
Bericht Nr. 1418139.31

Einwohnergemeinde Kandersteg

Kandersteg, Rutschung "Spitze Stei"

Datenerhebungen und Auswertungen 2022

Zollikofen, 10. Januar 2023

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

Autor(en)	Bearbeitete Themen / Fachbereiche
Christian Kienholz	Ganzer Bericht
Supervision	Visierte Inhalte
Kaspar Graf	Ganzer Bericht
Daniel Tobler	Ganzer Bericht
Hinweise	

GEOTEST AG



Daniel Tobler



Christian Kienholz

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	4
2.	Witterung	5
3.	Bewegungsraten.....	8
4.	Zusammenhang Witterung - Bewegungsraten.....	14
5.	Sturz- und Rutschaktivität.....	16
5.1	Abbrüche Schuttrutschungen	18
5.2	Sturzereignisse Mittlerer Ostgrat.....	19
5.3	Sturzereignisse aus sekundärer Felsrutschung unterhalb Ostgrat	21
6.	Kinematische Datenerhebungen und Auswertungen.....	24
7.	Abschliessende Bemerkungen	35
8.	Quellen	36
	Anhang 1 – Übersicht GPS / Reflektoren Spitze Stei.....	37
	Anhang 2 – Höhenveränderungen Spitze Stei 01.10.2021 – 12.10.2022.....	38
	Anhang 3 – 3D Bewegungsraten.....	39
	Anhang 4 – Höhenwinkel.....	41
	Anhang 5 – Übersicht Ereignisse 2022	42
	Anhang 6 – Übersicht Feldeinsätze 2022.....	51

1. Einführung

Der vorliegende Bericht gibt einen Rückblick auf die Datenerhebungen und Auswertungen, welche im Rahmen der Arbeiten Spitze Stei im Jahr 2022 durchgeführt worden sind. Ein wichtiger Teil dieser Arbeiten umfasste die operative Überwachung der Rutschung und der darunter gelegenen Gerinne. In diesem Rahmen wurden Witterungsverhältnisse, Bewegungsraten und Abbruchaktivität laufend verfolgt. Die entsprechenden Aufzeichnungen sind in den Kapiteln 2, 3 und 4 zusammengefasst.

Neben der operativen Überwachung der Rutschung Spitze Stei lag ein Hauptfokus der Facharbeiten 2022 auf einer vertieften Auswertung der am Spitze Stei erhobenen Permafrostdaten. Die entsprechenden Resultate sind in Bericht «Auswertung Permafrostdaten, Permafrostmodellierungen» [1] dokumentiert.

Ein zweiter Schwerpunkt der Arbeiten 2022 lag auf einer verbesserten flächigen Quantifizierung der Oberflächenverschiebungen am Spitze Stei. Da Bohrungen im hochalpinen Gelände des Spitze Stei sehr aufwändig und aus Sicherheitsgründen nur in peripheren Rutschbereichen möglich sind [2], kommt flächig quantifizierten Oberflächenverschiebungen eine besonders wichtige Rolle zu; dies als Grundlage zur Verbesserung des generellen Prozessverständnisses und spezifisch für die Erstellung eines detaillierten geologisch-kinematischen Modelles der Rutschung. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde auf die Drohnendaten fokussiert, welche seit 2021 über den ganzen Rutschperimeter erhoben werden. Deren Prozessierung wurde optimiert, sodass nun Orthophotos und Terrainmodelle des Gesamtperimeters mit Auflösung und Genauigkeit von wenigen Zentimetern zur Verfügung stehen. Die auf den Daten angewendete Methodik zur Ableitung von Geschwindigkeitsfeldern wurde ebenfalls verbessert, um möglichst hoch aufgelöste und genaue Bewegungsfelder zu bestimmen. Die Methodik wurde zudem erweitert, um neben den bis anhin verfügbaren 2D-Bewegungsfeldern auch 3D-Bewegungsfelder und daraus abgeleitete Grössen (3D-Bewegungsraten, Höhenwinkel) zu generieren. Die Resultate der Arbeiten, welche sich an neuen Entwicklungen aus der Wissenschaft orientieren ([3][4] und Referenzen in diesen Berichten), werden in Kapitel 6 beschrieben.

Der dritte Schwerpunkt der Arbeiten 2022 deckte hydrologische bzw. hydrogeologische Fragestellungen ab. Aufbauend auf den in Bericht [5] dokumentierten Resultaten der Schneeschmelzmodellierung liegt das Ziel der betreffenden Arbeiten darin, den Zusammenhang zwischen Rutschaktivität und treibenden Faktoren (Niederschlägen, Schmelzwassereintrag) mittels sogenannter linearer Reservoirs zu quantifizieren. Hier liegen erste vielversprechende Zwischenresultate vor, welche in Kapitel 4 an einem Beispiel illustriert werden. Die Präsentation von Methodik und finalen Resultaten erfolgt im Rahmen eines spezifischen Fachberichtes im laufenden Jahr.

Im Rahmen der Gefahrenbeurteilung wurden per Ende 2022 die bestehenden Absturzsznarien aus Bericht [6] überprüft. Nach den weitreichenden Anpassungen im Nachgang an die ereignisreiche Saison 2021 [7] wurden dieses Jahr nur minimale Anpassungen vorgenommen. Dies nicht zuletzt, da im vergangenen schneearmen und trockenen Jahr kaum aussagekräftige neue Daten/Erfahrungswerte zur Überprüfung der Szenarien bzw. deren Wahrscheinlichkeiten generiert wurden. So wurde der am Spitze Stei erstmals beobachtete starke Rückgang der Bewegungsraten auch in anderen überwachten Rutschgebieten mit ähnlichen Witterungsbedingungen festgestellt (z.B. [4]). Auf eine detaillierte Diskussion der Szenarien wird im vorliegenden Bericht daher ebenfalls verzichtet.

2. Witterung

Nachfolgend wird auf die für die Rutschaktivität wichtigen Witterungsparameter (Schnee- bzw. Schneeschmelze, Regen) fokussiert. Die Meteostationen Fisistock (Lufttemperatur) und Kandersteg (Niederschlag) weisen mehrjährige Zeitreihen ohne Unterbrüche auf und werden daher im Rahmen der Vergleiche gezeigt.

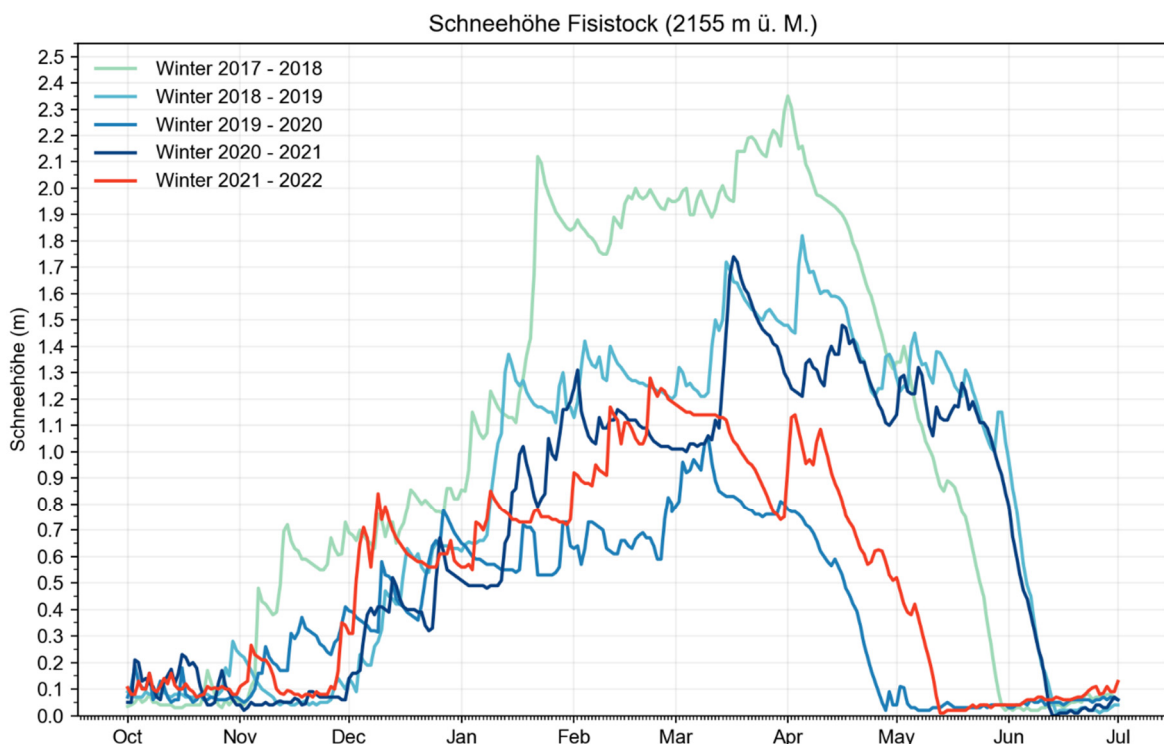


Abbildung 1: Seit 2017 gemessene Schneehöhen an der IMIS-Station Fisistock. Die Station liegt rund 3 km südwestlich der Rutschung Spitze Stei. Die Stationshöhe (2'155 m ü. M.) entspricht dem untersten Bereich der Rutschung (Höhenbereich 2'150 bis 2'850 m ü. M.).

Die Rutschung Spitze Stei wurde Ende November 2021 eingeschneit (Abbildung 1). In der Folge entwickelte sich die Schneedecke bis Ende Februar innerhalb der Norm der vergangenen Jahre. Sehr trockenes Hochdruckwetter im März und heiss-trockene Bedingungen im Mai (Abbildung 3) führten zu einem schneearmen Spätwinter und einer frühen Ausaperung im Frühling. Im Vergleich zum Vorjahr 2021 aperte die Rutschung Spitze Stei rund einen Monat früher aus (Mitte Mai vs. Mitte Juni, Abbildungen 1 und 2).

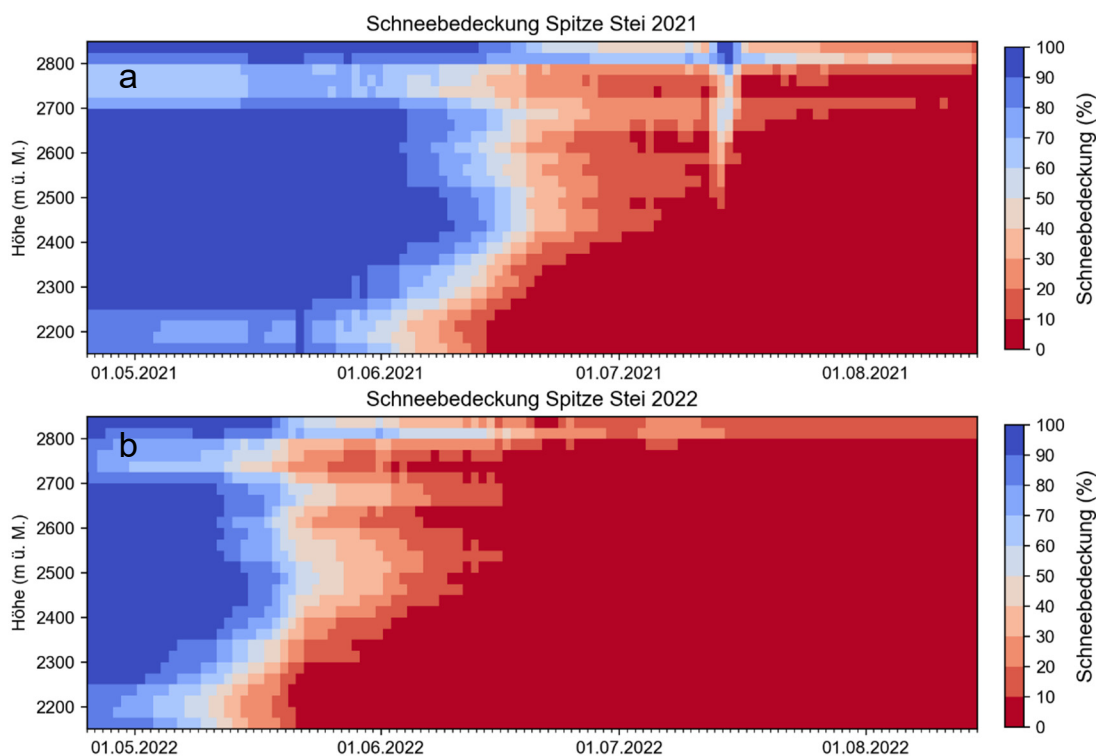


Abbildung 2: Schneedeckung der Rutschung Spitze Stei für die Frühjahre 2021 (a) und 2022 (b). Die prozentuale Schneedeckung ist in Tagesschritten (Abszisse) und pro 25 m Höhenstufe (Ordinate) quantifiziert. Die Schneedeckung wurde aus klassifizierten Fotos der Überwachungskamera Rosshubel berechnet. Blaue Flächen entsprechen vollständiger Schneedeckung, rote Flächen kompletter Ausaperung. Vgl. [5] für Details zur Methodik.

Die Witterung blieb in den Sommermonaten Juni bis August warm und trocken. Im Juli wurden an der Station Kandersteg nur 60 mm Regen gemessen (Abbildung 4). Zum Vergleich: im Juli 2021 lag der Monatsniederschlag mit 200 mm deutlich höher; auch in den Juli-Monaten 2020 und 2019 wurden jeweils Niederschläge von über 100 mm aufgezeichnet.

Der Herbst 2022 war vorübergehend kühl-nass, insbesondere während der zweiten Septemberhälfte. Der September als Ganzes war im Vergleich zu den Vorjahren 2°C kälter und ca. ein Drittel feuchter (Abbildungen 3 und 4). Auf den kühlen September folgte ein ausserordentlich milder Oktober, in dem an der Station Fisistock eine Monatsdurchschnittstemperatur von annähernd 9°C gemessen wurde (Abbildung 3). Unterhalb des Gipfelbereichs

verblieb die Rutschung bis Ende Oktober vollständig ausgeapert. Hinsichtlich Niederschlägen lag der Oktober 2022 verglichen mit den Vorjahren im Mittelfeld, war aber deutlich feuchter als der sehr trockene Oktober des Vorjahres 2021.

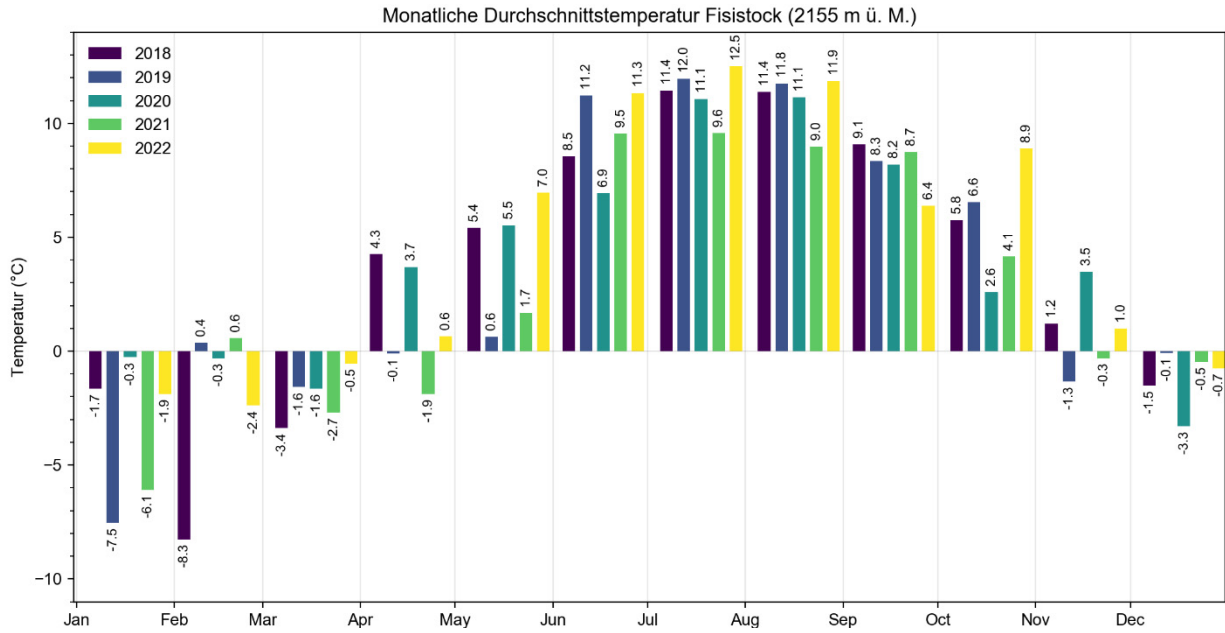


Abbildung 3: Monatlich gemittelte Lufttemperaturen gemessen an der IMIS-Station Fisistock für die Jahre 2018 – 2022.

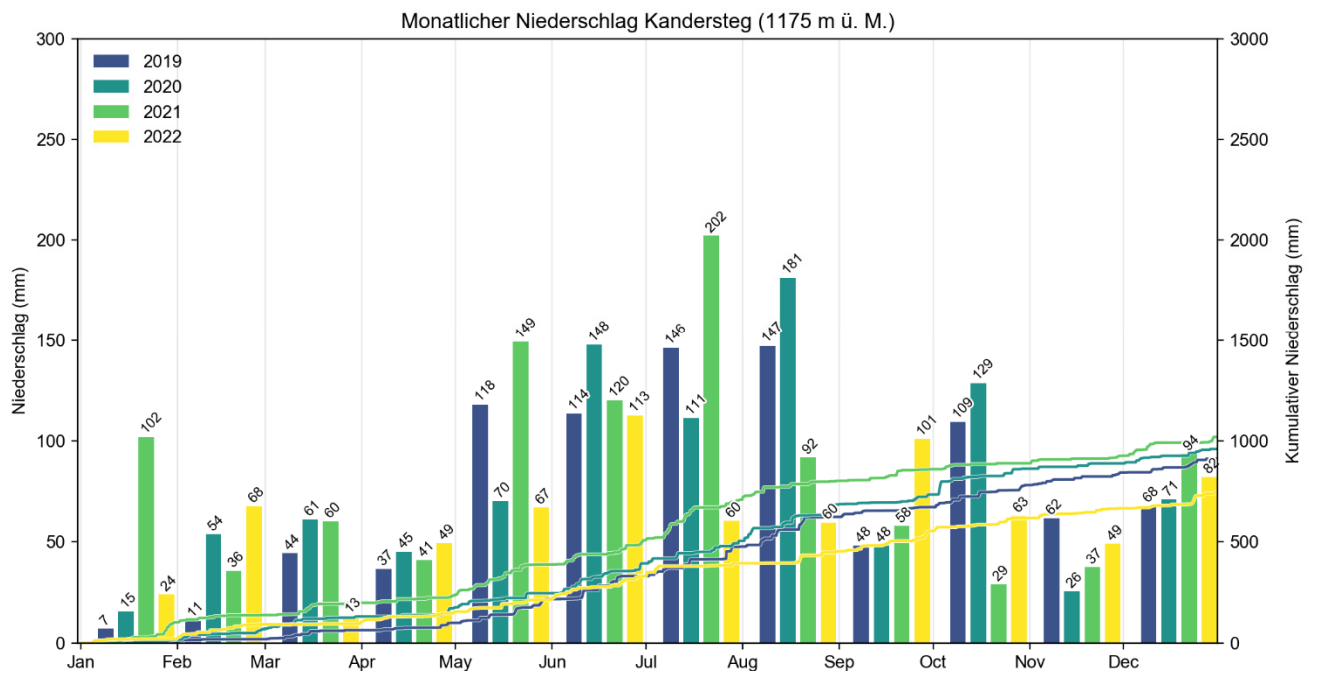


Abbildung 4: Monatliche Niederschläge (linke Ordinate, Säulen) sowie kumulative Jahresniederschläge (rechte Ordinate, Linien) gemessen an der Station Kandersteg (1'175 m ü. M.).

Die Monate November und Dezember waren generell eher mild, die zweite Dezemberhälfte sogar ausserordentlich warm. Bezüglich Niederschlägen lagen die beiden Monate in der Norm der Vorjahre. Eingeschneit wurde die Rutschung Spitze Stei mit den Niederschlägen vom 04. November. Aufgrund der ausbleibenden Schneefälle und der warm-trockenen Bedingungen in der zweiten Dezemberhälfte lag die Schneemächtigkeit per Ende Dezember deutlich unter der mehrjährigen Norm.

Zusammenfassend fiel das Jahr 2022 warm-trocken aus, dies in Kontrast zum feucht-kühlen Vorjahr 2021. Die günstige Witterung führte am Spitze Stei zu deutlich geringeren Bewegungsraten und leicht reduzierter Sturzaktivität im Vergleich zum Vorjahr.

3. Bewegungsraten

Abbildung 5 zeigt die jährlichen Bewegungsraten der Rutschung Spitze Stei für den Zeitraum 08.09.2021 – 11.09.2022. Die Bewegungsraten wurden aus den Drohnendaten via 2D-Feature Tracking abgeleitet (vgl. [8][9][10] für Methodik). Die Messungen zeigen Bewegungen innerhalb des Rutschperimeters von über 4 m pro Jahr in den unteren Bereichen der Schuttrutschungen, wobei dieser Betrag nur die horizontale Komponente des Bewegungsfeldes abbildet (für 3D-Tracking, vgl. Kapitel 6).

Der Vergleich mit den Bewegungsraten der Vorjahresperiode 2021 (04.09.2020 – 08.09.2021, Abbildung 6a) zeigt fast durchgehend einen Rückgang der Rutschbewegungen (Abbildung 6b). Während im felsigen Gipfelbereich der Rutschung (Annotation 1 in Abbildung 6b) die Bewegungsraten rund 60 bis 80% der Beträge der Vorjahresperiode erreichten, waren es im Bereich der Schuttrutschung Westflanke sowie des untersten Bereiches des Westgrates (Annotation 2) unter 40%; im Bereich der sekundären Schuttrutschung bei Annotation 3 sogar weniger als 20%.

Nennenswerte Beschleunigungen gab es in den Bereichen um Annotationen 4, 5 und 6. Bei Annotation 4 handelt es sich um eine sekundäre Felsrutschung (vgl. Kapitel 5.3 für Diskussion der Sturzaktivität aus dem Bereich), bei Annotation 5 um eine periphere, nach Nordosten exponierten Schuttrutschung [10]. Die starken und grossflächigen Beschleunigungen um Annotation 6 (über Faktor 1.5 erhöhte Bewegungsraten) betreffen Teile der Grundmoräne des Doldenhorngletschers, welche westlich an die Rutschung Spitze Stei angrenzt bzw. diese gebietsweise überlagert. Der oberflächennahe eisreiche Schutt reagierte hier mit Bewegungszunahmen auf die sehr warmen Sommertemperaturen.

08.09.2021 - 11.09.2022 (1.0 Jahre)

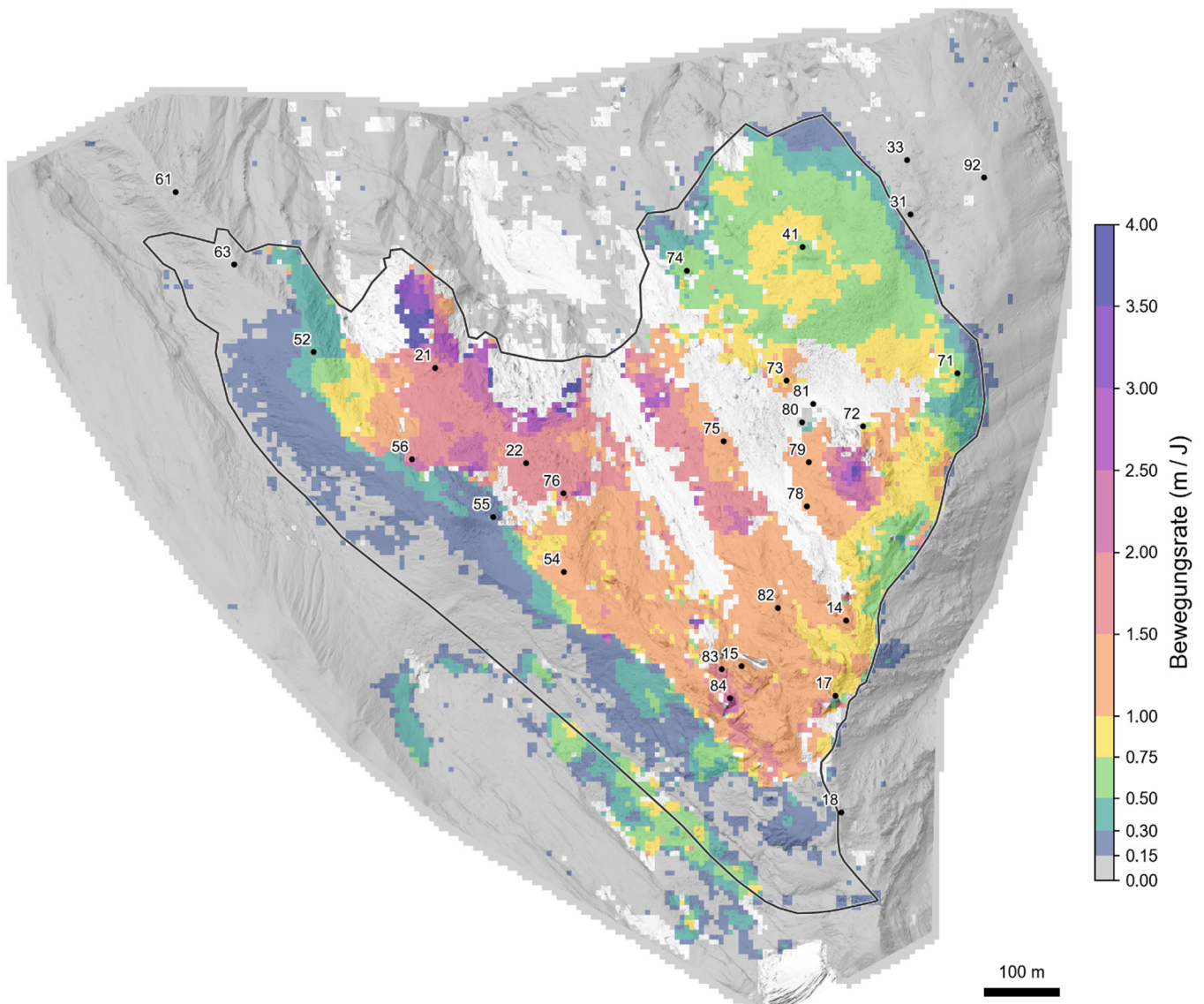


Abbildung 5: Bewegungsraten der Rutschung Spitze Stei (nur Horizontalkomponente) für die Zeitperiode 08.09.2021 – 11.09.2022. In Abbruch-, Transit- und Ablagerungsgebieten sind aufgrund chaotischer Terrainveränderungen keine Bewegungsmessungen möglich. Zur Orientierung sind die Reflektorpositionen annotiert (schwarze Punkte mit Nummern). Die schwarze Linie entspricht dem Perimeter der Rutschung Spitze Stei (Stand 2022).

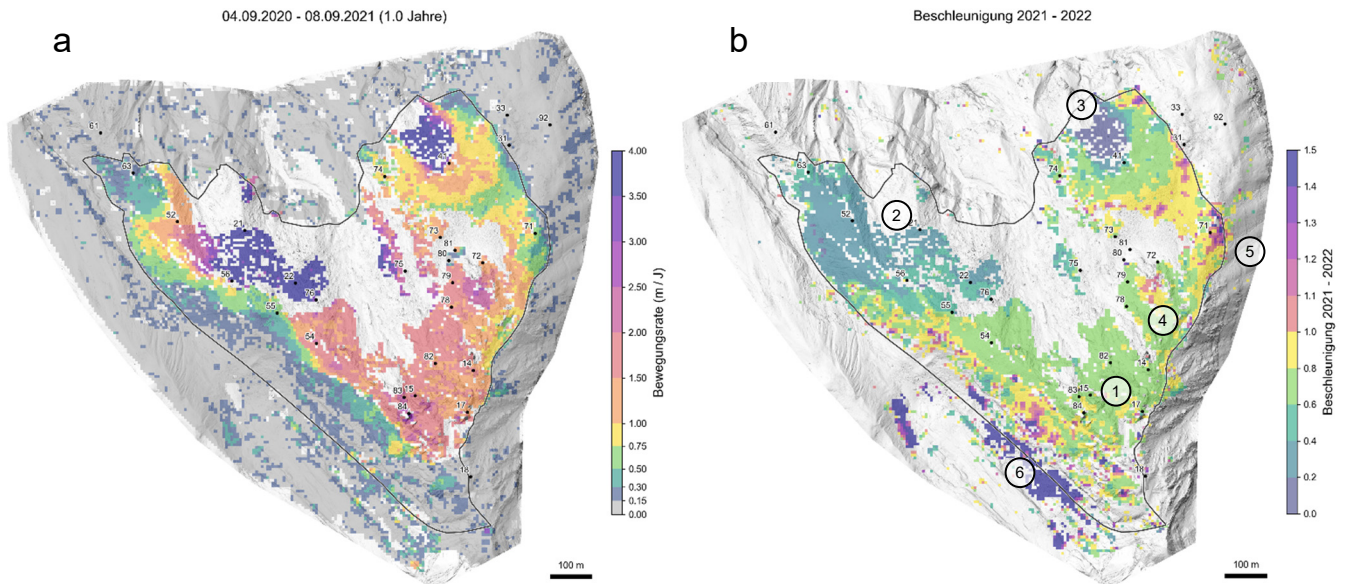


Abbildung 6: (a) Bewegungsraten (Horizontalkomponente) für die Zeitperiode 04.09.2020 – 08.09.2021. Räumliche Auflösung und Genauigkeit der Referenzdaten von 2020 sind reduziert, was zu erhöhtem Rauschen führt. (b) Beschleunigung 2021 – 2022, berechnet via Division der Raster 2021 (a) und 2022 (Abbildung 5). Blau-grün-gelbe Farbtöne zeigen eine Verlangsamung, pink-violette Farbtöne eine Beschleunigung an.

Der generelle Rückgang der Bewegungen reflektiert die unterschiedlichen Witterungsbedingungen der verglichenen Jahre (kalt-nasses Jahr 2021, warm-trockenes Jahr 2022, vgl. vorgängiges Kapitel sowie Kapitel 4). Methodenbedingt, wegen der Drohnenbefliegungen zu Beginn des Septembers, ist der Witterungscontrast zusätzlich verschärft. So wurde der nasse Oktober 2020 der generell nassen Periode 2021 (04.09.2020 – 08.09.2021) zugerechnet. Der trockene Oktober 2021 wurde hingegen bei der generell trockenen Periode 2022 (08.09.2021 – 11.09.2022) berücksichtigt, während die nasse zweite Monatshälfte des Septembers 2022 in der Periode 2022 bereits nicht mehr berücksichtigt ist.

Abbildung 7 stellt die Bewegungsraten des Jahres 2022 in den mehrjährigen Kontext. Die Abbildung zeigt einerseits die vorgängig diskutierten starken Bewegungsabnahmen 2021 – 2022, z.B. im Bereich der Schuttrutschung Westflanke (Zone 4) von durchschnittlich 4.85 m pro Jahr (braune Säule) auf 1.86 m pro Jahr (graue Säule). Die Grafik zeigt weiterhin, dass die Bewegungsraten 2022 trotz des starken Rückganges im mehrjährigen Kontext nach wie vor hoch sind. Sie entsprechen verbreitet den zwischen 2017 und 2019 gemessenen Bewegungsraten (orange Säulen).

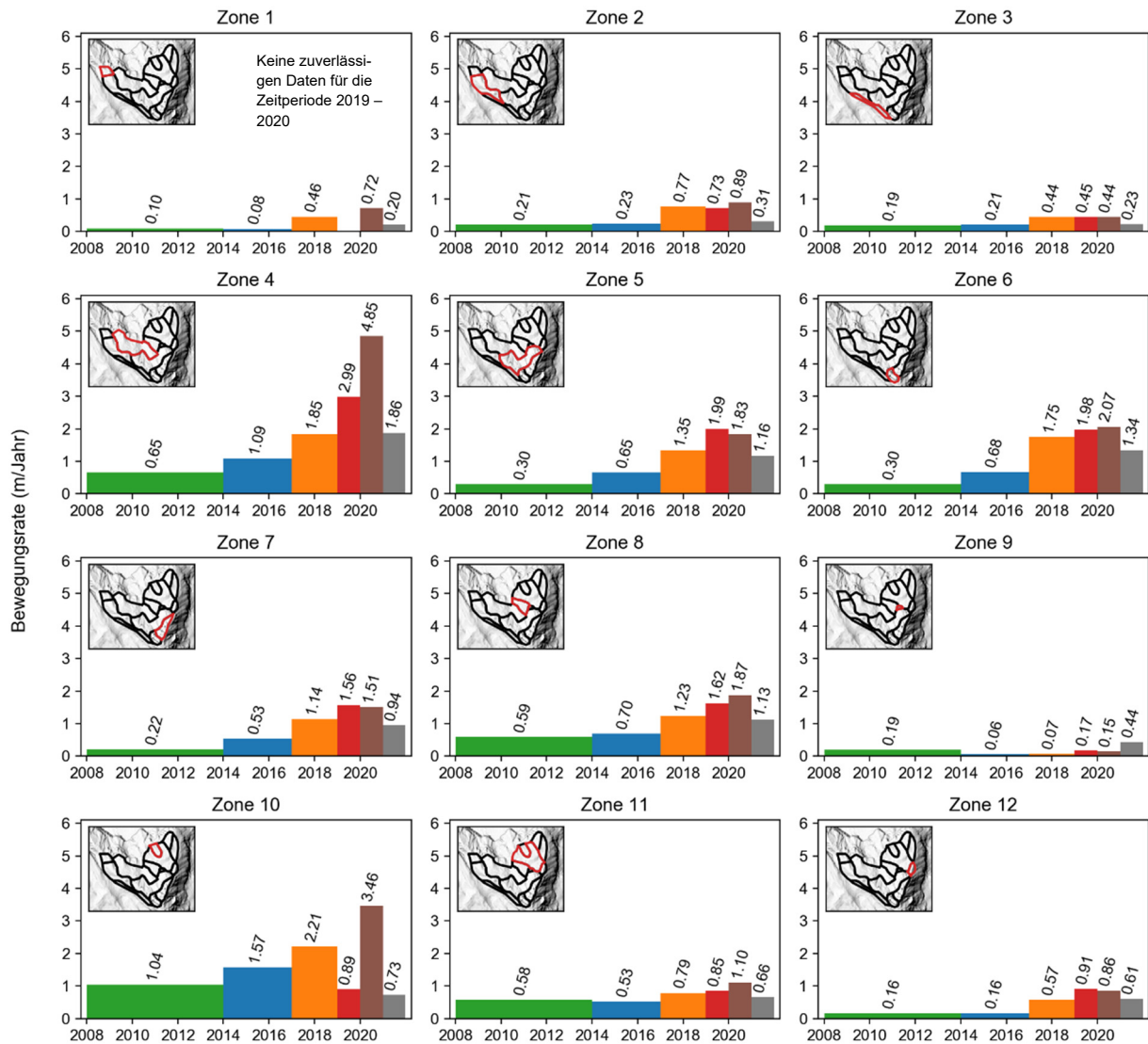


Abbildung 7: Gemittelte jährliche Bewegungsraten für die in [9] definierten Zonen der Rutschung Spitze Stei. Berechnungen wurden für die Perioden 2008 – 2014 (grün), 2014 – 2017 (blau), 2017 – 2019 (orange), 2019 – 2020 (rot), 2020 – 2021 (braun) sowie 2021 – 2022 (grau) durchgeführt. Die Lage der Zonen ist in den Karten dargestellt. Die Bewegungsraten wurden mittels 2D-Feature-Tracking, basierend auf Luftbildern und Höhenmodellen bestimmt. Vgl. [8] und [9] für Informationen zur Methodik.

Ergänzend zu den flächigen Messungen aus den Drohnendaten sind in den Abbildungen 8 und 9 die Punktmessungen der GPS und Reflektoren dargestellt. Zur verbesserten Lesbarkeit wurden die zeitlich hoch aufgelösten Messzeitreihen über fünfjährige Perioden gemittelt. Standorte der GPS und Reflektoren sind in den Übersichtskarten in den Panels zu finden. Ein Foto der Rutschung mit projizierten GPS- und Reflektorstandorten ist zudem in Anhang 1 einzusehen.

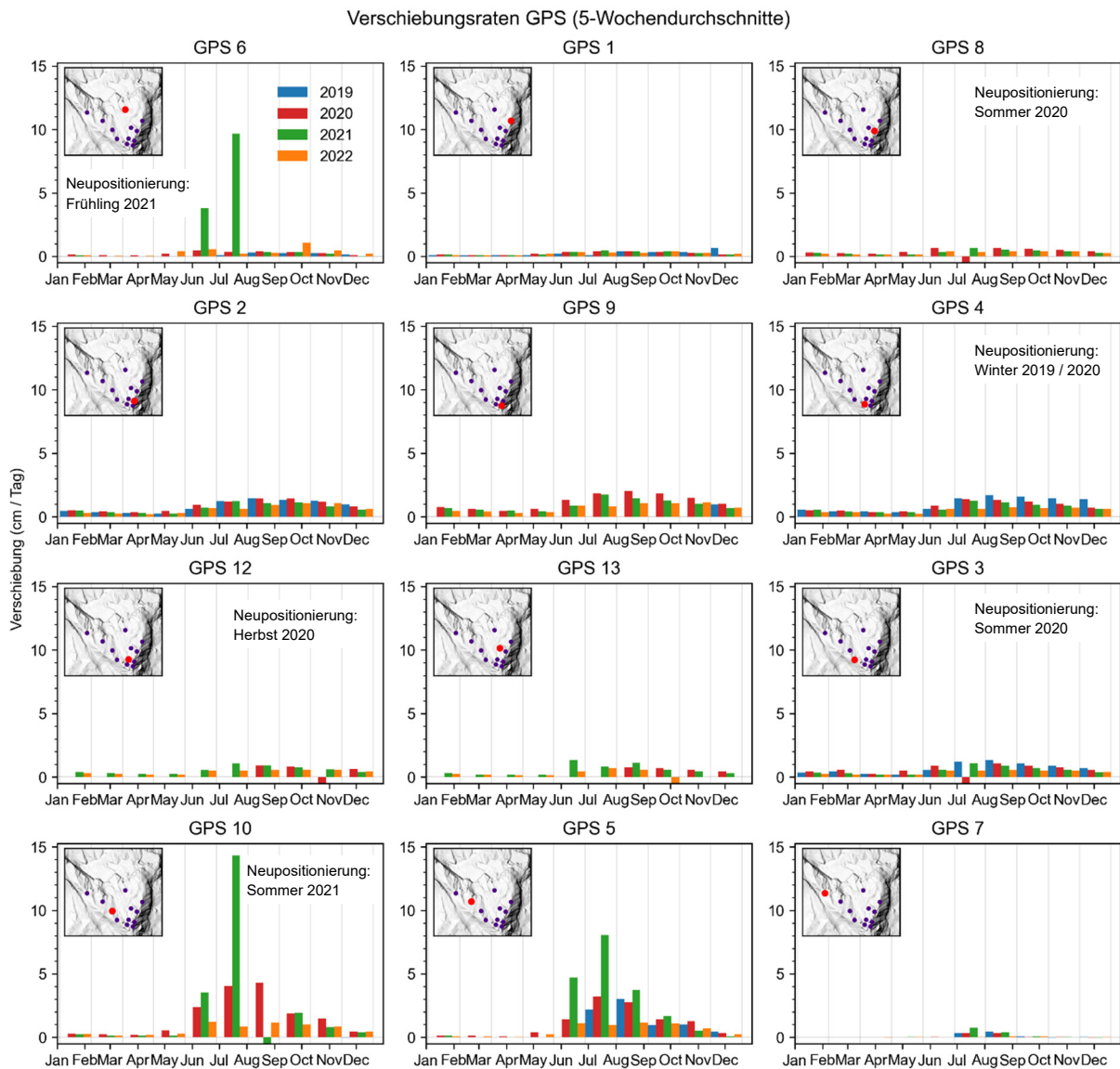


Abbildung 8: 5-wöchentlich gemittelte Verschiebungsraten (3D-Geschwindigkeiten) für die am Spitze Stei installierten GPS. Orange Säulen entsprechen den Messungen des Jahres 2022, grüne, rote und blaue Säulen jenen der Vorjahre 2021 – 2019. Die auf den Karten rot eingezeichneten Punkte entsprechen den GPS-Standorten. Da verschiedene GPS wegen erfolgter bzw. drohender Abstürze verschoben werden mussten, sind die abgebildeten Bewegungsraten oft nicht über den Gesamtzeitraum vergleichbar (vgl. Annotationen in den Panels).

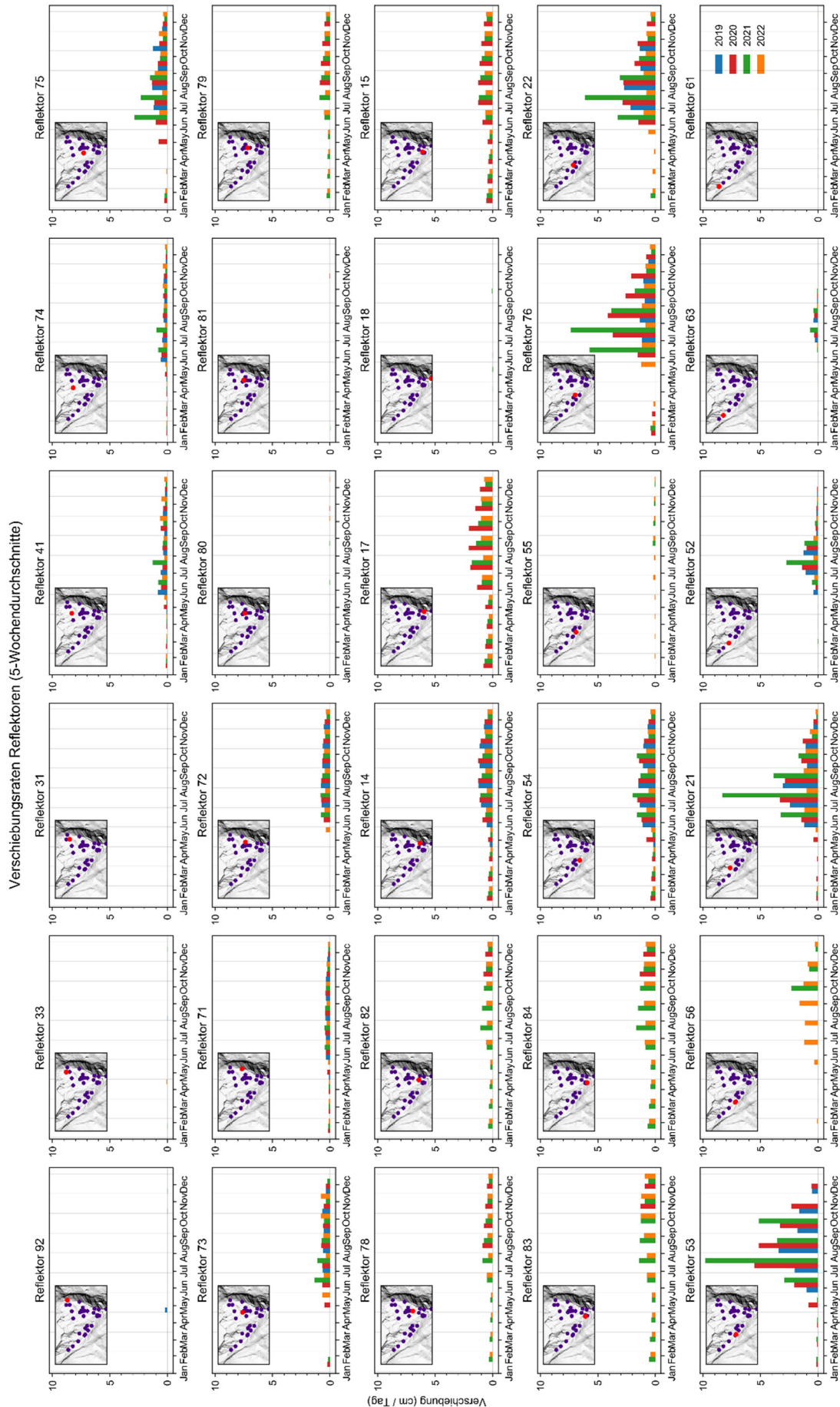


Abbildung 9: 5-wöchentlich gemittelte Verschiebungsdaten (Bewegungskomponente in Sichtrichtung der Totalstation) für die installierten Reflektoren.

Die saisonale Entwicklung der Bewegungsraten folgte 2022 einem ähnlichen Muster wie in den Vorjahren ([7][10]), wenn auch auf tieferem Niveau. Wegen der frühen Ausaperung und entsprechend früher einsetzendem Wassereintrag in den Rutschkörper (vgl. nachfolgendes Kapitel 4), wurde die Frühlingsbeschleunigung bereits Mitte Mai initiiert. Aufgrund schneearmer und gleichzeitig trockener Bedingungen (vgl. vorangegangenes Kapitel) fiel die Beschleunigung in der Folge jedoch unterdurchschnittlich aus, insbesondere im Vergleich zum nassen Vorjahr 2021. Die unterdurchschnittliche Frühjahrsbeschleunigung betraf insbesondere die Bereiche mit sekundären Schuttrutschungen (z.B. in der Westflanke mit GPS 5, 10 in Abbildung 8 bzw. Reflektoren 22, 21 und 76 in Abbildung 9), welche erfahrungsgemäss besonders sensitiv auf veränderte Wassereinträge reagieren.

Anstelle einer deutlichen Frühlingsbeschleunigung kam es in Teilen der Schuttrutschungen erst in der niederschlagsreichen zweiten Septemberhälfte 2022 zu Beschleunigungen. Die Beschleunigungen sind in den 5-wöchig gemittelten Daten in gedämpfter Form erkennbar (z.B. bei GPS 6 in Abbildung 8). Abbildung 13 in Kapitel 5.1 zeigt zudem ein radarbasiertes Bewegungsfeld, das Anfang Oktober im Anschluss an die nasse Periode aufgenommen worden ist. Die flächigen Beschleunigungen im Schutt sind hier klar ersichtlich.

4. Zusammenhang Witterung - Bewegungsraten

Die aktuell laufenden Untersuchungen zu hydrologisch bzw. hydrogeologischen Fragestellungen zeigen ergänzend zu früheren Auswertungen (z.B. [11]), dass Zusammenhänge zwischen Bewegungsraten und einzelnen isolierten Witterungsparametern (z.B. Niederschläge, Lufttemperaturen) nicht signifikant ausfallen. Unter Berücksichtigung mehrerer treibender Parameter (insbesondere Schneeschmelze und Niederschläge) sowie Zwischenschaltung einer bzw. mehrerer Transferfunktionen (lineare Reservoirs) treten jedoch klar signifikante Zusammenhänge zu Tage. Abbildung 10 zeigt als Beispiel den Zusammenhang zwischen den zweiwöchig gemittelten Bewegungsraten von GPS 2 und 12, welche beide im Gipfelbereich der Rutschung installiert sind (vgl. Anhang 1) sowie dem Output eines linearen Reservoirs, das durch modellierte Schmelzwassereinträge und gemessene Niederschläge [5] gespeisen wird.

Das Modell (blaue Linie in Abbildung 10) reproduziert einerseits die frühere Bewegungszunahme im Jahr 2022 im Vergleich zum Jahr 2021 (Mai vs. Juni), andererseits aber auch die generell geringeren Bewegungsraten von 2022 im Vergleich zum Jahr 2021 (vgl. vorangegangenes Kapitel). Im Falle von GPS 12 (orange Säulen) kann das Modell über 85% der Variabilität der gemessenen Bewegungsrate erklären ($r=0.92$).

Im Falle des GPS 2 (magenta Säulen) erklärt das Modell nur rund 70% der Variabilität der gemessenen Bewegungsraten. Dies dürfte mitunter daran liegen, dass GPS 2 auf einem

Block installiert ist, welcher zunehmende Kippbewegung zeigt. Solche witterungsunabhängige Phänomene können durch das Modell nicht reproduziert werden. Vielmehr liegt der Mehrwert des Modelles hier darin, aufzuzeigen, dass Änderungen stattfinden, die mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht witterungsbedingt sind.

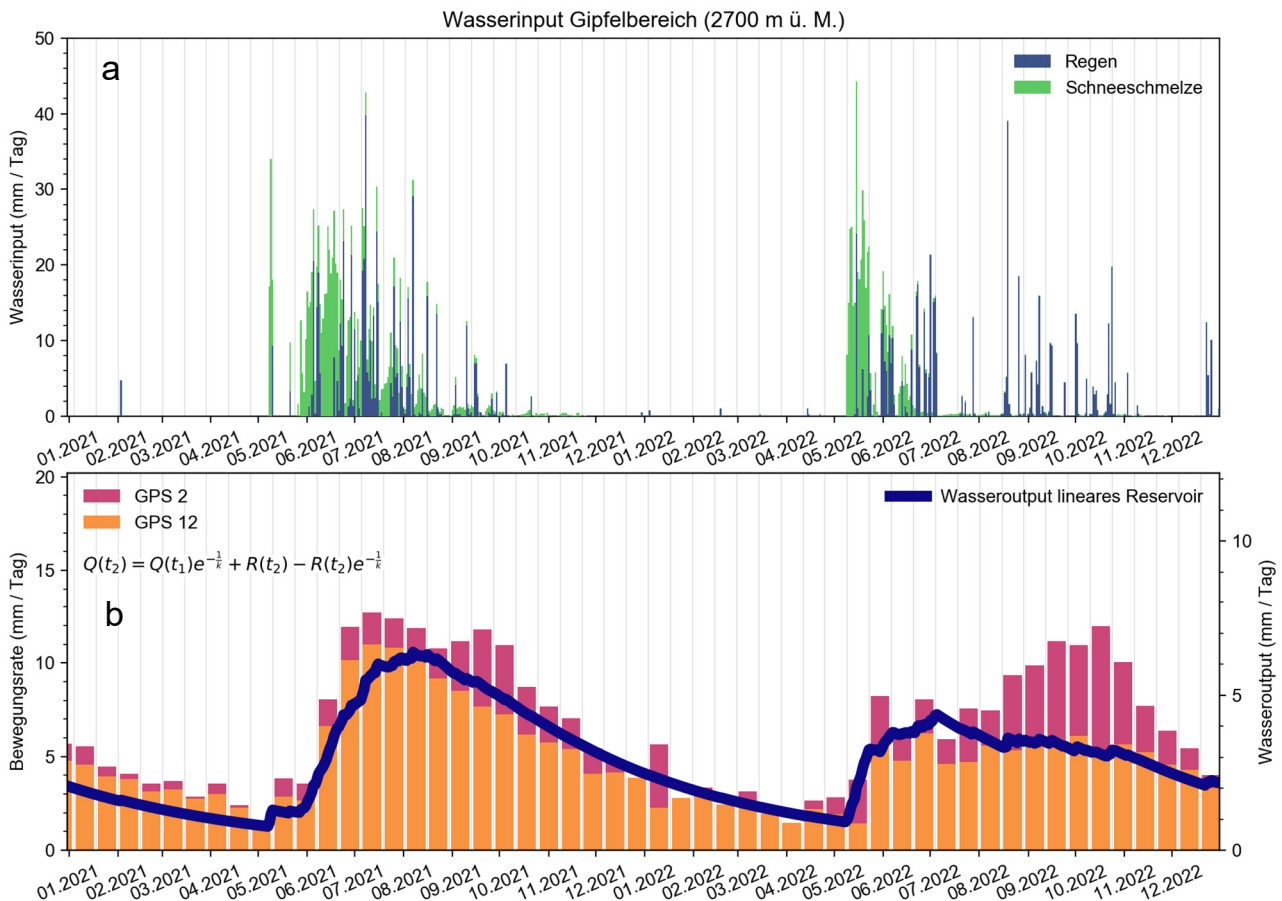


Abbildung 10: (a) Tagessummen modellierter Schneeschmelze (grüne Säulen) und gemessenen Regens (blaue Säulen), welche gemeinsam das lineare Reservoir speisen. (b) Zweiwöchig gemittelte Bewegungsraten für die GPS 2 und 12 im Gipfelbereich der Rutschung (orange und magenta Säulen, linke Ordinate) sowie Wasseroutput des linearen Reservoirs (blaue Linie, rechte Ordinate) für den Zeitraum Januar 2021 – Dezember 2022. Der Wasseroutput des linearen Reservoirs ist ein Proxy für den Wasserstand des Reservoirs bzw. auf die Rutschung übertragen ein Proxy für die Wasserdrücke im Rutschkörper.

Im obigen Beispiel wurde der einfachste Fall, mit Bewegung entlang einer einzigen Gleitfläche [10], modelliert. Im Bereich der Schuttrutschungen, mit mehreren übereinanderliegenden Gleitflächen [10] und komplexeren hydrogeologischen Verhältnissen, konnte eine ähnlich gute Übereinstimmung wie in Abbildung 10 bisher nicht erreicht werden, trotz Nutzung zusätzlicher Reservoirs. Bemühungen zur Verbesserung des Modelles bzw. dessen Kalibration sind weiterhin im Gange (vgl. Kapitel 7).

5. Sturz- und Rutschaktivität

Trotz verringerter Bewegungsraten (Kapitel 3) kam es 2022 zu zahlreichen Sturz- und Rutschereignissen. Während die grösseren Ereignisse Kubaturen von einigen 1000 m³ erreichten, blieben viele Ereignisse mit Kubaturen von einigen 10er bis 100er m³ klein bis sehr klein.

In den Abbildungen 11 und 12 sind die Abbruchkubaturen der Sommersaison 2022 dargestellt, abgeleitet aus Vergleichen der vier erhobenen Drohnenhöhenmodelle. Abgedeckt sind die Zeiträume 25. Juni bis 12. August (48 Tage), 12. August bis 11. September (30 Tage) sowie 11. September bis 12. Oktober (31 Tage).

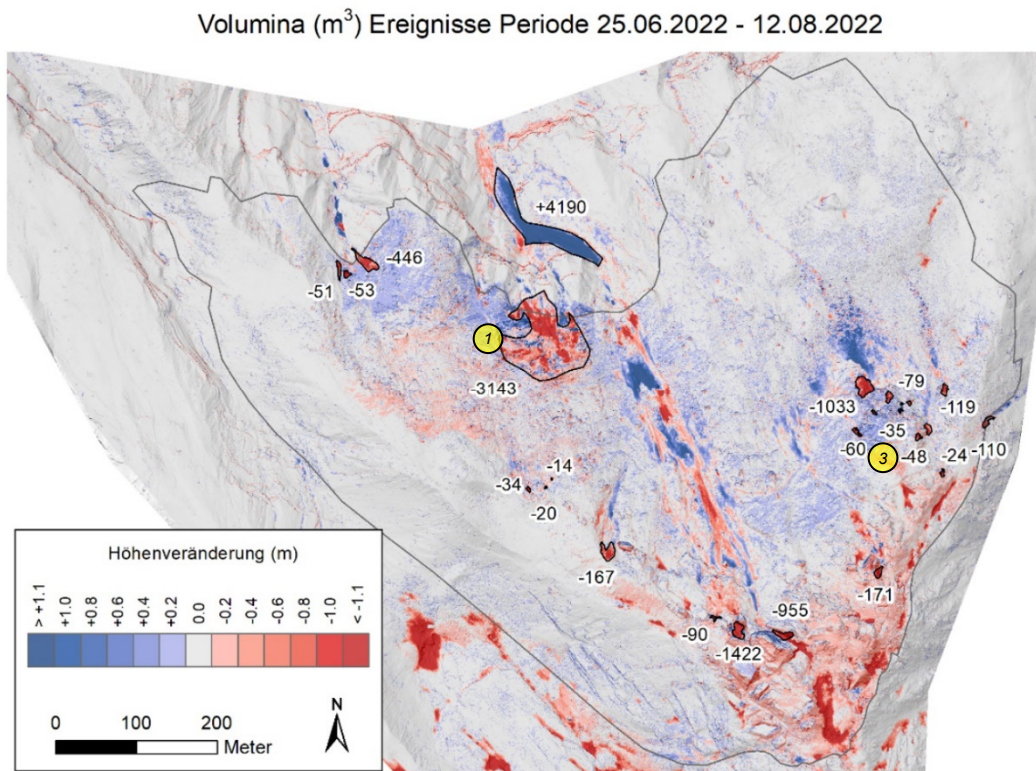


Abbildung 11: Höhenveränderungen Rutschung Spitze Stei über die 48-Tage Periode 25. Juni bis 12. August 2022. Rottöne zeigen Bereiche, in welchen das Gelände beim zweiten Drohnenflug tiefer lag als beim ersten (Materialverluste aufgrund plötzlicher Sturz- oder Rutschprozesse oder kontinuierlicher Rutschbewegungen). Blautöne zeigen Bereiche, in welchen das Gelände bei der Zweitmessung höher lag (Materialakkumulation aufgrund Sturz- oder Rutschprozesse oder kontinuierlicher Rutschbewegungen). Höhenveränderungen ± 10 cm sind grau eingefärbt. Schwarze Umrandungen roter Flächen identifizieren Abbruchgebiete; die entsprechenden Absturzkubaturen (m³) sind annotiert. Schwarze Umrandungen blauer Flächen identifizieren ausgewählte Akkumulationsgebiete. Im Gipfelbereich sowie unterhalb des Doldenhorngletschers lag am 25. Juni in Muldenlagen noch verbreitet Schnee. Die Schneeschmelze führte zu Höhenverlusten, welche nicht auf Sturz- oder Rutschereignisse zurückzuführen sind (dunkelrote Flächen ohne schwarze Umrandung).

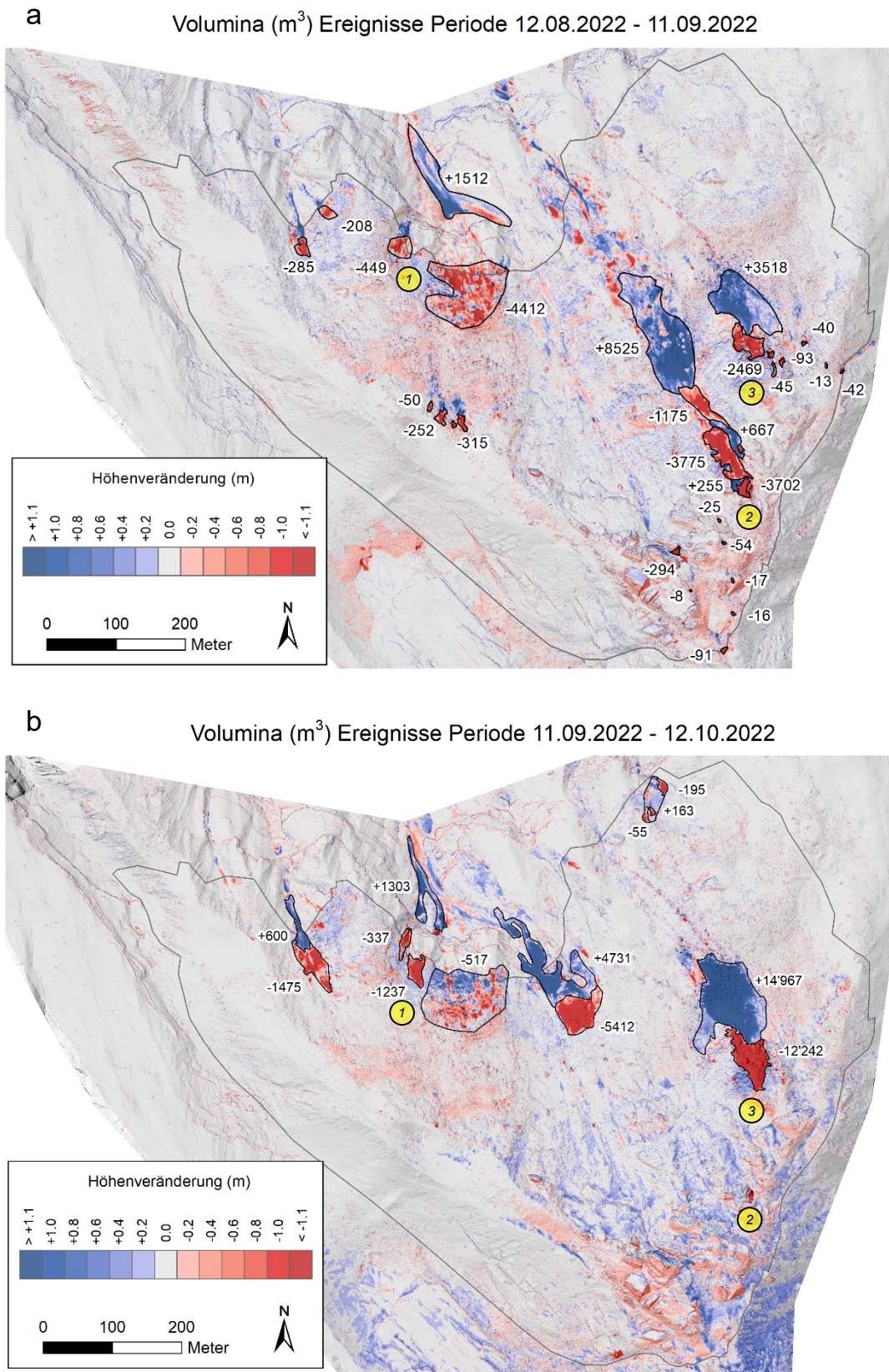


Abbildung 12: Höhenveränderungen für die Perioden (a) 12. August bis 11. September (30 Tage) sowie (b) 11. September bis 12. Oktober (31 Tage). Am 12. Oktober lag etwas Neuschnee in hohen und schattigen Lagen, was leicht positive Höhenveränderungen (blaue Flächen) im südöstlichen Teil der Abbildung b erklärt.

Die grösseren Ereignisse entstammten einerseits dem Frontbereich der Schuttrutschungen (Annotationen 1 in Abbildungen 11 und 12), wo Schuttmaterial durch die Rutschbewegung laufend zur Felskante oberhalb der Chalberspissibäche geschoben wird. Andererseits gab es 2022 grössere Abstürze aus zwei Felsbereichen am bzw. unterhalb des Ostgrates (Annotationen 2 und 3 in Abbildung 12).

5.1 Abbrüche Schuttrutschungen

Aufgrund der reduzierten Aktivität der Schuttrutschungen (Kapitel 3) war auch die Abbruchaktivität aus deren Frontbereichen etwas geringer. Während des Sommers wurden weniger als 20'000 m³ Material ausgetragen, verteilt auf mehrere Einzelereignisse. Rund 5'000 m³ davon wurden im flachen Felsbereich unterhalb der Rutschung abgelagert und gelangten somit noch nicht in die Gerinne der Chalberspissibäche. Die reduzierten Geschiebeeinträge, zusammen mit der trockenen Witterung und geringen Schneeablagerungen im Gerinne im Frühling, erklären die verringerte Gerinnemurgangaktivität im Vergleich zum Vorjahr (vgl. tabellarische Auflistung sämtlicher Ereignisse in Anhang 5). Im Vorjahr wurden noch rund 30'000 m³ Schutt aus der Rutschung ins Gerinne eingetragen [12].

Die grösseren Abstürze aus den Frontbereichen der Schuttrutschungen kündigten sich auch 2022 durch Beschleunigungen an, welche in den Bewegungsmessungen des interferometrischen Radars Rosshubel erkennbar waren. 2022 zeigte sich zudem erneut, dass sich die frontalen Bereiche der Schuttrutschungen nach Abgleiten der übersteilten Schuttpakete wieder beruhigen. Ein Zurückgreifen der Beschleunigungen in weiter hangaufwärts gelegene Schuttbereiche, mit anschliessenden weiteren Abstürzen, wurde weiterhin nicht beobachtet.

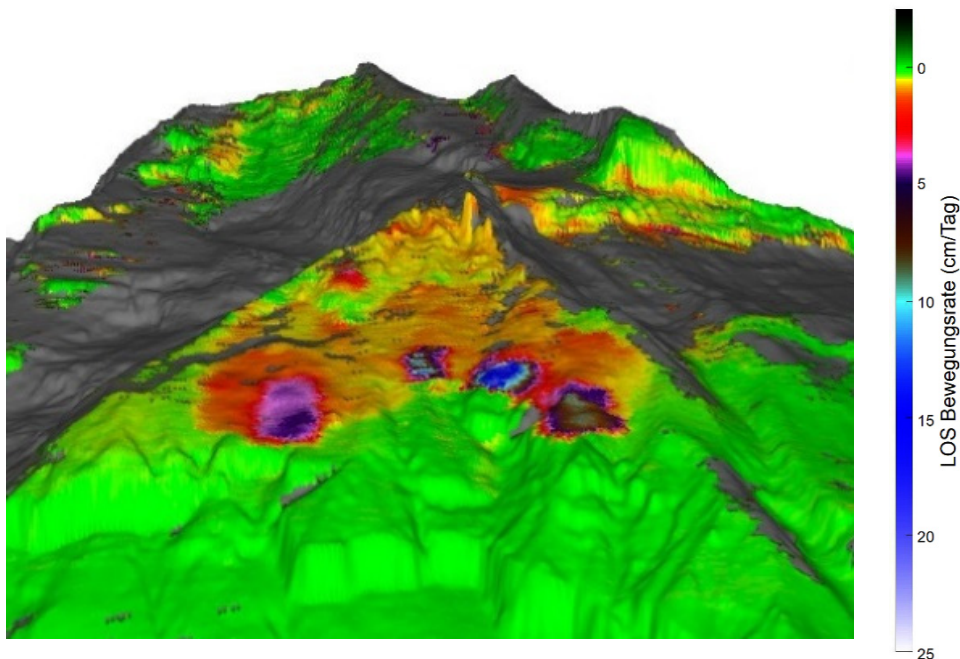


Abbildung 13: Line-of-Sight (LOS) Bewegungsraten vom 04. Oktober 2022, gemessen mit dem interferometrischen Radar Rosshubel nach zweiwöchiger, niederschlagsreicher Phase. Deutlich erkennbar sind die beschleunigten Frontbereiche der Schuttrutschungen.

5.2 Sturzereignisse Mittlerer Ostgrat

Aus dem mittleren Ostgrat (Annotation 2 in Abbildung 12) gab es je ein Sturzereignis am 23. August und am 14. Oktober. Verstärktes Gleiten bzw. Kippen des später abgestürzten Felspaketes (rot umkreister Bereich in Abbildung 14) kündigte den Absturz bereits in den Drohendaten des Frühsommers 2022 an (Vergleich Daten 25. Juni und 12. August).

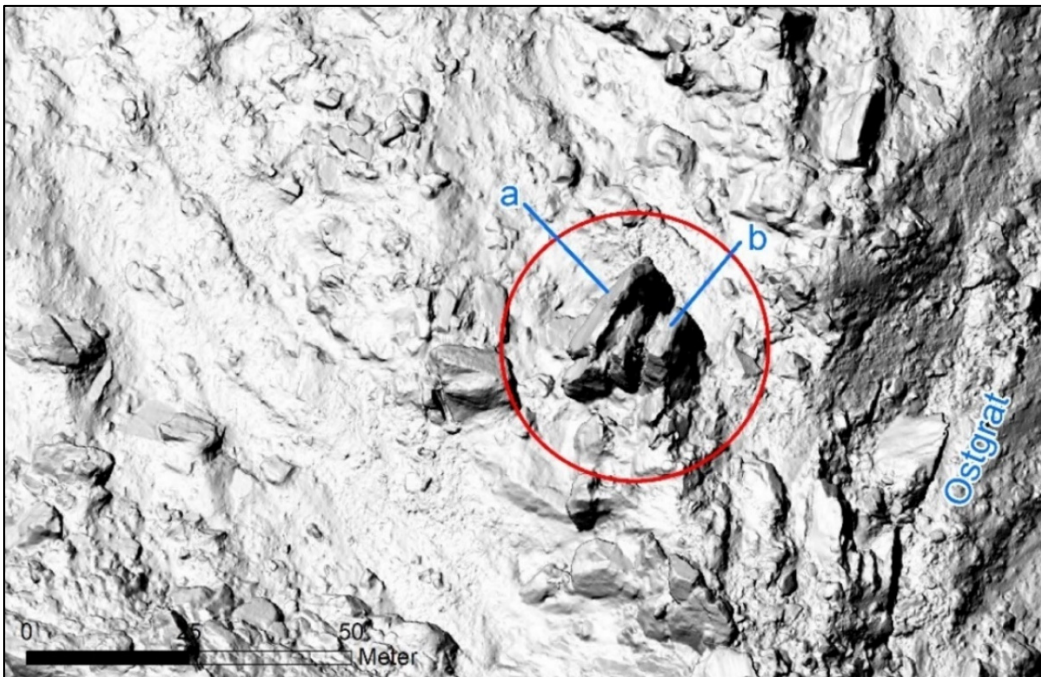


Abbildung 14: Drohnenterrainmodell vom 12. August 2022. Das mit *a* annotierte Felspaket stürzte am 23. August 2022 ab. Der mit *b* annotierte Felspfeiler blieb zunächst stehen, kippte weiter und kollabierte schliesslich am 14. Oktober 2022. 50 m-Massstab unten links.

Dem Absturz vom 23. August ging eine mehrtägige Beschleunigung voraus, die sich in den interferometrischen Radarmessungen manifestierte (Abbildung 15a). Beim Ereignis stürzte der vordere Teil des Felspakets, mit einer Kubatur von gut 4'000 m³, ab (Annotation *a* in Abbildung 14). Beim Absturz über die rund 150 m hohe Felswand wurden weitere gut 4'000 m³ Fels mobilisiert (Abbildung 12a). Der Grossteil des Sturzmaterials (8'500 m³, inkl. Auflockerung, Abbildung 12a) wurde im östlichen Bereich der Schuttrutschung Zentrum abgelagert. Weiteres Material gelangte über die Felskante unterhalb der Rutschung Spitze Stei hinaus und wurde schliesslich im Gebiet Holzspicher, innerhalb der dauerhaften Sperrzone, abgelagert. Der Absturz führte wegen der ausgeprägten Trockenheit zu einer starken Staubentwicklung.

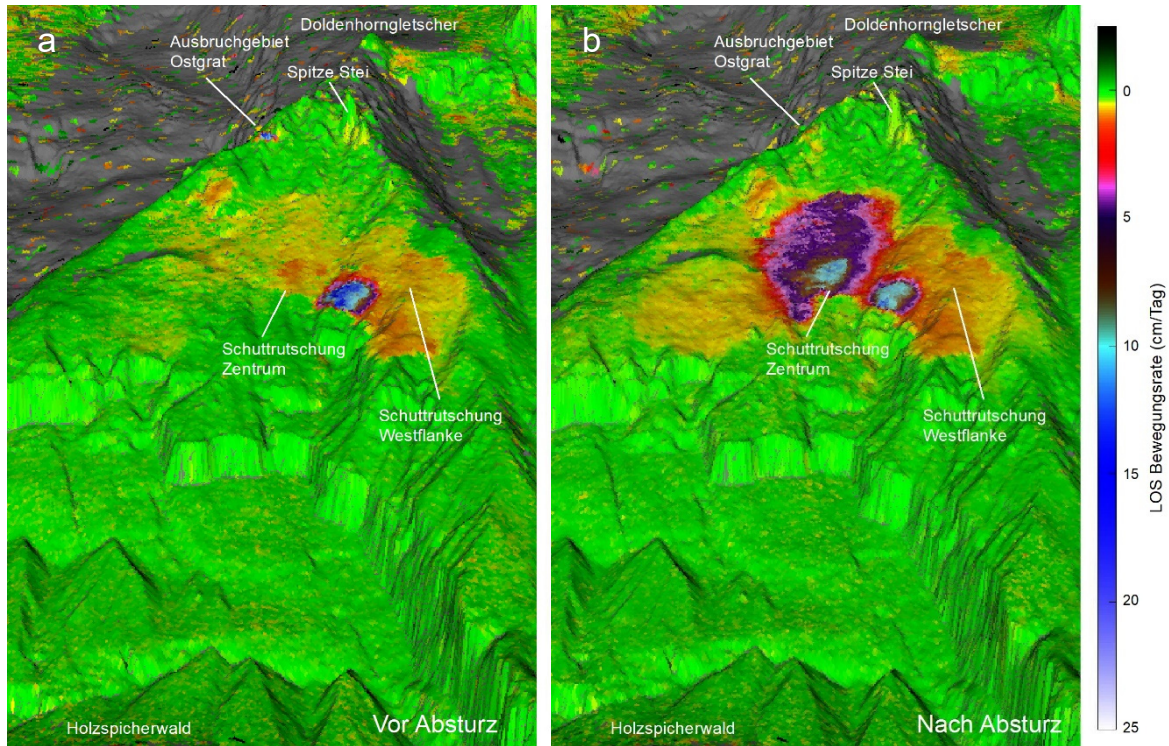


Abbildung 15: Line-of-Sight (LOS) Bewegungsraten gemessen mit dem interferometrischen Radar Rosshubel (a) vor und (b) nach Absturz des Felspaketes aus dem Bereich Ostgrat. Der beschleunigte Felsbereich ist in (a) als kleine blaue Fläche erkennbar.

Aufprall und Ablagerung des Sturzmaterials im Bereich der Schuttrutschung Zentrum führten zu einer abrupten Beschleunigung des labil gelagerten Schuttkörpers ([7][8]). Während die Bewegungsraten vor dem Absturz noch um 1 cm pro Tag lagen (Abbildung 15a), nahmen sie nach dem Absturz auf stellenweise über 20 cm pro Tag zu (Abbildung 15b). Auch Bereiche deutlich ausserhalb der Sturzablagerungen waren von der Beschleunigung betroffen. Nennenswerte Abstürze aus der beschleunigten Schuttrutschung blieben jedoch aus. In den Folgetagen zeigten die Radarmessungen abnehmende Bewegungsraten und bis zum 26. August (drei Tage nach Sturzereignis) lagen die Bewegungsraten wieder in der Grössenordnung von vor der Beschleunigung.

Im Ausbruchgebiet am Ostgrat kippte der verbliebene, über 20 m hohe Felspfeiler weiter und stürzte 50 Tage später, am 14. Oktober 2022, ab. Der bevorstehende Absturz des Pfeilers (Kubatur knapp 1000 m³) zeigte sich wiederum mit Vorlauf in den Drohnen- und Radardaten (der rote Bereich in Abbildung 12b, Annotation 2, ist das Resultat der Kippbewegung des Pfeilers). Da das zweite Sturzereignis zwei Tage nach dem letzten Drohnenflug der Saison 2022 eintrat (12. Oktober vs. 14. Oktober), ist die Sturzkubatur mitsamt Materialmobilisierung im Transitbereich noch nicht abschliessend bestimmt. Die Gesamtkubatur war jedoch deutlich kleiner als beim Ereignis vom 23. August. Dies dürfte mitunter ein Grund dafür

sein, dass beim Ereignis vom 14. Oktober keine nennenswerte Beschleunigung der Schuttrutschung eintrat.

5.3 Sturzereignisse aus sekundärer Felsrutschung unterhalb Ostgrat

Bereits 2021 wurde die Beschleunigung einer sekundären Felsrutschung unterhalb des Ostgrates festgestellt. 3D-Modellierungen ergaben eine Gesamtkubatur des betreffenden Rutschkörpers von rund 70'000 m³ (hellgrünes Kompartiment in Abbildung 16). Die Bewegungen des Felsbereiches nahmen 2022 weiter zu. Der Perimeter der sekundären Felsrutschung war damit einer der wenigen Bereiche der Gesamtrutschung, welche 2022 im Vergleich zum Vorjahr keine Bewegungsabnahme aufwies (Annotation 4 in Abbildung 6b).

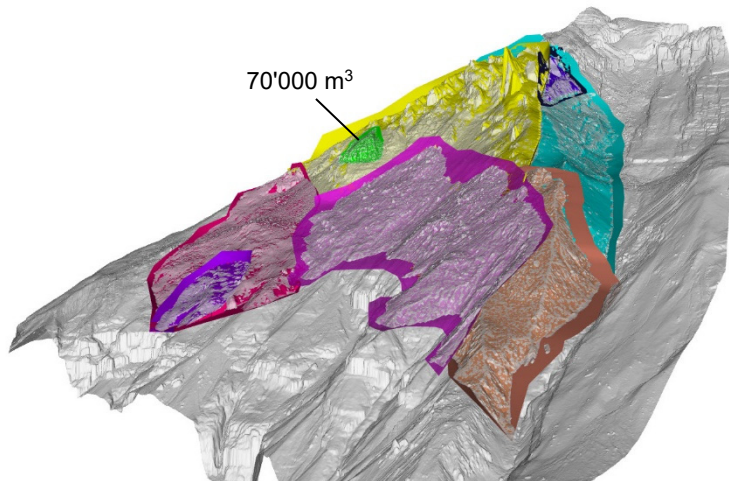


Abbildung 16: 3D-Modell der fünf Hauptkompartimente der Rutschung Spitze Stei (Stand 2021), überlagert von drei sekundären Kompartimenten. Beim hellgrünen Kompartiment handelt es sich um die beschleunigende sekundäre Felsrutschung, aus deren Frontbereich 2022 vermehrt Material abstürzte. Abbildung aus [10].

Aus dem Frontbereich der sekundären Felsrutschung gab es bereits im Früh- und Hochsommer kleinere Felsabbrüche mit Kubaturen von einigen 10er bis 100er m³ (Annotation 3 in Abbildungen 11 und 12a). Aus dem zunehmend schneller bewegenden Felsbereich (Bewegungsraten bis zu 3 cm pro Tag im September) kam es insbesondere im Herbst wiederholt zu Abbrüchen. Zwischen Mitte September und Mitte Oktober 2022 stürzten verteilt auf mehrere Sturzereignisse gesamthaft über 12'000 m³ Fels ab (Annotation 3 in Abbildung 12b). Das grösste Einzelereignis ereignete sich in der Nacht vom 26. auf den 27. September. Radardaten vor dem Absturz zeigten in der Ausbruchsnische Bewegungsraten von über 10 cm pro Tag (Abbildung 17).

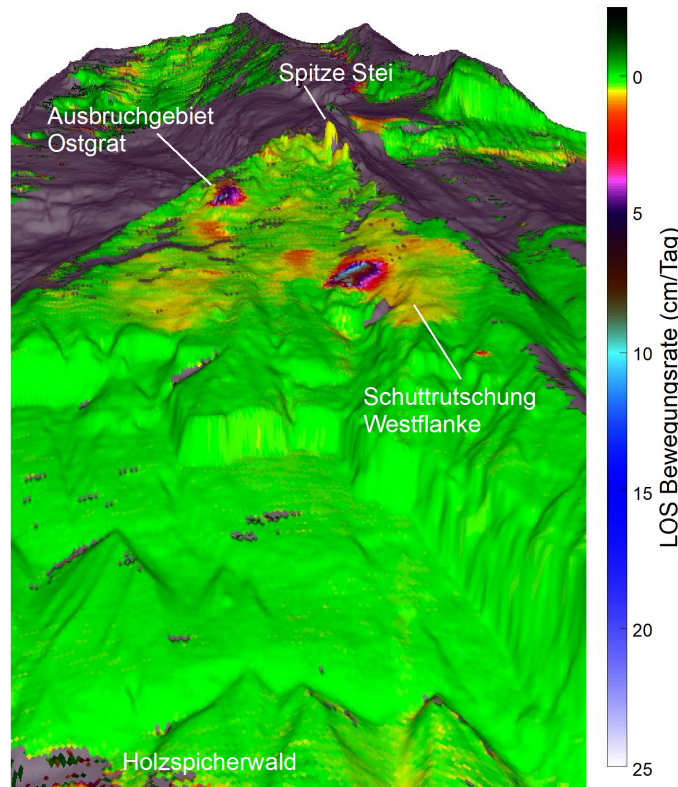


Abbildung 17: Line-of-Sight (LOS) Geschwindigkeitsmessung des interferometrischen Radars vom 26. September 2022. Die Messung zeigt die den Abbrüchen vorangehende Beschleunigung auf mehr als 10 cm pro Tag im Frontbereich der sekundären Felsrutschung.

Bei den Abstürzen Ende September wurde im Transitbereich zusätzliches Material mobilisiert (Abbildung 18). Abgelagert wurde das Material im flacheren Schuttbereich ab Höhe des verschütteten Reflektors 81. Grössere Blöcke gelangten rollend und springend über den Rutschperimeter hinaus bis hinunter in den Bereich Holzspicher. Trajektorien solcher Blöcke sind in den Terrainvergleichen in Abbildung 12 erkennbar (rot-blaue Musterabfolgen).

Die Bewegungen der sekundären Felsrutschung nahmen mit dem Wintereinbruch ab, infolgedessen verringerte sich auch die Sturzaktivität. Weiteres Material dürfte bei zukünftigen Ereignissen abstürzen, insbesondere nach der Frühlingsbeschleunigung 2023. Von den abgeschätzten 70'000 m³ der Felsrutschung wurden bis anhin weniger als 20% mobilisiert.

Bei den bisherigen Ereignissen stürzten jeweils die frontalen Bereiche der sekundären Felsrutschung ab (Ableiten und teilweise Kippen freigelegter Blöcke, Abbildung 18). Der stark zerrüttete Zustand des Felskörpers legt nahe, dass solch paketweisen Abstürze auch zukünftig am wahrscheinlichsten sind.



Abbildung 18: Aufnahme des Frontbereiches der sekundären Felsrutschung (Annotation 1) nach den Sturzereignissen von Ende September 2022 (Aufnahmedatum 04. Oktober). Rot gestrichelt angedeutet ist die Gleitfläche der Felsrutschung. In der Transitzone unterhalb des Ausbruchgebietes (Annotation 2) wurde weiteres Material mobilisiert. Annotation 3 markiert den Standort des bisher unbeschädigten Reflektor 72. Reflektor 81, bei Annotation 4 ausserhalb der Aufnahme gelegen, wurde bei den Abstürzen verschüttet. Die durch die Aufnahme abgedeckte Terrain-Höhendifferenz im Vordergrund entspricht gut 100 m.

6. Kinematische Datenerhebungen und Auswertungen

Zur Generierung verbesserter kinematischer Grundlagedaten wurde die Prozessierung der Drohnendaten optimiert (vgl. Einführung). Mit den verbesserten Daten sollte unter anderem der Rutschperimeter abschliessend definiert werden. So konnte bis anhin noch nicht abschliessend geklärt werden, ob die Bereiche östlich und westlich des Kretenverlaufes Gipfel – Reflektor 18 – Pt. 2974 m (rot gepunktete Linie in Abbildung 19, Annotationen 1 und 2) stabil sind oder möglicherweise geringe Bewegungen aufweisen. Infolge Terrainabschattung können die beiden Bereiche mit dem terrestrischen Laserscanner vom Messstandort Ross-hubel nicht eingemessen werden, womit die entsprechenden Messzeitreihen seit 2018 nicht zur Verfügung stehen. Lokale interferometrische Radarmessungen im Jahr 2020 [8] ergaben keine Hinweise auf grossflächige Bewegungen unterhalb des Ostgrates (Annotation 1 in Abbildung 19). Hinweise auf Bewegungen gab es jedoch für den Bereich westlich des Grates (Annotation 2). Da mit dem Radar nur die Bewegungskomponente in Sichtrichtung (LOS) des Sensors erfasst wird, waren abschliessende Aussagen zu den absoluten Bewegungsbeträgen und -richtungen nicht möglich [8].

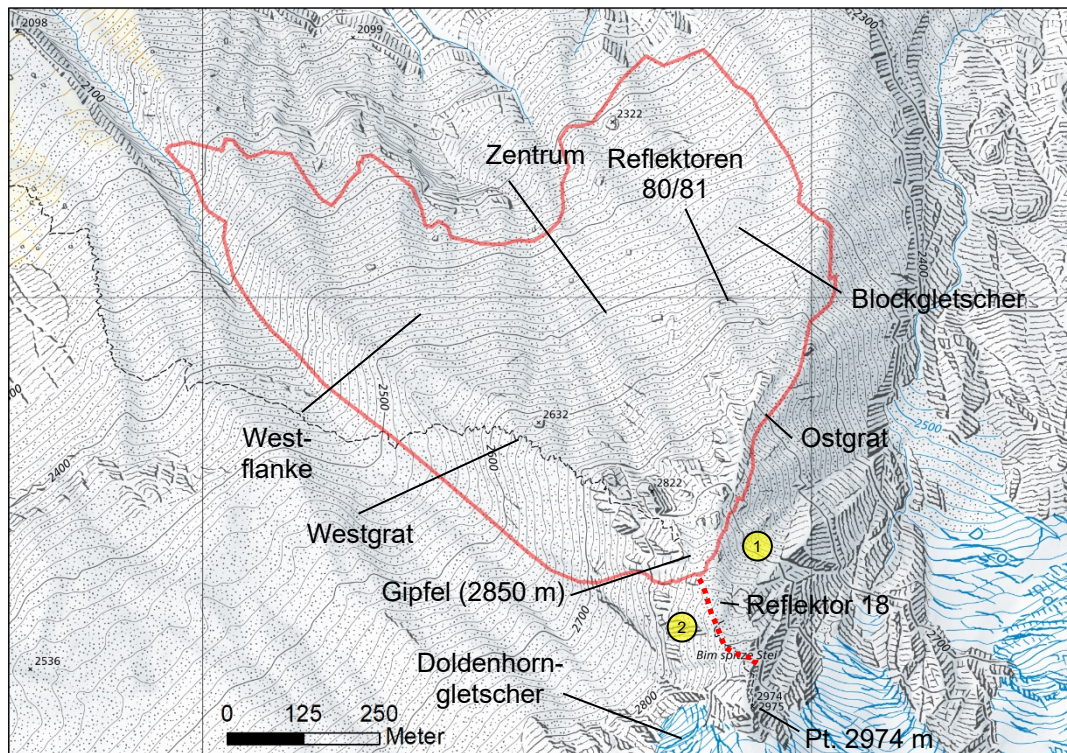


Abbildung 19: Karte Spitze Stei mit dem per Ende 2021 ausgeschiedenem Rutschperimeter (rote Linie) und annotierten Örtlichkeiten. Die rot gestrichelte Linie entspricht dem Verlauf der Krite Gipfel – Reflektor 18 – Pt. 2974 m.

Tabelle 1: Daten der Drohnenbefliegungen 2021 und 2022. Für die Berechnung der Bewegungsfelder werden Daten über jährliche Zeiträume verglichen (verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis). Vergleiche zwischen den Drohnen Daten desselben Jahres dienen als Grundlage für Sturzvorhersagen sowie die Quantifizierung von Sturzkubaturen nach Ereignissen (vgl. Kapitel 5).

Periode	Befliegungen 2021	Befliegungen 2022	Zeitdifferenz (Tage)
1	20.07.2021	25.06.2022	340
2	13.08.2021	12.08.2022	364
3	08.09.2021	11.09.2022	368
4	01.10.2021	12.10.2022	376

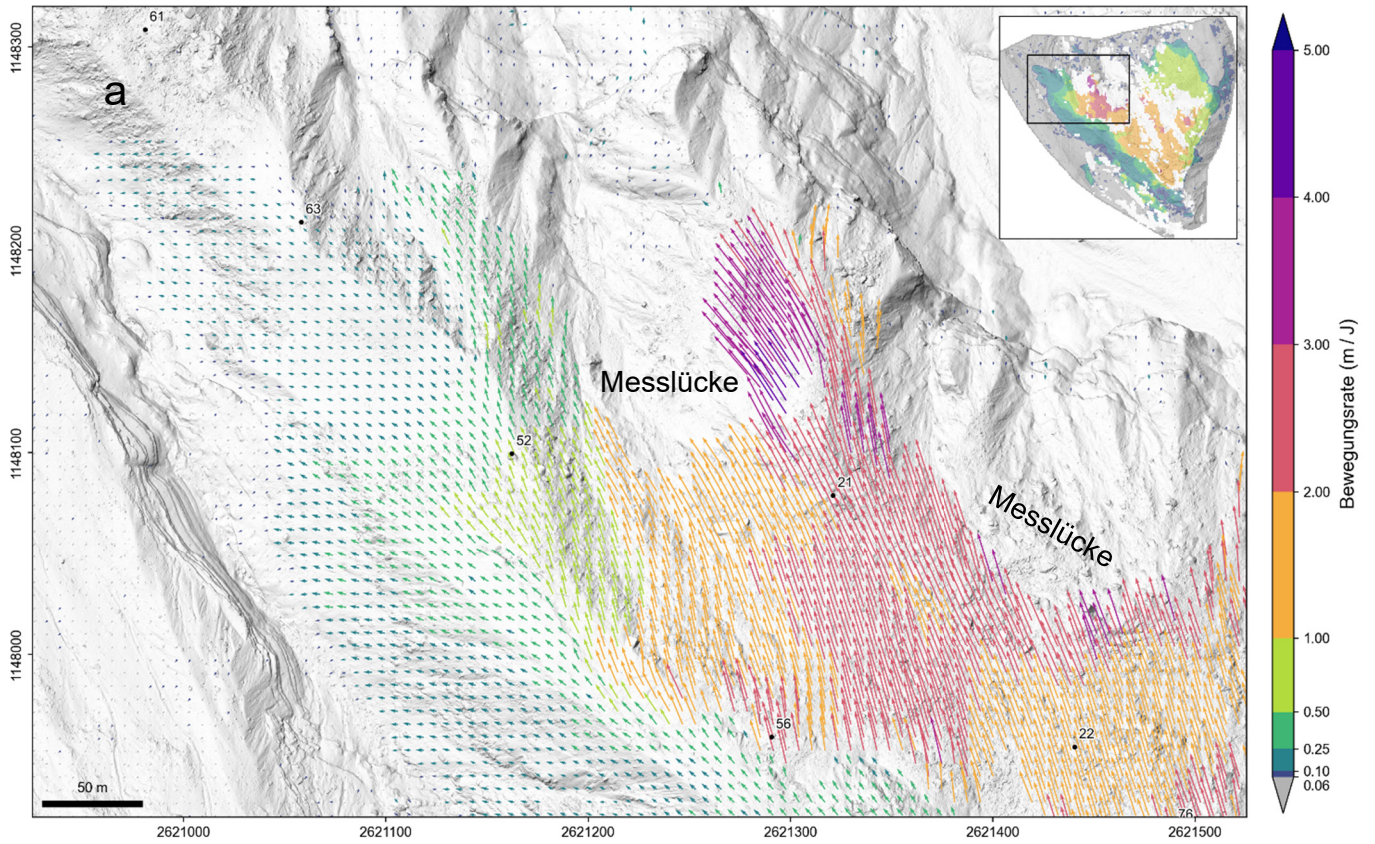
Zur Bestimmung möglicher Bewegungen in den peripheren Gebieten wurden zunächst vier unabhängige Bewegungsfelder generiert, dies für die in Tabelle 1 definierten, ca. ein Jahr langen Perioden 1–4. Um die Genauigkeit des zu interpretierenden Bewegungsfeldes zu erhöhen, wurden die vier unabhängigen Felder auf einjährige Perioden skaliert und danach gemittelt. Das gemittelte Bewegungsfeld ist in Abbildung 20 dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit des Vektorfeldes wurde der Perimeter der Gesamtrutschung in fünf Bereiche aufgeteilt, die in der Abbildung mit individuellen Panels (a–e) dargestellt sind.

Aus den neu erhobenen Daten kann geschlossen werden, dass im Felsbereich unterhalb des Ostgrates (Annotation 1 in Panel c, Abbildung 20) aktuell keine signifikanten, grossflächigen Bewegungen auftreten, in Übereinstimmung mit den Radarmessungen von 2020. Die bisherige Begrenzung der Rutschung bleibt im entsprechenden Bereich also gültig.

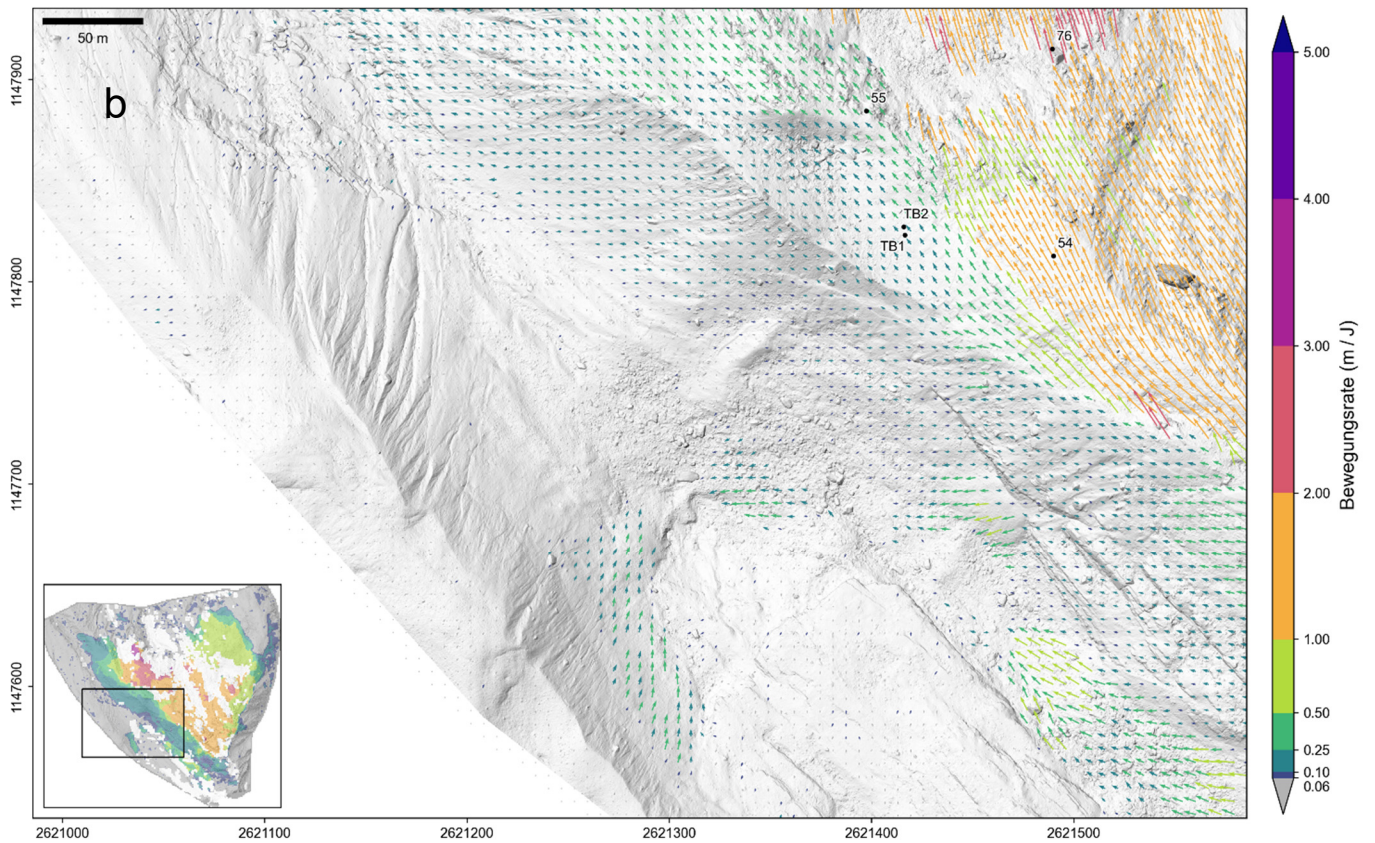
Im Felsbereich westlich der Linie Gipfel – Reflektor 18 – Pt. 2974 m (Annotation 2 in Panel c in Abbildung 20) zeigen die neuen Messungen hingegen signifikante Verschiebungen in Richtung Nordwest. Die Verschiebungen erreichen westlich des Reflektors 18 Beträge von über 10 cm pro Jahr (nur Horizontalkomponente). Die Begrenzung der Rutschung wurde in diesem Bereich entsprechend angepasst. Die Kubatur des neu berücksichtigten Kompartimentes (grün in Abbildung 21) beträgt gemäss 3D-Modellierungen rund 0.7 Mio. m³, womit sich die von [10] aktualisierte Gesamtkubatur der Rutschung Spitze Stei auf 18.3 Mio. m³ erhöht.

Die Begrenzung der Rutschung wurde auch entlang der restlichen Abschnitte überprüft. Es zeigte sich dabei nur lokal Korrekturbedarf.

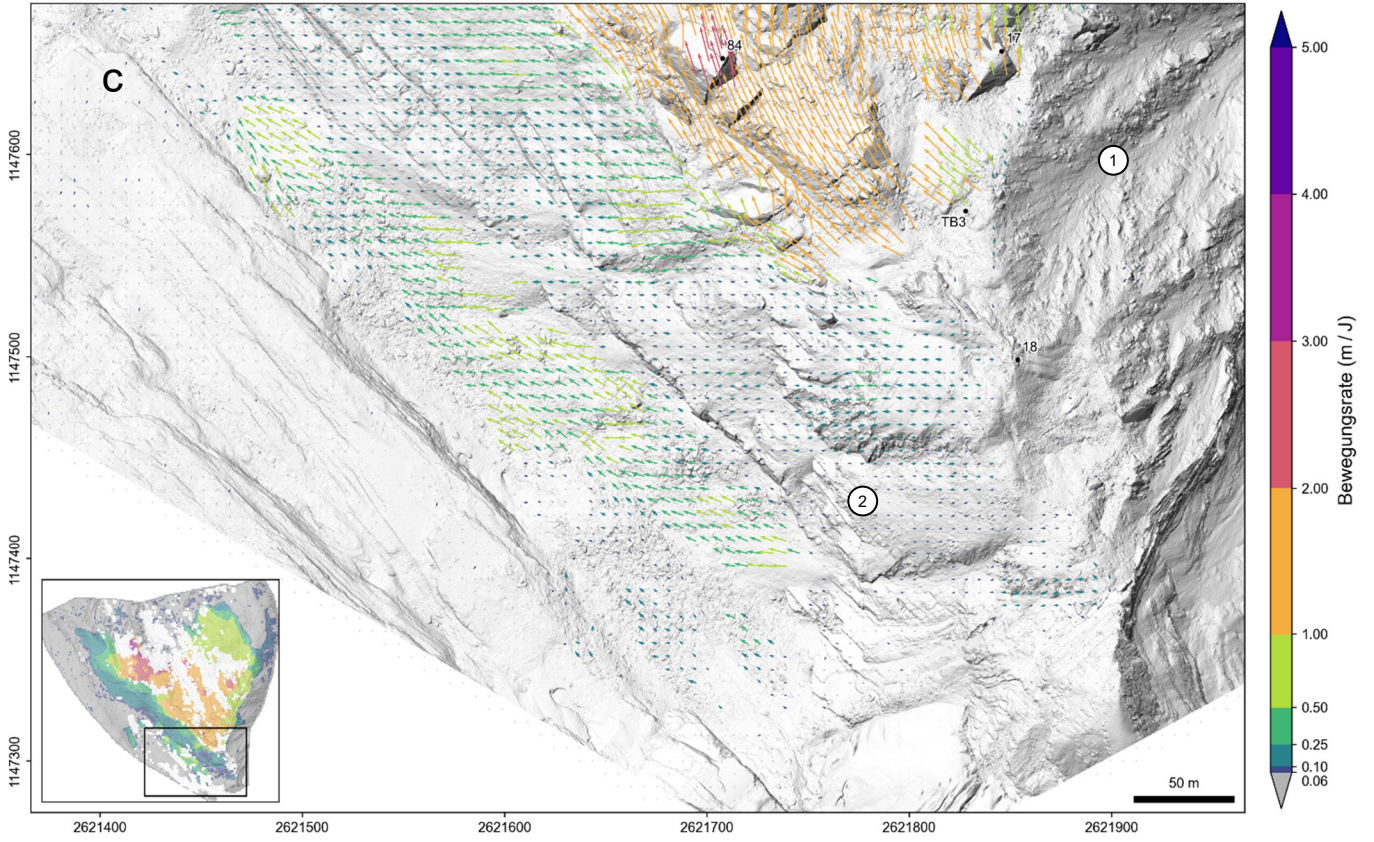
Mittel 2021 - 2022 (min. 3 Messwerte)



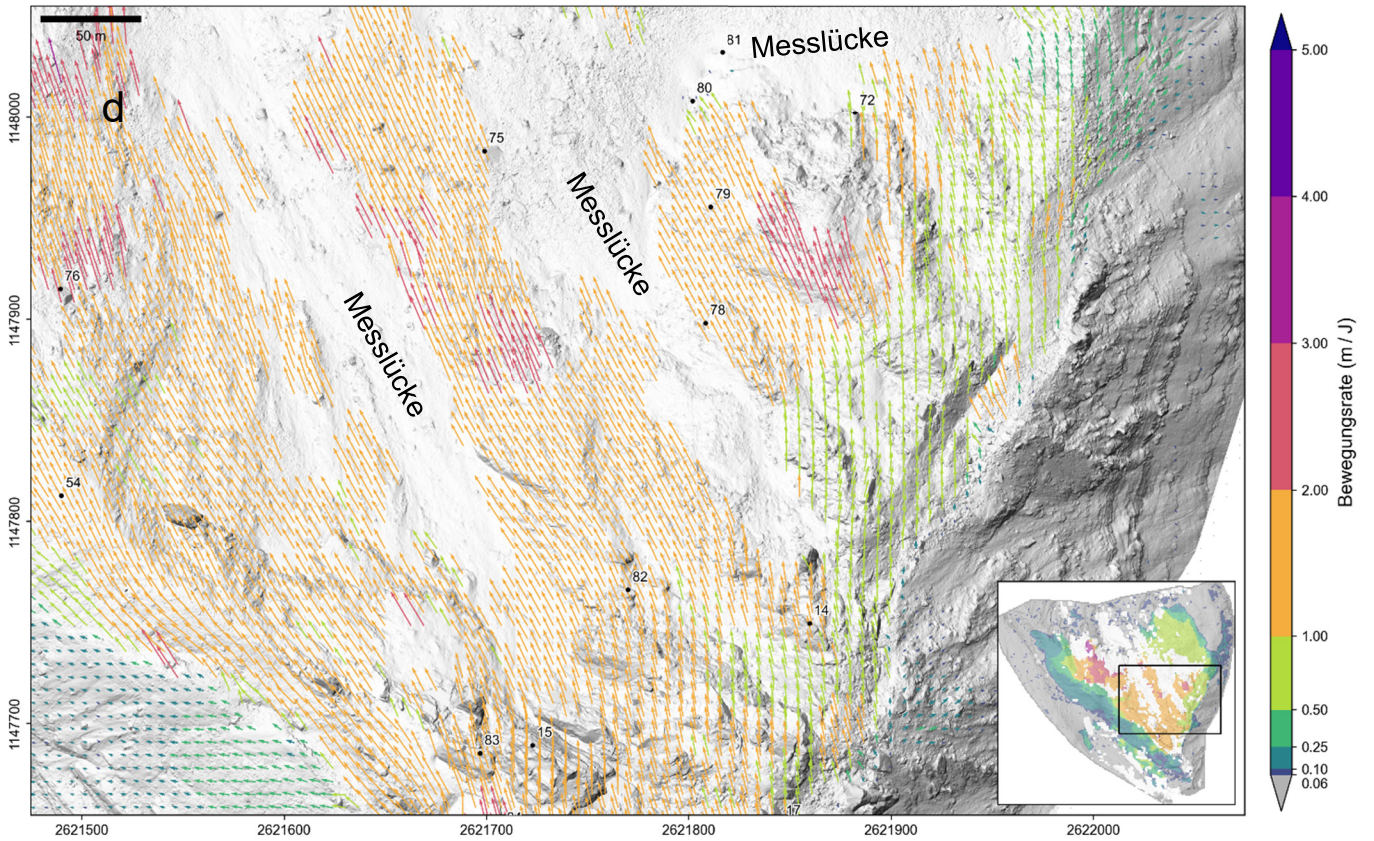
Mittel 2021 - 2022 (min. 3 Messwerte)



Mittel 2021 - 2022 (min. 3 Messwerte)



Mittel 2021 - 2022 (min. 3 Messwerte)



Mittel 2021 - 2022 (min. 3 Messwerte)

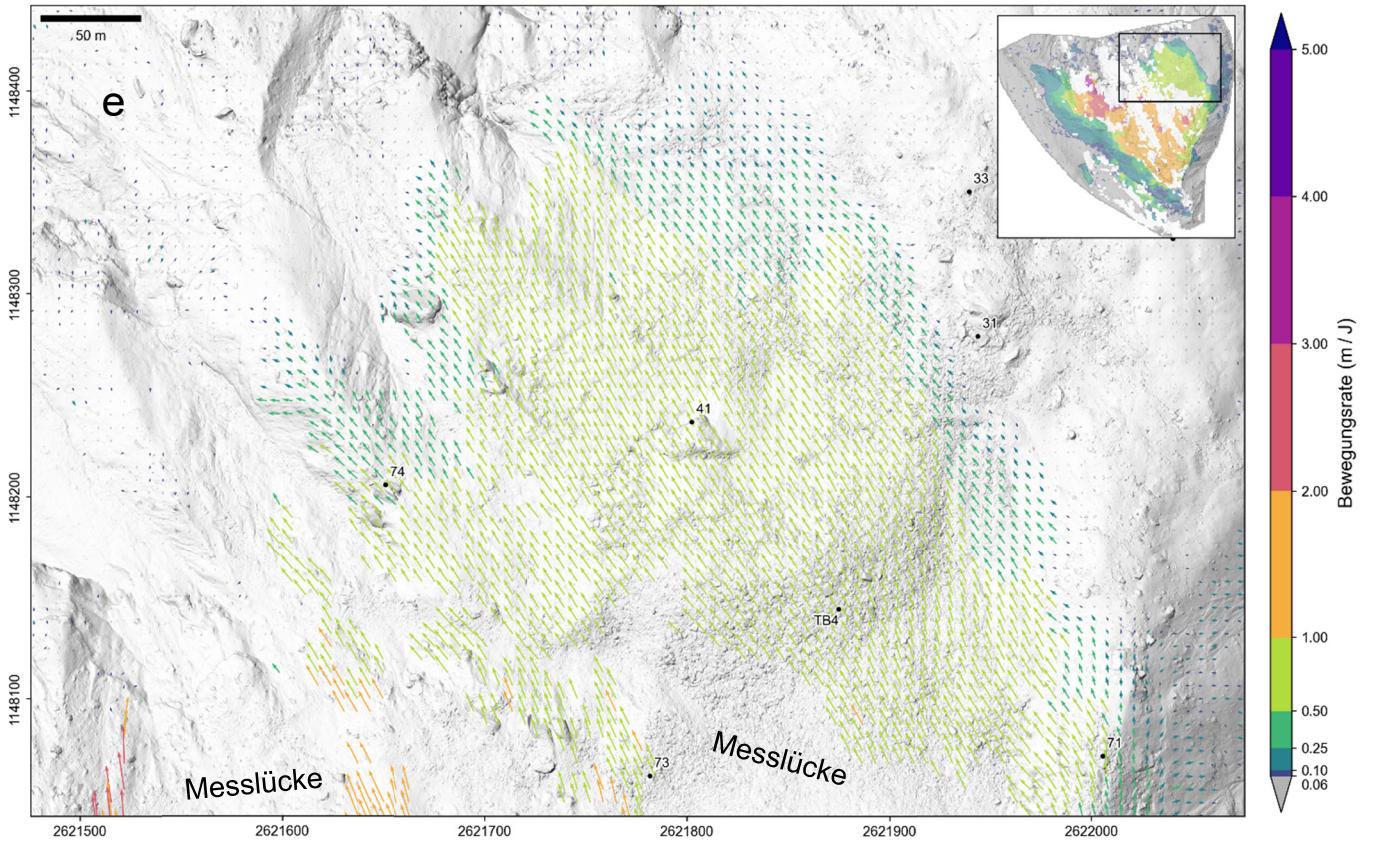


Abbildung 20: Vektorfeld (nur Horizontalkomponente) der Rutschung Spitze Stei für die Zeitperiode 2021 – 2022, gemittelt über vier unabhängige Messungen (Tabelle 1). Vektoren sind nur dargestellt, falls mindestens drei von vier Messungen vorliegen. In Bereichen mit starken Geländeänderungen (Ausbruchnischen, Bereiche mit Restschnee, etc.) waren nicht genügend Bewegungsmessungen möglich (Annotation Messlücke). Die Übersichtskarte zeigt das Bewegungsfeld der Gesamtrutschung sowie die Lage des vergrößerten Kartenausschnittes.

Kandersteg

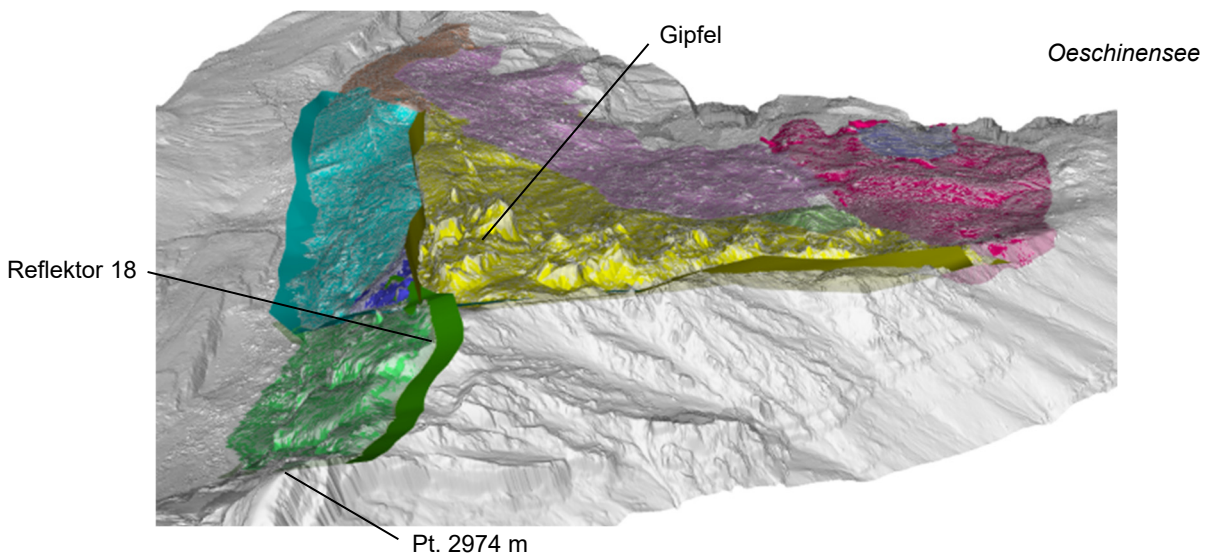


Abbildung 21: Aktualisiertes 3D-Modell der Rutschung mit neuem Kompartiment westlich der Krete Gipfel – Reflektor 18 – Pt. 2974 m (grün, Kubatur 0.7 Mio. m³). Sichtrichtung von Süden nach Norden in Richtung Oeschinensee und Kandersteg.

In den frontalen Bereichen der Rutschung, mit hohen bis sehr hohen Verschiebungsraten, bestätigen die neuen Daten aus Abbildung 20 bereits bekannte 2D-Bewegungsmuster aus dem Vorjahr ([8][10]). Diskontinuitäten in den 2D-Bewegungsfeldern, z.B. entlang des Westgrates, sind mit dem bisherigen 3D-Modell (Abbildung 21) stimmig.

Mit dem bisherigen Tracking-Ansatz konnten nur die Geländeverschiebungen in der Horizontalen abgebildet werden. Das Ableiten von 3D-Verschiebungsvektoren war bisher nicht möglich. Um die Lücke zu schliessen, wurde die Methodik in Anlehnung an [3] und [4] verbessert, sodass neben der Horizontalkomponente auch die Vertikalkomponente der Vektoren quantifiziert werden kann. Die Höhenveränderung entlang der Vektoren wird im sogenannten Lagrangian Koordinatensystem ermittelt, dies im Gegensatz zu Höhenveränderungen entlang der Vertikalen (Eulerian System), welche bei zellenweisen Höhenmodellvergleichen berechnet werden (Beispiele in den Abbildungen 11 und 12 sowie in Anhang 2). Im Rahmen kinematischer Interpretationen ergänzen sich beide Produkte. Berechnungen im Lagrangian System sind aber besonders wertvoll, da daraus Rückschlüsse auf das Einfallen der Gleitflächen gezogen werden können ([3][4]).

In der folgenden Abbildung 20 sind in Panel a die Beträge des klassischen 2D-Bewegungsfeldes dargestellt und in Panel b die Höhenveränderung des Feldes im Lagrangian Koordinatensystem. Die beiden Produkte kombiniert resultieren im 3D-Bewegungsfeld, dessen Beträge in Panel c abgebildet sind. Panel d zeigt schliesslich die Höhenwinkel des 3D-Vektorfeldes. Pro Datenpunkt (d.h. bei Datenverfügbarkeit alle 6.5 m) sind mit dieser Erweiterung dieselben kinematischen Informationen verfügbar, wie sie sonst nur aus GPS- und Reflektormessungen abgeleitet werden können.

Um die Qualität der neuen Produkte einzuordnen, wurden Höhenwinkel (Abbildung 23) und 3D-Bewegungsraten (Anhang 3) über sämtliche vier Zeitperioden aus Tabelle 1 berechnet und verglichen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Produkten, dies bei komplett unabhängigen Grundlagedaten. Der Vergleich mit Höhenwinkeln, welche mit einem anderen Ansatz [4] ermittelt wurden, zeigt ebenfalls gute Übereinstimmung.

Schliesslich zeigt auch der Vergleich mit aus GPS- und Reflektordaten abgeleiteten Höhenwinkeln (Abbildungen 24 und 25) eine gute Übereinstimmung, z.B. bei den Reflektoren 78 und 79 (flache Winkel) oder 14 (steile Winkel). Substanzielle Abweichungen bei den Reflektoren 84 und 17 im Gipfelbereich (Höhenwinkel aus Tracking deutlich steiler als aus Reflektordaten berechnet) waren auf fehlerhafte Reflektorparameter zurückzuführen.

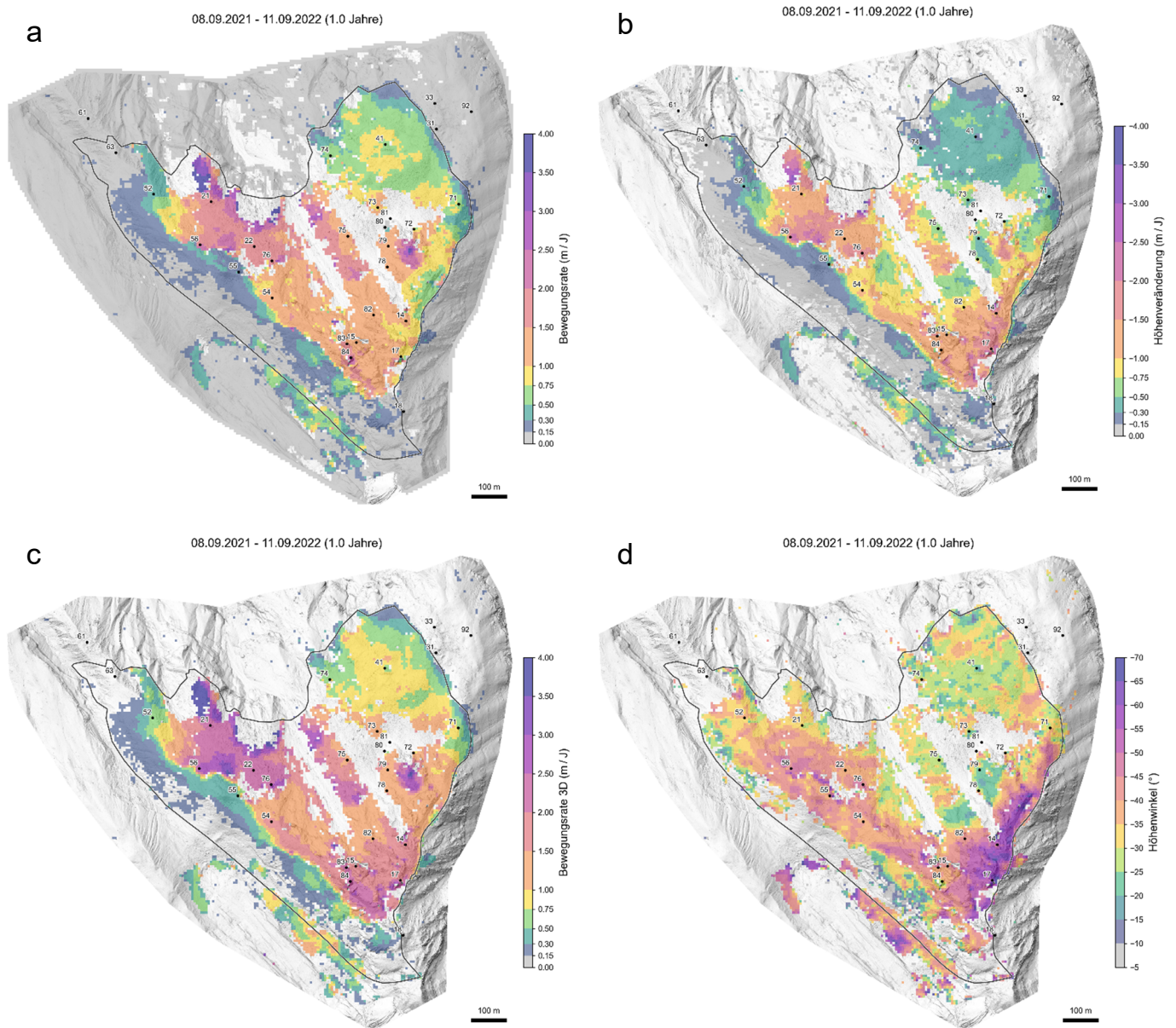


Abbildung 22: (a) Horizontalkomponente des Bewegungsfeldes für den Zeitraum 08.09.2021 – 11.09.2022, (b) Vertikalkomponente (Lagrangian Koordinatensystem). Im Vergleich mit dem Eulerian Produkt (Höhendifferenz entlang der Vertikalen, Anhang 2) werden im Lagrangian System (Höhendifferenz entlang der Vektoren) kaum positive Höhenveränderungen gemessen. Im Eulerian System treten immer dann positive Höhenveränderungen auf, wenn der Höhenwinkel der Verschiebungsvektoren flacher ist als das Gelände (c) Dreidimensionale Bewegungsrate abgeleitet aus den Horizontal- und Vertikalkomponenten (d) Höhenwinkel abgeleitet aus Horizontal- und Vertikalkomponenten.

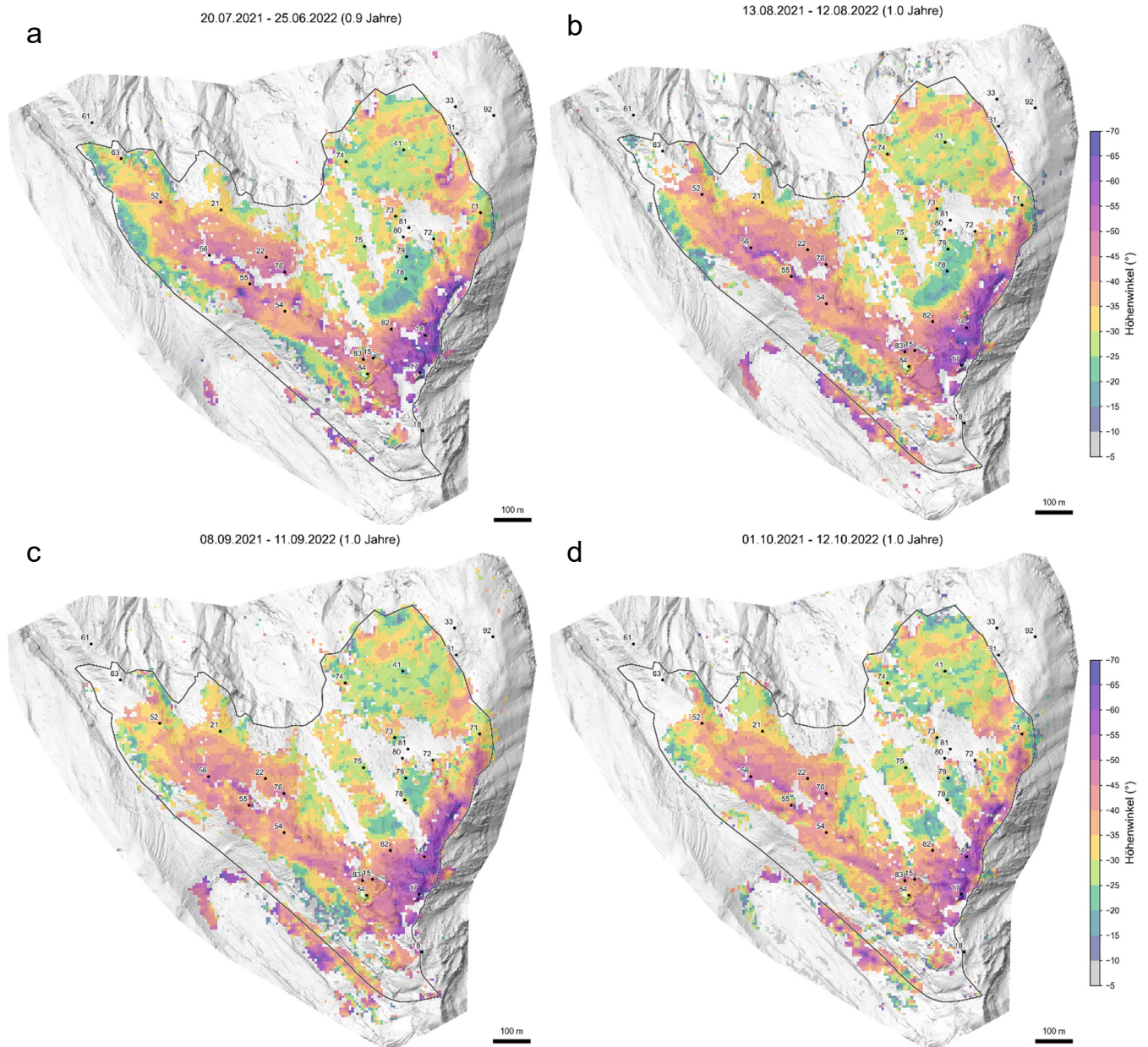


Abbildung 23: Höhenwinkel des Bewegungsfeldes für die Zeiträume (a) 20.07.2021 – 25.06.2022, (b) 13.08.2021 – 12.08.2022, (c) 08.09.2021 – 11.09.2022 und (d) 01.10.2021 – 12.10.2022. Die vier Datensätze basieren auf unabhängigen Grundlagedaten (Tabelle 1). Leichte Abweichungen sind neben Ungenauigkeiten in Daten und Methodik auch auf die unterschiedlichen abgedeckten Zeiträume zurückzuführen. In den Frühsommersmessungen (Panel a) sowie den Herbstmessungen (Panel d) sind die Höhenmessungen zudem lokal leicht durch Schnee beeinträchtigt.

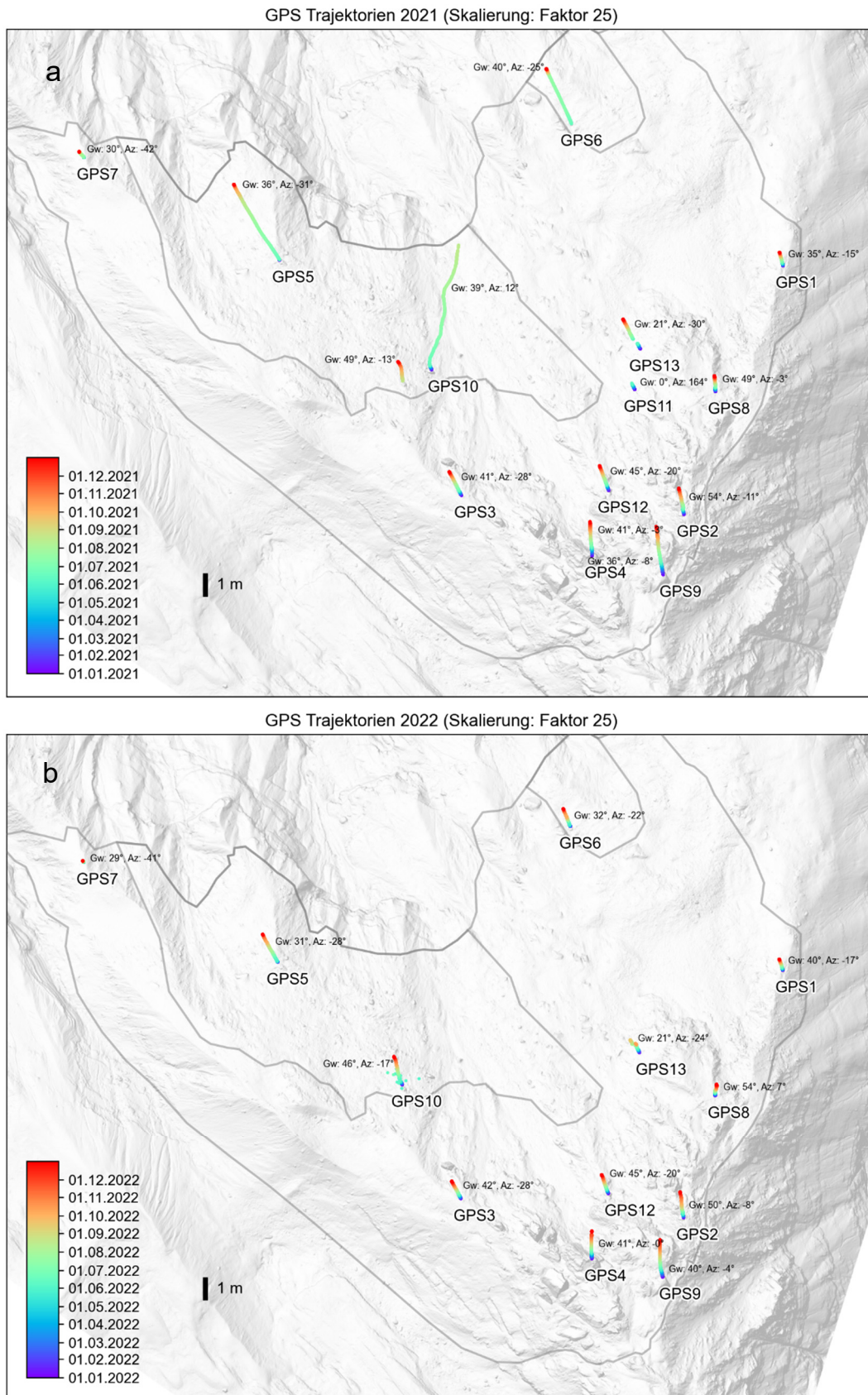


Abbildung 24: GPS-Trajektorien für die Jahre 2021 (a) und 2022 (b), um Faktor 25 verlängert (vgl. 1 m Massstab). Die Trajektorienfarbe reflektiert den jeweiligen Messzeitpunkt. Berechnete Höhenwinkel sind mit dem Kürzel Gw (Gleitwinkel=Höhenwinkel) annotiert. GPS 10 wurde während der Saison 2021 an einen neuen Standort versetzt. GPS 11 und 13 wurden 2021 bzw. 2022 bei Steinschlagereignissen beschädigt und nicht ersetzt.

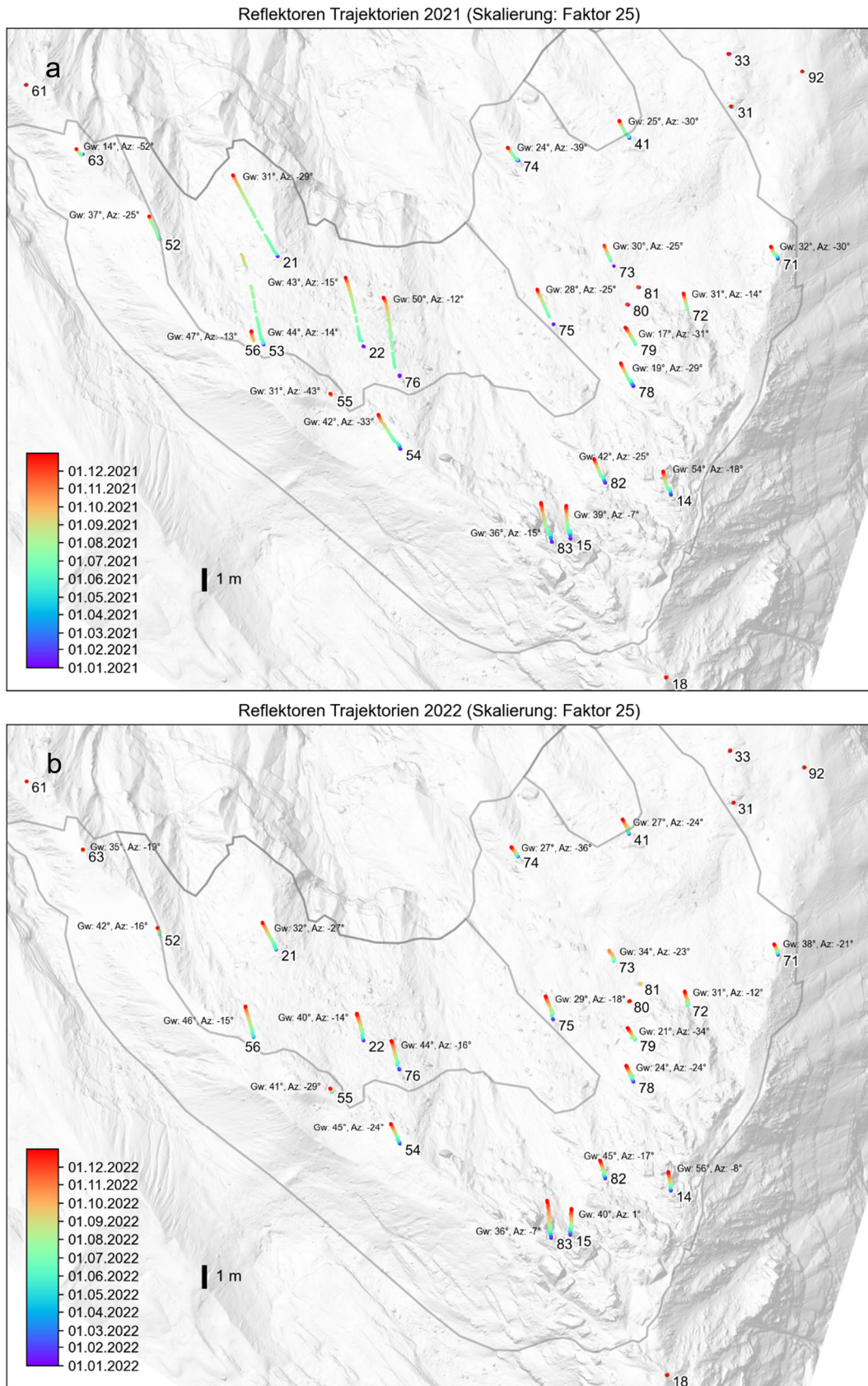


Abbildung 25: Um Faktor 25 verlängerte Trajektorien der Messreflektoren für die Jahre 2021 (a) und 2022 (b). Berechnete Höhenwinkel sind mit dem Kürzel Gw. annotiert. Wegen fehlerhafter Grundlagedaten sind die Trajektorien der Reflektoren 84 und 17 im Gipfelbereich nicht dargestellt.

Eine detaillierte Interpretation der erhobenen kinematischen Daten mitsamt Erstellung eines verfeinerten geologisch-kinematischen Modelles läuft aktuell und wird in einem zukünftigen Fachbericht detailliert behandelt. Die neuen Daten sind generell gut mit den bisherigen Interpretationen stimmig, stellen diese aber auf eine zunehmend robustere quantitative Basis. Nachfolgend wird der Mehrwert der neuen Daten beispielhaft erläutert.

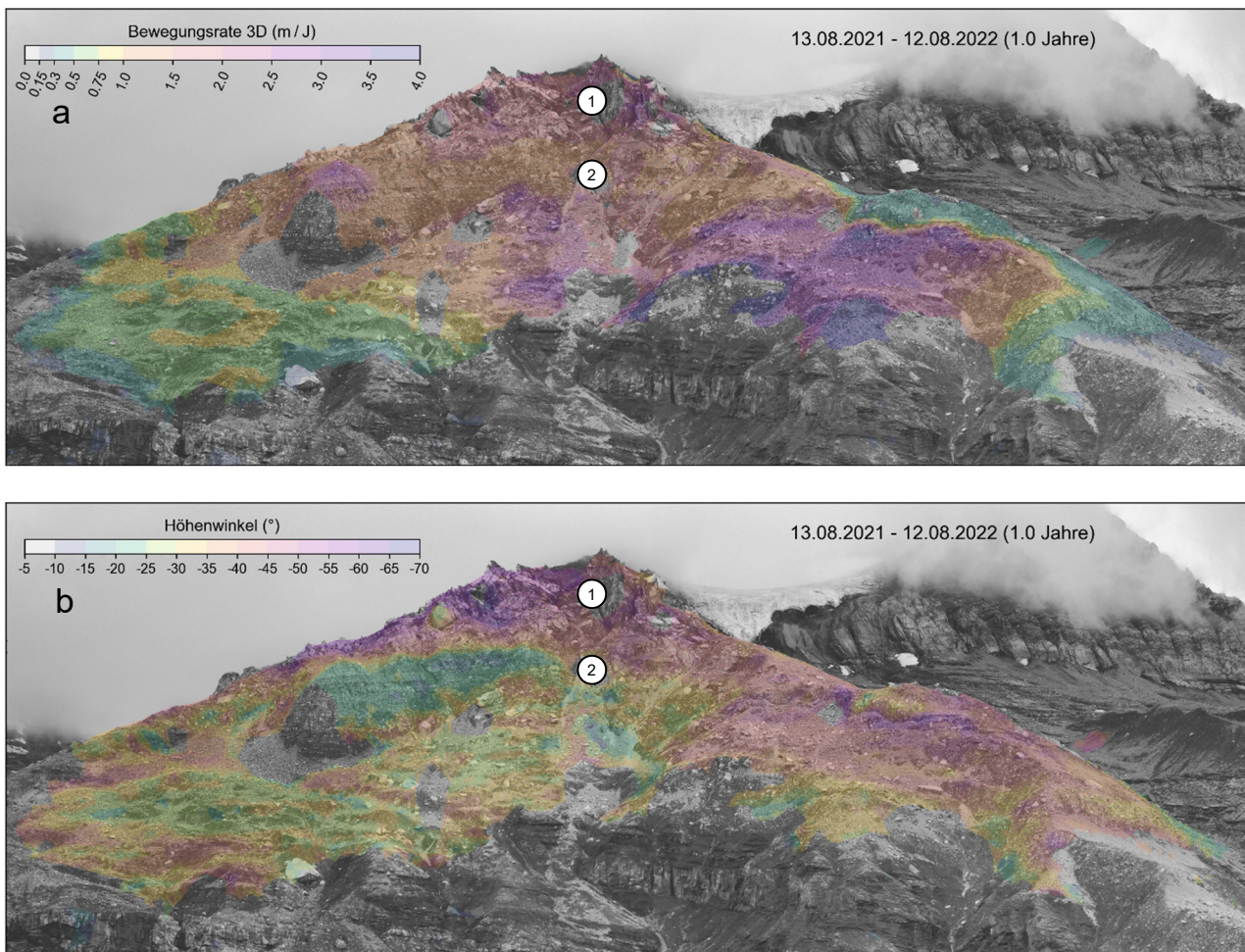


Abbildung 26: Frontansicht der Rutschung Spitze Stei mit (a) 3D-Bewegungsraten sowie (b) Höhenwinkeln für die Periode 13.08.2021 – 12.08.2022.

Die flächigen 3D-Bewegungsfelder zeigen im ganzen Gipfelbereich der Rutschung höhere Bewegungsraten als im darunterliegenden Felsbereich (Magenta vs. Orangetöne bei Annotationen 1 und 2 in Abbildung 26a). Im 2D-Bewegungsfeld sind diese Unterschiede wenig ausgeprägt, da dort das deutlich steilere Einfallen der Verschiebungsvektoren im Gipfelbereich (Abbildung 26b) nicht berücksichtigt ist. Die hangabwärts abnehmenden 3D-

Bewegungsraten signalisieren eine flächige Stauchung des Untergrundes, welche lokal zudem durch Kippbewegungen der Felstürme überprägt wird. Mit den Messungen werden Feldbeobachtungen gestützt, wonach sich Extensionsrisse und Scherbrüche gegen den Gipfelbereich zunehmend verlieren (vgl. Karte der Phänomene in [10]). Die stattdessen beobachtete unruhige Morphologie des Gipfelbereiches, mit räumlich inkongruent einfallenden Schichtgrenzen [8] der stark beanspruchten anstehenden Kalke und Mergel, ist mit der postulierten Kompression ebenfalls stimmig. Augenscheinlich wird die Sackungsbewegung des Gipfelbereiches vom darunterliegenden, langsamer bewegenden Felsbereich gebremst. Ein potenzielles Versagen dieses bremsenden Felsbereiches würde mit hoher Wahrscheinlichkeit auch zum Versagen des darüberliegenden Gipfelbereiches führen. Damit wären Abbrüche mit grösseren Kubaturen möglich, übereinstimmend mit den bisher definierten Szenarien [8].

7. Abschliessende Bemerkungen

Aktuell sind Arbeiten zu mehreren Themenbereichen am Laufen und kommen 2023 zum voraussichtlichen Abschluss. Erste Priorität diesbezüglich haben die hydrologischen bzw. hydrogeologischen Modellierungen mit den linearen Reservoirs. Diese Arbeiten sollten im Hinblick auf den Frühsommer 2023 abgeschlossen werden, nicht zuletzt, da die Resultate auch für die operative Überwachung nützlich sein dürften.

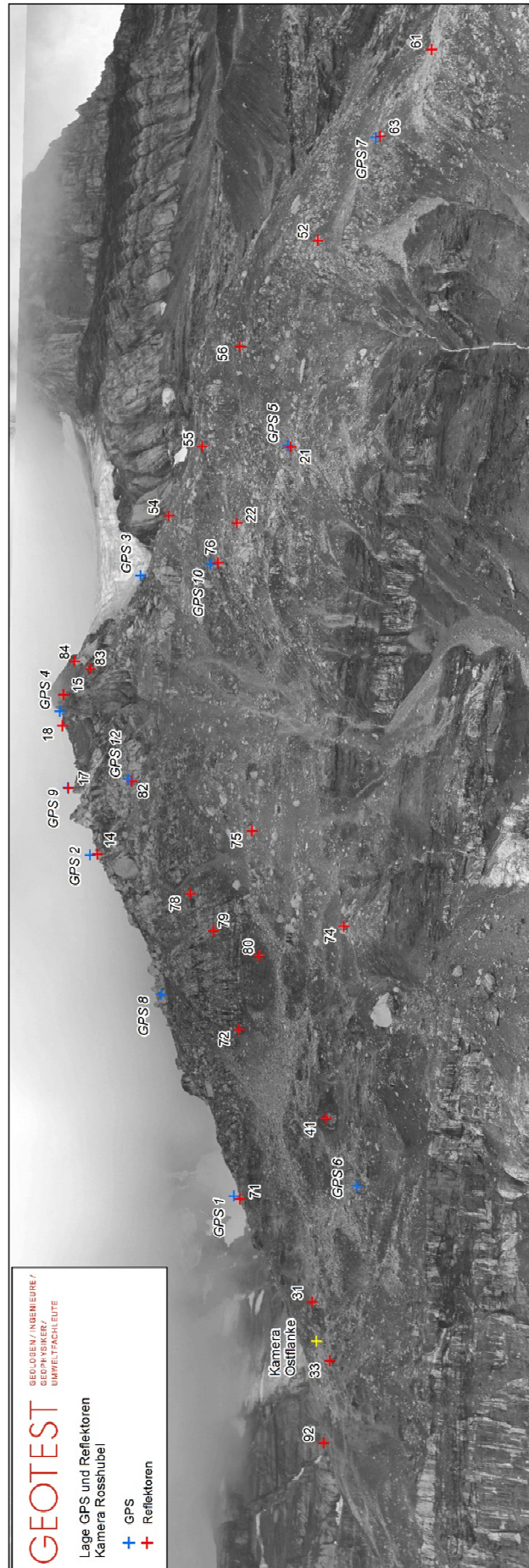
Zweite Priorität haben die Arbeiten zur Erstellung eines verfeinerten geologisch-kinematischen Modelles. Die Arbeiten werden parallel zu den obigen Modellierungen weitergeführt. Vor Abschluss der Arbeiten sollten noch die ersten Drohnendaten der Saison 2023 berücksichtigt werden. Mit den bis dahin zweijährigen Drohnenzeitreihen dürfen nochmals verbesserte Aussagen zur Kinematik erwartet werden, insbesondere auch in peripheren, vergleichsweise langsam bewegenden Bereichen, wo aktuell noch keine bzw. unsichere Gleitwinkel und 3D-Bewegungsraten vorliegen.

Basierend auf den Erkenntnissen aus den obigen Facharbeiten sowie neuen Erfahrungswerten aus der operativen Überwachung werden Szenarien und deren Eintretenswahrscheinlichkeiten in der zweiten Jahreshälfte erneut überprüft und bei Bedarf angepasst.

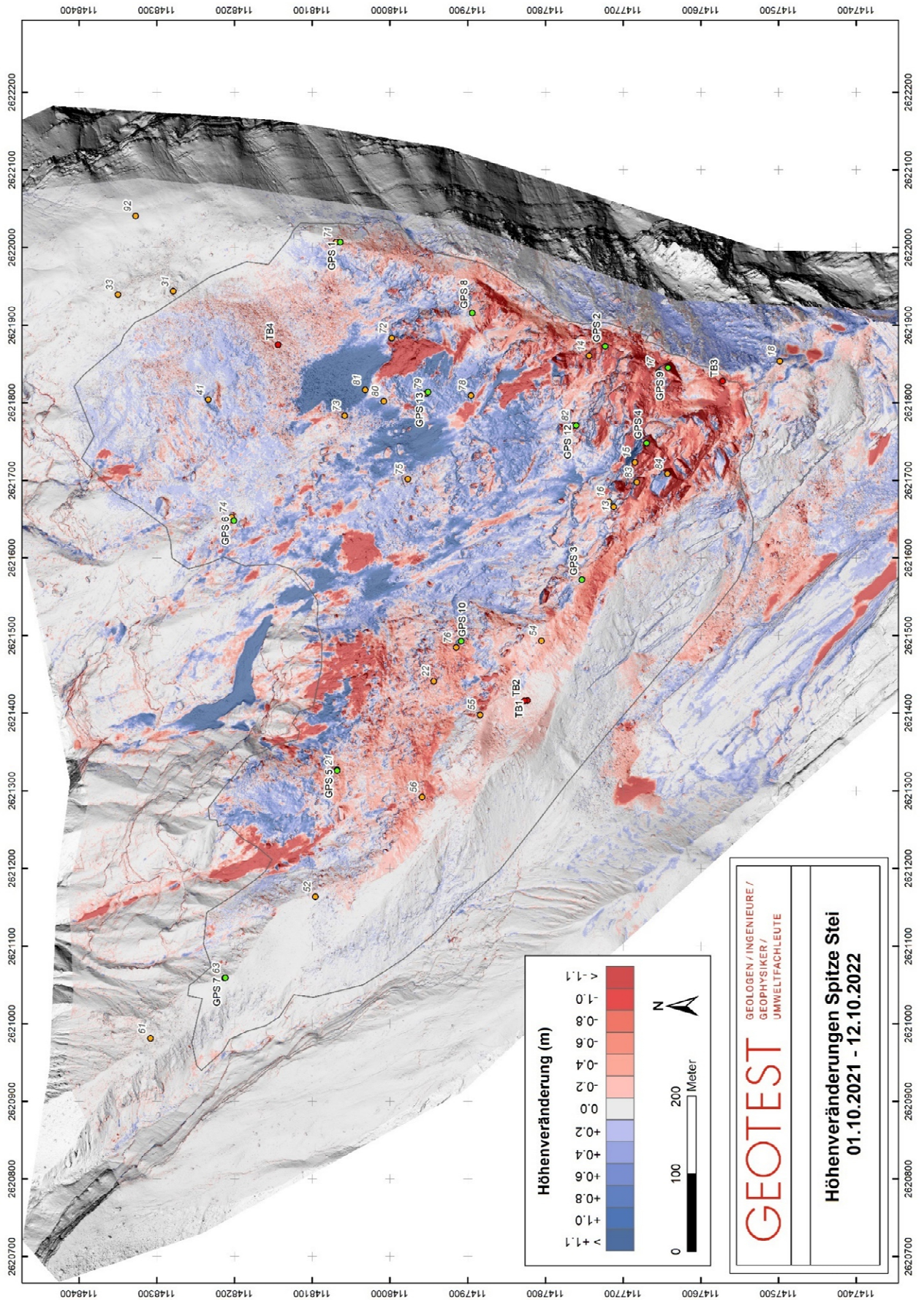
8. Quellen

- [1] GEOTEST AG (2022): Kandersteg, «Spitze Stei», Auswertung Permafrostdaten, Permafrostmodellierungen, Bericht Nr. 1418139.28.
- [2] GEOTEST AG (2020): Kandersteg, «Spitze Stei», Permafrostuntersuchungen, Bericht Nr. 1418139.9.
- [3] SLF (2021): Bericht terrestrisches Laserscanning Spitze Stei Kandersteg, BE, September 2021
- [4] SLF (2022): Bericht terrestrisches Laserscanning Spitze Stei Kandersteg, BE, September 2022
- [5] GEOTEST AG (2021): Kandersteg, «Spitze Stei», Modellierung oberflächlicher Wassereintrag, Bericht Nr. 1418139.20.
- [6] GEOTEST AG (2021): Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement 2021, Überprüfung Szenarien und Wirkungsräume, Bericht Nr. 1418139.25.
- [7] GEOTEST AG (2021): Kandersteg, Rutschung «Spitze Stei», Entwicklung Sommer 2021, Bericht Nr. 1418139.21.
- [8] GEOTEST AG (2020): Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement 2020, Datenerhebungen und Auswertungen 2020, Bericht Nr. 1418139.12.
- [9] GEOTEST AG (2020): Kandersteg, «Spitze Stei», Auswertung historische Orthophotos, Bericht Nr. 1418139.11.
- [10] GEOTEST AG (2021): Kandersteg, «Spitze Stei», Kinematische Daten 2021 / 3D-Modell Rutschung Spitze Stei, Bericht Nr. 1418139.23.
- [11] KAWA, Abt. Naturgefahren (2020): Einflussfaktoren auf Bewegungsraten 2020.
- [12] GEOTEST AG (2022): Kandersteg, «Spitze Stei», Geschiebebilanz Oeschibach / Chalberspissibäche 2021, Bericht Nr. 1418139.26.

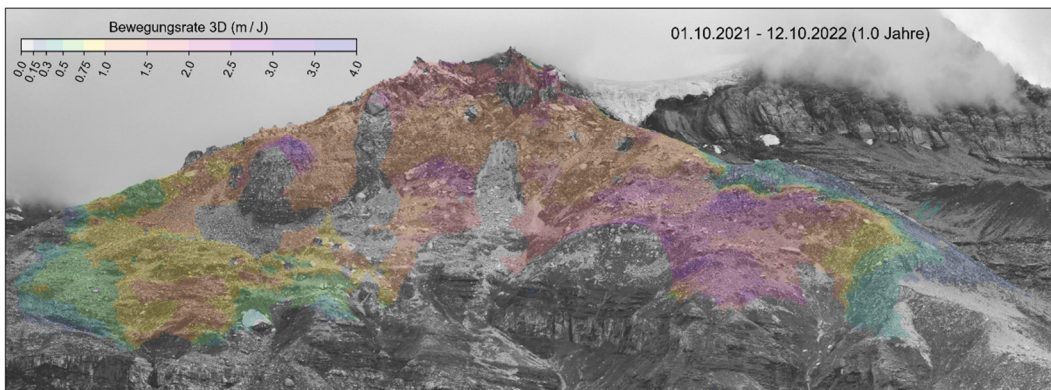
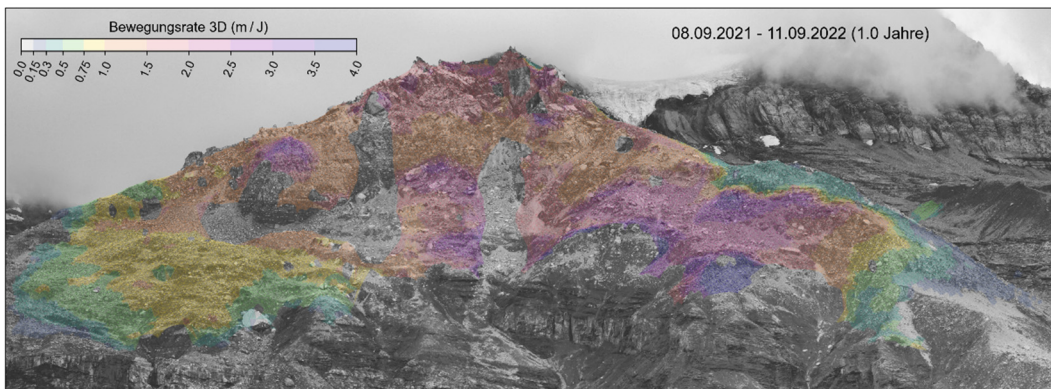
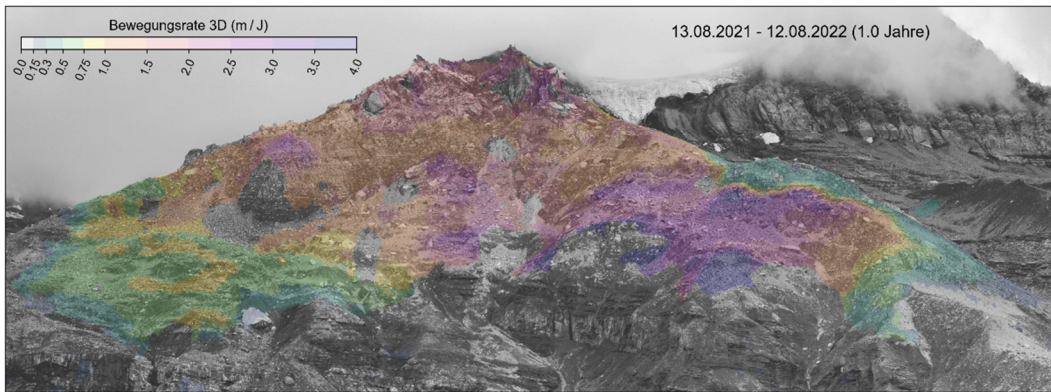
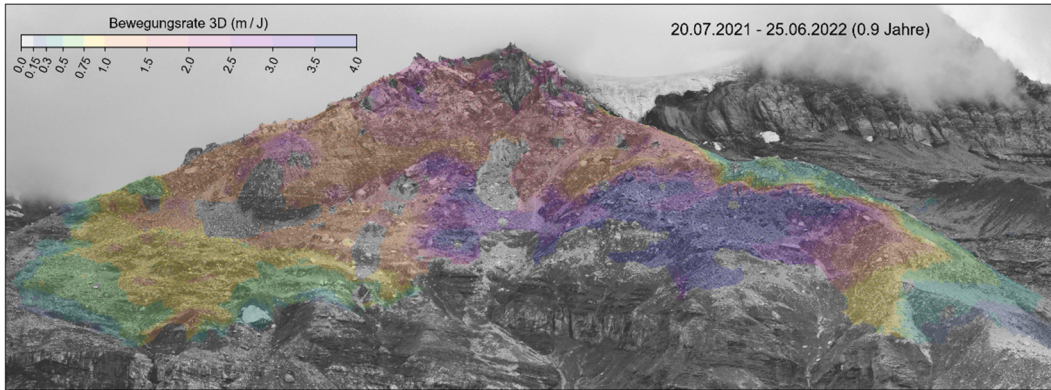
Anhang 1 – Übersicht GPS / Reflektoren Spitze Stei

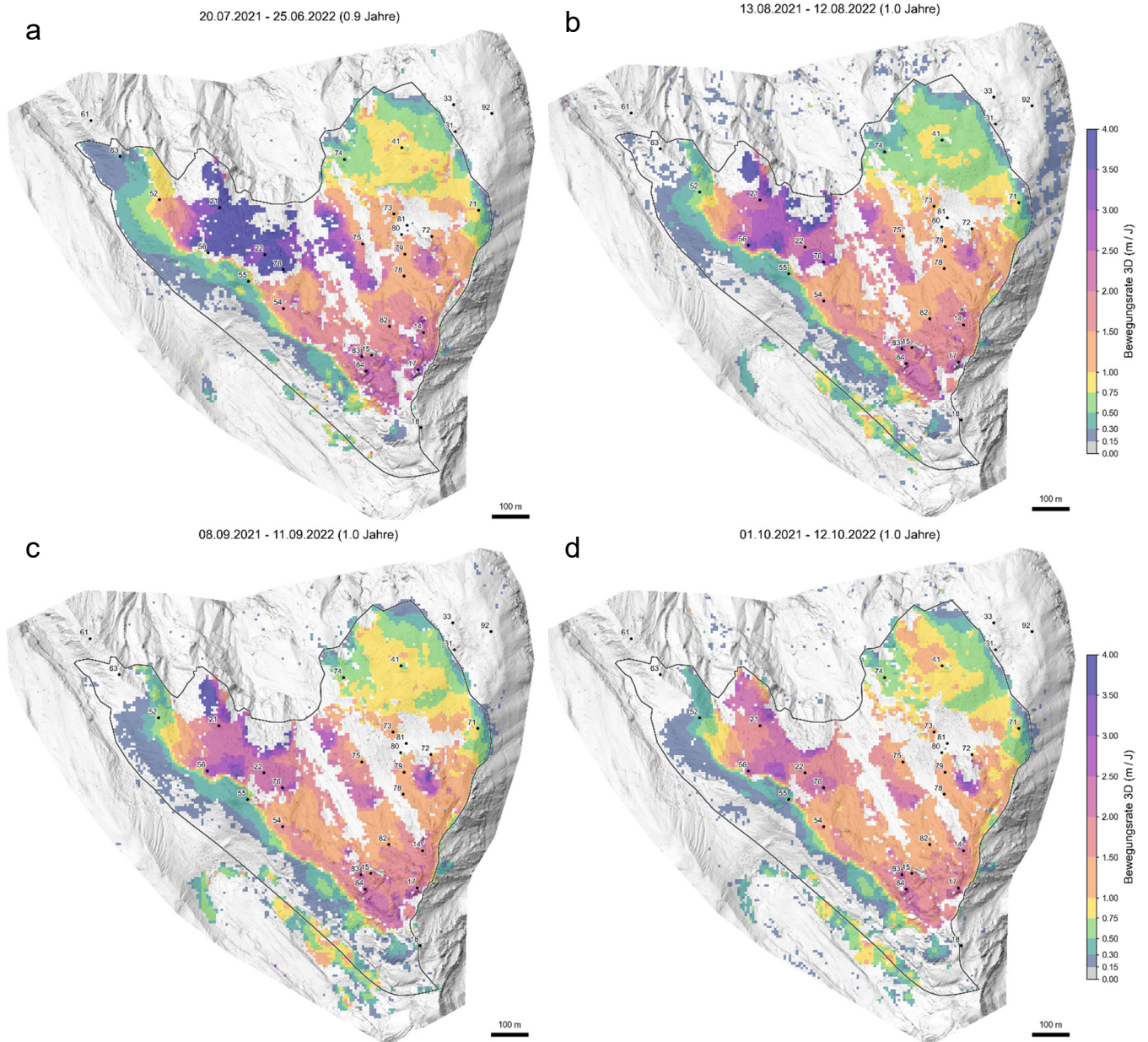


Anhang 2 – Höhenveränderungen Spitze Stei 01.10.2021 – 12.10.2022

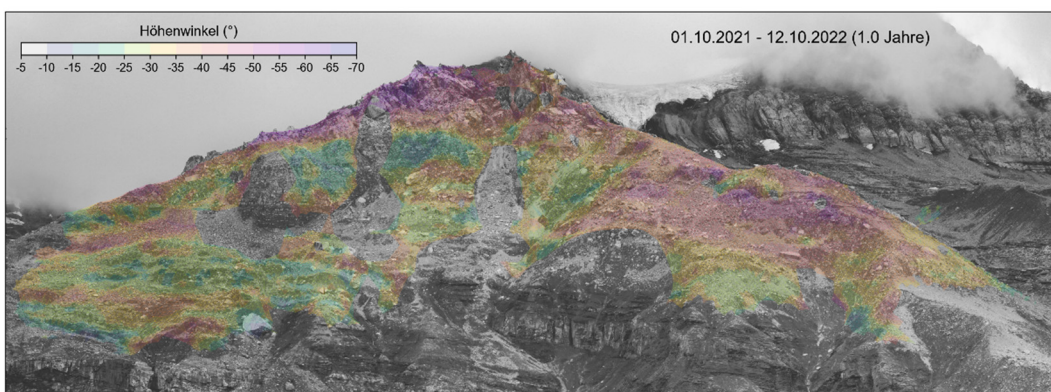
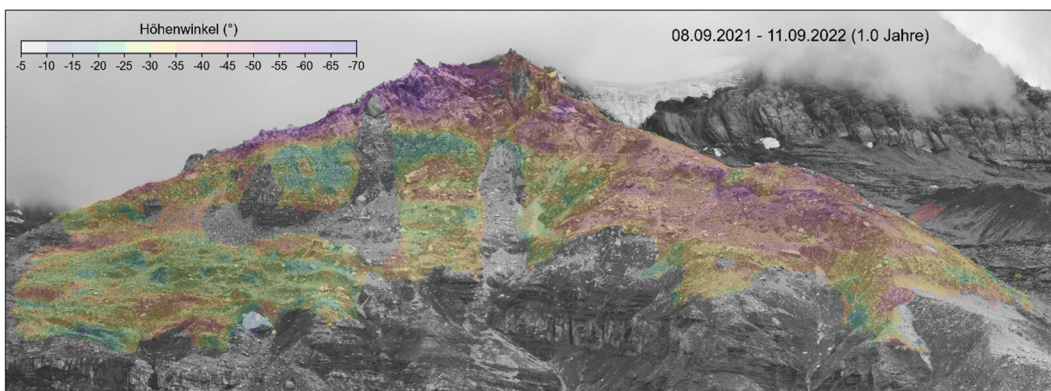
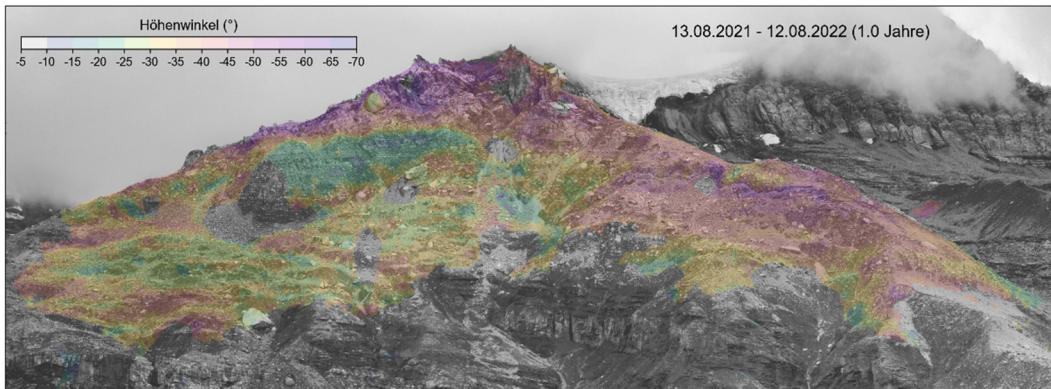
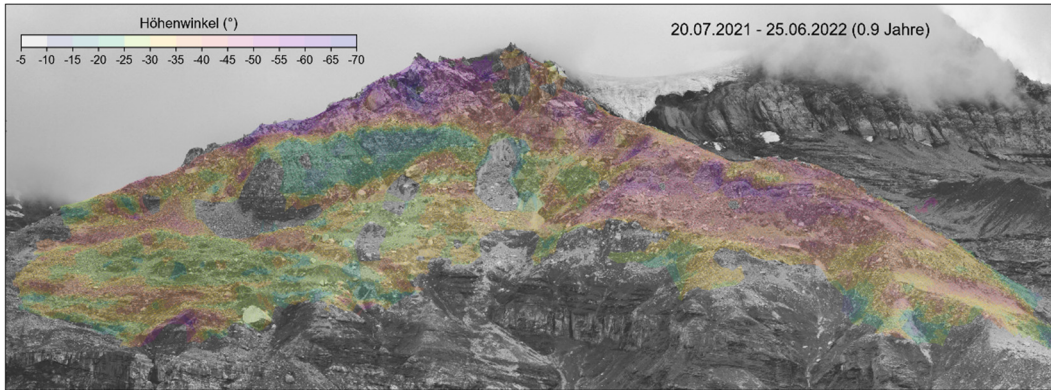


Anhang 3 – 3D Bewegungsraten



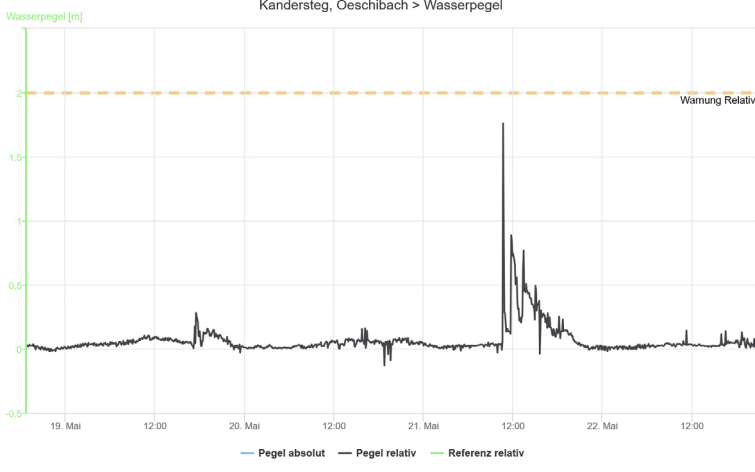


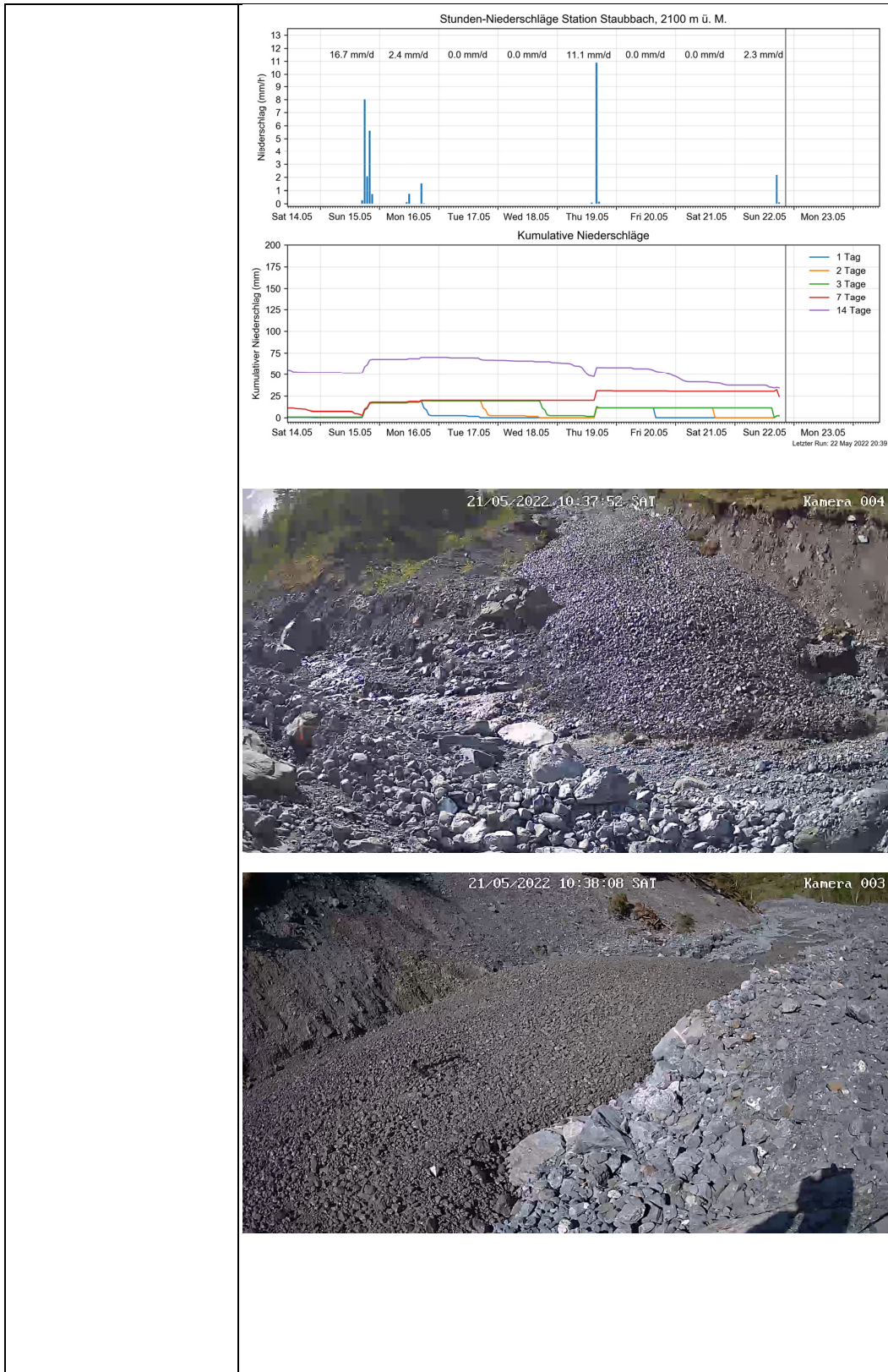
Anhang 4 – Höhenwinkel



Anhang 5 – Übersicht Ereignisse 2022

Nachfolgend werden die grösseren Ereignisse (Abbrüche und Gerinnemurgänge) des Jahres 2022 tabellarisch zusammengefasst.

Datum	Beschrieb
21.05.2022	<p>Schuttmaterialabsturz aus dem Frontbereich der Schuttrutschung Westflanke, mit anschliessendem Murgang im Äusseren Chalberspissibach.</p> <p>Trockene Witterung, jedoch beträchtlicher Schneeschmelzwasserinput infolge warmer Temperaturen. Lawinenschneeablagerungen im Äusseren Chalberspissibach.</p> <p>Zusätzlich zu dem am 21.05.2022 aus der Rutschung mobilisierten Material wurde möglicherweise noch Material vom Ereignis des 24.09.2021 remobilisiert. Dieses war teilweise im Äusseren Chalberspissibach zwischengelagert worden.</p> <p>Der Murgang erreichte eine maximale Höhe 1.7 m, vgl. nachfolgende Grafik. Das Volumen betrug einige 100 bis wenige 1000 m³. Querschnitt 10 m² (5 * 2 m), Geschwindigkeit 2 m/s, Dauer 30 Sekunden: 600 m³</p> <p>Der Murgang gelangte bis in den Bereich des Zusammenflusses mit dem Oeschibach. Ab dort geschiebereicher Abfluss mit Ablagerungen deutlich unter die Skibrücke.</p> 

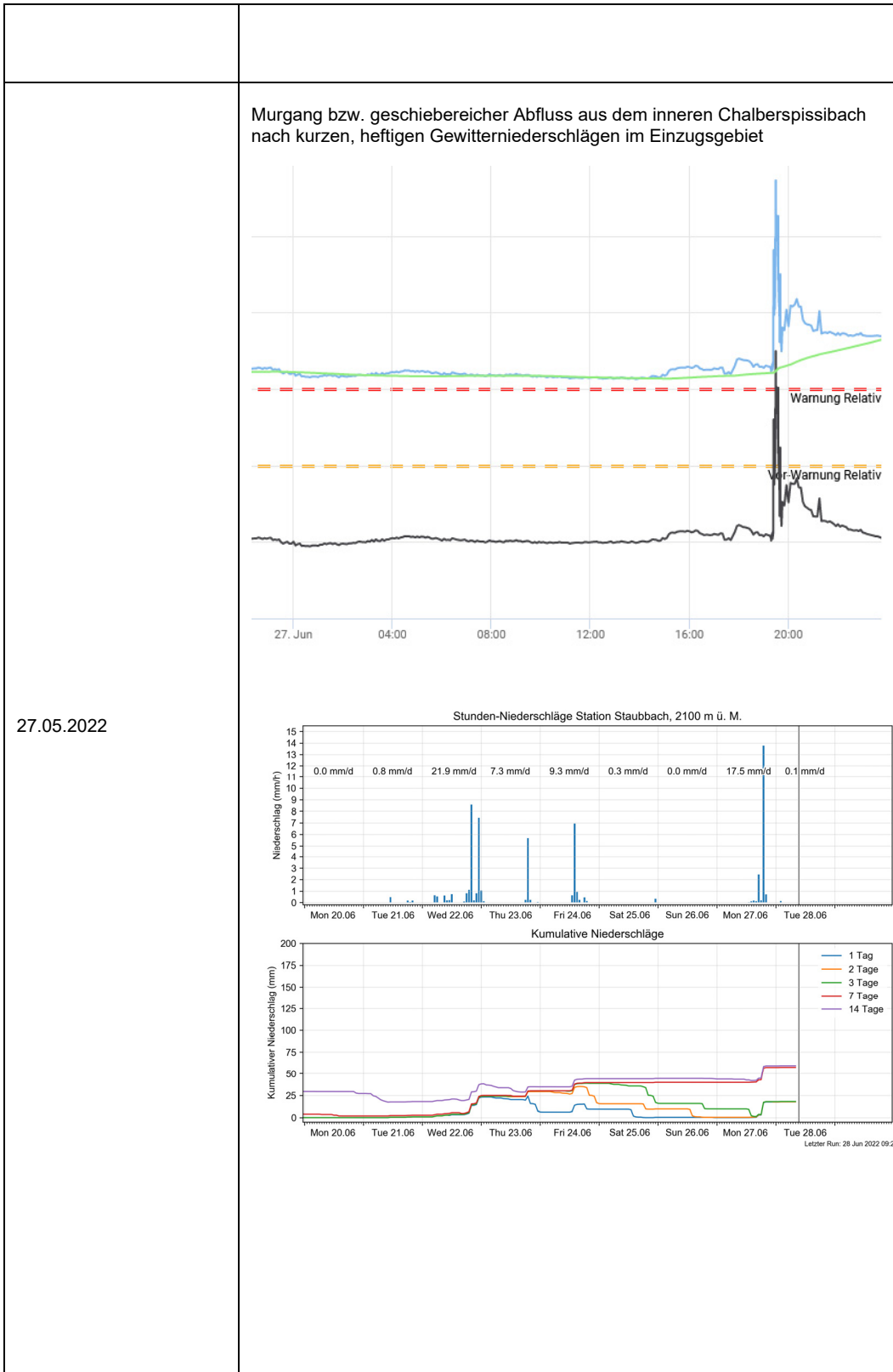


20.05.2022 18.00 Uhr



22.05.2022 18.00 Uhr



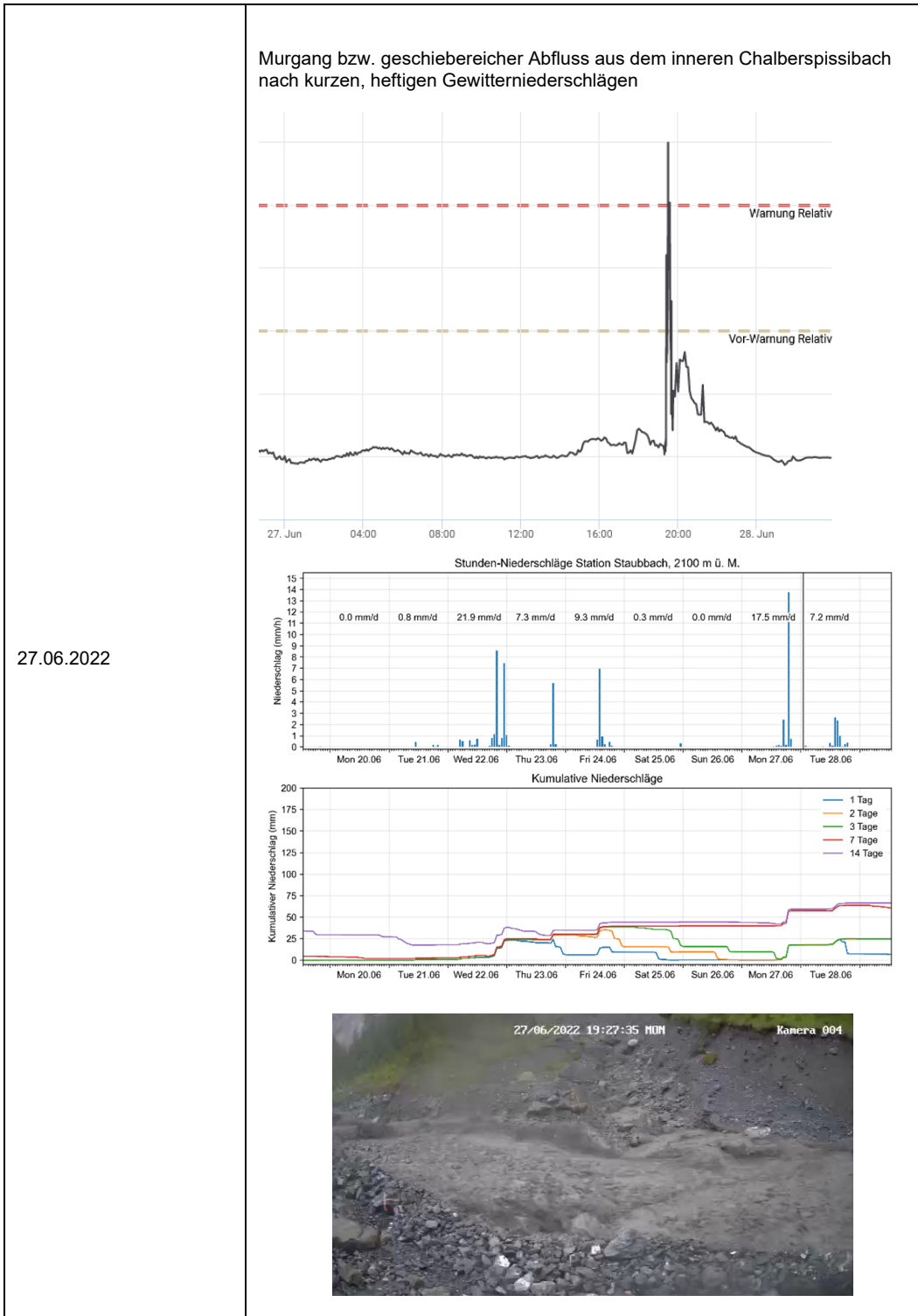



22.06. 08:00:

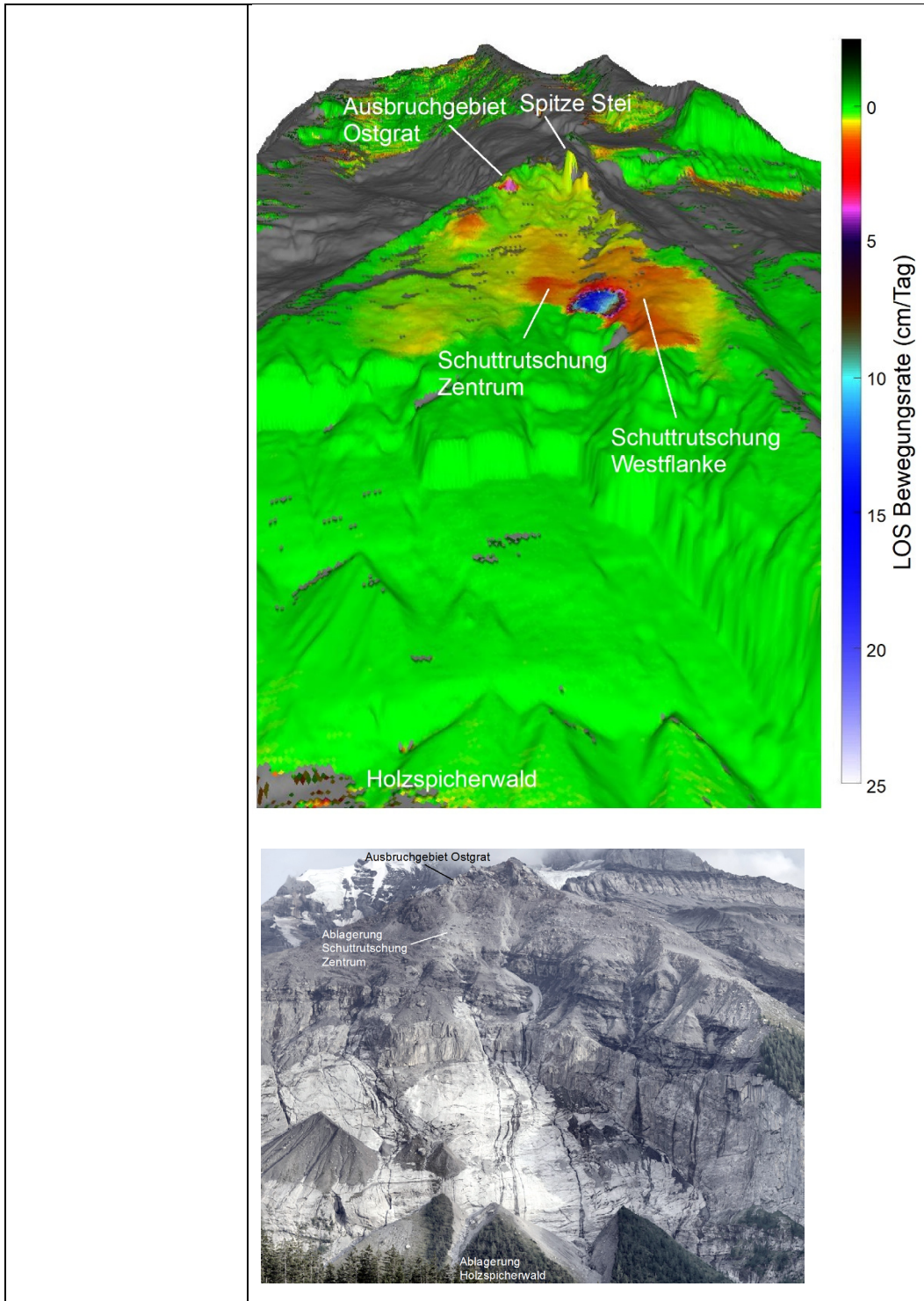


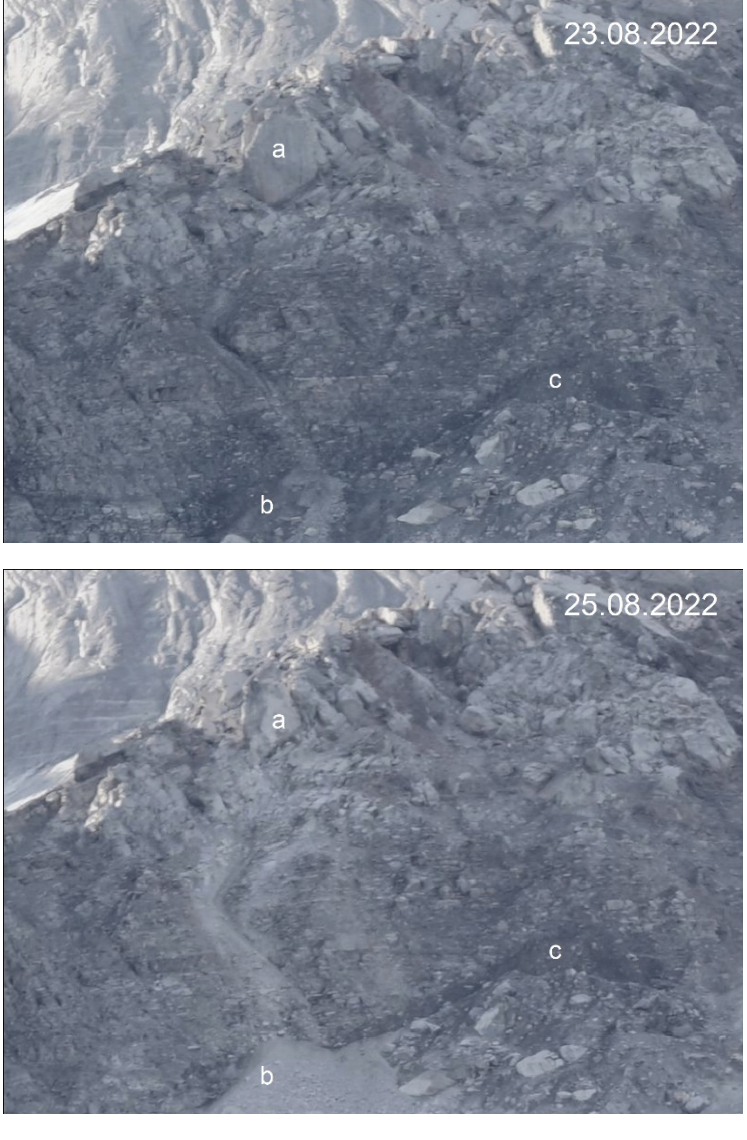
28.06. 08:00:





	
23.08.2022	9:51 Uhr: Absturz eines 4000 m ³ Felspaketes aus dem Ostgrat, Mitnahme von weiterem Material (ca. 4'000 m ³) im Transitgebiet. Weitherum sichtbare Stauentwicklung. Infolge des Absturzes starke Beschleunigung der Schuttrutschung Zentrum.



	
<p>03.09., 04.09. und 08.09.2022</p>	<p>Mehrere kleine Abbrüche aus der sekundären Felsrutschung unterhalb des Ostgrates.</p>
<p>26.09 – 27.09</p>	<p>Absturz einiger 1000 m³ Felsmaterial aus der sekundären Felsrutschung unterhalb des Ostgrates</p>
<p>02.10.2022</p>	<p>Weiterer Absturz aus sekundärer Felsrutschung.</p>
<p>14.10.2022</p>	<p>Absturz des am 23.08. nicht mobilisierten Felsfeilers aus dem Ausbruchgebiet Ostgrat. Kubatur gut 1'000 m³. Keine Beschleunigung der Schuttrutschung.</p>

Anhang 6 – Übersicht Feldeinsätze 2022

GPS / Reflektoren

Datum	Arbeiten
23.06.2022	- GPS 10: Installation neue Antenne - Reflektoren 54 und 22: Neuausrichtung - GPS 13: Kontrolle (Schäden an Panel)
18.08.2022	- Reflektor 80: Neuausrichtung - Markierungen sämtlicher Reflektoren und GPS neu gesprayt
04.10.2022	- Ersatz GPS 13
19.12.2022	- Ersatz GPS 4

Terrestrischer Laserscanner (TLS) und Radar

Datum	Arbeiten
17.05.2022	- Neuinstallation Pegelradar Oeschibach
26.05.2022	- Installation interferometrischer Radar Spitze Stei
07.06.2022	- Austausch Totalstation durch Flotron
03.08.2022	- TLS-Messung Spitze Stei
14.11.2022	- Deinstallation interferometrischer Radar Spitze Stei
16.11.2022	- Deinstallation/Einwinterung Pegelradar Oeschibach

Drohne

Datum	Arbeiten
27.03.2022	- Spitze Stei Flug 2022-1 (Gelände schneebedeckt, Flug zur Bestimmung der Schneemächtigkeit)
25.06.2022	- Spitze Stei Flug 2022-2 (weitgehend ausgeaperte Verhältnisse, etwas Restschnee in Mulden)
12.08.2022	- Spitze Stei Flug 2022-3 (ausgeaperte Verhältnisse)
11.09.2022	- Spitze Stei Flug 2022-4 (ausgeaperte Verhältnisse)
12.10.2022	- Spitze Stei Flug 2022-5 (Schnee in den höchsten abgeschatteten Bereichen)

Thermistoren / Inklinometer

Datum	Arbeiten
23.06.2022	- TB3 Gipfel: Datendownload
18.08.2022	- TB3 Gipfel: Installation neuer Batterien
04.10.2022	- 7. Folgemessung Inklinometer Westgrat

Wetterstationen

Datum	Arbeiten
04.10.2022	- Installation Schneemesser Westgrat

Begehungen

Datum	Arbeiten
04.08.2022	- Route: Ostgrat-Gipfel-Westgrat - ANG: N. Hählen, C. Brönnimann - GEOTEST: D. Tobler, C. Kienholz, R. Riner - Gemeinde: S. Bichsel, J. Reber

Diverses

Datum	Arbeiten
14.05.2022	- Installation Kameras Oeschibach
23.06.2022	- Installation Kameras 7 und 8 Oeschibach
23.06.2022	- Installation Seismometer-Array (orange Sensoren) WSL
04.08.2022	- Gesteinsproben SLF - Installation Seismometer WSL - Befliegung Quadcopter GEOTEST
12.08.2022	- Befliegung Quadcopter GEOTEST
18.08.2022	- Deinstallation Seismometer-Array (orange Sensoren) WSL
04.10.2022	- Installation Webkamera Rosshubel