 Bloc - 1 Kaskade | 33.3% 66.6% | μ-Version - Bloc - Kaskade | 1 2 |
| S7 | 21% | 1 Variante | 100% | μ-Version | 1 |
| S6 | 5% | 1 Variante | 100% | μ-Version | 1 |

Abbildung 8: Übersichtsgrafik zu den durchgeführten RAMMS-Modellierungen. Grau hinterlegt sind die definierten Hauptszenarien mit den jeweiligen Eintretenswahrscheinlichkeiten über den 10-Jahreshorizont (Tabelle 1). Blau hinterlegt sind die definierten Untervarianten dieser Hauptszenarien, welche sich bezüglich Lage des Ausbruchgebietes oder Abbruchmuster unterscheiden. Rot hinterlegt sind die modellierten μ -Parameter-Räume. Vgl. Tabelle 2 für die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Die über die Unterszenarien bzw. μ -Parameter aufsummierten Wahrscheinlichkeiten ergeben jeweils 100%.

Tabelle 2: Wahrscheinlichkeitsverteilung für die zwei μ -Parameter Versionen aus Abbildung 8. Version 1 kam bei Sturzvolumen ≥ 1 Mio. m^3 zur Anwendung, Version 2 bei Volumina < 1 Mio. m^3 .

| μ -Parameter Version 1 | | μ -Parameter Version 2 | |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| μ | Eintretenswahrscheinlichkeit (%) | μ | Eintretenswahrscheinlichkeit (%) |
| 0.10 | 5 | 0.10 | 2 |
| 0.15 | 15 | 0.15 | 10 |
| 0.20 | 60 | 0.20 | 50 |
| 0.30 | 15 | 0.30 | 30 |
| 0.40 | 5 | 0.40 | 8 |

Die aus den Modellläufen resultierenden Ablagerungshöhen wurden in Binär-Raster umgewandelt (1 = Ablagerung = starke Einwirkung; 0 = keine Ablagerung = keine Einwirkung) und für jedes der zehn Hauptszenarien wie folgt multipliziert:

$$P_{\text{Hauptszenario}} \cdot P_{\text{Unterszenario}} \cdot P_{\mu}$$

P entspricht den Wahrscheinlichkeiten aus Abbildung 8 bzw. Tabelle 2. Die so berechneten Eintretenswahrscheinlichkeiten der individuellen Modellierungsläufe wurden rasterzellenweise summiert, um die flächige Eintretenswahrscheinlichkeit der Hauptszenarien zu bestimmen.

Gesamthaft wurden 140 Modellierungsläufe durchgeführt. Im Falle des Szenarios R1 (97% Eintretenswahrscheinlichkeit) wurden z.B. drei Unterszenarien (für drei Ausbruchgebiete) definiert, für welche separate Modellierungsläufe mit einem Ausbruchvolumen von jeweils 0.2 Mio. m^3 und je fünf μ -Werten durchgeführt wurden (15 Modellierungen total, Abbildung 9). Die resultierenden flächigen Eintretenswahrscheinlichkeiten für Szenario R1 sind in Abbildung 10 dargestellt.

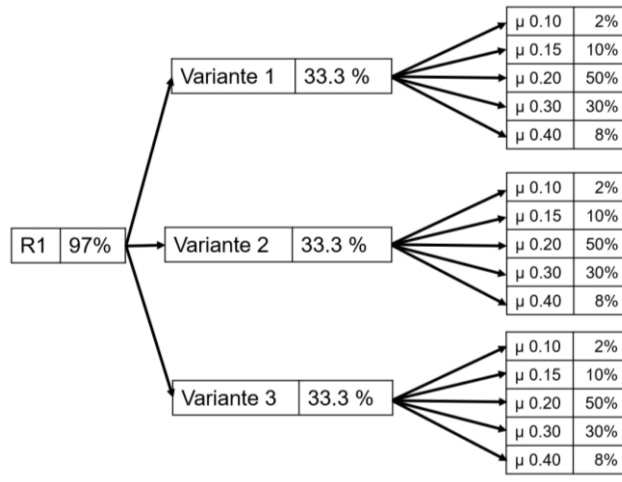


Abbildung 9: Szenarienbaum für das Hauptszenario R1 (drei verschiedene Ausbruchgebiete, μ -Parameter Version 2). Gesamthaft wurden für R1 15 Modellierungen durchgeführt.

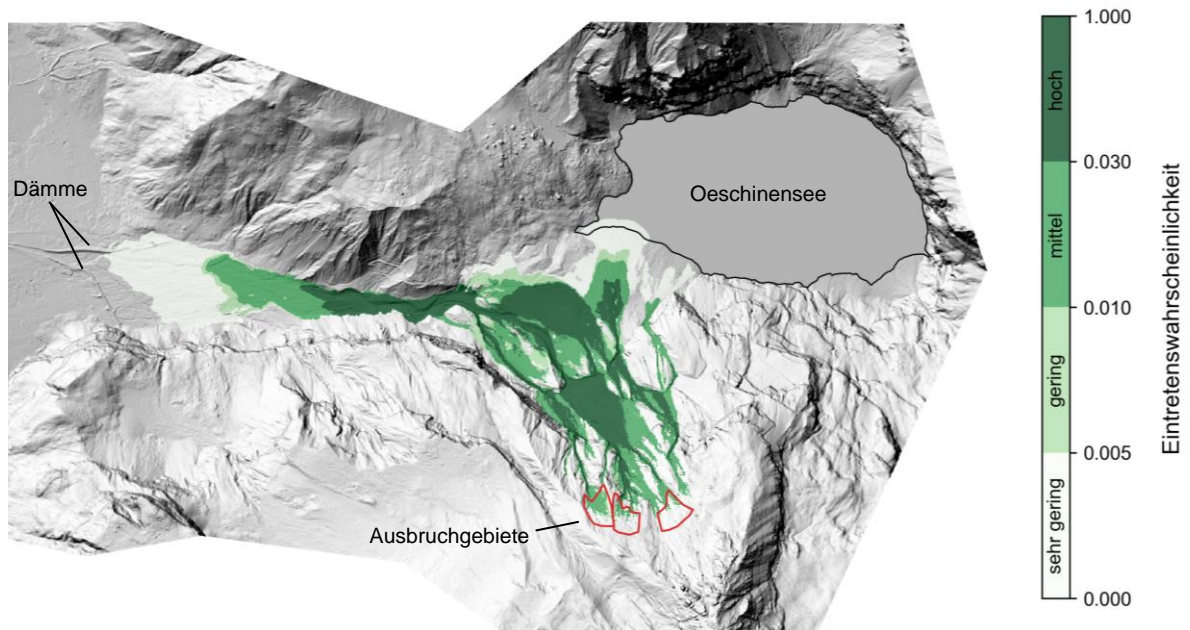


Abbildung 10: Flächige Eintretenswahrscheinlichkeiten für Szenario R1, abgeleitet aus 15 Modellläufen und klassifiziert nach Vorgaben der Gefährdungskarte ($> 3\%/J$ = hoch, $1 - 3\%/J$ = mittel, $0.5 - 1\%/J$ = gering, $< 0.5\%/J$ = sehr gering). Die drei berücksichtigten Ausbruchgebiete im unteren Bereich der Rutschung Spitze Stei sind rot umrandet.

Für die Erstellung der Gefährdungskarte «Primärprozesse» ist die synoptische Eintretenswahrscheinlichkeit, d.h. die Eintretenswahrscheinlichkeit über alle Hauptszenarien hinweg, massgebend. Zur Bestimmung dieser synoptischen Eintretenswahrscheinlichkeit wurde aus den flächigen Eintretenswahrscheinlichkeiten der zehn Hauptszenarien zellenweise die maximale Wahrscheinlichkeit extrahiert.

Die durchgeführten Modellierungen umfassen nur Szenarien, welche realistischerweise über den Perimeter der permanenten Sperrzone hinausgelangen können (kleinste modellierte Kubatur: 0.2 Mio. m³). Kleine, aber häufige Ereignisse, welche innerhalb der permanenten Sperrzone verbleiben, wurden nicht modelliert, da diese für die Gefährdungskarte nicht massgebend sind. Innerhalb der Sicherheitszone sind die präsentierten Eintretenswahrscheinlichkeiten daher zu tief, gerade in den oberen Bereichen der Chalberspissibäche, die bereits durch häufig auftretende, kleine Stürze erreicht werden. Innerhalb der permanenten Sperrzone gibt es zudem Bereiche, die so steil sind, dass sie bei den simulierten Stürzen zwar bestrichen werden, jedoch keine Ablagerungen aufweisen/zurückhalten. In diesen Bereichen sind die ausgewiesenen Eintretenswahrscheinlichkeiten ebenfalls nicht realistisch. In den Randbereichen der permanenten Sperrzone und ausserhalb davon gelten die obigen Einschränkungen nicht.

4.2 Resultate

Abbildung 11 fasst die Modellierungsergebnisse übersichtsmässig zusammen. Neben den synoptischen, flächigen Eintretenswahrscheinlichkeiten sind die massgebenden, d.h. die für die maximalen Eintretenswahrscheinlichkeiten verantwortlichen Szenarien dargestellt. Die flächigen Eintretenswahrscheinlichkeiten aller Hauptszenarien, inkl. simulierter Ausbruchgebiete, sind in Abbildung 12 übersichtsmässig abgebildet; vergrösserte Einzelgrafiken analog Abbildung 10 sind in Anhang 2 einsehbar. Die Ablagerungsmächtigkeiten aller Modellläufe sind ebenfalls in Anhang 2 dargestellt.

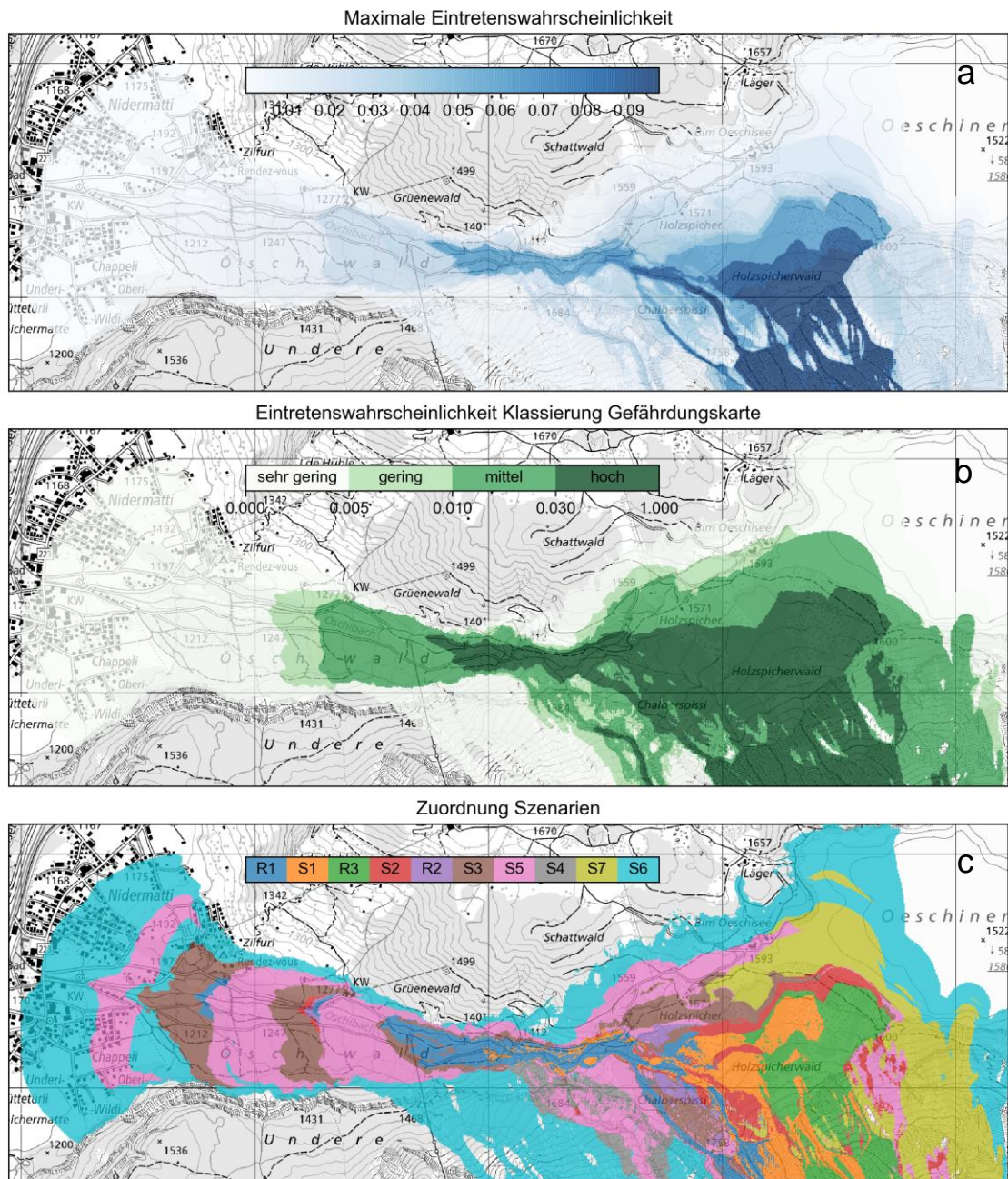


Abbildung 11: Synoptische Darstellung der Modellierungsergebnisse. (a) Maximale Eintretenswahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung aller Szenarien, ohne Kategorisierung. Der Wert 0.05 in der Legende entspricht einer Eintretenswahrscheinlichkeit von 5%/Jahr. (b) Maximale Eintretenswahrscheinlichkeiten über alle Szenarien, kategorisiert nach Vorgaben der Gefährdungskarte. (c) Übersicht massgebende (d.h. für maximale Eintretenswahrscheinlichkeit verantwortliche) Szenarien.

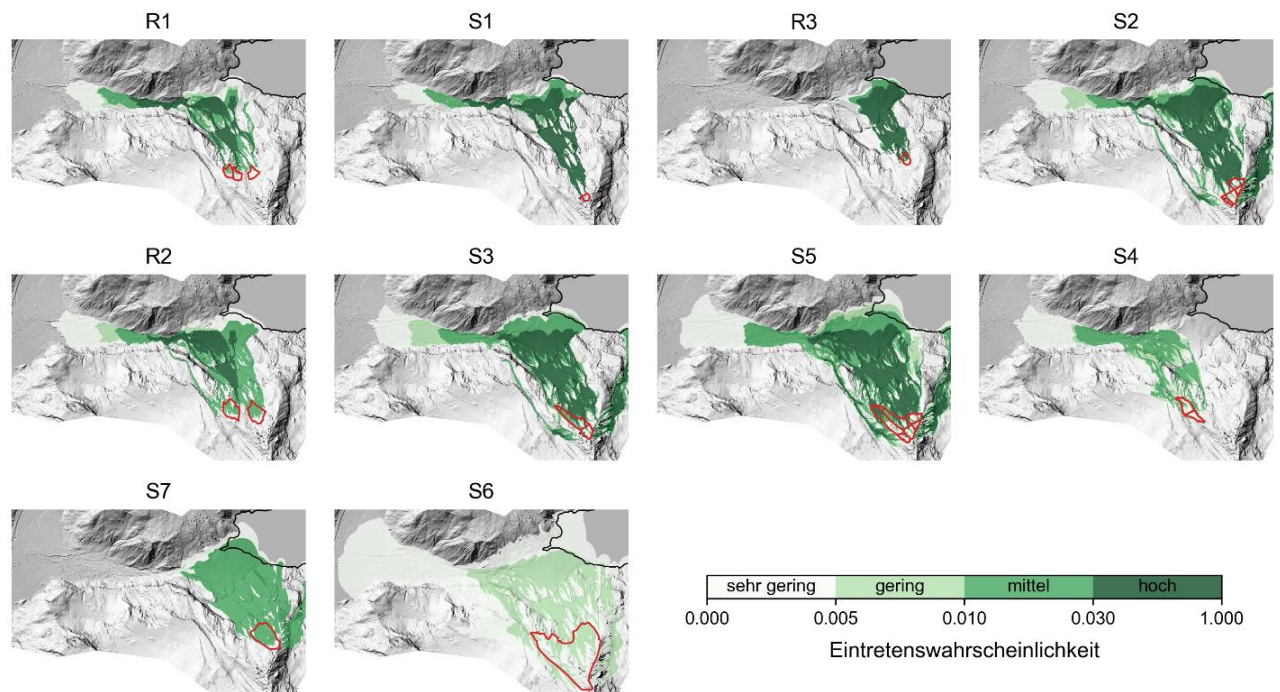


Abbildung 12: Eintretenswahrscheinlichkeiten für die zehn definierten Hauptszenarien, klassifiziert nach Vorgaben der Gefährdungskarte ($> 3\%/J$ = hoch, $1 - 3\%/J$ = mittel, $0,5 - 1\%/J$ = gering, $< 0,5\%/J$ = sehr gering). Die berücksichtigten Ausbruchgebiete sind rot umrandet.

Mit den vorliegenden Modellierungen werden die Resultate früherer Expertisen grundsätzlich gestützt. Anpassungen bei den Wirkungsräumen und Eintretenswahrscheinlichkeiten gibt es primär aufgrund folgender Faktoren:

- **Zusätzliche Szenarien:** Die Berücksichtigung der beiden zusätzlichen Szenarien R3 und S7 führte im zentralen und östlichen Bereich des Kegels Holzspicherwald zu Anpassungen bei den massgebenden Szenarien (Abbildung 11c). So ist das zusätzliche Szenario R3 neu im östlichen Bereich des Kegels massgebend. Die entsprechenden Modellierungen zeigen, dass abstürzendes Material aus dem unteren Bereich des Ostkompartimentes mit hoher Wahrscheinlichkeit bis hin zum Oeschinensee gelangen kann (Abbildung 12). Das zusätzliche Szenario S7 ist neu für einen grossen Bereich im zentralen Kegel das massgebende Szenario. Knapp nicht zu diesem Bereich gehört der Perimeter der Gasthäuser am Oeschinensee bzw. der Lifanlagen im Bereich Holzspicher. Hier ist nach wie vor das früher definierte Szenario S5 massgebend (Abbildung 11c).

- Eintretenswahrscheinlichkeiten Hauptszenarien: Aufgrund der Anpassung der Eintretenswahrscheinlichkeiten bei mehreren Hauptszenarien (vgl. Kapitel 3.2) gab es entsprechende Anpassungen auch bei den flächigen Eintretenswahrscheinlichkeiten (Abbildung 12). Die Reduktion der Eintretenswahrscheinlichkeit des Szenarios S5 führte z.B. dazu, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Gebäude unterhalb des Geschiebeablagerungsplatzes vom Primärprozess getroffen werden, geringer wurde. Die Erhöhung der Eintretenswahrscheinlichkeit des Szenarios S4 beeinflusste die synoptische Eintretenswahrscheinlichkeit nicht, da dieses Szenario durch Szenarien mit höherer Eintretenswahrscheinlichkeit (z.B. R1, S5) übersteuert wird (Abbildung 11c).
- Kaskadenartige Abstürze: Die Berücksichtigung und höhere Gewichtung kaskadenartiger Abstürze bei den Unterszenarien führte zu einer Verkleinerung der Wirkungsflächen bzw. einer entsprechenden Anpassung der flächigen Eintretenswahrscheinlichkeiten, da die Reichweite kaskadenartiger Abstürze geringer ist als jene gleich grosser Abstürze «en Bloc». Im Falle des Szenarios S5 ist der Unterschied im zentralen bzw. östlichen Teil des Schuttkegels besonders deutlich (Abbildung 13). Ähnliche Unterschiede wie bei Szenario S5 werden auch bei den weiteren Szenarien beobachtet.
- Dämme: Die Simulationen bilden die Schutzwirkung der höher gebauten Dämme ab. Modellläufe, welche bis in den Bereich der Schutzdämme gelangen, zeigen kleinere Wirkungsflächen ausserhalb der Dämme als dies bei Simulationen mit tieferen Dämmen bzw. ganz ohne Dämme der Fall wäre.

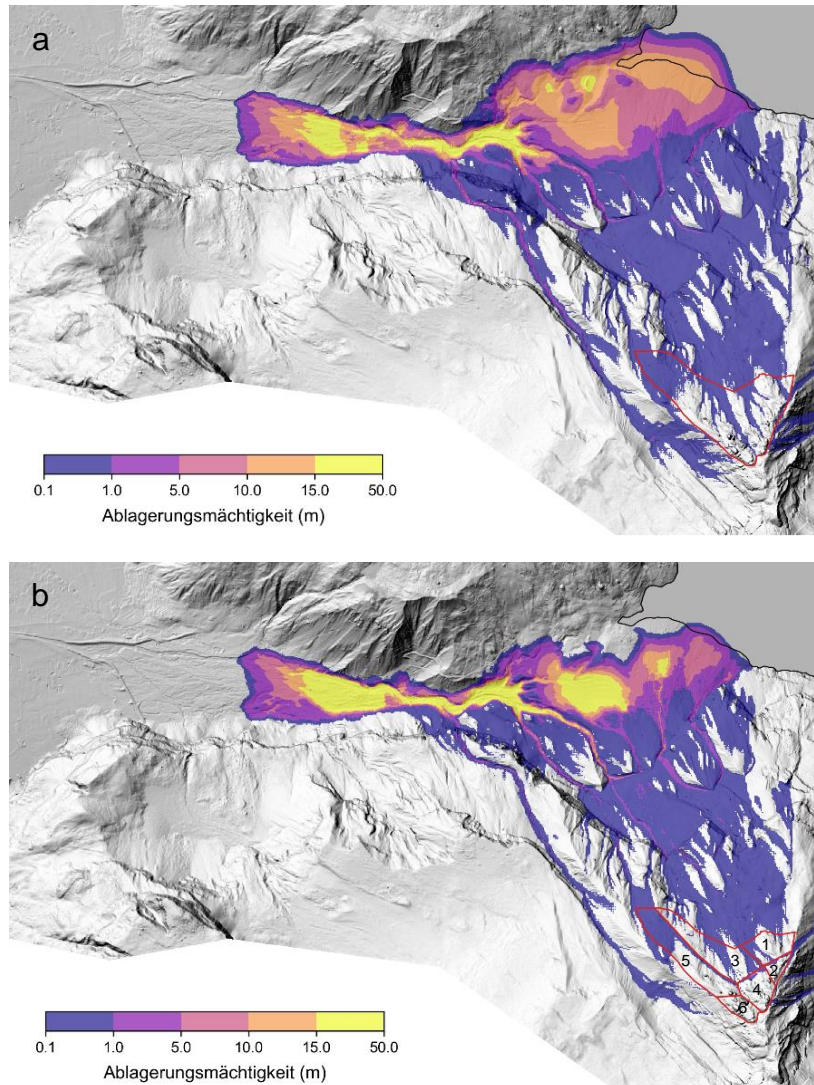


Abbildung 13: Modellierte Ablagerungsmächtigkeiten ($\mu = 0.2$, $\xi = 500 \text{ m s}^{-2}$) für das 8 Mio. m^3 Szenario S5 (a) «en Bloc» und (b) als Kaskade. Für das Kaskadenszenario wurden die Abstürze der sechs abgegrenzten Subkompartimente in nummerierter Reihenfolge simuliert, unter Berücksichtigung der jeweiligen Ablagerungen. Geringere Reichweiten im Falle der Kaskade führten zu entsprechend höheren Ablagerungsmächtigkeiten.

Das Ergebnis der Überführung der obigen Resultate ins Schema der Gefährdungskarte ist in Abbildung 14 dargestellt. Gemäss Vorgaben [5] fallen Flächen mit sehr geringen Eintretenswahrscheinlichkeiten in die Klasse der Restgefährdung, jene

mit höheren Eintretenswahrscheinlichkeiten in die Klasse der erheblichen Gefährdung. Die für die Gefährdungskarte ebenfalls massgeblichen Intensitäten sind für Sturzprozesse durchgehend hoch und werden daher nicht separat abgebildet.

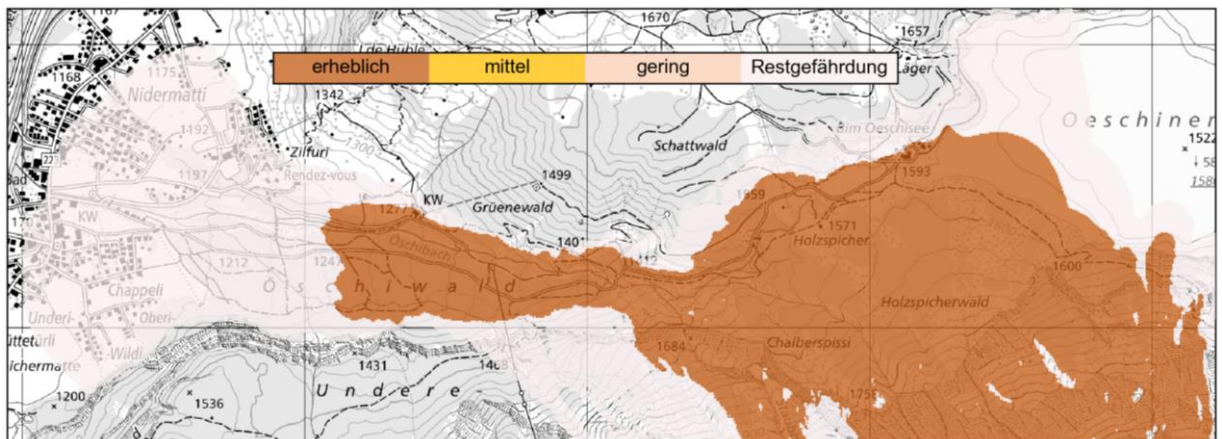


Abbildung 14: Gefährdungskarte Primärprozess für den modellierten Perimeter zwischen Oeschinensee und Kandersteg.

Die Zone mit erheblicher Gefährdung durch den Primärprozess wurde im Vergleich zum Vorjahr kleiner, aus den vorgängig genannten Gründen (Eintretenswahrscheinlichkeiten der massgeblichen Hauptszenarien reduziert, kaskadenartiges Versagen stärker gewichtet, Dämme berücksichtigt). Im Perimeter Dorf wurde die Zone aufgrund der neuen Resultate um ca. 150 m zurückgesetzt, sodass sich aktuell ein Gebäude im Bereich Zilfuri in der Zone mit erheblicher Gefährdung befindet (Abbildung 15).

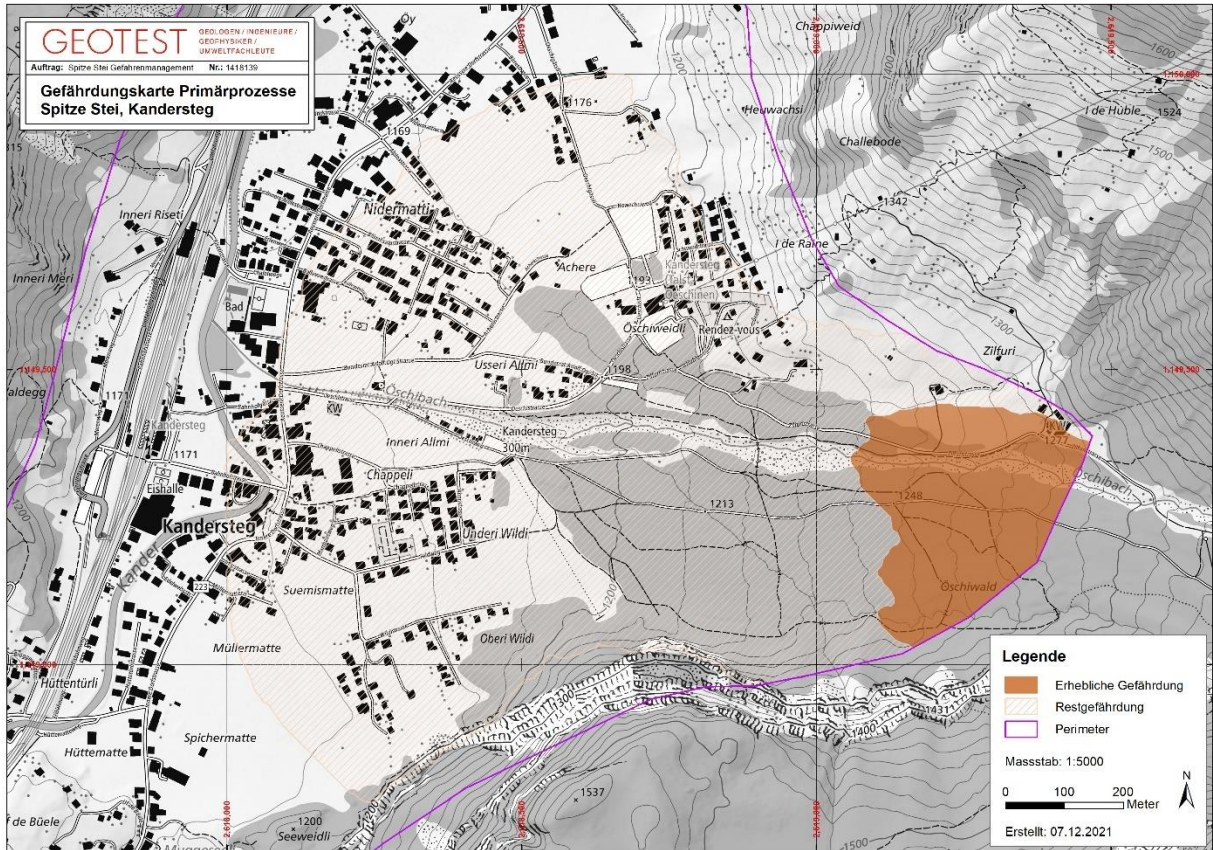


Abbildung 15: Gefährdungskarte Primärprozess für den Perimeter Dorf.

5. Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Überprüfung der bisherigen Szenarien «Primärprozess» wurden die Eintretenswahrscheinlichkeiten von zwei Szenarien unverändert belassen, jene von fünf Szenarien reduziert sowie diejenigen eines Szenarios erhöht. Zwei Szenarien wurden neu definiert. Ausgehend von der bisher semi-quantitativen Definition wurden die Eintretenswahrscheinlichkeiten neu durchgehend quantifiziert. Dass es in den nächsten 10 Jahren zu einem Absturz einer Kubatur von mindestens 1 Mio. m³ kommt, wird aktuell mit einer Wahrscheinlichkeit von 55% beurteilt. Dass Stürze dieser Grössenordnung nicht «en Bloc», sondern als Kaskade auftreten (d.h. in Paketen einiger 100'000 m³, welche zeitlich verzögert, z.B. innert Wochenfrist abstürzen), wird als möglich bis wahrscheinlich (mindestens 50% Eintretenswahrscheinlichkeit) betrachtet.

Für die Überprüfung der Wirkungsräume wurden 140 neue Modellierungen durchgeführt, unter Berücksichtigung der aktuellen Hauptszenarien, ergänzter Unterszenarien sowie dem aktuellen Ausbaustand der Dämme. Basierend auf den neuen Erkenntnissen konnten die Wirkungsräume leicht zurückgenommen bzw. deren Eintretenswahrscheinlichkeiten reduziert werden. Grundsätzlich werden die Resultate früherer Expertisen durch die neuen Modellierungen gestützt.

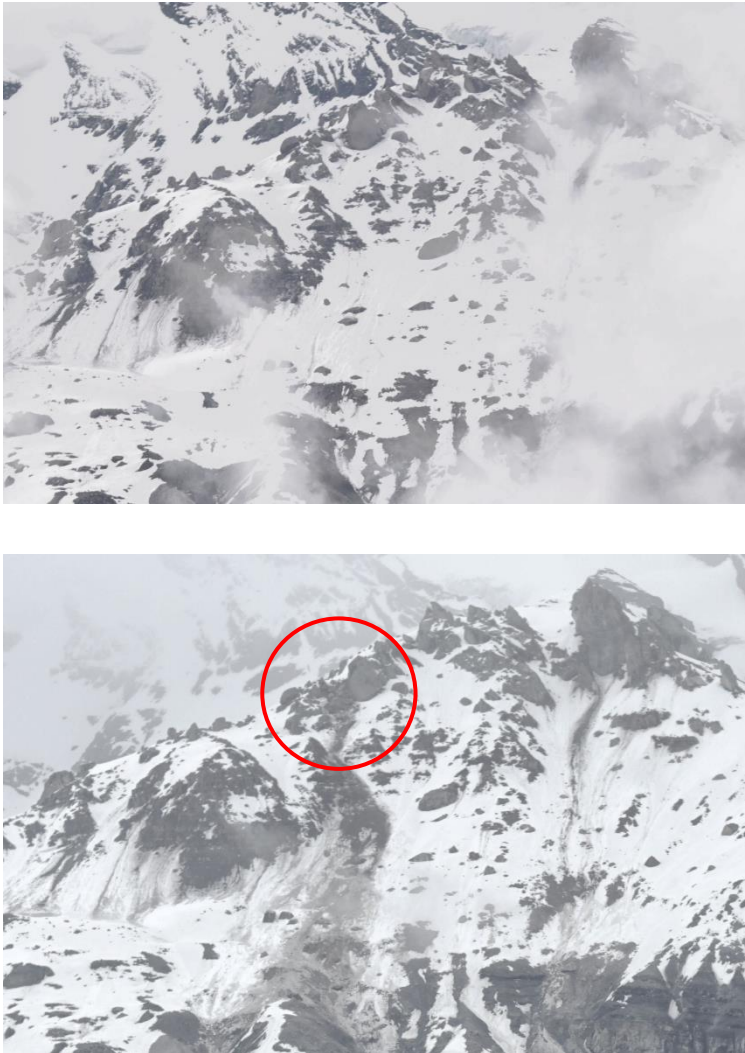
Die obige Überprüfung der Szenarien und Wirkungsräume wurde methodisch nachvollziehbar implementiert, dokumentiert und soweit möglich automatisiert. Zukünftige Analysen können basierend auf der etablierten Methodik weiter ausgebaut bzw. verfeinert werden, z.B. mit Modellierungen auf einem räumlich höher aufgelösten Terrainmodell, Modellierungen zusätzlicher Unterszenarien (z.B. weiterer Ausbruchgebiete) oder zusätzlicher μ -Parameterwerte. Die Eintretenswahrscheinlichkeiten der Hauptszenarien können zudem samt Unsicherheit durch die Modellierungen propagiert werden. Wir gehen davon aus, dass solch inkrementelle Verbesserungen nur zu geringen Anpassungen bei den Resultaten führen werden. Grössere Anpassungen sind erst zu erwarten, wenn die Eintretenswahrscheinlichkeiten gewisser Szenarien (z.B. des 8 Mio. m³ Szenarios) stark reduziert oder massgebende Szenarien sogar ganz ausgeschlossen werden können. Weitere und längere Beobachtungen (z.B. Drohnenmessungen zur detaillierteren Ausscheidung/Charakterisierung von Subkompartimenten, Scherversuche SLF zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Gleitfläche) sind zu diesem Zweck notwendig.

6. Quellen

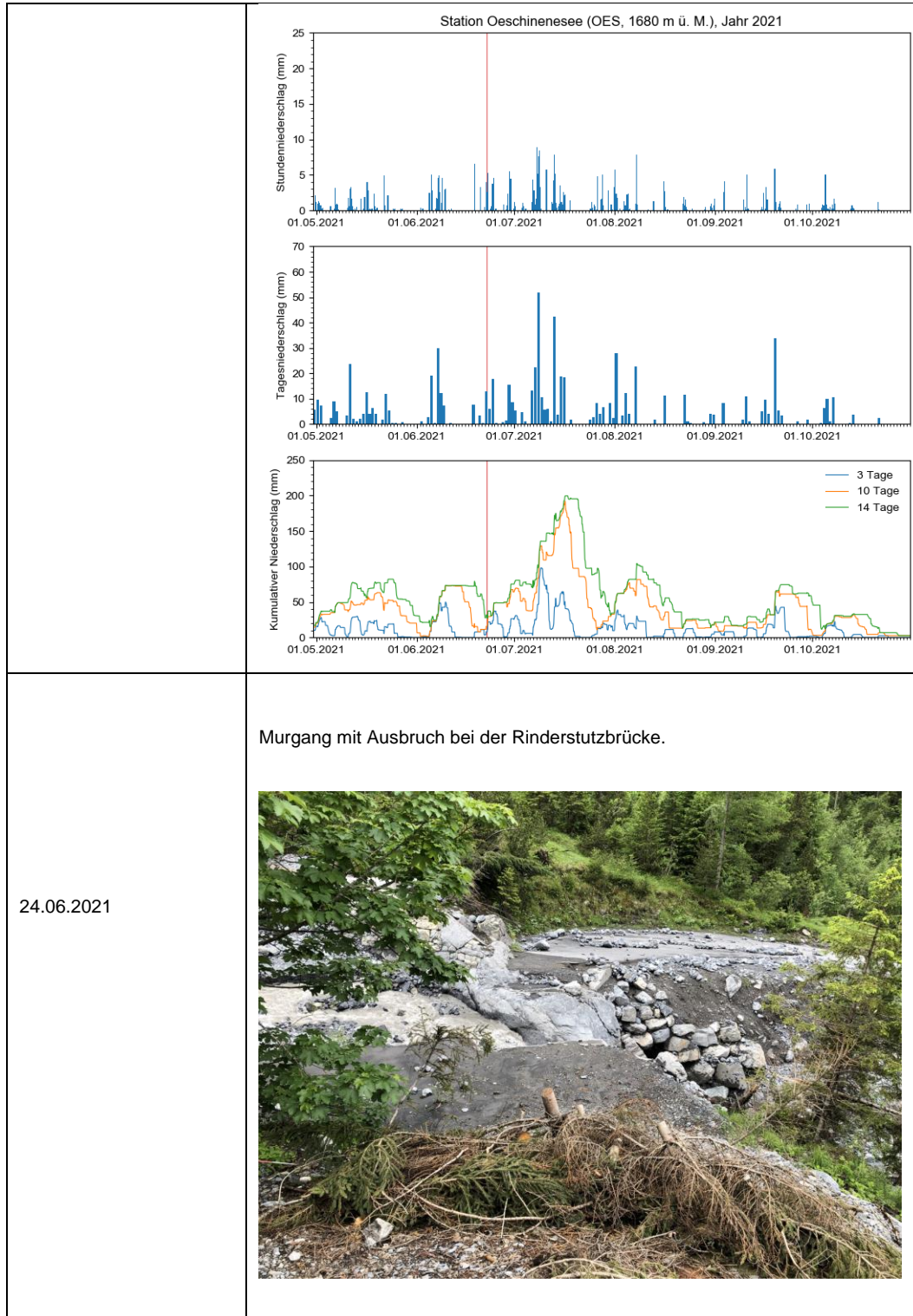
- [1] GEOTEST AG (2021): Kandersteg, «Spitze Stei», Kinematische Daten 2021 / 3D-Modell Rutschung Spitze Stei, Bericht Nr. 1418139.23.
- [2] GEOTEST AG (2021): Kandersteg, «Spitze Stei», Modellierung oberflächlicher Wassereintrag, Bericht Nr. 1418139.20.
- [3] GEOTEST AG (2019): «Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement, Ergebnisse und Auswertungen 2019, Bericht Nr. 1418139.2.
- [4] GEOTEST AG (2020): Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement 2020, Datenerhebungen und Auswertungen 2020, Bericht Nr. 1418139.12.
- [5] Amt für Wald und Naturgefahren & Tiefbauamt Kanton Bern. Gefährdungskarte Spitze Stei, 3. Dezember 2021.
- [6] GEOTEST AG (2021): Kandersteg, Rutschung «Spitze Stei», Entwicklung Sommer 2021, Bericht Nr. 1418139.21.
- [7] SLF (2021): Bericht terrestrisches Laserscanning Spitze Stei Kandersteg, BE, September 2021
- [8] SLF (2021): Kurzbericht Analyse Historische Luftbilder Spitze Stei Kandersteg, BE, November 2021
- [9] Bodin, X., Krysiecki, J.M., Schoeneich, P., Le Roux, O., Lorier, L., Eche-lard, T., Peyron, M. and Walpersdorf, A., (2017). The 2006 collapse of the Bérard rock glacier (Southern French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(1), pp.209-223.
- [10] GEOTEST AG (2020): Kandersteg, «Spitze Stei», Permafrostuntersuchungen, Bericht Nr. 1418139.9.
- [11] NDR Consulting, Hunziker Gefahrenmanagement (2020): Spitze Stei Sekundärprozesse, Faktenblätter und Erläuterungen.
- [12] Hunziker, Zarn & Partner (2020): «Spitze Stei» Tertiärprozesse: Auswirkungen auf die Kander in Kandersteg, Projekt A-1124.
- [13] GEOTEST AG (2021): Kandersteg, «Spitze Stei», Sperrgebiet Oeschinensee, Sommerbetrieb 2021, Präsentation, Februar 2021.

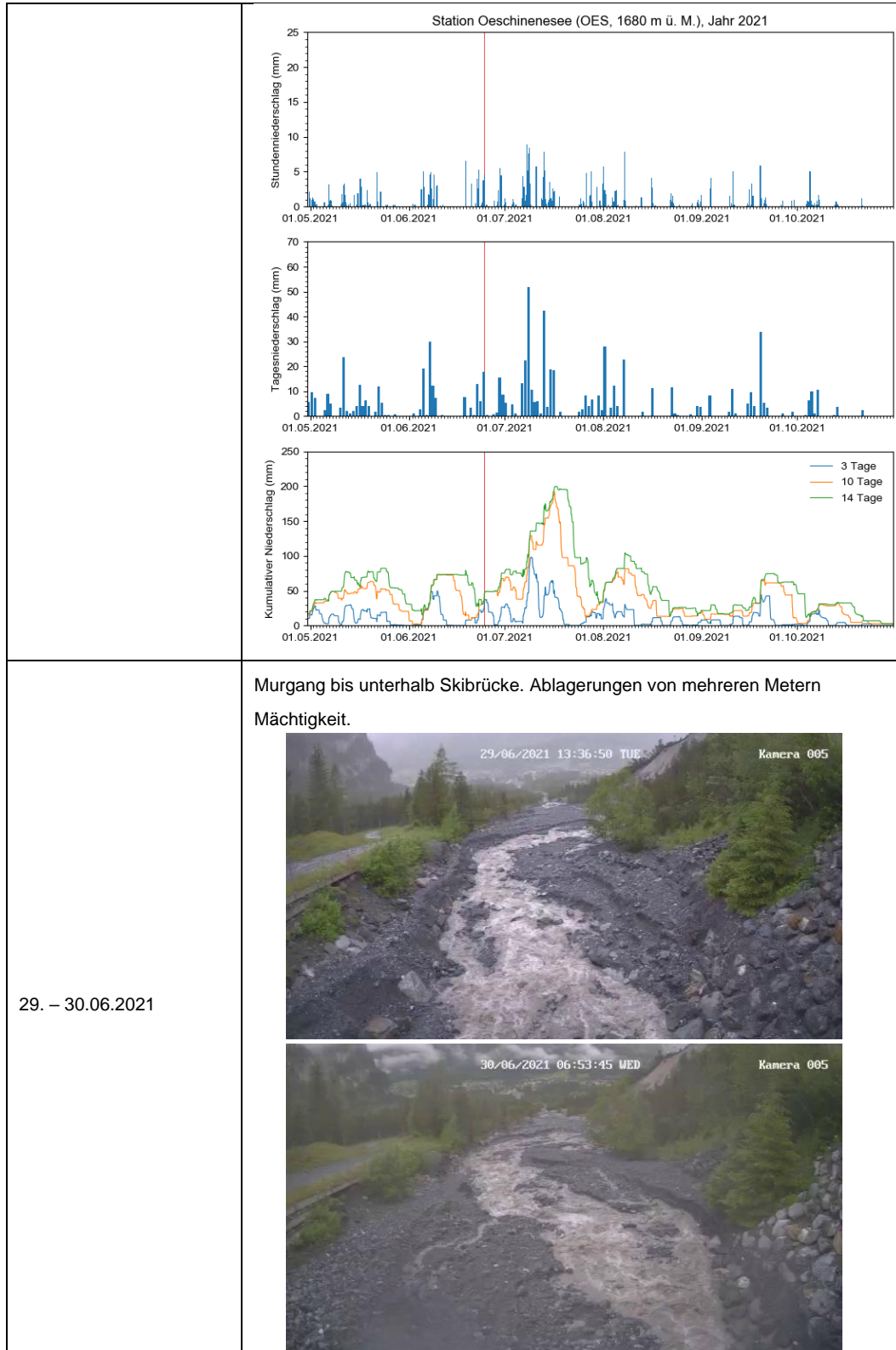
Anhang 1 – Übersicht Ereignisse 2021

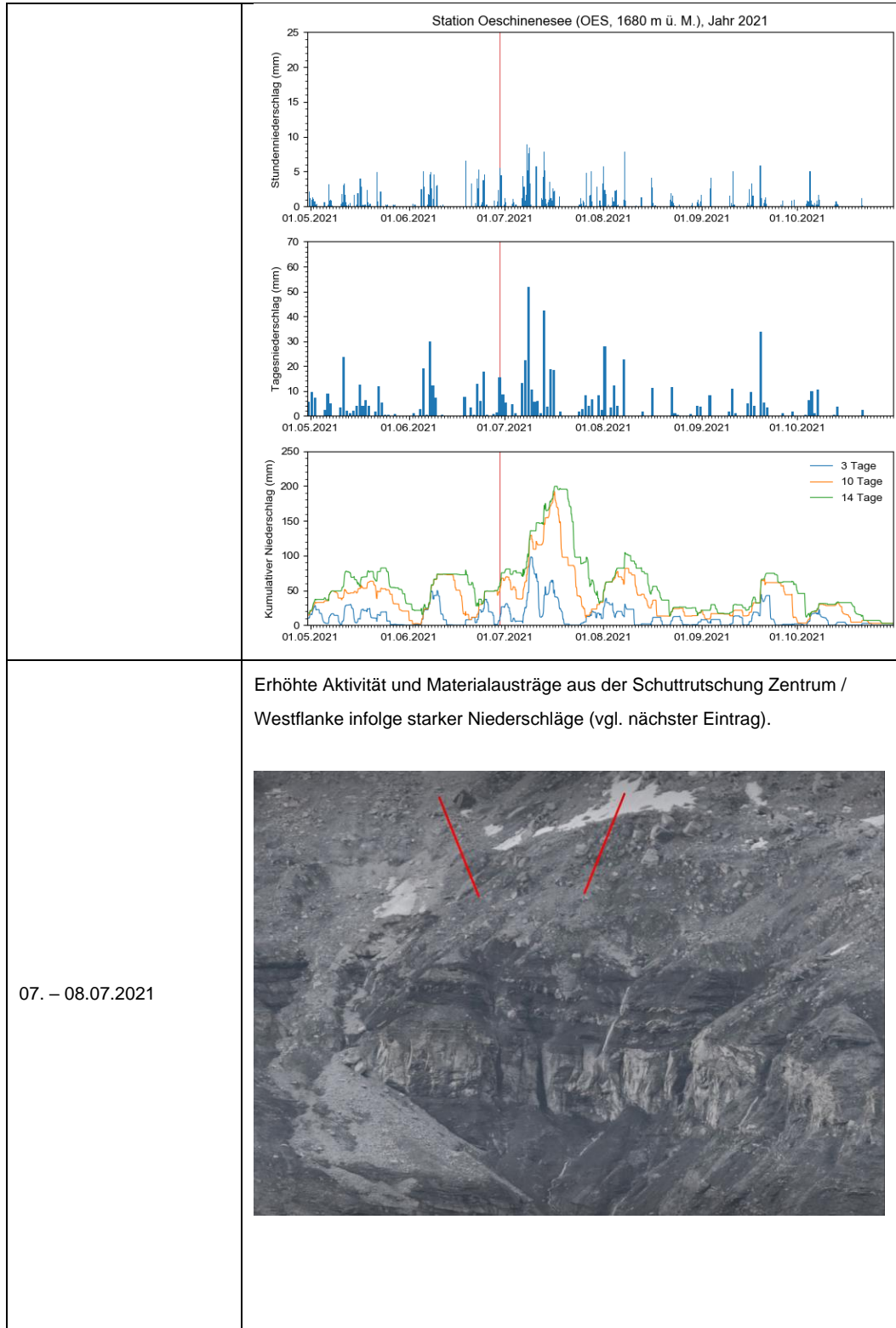
Nachfolgend sind die wichtigsten Ereignisse des Jahres 2021 (Spitze Stei und Oeschibach) tabellarisch zusammengefasst. Aufnahmen vor/nach den Ereignissen sowie Niederschlagsdaten der Station Oeschinensee ergänzen die Kurzbeschriebe.


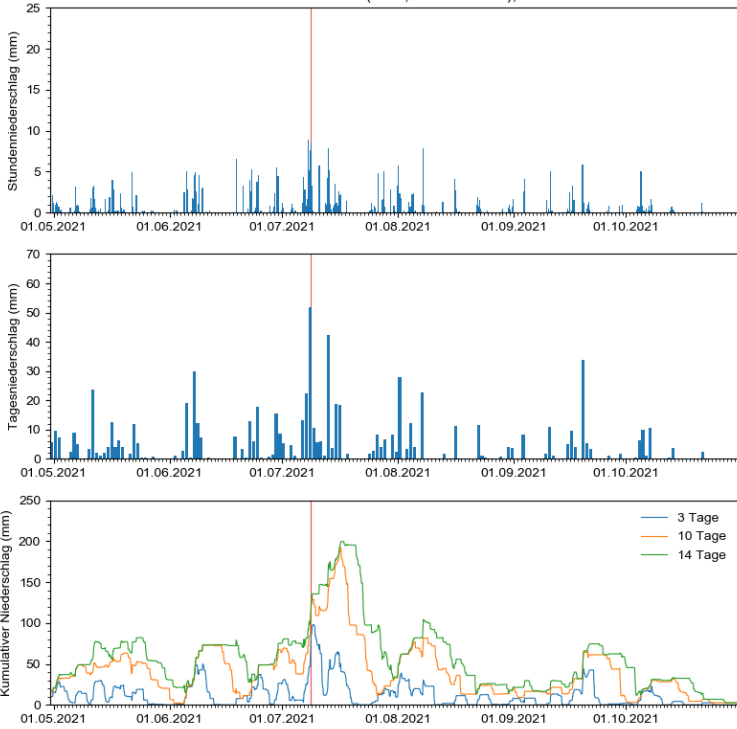
| Datum | Beschrieb |
|------------|---|
| 09.06.2021 | <p>Sturzereignis aus dem oberen Ostgrat, Kubatur ca. 1000 m³. Beim Ereignis wurde GPS 11 zerstört. Sturzmaterial gelangte bis in die Chalberspissibäche.</p>  |

| | |
|-------------------|--|
| <p>22.06.2021</p> | <p>Mehrere Murschübe in den Chalberspissibächen bzw. dem Oeschibach, ohne vorgängige grössere Abbrüche aus der Rutschung Spitze Stei. Mehrere Murschübe gelangten bis in den Bereich Zilfuri und führten zu Ablagerungen mit rund 2 m Mächtigkeit. Im Bereich Skibrücke Ablagerungshöhen um 4 m.</p>  <p>Relativ geringe Niederschläge und Vorgeuchte, durch hohe Temperaturen und Schneeablagerungen jedoch beträchtlicher Wassereintrag durch Schneeschmelze.</p> |
|-------------------|--|





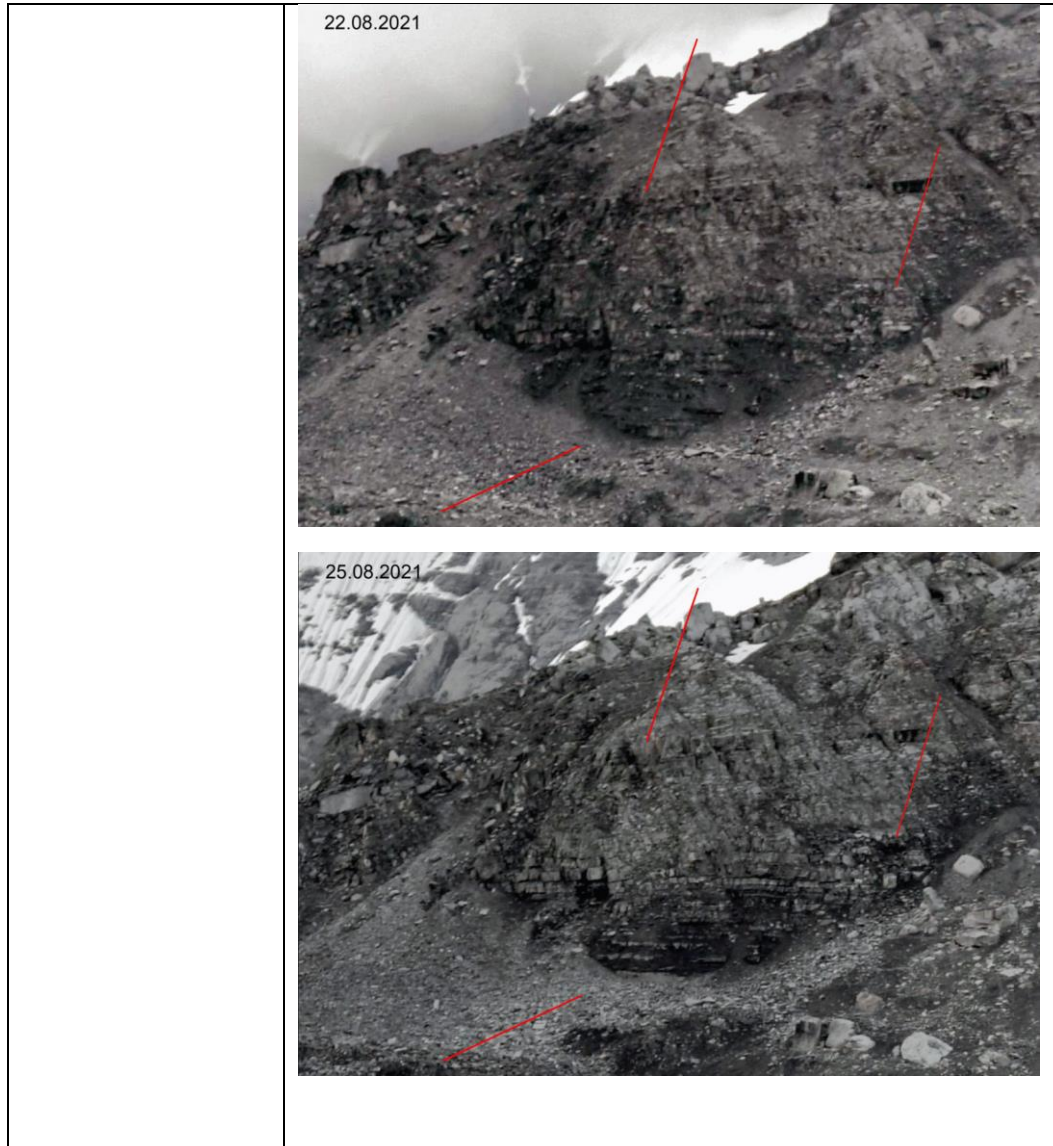


| | |
|-------------------------|--|
| |  <p style="text-align: center;">Station Oeschinenensee (OES, 1680 m ü. M.), Jahr 2021</p>  |
| <p>07. – 09.07.2021</p> | <p>Mehrere Murgänge im Nachgang an die oben beschriebenen Materialaussträge aus der Rutschung Spitze Stei. Reichweite bis unterhalb Skibrücke. Ablagerungen von mehreren Metern Mächtigkeit.</p> |

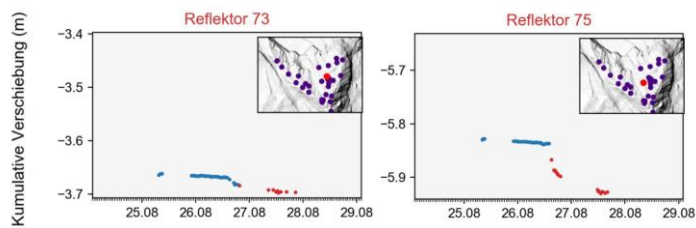




| | |
|------------|--|
| |  |
| 23.08.2021 | Abbrüche aus den stark zerrütteten Felsbereichen um die Reflektoren 73, 80 und 81. Das meiste Material (rund 3000 m ³) wurde im Bereich des Wandfusses abgelagert. |

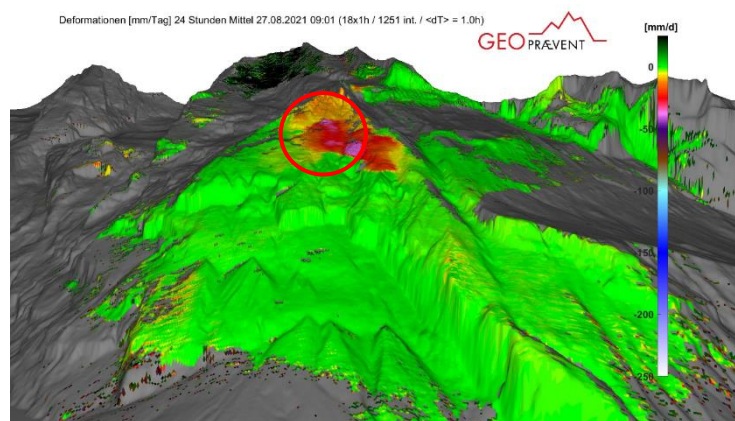
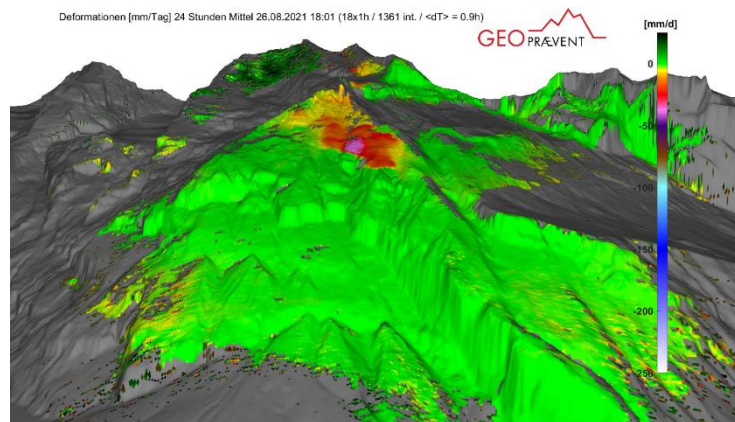


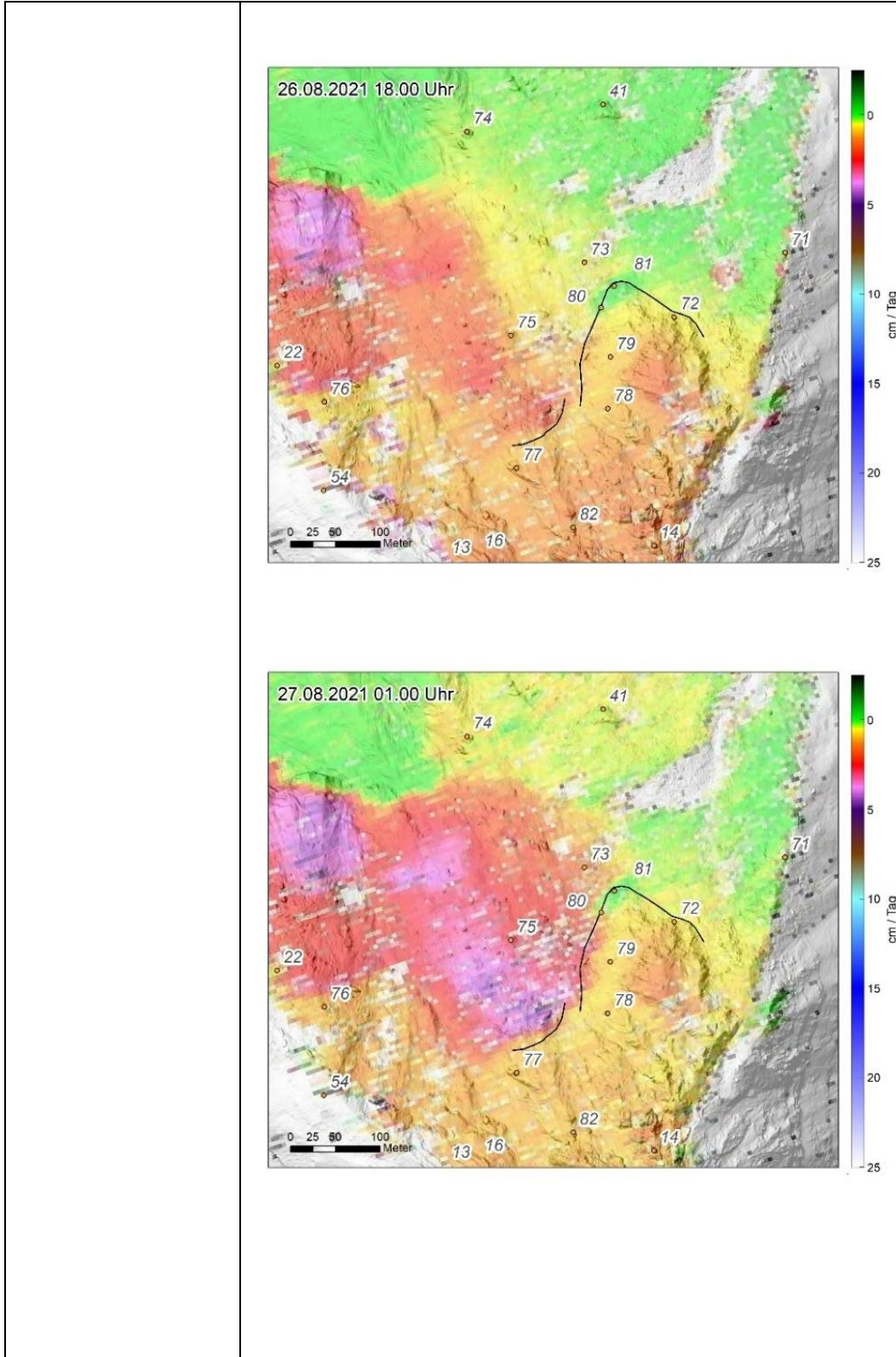
Abrupte Beschleunigung im Bereich Zentrum bei den Reflektoren 75 und 73.
 Bei Reflektor 75 betrug die Verschiebung rund 10 cm / 24 h, 5 cm davon innerhalb von 5 Stunden. Bei Reflektor 73 im randlichen Bereich der beschleunigten Zone betrug die Verschiebung rund 3 cm / 24 h.

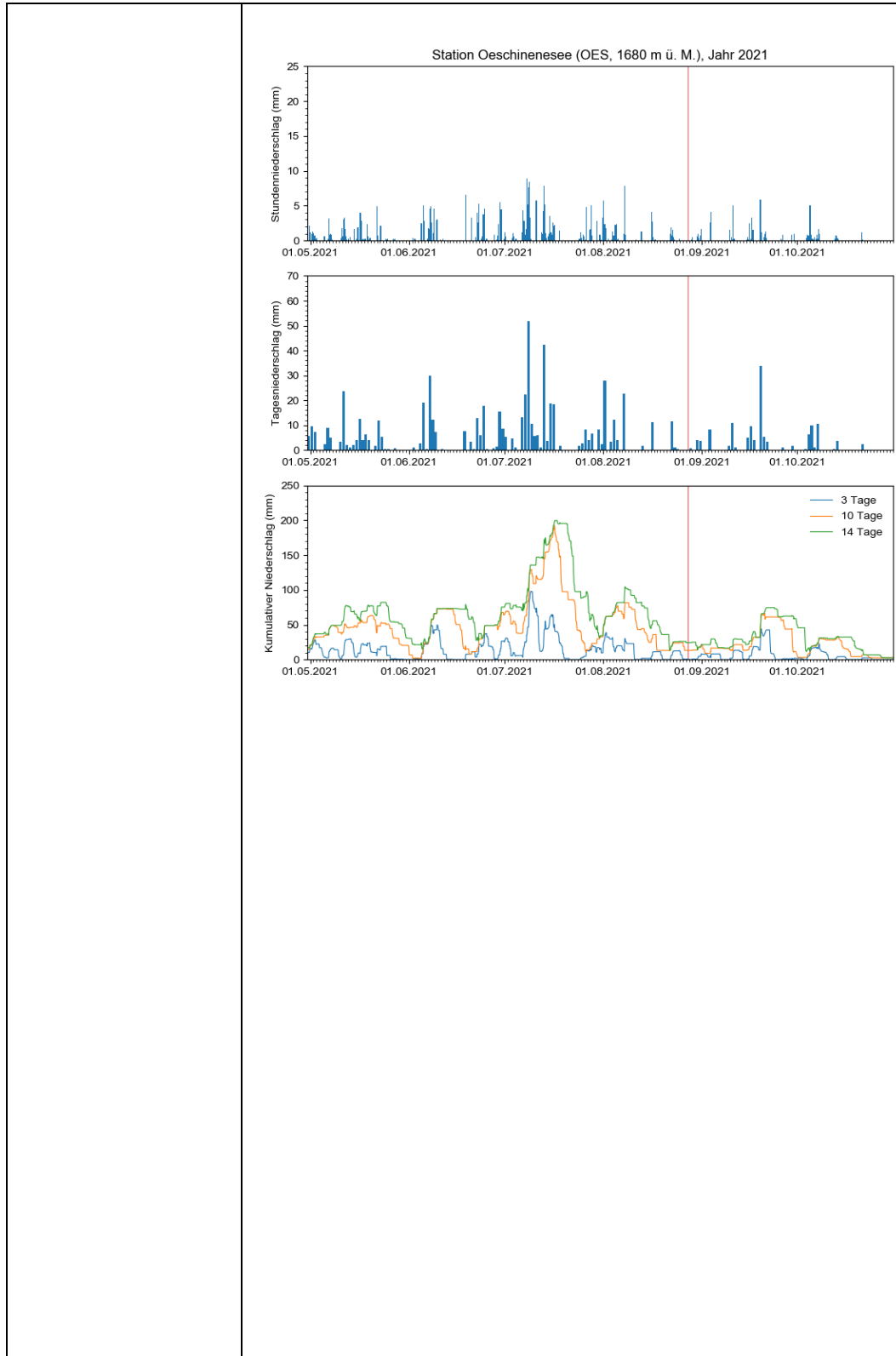



Die Beschleunigung wurde mit den Radarmessungen flächig aufgezeichnet.
 Nachfolgend sind jeweils Messungen vor bzw. während des Ereignisses dargestellt.

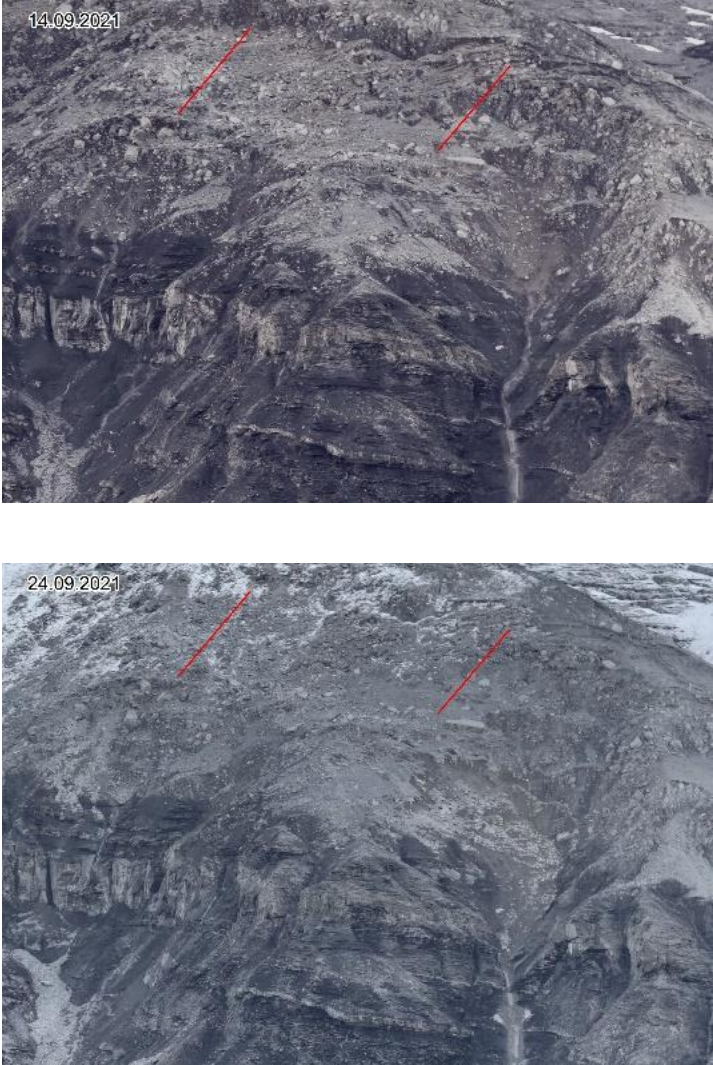
26.08 – 27.08.2021

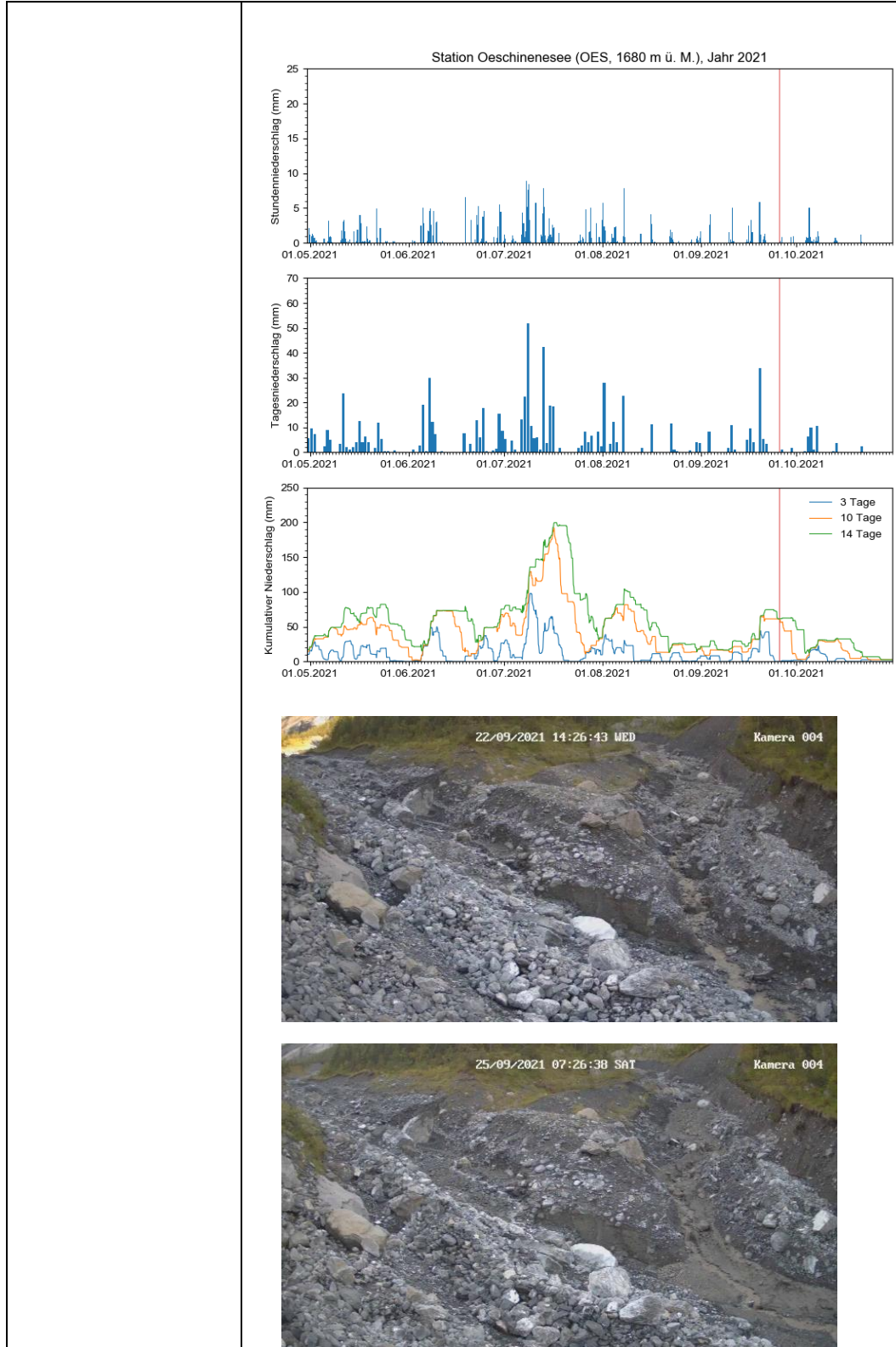








| | |
|----------------------------|---|
| <p>02.09.2021</p> | <p>Absturz eines Grossblockes (ca. 1600 m³) aus dem oberen Zentrumsbereich. Der darunterliegende Block mit Reflektor 75 wurde von Sturzmaterial getroffen und um ca. 5 cm verschoben.</p>  |
| <p>23.09. – 24.09.2021</p> | <p>Im Frontbereich der Schuttrutschung Westflanke kam es nach Mitte September 2021 zur Beschleunigung eines grösseren Schuttkompartmentes (rund 100'000 m³). Während der Beschleunigungsphase kam wiederholt zu kleineren Abbrüchen. Am 23.09. wurden Geschwindigkeiten um 50 cm/Tag erreicht. In der Nacht vom 23.09. auf den 24.09. rutschten rund 10'000 – 15'000 m³ ab. Ein Grossteil des mobilisierten Materials wurde in der Anrissnische bzw. direkt darunter abgelagert; ein Teil gelangte in die Chalberspissibäche.</p> |

| | |
|------------|--|
| |  |
| 25.09.2021 | <p>Zwei kleine Murschübe im Äusseren Chalberspissibach als Folge des Materialeintrages vom 23.09. bzw. 24.09. (vgl. vorangegangener Eintrag). Schübe traten bei trockenen Verhältnisse auf, d.h. ohne zusätzlichen Wassereintrag durch Niederschläge bzw. Schneeschmelze. Reichweite bis knapp unterhalb des Zusammenflusses der Chalberspissibäche.</p> |



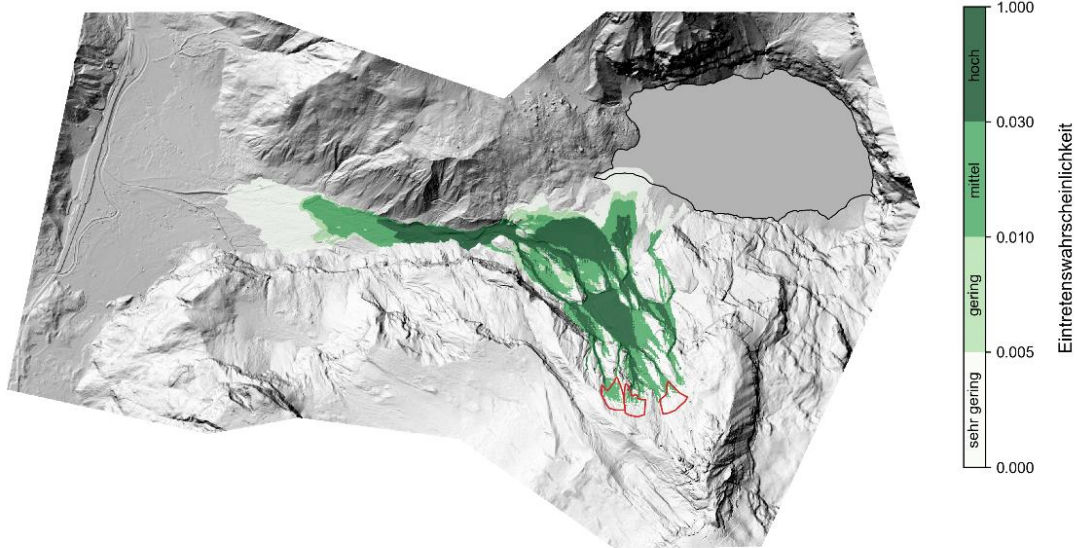
| | |
|------------|--|
| |  <p>22/09/2021 14:26:29 WED Kamera 003</p> <p>25/09/2021 07:26:15 SAT Kamera 003</p> |
| 26.09.2021 | <p>Kleiner Murgang nach geringen Niederschlägen (ca. 2 mm Tagesniederschlag).</p>  <p>26/09/2021 11:39:55 SUN Kamera 004</p> |



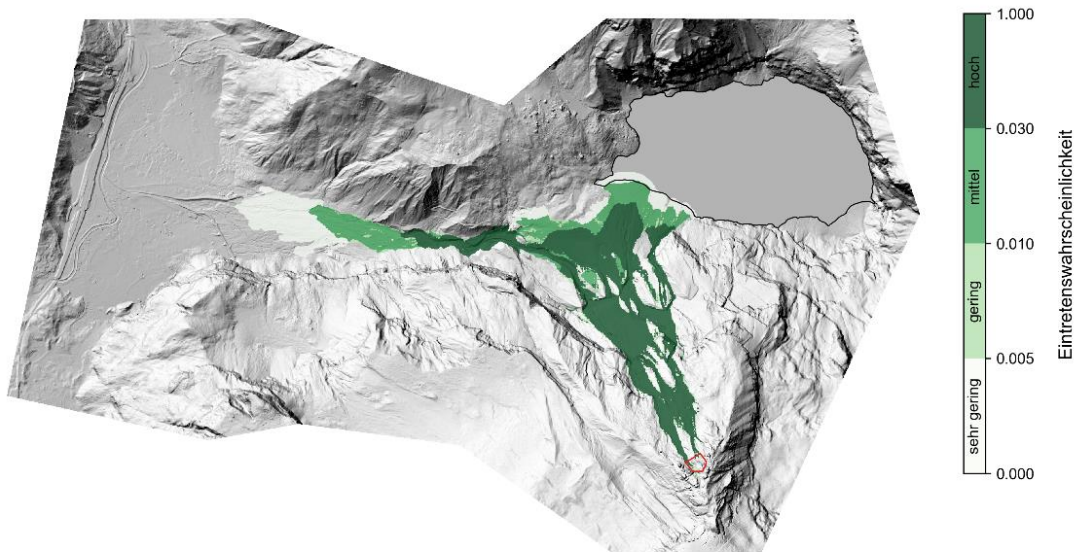
Anhang 2 – Resultate RAMMS-Modellierungen

Nachfolgend dargestellt sind die räumlichen Eintretenswahrscheinlichkeiten der 10 Hauptszenarien sowie die Ablagerungsmächtigkeiten aller Modellierungsläufe.

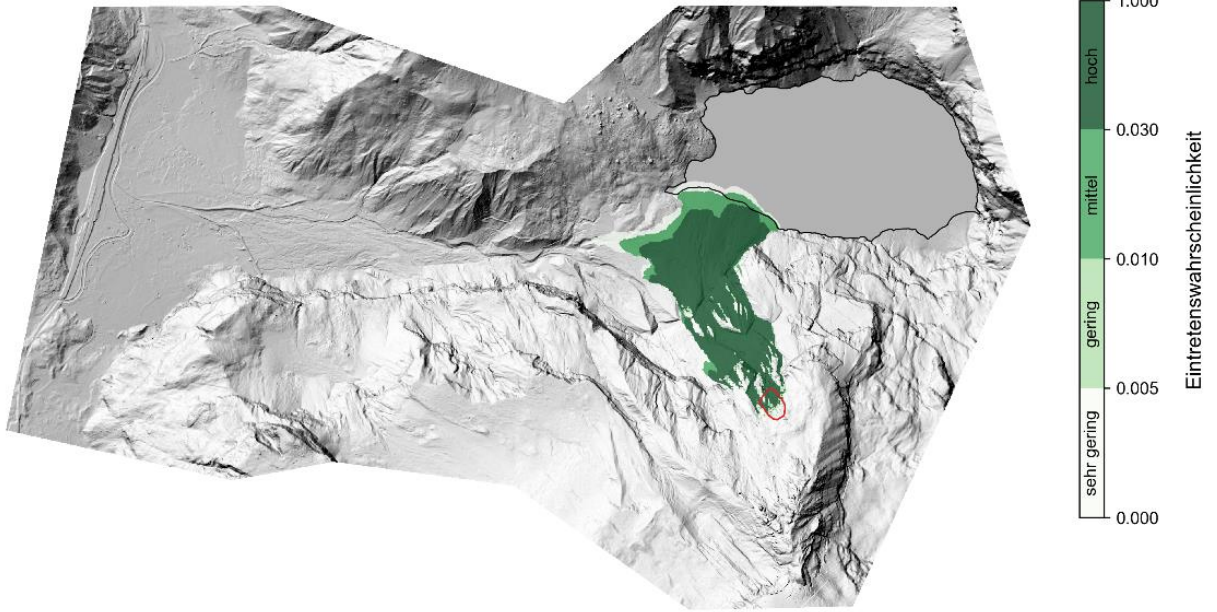
Eintretenswahrscheinlichkeit Szenario R1



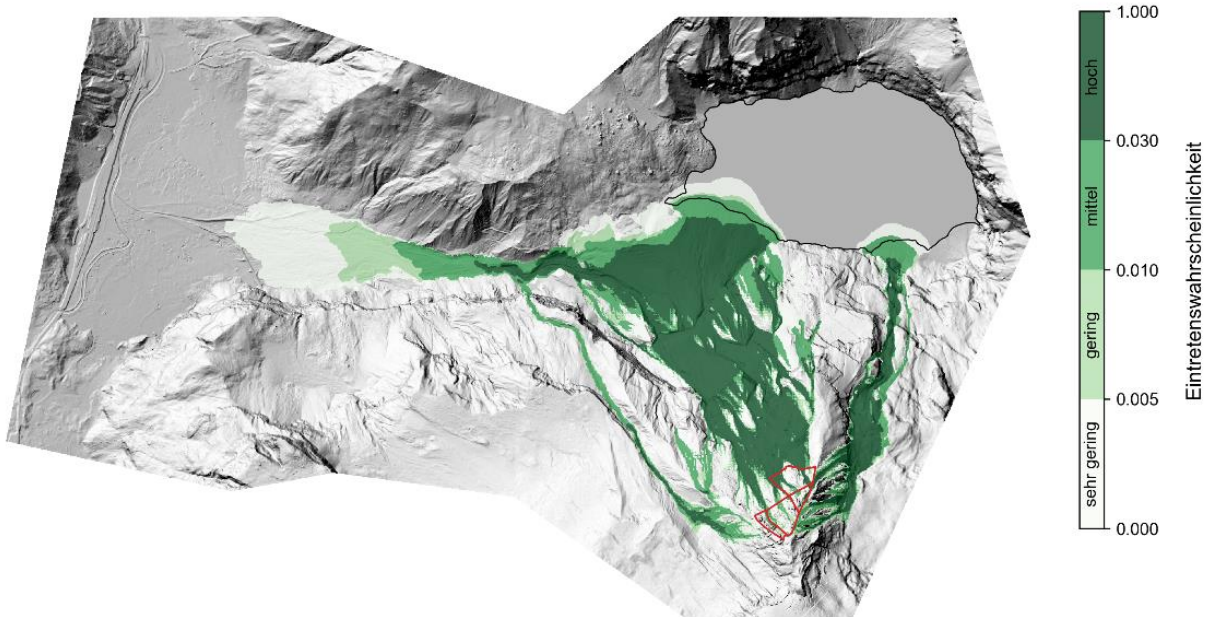
Eintretenswahrscheinlichkeit Szenario S1



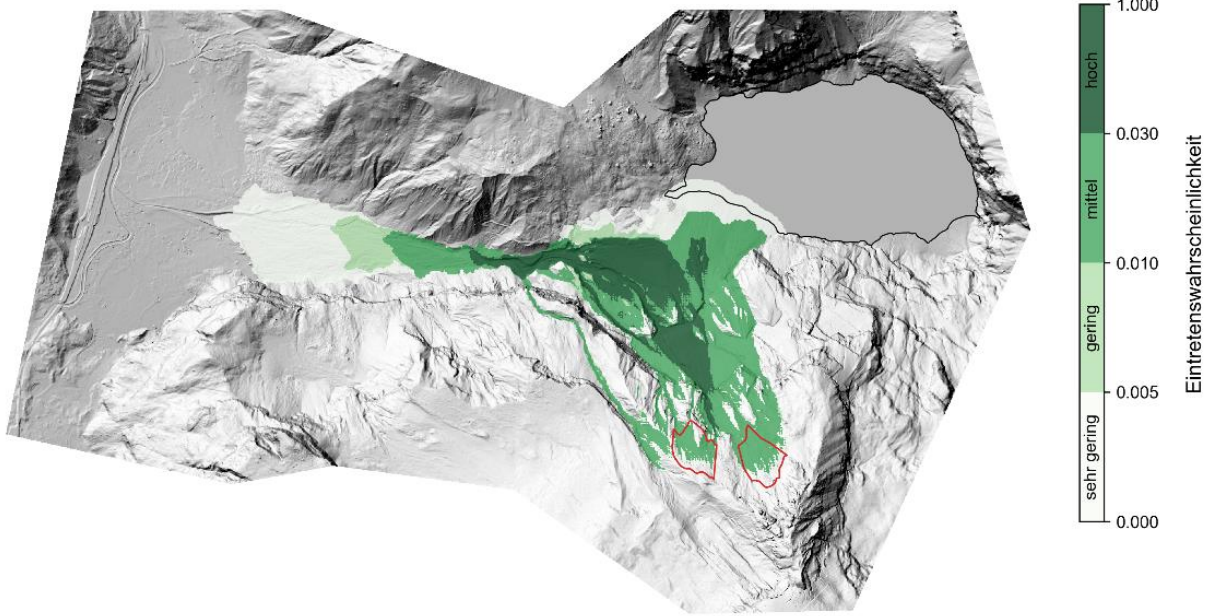
Eintretenswahrscheinlichkeit Szenario R3



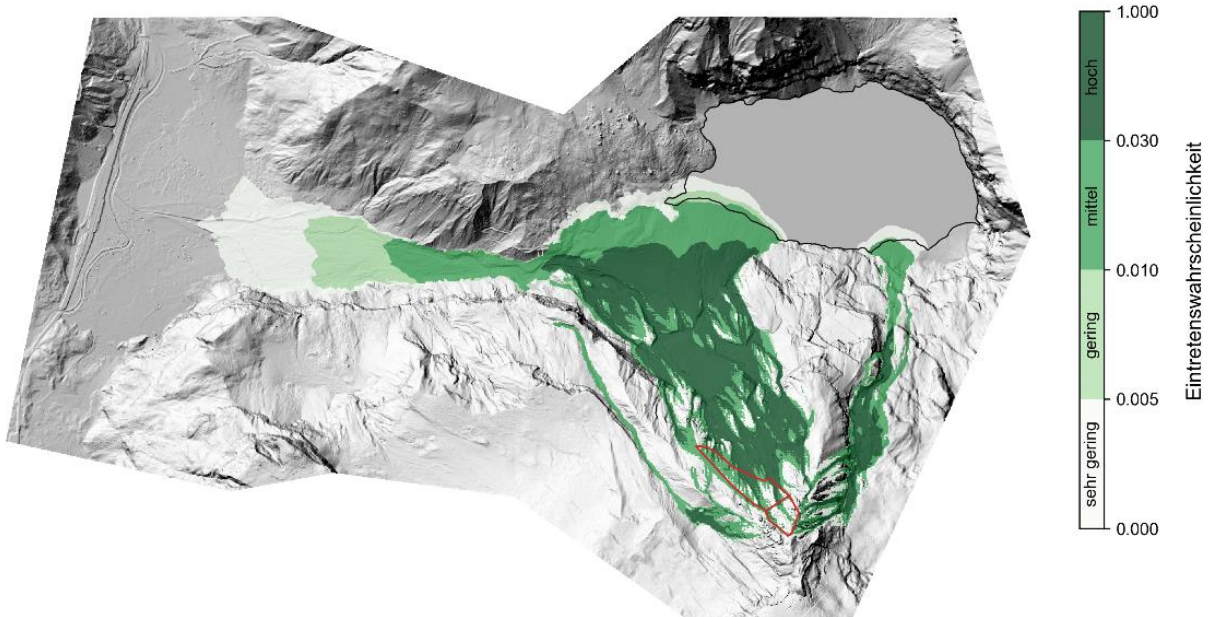
Eintretenswahrscheinlichkeit Szenario S2



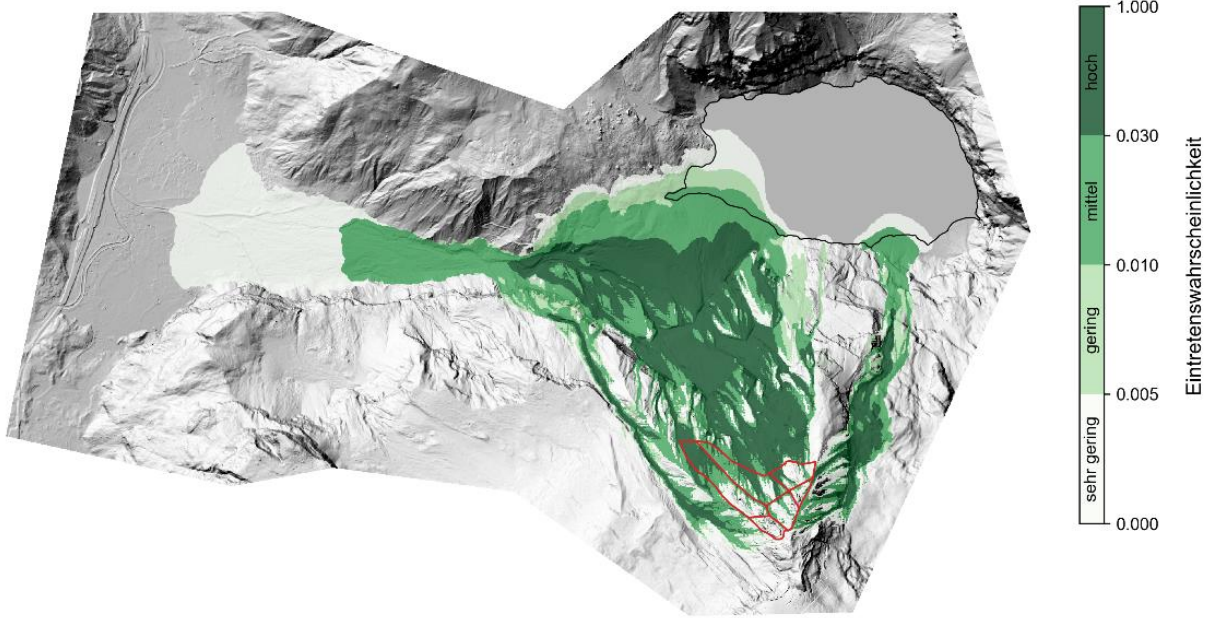
Eintretenswahrscheinlichkeit Szenario R2



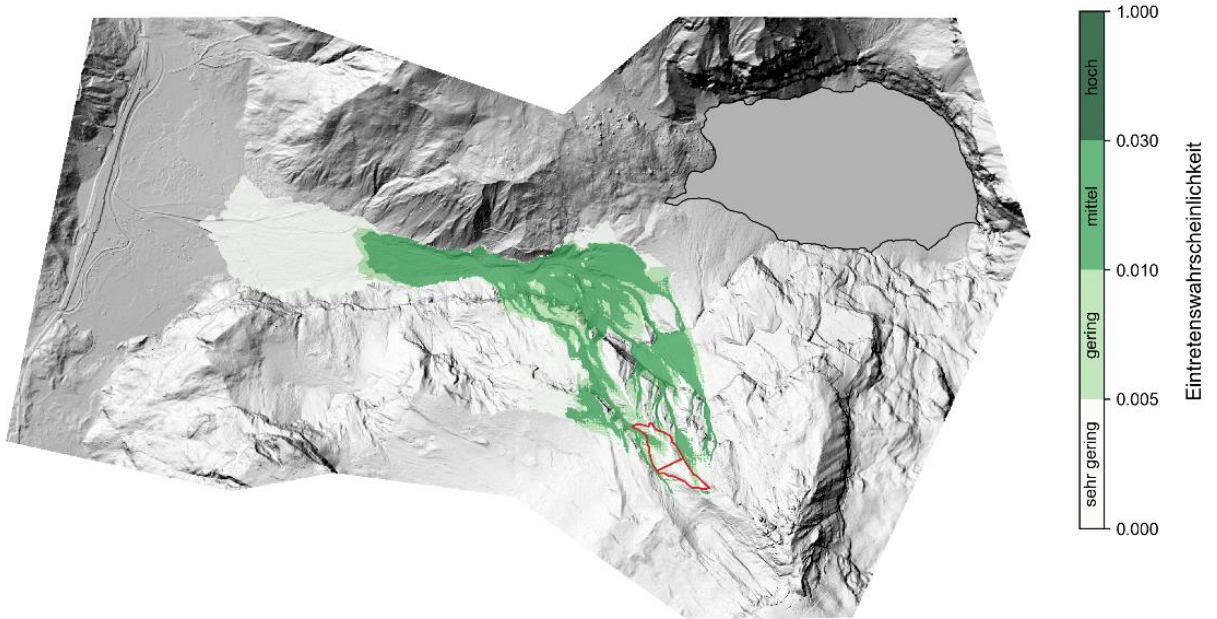
Eintretenswahrscheinlichkeit Szenario S3



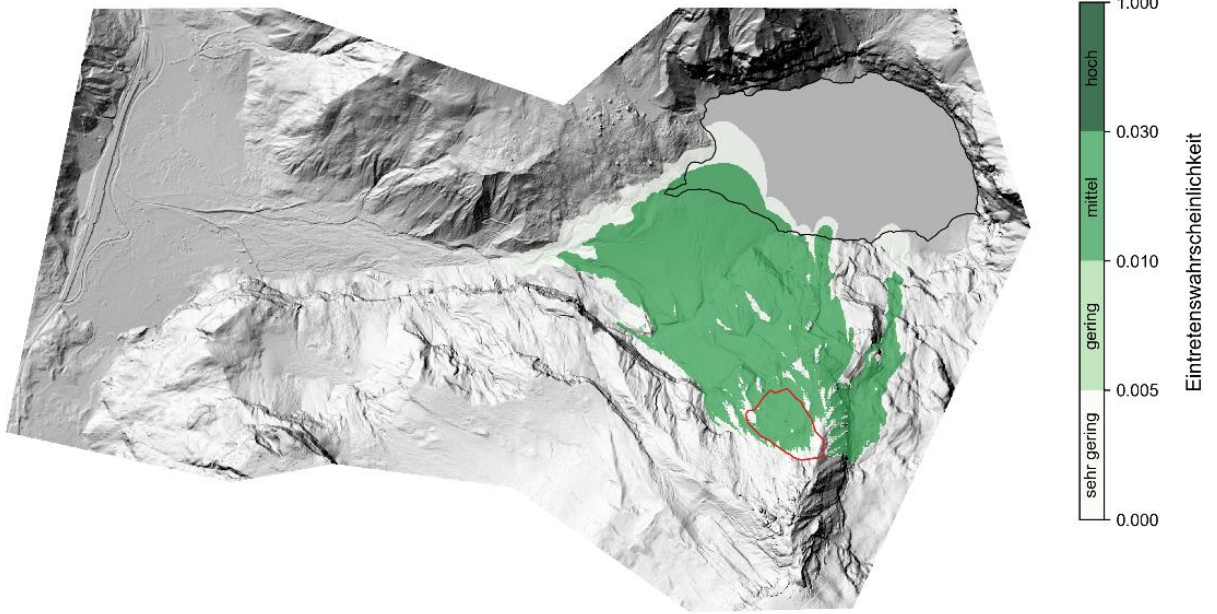
Eintretenswahrscheinlichkeit Szenario S5



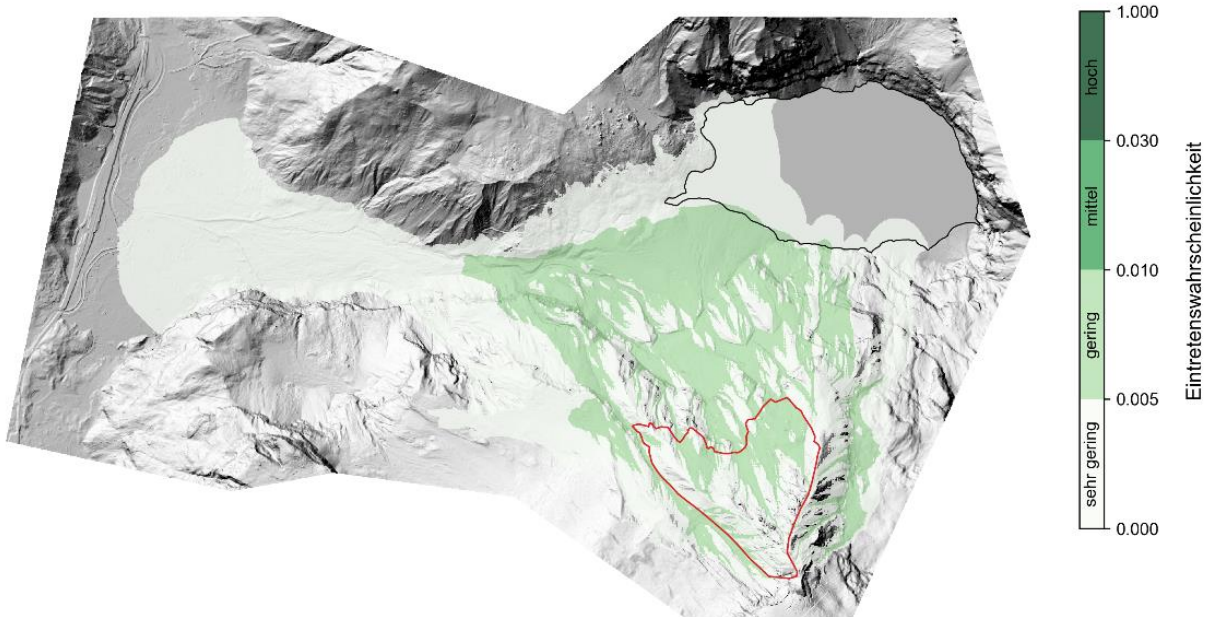
Eintretenswahrscheinlichkeit Szenario S4



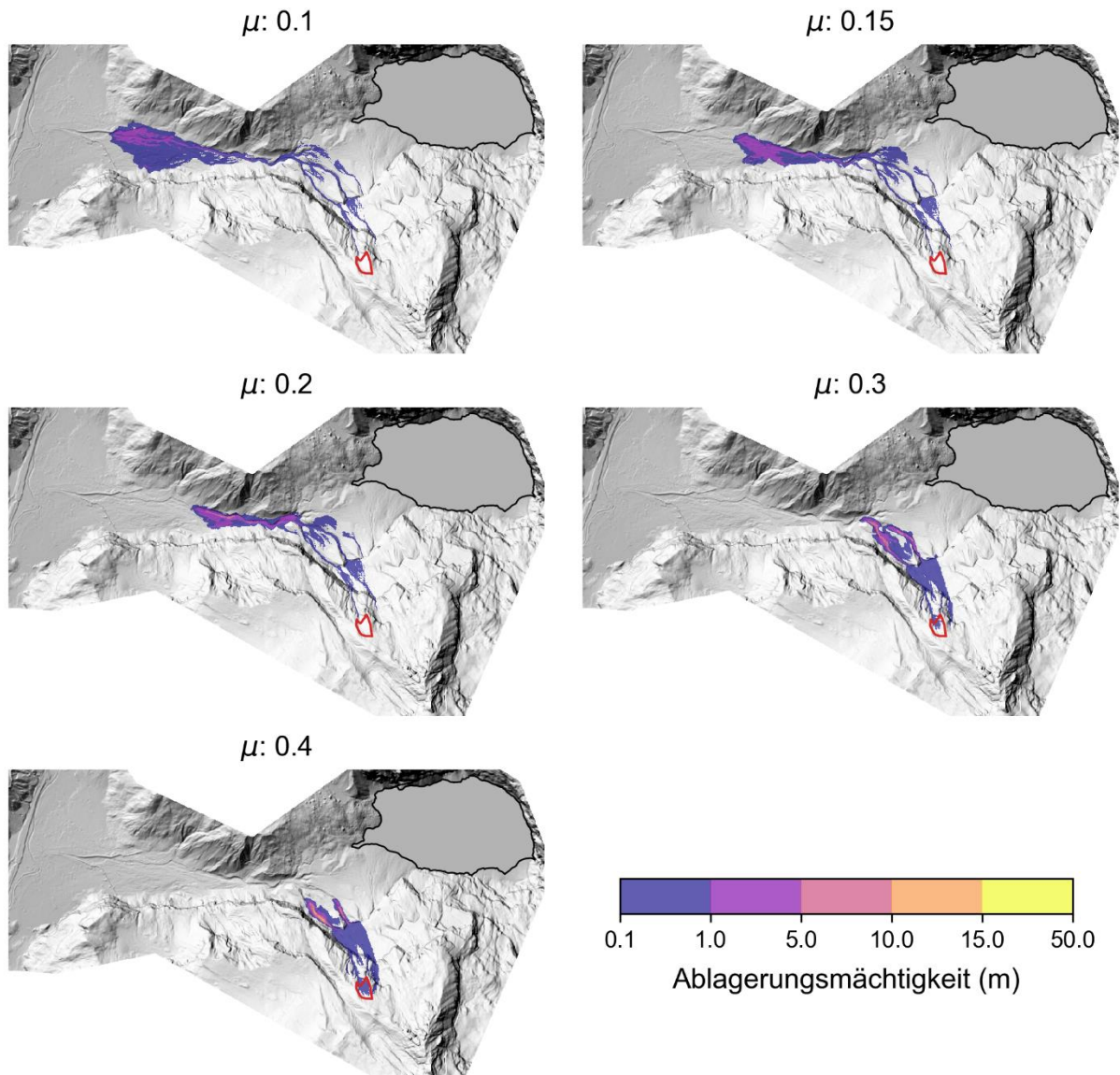
Eintretenswahrscheinlichkeit Szenario S7



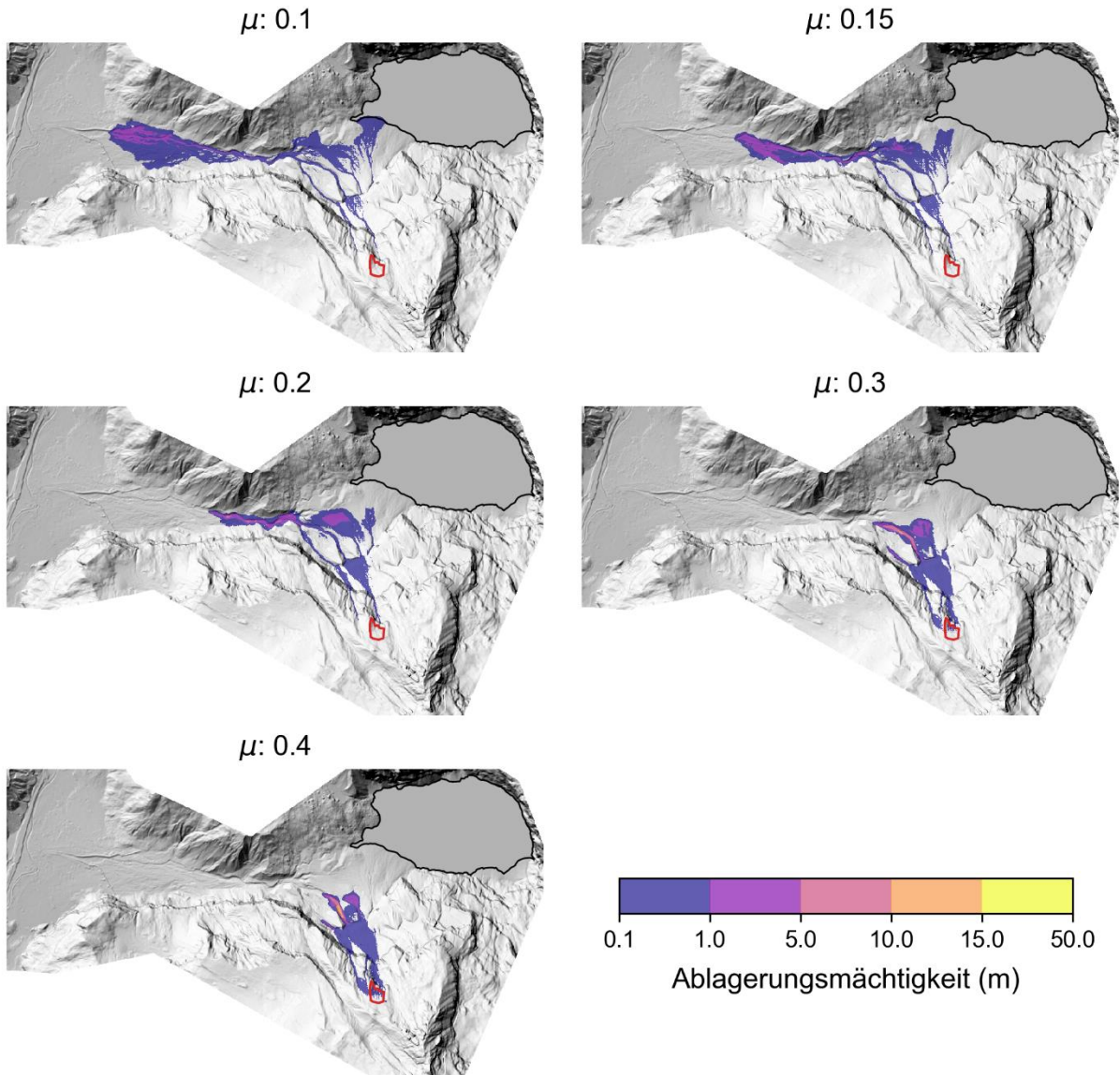
Eintretenswahrscheinlichkeit Szenario S6



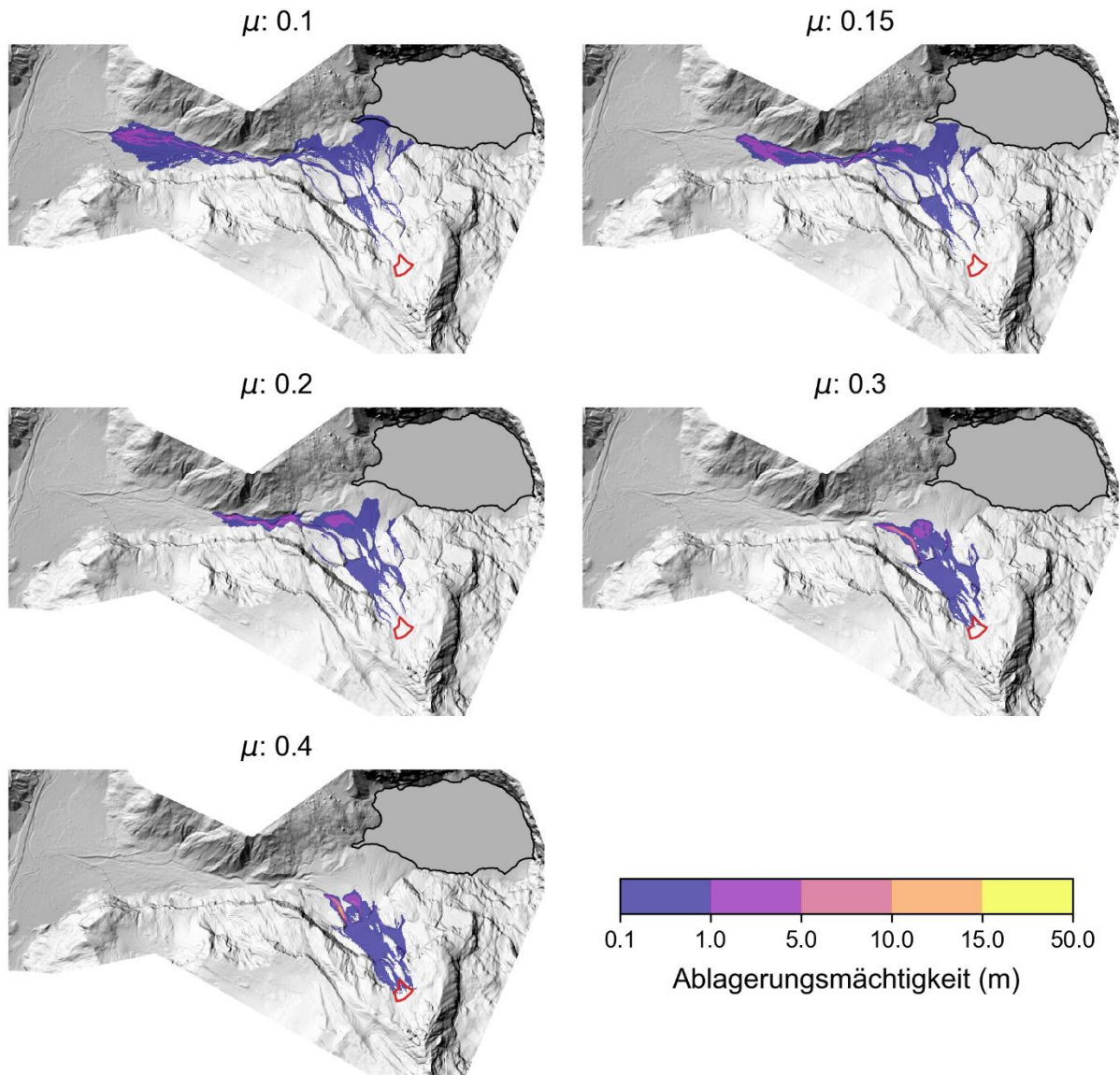
R1 - 0.2 Mio. m³ Schuttrutschung Var. 1, ϵ : 500 m s⁻²



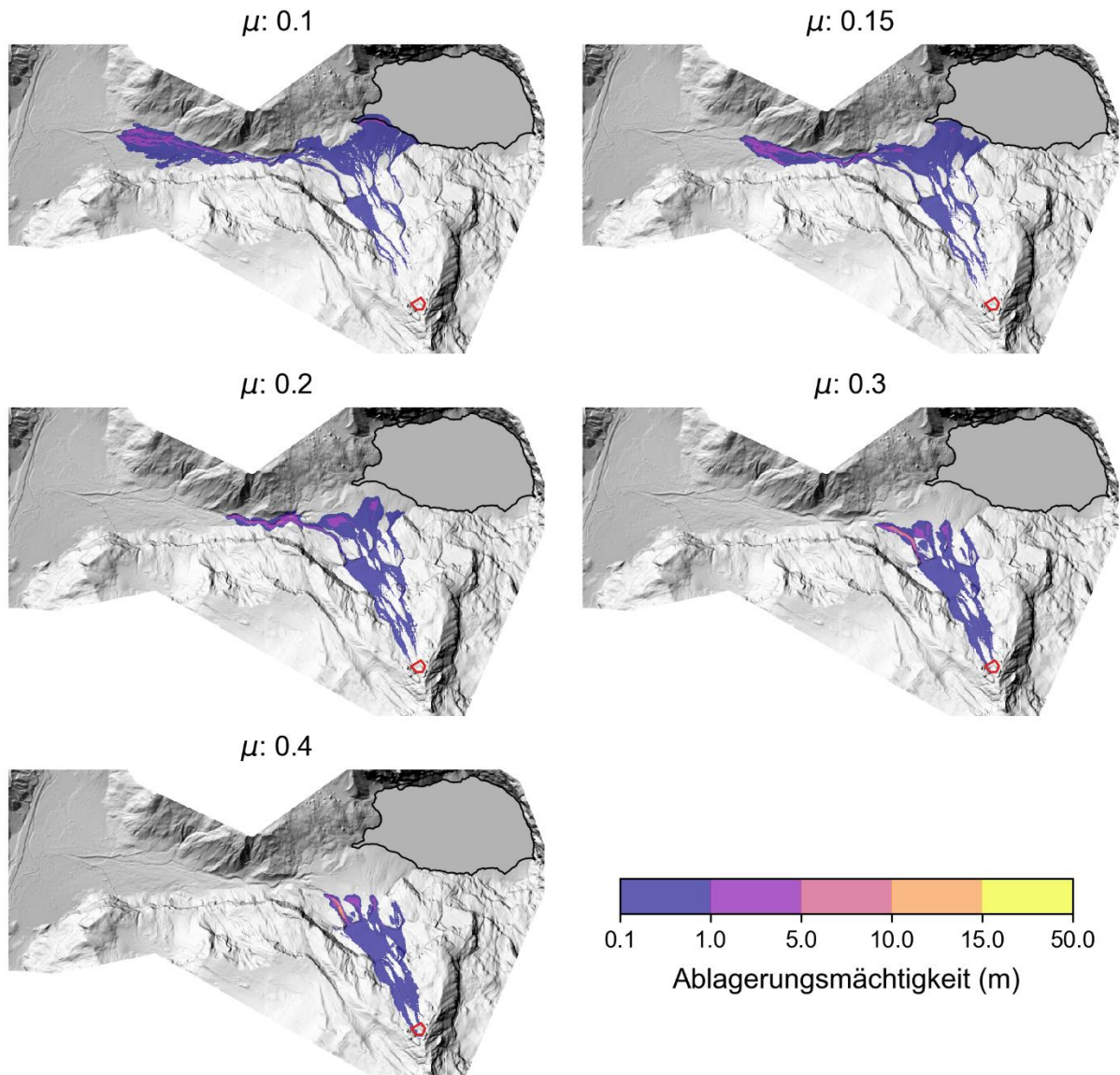
R1 - 0.2 Mio. m³ Schuttrutschung Var. 2, ϵ : 500 m s⁻²



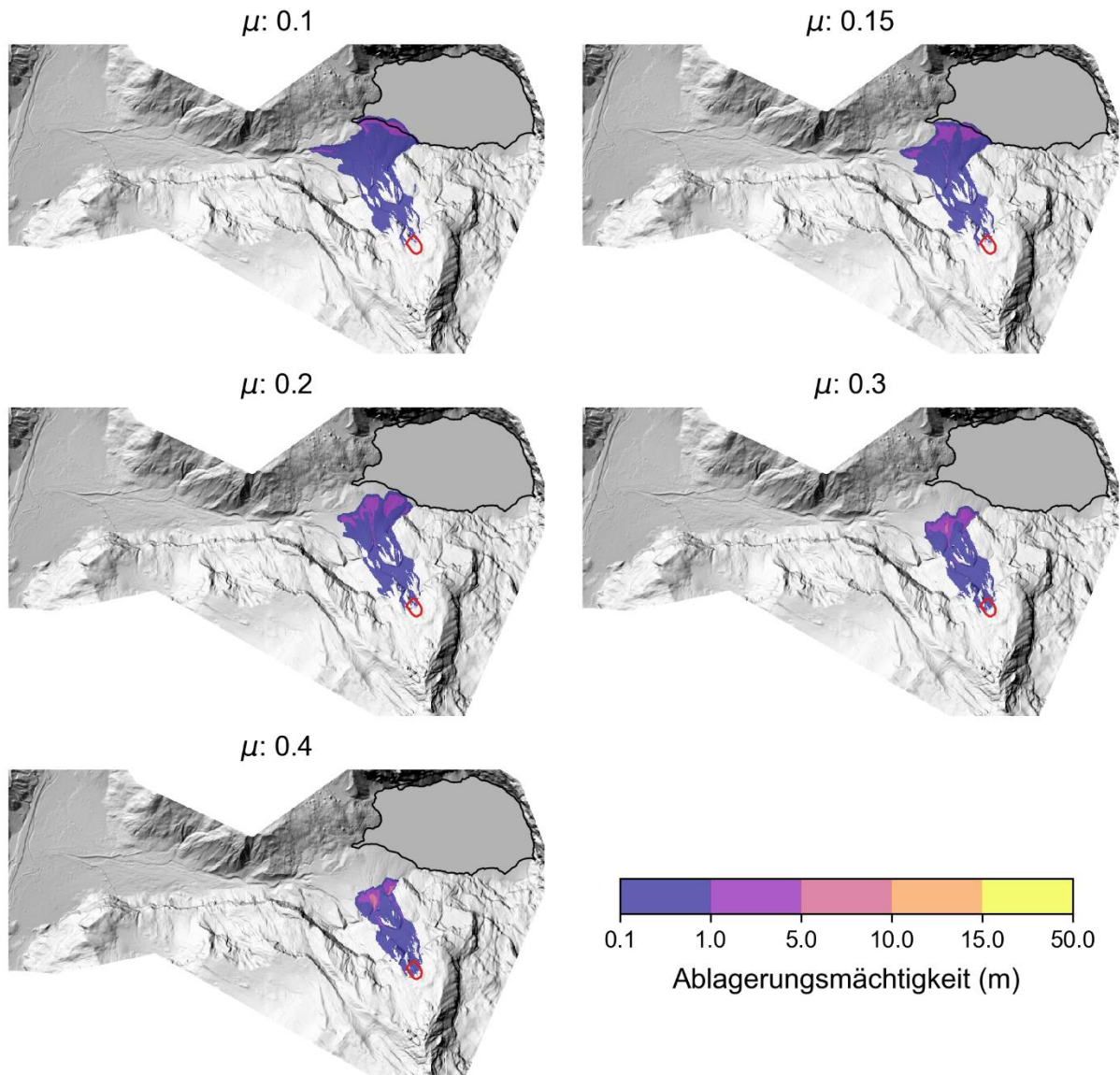
R1 - 0.2 Mio. m³ Schuttrutschung Var. 3, ϵ : 500 m s⁻²



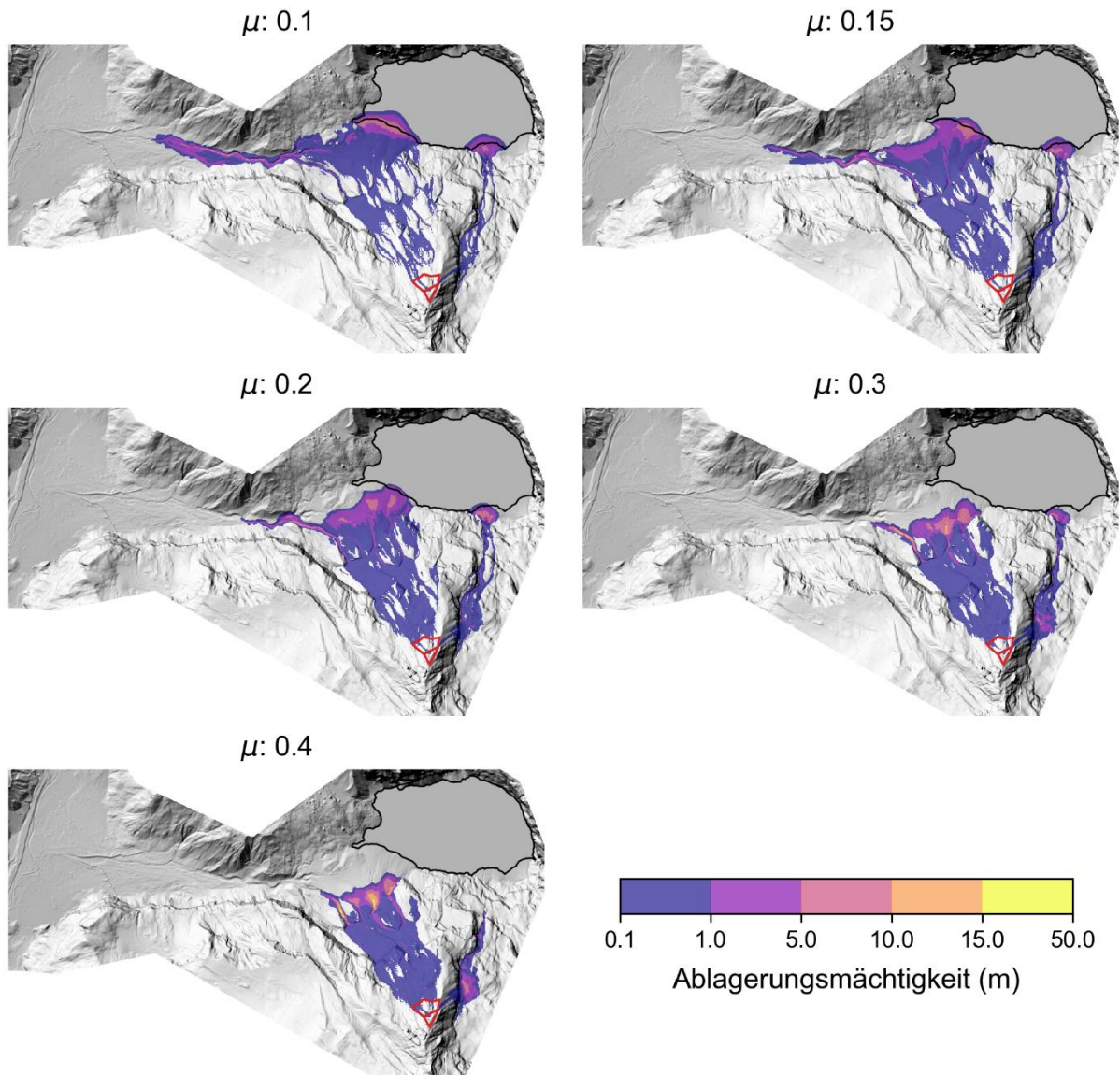
S1 - 0.2 Mio. m³, ϵ : 500 m s⁻²



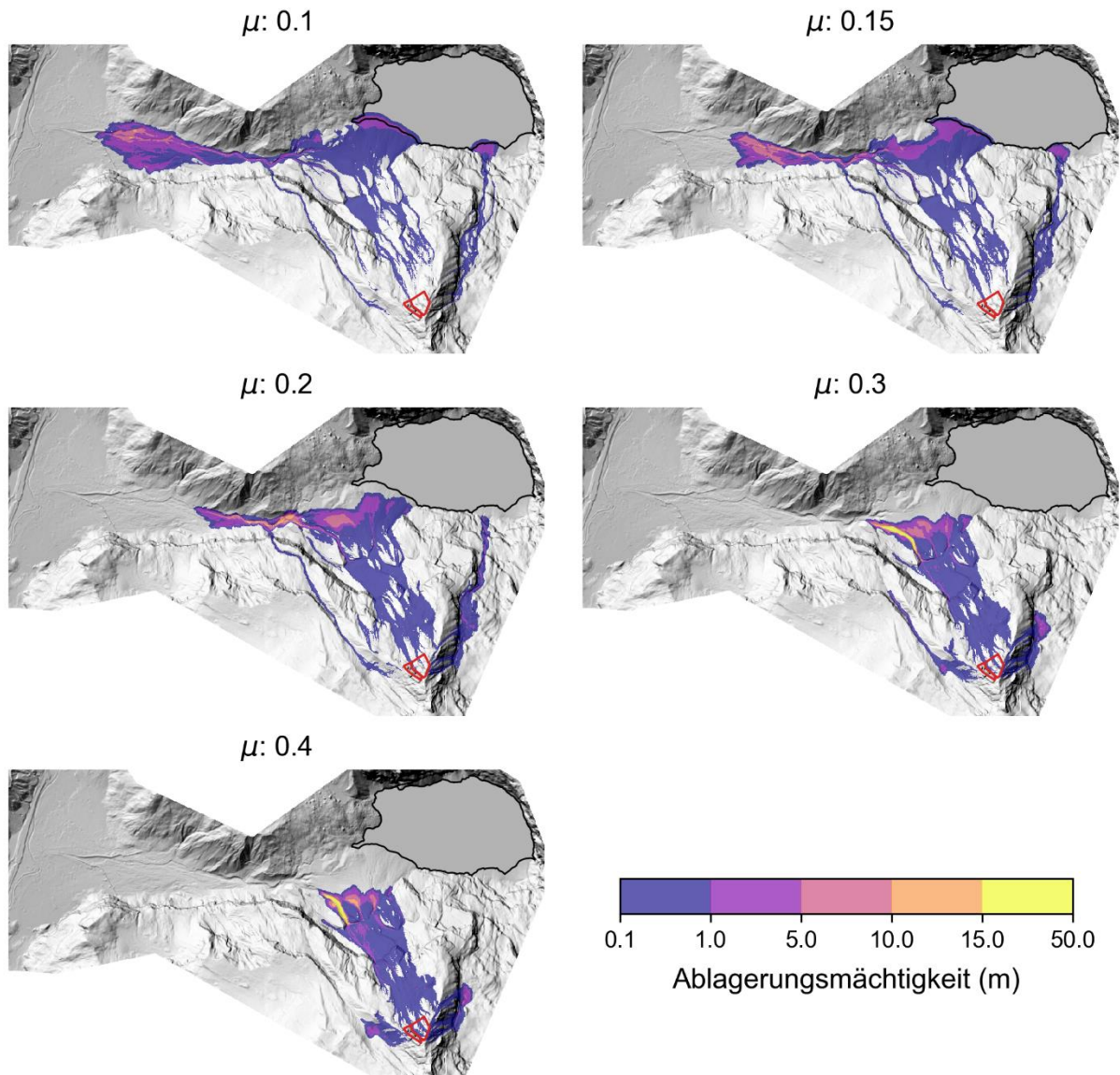
R3 - 0.2 Mio. m³ Ost, ϵ : 500 m s⁻²



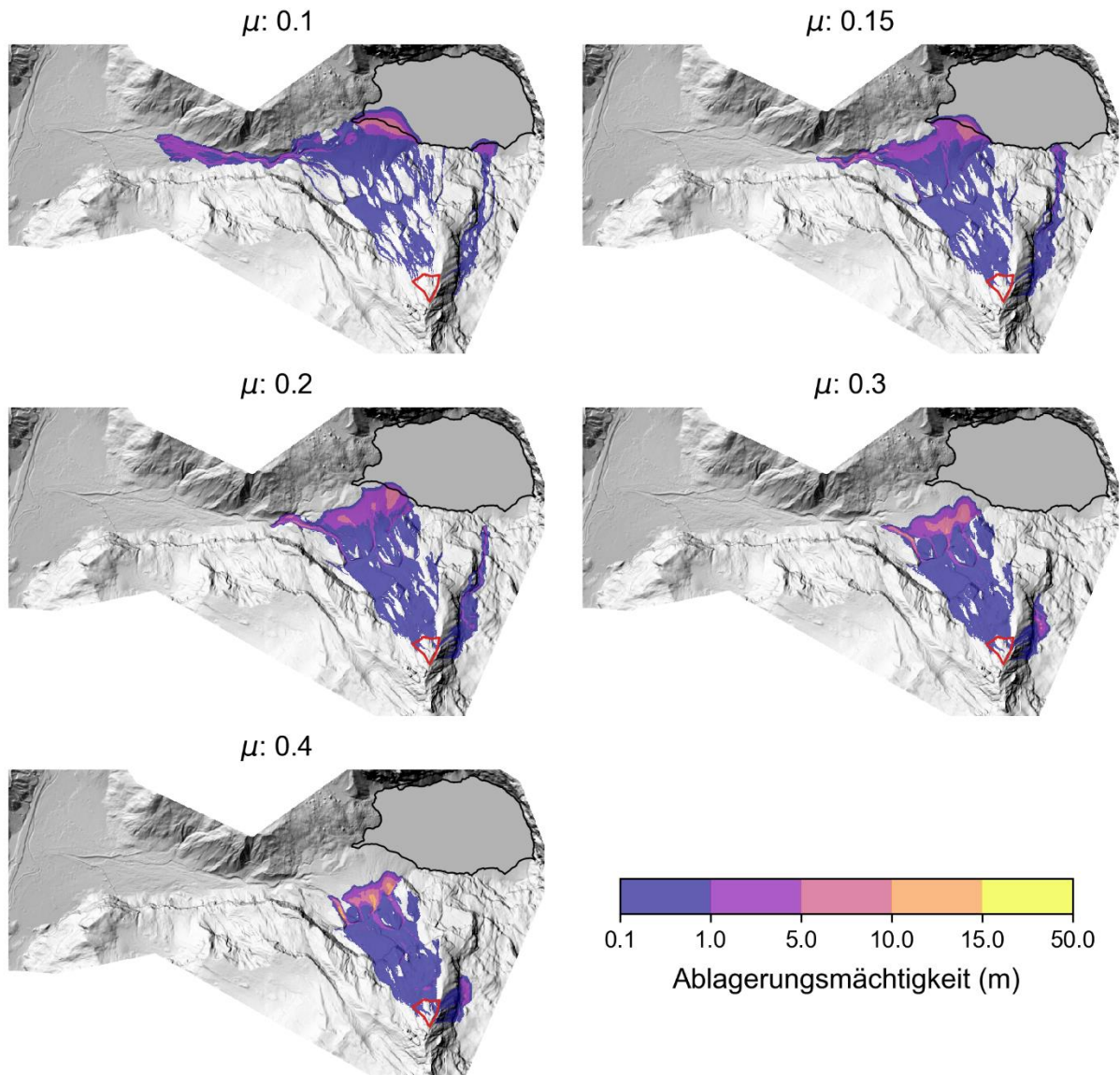
S2 - 1 Mio. m³ Szenario Kaskade Variante 1, ϵ : 500 m s⁻²



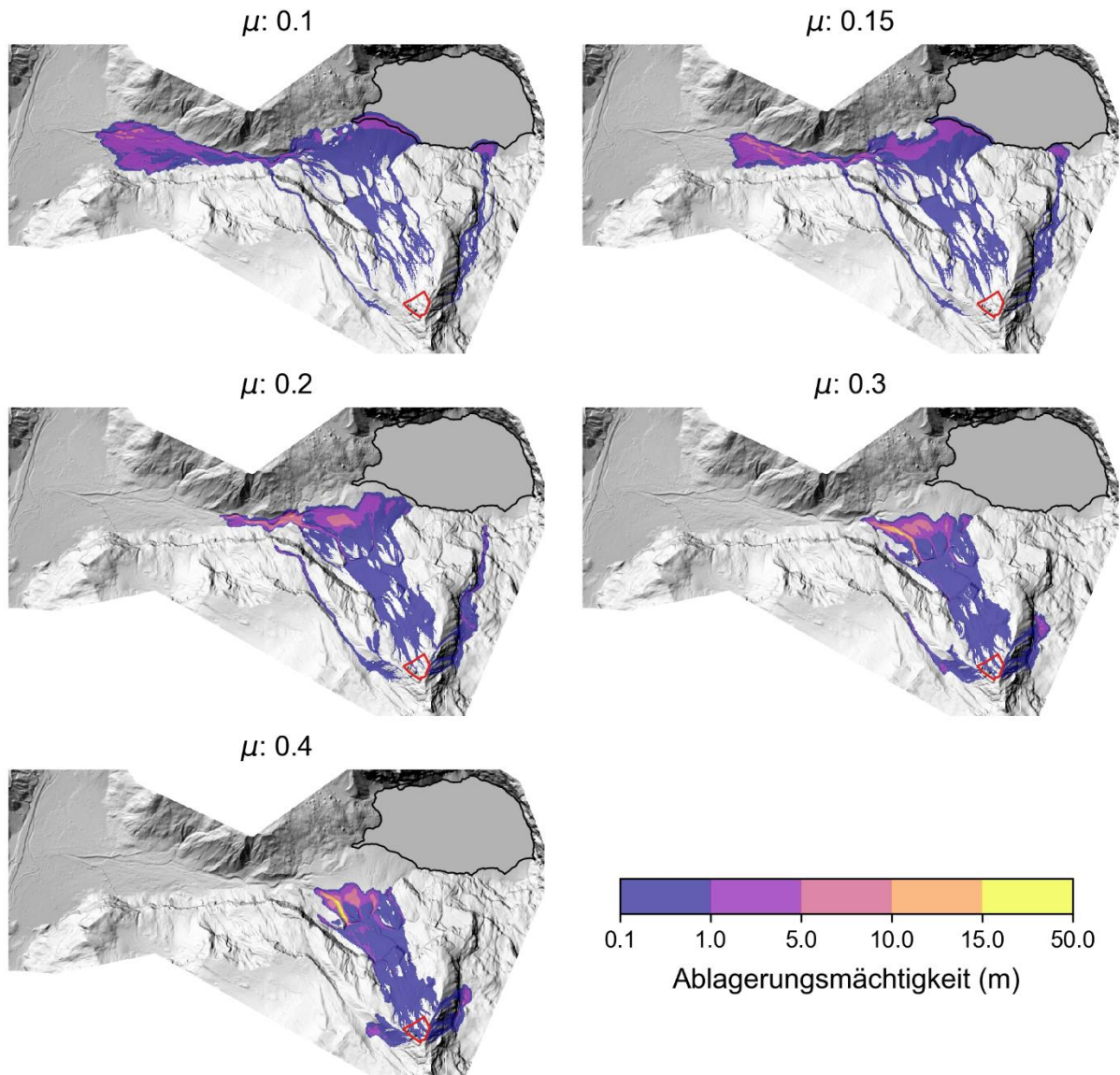
S2 - 1 Mio. m³ Szenario Kaskade Variante 2, ϵ : 500 m s⁻²



S2 - 1 Mio. m³ Szenario Bloc Variante 1, $\epsilon: 500 \text{ m s}^{-2}$

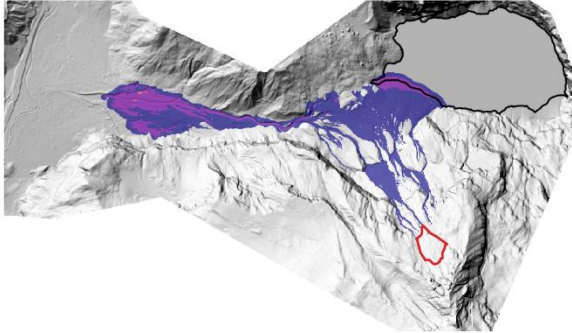


S2 - 1 Mio. m³ Szenario Bloc Variante 2, ϵ : 500 m s⁻²

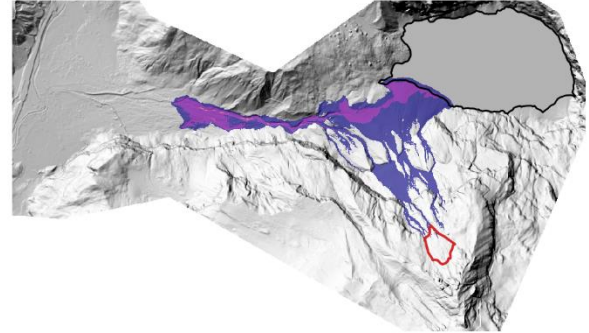


R2 - 0.6 Mio. m³ Szenario Zentrum, ϵ : 500 m s⁻²

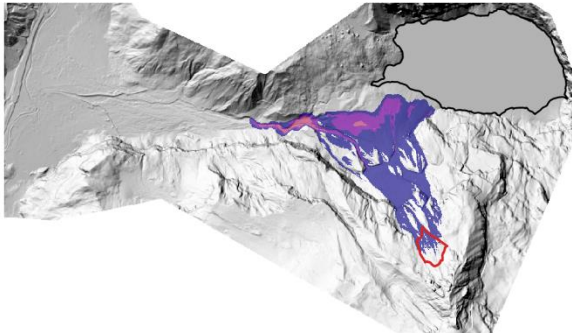
μ : 0.1



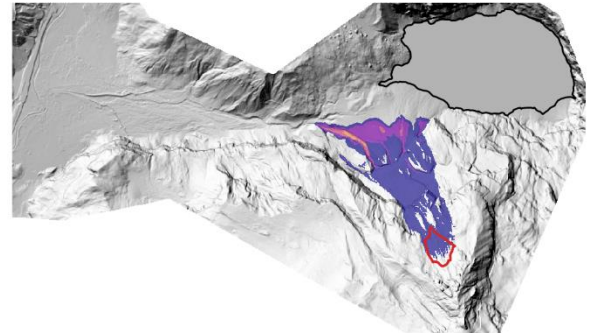
μ : 0.15



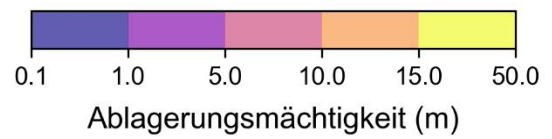
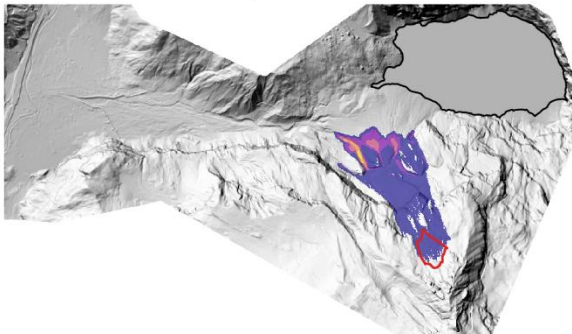
μ : 0.2



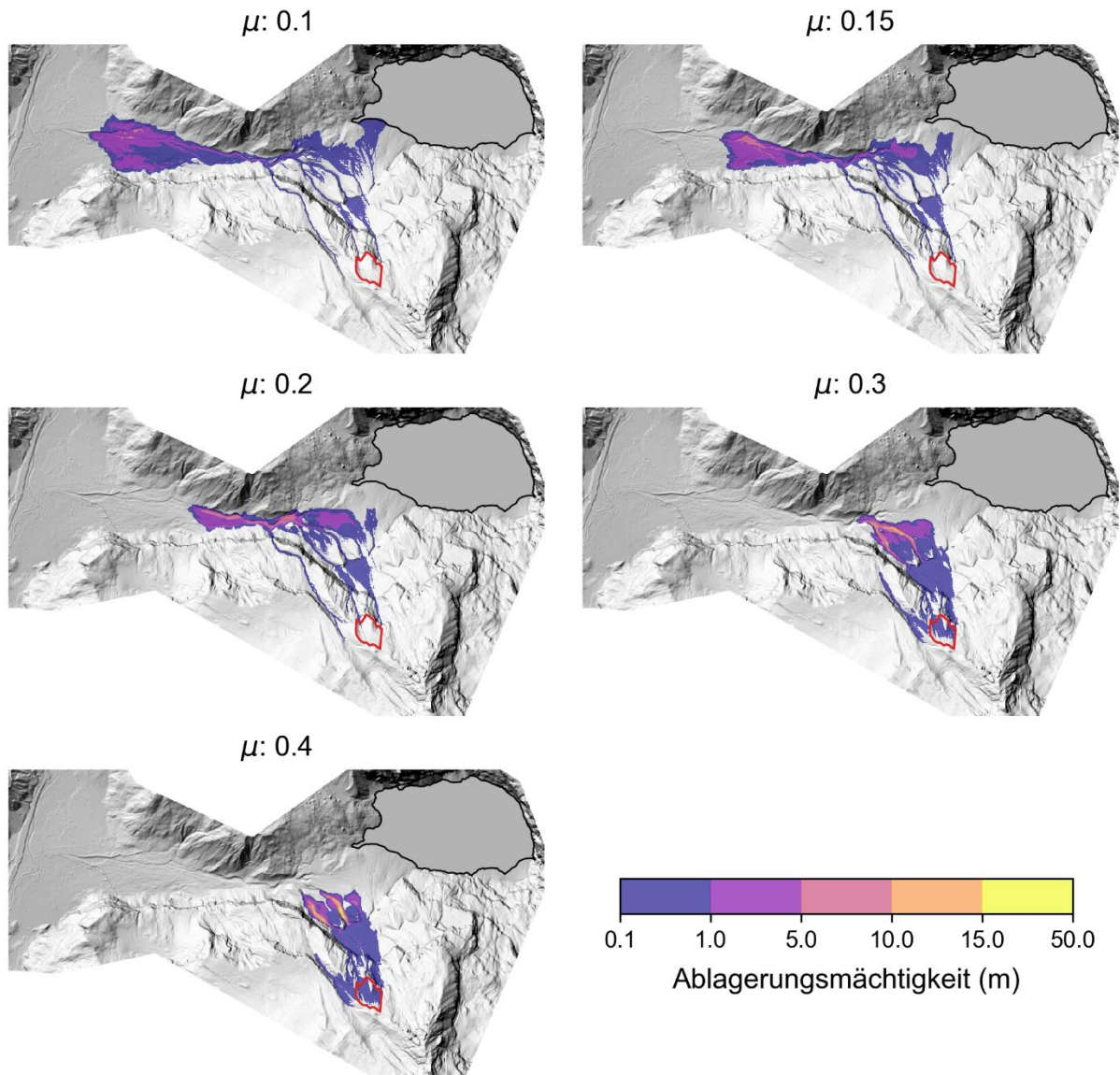
μ : 0.3



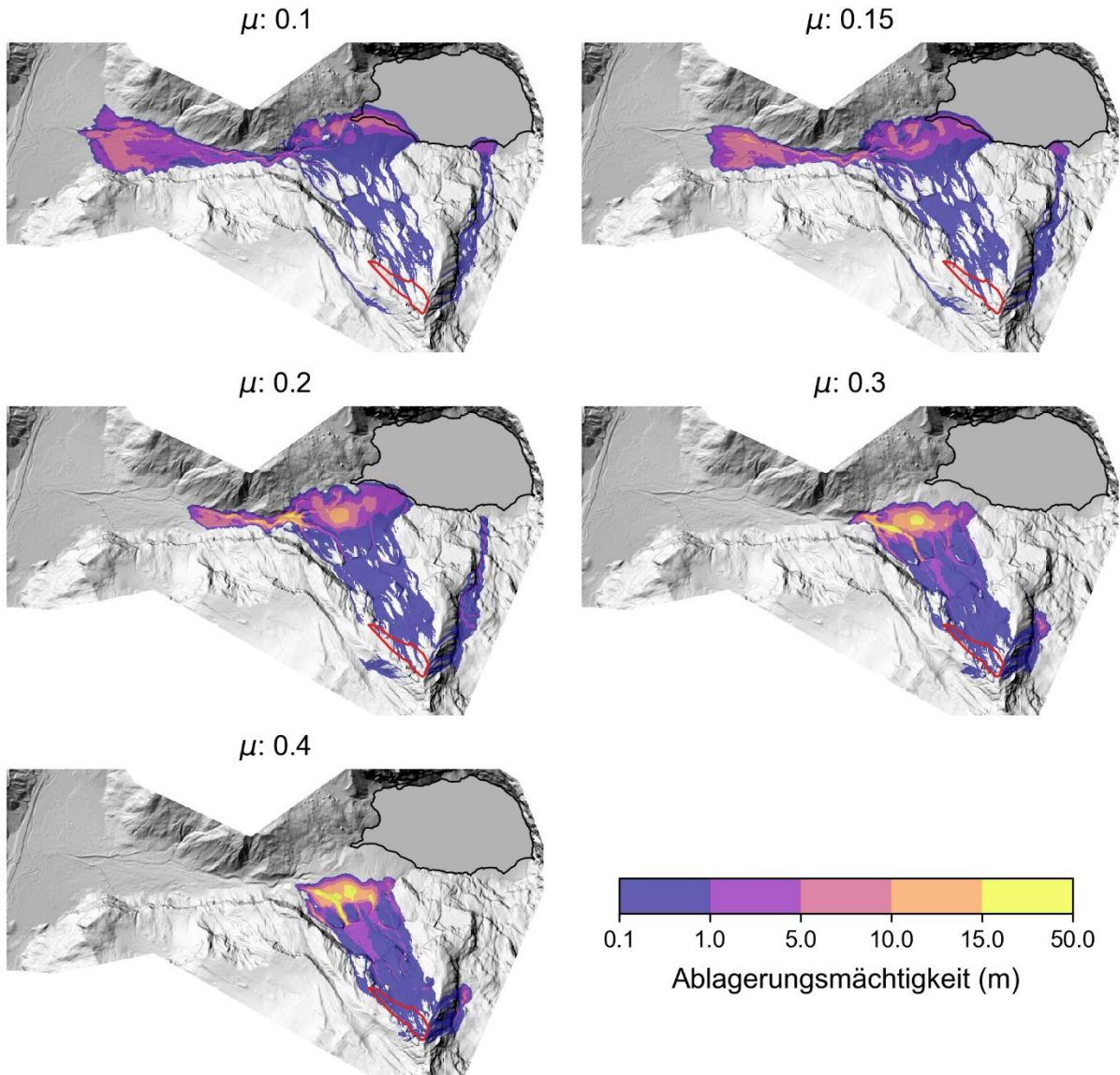
μ : 0.4



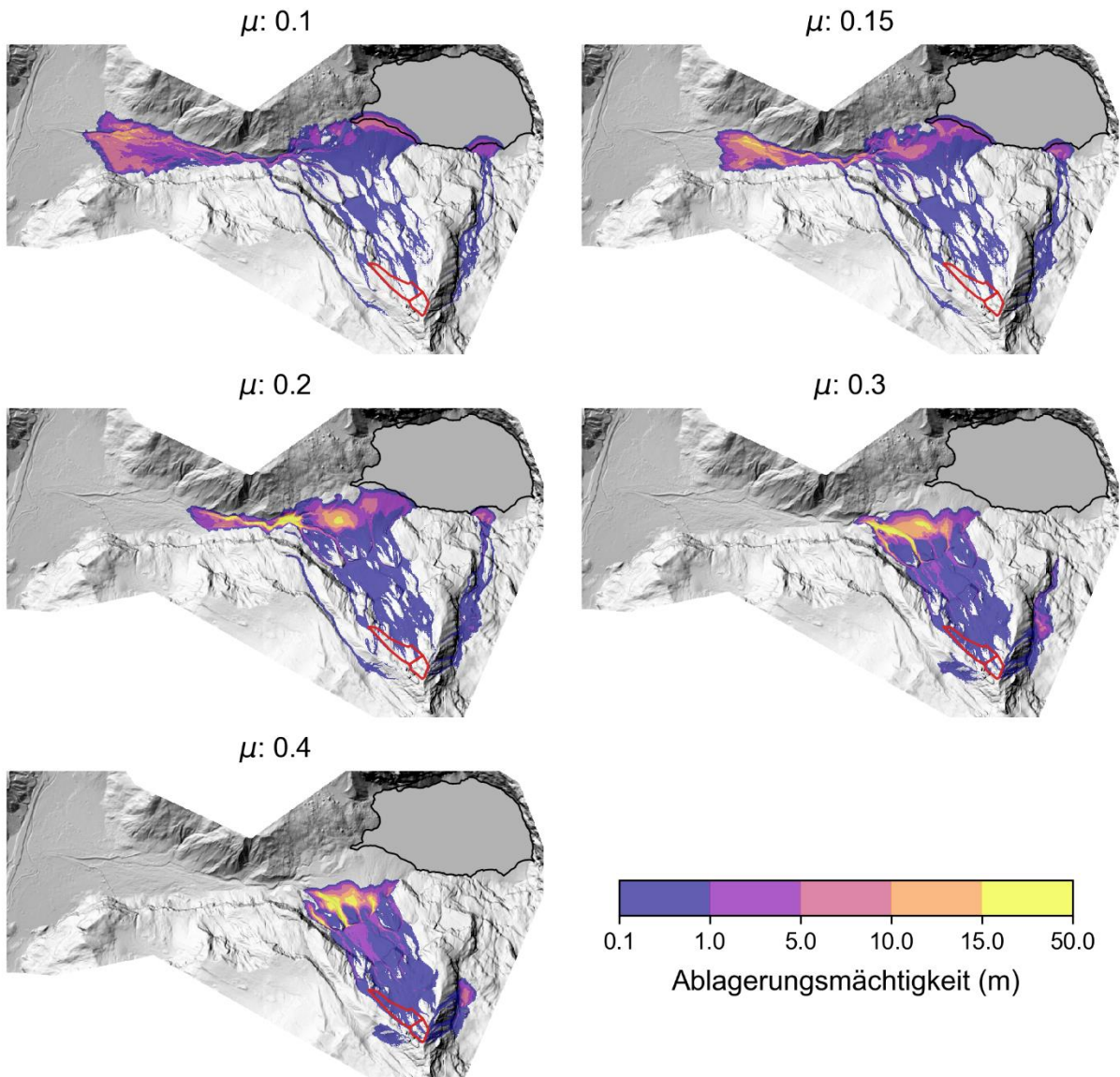
R2 - 0.6 Mio. m³ Szenario West, ϵ : 500 m s⁻²



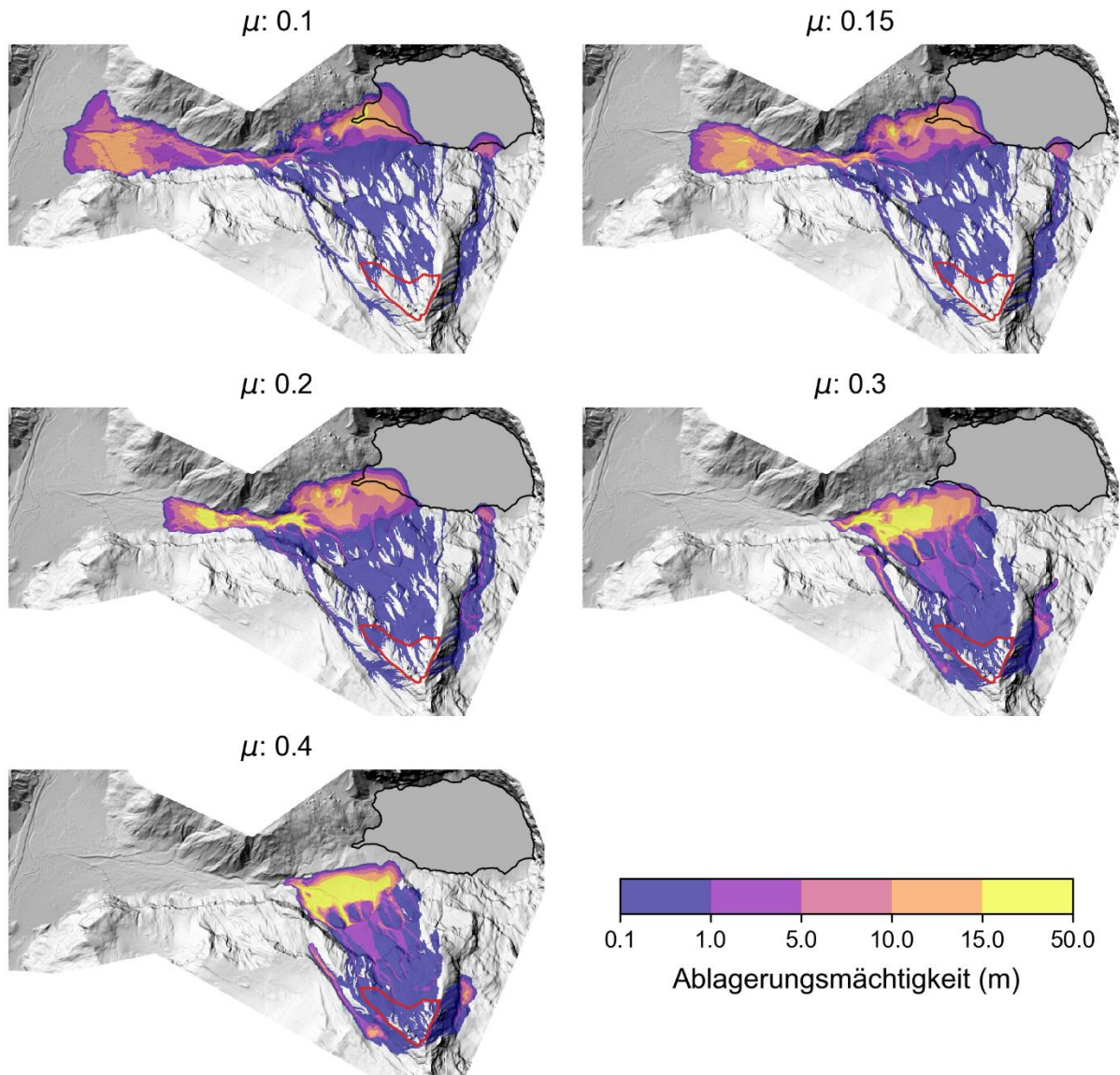
S3 - 3 Mio. m³ Szenario Bloc, $\epsilon: 500 \text{ m s}^{-2}$



S3 - 3 Mio. m³ Szenario Kaskade, $\epsilon: 500 \text{ m s}^{-2}$

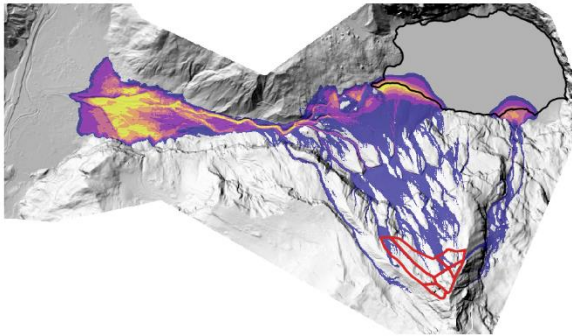


S5 - 8 Mio. m³ Szenario, ϵ : 500 m s⁻²

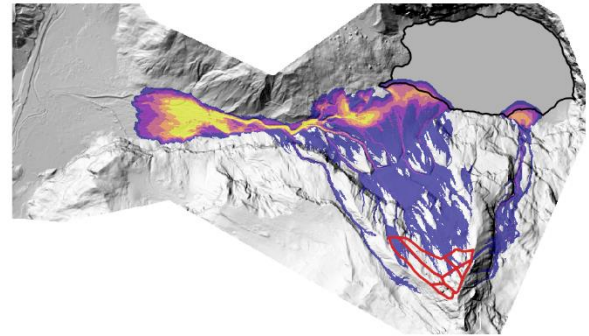


S5 - 8 Mio. m³ Szenario Kaskade, $\epsilon: 500 \text{ m s}^{-2}$

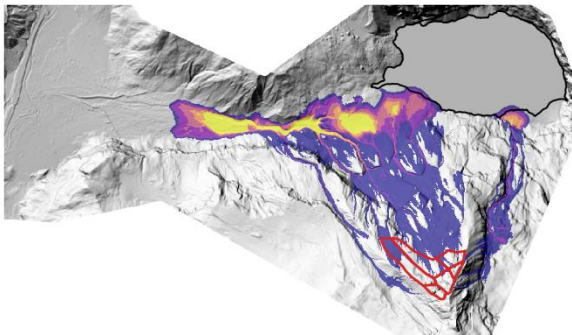
$\mu: 0.1$



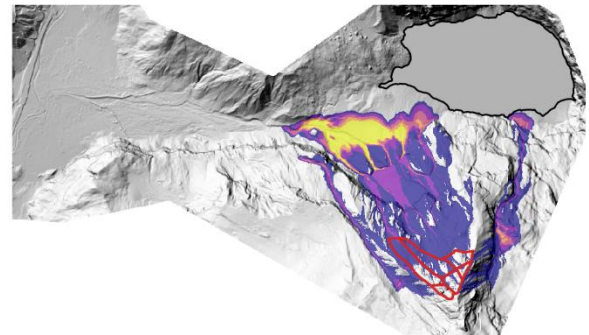
$\mu: 0.15$



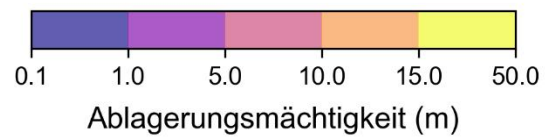
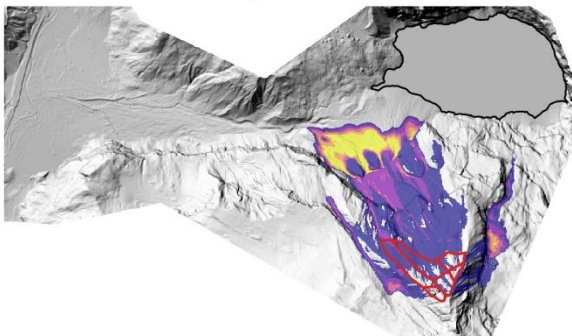
$\mu: 0.2$



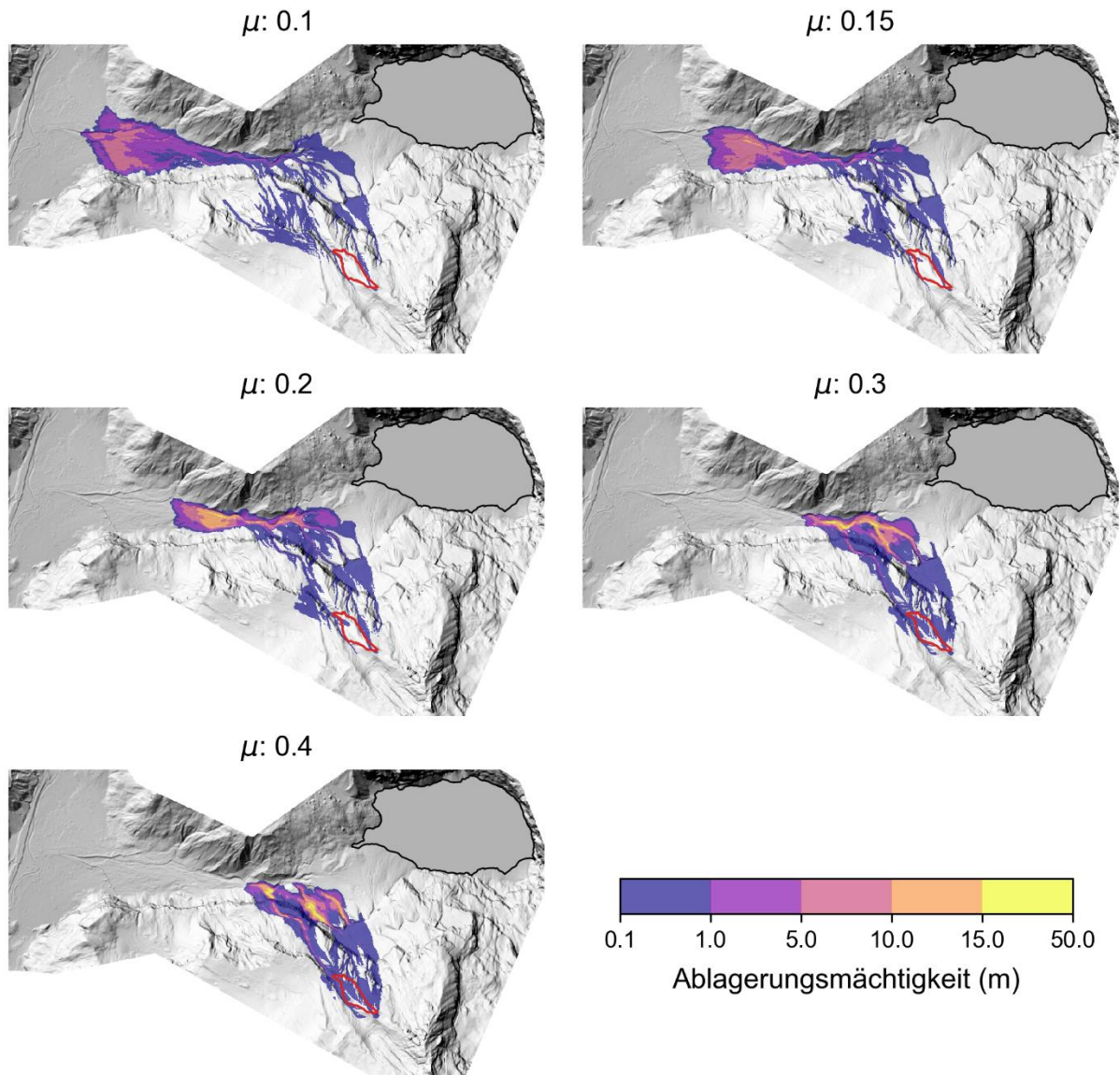
$\mu: 0.3$



$\mu: 0.4$

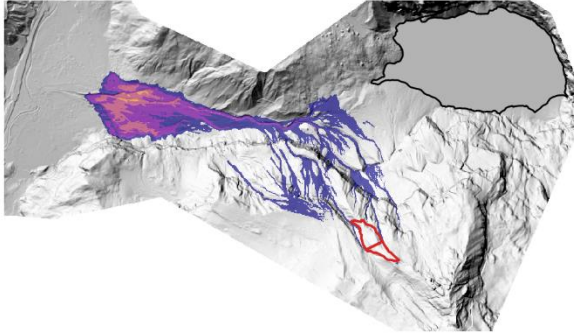


S4 - 1.5 Mio. m³ Szenario Bloc, ϵ : 500 m s⁻²

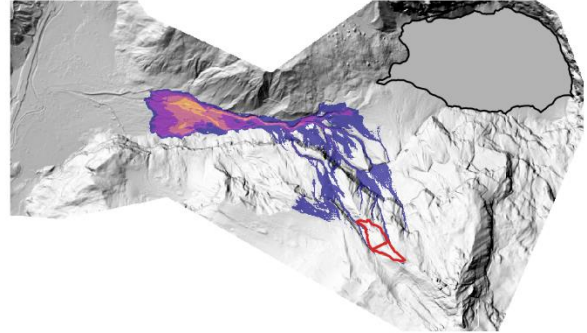


S4 - 1.5 Mio. m³ Szenario Kaskade, ϵ : 500 m s⁻²

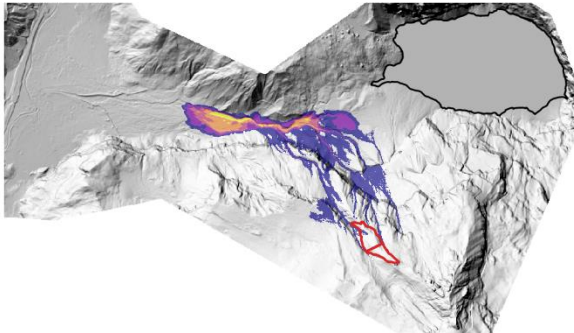
μ : 0.1



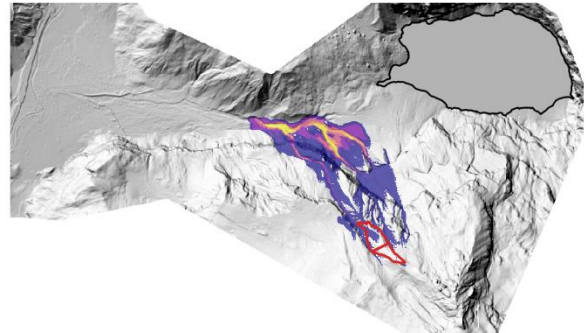
μ : 0.15



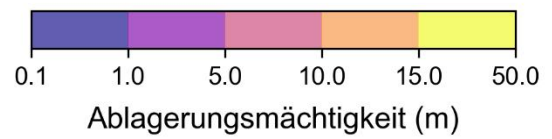
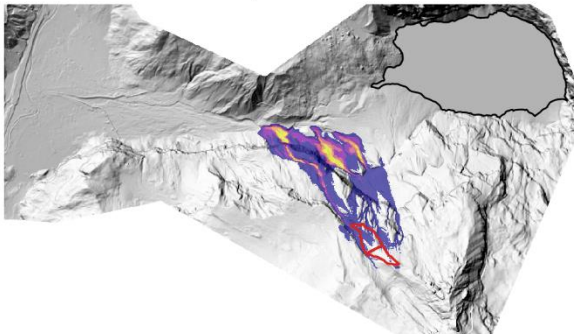
μ : 0.2



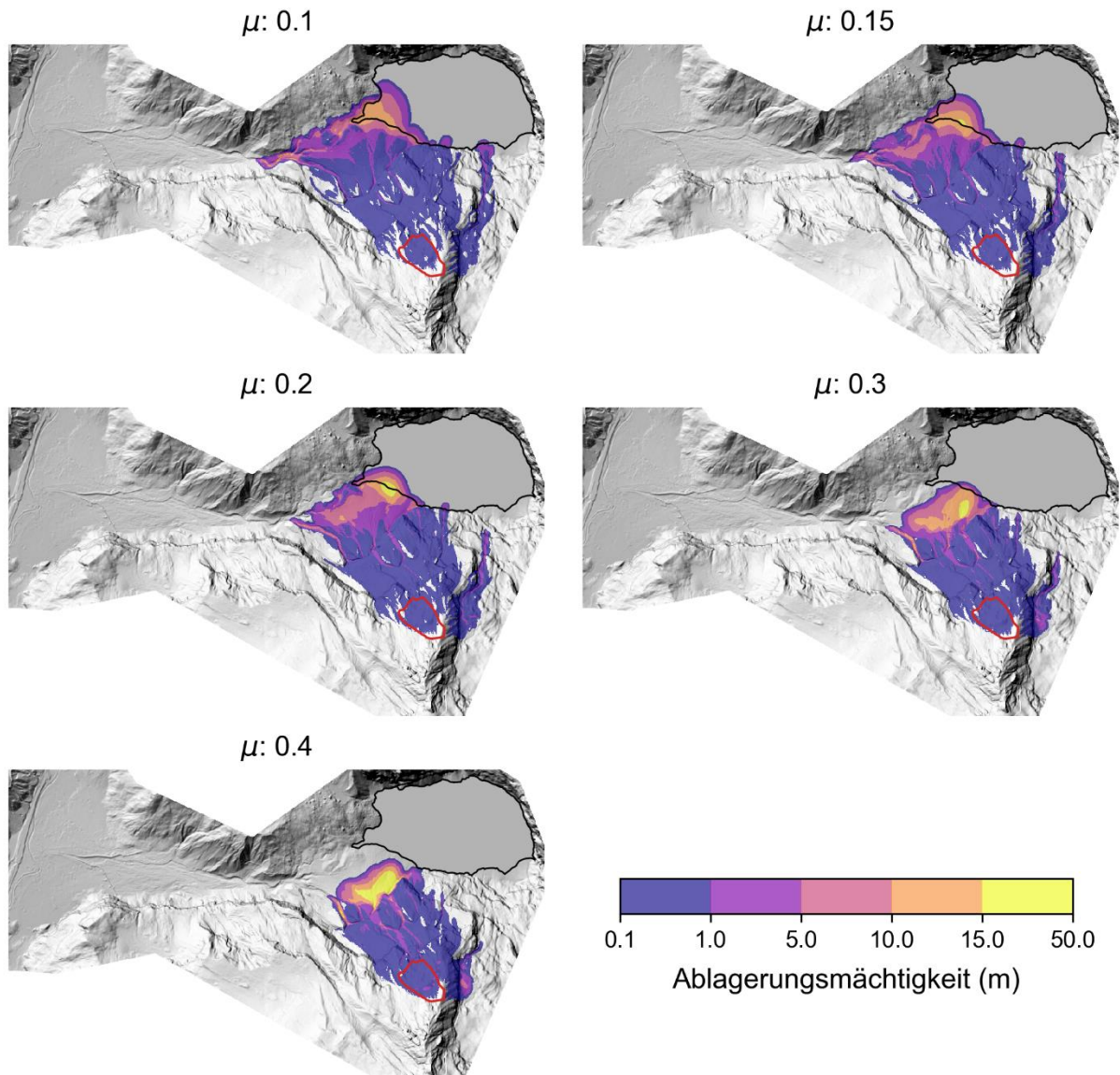
μ : 0.3



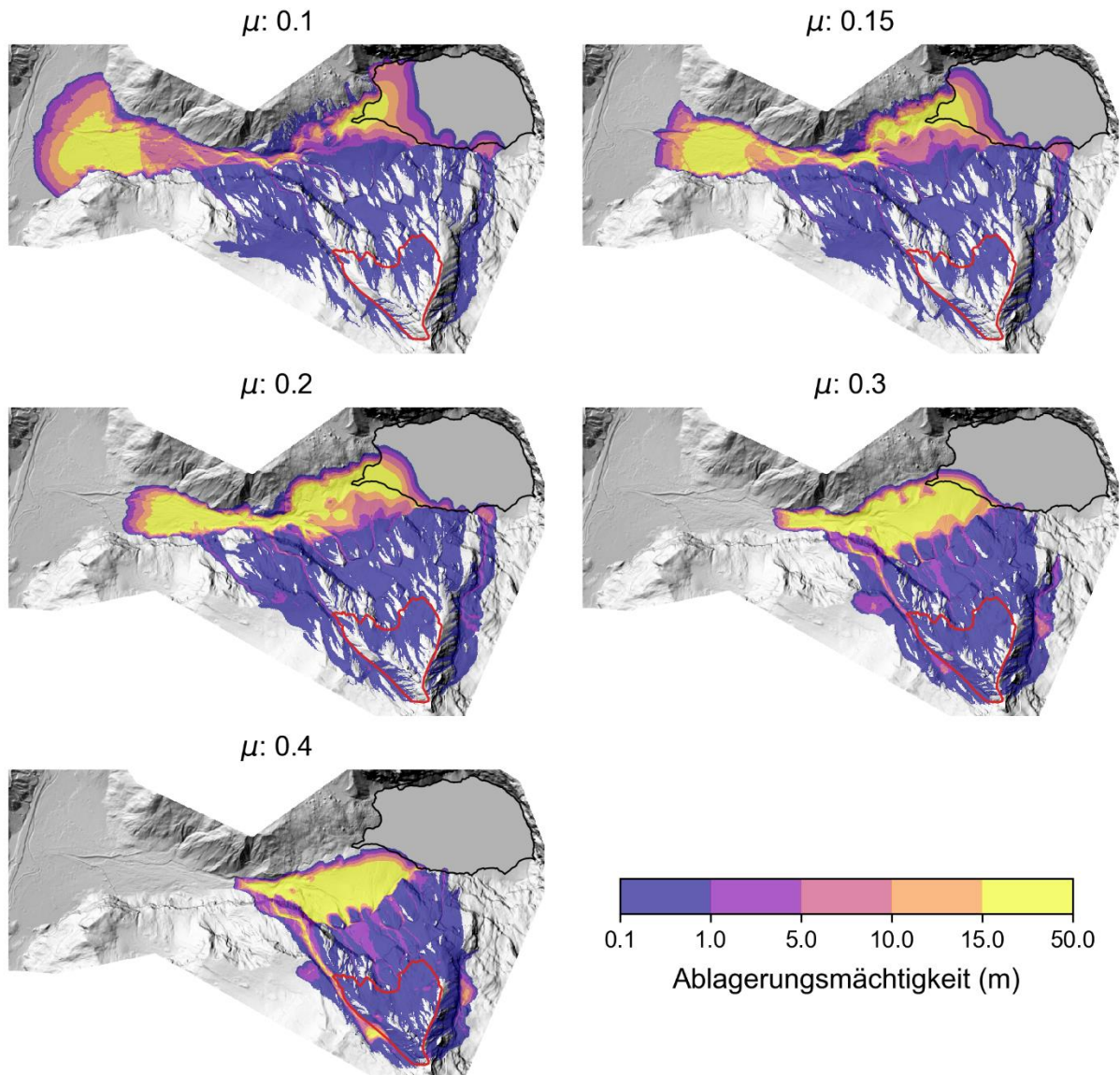
μ : 0.4



S7 - 3 Mio. m³ Szenario Ost, ϵ : 500 m s⁻²



S6 - 20 Mio. m³ Szenario, $\epsilon: 500 \text{ m s}^{-2}$



Anhang 3 – Übersicht Feldarbeiten 2021

1. GPS/Reflektoren

| Datum | Arbeiten |
|------------|---|
| 11.06.2021 | <ul style="list-style-type: none"> - Neuinstallation GPS 5 und 6 nach lawinenbedingtem Verlust am 29.01.2021 - Kontrolle GPS 13 (durch Steinschlagereignis am 07.06.2021 wurden Solarpanel und Antenne gedreht/beschädigt) - Demontage GPS 11 (bei Felssturzereignis vom 09.06.2021 wurde Gerät stark beschädigt) |
| 18.08.2021 | <ul style="list-style-type: none"> - Installation Ersatzgerät nach Absturz GPS 10 am 17.08.2021 - Installation eines zusätzlichen Reflektors (Nr. 55) beim Westgrat, zwischen Reflektor 53 und 54 - Neuausrichtung Reflektoren 53 und 54 - Installation von zwei GPS-Testgeräten bei den bisherigen GPS 7 und GPS 9 |
| 17.09.2021 | <ul style="list-style-type: none"> - Installation Reflektor 56 als Ersatz für den am 12.09.2021 abgestürzten Reflektor 53 - Deinstallation der beiden GPS-Testgeräte |
| 17.12.2021 | <ul style="list-style-type: none"> - Installation 88 Ah Zusatzbatterien bei GPS 2 und 9 |

2. Terrestrischer Laserscanner (TLS) und Radar

| Datum | Arbeiten |
|------------|---|
| 18.06.2021 | <ul style="list-style-type: none"> - Installation Radar Spitze Stei |
| 12.08.2021 | <ul style="list-style-type: none"> - Installation Pegelradar beim Zusammenfluss der Chalberspissibäche |
| 10.08.2021 | <ul style="list-style-type: none"> - TLS-Messung Spitze Stei |
| 09.11.2021 | <ul style="list-style-type: none"> - Deinstallation Radar Spitze Stei |
| 18.11.2021 | <ul style="list-style-type: none"> - Deinstallation/Einwinterung Pegelradar |

3. Drohne

| Datum | Arbeiten |
|------------|---|
| 24.04.2021 | - Oeschibach Flug 2021-1 (Perimeter Skibrücke – Bahnhof), Einmessen Kontrollpunkte |
| 28.06.2021 | - Oeschibach Flug 2021-2 (Gesamtgerinne Geschiebeablagerungsplatz – Chalberspissibäche) |
| 20.07.2021 | - Spitze Stei Flug 2021-1 |
| 13.08.2021 | - Oeschibach Flug 2021-3 (Gesamtgerinne) |
| 13.08.2021 | - Spitze Stei Flug 2021-2 |
| 08.09.2021 | - Spitze Stei Flug 2021-3 |
| 01.10.2021 | - Spitze Stei Flug 2021-4 |
| 24.10.2021 | - Oeschibach Flug 2021-4 (Gesamtgerinne) |

4. Thermistoren/Inklinometer

| Datum | Arbeiten |
|------------|--|
| 11.06.2021 | - Ersatz SIM-Karte Drucksensor Westgrat - Abdichtung Loggergehäuse Thermistorenkette Westgrat |
| 29.07.2021 | - Ersatz Antenne Loggergehäuse Thermistorenkette Zentrum nach Lawinenschäden - Abdichtung Loggergehäuse Thermistorenkette Zentrum |
| 18.08.2021 | - Ersatz SIM-Karte Drucksensor Gipfel |
| 17.12.2021 | - Inklinometermessung Westgrat (6. Folgemessung) |

5. Regenmesser / Wetterstation

| Datum | Arbeiten |
|------------|--|
| 11.06.2021 | - Deinstallation Regenmesser Staubbach nach Lawinenschäden |
| 17.09.2021 | - Installation Ersatz-Regenmesser Staubbach inkl. Temperatursensor - Neuabspannung Masten |

6. Begehungen

| Datum | Arbeiten |
|------------|--|
| 20.07.2021 | - Route: Ostgrat-Gipfel-Westgrat - NGA: N. Hählen, J. Häberle - GEOTEST: D. Tobler, C. Kienholz, I. Kull, A. Haberkorn - Oeschinenanstösser: C. Wandfluh - Gemeinde: J. Schärer |
| 29.07.2021 | - Route: Ostgrat-Gipfel-Westgrat - NGA: N. Hählen, C. Brönnimann, A. Peter, J. Häberle - GEOTEST: K. Graf, C. Kienholz - Gemeinde: R. Mäder - Hunziker Gefahrenmanagement: G. Hunziker - Mehrere Kantonsgeologen und Vertreter des Bundes |

7. Diverses

| Datum | Arbeiten |
|------------|---|
| 17.12.2021 | - Entnahme Gesteinsproben oberhalb der Reflektoren 80/81 für SLF-Scher- versuche |