
Bericht Nr. 1418139.12

Einwohnergemeinde Kandersteg

**Kandersteg, "Spitze Stei"
Gefahrenmanagement 2020**

Datenerhebungen und Auswertungen 2020

Zollikofen, 30. Dezember 2020

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	Gesamter Bericht, Messungen und Geländebefunde, Permafrost
Anna Haberkorn	Permafrost
Reto Hänni	Geologie und 3D-Modell
Kaspar Graf	Messungen und Geländebefunde, Geologie und 3D-Modell
Supervision	Visierte Inhalte
Daniel Tobler	Gesamter Bericht
Hinweise	

GEOTEST AG



Daniel Tobler



Christian Kienholz

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	5
2.	Ausgeführte Arbeiten	5
2.1	GEOTEST AG.....	5
2.2	Dritte.....	6
3.	Messungen und Geländebefunde 2020	7
3.1	Terrestrische Laserscans (TLS)	7
3.2	Drohnen-basierte Messungen	11
3.2.1	Periode 2019 – 2020.....	11
3.2.2	Historische Zeitreihe	19
3.3	Radar-basierte Messungen.....	23
3.3.1	Ostflanke	24
3.3.2	Westgrat.....	27
3.4	Kamera-basierte Messungen.....	33
3.5	Geodätische Messungen, GPS-Messungen.....	35
3.6	Bohrlochmessungen (Temperatur / Wasserdruck / Deformation)	46
3.6.1	Inklinometermessungen TB1	48
3.6.2	Temperaturmessungen TB2 – TB 4	50
3.7	Geländebefunde	59
4.	Permafrostverteilung und Eigenschaften	62
5.	3D Geologisches Modell	64
5.1	Basale Gleitfläche	66
5.2	Gleitfläche Felsrutschung	66
5.3	Periphere Gleitfläche Gipfel und Schuttrutschungen.....	71
6.	Einflussfaktoren und Versagensmechanismen.....	73
7.	Szenarien und Wirkungsräume.....	75
7.1	Entwicklung 2020 und Übereinstimmung mit Szenarien	75
7.2	Zu erwartende Entwicklung 2021 - 2030	77
7.3	Einfluss auf Wirkungsräume	81
8.	Bewertung Monitoring und periodische Messungen	82
8.1	Monitoring	82
8.2	Periodische Messungen.....	85
9.	Schlussbemerkungen.....	89
10.	Literaturverzeichnis	90

Anhang:

- Übersicht Feldarbeiten 2020 1
- Abbildungen und Karten terrestrischer Laserscanner (TLS) 2
- Karten Drohnenmessungen 3
- Photodokumentation Diskontinuitäten 4
- Übersicht Reflektoren / GPS 5
- Gleitwinkel GPS 6
- Übersicht Ereignisse 2020 7

1. Einleitung

Aus dem instabilen Gebiet des «Spitze Stei» oberhalb des Oeschinensees muss mit grossen Felsabbrüchen und Bergstürzen gerechnet werden, was weitreichende Auswirkungen auf mehrere Bereiche der Gemeinde Kandersteg haben könnte ([1], [2], [3], [4]). Das Gebiet um den «Spitze Stei» wird daher seit Sommer 2018 überwacht. Im Winter 2018/19 wurde eine umfassende Gefahrenbeurteilung durchgeführt; darauf basierend wurden Sicherheitszonen ausgeschieden und ein Monitoringkonzept für die Primärprozesse erarbeitet [1]. Gefahrenmanagement sowie Basismonitoring (automatisierte Tachymetermessungen, GPS-Messungen, Kameraüberwachung) gingen im Frühling 2019 in die operative Phase. Im Jahr 2019 wurden weitere Daten erhoben, u.a. mittels Feldbegehungen, Drohnenbefliegungen, geophysikalischen Messungen sowie terrestrischen Laser- und Radarmessungen. Sämtliche Daten wurden im Herbst 2019 ausgewertet und in einem geologischen 3D-Modell zusammengeführt, mit dem Ziel, Abbruchszenarien und -mechanismen zu präzisieren sowie weiterführende Schritte im Gefahrenmanagement zu definieren [2]. Die Arbeiten wurden im Rahmen einer Zweitmeinung ([5], [6]) evaluiert.

Im Jahr 2020 wurde das Monitoring ausgebaut und hinsichtlich Abdeckung und Redundanz optimiert [7]. Während der kritischen Sommermonate kam ein terrestrischer Radar zum Einsatz, welches mit flächigen Geschwindigkeitsmessungen die punktuellen GPS- und Tachymetermessungen ergänzte – dies weitgehend wetterunabhängig. Zusätzlich zum Monitoring wurden Datenerhebungen aus dem Jahr 2019 fortgesetzt (u.a., terrestrische Radar- und Lasermessungen, Drohnenbefliegungen, Geländebegehungen) sowie zusätzliche Untersuchungen durchgeführt (u.a., Bohrungen, Auswertung historischer Luftbilder). Unter Einbezug des Inputs der Zweitmeinung [5] sowie weiterer externer Expertenberichte (u.a., [8], [9]) wurden die erhobenen Daten ausgewertet. Der vorliegende Bericht fasst den aktuellen Stand der Auswertungen zusammen. Die durchgeführten Messungen wurden zudem bewertet und eine Fortführung im Rahmen des Gefahrenmanagements 2021 diskutiert.

2. Ausgeführte Arbeiten

2.1 GEOTEST AG

- Koordination der Bohrarbeiten und Auswertung der erhobenen Bohrlochdaten (Temperatur, Druck, Deformation) [10]

- Koordination des laufenden Monitorings, inkl. Installations- und Unterhaltsarbeiten (Reflektoren, GPS, Kamera, Radar, Regenmesser, Bohrlochinstrumentierung)
- Laufende Auswertungen der Monitoringdaten und wöchentliche Berichterstattung
- Geländebegehungen und Drohnenbefliegungen
- Fotogrammetrische Auswertung der Drohnenfotos, inkl. Geschwindigkeitsberechnungen und Berechnung von Höhenveränderungen
- Auswertung historischer Luftbilder [11]
- Präzisierung 3D Geologisches Modell
- Präzisierung Abbruchszenarien / zu erwartende Entwicklung und Wirkungsräume
- Berichterstattung
- Diverse Sitzungen mit Gemeinde, Abteilung Naturgefahren sowie weiteren Projektbeteiligten

2.2 Dritte

- SLF:
 - Vermessungen terrestrischer Laserscanner (TLS) vom Standort Rosshubel und Auswertung der Messdaten ([8], [9], [12])
 - Verfassen der Zweitmeinung [5]
- Gamma Remote Sensing:
 - Messungen terrestrischer Radar (GPRI) von den Standorten Winteregg und Westgrat
- Geopraevent:
 - Kontinuierliche Messungen terrestrischer Radar (IDS-IBIS) vom Standort Rosshubel im Rahmen des Monitorings
 - Betrieb Monitoring-Plattform
- Wyss+Früh / Flotron:
 - Kontinuierliche geodätische Messungen vom Standort Rosshubel im Rahmen des Monitorings
- Geosat:
 - Kontinuierliche GPS-Messungen Spitze Stei im Rahmen des Monitorings

- Gasser Felstechnik:
 - Bohrungen an den Standorten Westgrat, Gipfel und Zentrum
- CSD Ingenieure:
 - Verfassen der Zweitmeinung [5]
 - Geländebegehungen
- Flotron:
 - Neuprozessierung historische Luftbilder
 - Erstellen Orthofotos / Höhenmodell 2020
- AWN:
 - Diverse Datenauswertungen (u.a., [13])
 - Geländebegehungen
 - Aufnahme Oberflächentemperaturen

Detaillierte Angaben zu den ausgeführten Feldarbeiten sind in Anhang 1 zu finden.

3. Messungen und Geländebefunde 2020

Nachfolgend wird direkt auf die Messungen des Jahres 2020 eingegangen. Vgl. Kapitel 3 in Studie [1] für einen detaillierten geologisch-geomorphologischen Kontext.

3.1 Terrestrische Laserscans (TLS)

Durch das SLF wurden am 20. Juli und 19. September 2020 zwei terrestrische Laserscans des Rutschgebietes erstellt, ergänzend zu den Laserscans der Uni Freiburg aus dem Jahr 2019 [12]. Die Scans wurden vom Standort Rosshubel mittels eines Riegl VZ6000-Scanners erstellt. Die erstellten Punktwolken/Geländemodelle sind räumlich hoch aufgelöst (Auflösung < 0.5 m) und sehr genau (systematische Fehler < 5 cm bei Vergleichen der 2020er-Scans, < 10 cm bei Vergleichen der Scans von 2019 und 2020). Die Messgeometrie führt zu topografiebedingten Abschattungen entlang des Ost- und Westgrates sowie im Gipfelbereich. Der frontale Bereich des Rutschgebietes wird hingegen vollständig abgedeckt (Abbildung 1).

Basierend auf den Geländemodellen wurden zwei komplementäre Produkte abgeleitet:

- Skalare Deformationen rechtwinklig zur Geländeoberfläche (Abbildung 1, weitere Abbildung in Anhang 2), bestimmt durch den Vergleich zweier Geländemodelle entlang der Oberflächennormale.
- Horizontale Deformationsfelder, abgeleitet via Feature Tracking auf den verglichenen Geländemodellen (Abbildung 2, Karten in Anhang 2).

Die Resultate der Auswertungen wurden durch das SLF in zwei Berichten ([8], [9]) dokumentiert und diskutiert.

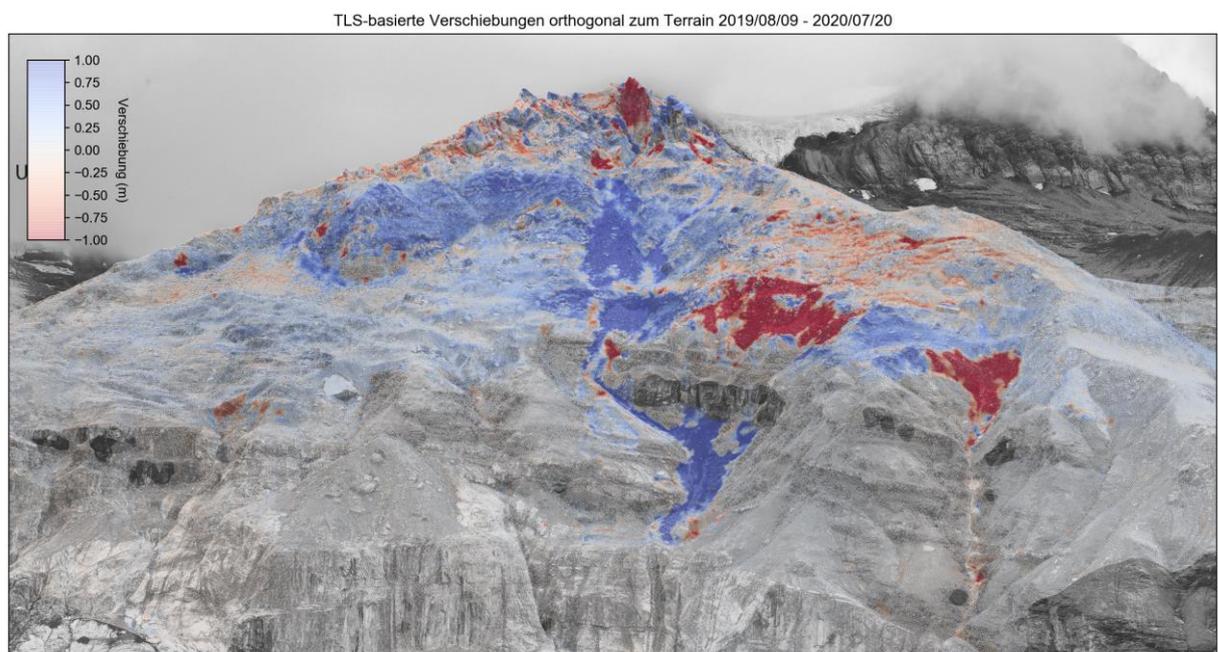


Abbildung 1: TLS-basierte Verschiebungen orthogonal zur Terrainoberfläche für den Zeitraum 09.08.2019 – 20.07.2020. Rottöne zeigen Bereiche, in welchen das Gelände bei der Zweitmessung tiefer lag als bei der Erstmessung (Materialverluste aufgrund plötzlicher Sturz- oder Rutschprozesse oder kontinuierlicher Rutschbewegungen). Blautöne zeigen Bereiche an, in welchen das Gelände bei der Zweitmessung höher lag. Eigene Darstellung basierend auf TLS Daten aus [8] und Aufnahmen der Kamera Rosshubel.

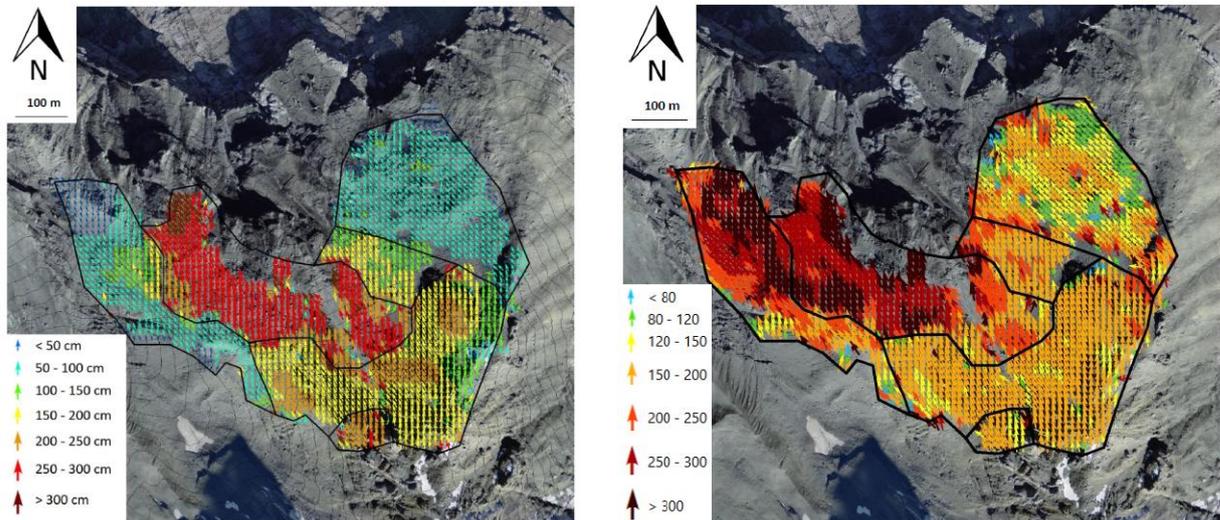


Abbildung 2: Links: Vektorfeld mit den 2D-Deformationen des Zeitraumes 11.07.2019 – 20.07.2020. Darstellung aus [8]. Vgl. Anhang 2 für vergrößerte Kartenansichten mit samt GPS- und Reflektorpositionen. Rechts: Prozentuale Veränderung der Deformationsgeschwindigkeit zwischen den Perioden 20.07.2020 – 19.09.2020 und 11.07.2019 – 20.07.2020. Darstellung aus [9].

Basierend auf den Messresultaten wurde das Rutschgebiet durch das SLF in sechs Sektoren eingeteilt (orange Polygone in Abbildung 3). Die Sektoren 1, 2, 3, und 4 umfassen den Schuttbereich der Rutschung; im Bereich des Sektors 2 befindet sich zusätzlich ein aktiver Blockgletscher (vgl. [1] für eine Zusammenfassung der geologisch-geomorphologischen Situation). Die Sektoren 1 und 2 weisen zwischen 2019 und 2020 2D-Bewegungen von grösstenteils unter 1 m/Jahr auf. Deutlich höhere 2D-Verschiebungsbeträge (ca. 3 m/Jahr) werden im Sektor 4 erreicht (Abbildung 2, links); in diesem Sektor sind auch die saisonalen Beschleunigungen am ausgeprägtesten (Abbildung 2, rechts). In Sektor 3 werden Geschwindigkeiten zwischen 1 und 2 m/Jahr erreicht. Am nordöstlichen Rand des Sektors 3 (gegen Sektor 2) nehmen die Geschwindigkeiten stark ab und am südwestlichen Rand (gegen Sektor 4) stark zu.

Die Sektoren 5 und 6 umfassen den Bereich der Felsrutschung. Sektor 5 zeigt horizontale Verschiebungen von rund 2 m/Jahr (Abbildung 2, links), wobei die horizontalen Verschiebungen mit zunehmender Höhe am Hang tendenziell abnehmen. Gleichzeitig nehmen die gemessenen Setzungen zu (vgl. Karten in Anhang 2), was auf eine Versteilung der Gleitfläche im oberen Bereich hinweist (vgl. nächster Absatz). Sektor 6 zeigt relativ zu Sektor 5 erhöhte Bewegungsraten, welche sich wahrscheinlich infolge der Kippbewegungen der lokalen Felstürme manifestiert.

In [8] wird die Ausbisslinie zwischen den Sektoren 3 und 5 (rote Linie in Abbildung 3) detailliert diskutiert. Der unterhalb der Ausbisslinie anstehende Fels bewegt sich gemäss den TLS-Messungen nicht oder nur minimal, dies in Übereinstimmung mit den GPRI-Messungen von 2019 [16] und 2020 (Abschnitt 3.3), sowie der Auswertung der historischen Orthophotos [11] und der installierten Messreflektoren (Abschnitt 3.5).

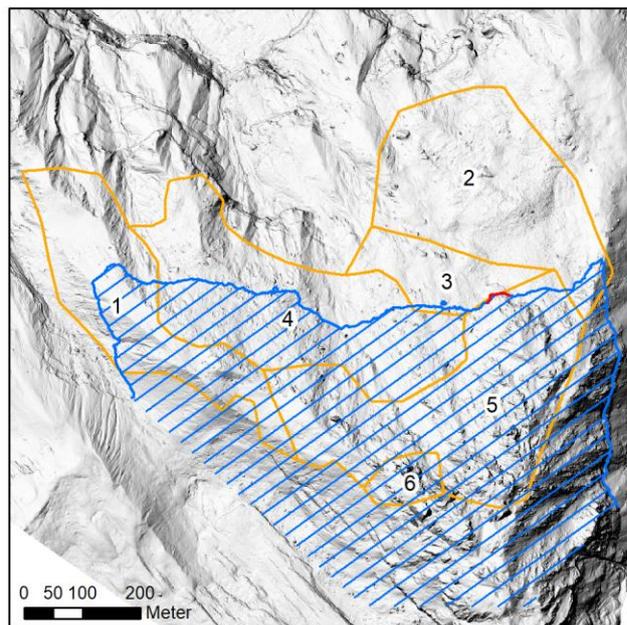


Abbildung 3: Einteilung der Rutschung in sechs Sektoren (orange Polygone) gemäss [8]. Durch die Messungen nicht erfasste Bereiche der Rutschung entlang des Westgrates, des Ostgrates und beim Gipfel liegen ausserhalb der ausgeschiedenen Sektorpolygone. Die blauen Linien entsprechen 10 m Höhenlinien der in [8] berechneten Gleitfläche (21° geneigt, -36° Azimut). Die dicke blaue Linie entspricht der Ausbisslinie der Gleitfläche. Die kurze rote Linie zwischen den Sektoren 3 und 5 markiert den Verlauf der Ausbisslinie im Frontbereich der Felsrutschung. Eigene Abbildung mit Daten/Informationen aus [8] und [9]. Hintergrund: DTM Spitze Stei vom 04.09.2020 [14].

Durch das Abgreifen von 3D-Koordinaten entlang der Ausbisslinie wurde in [8] eine potenzielle Gleitfläche quantifiziert (Ebene mit Oberflächennormale $x: -0.2092$, $y: 0.2892$, $z: 0.9340$). Die Gleitfläche hat einen Neigungswinkel von 21° in Azimutrichtung -36° (-45° entspricht NW, 0° entspricht N). Die Ebene, inkl. Ausbisslinie entlang des Terrains, ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Ebene verläuft entlang des Ost- und Westgrates zu tief, was eine Versteilung der Gleitfläche in den entsprechenden Bereichen wahrscheinlich macht. Die Versteilung der Gleitfläche wird durch die Messungen des 2D-Geschwindigkeitsfeldes (mit zunehmender Höhe abnehmend) sowie den Deformationen entlang der Oberflächennormale (Setzungen

mit zunehmender Höhe zunehmend) gestützt (vgl. Karten in Anhang 2). Der plausible Verlauf der Gleitfläche im Frontalbereich der Rutschung wird dahingehend interpretiert, dass die Sektoren 1, 4, 5 und 6 die gleiche Gleitfläche haben. Die Sektoren 2 und 3 liegen unterhalb der ausgeschiedenen Gleitfläche und verschieben sich entsprechend auf separaten Rutschhorizonten. Die erhöhten Geschwindigkeiten im Sektor 4 können durch sekundäre Gleitflächen (Schuttrutschungen) erklärt werden. Die schnelleren Bewegungen und der erhöhte Massenauswurf aus Sektor 4 könnten die Stabilitätskrise in den oben angrenzenden Sektoren verschärfen (ungünstige Änderung der Lastenverhältnisse Fussbereich des degradierenden Sturzkörpers).

3.2 Drohnen-basierte Messungen

3.2.1 Periode 2019 – 2020

Die im Jahr 2019 initiierten Drohnenbefliegungen des Spitze Stei [1] wurden im Jahr 2020 weitergeführt. Systematische Befliegungen mittels RTK-Vermessungsdrohne fanden am 27. August und am 21. September 2020 statt. Aus den Drohnen- und Daten wurden mittels Structure-From-Motion Fotogrammetrie Höhenmodelle und Orthofotos abgeleitet. Die Genauigkeit der abgeleiteten Höhenmodelle liegt bei rund 10 bzw. 25 cm (horizontal bzw. vertikal) und erreicht damit die Genauigkeit der aus den TLS-Daten abgeleiteten Höhenmodelle nicht ganz. Ein Hauptvorteil der Drohnen- und Daten liegt darin, dass entlang des Ost- und Westgrates keine topographiebedingten Abschattungen auftreten. Die hochaufgelösten Fotos ermöglichen zudem zusätzliche visuelle und automatisierte Auswertungen.

Mittels vergleichender Betrachtung der Höhenmodelle von 2019 und 2020 wurden Höhenveränderungen über das ganze Rutschgebiet bestimmt. Im Gegensatz zu den TLS-Daten wurden die Veränderungen entlang der Vertikalen anstelle der Oberflächennormalen berechnet. Zusätzlich zu den skalaren Höhenveränderungen wurden mittels Feature Tracking (methodisch analog zu [11]) 2D-Bewegungsfelder erstellt. Diese Felder quantifizieren die horizontale Komponente der Verschiebungen und können mit den Bewegungsfeldern der TLS-Daten (Kapitel 3.1) verglichen werden.

Weil beim automatisierten Feature Tracking flächige Bildbereiche verglichen werden, entsprechen Richtung und Betrag des abgeleiteten Geschwindigkeitsfeldes einer geglätteten Version des tatsächlichen Geschwindigkeitsfeldes [11]. Um scharfe Geschwindigkeitsdiskontinuitäten (z.B. im Bereich der Ausbisslinien der Gleitflächen) zu kartieren, wurden sämtliche Daten (geschummerte Höhenmodelle,

Orthofotos, Schrägaufnahmen) in einem GIS visuell analysiert. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden auch Brüche/Schwächezonen kartiert (Abbildung 4) sowie Neigungswinkel/Azimute von klar erkennbaren Schichtflächen eingemessen (Abbildung 5).

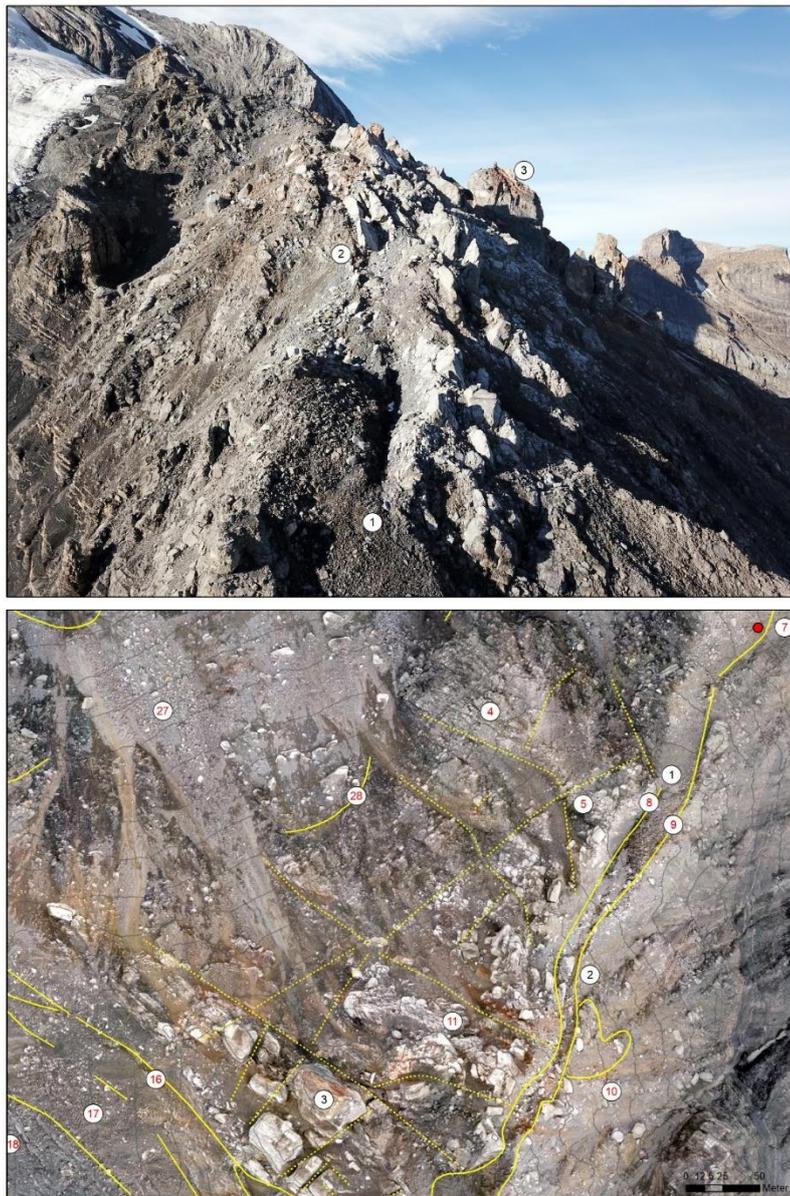


Abbildung 4: Oben: Drohnen-Schrägaufnahme des oberen Ostgrates des Spitze Stei, aufgenommen am 19.08.2020. Unten: Orthomosaik vom 21.09.2020 mit kartierten Geschwindigkeitsdiskontinuitäten (ausgezogene Linien) und Brüchen/Schwächezonen (gestrichelte Linien). Die schwarz nummerierten Punkte in den beiden Panels dienen der räumlichen Orientierung; rot nummerierte Punkte im unteren Panel markieren

Bereiche, welche in Tabelle 1 diskutiert werden. Der Standort der Drohne zum Zeitpunkt der Schrägaufnahme ist im unteren Panel mit einem roten Punkt markiert.

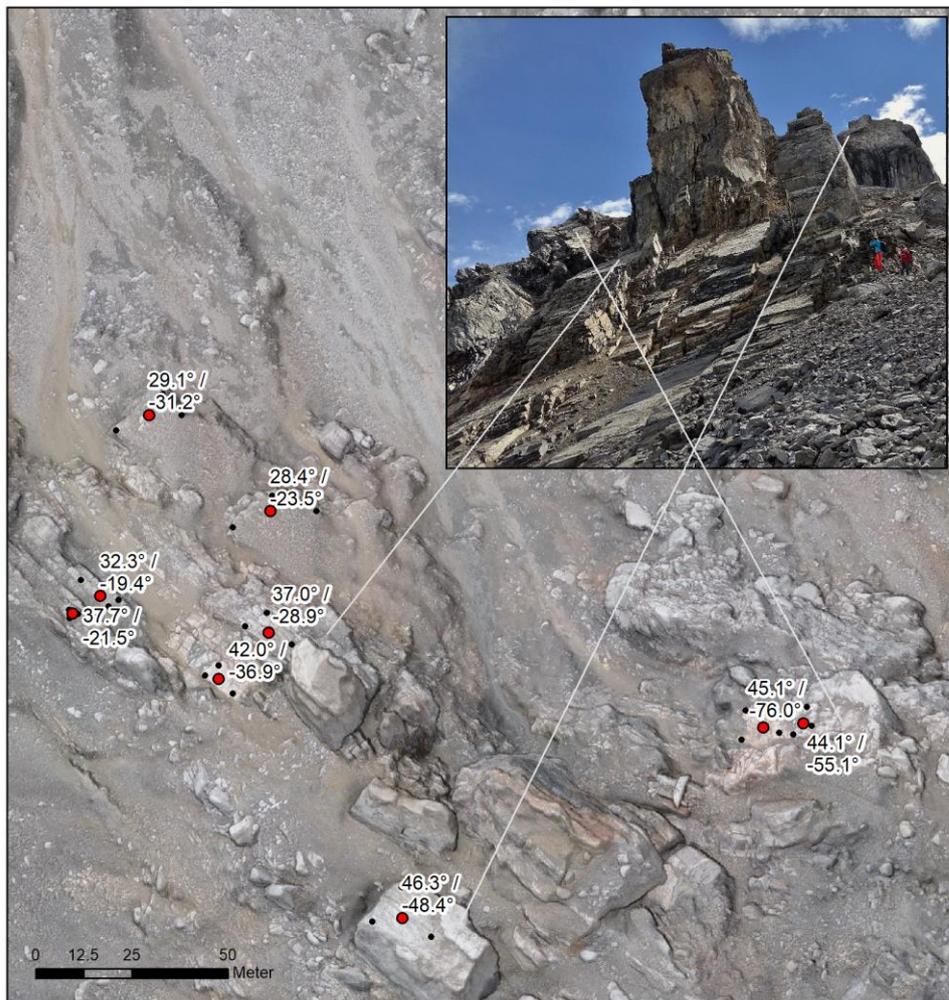


Abbildung 5: Orthofoto mit Neigungswinkeln / Azimuten der eingemessenen Schichtflächen. Bildquelle Inset-Photo: Nils Hählen.

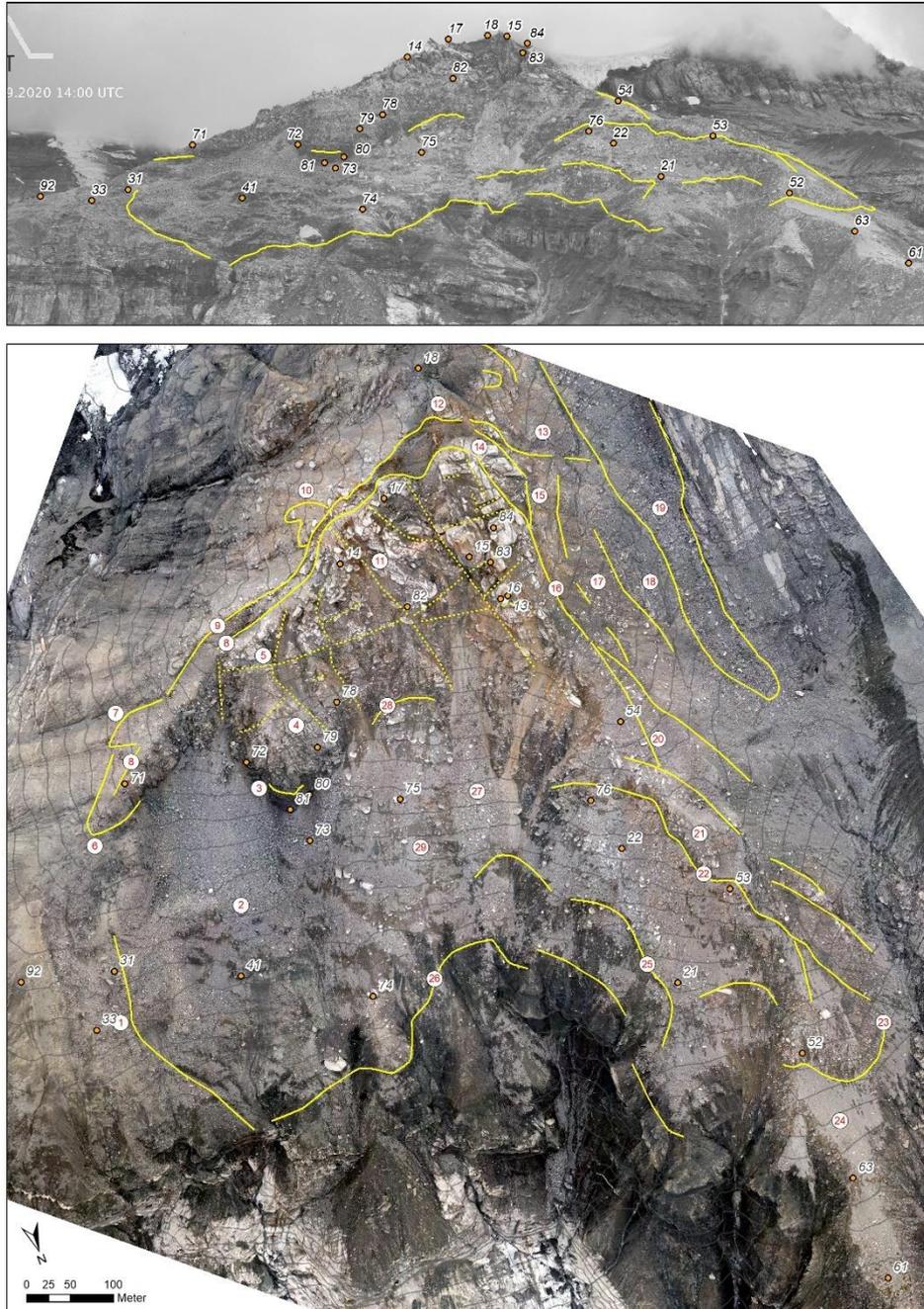


Abbildung 6: Oben: Frontansicht der Rutschung mit projizierten Geschwindigkeitsdiskontinuitäten und Reflektorpositionen (orange Punkte zur räumlichen Orientierung). Unten: Orthomosaik vom September 2020 mit kartierten Geschwindigkeitsdiskontinuitäten (ausgezogene Linien) und Brüchen/Schwächezonen (gestrichelte Linien). Bereiche mit rot nummerierten Punktmarkierungen werden in Tabelle 1 diskutiert. Vgl. Anhang 3 für Karten mit Geschwindigkeitsfeldern und Höhenveränderungen.

Abbildung 6 verortet die kartierten Geschwindigkeitsdiskontinuitäten auf einem Schrägbild und einem Orthophoto. Bereiche mit rot nummerierten Punktmarkierungen werden in Tabelle 1 diskutiert. Mit denselben Punktmarkierungen annotierte Drohnen-Schrägaufnahmen (analog zu Abbildung 4) sind in Anhang 4 zu finden. Die annotierten Karten in Anhang 3 umfassen neben den Diskontinuitäten auch die Bewegungsfelder und Höhenveränderungen für die Periode 2019 – 2020.

Tabelle 1: Beschrieb / Diskussion der Annotationen in Abbildung 6 sowie den Karten in Anhang 3 und 4. Die angegebenen Bewegungsraten reflektieren den Zeitraum 09.08.2019 – 21.09.2020.

Annot.	Beschrieb / Diskussion
①	
1	Übergang zwischen einem nordöstlichen Bereich mit nicht signifikanten Bewegungen (< 5 cm / Jahr) und dem südwestlichen Perimeter des aktiven Blockaletschers.
2	Aktiver Blockgletscher mit Bewegungsraten von ca. 0.8 – 1.0 m / Jahr. Zwischen dem Blockgletscher und dem anstehenden Fels des Ostgrates wird das Gelände von Blockschutt bedeckt, welcher leicht höhere Bewegungsraten aufweist als der Blockgletscher (bis 1.5 m / Jahr).
3	Markante Ausbisslinie einer Gleitfläche im Bereich des anstehenden Felsens. Unterhalb der Ausbisslinie zeigt der anstehende Fels bis hin zum Schutt (beginnt direkt unter Reflektor 81) keine signifikanten Bewegungen.
4	Anstehender Fels oberhalb der Ausbisslinie, mit systematischen Bewegungen (ca. 2.0 – 2.5 m / Jahr) in nord-nordwestlicher Richtung. Der Höhenmodellvergleich (vgl. Karten in Anhang 3) zeigt einen positiven Bewegungstrend (Zunahme der Geländeerhebung). Dies wird dahingehend interpretiert, dass die Gleitfläche der Rutschung in diesem Bereich flacher verläuft als die > 40° steile Geländeoberfläche.

5	Felspaket mit im Vergleich zur Annotation 4 geringeren (< 1 m / Jahr) und stärker nordwärts orientierten Horizontalgeschwindigkeiten (vgl. Karten in Anhang 3). Der Höhenmodellvergleich in diesem Bereich zeigt einen negativen Bewegungstrend (Abnahme der Geländeerhebung). Nördlich des Felspaketes (Bereich GPS 8) verläuft eine diskrete, wahrscheinlich subvertikale Bruchfläche in NE-SW Richtung.
6	Äusserster Bereich mit gemäss Drohnendaten signifikanten Deformationen. Diskontinuität korrespondiert ungefähr mit dem aufgeschlossenen Felskörper.
7	Sekundäre, oberflächliche Rutschung mit Bewegungen in nordöstliche Richtung.
8	Verlauf der aktuellen Ausbisslinie in einem abschnittsweise markant ausgeprägten Nackental, beidseitig von Gratlinien begrenzt. Horizontale und vertikale Versätze im Dekameterbereich.
9	Anrisskante der Rutschung. Zwischen Anrisskante und der aktuellen Ausbisslinie wird die Gleitfläche von labilen nachgleitenden Felspaketen und Schutt überlagert. Südöstlich der Anrisskante werden in den Drohnendaten mit wenigen Ausnahmen (z.B. bei Annotation 10) keine signifikanten Bewegungen detektiert.
10	Sekundäre, oberflächliche Rutschbewegungen in nordöstliche Richtung.

11	<p>Felsbereich mit im Vergleich zur Annotation 4 geringeren horizontalen Geschwindigkeiten (ca. 1.5 – 2.0 m / Jahr) sowie stärker nordwärts orientierten Vektorrichtungen. Der Höhenmodellvergleich zeigt eine Abnahme der Geländeerhebung. Der Höhenverlust dürfte primär darauf zurückzuführen sein, dass die Neigung der Rutschfläche in dem Bereich steiler ist als jene der Oberflächentopografie. Der Bereich unterliegt zudem tendenziell einer Extension, was ein Zusammensacken der Masse und somit eine Absenkung des Geländes begünstigt. Schmelzendes Permafrosteis könnte den Höhenverlust weiter intensivieren, wobei diesem Prozess nur eine untergeordnete Bedeutung zugeschrieben wird.</p> <p>Die kartierten Brüche in dem Bereich verlaufen primär in NW-SE und NE-SW-Richtung.</p>
12, 13	Bereiche ohne signifikante Bewegungen (< 5 cm / Jahr).
14	An die aktuelle Ausbisslinie angrenzender Bereich, topographisch unterhalb des Westgrates liegend. Felskompartimente und Schutt aus diesem Bereich gleiten ähnlich schnell wie die Hauptmasse ab.
15	Ausgeprägte (1.0 bis 1.5 m / Jahr) sekundäre Deformationen im anstehenden Fels, in westlicher bis nordwestlicher Richtung. Wahrscheinlich oberflächlicher Natur.
16	Scharf ausgeprägte Ausbisslinie der Hauptgleitfläche entlang des Westgrates. Östlich der Gleitfläche werden Bewegungsraten von ca. 2.5 m / Jahr erreicht. Im Vergleich zum Ostgrat mit wenig ausgeprägtem Nackental, da die Ausbisslinie weitgehend parallel zur Bewegungsrichtung der Rutschung verläuft.
17	Signifikante Bewegungen (ca. 30 - 70 cm / Jahr) unterhalb der Ausbisslinie der Hauptgleitfläche, wahrscheinlich oberflächliche Bewegungen im Schutt sowie Bewegungen auf der tiefliegenden Gleitfläche reflektierend. Die Bewegungen nehmen in westlicher Richtung ab.

18	Felsbereich mit knapp signifikanten Bewegungen (ca. 20 cm / Jahr), Bewegungen auf der tiefliegenden Gleitfläche reflektierend.
19	Ausgeprägte oberflächliche Bewegungen (bis zu 1.0 m / Jahr) und Setzungen (> 25 cm / Jahr) im eishaltigen Schutt der Grundmoräne des Doldenhorngletschers.
20	Die grataufwärts (Annotation 16) scharf ausgeprägte Ausbisslinie verliert/verzweigt sich aufgrund der mächtiger werdenden Schuttbedeckung zunehmend. Die gemessenen Bewegungsraten nehmen in südwestlicher Richtung über eine Distanz von rund 100 m von > 2.0 m / Jahr auf unter 0.5 m / Jahr ab. Im Schutt gibt es zahlreiche ausgeprägte NW-SE-orientierte Risse.
21	Vergleichsweise stabile Scholle (0.7 m / Jahr) im Randbereich der Rutschung.
22	Markante, durchgehende Anbruchkante einer grossen sekundären Rutschung im Schuttkörper der Westflanke. In der Schuttrutschung werden verbreitet Bewegungsraten von 3.0 – 4.0 m / Jahr erreicht.
23	Lobenförmige Stauchwulst im Frontbereich der Rutschung. Die Qualität des Geschwindigkeitsfeldes ist in diesem Bereich vermindert wegen lückenhaften Drohnendaten von 2019.
24	Bereich ohne signifikante Bewegungen in den Drohnendaten. Die Qualität des Geschwindigkeitsfeldes ist in diesem Bereich vermindert wegen lückenhaften Drohnendaten von 2019.

25	Abrisskanten abgestürzter Schuttpakete im unteren Bereich der Schuttrutschung. Negative Höhendifferenzen (rote Flächen) umfassen Bereiche, in denen Material zwischen 2019 und 2020 abgestürzt ist. Positive Höhendifferenzen (blaue Flächen) umfassen Bereiche, in denen Material seit 2019 ohne grössere Abstürze talwärts geschoben wurde.
26	Untere Begrenzung der Instabilität.
27	Bereich mit Ablagerungen der kollabierten Spitze des Spitze Steis (Ereignis vom Dezember 2019 [15]). Wegen der stark veränderten Oberflächenbeschaffenheit können über den Zeitraum 2019 – 2020 stellenweise keine Bewegungsraten bestimmt werden.
28	Anbruchkante einer weiteren sekundären oberflächlichen Rutschung im Schuttkörper. Die Bewegungsraten unterhalb der Anbruchkante übersteigen 3.0 m / Jahr, oberhalb liegen sie bei rund 2.0 bis 2.5 m / Jahr.
29	Bereich mit starker Geschwindigkeitsabnahme in nordöstlicher Richtung (von rund 2.5 m / Jahr auf 1.0 m / Jahr über ca. 80 m). Der Bereich entspricht wahrscheinlich der östlichen Scherzone der bei Annotation 28 anbrechenden Schuttrutschung. Diese Schuttrutschung dürfte mit der grossen Schuttrutschung der Westflanke (bei Annotation 22 anbrechend) räumlich zusammenhängen, obwohl dies mit den Drohnendaten wegen der Datenlücke um Annotation 27 nicht bestätigt werden kann. Die auf den TLS-Daten vom 20. Juli und 19. September 2020 basierenden Geschwindigkeitsfelder (Anhang 2) stützen die These.

3.2.2 Historische Zeitreihe

Abbildung 7 und Abbildung 8 vergleichen die während der Periode 2019 – 2020 gemessenen 2D-Bewegungsraten mit den in [11] bestimmten historischen Bewegungsraten. Die nachfolgende Liste ergänzt die Erkenntnisse aus [11], welche nach wie vor Gültigkeit haben.

- Der Trend zur Beschleunigung setzt sich generell fort. Besonders markant ist die Beschleunigung im Bereich der Schuttrutschung in der Westflanke (Zone 4 in Abbildung 7; Bereich GPS 5 und 10 in Abbildung 8). Die Schuttrutschung ist generell schneller als die oben angrenzende Felsrutschung.
- Auch im Bereich der Felsrutschung (Zonen 5, 6, 7) ist die Beschleunigung stark ausgeprägt. In Zone 6 sind die Bewegungsraten stark von den Kippbewegungen der Felstürme beeinflusst. Der Kollaps der Spitze des Spitze Steis Ende Dezember 2019 dürfte die besondere Bewegungsentwicklung der Zone 6 (relativ hohe Geschwindigkeiten in der Periode 2017 – 2019, geringere Geschwindigkeitszunahme 2019 – 2020) teilweise erklären.
- In Zone 3 (untere westliche Bereiche des oberen Westgrates) nehmen die Bewegungen seit 2017 nicht signifikant zu. Diese Beobachtung ist im Hinblick auf die Beurteilung der Aktivität der basalen Gleitfläche von Bedeutung (vgl. Kapitel 5).
- Die 2019 – 2020 gemessenen Geschwindigkeiten bei Zone 9 (Felsaufschluss mit Ausbisslinie) sind wahrscheinlich nicht signifikant, sondern ein Effekt der räumlichen Mittelung der Bewegungsraten. Zone 9 dürfte über die ganze historische Zeitreihe stabil sein.
- Im Bereich des Blockgletschers bleiben die Bewegungsraten gleich (Zone 11, GPS 6) oder nehmen ab (Zone 10). Die Abnahme bei Zone 10 (von 2.2 m/Jahr auf 0.9 m/Jahr) ist markant und führt dazu, dass Zone 10 in der Periode 2019 – 2020 ähnliche Bewegungsraten aufweist wie Zone 11. Diese Beobachtungen bestätigen, dass sich die Dynamik des Blockgletschers von jener der Rutschung deutlich unterscheidet. Die Beobachtungen zeigen auch, dass sich schnell bewegende Bereiche innert Jahresfrist stark beruhigen können. Aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheit des Untergrundes (u.a. mehr Eis in Zone 11, [7]) ist die Beobachtung nicht direkt auf andere Zonen (z.B. Zone 4) übertragbar.
- Die Differenz in den Bewegungsraten der Zonen 4 (Schuttrutschung, starke Beschleunigung) und 11 (Blockgletscher, geringe Beschleunigung) wird immer grösser. In der Übergangzone 8 nehmen die Bewegungsraten zu, die Beschleunigung fällt jedoch geringer aus als jene der Zone 4.

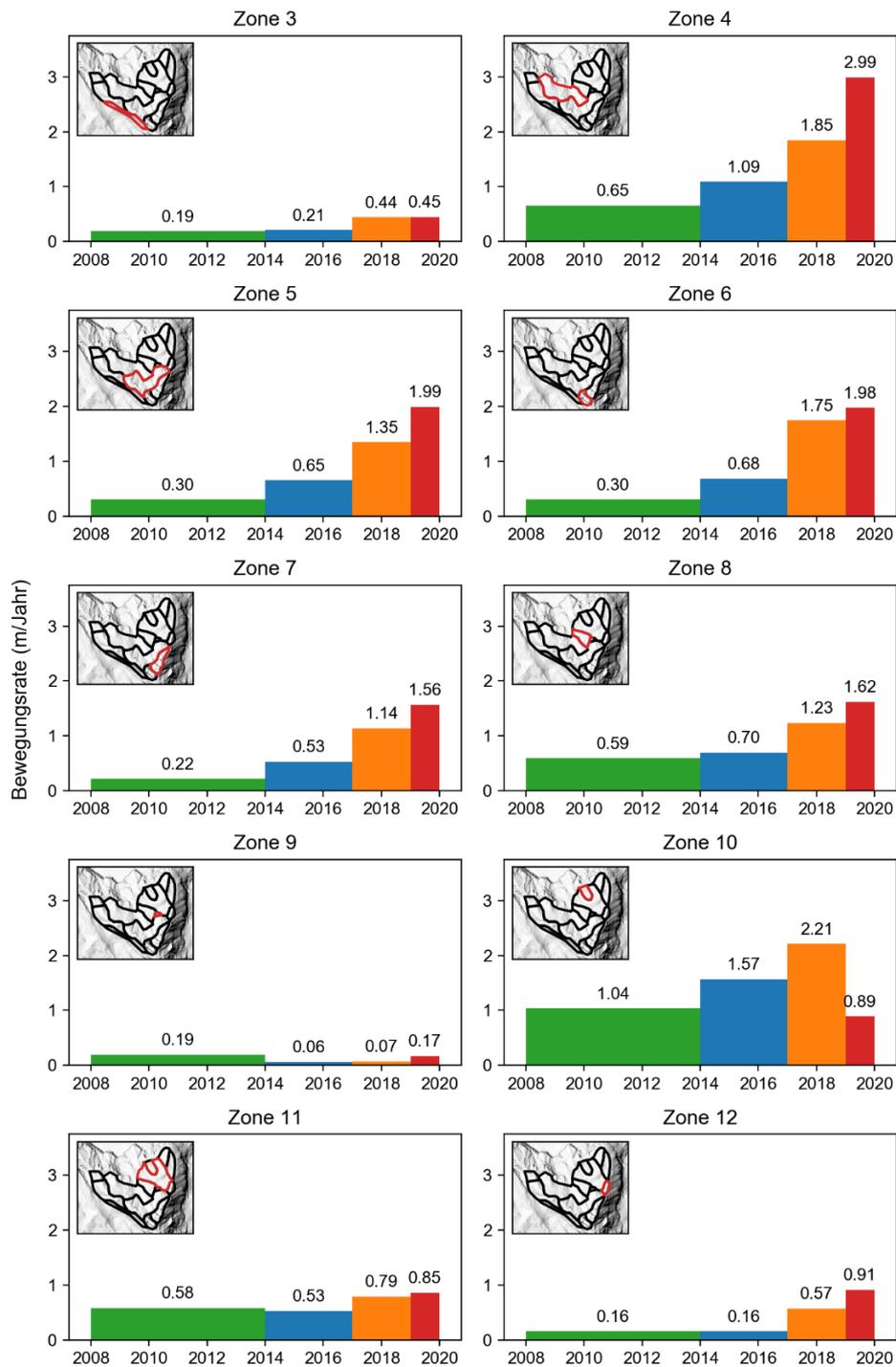


Abbildung 7: Gemittelte 2D-Bewegungsrate (Perioden 2008 – 2014, 2014 – 2017, 2017 – 2019, 2019 – 2020) für die in [11] definierten Zonen der Rutschung Spitze Stei. Die Zonen 1 und 2 werden nicht gezeigt, da die Daten von 2019 in dem Bereich teilweise fehlerhaft sind.

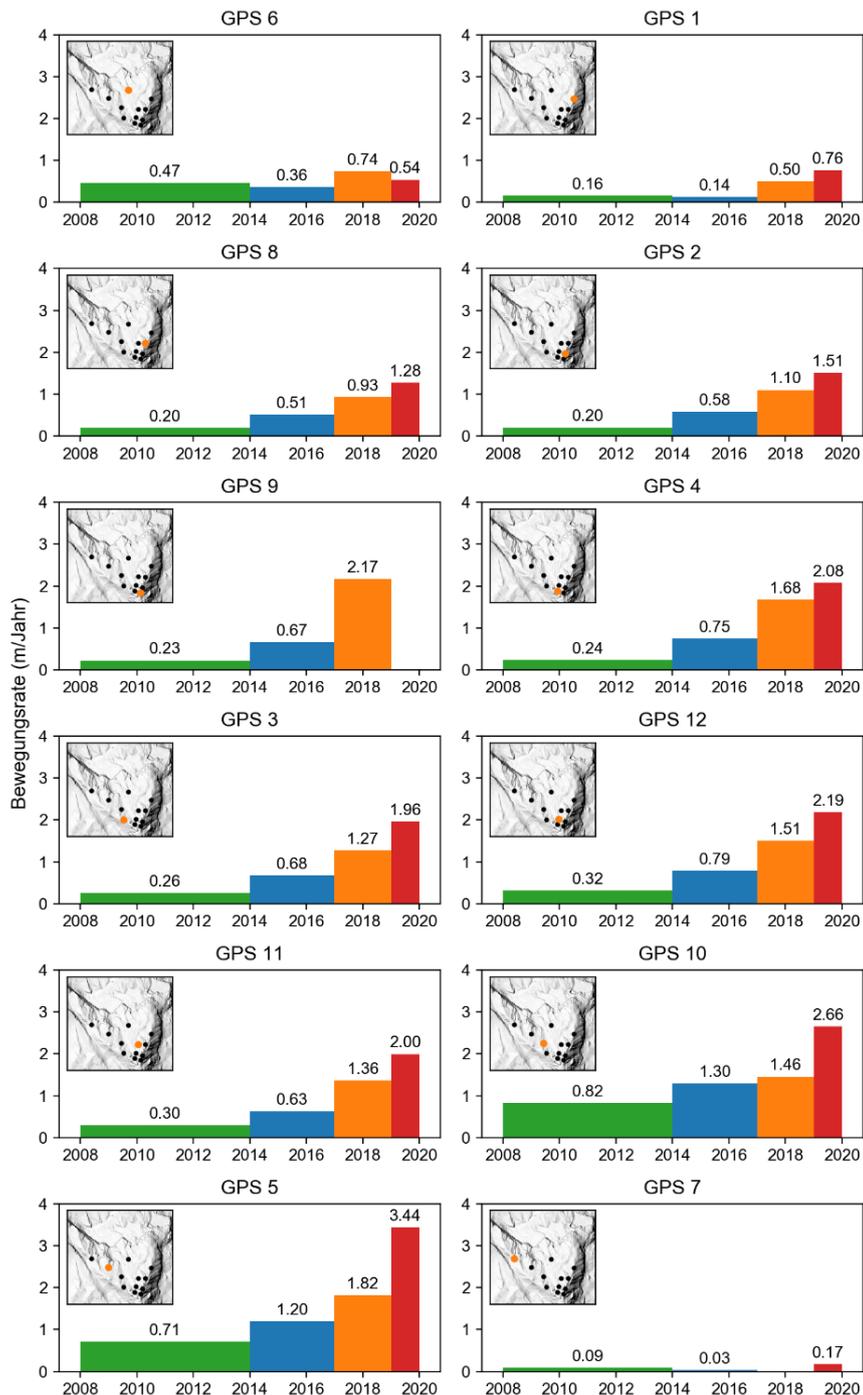


Abbildung 8: Gemittelte 2D-Bewegungsraten (Perioden 2008 – 2014, 2014 – 2017, 2017 – 2019, 2019 – 2020) für 12 GPS-Standorte. Die Geschwindigkeiten wurden in einem Umkreis von 25 m gemittelt. Bei GPS 9 gibt es für die Periode 2019 – 2020, bei GPS 7 für die Periode 2017 – 2019 keine Messwerte.

3.3 Radar-basierte Messungen

Durch Gamma Remote Sensing wurden am 19. August und zwischen dem 24. und 26. August 2020 Messungen mit dem Gamma Portable Radar Interferometer (GPRI) vom Standort Winteregg ausgeführt. Das Ziel der Radar-Kampagne bestand darin, Lage und Verlauf von Ausbisslinie(n) entlang des Ostgrates zu detektieren. Der Bereich lag bei den GPRI-Messungen von 2019 (Standorte Rosshubel, Westgrat) topographiebedingt im Radarschatten [16].

Weitere Messungen wurden beim Standort Westgrat zwischen dem 24. und 26. August sowie am 21. September 2020 durchgeführt. Dies als Ergänzung zu den im Jahr 2019 durchgeführten Messungen beim einem ca. 300 m weiter unten liegenden Standort. Der 2020 gewählte Standort Westgrat bietet eine direktere Sicht in den Gipfelbereich als der 2019 gewählte Standort. Zudem liegt der Messtandort auf einer stabilen Felsplatte (Schutt in 2019), was Wiederholungsmessungen über längere Zeiträume (Monate bis Jahre) ermöglicht.

Das GPRI misst im Ku-Band (17.2 GHz, Wellenlänge: 1.74 cm). Die räumliche Auflösung der Radar-Daten beträgt rund 0.75 m in Slant-Range-Richtung, unabhängig von der Messdistanz. Die Auflösung in Azimut-Richtung nimmt proportional (im Verhältnis von ca. 8:1000) mit der Messdistanz ab und beträgt rund 2 m in 250 m Entfernung vom Radar (Standort Westgrat) bzw. 16 m in 2 km Entfernung vom Radar (Standort Winteregg). Die Topografie des Untersuchungsgebietes beeinflusst die räumliche Auflösung lokal.

Mittels interferometrischer Vergleiche der flächigen Radarbilder wurden Bewegungsraten im Bereich des Rutschgebietes bestimmt. Die Sensitivität der Methodik ist sehr hoch, was eine Detektion von Bewegungen im mm-Bereich ermöglicht. Gleichzeitig reagiert die Methodik sensitiv auf Veränderungen der atmosphärischen Bedingungen (z.B. Luftfeuchtigkeit) oder der Terrainbeschaffenheit, was die Zuverlässigkeit der Resultate unter Umständen verringert. Die abgeleiteten skalaren Geschwindigkeiten reflektieren Bewegungen in Sichtrichtung (line-of-sight, LOS) des Radars. Die LOS-Bewegungskomponente entspricht nur in Ausnahmefällen (Bewegung direkt in Richtung Radar) der tatsächlichen Bewegung. Bewegungen rechtwinklig zur LOS werden vom Radar nicht erfasst.

Um rasche Bewegungen (cm/Tag) zu detektieren, wurden jeweils Radardaten innerhalb der gleichen Messkampagne verglichen (Zeitdifferenz der verglichenen Daten im Bereich von Stunden). Um langsame Bewegungen (mm/Tag) zu detektieren, wurden Daten beider Kampagnen verglichen (Zeitdifferenz der verglichenen Daten im Bereich von Tagen).

3.3.1 Ostflanke

Die vom Standort Winteregg aus gemessenen LOS-Geschwindigkeiten (basierend auf 8-Stunden-Interferogrammen) sind in Abbildung 9 dargestellt. Abbildung 10 zeigt das 6-Tages-Interferogramm, erstellt mit Daten der beiden Radarkampagnen (19. August und 24. – 26. August 2020). Basierend auf den Messdaten wurden von Gamma Remote Sensing Diskontinuitäten ausgeschieden (schwarze Linien in den Abbildungen). Die annotierten Bereiche werden in Tabelle 2 diskutiert.

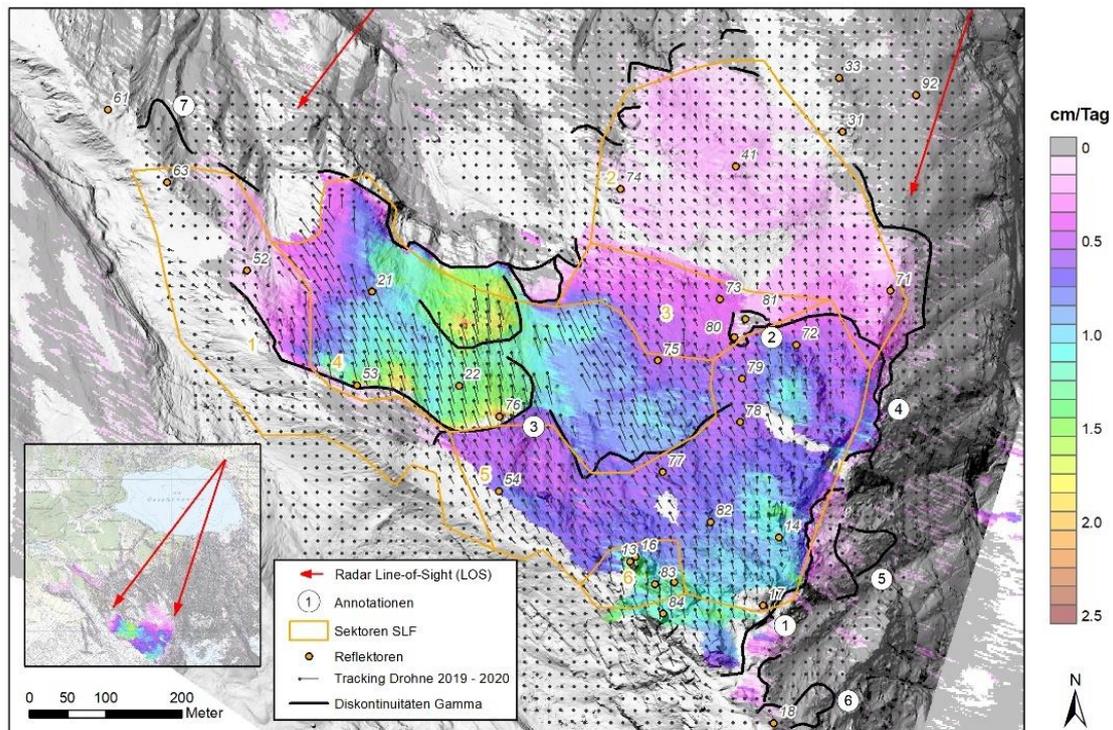


Abbildung 9: LOS-Geschwindigkeiten (cm/Tag, positive Beträge = gegen Radar) berechnet aus den 8-Stunden-Interferogrammen der Messkampagne Winteregg vom 24 – 26. August 2020. Die roten Pfeile entsprechen der Sichtlinie (LOS) des Radars. Aufgrund der beträchtlichen Distanz zwischen Radar am Standort Winteregg und dem Spitze Stei (> 2 km) liegt die Lagegenauigkeit der georeferenzierten Geschwindigkeitsfelder bei rund 10 m. Veränderungen der LOS-Geschwindigkeit können tatsächliche Beschleunigungen/Verlangsamungen widerspiegeln oder Veränderungen der Bewegungsrichtung. Das 2D-Geschwindigkeitsfeld (schwarzes Vektorfeld) wurden von Drohnen abgeleitet (Kapitel 3.2). Im Bericht diskutierte Bereiche sind mit weißen Punkten annotiert. Eigene Darstellung, basierend auf Daten von Gamma Remote Sensing.

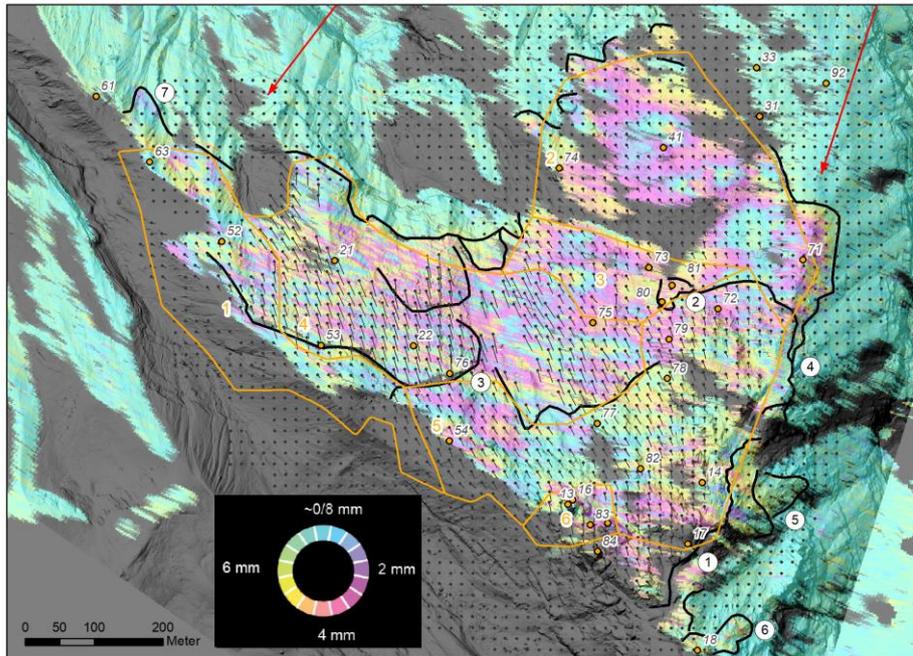


Abbildung 10: 6-Tages-Interferogramm, erstellt mit Daten der beiden Radarkampagnen (19. August und 24. – 26. August 2020).

Tabelle 2: Beschrieb / Diskussion der Annotationen von Abbildung 9 und Abbildung 10.

Annot.	Beschrieb / Diskussion
①	
1	<p>Die Ausbisslinie der Rutschung ist im Gipfelbereich des Spitze Stei klar erkennbar und kann trotz Radarschatten entlang des Ostgrates verfolgt werden. Unter Berücksichtigung der Lagegenauigkeit der georeferenzierten Radardaten stimmt die kartierte Linie mit der aus Drohnendaten abgeleiteten Ausbisslinie überein. Im Gipfelbereich wurde im Bereich von Annotation 1 eine zweite Diskontinuität ausgeschieden. Diese entspricht der in den Drohnendaten (Abbildung 6) mit Annotation 9 annotierten Anbruchkante oberhalb der aktuellen Ausbisslinie. Zwischen Anbruchkante und der aktuellen Ausbisslinie wird die Gleitfläche von labilen nachgleitenden Felspaketen und Schutt überlagert. Die entsprechenden Bewegungen werden vom Radar detektiert.</p>
2	<p>Felskompartiment mit sehr geringen Bewegungen (< 1 mm / Tag LOS). Es handelt sich um das Kompartiment und die dazugehörige Ausbisslinie, welche auch in den TLS Daten, den Drohnendaten sowie den Radardaten 2019 (vom Standort Rosshubel) ersichtlich sind.</p>
3	<p>Scharfe Diskontinuitäten, welche den Anbruchkanten der sekundären Schuttrutschungen entsprechen. Die Diskontinuitäten sind in den weiteren Messdaten (Drohne, TLS) ebenfalls ersichtlich.</p>
4	<p>Bereich mit zwei Diskontinuitäten. Die östliche Linie markiert den Übergang von bewegtem zu unbewegtem Terrain, die westliche Linie einen Bereich mit einem markanten Geschwindigkeitsgradienten innerhalb der bewegten Masse.</p>

5, 6	Die Diskontinuitäten bei den Annotationen 5 und 6 wurden basierend auf den 6-Tages-Interferogrammen (Abbildung 10) ausgeschieden. Die Signale sind nicht eindeutig und könnten auch durch die Atmosphärenkorrektur bzw. lokale Sturzprozesse bedingt sein. Bei Annotation 5 wurden in den Drohnen-daten oberflächliche Bewegungen unterhalb der Anbruchkante festgestellt (Annotation 10 in Abbildung 6). Wegen der höheren Sensitivität des Radars dürfte die radar-basierte Diskontinuität weiter hangabwärts reichen als die drohnenbasierte Diskontinuität.
7	Die 6-Tages-Interferogramme (Abbildung 10) geben Hinweise auf langsame Bewegungen bis in den Bereich des Reflektors 63. Aufgrund des ungünstigen Blickwinkels sind die Bewegungen in Abbildung 9 nur schwach erkennbar.

3.3.2 Westgrat

Das vom Standort Westgrat aus gemessene Geschwindigkeitsfeld (Periode 24. – 26. August 2020) ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Positionierung des Radars relativ zum Bewegungsfeld führt zu positiven Geschwindigkeiten (gegen den Radar) im Gipfelbereich und negativen Geschwindigkeiten (vom Radar weg) im unteren Bereich des Westgrates. Dazwischen verläuft die Bewegungsrichtung rechtwinklig zur LOS, womit keine Bewegungen detektiert werden können. Abbildung 12 zeigt das 26-Tage-Interferogramm vom gleichen Standort, erstellt mit den Daten der beiden Radarkampagnen (24. – 26. August 2020 und 21. September 2020). Ergänzend zeigt Abbildung 13 ein satelliten-basiertes Interferogramm für die Periode 8. September 2020 – 20. September 2020 (rund die Hälfte der 26-Tage Periode). Abbildung 14 entspricht Abbildung 11, zeigt jedoch die im Jahr 2019 gemessenen LOS-Geschwindigkeiten (anderer Standort und Blickwinkel). Die in den Abbildungen annotierten Bereiche werden in Tabelle 3 diskutiert.

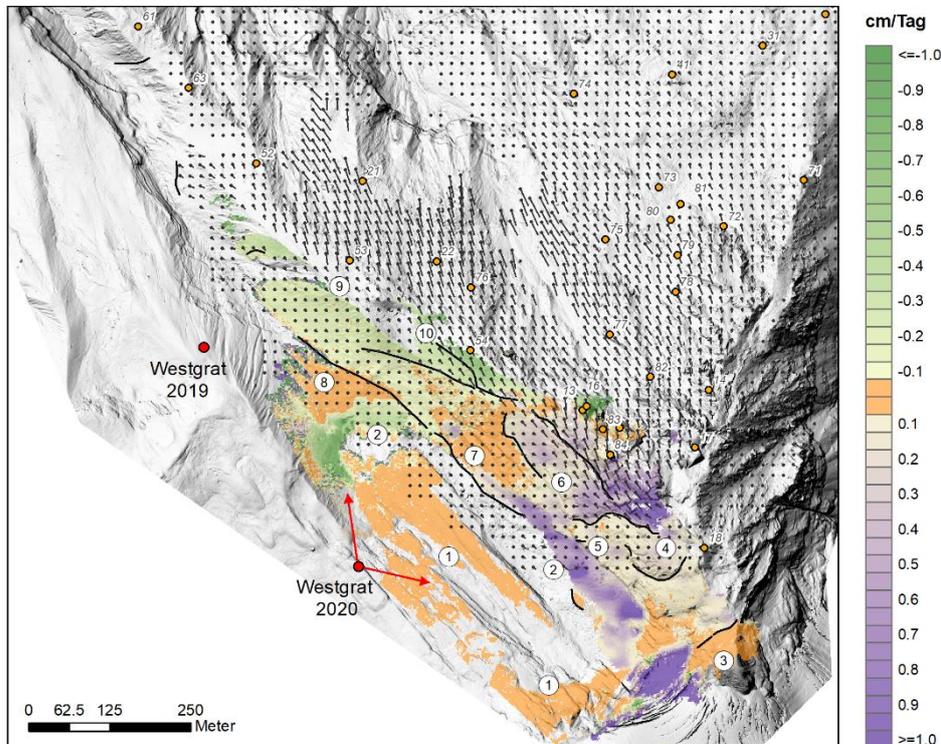


Abbildung 11: LOS-Geschwindigkeiten für den Standort Westgrat (roter Punkt), basierend auf Radardaten der Periode 24. – 26. August 2020. Bewegungen zum Radar hin werden in Violett-Tönen angezeigt, Bewegungen vom Radar weg in Grün-Tönen. Orange eingefärbt sind Geschwindigkeitsbereiche zwischen -0.5 und +0.5 mm/Tag. Veränderungen der LOS-Geschwindigkeit können tatsächliche Beschleunigungen/Verlangsamungen widerspiegeln oder Veränderungen der Bewegungsrichtung. Die angezeigten Resultate wurden adf-gefiltert. Die Filterung kann die absoluten Geschwindigkeiten dämpfen und scharfe Trennflächen glätten. Schwarze Linien entsprechen den von Gamma Remote Sensing basierend auf den 2019 und 2020-Radardaten ausgeschiedenen Diskontinuitäten. Das 2D-Geschwindigkeitsfeld (schwarzes Vektorfeld) wurden von Drohnen abgeleitet. Eigene Darstellung, basierend auf Daten von Gamma Remote Sensing.

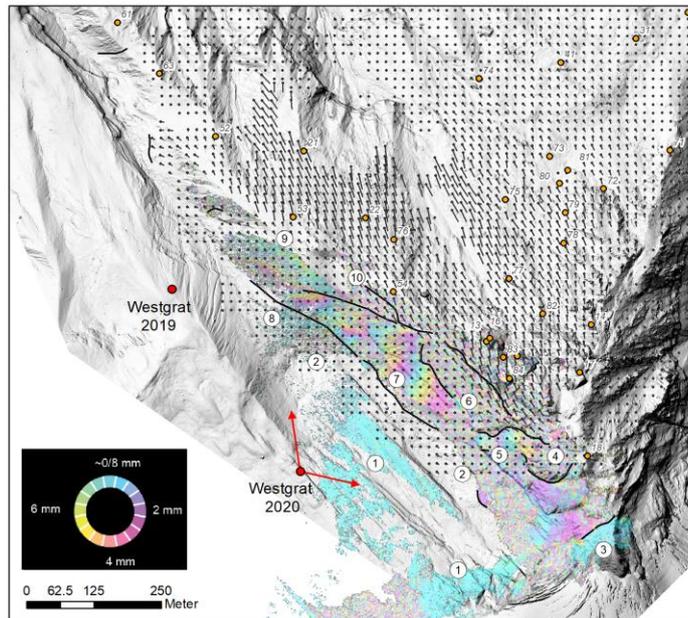


Abbildung 12: 26-Tage-Interferogramm, erstellt mit Daten der beiden Radarkampagnen (24. – 26. August 2020 und 21. September 2020).

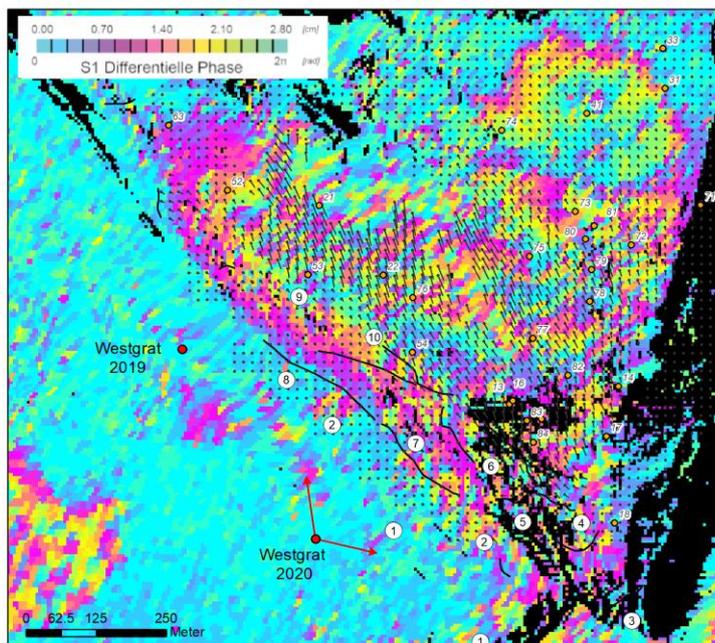


Abbildung 13: Sentinel-basiertes Interferogramm für den Zeitraum 8. September 2020 – 20. September 2020. Das Interferogramm deckt rund die Hälfte des 26-Tage-GPRI-Intervalls (Abbildung 12) ab. Die Sichtrichtung des Satelliten (descending path) stimmt gut mit der Bewegungsrichtung der Rutschung überein. An den violetten

Interferenzfarben um Annotation 7 wird der Verlauf einer tiefen Gleitfläche vom Gipfelbereich bis hin zur Front (Reflektor 63) deutlich. Die violetten Farben entsprechen einer Geschwindigkeit von 0.7 – 0.8 mm / Tag.

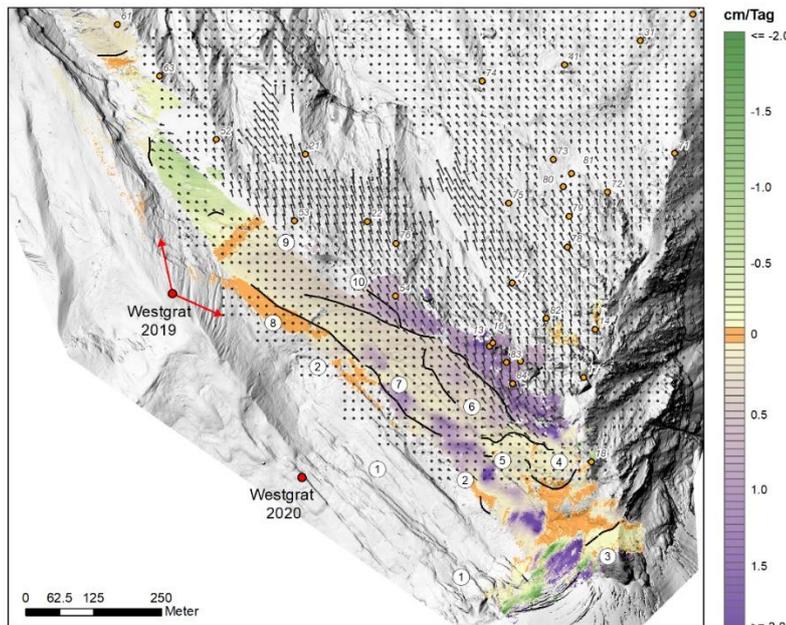


Abbildung 14: LOS-Geschwindigkeiten für den Standort Westgrat (roter Punkt), basierend auf Radardaten der Periode 8. – 9. August 2019. Bewegungen zum Radar hin werden in Violett-Tönen angezeigt, Bewegungen vom Radar weg in Grün-Tönen. Orange eingefärbt sind Geschwindigkeitsbereiche zwischen -0.5 und +0.5 mm/Tag.

Tabelle 3: Beschrieb / Diskussion der Annotationen aus Abbildung 11 – Abbildung 14.

Annot.	Beschrieb / Diskussion
①	
1	Die Felsplatten im Bereich der Annotationen 1 sind stabil. Sowohl über die kurze (Abbildung 11) wie auch die lange Messperiode (Abbildung 12) werden keine signifikanten Bewegungen gemessen.
2	Die markanten Verschiebungen (mehrere mm / Tag in LOS) im Bereich der Annotationen 2 entsprechen Bewegungen/Absenkungen der eisdurchsetzten Grundmoräne. Die Bewegungen sind in den Drohnendaten ebenfalls erkennbar.

3, 4, 5	<p>Die im Bereich 3 – 4 – 5 gemessenen Bewegungsraten sind minimal und nahe bzw. innerhalb des Unsicherheitsbereiches der Radar-Methodik. Ob sich der Bereich 3 – 4 – 5 als Ganzes minimal bewegt, kann basierend auf den Radardaten von 2019 und 2020 nicht abschliessend beurteilt werden. Gesichert ist, dass die Felspartie bei Annotation 3 stabil ist. Nordwestlich von Annotation 3 verläuft eine Diskontinuität hin zu einer wahrscheinlich lokal labilen Felspartie. Auch bei Annotation 4 gibt es Anzeichen für eine instabile Felspartie (ausbauchende Deformation). Der Bereich um Annotation 5 könnte ganz stabil sein oder aber eine minimale Talwärtsbewegung ($\ll 1$ mm / Tag) aufweisen.</p> <p>Satelliten-basierte Radarmessungen (Abbildung 13) können aufgrund des Radarschattens nicht zur Verifizierung herangezogen werden. In den Drohnendaten werden im Bereich keine signifikanten Bewegungen gemessen, geringe Bewegungen (< 10 cm / Jahr) können damit jedoch nicht zuverlässig erfasst werden.</p>
6, 9, 10	<p>Im Bereich der Annotation 6 werden ausgeprägte Bewegungen (ca. 5 mm / Tag LOS) hin zum Radar gemessen. Die Bewegungen stimmen mit den aus Drohnendaten detektierten Verschiebungen überein und werden als oberflächennahes Wegrutschen von Geröll bzw. Felspaketen interpretiert. Die zwischen den Annotationen 4 und 5, sowie nordwestlich der Annotation 4 ausgeschiedenen Diskontinuitäten reflektieren markante Bewegungsabnahmen. Die Diskontinuität nordöstlich der Annotation 4 entspricht der scharf ausgeprägten Ausbisslinie der Felsrutschung des Spitze Stei.</p> <p>Die Annotationen 9 und 10 befinden sich innerhalb der schnellen Rutschmasse der Felsrutschung. Die Diskontinuität bei Annotation 9 markiert eine Zone mit Beschleunigung hin zur Westflanke. Die Beschleunigung ist auch in weiteren Datensätzen erkennbar.</p>

7	<p>Die anstehenden Felsplatten in diesem Bereich weisen in den Auswertungen der August 2020 Daten (Abbildung 11) keine signifikanten Bewegungen auf. Der Blickwinkel vom Standort ist jedoch fast rechtwinklig zur Bewegungsrichtung und die Sensitivität für Bewegungen gering. Das 26-Tage Interferogramm August – September 2020 (Abbildung 12) vom selben Standort liefert klare Hinweise, dass sich die Felsplatten als Ganzes bewegen (Bewegungsraten im Bereich 1 mm/Tag), in Übereinstimmung mit den Auswertungen aus dem Jahr 2019 (Abbildung 14). Das Sentinel-Interferogramm vom September 2020 (Abbildung 13) zeigt für den Bereich Bewegungen in der Grössenordnung von 0.7 – 0.8 mm / Tag an. Auch in den Drohnendaten werden knapp signifikante Bewegungen (ca. 20 cm / Jahr) gemessen. Die Auswertung der historischen Orthophotos [11] zeigt für die Periode 2017 – 2020 ebenfalls signifikante Bewegungen.</p>
8	<p>Trotz günstigem Blickwinkel werden in diesem Bereich keine signifikanten Bewegungen gemessen (Abbildung 11), in Übereinstimmung mit den Messungen von 2019 (Abbildung 14). Nordöstlich von Annotation 8 erscheint eine klare Diskontinuität hin zu einem instabilen Bereich. Diese Diskontinuität, welche auch in den Sentinel-Daten erkennbar ist (Abbildung 13), entspricht der Ausbisslinie der in [1] und [16] bestimmten basalen Gleitfläche, auf der auch die Felsplatten bei Annotation 7 abgleiten dürften. Die Daten deuten darauf hin, dass die Ausbisslinie im Bereich der rasch deformierenden Grundmoräne (Diskontinuität unterhalb Annotation 7) talaufwärts zieht, um dann bei der Diskontinuität zwischen den Annotationen 5 und 6 steil nach oben zu stechen. Rasche oberflächliche Bewegungen in Runsen, Fächern und Grundmoräne überprägen die Diskontinuität in mehreren Bereichen, was eine durchgehende Verfolgung erschwert. Die Beobachtung, dass sich der Bereich um Annotation 5 langsamer zu bewegen scheint als der Bereich um Annotation 7 und die Tatsache, dass Reflektor 18 geringere Bewegungen aufweist als der Bereich um Annotation 7, stützen die These eines Gleitflächenverlaufes zwischen den Annotationen 5 und 6. Talwärts dürfte die Gleitfläche bis hin zu Reflektor 63 verlaufen (Abbildung 13).</p>

3.4 Kamera-basierte Messungen

Das 2019 initiierte Feature Tracking auf den Schrägaufnahmen der Timelapse-Kameras wurde im Jahr 2020 weitergeführt. Bei den Auswertungen wurde auf die am Ostgrat installierte Kamera fokussiert (Übersichtskarte in Anhang 5), da sich deren Sichtfeld (schräg auf den Felsbereich der Rutschung) massgeblich vom Sichtfeld der weiteren Instrumente unterscheidet. Das Sichtfeld der Kamera Rosshubel ist ähnlich wie jenes der weiteren Instrumente (z.B. TLS, Radar). Die Tracking-Resultate der Kamera Rosshubel unterscheiden sich damit nicht wesentlich von den Resultaten dieser Messungen.

Ein Vorteil des Trackings auf Schrägaufnahmen liegt darin, dass das Geschwindigkeitsfeld Teile der horizontalen und vertikalen Bewegungen erfasst. Im Vergleich zu alternativen Messmethoden (z.B. Radar, TLS) ist das Feature Tracking auf Schrägaufnahmen jedoch deutlich weniger sensitiv und genau. Im Fernfeld der Kamera müssen Bewegungen i.d.R. mehrere 10 cm betragen, um zuverlässig detektiert zu werden. Auch nimmt die räumliche Auflösung des Deformationsfeldes im Fernfeld der Kamera ab.

Abbildung 15 zeigt die gemessenen Deformationen der Kamera Ostgrat für den Zeitraum 26. Juli 2020 – 21. September 2020. Das Geschwindigkeitsfeld bildet den scharfen Übergang hin zum aktiven Blockgletscher ab (Punkt 1) und bestätigt damit die Resultate weiterer Messungen (z.B. basierend auf den Drohnen- und Karten in Anhang 3). Ebenfalls deutlich erkennbar sind die Anrissbereiche der Schuttrutschungen Westflanke (Punkt 2) und Zentrum (Punkt 3). Das Geschwindigkeitsfeld zeigt ferner, dass die Deformationen im oberen Bereich des Felskörpers (Punkt 4) eine stärkere Vertikalkomponente aufweisen als die Deformationen im unteren Bereich. Dies stützt die These wonach sich die Gleitfläche mit zunehmender Höhe versteilt.

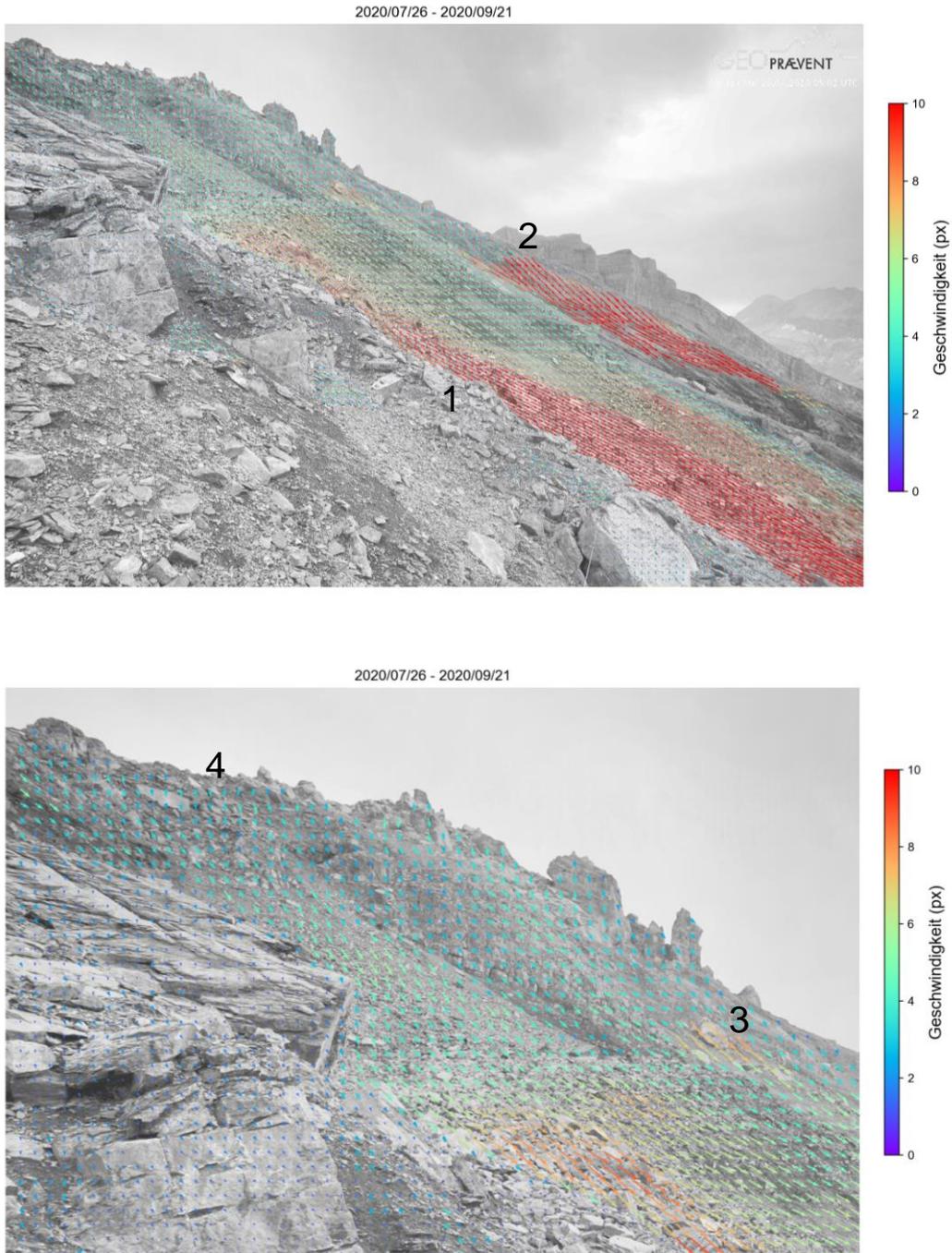


Abbildung 15: Tracking-Resultate Kamera Ostgrat, Zeitraum 26. Juli 2020 – 21. September 2020. Oben: Komplettes Blickfeld der Kamera. Unten: Zoom-in auf den Felsbereich der Rutschung.

3.5 Geodätische Messungen, GPS-Messungen

Per November 2020 wurde das Rutschgebiet mit 28 Messreflektoren und 13 GPS-Sensoren überwacht (vgl. Übersichtskarte in Anhang 5). Die Reflektoren sind über das ganze Rutschgebiet verteilt, während die GPS aus strategischen Gründen (Exponiertheit, Abschattungen) primär in höheren Bereichen der Rutschung (Felsbereich) installiert wurden. Nur GPS 5, 6, 7 und 10 befinden sich in den tieferliegenden, schuttüberlagerten Bereichen der Rutschung; GPS 3 befindet sich im Bereich des Fels–Schutt Überganges.

Mit den installierten GPS werden in stündlichen Intervallen 3D-Koordinaten gemessen; die Genauigkeit der differenziell korrigierten Messdaten liegt bei rund 2 – 3 cm. Die Messreflektoren werden via Totalstation Rosshubel halbstündlich vermessen sofern Sicht zwischen Totalstation und Reflektor besteht. Bei der automatischen Vermessung der Reflektoren werden Schrägdistanzen in Sichtrichtung (LOS) der Totalstation Rosshubel registriert. Die Genauigkeit der gemessenen Schrägdistanzen liegt im cm-Bereich. 3D-Koordinaten der Reflektoren werden nicht automatisiert gemessen, da das Einmessen der Winkel wegen der grossen Messdistanz (fast 3 km) fehleranfälliger ist als das Messen der Schrägdistanzen. Ein manuelles Einmessen der 3D-Reflektorpositionen war per Herbst 2020 nicht mehr möglich, da die Markierungen um die Reflektoren zu stark verblasst waren.

Die geodätischen und die GPS-Messungen bilden dank ihrer hohen zeitlichen Auflösung/Verfügbarkeit ein Schlüsselement des Monitorings Spitze Stei [7]. Nachfolgend werden die Daten mit Fokus auf die Präzisierung des 3D-Modells der Rutschung ausgewertet. Für die GPS konnte mit den vorliegenden 3D-Koordinaten Bewegungsazimute und Gleitwinkel berechnet werden (Abbildung 16, Anhang 6); bei den Reflektoren wurden die Schrägdistanzen analysiert (Abbildung 17).

GPS Trajektorien 2020 (Skalierung: Faktor 50)

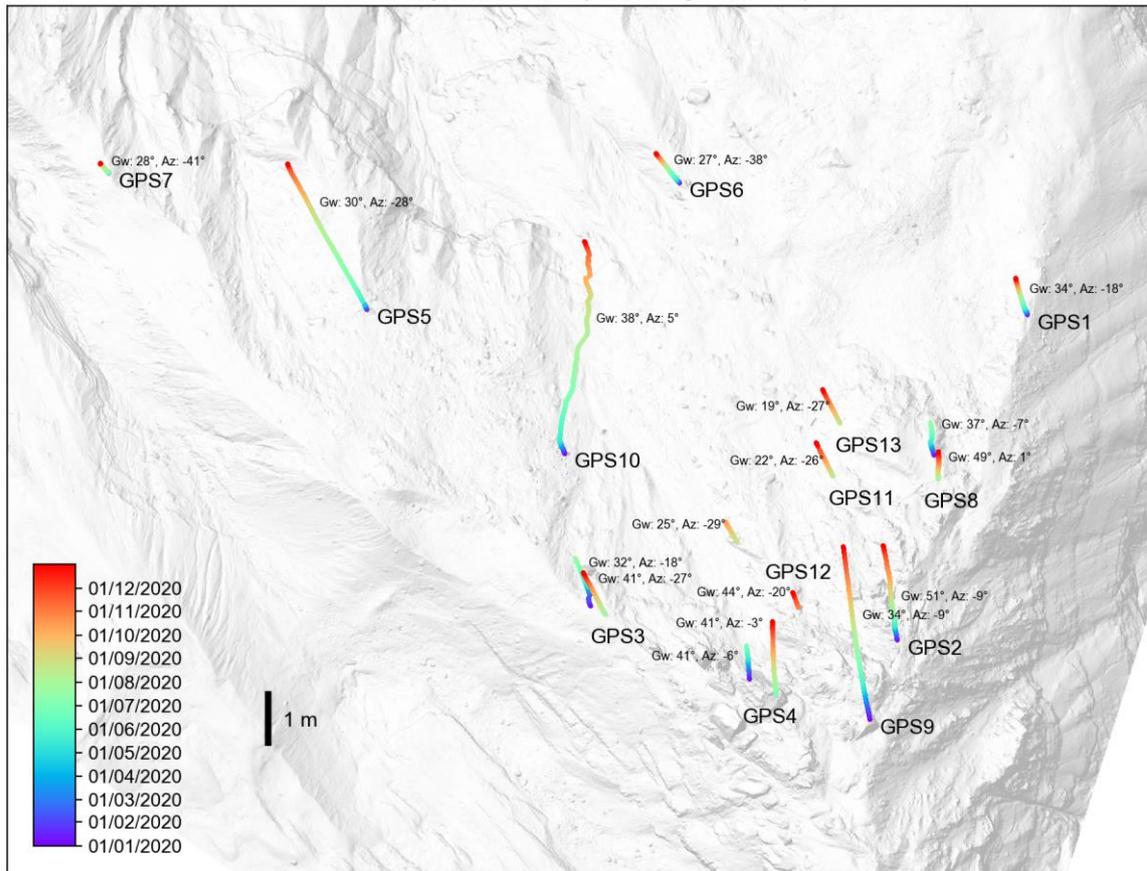


Abbildung 16: GPS-Trajektorien für das Jahr 2020, um Faktor 50 verlängert (vgl. Massstab). Die Farbcodierung der Trajektorien variiert als Funktion der Zeit. Durchschnittliche Gleitwinkel und Azimute sind annotiert. Die GPS 11, 12, 13 wurden erst im August 2020 installiert. Die GPS 3, 4, 8 und 12 wurden während der Saison an neue Standorte versetzt (vgl. Anhang 1).

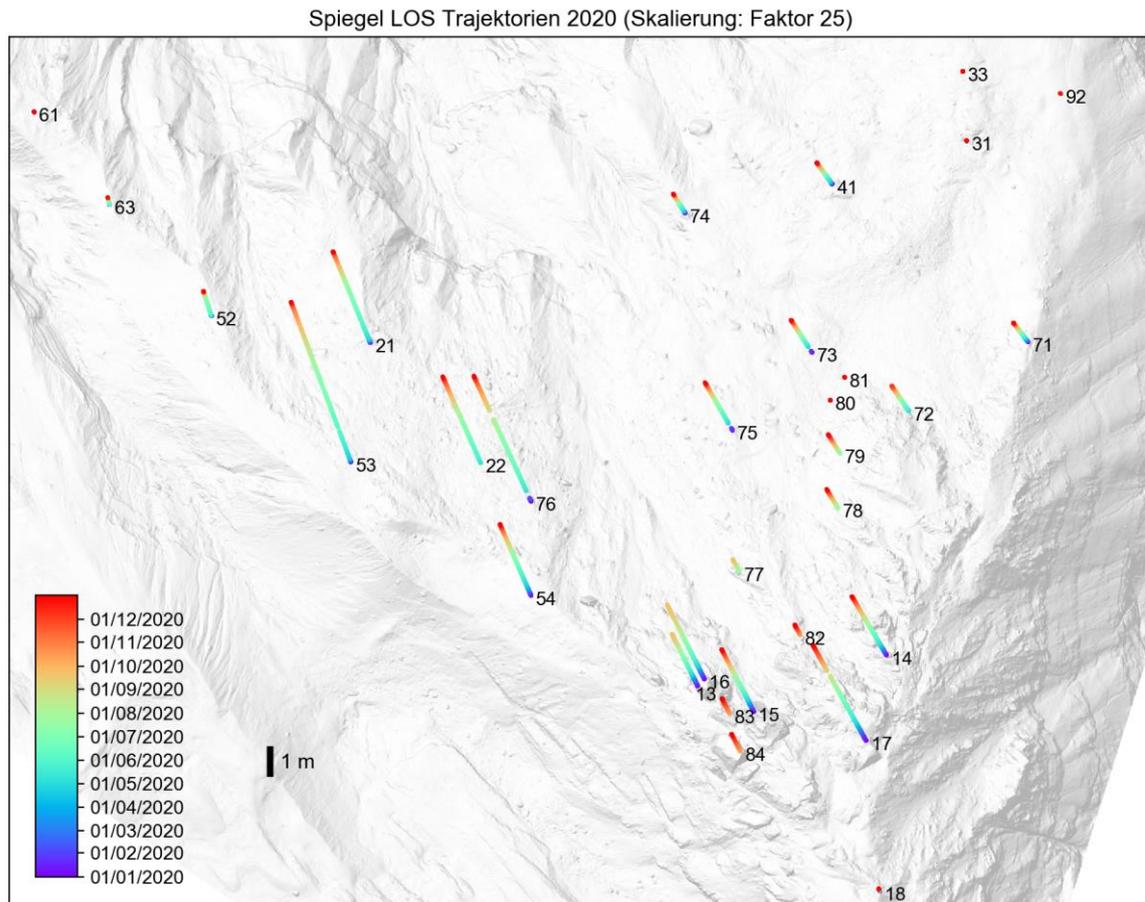


Abbildung 17: LOS-Trajektorien der Messreflektoren in Richtung Totalstation Rosshubel für das Jahr 2020, um Faktor 25 verlängert. Die Farbcodierung der Trajektorien ändert als Funktion der Zeit. Aufgrund später Ausaperung der Messreflektoren bzw. nachträglicher Installation während des Jahres 2020 (vgl. Anhang 1) decken nicht alle Trajektorien den ganzen Zeitbereich ab.

Die nachfolgende Liste ergänzt die letztjährigen Erkenntnisse zu den Bewegungsmustern am Spitze Stei ([17], [1]), welche grundsätzlich nach wie vor Gültigkeit haben.

- Bei den Reflektoren 31, 33 und 92 im nordöstlichen Bereich des Überwachungsgebietes werden nur minimale Bewegungen gemessen (Abbildung 17). Die horizontalen kumulierten Bewegungen in Sichtrichtung der Totalstation betragen seit Mai 2019 weniger als 3 cm (wobei rund 0.5 cm auf eine Neupositionierung der Totalstation im Oktober 2020 zurückzuführen ist). Der Bereich ist zurzeit stabil, in Übereinstimmung mit den weiteren Messdaten (Drohne, TLS). Die Auswertung der historischen Orthofotos

[11] zeigt, dass der Bereich um die Punkte 31 und 33 zwischen 2008 und 2014 noch Bewegungen aufwies (ca. 20 cm / Jahr), sich dann aber beruhigte.

- Bei Reflektor 61 im nordwestlichen Bereich der Rutschung wurden ebenfalls keine signifikanten Bewegungen gemessen (< 5 mm seit Mai 2019, Abbildung 17). Der Bereich ist zurzeit ebenfalls stabil. Auch während der untersuchten historischen Periode (seit 2008) war der Bereich um Punkt 61 stabil.
- Reflektor 18 im Gipfelbereich (Abbildung 17) weist seit Januar 2020 eine horizontale LOS-Bewegung von ca. 7 cm auf, mit einem leichten Beschleunigungstrend. Ob die Bewegungen eine lokale oder eine grössere Instabilität reflektieren, kann nicht abschliessend beurteilt werden, auch unter Einbezug weiterer Messdaten. Die Radardaten Winteregg zeigen im Bereich des Reflektors 18 zwar eine lokale Instabilität (Abbildung 9), deren Existenz/Abgrenzung ist jedoch unsicher. Die weiteren Messmethoden sind zu wenig sensitiv, um Bewegungen im tiefen cm-Bereich zuverlässig zu erfassen. Obwohl nicht gänzlich stabil, sind die Jahresbewegungen bei Reflektor 18 rund 50-mal geringer als jene in der rasch abgleitenden Rutschmasse des Spitze Stei. So bewegte sich das rund 150 m von Reflektor 18 entfernte GPS 9 seit Januar 2020 um rund 3.5 m (nur horizontale Bewegungskomponente berücksichtigt).
- Die Reflektoren 80 und 81 wurden im Oktober 2020 unterhalb der Ausbisslinie im Frontbereich der Felsrutschung installiert. Seit der Installation betrug die LOS-Bewegung weniger als 5 mm, während die Bewegung bei Punkt 72 oberhalb der Ausbisslinie über den gleichen Zeitraum rund 30 cm erreichte (Abbildung 17). Der Felsbereich unterhalb der Ausbisslinie ist daher wahrscheinlich stabil, was durch weitere Messungen (u.a. die TLS-Messungen, vgl. Kapitel 3.1) bestätigt wird. Allenfalls könnte sich der Bereich sehr langsam, womöglich saisonal bewegen. Eine abschliessende Beurteilung kann nach Vorliegen einer längeren Messreihe vorgenommen werden. Diese Messreihe sollte auch die Monate Juli – September umfassen. In diesem Zeitraum wurden bei weiteren Messpunkten (z.B. Reflektor

63¹, Abbildung 17) Bewegungen gemessen, während in den restlichen Monaten kaum signifikante Bewegungen auftraten.

- Die im unteren Felsbereich installierten GPS (11, 12 vor Versetzung, 13) zeigen ein homogenes Verformungsmuster, mit Azimuten in nord-nordwestlicher Richtung (-27° bis -29° von Nord) und flachen Gleitwinkeln um 20 bis 25° (Abbildung 16, Anhang 6). Die Azimute von GPS 3 (vor und nach Repositionierung) liegen in einem ähnlichen Bereich wie die Azimute der GPS 11 – 13, während die Gleitwinkel (30 bzw. 40°) etwas steiler sind. Die bei GPS 3 gemessenen Gleitwinkel und Azimute sind zudem ähnlich wie die Winkel und Azimute der lokal eingemessenen Schichtflächen (Abbildung 5, Azimute zwischen -19° und -36°, Neigungswinkel zwischen 32° und 42°).
- Die GPS im oberen Felsbereich (4, 9, 2, 8) weisen stärker nördlich orientierte Azimute auf als der tiefer liegende Felsbereich um die GPS 11 – 13. Gleichzeitig sind die Gleitwinkel generell steiler (bis zu 50°, Abbildung 16, Anhang 6). Die Variabilität der Azimute und Gleitwinkel ist im oberen Felsbereich erhöht, u.a. weil die GPS auf grossen Blöcken/Pfeilern installiert sind, deren Bewegung von der grossräumigen Bewegung abweichen kann.
- Die Azimute der GPS 5, 6, 7 (-29° bis -44°) im Schuttbereich liegen in einem ähnlichen Bereich wie jene der GPS 11 – 13 (Abbildung 16, Anhang 6). Die Gleitwinkel betragen durchgehend rund 30°. Die Trajektorie des GPS 10 (Bereich Schuttrutschung) weicht deutlich vom grossräumigen Bewegungsmuster ab. GPS 10 ist auf einem im Schutt schwimmenden Block installiert und reflektiert daher lokale Rutschbewegungen und Rotationen dieses Blockes.
- Generell werden mit den Reflektor- und GPS-Messungen die flächigen Resultate aus Feature-Tracking und Höhenmodellvergleichen (Drohne und TLS, vgl. Anhang 2 und 3) bestätigt. Neben den Azimuten trifft dies auch auf die Bewegungsbeträge zu. Die aus den GPS-Daten abgeleiteten Gleitwinkel können nicht direkt mit den Resultaten aus 2D-Feature-Tracking (Lagrangian System) und Höhenmodellverrechnung (Eulerian System)

¹ Im Falle des Reflektors 63 waren die Bewegungen seit Oktober 2020 höher als jene der Reflektoren 80 und 81 (15 mm vs. 5 mm), was für eine höhere Stabilität des Bereiches um die Reflektoren 80 und 81 spricht.

verglichen werden. Tracking im 3D-Raum wäre ideal, um diese Einschränkung zu umgehen.

- Saisonal werden die höchsten Bewegungsraten gegen den Spätsommer erreicht (vgl. Abbildung 18 für die Bewegungsentwicklung der GPS, Anhang 5 für jene der Reflektoren). Im Bereich der Schuttrutschung (z.B. GPS 10, GPS 5) erfolgte die saisonale Beschleunigung abrupt im Laufe des Monats Mai, als Reaktion auf die Erwärmung und dem damit einhergehenden Eindringen von Wasser in den Untergrund (durch die Schneeschmelze im Frühjahr wird Wasser in den Boden infiltriert, was den Frühlings - Zero Curtain auslöst, vgl. Kapitel 3.6). Die Messpunkte in der Schuttrutschung zeigen auch klare Beschleunigungen bei Niederschlagsereignissen [13]. Diese starke und rasche Reaktion im Bereich der Schuttrutschung deutet auf eine vergleichsweise untiefe Gleitschicht und generell wasserdurchlässige Verhältnisse hin.
- Im Felsbereich der Rutschung verläuft die Entwicklung der Bewegungsraten deutlich gedämpfter (Abbildung 18, Anhang 5). So werden minimale Bewegungsraten erst gegen Ende Frühling erreicht. Dies dürfte an der im Vergleich zur Schuttrutschung tiefer liegenden Gleitschicht liegen. Neben Klüften und Hohlräumen, welche eine rasche Wasserinfiltration hin zur Gleitschicht ermöglichen, dürften Bereiche mit reduzierten Wassergängigkeiten die durchschnittlichen Eindringzeiten verlängern.

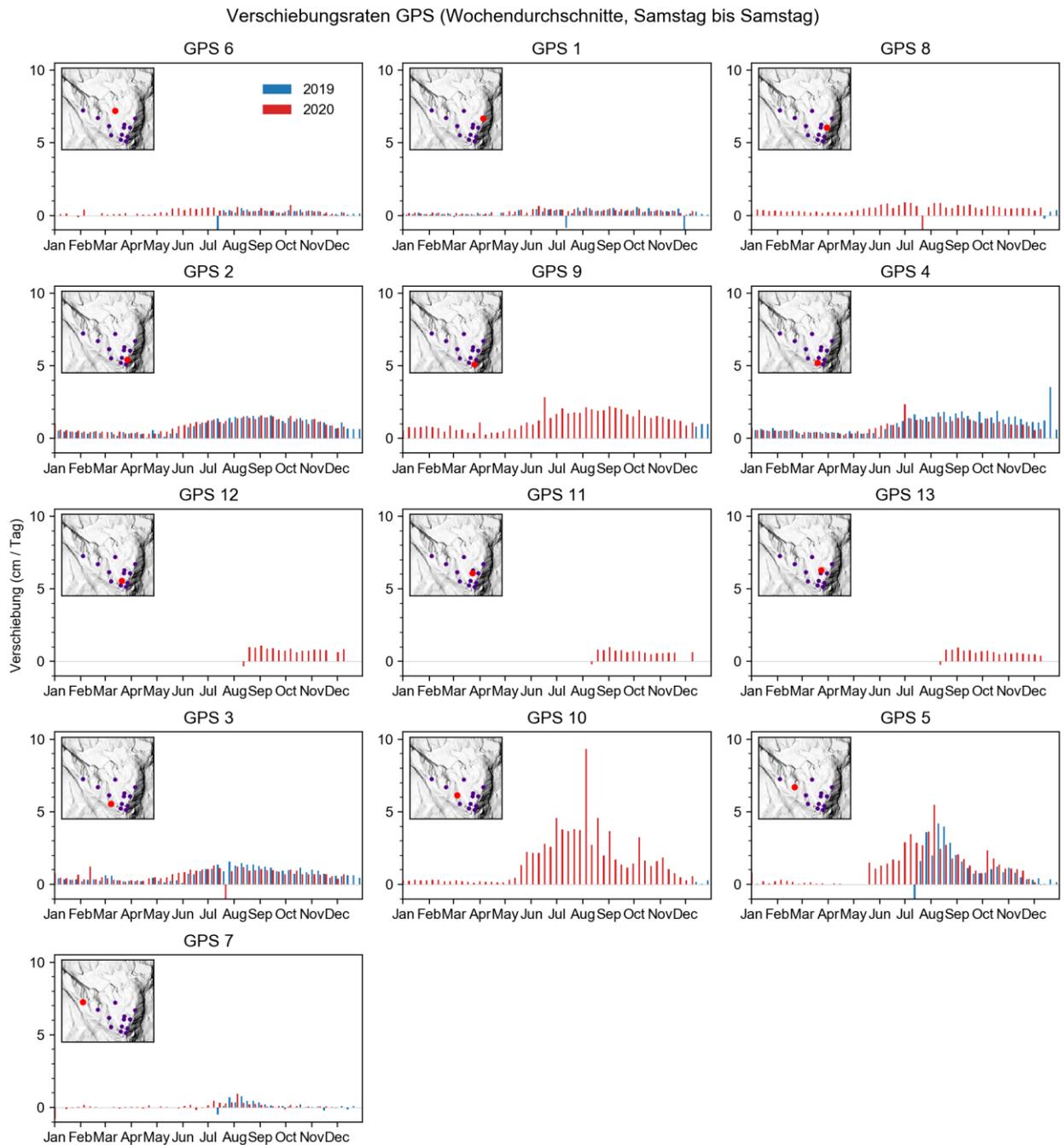


Abbildung 18: Wöchentlich gemittelte Verschiebungsraten für die 13 installierten GPS. Blaue Balken entsprechen dem Jahr 2019, rote Balken dem Jahr 2020. Bei GPS 3 und GPS 4 können die Bewegungsraten von 2019 und 2020 nicht verglichen werden, da die GPS versetzt wurden. Rote Punkte auf den Karten zeigen die GPS-Standorte.

- Die Beschleunigung fand im Jahr 2020 verbreitet früher statt als im Jahr 2019 (vgl. z.B. GPS 2 in Abbildung 18, Reflektor 53 in Anhang 5), wahrscheinlich als Folge erhöhter Frühlingstemperaturen und dem damit verbundenen früheren Eindringen von Wasser in den Untergrund. Insbesondere die Monate April und Mai 2020 waren deutlich wärmer als die entsprechenden Monate im Vorjahr (Abbildung 19). Die im Frühling 2020 entsprechend früher einsetzende Schneeschmelze führte dazu, dass die Station Doldenstock im Jahr 2020 ca. einen Monat früher schneefrei war als im Jahr 2019 (Ende Mai vs. Anfang Juli, Abbildung 20).

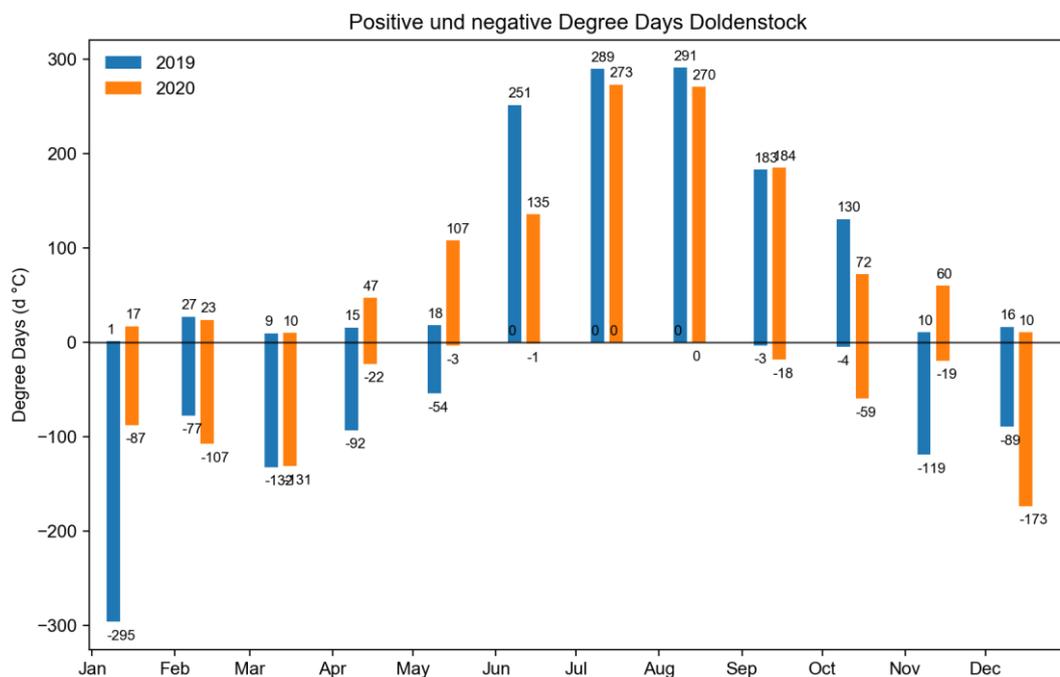


Abbildung 19: An der Station Doldenstock (2560 m ü. M.) gemessene Anzahl positiver und negativer Gradtage (Degree Days) für die Jahre 2019 (blau) und 2020 (orange), aufgeschlüsselt nach Monaten. In den Monaten April und Mai gab es im Jahr 2020 deutlich mehr positive Gradtage (154) als im Vorjahr (33) und damit eine entsprechend erhöhte Schneeschmelze.

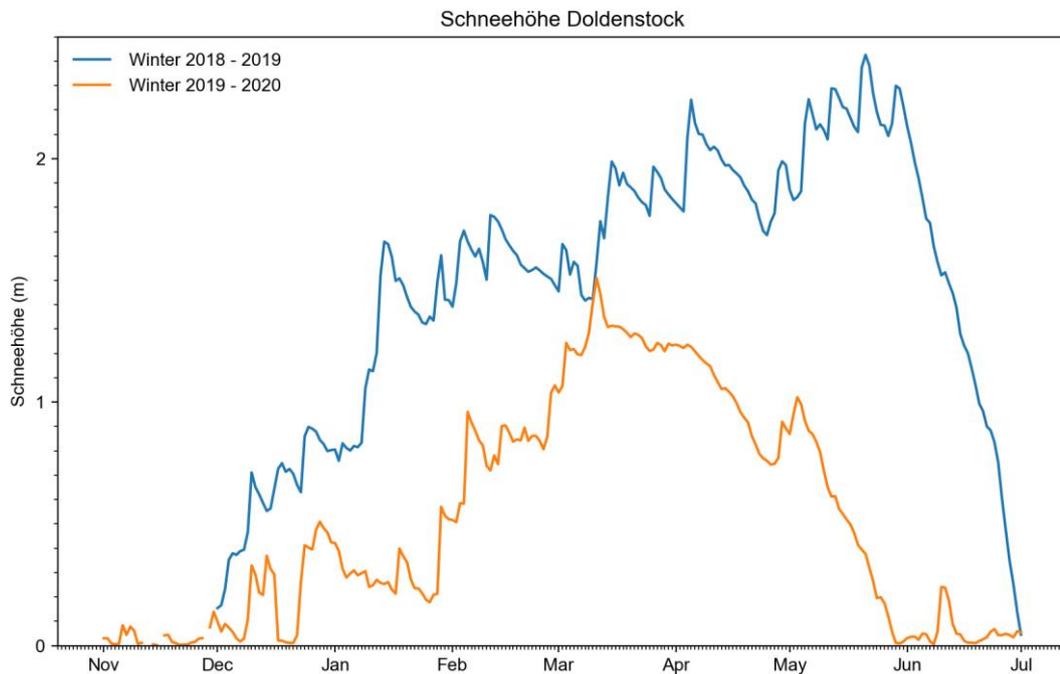


Abbildung 20: An der Station Doldenstock (2560 m ü. M.) gemessene Schneehöhen für die Jahre 2019 und 2020. Aufgrund der generell geringeren Schneemächtigkeit im Winter 2019 – 2020 und der im Frühling 2020 früher einsetzenden Schneeschmelze war die Station Doldenstock im Frühsommer 2020 ca. einen Monat früher schneefrei (Ende Mai vs. Anfang Juli).

- Im Schuttbereich der Rutschung in der Westflanke wurden im Jahr 2020 trotz unterdurchschnittlicher Niederschläge ([13], Abbildung 21) und relativ geringer Verfügbarkeit von Schmelzwasser (geringmächtigere Schneedecke im Frühling 2020, Abbildung 20) verbreitet höhere Geschwindigkeiten gemessen als im Jahr 2019, was als Hinweis auf eine fortschreitende Destabilisierung der Schuttrutschung interpretiert wird. Zunehmend markante Abrisskanten (teilweise mehrere Meter hoch, sichtbar als rotes Band in Abbildung 1 sowie den Abbildungen / Karten in Anhang 2) im Bereich der oberen Westflanke sind deutliche Indikatoren dieser Entwicklung. Im Jahr 2020 gab es auch zwei grössere Abstürze von Schuttmateriale aus dem Frontbereich der Schuttrutschung in das Einzugsgebiet der Chalberspissibäche (vgl. Anhang 7, Perimeter der Abstürze sichtbar in Abbildung 1 sowie den Abbildungen und Karten in Anhang 2).

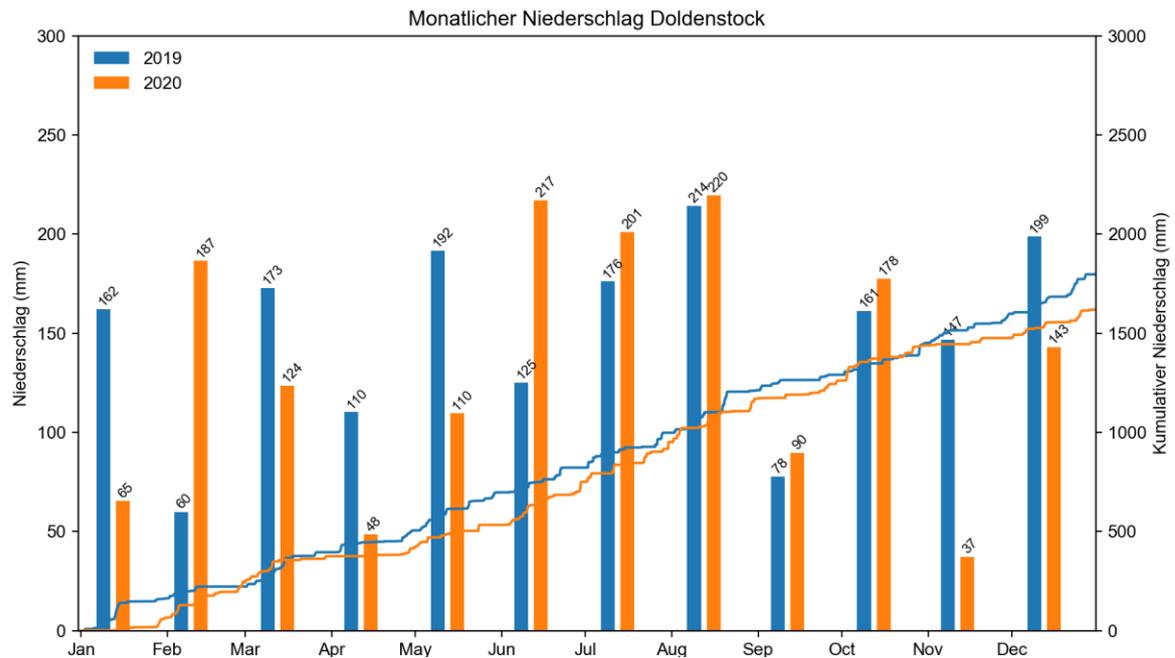


Abbildung 21: Monatliche Niederschlagssummen für die Station Doldenstock (2560 m ü. M.) für die Jahre 2019 und 2020 (Balken, linke vertikale Achse). Linien zeigen die kumulativen jährlichen Niederschläge der beiden Jahre (rechte vertikale Achse).

- Die Bewegungsraten im Felsbereich der Rutschung sind im Vergleich zum Jahr 2019 gleichbleibend bzw. nur leicht erhöht² (Abbildung 18, Anhang 5). Zwischen 2018 und 2019 hatten die Bewegungen noch stark zugenommen [17]. Trotz diesem Hiatus, welcher teilweise auf die geringe Schmelzwassererfügbarkeit im Jahr 2020 zurückzuführen sein dürfte, sind die Bewegungen im Felsbereich der Rutschung sehr hoch (Abbildung 16). Kleine und mehrere mittelgroße Sturzereignisse zeugten auch 2020 von der sehr hohen Aktivität im Gebiet (vgl. Anhang 7). Prominent war der Kollaps des Felsturmes bei den Reflektoren 13 und 16 am 12. Oktober (Beschleunigungskurve in Anhang 5, Fotodokumentation Anhang 7).
- Im Bereich Zentrum gab es am Morgen des 31.08.2020 eine spontane Beschleunigung um ca. Faktor 10 (bei Reflektor 75 wurden innerhalb ca. 5 Stunden 4 cm Verschiebung gemessen, bei Reflektor 73 ca. 1 cm), ähnlich

² Diese Beobachtung steht nicht im Widerspruch zu der in Abbildung 7 und Abbildung 8 gezeigten ausgeprägten Beschleunigung. Beim Feature Tracking umfasst die letzte Messung (2019 – 2020) die Bewegungsraten aus den Jahren 2019 und 2020, während hier die Bewegungsraten aus den Jahren 2019 und 2020 verglichen werden.

wie beim Ereignis vom 13.11.2019 ([1], ca. 10 cm Verschiebung innerhalb 5 Stunden bei Reflektor 75, 2 cm bei Reflektor 73). Bei beiden Ereignissen beruhigte sich die mobilisierte Masse ohne nachfolgenden Absturz wieder. Dem Ereignis vom 31.08.2020 ging eine regnerische Periode voraus (ca. 70 mm Niederschlag seit dem 28.08.2020), während das Ereignis vom 13.11.2019 bei trockenen Bedingungen und Umgebungstemperaturen unterhalb des Gefrierpunktes stattfand³. Beim diesjährigen Ereignis konnte der Perimeter der beschleunigten Masse mittels Radar räumlich abgegrenzt werden (Abbildung 22). Der Bereich (ca. 40'000 m²) verläuft von der markanten Abrissnische der Schuttrutschung unterhalb des Felsbereiches bis ca. 100 m oberhalb von Reflektor 74. Reflektor 75 befindet sich im Zentrum der destabilisierten Masse, Reflektor 73 im Randbereich. Das Volumen der spontan beschleunigten Masse wird auf rund 400'000 m³ geschätzt. Beim Ereignis wurde der untere Bereich der Schuttrutschung Zentrum von der Beschleunigung nicht erfasst. Die westliche Begrenzung des beschleunigten Perimeters verläuft entlang einer Diskontinuität (subvertikale Scherzone) im drohnen-basierten Geschwindigkeitsfeld (Abbildung 22). Eine lokale Spannungsumlagerung, wie in [5] propagiert, dürfte damit die wahrscheinliche Ursache für die spontane Beschleunigung sein. Im Falle des Ereignisses von 2020 dürften die Niederschläge bei der Auslösung eine wichtige Rolle gespielt haben. Ob es ohne den stabilisierenden unteren Bereich der Schuttrutschung zu einem Absturz gekommen wäre, kann nicht abschliessend beurteilt werden.

³ Trotz negativer Umgebungstemperaturen war der Boden zum Zeitpunkt des Ereignisses noch frostfrei (Datenquelle: Bohrlöcher Doldenstock).

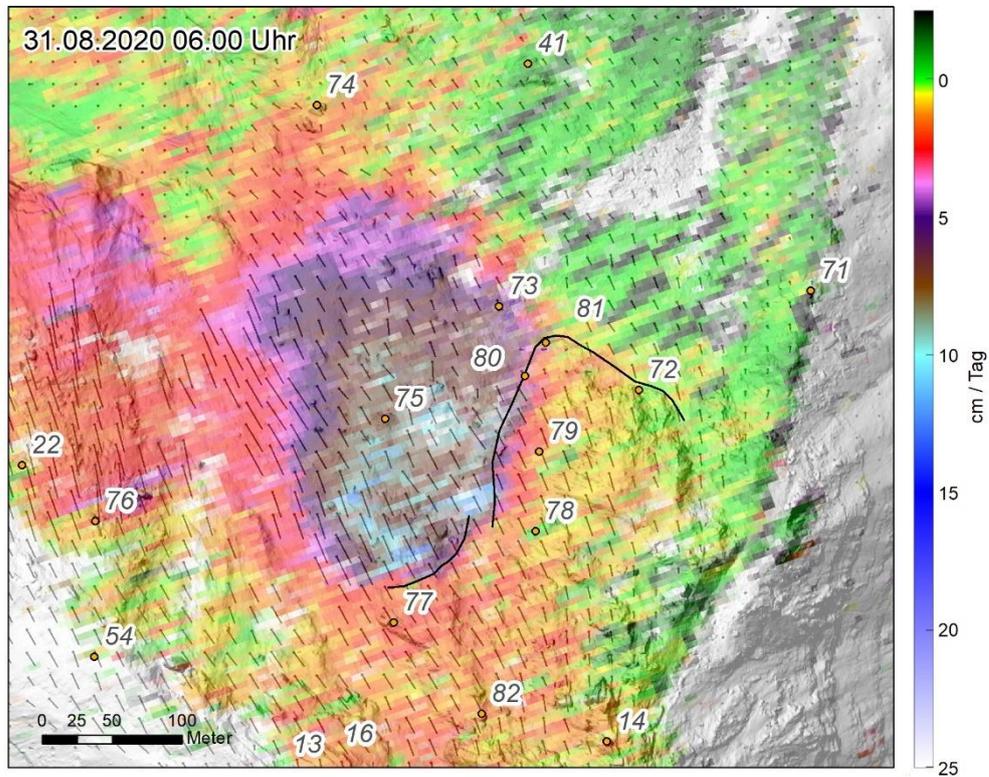


Abbildung 22: Vom Radar Rosshubel am 31.08.2020, 06.00 Uhr gemessene LOS-Geschwindigkeiten. Reflektor-Positionen werden mit orangen Punkten angezeigt. Die blau-braun-violette Fläche um Reflektor 75 entspricht dem beschleunigten Bereich der Schuttrutschung Zentrum. Die schwarzen Linien entsprechen dem unabhängig kartierten Schutt – Fels Übergang. Das von den Drohnendaten 2019 – 2020 abgeleitete 2D-Geschwindigkeitsfeld (schwarze Vektoren) wird zur Referenz angezeigt.

3.6 Bohrlochmessungen (Temperatur / Wasserdruck / Deformation)

Zwischen Januar und Februar 2020 wurden im Rutschgebiet Spitze Stei vier Tastbohrungen abgeteuft (Abbildung 23). Eine Bohrung (TB1) wurde für Deformationsmessungen ausgebaut. Drei weitere Bohrungen (TB2 bis TB4) wurden mit Thermistorenketten (digitale Sensoren der Firma Terratransfer, Genauigkeit nach Kalibrierung ca. 0.05°C) und Drucksensoren (Geokon 4500) instrumentiert (Tabelle 4). Die Arbeiten wurden in einem separaten Bericht [10] dokumentiert.

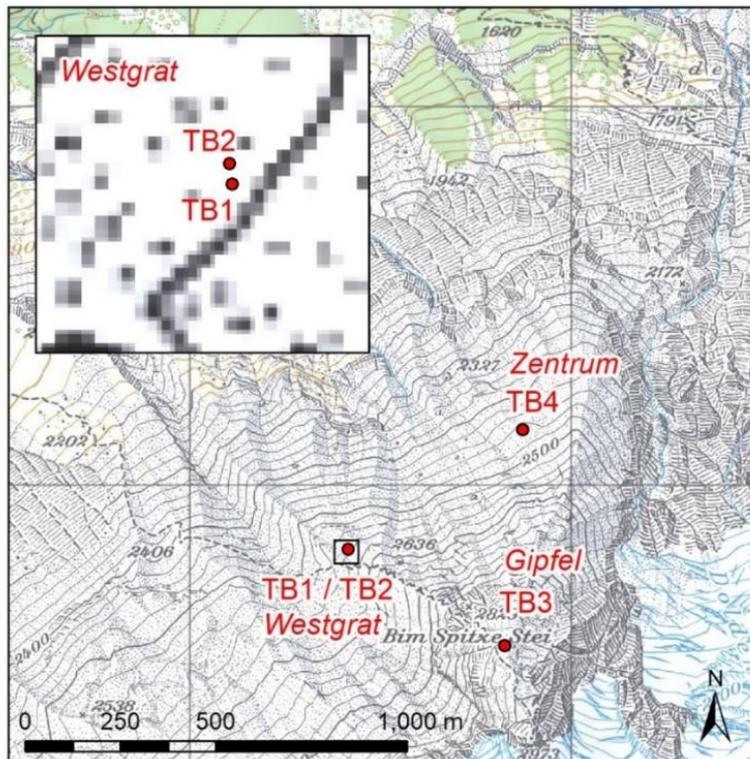


Abbildung 23: Bohrstandorte am Spitze Stei. Der vergrößerte Kartenausschnitt zeigt die Lage der Bohrungen TB1 und TB2 am Westgrat.

Tabelle 4: Standort, Bohrtiefe und Instrumentierung der ausgeführten Tastbohrungen am Spitze Stei

Name	Standort Koordinaten	Bohrtiefe (geplant, erreicht, verrohrt/instrumentiert)	Instrumentierung
TB1	Westgrat 2'621'420 / 1'147'820 2'562 m ü. M.	60 m, 46 m, 26 m	Inklinometerrohr
TB2	Westgrat 2'621'420 / 1'147'830 2'560 m ü. M.	40 m, 45 m, 40 m	Thermistoren / Drucksensoren

TB3	<i>Gipfel</i> 2'621'830 / 1'147'570 2'844 m ü. M.	40 m, 40.5 m, 30 m	Thermistoren / Drucksensoren
TB4	<i>Zentrum</i> 2'621'880 / 1'148'140 2'462 m ü. M.	30 m, 41.5 m, 30 m	Thermistoren / Drucksensoren

3.6.1 Inklinometermessungen TB1

Die Inklinometer-Nullmessungen bei TB1 wurde am 8. Februar 2020 durchgeführt. Bis am 9. Oktober 2020 fanden fünf Folgemessungen statt (Tabelle 5). Da bei den ersten Folgemessungen nur geringe Deformationen gemessen wurden (innerhalb der Messgenauigkeit von ca. 1 cm), wurde das Zeitintervall zwischen den Messungen ab Folgemessung 4 deutlich verlängert.

Tabelle 5: Daten der im Jahr 2020 ausgeführten Inklinometermessungen.

Datum	Messung	Zeitdifferenz (Tage)
08.02.2020	Referenz	-
20.02.2020	Folgemessung 1	12
11.03.2020	Folgemessung 2	20
03.04.2020	Folgemessung 3	23
21.07.2020	Folgemessung 4	109
09.10.2020	Folgemessung 5	80

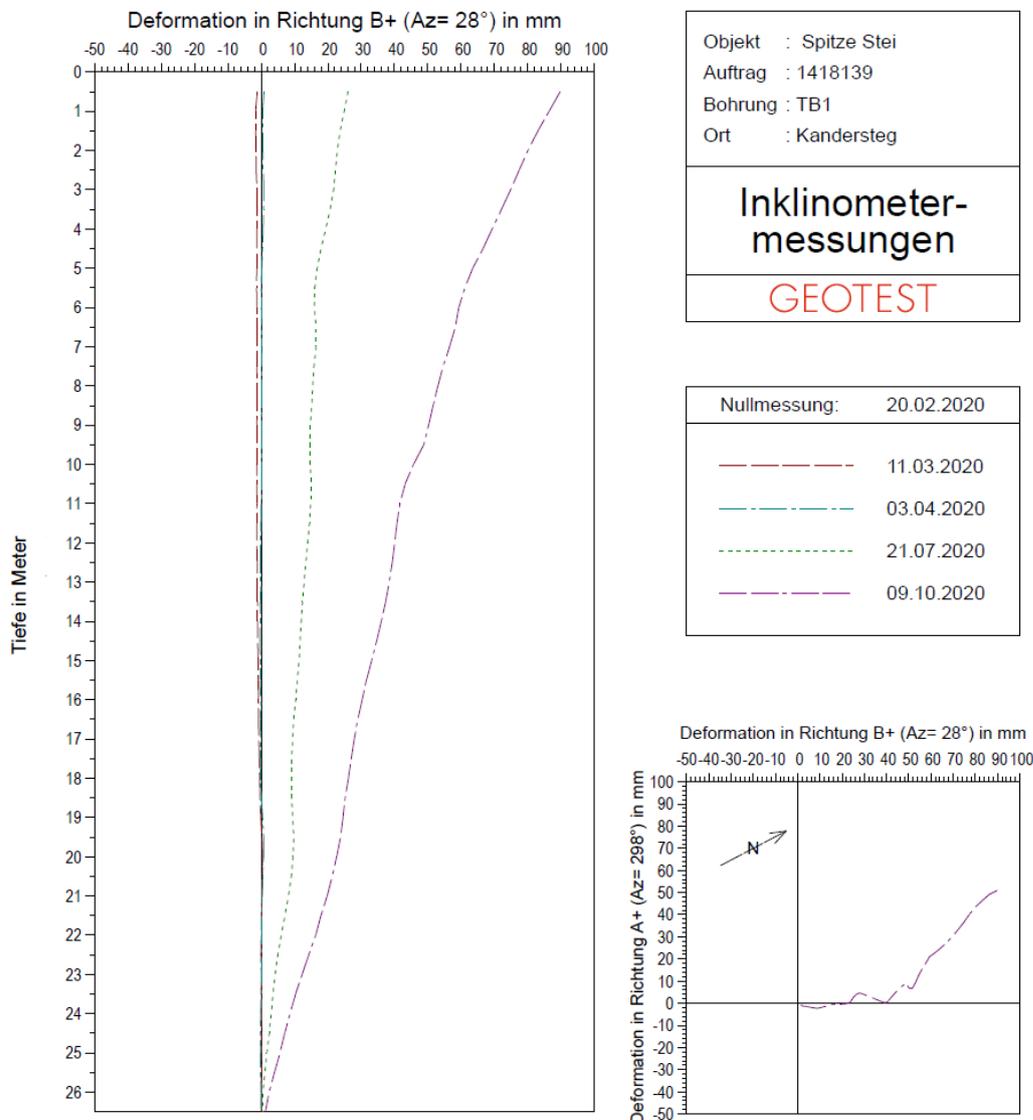


Abbildung 24: Gemessene Deformationen am Inclinometerstandort TB1, 20.02.2020 – 09.10.2020.

Die Haupteigenschaften sind wie folgt:

- Zwischen der Nullmessung vom 8. Februar und der 5. Folgemessung vom 9. Oktober (244 Tage) betrug die über 26 m kumulierte Deformation rund 10 cm in Richtung NNE (Abbildung 24). Die dominierende Deformationsrichtung entspricht der allgemeinen Bewegungsrichtung der Rutschung beim Messstandort.

- Die höchsten Deformationsraten wurden zwischen dem 21. Juli und dem 9. Oktober gemessen, übereinstimmend mit dem saisonalen Beschleunigungsmuster benachbarter Reflektoren (z.B. Reflektor 54).
- Das vertikale Deformationsmuster gibt keine Hinweise auf Abscherhorizonte innerhalb der vermessenen 26 m, stattdessen deuten die Messungen auf eine relativ gleichmässige interne Deformation des durchbohrten Schutt- und Felskörpers hin. Die Messungen bestätigen damit entsprechende Bohrlochaufnahmen, in welchen keine Hinweise auf Abscherhorizonte festgestellt wurden [10].
- Die an der Oberfläche gemessene Deformationsgeschwindigkeit über den Messzeitraum 20.02.2020 – 09.10.2020 betrug rund 0.8 m in Richtung NNE und lag damit 8-mal höher als die in den obersten 26 m gemessenen Deformationen. Diese Differenz deutet ebenfalls darauf hin, dass Gleit-/Scherflächen unterhalb der vermessenen 26 m liegen müssen.

3.6.2 Temperaturmessungen TB2 – TB 4

Die in den Bohrlöchern TB2 – TB4 installierten Thermistorenketten zeichnen seit der Installation im Februar bzw. März 2020 Temperaturen mit stündlicher Auflösung auf (Abbildung 25 – Abbildung 31). Die Zeitreihen bilden die saisonale Temperaturentwicklung in den Bohrlöchern detailliert ab; längerfristige Temperaturentwicklungen können mit den bisherigen Messungen noch nicht abschliessend beurteilt werden.

Für TB2 (Westgrat, 2560 m ü. M., Abbildung 25, Abbildung 26, Abbildung 27) lassen sich folgende Kernpunkte zusammenfassen:

- Der Permafrostspiegel wird in rund 20 m Tiefe erreicht (Abbildung 25, Abbildung 26, Abbildung 27). Der darunter angetroffene fossile Permafrost hat Temperaturen zwischen -0.25 und knapp unter 0°C. Zwischen dem Permafrostspiegel und der saisonal gefrorenen Bodenschicht (4 – 5 m mächtig) existiert ein dauerhaft ungefrorener Bodenkörper (supra-Permafrost Talik), in welchem deutliche saisonale Temperaturschwankungen erkennbar sind. Mit zunehmender Tiefe sind die Temperaturveränderungen gedämpft und zeitverzögert (in 10 m Tiefe ca. 6 Monate Verzögerung).
- Der durch die Schneeschmelze induzierte Zero-Curtain-Effekt führt im Frühling zu verzögerten Temperaturanstiegen (Abbildung 27). Der

Frühlings-Zero-Curtain ist lang, was auf eine eher mächtige Schneedecke hindeutet. Im Herbst gibt es keinen Zero-Curtain, was auf die geringe Bodenfeuchtigkeit im blockigen Material zurückgeführt wird.

- Auch nach über 10 Monaten Installationsdauer ist die 40 m lange Thermistorenkette intakt. Markante Scher- / Gleitflächen dürften daher unter 40 m Tiefe liegen, in Übereinstimmung mit den Resultaten der Inklinometermessungen in TB1.
- Bei den in 20, 30 und 40 m Tiefe installierten Drucksensoren wurden keine saisonalen Druckanstiege registriert. Es gibt daher keine Hinweise auf gestautes Wasser innerhalb des Bohrloches.

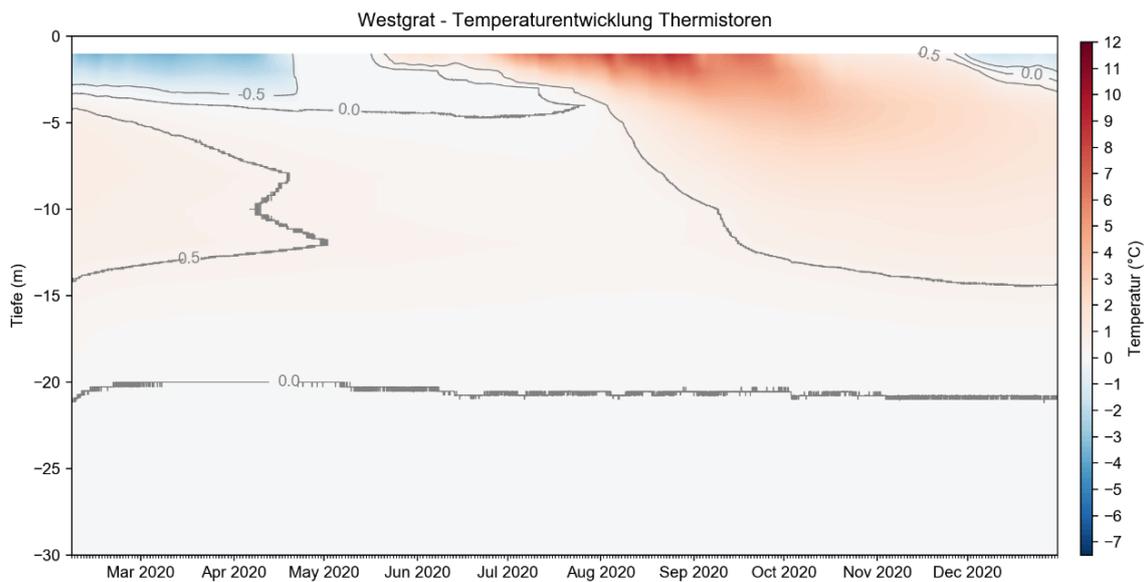


Abbildung 25: Raum-zeitliche Entwicklung der Bodentemperaturen bei Bohrloch TB2.

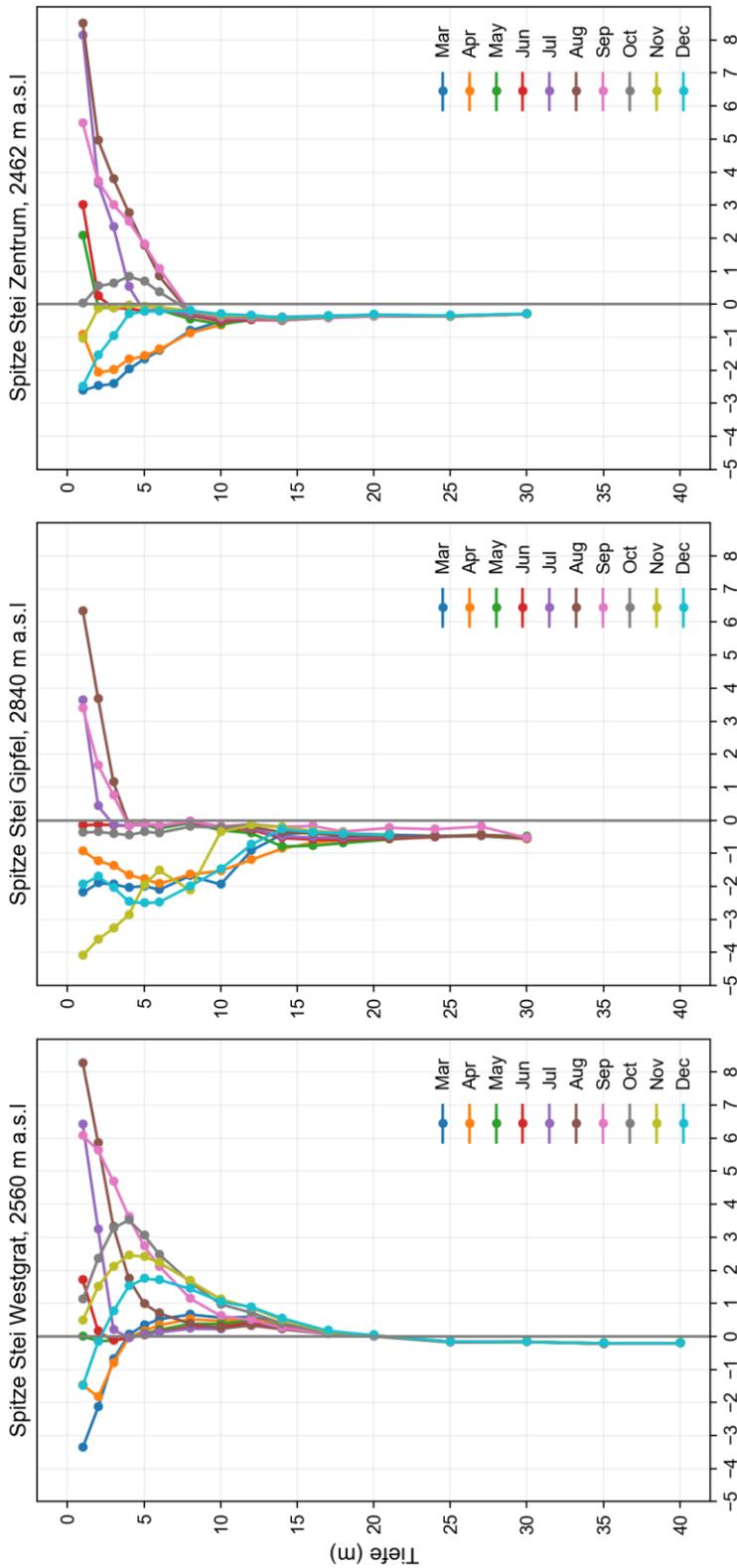


Abbildung 26: Temperaturprofile (Monatsdurchschnitte) für die Bohrlöcher Westgrat (TB2), Gipfel (TB3) und Zentrum (TB4).

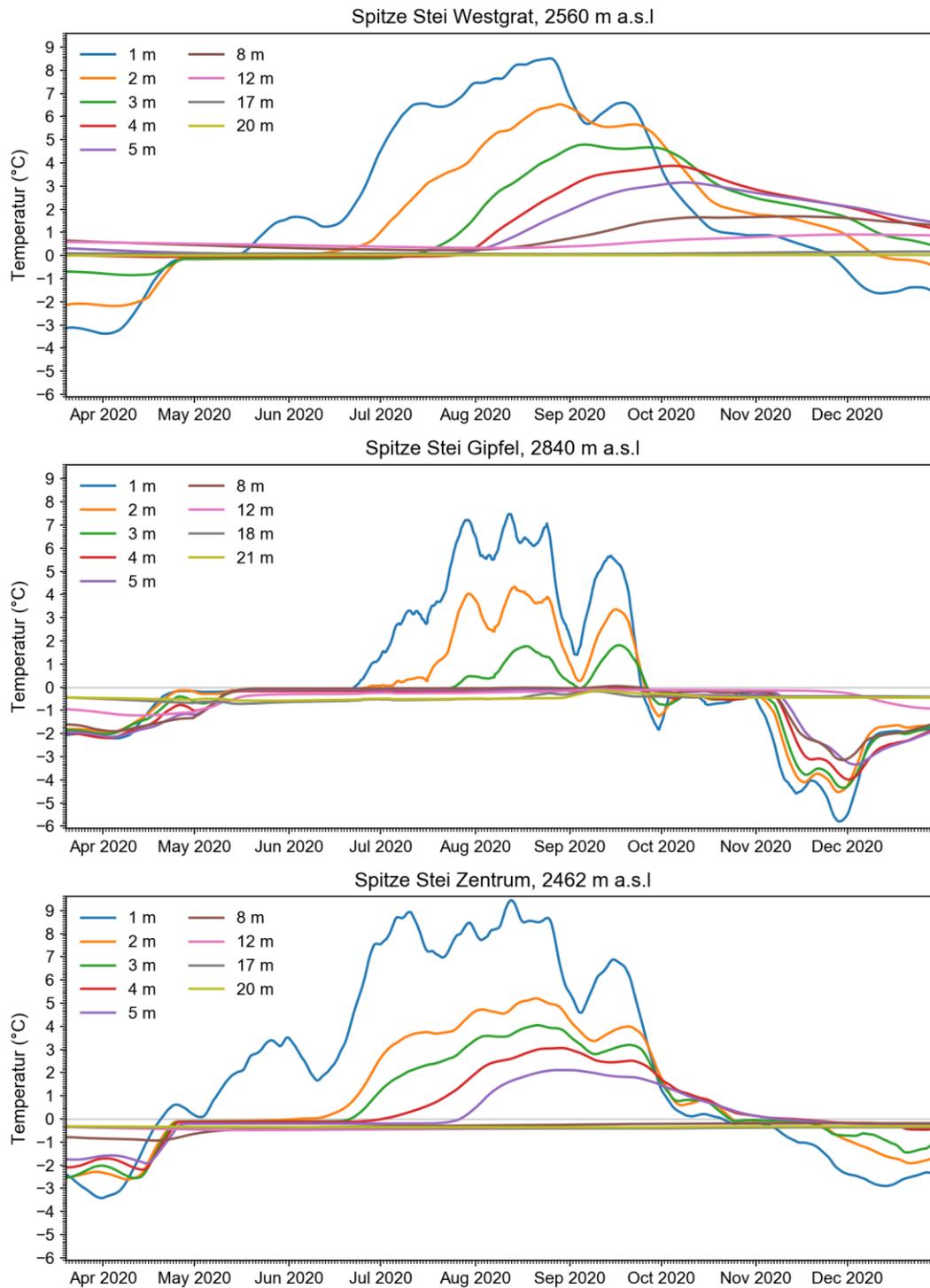


Abbildung 27: Bodentemperatur-Entwicklungen (laufende 10-Tage-Mittelwerte) für ausgewählte Tiefen in den Bohrlöchern TB2 Westgrat (oben), TB3 Gipfel (mitte) und TB4 Zentrum (unten) am Spitze Stei.

Für TB3 (Gipfel, 2840 m ü. M., Abbildung 26, Abbildung 27, Abbildung 30) lassen sich folgende Kernpunkte zusammenfassen:

- Am eisarmen Bohrlochstandort TB3 befindet sich der Permafrostspiegel in rund 4 – 5 m Tiefe. Saisonale Temperaturschwankungen reichen bis in ca. 12 m Tiefe. Darunter befindet sich Permafrost mit einer Temperatur um -0.5°C .
- Oberflächennah (z.B. in 3 m Tiefe) dauert der Zero-Curtain-Effekt Anfang Sommer mehrere Monate (Mai bis Juli). Im Herbst wird keine entsprechende Verzögerung der Abkühlung festgestellt (Abbildung 27). Der lange Frühlings-Zero-Curtain wird durch die im Spätwinter mächtige Schneedecke (viel eingeblassener Schnee) verursacht. Im Herbst fehlt im grobblockigen Material bzw. dem anstehenden Felsen die nötige Bodenfeuchte für das Einsetzen des Zero-Curtains. Entsprechend fallen die Bodentemperaturen im Frühwinter 2020 weitgehend ohne Verzögerung unter den Gefrierpunkt. Die markante Abkühlung erreicht rasch Tiefen um -10 m (Abbildung 30), was zumindest teilweise auf Ventilationseffekte im Schutt zurückzuführen sein dürfte.
- Abrupte positive Temperaturanomalien (bis zu 0.5°C) erfolgen wiederholt unterhalb des Tiefenbereiches mit saisonalen Temperaturschwankungen, zwischen 14 und 27 m (z.B. Anfang Mai 2020, Abbildung 28). Die Temperaturschwankungen dürften durch laterale Wasserflüsse im zerrütteten Untergrund verursacht sein. Solche lateralen Wasserflüsse können mit den in der Verrohrung angebrachten Drucksensoren möglicherweise nicht zuverlässig gemessen werden, da das Rohr nicht von unten mit Wasser gefüllt wird.

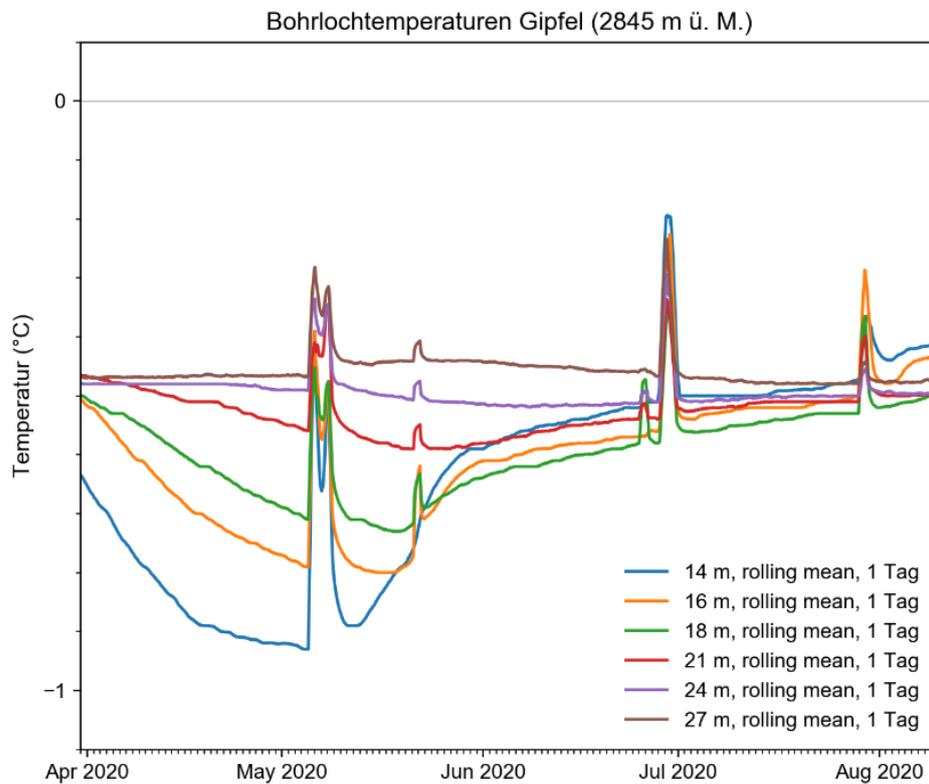


Abbildung 28: Detailansicht der Bohrlochtemperaturen (laufender 1-Tag-Mittelwert) gemessen zwischen 14 und 27 m Tiefe im Bohrloch TB3 Gipfel. Vorübergehend positive Temperaturanomalien deuten auf laterale Wasserflüsse hin.

- Der 8 m Thermistor zeigt ausgeprägtere Temperaturschwankungen als die benachbarten Thermistoren in 6 und 10 m Tiefe. Ende September 2020 steigen die Temperaturen in 8 m Tiefe über 0°C, was auf das Entstehen bzw. das Vorhandensein eines saisonalen Taliks (Anomalien positiver Bodentemperaturen im Permafrost) hindeutet (Abbildung 29). Diese Entwicklung dürfte im Zusammenhang mit der Infiltration von Schneeschmelzwasser und Niederschlägen und dem entsprechenden advektiven Wärmefluss stehen.

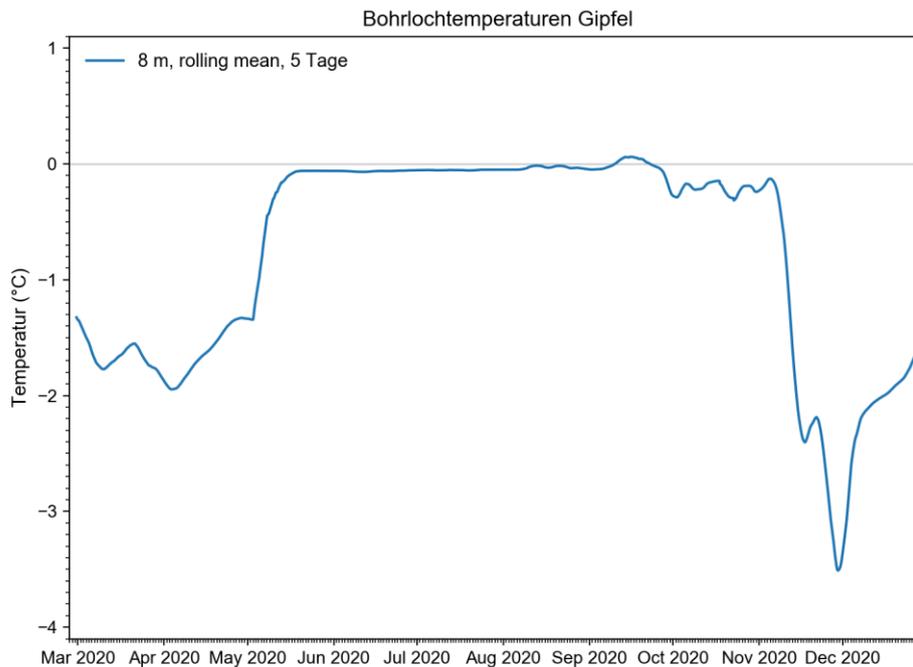


Abbildung 29: Bodentemperatur-Entwicklung (laufender 5-Tages-Mittelwert) in 8 m Tiefe im Bohrloch TB3 Gipfel. Ende September 2020 bildete sich ein saisonaler Talik aus.

- Die Thermistorenkette wird Ende September 2020 im Bereich zwischen 21 und 24 m Tiefe abgesichert (fehlende Messwerte in Abbildung 30). In dem Tiefenbereich verläuft eine Gleitschicht oder ein lokaler Bruch. Bei den Bohrungen wurde in diesem Bereich (ca. 23 m) auch der Übergang zu weichen, mergeligeren Schichten festgestellt [10].
- Beobachtungen vor Ort zeigten, dass die Bohrlochverrohrung im oberflächennahen Bereich sehr stark durch Deformationen beansprucht ist (Verrohrung steht schräg). Dies stimmt mit der beobachteten sehr starken Zerrüttung des oberflächennahen Kalkgesteins überein [10].
- Zwischen dem 5. und 7. September wurden bei den Drucksensoren in 20 und 30 m Tiefe simultane Druckanstiege gemessen (auf ca. 1.5 und 11.3 m Wassersäule), zeitlich übereinstimmend mit einem Temperaturanstieg von -0.5°C auf knapp unter 0°C bei den Thermistoren in 21, 24 und 27 m Tiefe. Dieser Druckanstieg dürfte auf eindringendes Wasser zurückzuführen sein. Es kann jedoch nicht ganz ausgeschlossen werden, dass die Druckzunahme durch Quetschung der Drucksensoren infolge Bohrlochzerscherung verursacht wurde.

- Zum Zeitpunkt des oben genannten Druckanstieges wurden bei den Reflektoren bzw. GPS keine signifikanten Beschleunigungen detektiert; der lokal erhöhte hydrostatische Druck führte demnach nicht zu einer erkennbaren Beschleunigung der Rutschbewegungen. Zwischen dem Druckanstieg im Bohrloch und den gemessenen Niederschlägen besteht zudem kein unmittelbarer Zusammenhang: zwischen dem 5. und 7. September gab es kaum Niederschläge bei den Niederschlagsstationen in der Umgebung des Spitze Steis; die letzten grösseren Niederschläge fanden Ende August statt.
- Am 30. September fiel der gemessene Druck beim 20 m Sensor zurück auf 0 m Wassersäule während jener beim 30 m Sensor konstant blieb bzw. weiterhin zunahm. Der plötzliche Druckabfall in 20 m Tiefe erfolgte nur drei Tage nach Abscherung der Thermistoren unterhalb 21 m. Der Druckabfall ist daher wahrscheinlich auf eine Beschädigung der Drucksensoren zurückzuführen. Dass TB30 immer noch Daten übermittelt, könnte auf die robuste Bauweise der Drucksensorkabel zurückzuführen sein.

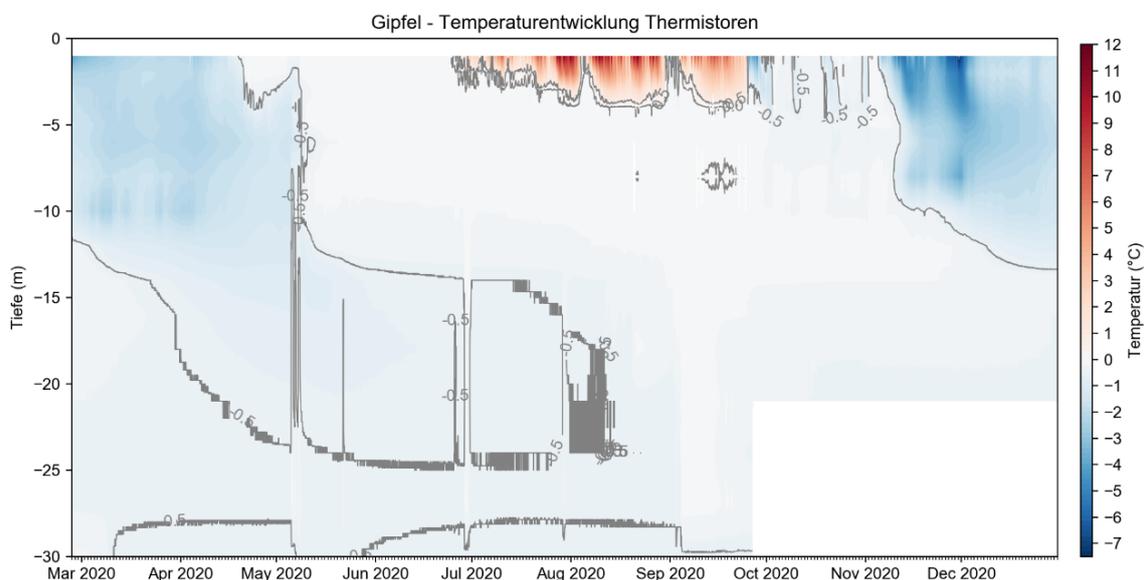


Abbildung 30: Raum-zeitliche Entwicklung der Bodentemperaturen bei Bohrloch TB3. Ende September wurden die Thermistoren unterhalb 21 m abgesichert, daher besteht für die entsprechenden Bereiche eine Datenlücke.

Für TB4 (Zentrum, 2462 m ü. M., Abbildung 26, Abbildung 27, Abbildung 31) lassen sich folgende Punkte zusammenfassen:

- Die saisonale Auftauschicht ist 6 - 8 m mächtig; die Permafrosttemperaturen zwischen 8 und 30 m Tiefe liegen zwischen -0.2 und -0.5°C .
- Saisonale Temperaturschwankungen erreichen eine Tiefe von ca. 10 m; in 10 m Tiefe sind die Temperaturschwankungen zeitverzögert (ca. 6 Monate) und gedämpft.
- Der Zero-Curtain-Effekt ist sowohl im Frühling wie auch im Herbst ausgeprägt. Der im Vergleich zu den anderen Bohrstandorten stärker ausgeprägte Zero-Curtain-Effekt im Herbst ist auf die erhöhte Bodenfeuchtigkeit zurückzuführen (eine Funktion von Porenvolumen, Materialbeschaffenheit, Eisgehalt der darunterliegenden Schichten). Lange Herbst-Zero-Curtains sind typisch für Blockgletscher-Standorte.
- Die 30 m lange Thermistorenkette ist per Ende November intakt. Scher- / Gleitflächen dürften damit unter 30 m Tiefe liegen. In [10] wurde die Gleitfläche noch in ca. 17 m Tiefe erwartet. Für eine tiefere Gleitfläche spricht auch die Tatsache, dass Scherflächen bei Blockgletschern unterhalb des kontinuierlichen Permafrostes generell im ungefrorenen Boden liegen [25].
- Bei den in 10, 20 und 30 m Tiefe installierten Drucksensoren wurden keine saisonalen Druckanstiege registriert. Es gibt daher keine Hinweise auf gestautes Wasser innerhalb des Bohrloches. Dies dürfte ein weiterer Hinweis für einen Verlauf der Gleitschicht unterhalb von 30 m Tiefe sein.

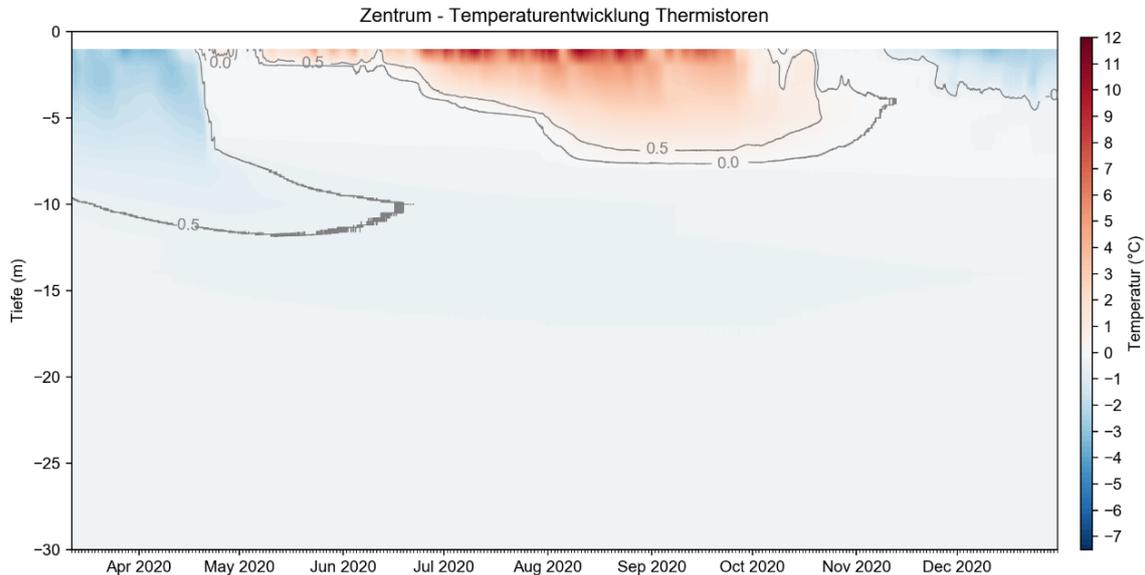


Abbildung 31: Raum-zeitliche Entwicklung der Bodentemperaturen bei Bohrloch TB4.

3.7 Geländebefunde

Neben der Einschätzung der geologisch-geomorphologischen Situation und der Beurteilung der laufenden Gefahrensituation kam den diesjährigen Feldbegehungen die Rolle der Validierung und Interpretation erhobener Messungen zu. So wurden im Gelände die via Feature Tracking und Höhenmodellvergleich bestimmten Verläufe der Ausbisslinien begangen und vor Ort beurteilt.

Zusammenfassend können die folgenden Punkte festgehalten werden:

- Die in Studie [1] geschilderten Sachverhalte zur übergeordneten geologisch-geomorphologischen Situation sind im Jahr 2020 unverändert zutreffend.
- Die Rutschphänomene haben sich wegen der fortschreitenden Bewegungen weiter verstärkt: Risse und Brüche im Fels, Nackentälchen, Schollen und Mulden im Schutt sind noch stärker ausgeprägt als im Vorjahr. Felstürme sind noch stärker verkippt / versackt (Abbildung 32). Der labil gelagerte Schutt macht eine Begehung der Route Ostgrat – Gipfel – Westgrat zunehmend schwierig. Bei den Begehungen / Feldarbeiten konnten oberflächliche Rutschungen und Kollapse von Felsfeilern beobachtet werden (Abbildung 33), was eine zunehmende Dynamik des Gebietes unterstreicht.

- Im Bereich des oberen Ostgrates sowie dem Gipfelbereich ist eishaltiger Schutt bzw. stark verwitterter Fels mit eisgefüllten Klüften verbreitet und an teilweise neuen Orten sichtbar (Abbildung 34). Diese Beobachtungen bestätigen die Resultate der Geoelektrikuntersuchungen, welche im Jahr 2019 im Gebiet durchgeführt wurden [23]. Gleichzeitig legen die Beobachtungen nahe, dass die bei Bohrloch TB3 angetroffenen Verhältnisse (wenig Eis [10]) wahrscheinlich nicht für den ganzen Gipfelbereich repräsentativ sind.
- Entlang des Westgrates war während der diesjährigen Begehungen oberflächennah generell kein Eis erkennbar, was u.a. auf das Fehlen grosser frischer Anrissnischen zurückzuführen sein dürfte (eine Folge der Bewegungsrichtung der Rutschung relativ zur Topografie). Andererseits könnten diese Beobachtungen aus dem Bohrloch TB2 bestätigen, wonach Permafrost gar nicht oder erst in grösserer Tiefe auftritt.



Abbildung 32: Verkippte Felstürme (Oerlikalk) mit markanten Rissen im Bereich des Ostgrates. Der Verlauf der Ausbisslinie entlang des Ostgrates ist mit einer roten Linie gekennzeichnet. Vgl. Person für Massstab.



Abbildung 33: Kollaps eines Felsturmes im Gipfelbereich des Spitze Stei anlässlich der Begehung vom 21.09.2020. Bildquelle: W. Flogerzi.



Abbildung 34: Freigelegter eishaltiger Schuttkörper im oberen Bereich des Ostgrates (hinter GPS 9), Begehung vom 26.06.2020. Rund zwei Wochen nach der Begehung war der Bereich fast vollständig mit frischem Geröll verschüttet.

4. Permafrostverteilung und Eigenschaften

Die Permafrostverteilung und der Eisgehalt im Boden sind am Spitze Stei lokal sehr unterschiedlich (Abbildung 35, [18]). Folgende Bereiche werden unterschieden: (1) eisreicher Permafrost mit einem Eisgehalt, der das Porenvolumen des Bodens übersteigt, (2) eisarmer Permafrost mit Eis nur in Poren und Klüften und (3) Permafrost-freier Boden. Kenntnisse des Bodeneisgehaltes sind von grosser Bedeutung, da der Bodeneisgehalt einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklungen der Bodentemperaturen auf veränderte äussere atmosphärische Bedingungen aufgrund von latenten Wärmeeffekten hat ([19], [20]). Dazu kann der Eisgehalt die Dynamik der abstürzenden Fels- und Schuttmassen beeinflussen [21]. Durch schmelzendes Eis wird der Wassergehalt in der Sturzmasse erhöht, was die Reichweite des Primärprozesses erhöht und die Auslösung von sekundären Fliessprozessen begünstigt [22].

Die modifizierte Version der Permafrost- und Bodeneiskarte (PGIM) des SLF impliziert, dass Permafrost am Spitze Stei nicht flächendeckend vorhanden ist (Abbildung 35). Die untere Grenze für kontinuierlichen Permafrost im NW-exponierten Hang liegt gemäss Karte bei ca. 2600 m ü. M. Entsprechend ist kontinuierlicher Permafrost in maximal 15% des Rutschperimeters zu erwarten (75'000 m² vs. 0.5 km²). Die Existenz von eisreichem Permafrost ist auch unterhalb der kontinuierlichen Permafrost-Grenze möglich. Da eisreicher Permafrost in der Regel nur in Lockergestein bei Hangneigungen unter 30° existiert, sind diese Bereiche am Spitze Stei jedoch begrenzt (ca. 10 bis 15% des Rutschperimeters). Grosse Bereiche des Rutschperimeters am Spitze Stei (ca. 75%) sind daher wahrscheinlich Permafrost-frei.

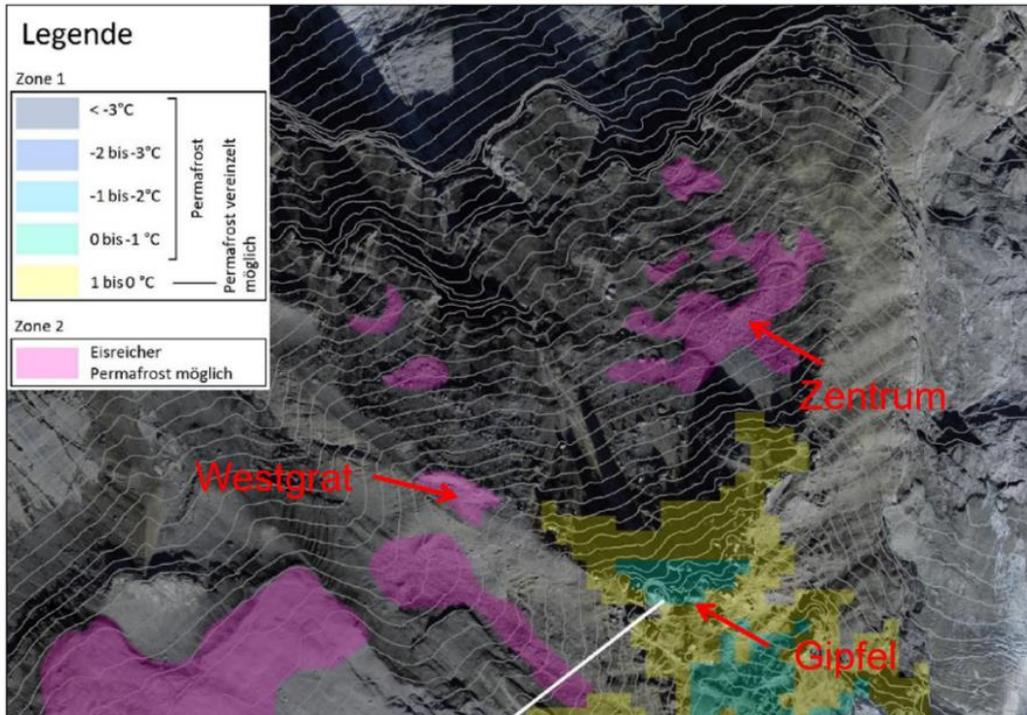


Abbildung 35: Bohrstandorte überlagert über die modifizierte SLF Permafrostkarte PGIM [18]. Die Bohrstandorte Westgrat und Zentrum befinden sich in Bereichen, in denen eisreicher Permafrost möglich ist. Der Gipfelstandort befindet sich in einem Bereich, wo kontinuierlicher, eisarmer Permafrost erwartet wird. Die PGIM-Karte deckt den Tiefenbereich zwischen 0 und 20 m ab.

Gemäss PGIM-Karte kann eisreicher Permafrost im Bereich des Bohrloches TB2 (Westgrat) und des Bohrloches TB4 (Zentrum, Blockgletscher) vorkommen, während eisarmer Permafrost mit Temperaturen zwischen 0 und -1°C höchstwahrscheinlich im Bereich des Bohrloches TB3 (Gipfelbereich) zu finden ist. Diese Kategorisierung wird mit den erhobenen Daten (Kapitel 3.6, 3.7, [10]) weitgehend bestätigt. Der für den Standort Westgrat (TB2) in der PGIM-Karte als möglich taxierte eisreiche Permafrost wurde bei den Bohrungen nicht angetroffen, zumindest nicht in den obersten 20 m, welche in der PGIM-Karte modelliert sind. Der unter 20 m Tiefe detektierte Permafrost (wahrscheinlich reliktscher Natur) ist gemäss [10] eisarm. Die generell gute Übereinstimmung der Bohrlochdaten und Geländebeobachtungen mit den modellierten Permafrostkategorien stützt eine flächenhafte Anwendung der Modellresultate.

Basierend auf den Feldbeobachtungen, Bohrlochauswertungen und den modellierten Permafrostbereichen (PGIM) ist davon auszugehen, dass eisreicher Permafrost nur lokal im Bereich des Blockgletschers unterhalb des Ostgrates vorkommt. Der restliche Permafrost dürfte generell eisarm sein. Auch die freigelegten,

eishaltigen Schuttkörper im Gipfelbereich (z.B. Abbildung 34) sind der eisarmen Kategorie zuzuordnen. Diese Resultate liegen im Rahmen früherer Annahmen hinsichtlich Permafrostverbreitung und Eisgehalt, welche den Beurteilungen der Primär- und Sekundärprozesse zu Grunde liegen ([2], [23], [3], [24]).

Im Bereich mit eisreichem Permafrost dürfte die Permafrostdegradation weiterhin träge voranschreiten. Einerseits verzögern hier latente Wärmeeffekte eine weitere Erwärmung, andererseits trägt der an der Geländeoberfläche anstehende Blockschutt zur effektiven Isolation des Permafrostes bei. In den Geländebereichen mit eisarmen Permafrost dürfte die Permafrost-Degradation in den nächsten Jahren vergleichsweise rasch vorangehen (latente Wärmeeffekte wenig ausgeprägt aufgrund der geringeren Eisvolumina, Permafrosttemperaturen bereits nahe des Gefrierpunktes). Nicht unerwartet wurden im Bereich des Bohrloches TB3 (Gipfel, eisarmer Permafrost) bei den Messungen klare Indikatoren für Permafrosterwärmung und -degradation festgestellt, so z.B. die Bildung eines intra-Permafrost Taliks in 8 m Tiefe (Abbildung 29). Die Implikationen der Permafrostdegradation sind in [25] detailliert beschrieben. Insbesondere dürfte die erhöhte Wassergängigkeit des Untergrundes aufgrund des schmelzenden Kluftes zu einer erhöhten Wasserzufuhr in den Bereich der Gleitschichten führen, was eine weitere Beschleunigung der Rutschung begünstigen dürfte. Diese Entwicklung wurde bei der Szenarienbildung (Kapitel 7) berücksichtigt.

Im Rahmen der fortschreitenden Permafrostdegradation wird der Eisgehalt des Untergrundes abnehmen. Auf die Wirkungsräume (Reichweiten der Primär- und Sekundärprozesse) hat diese Entwicklung kurz- bis mittelfristig keinen massgeblichen Einfluss.

5. 3D Geologisches Modell

Im Hinblick auf die Präzisierung des 3D-Modelles von 2019 (Abbildung 36) sind folgende Befunde von Bedeutung:

- Der Verlauf der Ausbisslinien am Ost- und Westgrat entspricht generell dem im Jahr 2019 erwarteten Verlauf. Basierend auf den neuen Messdaten (insbesondere Höhenmodelle und Radardaten) und Feldbeobachtungen konnte der Verlauf der aktiven Ausbisslinien durchgängig präzisiert werden (Anhang 3, Anhang 4).

- Mit den erhobenen Radarmessungen konnten in der Ostwand unterhalb des Ostgrates keine weiteren aktiven Gleitflächen detektiert werden. Die Existenz solcher zusätzlichen Gleitflächen ist daher unwahrscheinlich.
- Die aktiven Sekundärrutschungen im Schuttbereich der Westflanke und dem Zentrum konnten bestätigt werden. Ausdehnung und Aktivität der Sekundärrutschungen wurden mit den neuen Daten präziser definiert.
- Die Dynamik des Felsteils der Rutschung konnte mit den neuen Daten detaillierter quantifiziert werden. Kartierte Schwächezonen im Felsteil der Rutschung erlauben die Abschätzung realistischer Teilkubaturen für die Präzisierung zukünftiger Absturzscenarien.
- Mit den erhobenen Bohrlochdaten konnte der Verlauf der Gleitflächen punktuell eingegrenzt werden. Die bisherigen Resultate decken sich mit den Annahmen, welche vor der Ausführung der Bohrungen getroffen wurden. So verlaufen potenzielle Gleitflächen am Westgrat eher tief (> 40 m), während die Gleitfläche im Gipfelbereich deutlich näher an der Oberfläche zu liegen scheint (ca. 20 m unter Terrain). Im letzteren Fall kann nicht ganz ausgeschlossen werden, dass anstelle der Gleitfläche nur ein lokaler Bruch detektiert wurde.
- Die erhobenen Radardaten geben klare Hinweise darauf, dass im Bereich Westgrat eine zweite, tiefliegende Gleitfläche mit Bewegungen in der Größenordnung mm / Tag besteht. Im Bereich Westgrat deckt sich deren Ausbisslinie weitgehend mit dem Verlauf der Ausbisslinie der 2019 ausgetherten basalen Gleitfläche (violette Fläche in Abbildung 36).
- Mehrere Messungen (Radar-, Reflektor- und TLS) deuten darauf hin, dass es beim Felsaufschluss um die Reflektoren 80 und 81 keine signifikanten Bewegungen gibt. Dies bedeutet, dass die oben genannte zweite Gleitfläche wahrscheinlich nur den Westgrat einschliesst und nicht den ganzen Perimeter der Instabilität. In NE-Richtung könnte die Gleitfläche durch eine der kartierten NW-SE verlaufenden sub-vertikalen Brüche (Abbildung 6) begrenzt sein.

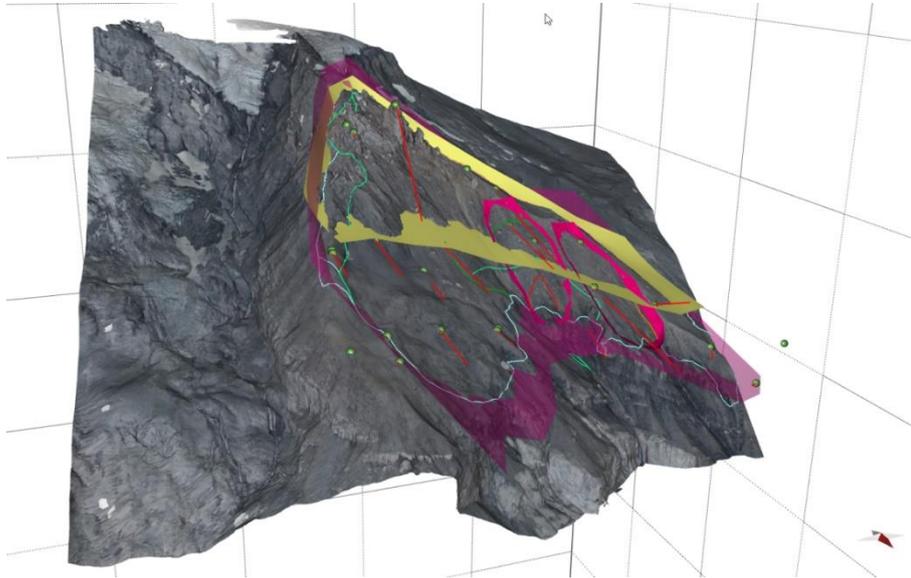


Abbildung 36: 3D-Modell des Rutschgebietes, erstellt in 2019 [1].

5.1 Basale Gleitfläche

Eine Anpassung der basalen Gleitfläche im nordöstlichen Bereich der Rutschung wird vorgenommen, sobald die Stabilität des Felsaufschlusses um die Reflektoren 80 und 81 bestätigt ist. Dazu sollte bei den im Oktober 2020 installierten Reflektoren 80 und 81 eine längere Messzeitreihe abgewartet werden, welche auch die Sommermonate miteinbezieht. Mit dieser Vorgehensweise kann ein mögliches Zurücksetzen des Verlaufes der Gleitfläche in den Zustand von 2019 vermieden werden.

5.2 Gleitfläche Felsrutschung

Um den Verlauf der Gleitfläche der Felsrutschung zu präzisieren (goldene Fläche in Abbildung 36), wurden zwei Arbeitsschritte durchgeführt: Im ersten Schritt wurde pro kartierte Ausbisslinie (Frontbereich Felsrutschung, Ostgrat, Westgrat) ein zentraler, auf der Ausbisslinie liegender Punkt definiert. Basierend auf den in Kapitel 3.5 präsentierten Azimuten und Gleitwinkeln der umliegenden GPS (z.B. 11, 12, 13 für den Frontbereich der Felsrutschung) wurden für jeden Punkt mögliche Gleitebenen berechnet. Dabei wurden jeweils zahlreiche Azimut-Gleitwinkel-Kombinationen via Monte-Carlo Methodik berücksichtigt. Für jede Gleitebene wurde dann die Ausbisslinie entlang des Terrains bestimmt (analog zu Abbildung 3); Gleitflächen mit

guter Übereinstimmung mit den kartierten Ausbisslinien wurden für den zweiten Arbeitsschritt beibehalten.⁴

Der zweite Arbeitsschritt fand in der 3D-Software Move statt. Neben den Gleitebenen aus dem ersten Arbeitsschritt wurden alle weiteren Referenzdaten (kartierte Ausbisslinien, GPS-Trajektorien, Bewegungsfelder aus Feature Tracking, etc.) in den dreidimensionalen Raum importiert. Die Gleitebenen der Ausbisslinien wurden dann unter Einbezug der obigen Informationen gutachterlich verschnitten und wo nötig angepasst. Eine 3D-Ansicht der präzisierten Gleitfläche ist in Abbildung 37 dargestellt. Abbildung 38 zeigt die Mächtigkeit der Felsmasse oberhalb der präzisierten Gleitfläche; Abbildung 39 den Verlauf von Terrain und Gleitfläche entlang von drei Profillinien.

Das Totalvolumen der mobilisierten Felsmasse beträgt rund 8.2 Mio. m³, wovon rund 1.5 Mio. m³ Material im östlichen Randbereich (östlich von TB1 und TB2 sowie Reflektor 53) geringere Bewegungsraten aufweisen als die restliche Masse. Im Bereich Westgrat und dem Gipfelbereich werden Mächtigkeiten > 70 m erreicht.

Mit den kartierten Schwächezonen/Brüchen (Abbildung 6) können im Gipfelbereich individuelle Felskompartimente abgegrenzt werden. Die Volumina der grösseren Kompartimente belaufen sich jeweils auf rund 500'000 m³; das Felskompartiment oberhalb der Reflektoren 80 und 81 hat ein Volumen von rund 700'000 m³. Kleinere Subkompartimente haben Volumina in der Grössenordnung von 100'000 m³. Die Anordnung der Kompartimente ermöglicht ein fortschreitendes Versagen im Rahmen von kaskaden- bzw. dominoartigen Prozessen.

⁴ Durch Messung mehrerer Punkte entlang der Ausbisslinien könnten Gleitebenen auch direkt (d.h., ohne GPS-Informationen, ohne Monte-Carlo-Methodik) interpoliert werden. Der lineare Verlauf der Ausbisslinien (z.B. am Ostgrat) führt jedoch zu fast kollinearen Punkten, so dass ein solcher Ansatz mit beträchtlichen Unsicherheiten verbunden ist.

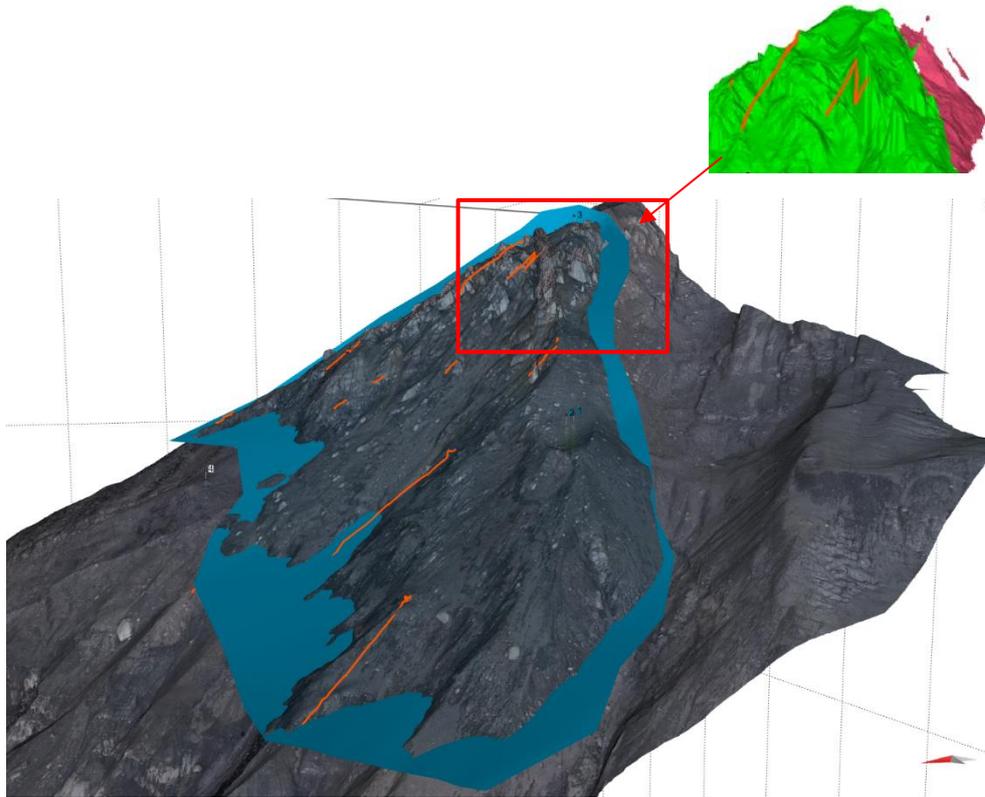


Abbildung 37: 3D-Modell der präzisierten Gleitfläche der Felsrutschung (blau), inkl. GPS-Trajektorien (orange Linien). Im westlichen Gipfelbereich wurde eine separate Gleitfläche ausgeschieden (pinker Bereich in Inset), um lokale Bewegungen unterhalb der blauen Gleitfläche (Bereich Annotation 15, Anhang 3) abzubilden. Der grün eingefärbte Bereich im Inset entspricht dem Bereich oberhalb der blauen Gleitschicht in der Hauptabbildung.

Das Volumen der neuen Gleitfläche (8.2 Mio. m³) liegt rund 2.7 Mio. m³ über dem Volumen der 2019 [1] definierten Fläche (5.5. Mio. m³, goldene Fläche in Abbildung 36). Bei den 8.2 Mio. m³ miteingerechnet ist das Volumen der über der Gleitfläche gelegenen Schuttrutschungen (vgl. Kapitel 5.3). Im Vergleich zur ursprünglichen Version stimmt die neue Gleitfläche besser mit der vom SLF ([8], Abbildung 3) abgeleiteten Gleitebene überein; die neue Version und die Gleitebene des SLF sind jedoch nicht ganz identisch. So verläuft die Ausbisslinie unserer neuen Gleitfläche generell unterhalb der vom SLF abgeleiteten Ausbisslinie⁵. Der SLF-Sektor

⁵ Das SLF passte eine Ebene durch den Aufschluss der Gleitfläche im östlichen Felsteil (oberhalb der Reflektoren 80 und 81), um diese Gleitfläche zu extrapolieren [8]. Ein Abweichen der tatsächlichen Gleitfläche von dieser Ebene ist daher erwartet.

3 (Abbildung 3) fällt grösstenteils in den Bereich unserer neuen Gleitfläche. Die Geschwindigkeitsdiskrepanz zwischen den auf der gleichen Gleitfläche liegenden Sektoren 3 (langsam) und 4 (schnell) kann damit erklärt werden, dass die Bewegungsraten der sekundären Schuttrutschung im Sektor 4 höher sind als im Sektor 3.

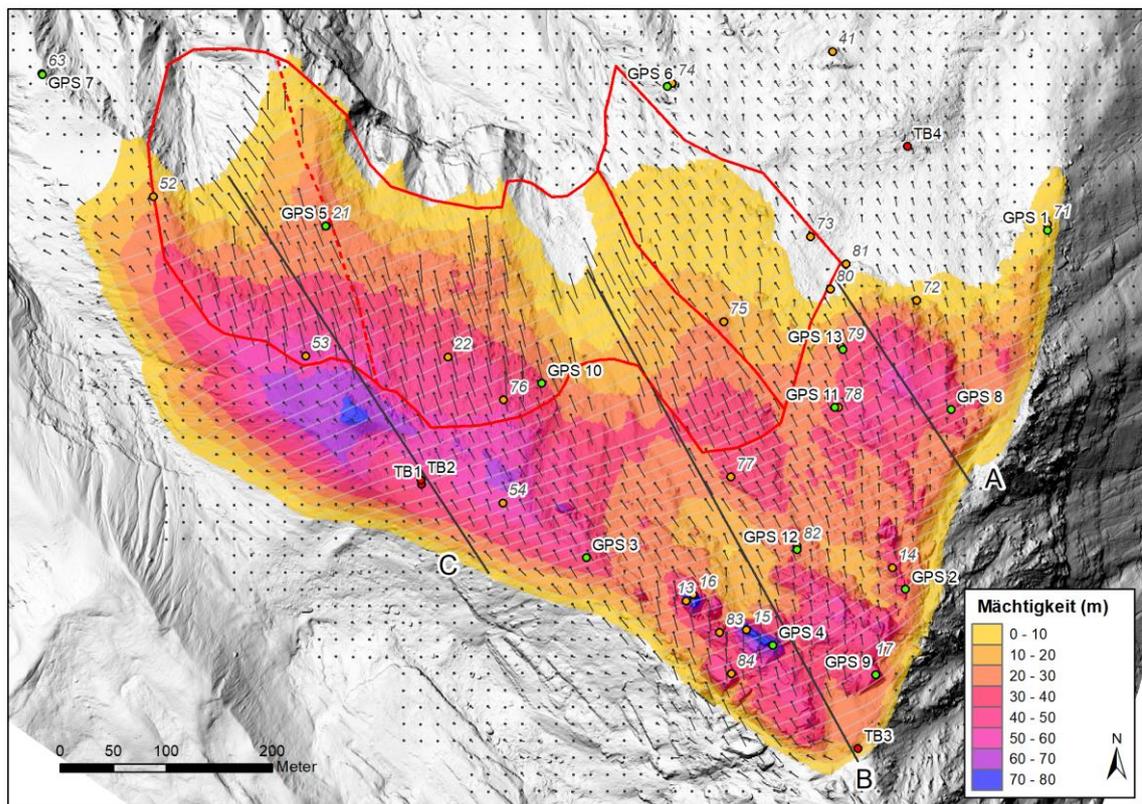


Abbildung 38: Mächtigkeit der Felsmasse oberhalb der präzisierten Gleitfläche der Felsrutschung. Das über die Gleitfläche integrierte Volumen beträgt rund 8.2 Mio. m³, inkl. Volumen der Schuttrutschung. Die Perimeter der Schuttrutschungen im Bereich Westflanke/Zentrum sind mit roten Linien abgegrenzt. Die rot gestrichelte Linie markiert den Übergang zwischen dem Einzugsgebiet des äusseren Chalberrspissibaches (links) und des inneren Chalberrspissibaches (rechts). Die tiefliegende Gleitschicht im Bereich Westgrat sowie die randliche, südwestlich orientierte Gleitschicht im Gipfelbereich sind nicht abgebildet. Das Vektorfeld entspricht dem drohnenbasierten Geschwindigkeitsfeld (Zeitraum 2019 – 2020). Graue, semi-transparente Linien entsprechen 10 m-Isohypsen der Gleitfläche der Felsrutschung.

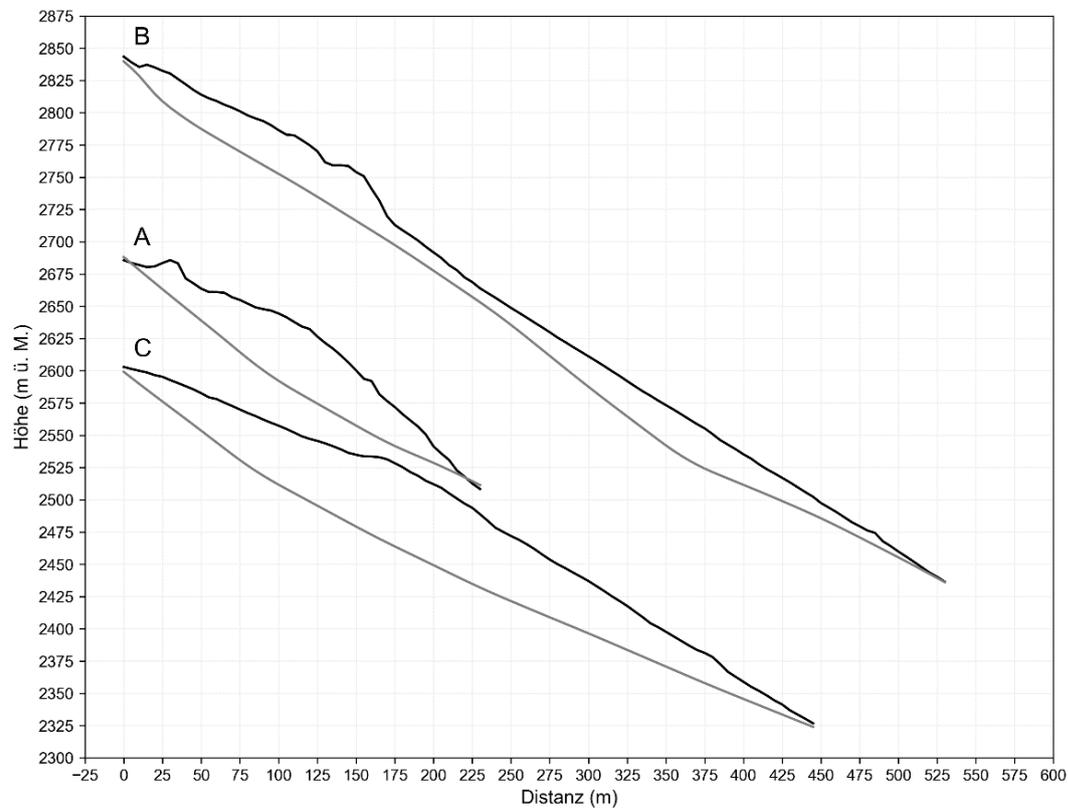


Abbildung 39: Verlauf Terrain (schwarze Linien) und Gleitfläche (graue Linien) der Felsrutschung (blau in Abbildung 37) entlang der Profillinien A, B und C (Abbildung 38).

Im östlichen Bereich der Felsrutschung (Profil A, Abbildung 38, Abbildung 39) ist der Verlauf der Gleitfläche mit den beiden Ausbisslinien und den Geschwindigkeitsfeldern klar definiert und generell plausibel. Ob die versteilende Fläche gekrümmt oder getreppet verläuft, kann nicht abschliessend beurteilt werden. Der flache Bereich der Gleitfläche bei der Ausbisslinie in der Front verläuft steiler als die von den GPS-Daten und Ausbisslinien abgeleiteten Gleitwinkel (ca. 26° vs. 21°).

Im Gipfelbereich ist die Gleitfläche dank der konvergierenden Ausbisslinien am West- bzw. Ostgrat sowie den Geschwindigkeitsfeldern ebenfalls klar definiert. Die modellierte Gleitfläche hat eine Neigung von ca. 30° . Die von den GPS-Koordinaten abgeleiteten Gleitwinkel liegen generell über $35^\circ - 40^\circ$, was auf eine etwas steiler verlaufende Gleitfläche hinweist. Die Gleitwinkel der GPS werden jedoch wegen ihres Installationsstandortes (grosse Felsblöcke) als nur bedingt repräsentativ für die Gleitfläche bewertet. Bei Bohrloch TB3 befindet sich die modellierte Gleitfläche rund 17 m unter Terrain; die tatsächliche Gleitfläche wird bei ca. 21 m erwartet.

Unterhalb des Gipfelbereiches versteilt sich die modellierte Gleitfläche auf über 40° und erreicht damit Übereinstimmung mit den dort gemessenen zuverlässigen GPS-Gleitwinkeln (GPS nicht auf Blöcken, sondern direkt auf Felsplatte montiert), dem Verlauf der Ausbisslinie am Westgrat, sowie der Richtung des flächigen Geschwindigkeitsfeldes. Dieser versteilte Bereich (in Profil B ca. 100 m lang) wird von einer markanten Verflachung gefolgt. Die Abfolge von steil zu flach dürfte in der vorliegenden Version des 3D-Modelles zu markant ausfallen, was es in zukünftigen Versionen des Modelles anzupassen gilt.

Im Bereich des unteren Westgrates und der Westflanke (Profil C) ist der Verlauf der Gleitfläche durch die kartierten Ausbisslinien, die GPS-Trajektorien, die Bewegungsfelder sowie die Bohrlochmessungen definiert. Im Bereich von TB1 und TB2 verläuft die Gleitfläche rund 45 m unter Terrain, in Übereinstimmung mit den Beobachtungen bei den Bohrlöchern (geringe Deformation in den obersten 40 m). Der Verlauf der Isohypsen hat eine gute Übereinstimmung mit den Geschwindigkeitsfeldern. Im Vergleich zu den GPS-Gleitwinkeln (z.B. GPS 5) verläuft die Gleitfläche etwas flacher. Im Bereich der Westflanke sind jedoch mindestens zwei Gleitflächen aktiv, was eine eindeutige Interpretation der GPS-Messdaten hinsichtlich einzelner Gleitflächen erschwert.

5.3 Periphere Gleitfläche Gipfel und Schuttrutschungen

Im westlichen Gipfelbereich wurde eine separate periphere Gleitfläche ausgeschieden (pinke Fläche in Abbildung 37, Annotation 15 in Anhang 3). Diese Gleitfläche ermöglicht die detektierten Bewegungen in westlicher Richtung. Das über die Gleitfläche integrierte Volumen erreicht ca. 100'000 m³.

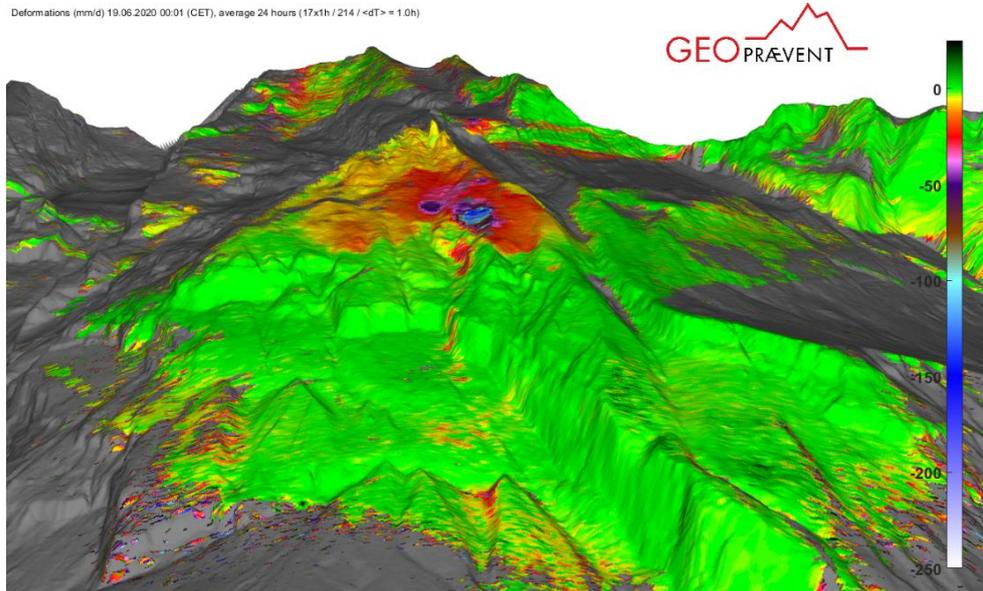


Abbildung 40: Bewegungsrate der Schuttrutschung am 19. Juni 2020 in LOS des Radars Rosshubel (mm / Tag, 24-Stunden Durchschnitt). Die dunkelroten Flächen umfassen den Perimeter der Schuttrutschung Westflanke – Zentrum. Blau-braune Flächen im Frontbereich der Rutschung entsprechen Bereichen mit erhöhten Geschwindigkeiten im Nachgang an den Schuttmaterialabsturz vom 18. Juni (vgl. Anhang 7).

Der präzisierte Perimeter der Schuttrutschungen ist in Abbildung 38 dargestellt. Die erhobenen Daten deuten darauf hin, dass die Schuttmasse im Bereich Westflanke – Zentrum einen zusammenhängenden Rutschkörper darstellt (vgl. Abbildung 40). Die Fläche der Schuttrutschung beträgt ca. 110'000 m², wovon 40'000 m² im Einzugsgebiet des äusseren Chalberspissibaches liegen und 70'000 m² im Bereich des inneren Chalberspissibaches. Im östlichen Bereich des Zentrums (im Bereich der Reflektoren 75 und 73, Abbildung 38), sind die Bewegungsraten im Schutt geringer als westlich davon und variieren teilweise abrupt (Abbildung 22). Diese Übergangs- / Scherzone hin zum Blockgletscher hat eine Fläche von 30'000 m² und liegt komplett im Einzugsgebiet des inneren Chalberspissibaches. Die Gesamtfläche der Schuttrutschungen im Einzugsgebiet des inneren Chalberspissibaches liegt damit bei rund 100'000 m².

Feldbeobachtungen und Messdaten deuten darauf hin, dass die Gleitflächenneigung der Schuttrutschung Westflanke im oberen Bereich 40° übersteigt; im unteren Bereich der Schuttrutschung nimmt die Gleitflächenneigung wahrscheinlich ab, wobei die Neigungswinkel der GPS diesbezüglich schwierig zu interpretieren sind (vgl. Kommentar oben, Messungen reflektieren immer mindestens zwei Gleitflächen). Bei den Bohrungen TB1 und TB2 (Abbildung 23) direkt oberhalb der Schuttrutschungen wurde Lockergestein bzw. stark aufgelockerter Fels bis in ca.

9.5 m Tiefe festgestellt [10]. Die durchschnittliche Mächtigkeit der Schuttrutschung wird daher auf rund 10 m geschätzt. Das mobilisierte Volumen im Bereich des inneren Chalberspissibaches beträgt demnach rund 1 Mio. m³, jenes im äusseren Chalberspissibach rund 0.4 Mio. m³. Im letztjährigen Modell wurden in den Einzugsgebieten der beiden Bäche zwei Rutschkörper mit einem Volumen von je 0.3 Mio. m³ ausgeschieden (Abbildung 36).

Die obigen Volumenangaben sind trotz der genauen Kartierung der Rutschumrisse mit einer relativ grossen Unsicherheit behaftet, da die Mächtigkeit des Schuttkörpers mit den vorhandenen Daten nicht durchgehend quantifiziert werden konnte. Auf dem Massenkonservierungsprinzip beruhende Ansätze zur Berechnung der Schuttkörpermächtigkeit waren nicht anwendbar, obwohl dazu notwendige Messungen (Volumenveränderungen, Geschwindigkeitsfelder) vorhanden sind. Da sich die Schuttrutschungen noch auf weiteren Gleitflächen bewegen, müssen Bewegungen und Höhenveränderungen, welche auf die unterliegenden Gleitflächen zurückzuführen sind, vorgängig korrigiert werden. Diese Korrekturen bringen grosse Unsicherheiten mit sich. Annahmen zur internen Deformation des Schuttkörpers sind ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet, sodass die resultierende Gesamtunsicherheit eine genügend genaue Berechnung der Schuttkörpermächtigkeit verunmöglicht.

6. Einflussfaktoren und Versagensmechanismen

In der letztjährigen Studie [1] und der Zweitmeinung [5] wurden mögliche Einflussfaktoren und Versagensmechanismen detailliert diskutiert (Abbildung 41). Mit den neu erhobenen Daten konnten die Einschätzungen teilweise evaluiert werden. Die entsprechenden Erkenntnisse werden nachfolgend diskutiert:

	Einflussfaktor / Versagensmechanismus	Einschätzung
1	Festigkeitsverlust durch abtauenden Permafrost entlang der Gleitfläche(n) und innerhalb des Gleitkörpers	Wenig wahrscheinlich für gesamte Rutschung. Festigkeit des Eises innerhalb des stark fragmentierten Gleitkörpers beim «Spitze Stei» wird als gering eingeschätzt.
2	Festigkeitsverlust innerhalb des Gleitkörpers durch Eiskeilwachstum / Eissegregation	Wichtiger Mechanismus für die Felsrutschung. Erklärt die aktuelle, wie auch die langzeitliche Destabilisierung.
3	Zunehmende Wasserwegigkeit durch abschmelzenden Permafrost	Wichtigster Mechanismus. Erklärt gut die aktuelle Deformationskrise. → positive Rückkoppelung
4	Bilden eines Stauers im Hangfussbereich durch Einschweben von Feinmaterial	Möglicher Mechanismus. Könnte aktuelle Deformationskrise erklären.
5	Verstärkte Ventilation in ausweitenden Klüften	Möglicher Mechanismus. Kann verstärkend auf langzeitliche Destabilisierung wirken, ist aber von untergeordneter Wichtigkeit für aktuelle Deformationskrise.
6	Änderungen der Lastverhältnisse im Hangfuss durch abgleitendes Lockermaterial oder Blockgletscherbewegungen	Potentiell wichtiger Mechanismus. Könnte aktuelle Deformationskrise erklären. → positive Rückkoppelung
7	Progressives Versagen der retrogressiven Hanginstabilität	Wichtig. Ist sicherlich beteiligt an der langzeitlichen Destabilisierung, könnte aber auch die aktuelle Deformationskrise erklären (vgl. Fall Randa 1991).

Abbildung 41: Mögliche Einflussfaktoren und Versagensmechanismen beim Spitze Stei [6].

- Die Temperaturmessungen in den Bohrlöchern bestätigen, dass am Spitze Stei gebietsweise Permafrost existiert (Abbildung 26). Feldbeobachtungen und Bohrlochaufnahmen zeigen zudem, dass Spalten und Klüfte im Gleitkörper weit verbreitet und teilweise mit Eis gefüllt sind [10]. Innerhalb des mehrere Dekameter mächtigen, stark fragmentierten Gleitkörpers dürfte das Permafrosteis jedoch keine signifikante Kohäsionswirkung haben, in Übereinstimmung mit der Einschätzung von [5] (Punkt 1 in Abbildung 41). Auch entlang der Gleitflächen dürfte Permafrosteis keine signifikante Kohäsionswirkung entfalten. Die Bewegungen am Spitze Stei sind dafür zu tiefgründig und die Bewegungsraten zu hoch.
- Das Abschmelzen des verbleibenden Permafrosteises im Rutschkörper als Folge der Erwärmung dürfte die Wasserwegigkeit/Durchlässigkeit des anstehenden Gesteinskörpers erhöhen, in Übereinstimmung mit der Einschätzung von [5] (Punkt 3 in Abbildung 41). Bei Bohrloch TB3 (Gipfelbereich) im kontinuierlichen Permafrost konnten mit der Bohrlochinstrumentierung Wasserflüsse gemessen werden (Kapitel 3.6.2). Diese Wasserflüsse sind möglicherweise eine direkte Folge der erhöhten Wasserwegigkeit. Die Wasserwegigkeit des anstehenden Gesteines dürfte im Rahmen der angestossenen positiven Rückkoppelung (schnellere Bewegungen führen zu einer stärkeren Zerrüttung, was wiederum Wassereintritte, erhöhte hydrostatische Drücke und damit schnellere Gleitbewegungen fördert) auch ohne zusätzliche Schmelze des Permafrosteises weiter zunehmen. Dass die Zerrüttung des Felskörpers soweit fortschreitet, dass der Aufbau

hydrostatischer Drücke erschwert wird (Unterbrechung der positiven Rückkoppelung), ist wenig wahrscheinlich, kann jedoch auch nicht ganz ausgeschlossen werden. Uns ist kein Fall bekannt, wo sich eine vergleichbare Rutschung entsprechend entwickelt hätte.

- Die maximalen Bewegungsraten am Spitze Stei werden in der Schuttrutschung im unteren Bereich des Rutschperimeters gemessen (vgl. z.B. Anhang 3, Abbildung 7). Die entsprechenden Massenumlagerungen und -austräge führen wahrscheinlich zu einer Entlastung des Hangfusses des Spitze Stei, was zu einer Destabilisierung und damit zu einer Beschleunigung der gesamten Rutschung beitragen könnte (Punkt 6 in Abbildung 41). Zusätzlich zur vorgängig genannten zunehmenden Wasserwegigkeit dürfte dieser Effekt bei der momentan beobachteten Beschleunigung eine wichtige Rolle spielen [5]. Der entsprechende positive Rückkoppelungseffekt kann ohne Entlastung der oberen Hangpartien im Rahmen von Sturzereignissen nicht durchbrochen werden.

7. Szenarien und Wirkungsräume

7.1 Entwicklung 2020 und Übereinstimmung mit Szenarien

Im letztjährigen Bericht [1] wurden folgende Abbruchszenarien für den Zeitraum 2020 – 2030 skizziert:

- 1) Teilabstürze von Schuttmaterial aus der W-Flanke
- 2) Felsauflockerung und -stürze aus der Sackungsmasse
- 3) Grosse Schuttrutschungen aus der W-Flanke
- 4) Mehrere grosse Felsstürze
- 5) Sturzereignisse im Winterhalbjahr
- 6) Kaskaden- und Dominoeffekte
- 7) Bergsturz mit einem Volumen von mehreren Millionen Kubikmetern Festgestein

Die in Bericht [1] definierten Eintretenswahrscheinlichkeiten sind in Abbildung 42 wiedergegeben.

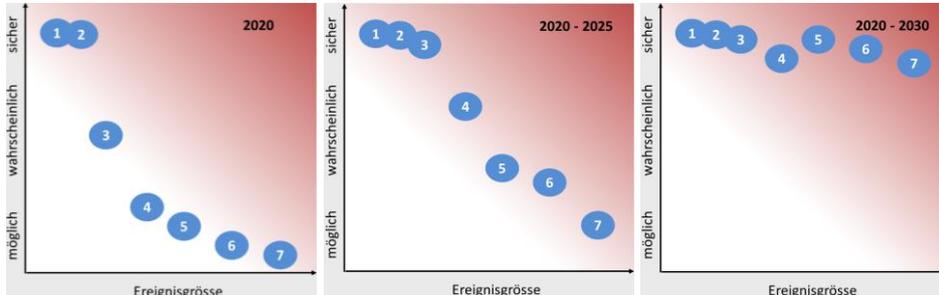


Abbildung 42: Entwicklung der Eintretenswahrscheinlichkeit für die Zeithorizonte 2020, 2020 – 2025 und 2020 – 2030 (aus [1]).

Die Übereinstimmung mit den im Jahr 2020 tatsächlich eingetroffenen Ereignissen ist wie folgt:

- Die beiden fürs Jahr 2020 als sicher eingeschätzten Ereignisse 1 und 2 (Teilabstürze aus der Westflanke sowie Felsauflockerung aus der Sackungsmasse) sind eingetreten (vgl. Anhang 7). Zu einem grösseren Teilabsturz von Schuttmaterial aus der unteren Westflanke kam es am 18. Juni; zu einem grösseren Sturz aus der Felssackung am 12. Oktober (Kollaps Felsturm 16). Zusätzlich gab es mehrere kleine Ereignisse aus dem Fels- und Schuttbereich. Generell fielen die Ereignisse, gerade jene aus der Westflanke, kleiner aus als erwartet. Diese Tatsache dürfte u.a. auf das Ausbleiben von intensiven bzw. langanhaltenden Niederschlagsereignissen während des Jahres 2020 zurückzuführen sein. Zusätzlich führte die unterdurchschnittlich mächtige Schneedecke des Winters 2019/2020 zu einem geringeren Wasserangebot via Schneeschmelze.
- Das als wahrscheinlich eingeschätzte Ereignis 3 (grosse Schuttrutschungen aus der W-Flanke) ist nicht eingetroffen, was ebenfalls auf die günstigen Witterungsverhältnisse zurückzuführen sein dürfte (vgl. Kommentar oben).
- Die weiteren, als möglich eingeschätzten Szenarien (4 – 7) sind nicht eingetreten, mit Ausnahme des Szenarios 5 (Sturzereignis im Winterhalbjahr). So fällt der Kollaps des Felsturmes 16 (Anhang 7) ins Winterhalbjahr, ebenso wie der Kollaps der Spitze des Spitze Steis im Dezember 2019 [15]. Im Bereich der Schuttrutschung gab es hingegen keine grösseren Ereignisse im Winterhalbjahr. Angesichts der ausgeprägten Saisonalität der Bewegungsraten im Bereich der Schuttrutschung (mit einer deutlichen Beruhigung im Winter), ist die beobachtete Entwicklung nicht unerwartet.

7.2 Zu erwartende Entwicklung 2021 – 2030

Basierend auf den neusten Daten und Erkenntnissen wurden Szenarien und Eintretenswahrscheinlichkeiten für den Zeitraum 2021 – 2030 definiert (Abbildung 43). Die Szenarien sind mit Volumenschätzungen gekoppelt, welche mit den entsprechenden Wirkungsräumen ([1], [7]) verglichen werden können. Szenarien aus Abbildung 42, welche mehreren Volumenbereichen zugeordnet werden können (z.B. Winterabbrüche), sind in der Grafik nicht aufgeführt, werden aber nachfolgend diskutiert.

2021	1 2	3	4 5	6
bis 2025	1 2	3	4 5	6
bis 2030	1 2 3 4	5	6	
	sicher	wahrscheinlich	möglich	unwahrscheinlich
1 Rutschungen aus Westflanke (bis zu 0.2 Mio. m ³)		4 Mehrere grosse Felsstürze (bis zu 1 Mio. m ³)		
2 Felssturz aus Zentrum/Gipfel (bis zu 0.2 Mio. m ³)		5 Bergsturz / mehrere Bergstürze (bis zu 8 Mio. m ³)		
3 Grosse Schuttrutschungen (bis zu 0.6 Mio. m ³)		6 Gesamtabbruch (bis zu 20 Mio. m ³)		

Abbildung 43: Entwicklung der Eintretenswahrscheinlichkeit für die Zeithorizonte 2021, 2021 – 2025 und 2021 – 2030 (aus [1]). Gestaltung Grafik basierend auf einer Vorlage von N. Hählen.

Im Vergleich zu den Szenarien aus Bericht [1] (Abbildung 42) wurden nur geringe Anpassungen vorgenommen. Die vorgängig definierten Wirkungsräume ([1], [7]) der Szenarien bleiben gültig.

Für das Jahr 2021 gelten folgende Einschätzungen:

- Das Eintreten des Szenarios 1 wird als sicher eingestuft. Im Bereich der Schuttrutschung Westflanke waren die Geschwindigkeiten im Jahr 2020 noch einmal höher als im Jahr 2019, was auf eine fortschreitende Destabilisierung und mögliche positive Rückkoppelungen destruktiver Prozesse hinweist. Starke Beschleunigungen traten im Jahr 2020 bereits bei Niederschlagssummen von 40 – 50 mm pro Niederschlagsereignis auf [13]. Sollten im nächsten Jahr intensive bzw. langanhaltende

Niederschlagsereignisse eintreten (möglicherweise parallel zum Eintrag von Schneeschmelzwasser), könnten grössere Schuttkubaturen abrutschen und im Falle von Extremniederschlägen auch Volumina in der Grössenordnung von Szenario 3 erreichen (0.6 Mio. m³). Obwohl Winterereignisse nicht ausgeschlossen werden können, dürften Ereignisse der Kategorien 1 bzw. 3 primär im Sommerhalbjahr auftreten⁶. Ab Frühling bzw. Frühsommer muss mit einem Abgleiten der Schuttmasse bis in den Bereich der vermuteten Hauptgleitfläche (ca. 10 m tief) gerechnet werden⁷. Ein Spontanabsturz einer grösseren Schuttkubatur wird generell als unwahrscheinlich eingeschätzt; die teilweise abrupten Beschleunigungen der Schuttmasse (Abbildung 22) zeigen aber, dass Abstürze innert weniger Stunden nicht ganz ausgeschlossen werden können. Deutlich wahrscheinlicher sind jedoch Ereignisse, die sich über Tagesfrist via zunehmende Bewegungsraten ankünden. So waren alle bisher beobachteten grösseren Abstürze aus der Westflanke via Radar bzw. Reflektoren vorgängig erkennbar. Grössere Abstürze aus der Schuttmasse können kaskadenmässig verlaufen und sich dabei über mehrere Stunden bis Tage hinziehen. Radar- und fotobasierte Messungen aus dem Jahr 2020 zeigen diesbezüglich, wie Bereiche um frische Absturznischen über längere Zeit erhöhte Bewegungsraten aufweisen (Abbildung 40). Unter ungünstigen Umständen kann eine solche Entwicklung zum Absturz weiterer Schuttpakete führen. Wir gehen nicht davon aus, dass dabei die ganze Kubatur der Schuttrutschung (1.4 Mio. m³, Kapitel 5.3) mobilisiert wird. Ereignisse der Grössenordnung 0.6 Mio. m³ sind jedoch angesichts der Beobachtungen (Ereignis vom 31.08.2020, Abbildung 22) realistisch.

- Das Eintreten von Szenario 2 wird als sicher eingestuft. Auch hier ist aufgrund der beobachteten zunehmenden Schwächung der bereits stark fragmentierten Felsmasse zu erwarten, dass die entsprechenden Ereignisse im Jahr 2021 grösser ausfallen werden als jene des Jahres 2020. Im Falle kleinerer Kubaturen sind Spontanabstürze möglich; mehrtägige

⁶ Im Winter unterbinden die kalte Schneedecke und die saisonal gefrorene Bodenschicht (bei Bohrloch TB2 ca. 4 – 5 m mächtig, Abbildung 25) das Eintreten von Wasser in den Schuttkörper auch bei vorübergehenden Wärmeinbrüchen, sodass die Bewegungen und damit das Absturzrisiko generell reduziert sind. Eine isotherme Schneedecke und damit Schmelzwasser durch die gesamte Schneedecke hindurch gab es in 2020 am Bohrloch TB2 ab Mitte April.

⁷ Schmelz- und Regenwasser kann bereits vor dem vollständigen Auftauen der saisonal gefrorenen Bodenschicht (August im Fall des Bohrloches TB2, Abbildung 25) über präferentielle Fliesswege in den Bereich der Hauptgleitfläche gelangen und dort erhöhte hydrostatische Drücke hervorrufen.

Vorlaufzeiten wie im Falle des Kollapses des Felsturmes 16 dürften eine Ausnahme bleiben. Für grössere Kubaturen ($>100'000 \text{ m}^3$) werden Spontanabbrüche als unwahrscheinlich eingeschätzt. Mit Ereignissen aus der Felsmasse muss ganzjährig gerechnet werden; aufgrund der stark verzögerten Bewegungsentwicklung im Felsbereich⁸ ist auch im Hochwinter mit Stürzen zu rechnen. Kaskaden- oder dominoartige Abstürze sind aufgrund der Fragmentierung des Felskörpers möglich und können sich über Stunden bis Tage hinziehen.

- Die Szenarien 4 – 5 werden weiterhin als möglich eingestuft; die Eintretenswahrscheinlichkeit wird jedoch etwas tiefer beurteilt als noch in Bericht [1]. Dies insbesondere, da zwischen 2019 und 2020 die Beschleunigung im Felsbereich geringer ausfiel als aufgrund der letztjährig verfügbaren Daten erwartet werden musste⁹. Wir gehen insbesondere davon aus, dass Ereignisse der Kategorie 5 (z.B. ein Absturz der 8 Mio. m^3 Felsmaterial oberhalb der Gleitfläche der Felsrutschung, Abbildung 38) nicht unmittelbar bevorstehen. Bei Ereignissen der Grössenordnung 4 – 5 dürften Kaskadeneffekte aufgrund der starken Fragmentierung des Rutschkörpers eine wichtige Rolle spielen. Ein kaskadenmässiges Versagen individueller Felskompartimente dürfte mehrere Stunden bis Tage andauern. Eine klare Saisonalität bezüglich Abbruchwahrscheinlichkeit ist nicht zu erwarten. Aufgrund der stark verzögerten Bewegungsentwicklung im Felsbereich ist auch im Hochwinter mit Ereignissen zu rechnen. Ereignisse der Grössenordnung 4 – 5 werden sich vorgängig ankünden.
- Ein Eintreten von Szenario 6 (Gesamtabbruch) wird für das Jahr 2021 als unwahrscheinlich eingestuft. Die Bewegungsraten im Bereich der basalen Gleitfläche (Ausbisslinie Westflanke) liegen bei rund 20 cm / Jahr und damit deutlich tiefer als bei den Gleitflächen der Fels- und Schuttrutschung.

⁸ Das Geschwindigkeitsminimum wird erst im Frühling erreicht (Abbildung 18). Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die Gleitschicht der Felssackung verbreitet mehrere 10 m unter Terrain liegt (Abbildung 38). Die saisonale Entwicklung massgebender Einflussfaktoren (z.B. Wasserdrücke, Felstemperaturen) erfolgt in diesen Tiefen verzögert.

⁹ Basierend auf den Messdaten 2018 – 2019 sowie Auswertungen von Satelliten-Radaraufnahmen [26] und provisorischen Auswertungen von historischen Luftbildern musste von einer weiterhin exponentiellen Zunahme der Bewegungsraten ausgegangen werden; diese exponentielle Zunahme trat im Jahr 2020 im Bereich der Felssackung nicht ein. Damit wird die Eintretenswahrscheinlichkeit der Szenarien 4 – 5 etwas konservativer eingeschätzt. Ob die Beschleunigungsentwicklung einen kurzfristigen Hiatus oder den Beginn eines längerfristigen Trends widerspiegelt, wird die Fortführung der Messzeitreihen aufzeigen.

Basierend auf den verfügbaren Daten finden im Bereich der basalen Gleitfläche momentan keine signifikanten Beschleunigungen statt, die Datenlage ist aber eher spärlich und die entsprechenden Unsicherheiten hoch¹⁰. Ein Ereignis dieser Grössenordnung ist saison-unabhängig und kündigt sich vorgängig an.

Über den Zeitraum 2021 – 2030 ist eine fortschreitende Destabilisierung der Rutschung zu erwarten, womit die Eintretenswahrscheinlichkeit grösserer Ereignisse zunimmt (Abbildung 43). Dies gilt insbesondere für Ereignisse des Types 4 und 5. Ein Ereignis vom Typ 6 (Komplettabsturz) wird über den Zeithorizont 2021 – 2030 als eher unwahrscheinlich eingeschätzt, jedoch auch nicht ausgeschlossen. Prädisposition und Geschichte des Gebietes zeigen, dass Abstürze dieser Grössenordnung möglich sind. Obwohl die Bewegungen auf der basalen Gleitfläche zur Zeit nur einen geringen Teil der oberflächlich gemessenen Rutschbewegungen ausmachen, sind sie nicht vernachlässigbar (über 10 Jahre kumuliert ca. 2 m, ohne weitere Beschleunigung). Eine fortschreitende Schwächung durch akkumulierende Schäden im Bereich der Gleitfläche ist wahrscheinlich. Mit gezielten Messungen (vgl. Kapitel 8.2) muss die Entwicklung genauer überwacht werden.

Dass es bis 2030 zu einer weitgehenden Beruhigung der Rutschung kommt ohne vorgängige grössere Ereignisse (Grössenordnung Szenarien 3 – 5), wird aus heutiger Sicht als kaum wahrscheinlich eingeschätzt. Dazu ist die Destabilisierung der Felsmasse, mit den angestossenen positiven Rückkoppelungen destruktiver Prozesse zu weit fortgeschritten. Viele kleinere Teilabbrüche (Grössenordnung Szenario 2) könnten zwar zu einer Entlastung der Rutschung führen und so möglicherweise eine Beruhigung auslösen. Wir gehen jedoch davon aus, dass im Rahmen solcher kleinerer Teilabbrüche schliesslich auch Felsstürze grösser als Szenario 2 (>200'000 m³) ausgelöst würden. So wurden im Gipfelbereich individuelle Felskompartimente abgegrenzt, deren Volumina 200'000 m³ deutlich übersteigen (Kapitel 5.2.). Dass die Zerrüttung des Felskörpers soweit fortschreitet, dass der Aufbau hydrostatischer Drücke erschwert wird und es so zu einer Beruhigung der Rutschung kommt, kann ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Uns ist jedoch kein

¹⁰ Wegen der vergleichsweise geringen Bewegungsraten liegen mögliche Beschleunigungen innerhalb des Rauschens des Feature Trackings auf Luftbildern / Orthophotos. Die erhobenen terrestrischen Radardaten (GPR) können nicht zur Bestimmung von Beschleunigungen herangezogen werden, da sie nur wenige Tage des Jahres abdecken und zudem nur LOS-Geschwindigkeiten umfassen (von den Standorten Westgrat und Westgrat Hoch gemessene Geschwindigkeiten sind damit nicht direkt vergleichbar). Vom Standort Rosshubel aus ist der westliche Bereich des Westgrates nicht einsehbar.

vergleichbarer Fall bekannt, in dem sich eine derart grosse Rutschung entsprechend entwickelt hätte. Sollten sich die Rutschbewegungen in Zukunft wider Erwarten nachhaltig verlangsamen, muss ein Re-Evaluierung des Sachverhaltes vorgenommen werden.

7.3 Einfluss auf Wirkungsräume

Auch wenn die Kubaturen und Wahrscheinlichkeiten für einige Szenarien gegenüber dem Bericht 2019 [1] leicht angepasst wurden, bleiben die Wirkungsräume und Sicherheitszonen [7] unverändert, da die Anpassungen keinen massgeblichen Einfluss darauf haben. Da auch die Grundszenarien der Sturzprozesse für die Beurteilung der Sekundärprozesse keine relevante Änderung erfahren haben, ist davon auszugehen, dass diese Beurteilung sowie deren Umsetzung in die Planungszone ihre Gültigkeit behält. Eine nächste Überprüfung der Szenarien und Wirkungsräume erfolgt Ende 2021.

8. Bewertung Monitoring und periodische Messungen

8.1 Monitoring

Das ausgebaute Monitoring basierend auf kontinuierlichen GPS- und Tachymetermessungen, terrestrischen Radarmessungen, Timelapse-Aufnahmen und Bohrlochmessungen hat sich bewährt. Mit den redundanten Messungen und den individuell entwickelten Auswertungen konnten alle grösseren Rutsch- und Sturzereignisse detektiert werden.

Da wegen der schwierigen Messbedingungen am Spitze Stei längere Messintervalle gewählt werden mussten, bot der neu eingesetzte terrestrische Radar eine etwas geringere zeitliche Auflösung als vorgesehen und damit eine reduzierte Sensitivität hinsichtlich Veränderungen der Rutschgeschwindigkeiten. Trotz dieser Einschränkungen war der Radareinsatz zielführend; mit den erhobenen flächigen Radardaten konnte neben dem Monitoring punktuell auch das Systemverständnis verbessert werden (z.B. Abbildung 22).

Die automatisierte Überprüfung der Messwerte mit einem SMS-Warnsystem funktionierte technisch gut. Im Warnbereich besteht jedoch weiterhin Optimierungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der relativ hohen Anzahl von Falschalarmen.

Angesichts der positiven Bilanz des Monitorings 2020 liegt der Hauptfokus der monitoring-bezogenen Arbeiten im nächsten Jahr auf dem Unterhalt der bestehenden Monitoringinfrastruktur. Optimierungen bzw. Ergänzungen werden punktuell vorgenommen, wie nachfolgend beschrieben.

- Geodätische Messungen
 - Beim Reflektornetzwerk sind aus heutiger Sicht keine grösseren Anpassungen nötig. Der Fokus der Arbeiten wird daher im nächsten Jahr auf dem laufenden Ersatz beschädigter bzw. zerstörter Reflektoren liegen. Je nach Entwicklung der Gefahrensituation werden die 28 Reflektoren strategisch ergänzt.
 - Hinsichtlich der erhobenen Parameter wird eine Änderung angestrebt: Neben den momentan erhobenen Schrägdistanzen sollten mit der Totalstation auch Winkel und damit 3D-Reflektorpositionen gemessen werden. Schrägdistanzen sind fürs Monitoring zwar ausreichend; für die Verbesserung des Systemverständnisses (u.a., Verbesserung des 3D-geologischen Modelles) sind 3D-

Positionen jedoch besser geeignet. Trotz der grösseren Fehler bei den Winkelmessungen können im Rahmen der Nachprozessierung via Mittelung zuverlässige Positionen bestimmt werden. Die resultierenden Positionsangaben haben eine geringere zeitliche Auflösung (ca. täglich bis wöchentlich), was für die geplanten Anwendungen jedoch keine Einschränkungen zur Folge hat.

- GPS-Messungen
 - Auch bei den GPS liegt der Fokus auf dem Unterhalt der bestehenden 13 Geräte. Für den Sommerbetrieb ist das GPS-Netzwerk aus heutiger Sicht generell genügend ausgebaut. Ein zusätzliches GPS im Felsbereich oberhalb der basalen Gleitfläche (Punkt 7 in Abbildung 11) wäre wünschenswert, weil damit das Bewegungsverhalten der basalen Gleitfläche aufgezeichnet werden könnte. Bei entsprechenden Planungen muss berücksichtigt werden, dass der Bereich stark exponiert ist (Steinschlag und Lawinen).
 - Ein Ausbau (1 – 2 Geräte) im Bereich Zentrum und Westgrat würde für den Winterbetrieb (Reflektoren eingeschneit, kein Radar) einen Mehrwert liefern.
- Terrestrische Radarmessungen
 - Der Einsatz des terrestrischen IDS-IBIS Radars von Geopraevent wird im nächsten Jahr ähnlich ausfallen wie im Jahr 2020. Dank der optimierten Auswertung der Radar-Messdaten und den nun vorhandenen Erfahrungswerten mit dem Gerät ist eine kürzere Vorbereitungszeit möglich. Der Radar muss daher erst installiert werden, sobald bei Reflektoren und GPS kritische Bewegungsraten erreicht werden.
- Kameraaufnahmen
 - Die zwei Timelapse-Kameras am Spitze Stei und am Rosshubel arbeiten zuverlässig (keine Ausfälle seit Installation) und decken einen grossen Teil des Rutschgebietes ab. Die Kameras geben aber keinen Einblick in den aktiven hinteren Bereich des Gipfels und des Ostgrates. Um ein kompletteres Bild der Veränderungen

zu erhalten, wird die Installation einer weiteren Kamera im Gipfelbereich angestrebt.

- Feature Tracking auf den Aufnahmen der Timelapse-Kameras bietet für das Monitoring einen begrenzten Nutzen, da die Auswertungen aus technischen Gründen nicht genügend genau und zeitsensitiv sind. So können Geschwindigkeitsveränderungen nur über den Zeitraum mehrerer Tage zuverlässig detektiert werden. Im Rahmen des Monitorings sind daher alternative quantitative Auswertungen der Kameraaufnahmen (z.B. für Flächen- und Volumeberechnungen nach Abbrüchen) zielführender.
- Bohrlochmessungen
 - Die Temperaturmessungen funktionieren generell zuverlässig und liefern plausible Messwerte. Die Druckmessungen funktionieren ebenfalls zuverlässig, eine Plausibilisierung der erhobenen Messwerte ist jedoch schwieriger als bei den Thermistoren, nicht zuletzt wegen der geringeren Anzahl von Drucksensoren (3 vs. 16). Der Fokus der zukünftigen Arbeiten liegt auch hier auf dem Unterhalt der Logger und Sendeeinrichtungen. Abgescherte / zerstörte Druck- und Temperatursensoren in den Bohrlöchern (z.B. bei TB3) können nicht ersetzt bzw. repariert werden.
- Datennachprozessierung und Darstellung
 - Die automatisierte Nachprozessierung und Darstellung der Monitoringdaten konnte im Jahr 2020 deutlich optimiert werden. So werden stündlich Panels mit den wichtigsten Monitoringparametern erstellt. Diese Panels gestalten das laufende Monitoring und Reporting (u.a., Wochenblatt) deutlich effizienter.
 - Punktuelle Erweiterungen und Verbesserungen sind anzugehen, mit Fokus auf der Kombination verschiedener Messparameter. So würde eine interaktive Projektion der Radar-Geschwindigkeitsfelder auf die Fotos der Kamera Rosshubel (analog Abbildung 1) die laufende Interpretation der Radardaten vereinfachen. Zielführend wäre auch eine laufende Gegenüberstellung von Parametern wie

Bohrlochtemperaturen, -drücken, Niederschlagsmessungen und Bewegungsraten.

- Automatisches Warnsystem
 - Das momentan operierende SMS-Warnsystem basiert aus technischen Gründen auf absoluten Geschwindigkeitsschwellenwerten. Trotz laufender manueller Anpassungen der Schwellenwerte ist die Zahl der Falschalarme relativ hoch; das manuelle Festlegen der Alarme ist zudem nicht effizient. Zukünftig sollen Alarmschwellenwerte automatisiert angepasst werden, ebenfalls sollen die Schwellenwerte auf Beschleunigungen anstelle absoluter Geschwindigkeiten angewendet werden. Die dazu notwendigen Anpassungen beim Warnsystem haben hohe Priorität.
 - Bei beschleunigenden Bewegungen der GPS und Reflektoren werden im Rahmen der Daten-Nachprozessierung automatisiert Prognosen zu möglichen Abbruchzeitpunkten generiert. Die umgesetzten Ansätze haben sich grundsätzlich bewährt (z.B. beim Absturz des Felsturmes 16), können aber noch weiter optimiert (z.B. unter Einbezug von Niederschlagsprognosen) und ausgebaut werden (z.B. Anwendung auf flächige Radardaten).

8.2 Periodische Messungen

Die im Jahr 2020 periodisch durchgeführten Messungen werden nachfolgend diskutiert. Dabei wird auch evaluiert, ob und in welchem Umfang die Messungen im Jahr 2021 weitergeführt werden sollen.

- TLS-Messungen
 - Die TLS-Messungen und die entsprechenden Auswertungen durch das SLF (Kapitel 3.1) lieferten wichtige Erkenntnisse zur Verbesserung des Systemverständnisses; eine Weiterführung der Messungen ist daher anzustreben. Eine Reduktion von zwei Messungen pro Jahr auf eine Messung pro Jahr kann in Betracht gezogen werden, sofern die Zahl der Drohnenbefliegungen erhöht wird.

- Eine weitere TLS-Messung vom Standort Westgrat Hoch ist in Betracht zu ziehen, um die Bewegungen im Bereich der basalen Gleitfläche genauer zu quantifizieren. Dies anstelle bzw. als Ergänzung zu den terrestrischen Radarmessungen, den Drohnenmessungen sowie einem lokal installierten GPS.
- Drohnen-basierte Messungen
 - Die drohnen-basierenden Messungen (Kapitel 3.2) haben sich bewährt. Die Daten der Vermessungsdrohne vermitteln ein hoch aufgelöstes, räumlich komplettes Bild der Entwicklung der Rutschung und ermöglichen damit ein besseres Systemverständnis. Die drohnen-basierten Messungen ergänzen auch die Monitoringdaten in idealer Weise¹¹.
 - Im Hinblick auf das Jahr 2021 wären regelmässige Drohnenbefliegungen während der Sommermonate zielführend (ca. monatlich sowie nach Ereignissen). Mit den regelmässigen Drohnenbefliegungen wird das Verhalten der Rutschung zeitlich höher aufgelöst abgebildet, was für verschiedene Anwendungen einen Mehrwert bringt (vgl. vorheriger Punkt). Im Nachgang von Sturzereignissen sind damit auch genauere Volumenberechnungen möglich, da die systematischen Fehler aufgrund von Rutschbewegungen (vor und nach dem Sturzereignis) geringer ausfallen.
 - Der Perimeter der Drohnenbefliegungen muss leicht erweitert werden, um den Bereich der Reflektoren 61 und 63 (unterer Bereich Westgrat) komplett abzudecken. Die Drohnen-daten können damit gezielt genutzt werden, um Bewegungen entlang der basalen Gleitfläche genauer zu quantifizieren.
 - Im Bereich kritischer Geländeaufschlüsse (z.B. Aufschluss Front Felsrutschung oder Felsbereich oberhalb der basalen Gleitfläche)

¹¹ Mithilfe der Drohnen-daten konnten z.B. die bei den Reflektoren 13 und 16 gemessenen starken Beschleunigungen räumlich klar auf einen einzigen isolierten Felsturm eingegrenzt werden. Zudem können mit den Drohnen-daten labile, uninstrumentierte Felskompartimente detektiert werden, womit die Wahrscheinlichkeit für unvorhergesehene Abstürze reduziert werden kann. Aufgrund der geringeren räumlichen Auflösung lässt der terrestrische Radar bei solchen Analysen mehr Interpretationsspielraum offen.

sind für höchste Genauigkeiten geländenahe Befliegungen, unter optimalen Lichtverhältnissen in Betracht zu ziehen. Basierend auf solch genauen Daten kann z.B. die offene Frage nach gekrümmter bzw. getreppter Gleitfläche detaillierter untersucht werden (mittels genauer Nachverfolgung der Ausbisslinie im Bereich der Reflektoren 80, 81).

- Abzuklären sind die Möglichkeiten von 3D-Feature Tracking auf den photogrammetrisch erstellten 3D-Punktwolken. Gegenüber dem klassischen 2D-Tracking ergäbe ein flächiges 3D-Tracking einen Mehrwert bei der Überarbeitung des 3D geologischen Modells.
- Terrestrische Radarmessungen (GPRI)
 - Mit dem GPRI wurden in der Saison 2019 und 2020 wichtige Daten erhoben (Kapitel 3.3), welche das Systemverständnis verbesserten. Der Zusatznutzen von weiteren Messungen im Jahr 2021 (z.B. vom Standort Westgrat Hoch) ist aus heutiger Sicht limitiert, da mit den bisherigen Messungen das Potential des Radars bereits weitgehend ausgeschöpft wurde. Über jährliche bis zweijährliche Vergleichsperioden sind die Bewegungen im Bereich der basalen Gleitfläche genügend hoch, dass sie auch via TLS oder Vermessungsdrohne quantifiziert werden können. Dabei haben TLS- und Drohnenmessungen den Vorteil, dass Bewegungen 2D bzw. 3D und nicht nur in LOS bestimmt werden können. Auch fällt die Einschränkung der «Phase Ambiguity» weg, welche eindeutige Vergleiche von zeitlich weit auseinanderliegenden Radardaten (z.B. Sommer 2020 vs. Sommer 2021) erschwert.
 - Mit dem IDS-IBIS Radar am Standort Rosshubel wurden und werden sehr umfangreiche Radar-Daten erhoben, die bisher primär dem laufenden Monitoring dienten. Zukünftig könnten diese Daten vermehrt hinsichtlich spezifischer Fragestellungen ausgewertet werden (z.B. Bewegungen im Bereich des frontalen Felsaufschlusses), ohne dass dazu zusätzliche Messungen erhoben werden müssten.

- Bohrlochmessungen
 - Die periodischen Inklinometermessungen bei TB1 liefern zuverlässige Resultate. Angesichts der relativ geringen Deformationen des 26 m-Bohrloches kann im Jahr 2021 die Zahl der Inklinometermessungen reduziert werden. Aus heutiger Sicht ausreichend ist jeweils eine Messung im Frühling, Sommer und Herbst.
 - Zusätzliche und tiefere (Kern)-bohrungen durch die Gleitschichten wären für eine weitere Verbesserung des Systemverständnisses (u.a. geologisches und kinematisches Modell) zielführend. Die interessante frontale Zone der Rutschung kommt jedoch aus Sicherheitsgründen für Bohrungen nicht in Frage. Dasselbe gilt für die Westflanke, wo Zusatzinformationen u.a. zur Mächtigkeit der Schuttrutschung von grossem Interesse wären.
 - Zielführend und sicherheitsmässig möglich wären weitere, tiefere Bohrungen im Bereich der bestehenden Bohrlöcher TB1/TB2 und des Reflektors 63. Diese tieferen Bohrungen gäben zusätzliche Informationen zum Verlauf der Gleitfläche der Felsrutschung sowie der basalen Gleitfläche, welche mit den heutigen Bohrlöchern nicht erreicht werden. Im Bereich der Reflektoren 63 wären neben Inklinometermessungen auch Temperaturmessungen zielführend. Damit könnte das Temperaturregime des Untergrundes im tiefstgelegenen Bereich der Rutschung quantifiziert werden.
 - Kernbohrungen dürften wegen der Beschaffenheit des Untergrundes (Zerklüftung, Eisgehalt) und der benötigten Bohrinfrastruktur nur geringe Erfolgchancen haben. Destruktive Bohrungen, wie im Spätwinter 2020 ausgeführt [10], haben grössere Erfolgchancen, wegen des Verlustes des Bohrmaterials in Klüften jedoch nur eine beschränkte Aussagekraft hinsichtlich der Beschaffenheit des Untergrundes.
 - Aufgrund der genannten Einschränkungen und der hohen Kosten von Bohrungen, werden zusätzliche Bohrungen im nächsten Jahr nicht als prioritär eingestuft.

- GPS-Messungen
 - Auf periodische händische GPS-Messungen von Markern wurde bisher verzichtet. Für bestimmte Fragestellungen könnten solche Messungen, im Rahmen von Feldbegehungen ausgeführt, jedoch zielführend sein. Händische GPS-Messungen wären beispielsweise geeignet, um die Verschiebungen im Umfeld des Reflektors 18 zu bestimmen und damit festzustellen, ob dessen Bewegung (7 cm / Jahr, Kapitel 3.5) eine lokale oder eine grössere Instabilität widerspiegelt¹².
 - Händische GPS-Messungen kämen auch in Frage, um die Bewegungen im Felsbereich oberhalb der basalen Gleitfläche zu bestimmen. Wegen der höheren Bewegungsraten (ca. 20 cm / Jahr) bieten Drohnen- bzw. TLS-basierte Messungen, oder allenfalls ein fix installiertes GPS, eine bessere und sicherere Alternative.

9. Schlussbemerkungen

Mit den Arbeiten des Jahres 2020 konnten beim Aufbau des redundanten Monitorings der Rutschung Spitze Stei wichtige Fortschritte erzielt werden; die Empfehlungen des letztjährigen Berichtes und der Zweitmeinung wurden dabei weitgehend umgesetzt. Der Hauptfokus der monitoring-bezogenen Arbeiten liegt ab dem nächsten Jahr primär auf dem Unterhalt der bestehenden Monitoringinfrastruktur. Anpassungen bzw. Erweiterungen werden nur noch punktuell nötig sein, sofern sich die Lage im Gebiet nicht grundsätzlich verändert (z.B. infolge eines grösseren Absturzes).

Zusätzlich zum Monitoring wurden weitere spezifische Untersuchungen durchgeführt, namentlich terrestrische Laser- und Radarmessungen sowie Drohnenbefliegungen. Diese Untersuchungen ermöglichten zusammen mit den Resultaten aus dem Monitoring, Dynamik und Ausdehnung der Rutschung mit bisher unerreichter Genauigkeit zu quantifizieren. Die im Frühjahr 2020 durchgeführten Bohrungen

¹² Für drohnenbasierte Messungen sind die Bewegungen zu gering, um innert nützlicher Frist signifikante Resultate zu erhalten; für TLS- bzw. Radarmessungen vom Standort Rosshubel sind Blickwinkel und Messdistanz ungünstig.

ermöglichten zudem erste wichtige Informationen zur vertikalen Struktur der Rutschung.

Basierend auf den neu erhobenen Daten wurde das 3D geologische Modell der Rutschung verifiziert. Die Herausforderung bestand darin, alle Messungen widerspruchlos und im geologischen Kontext plausibel miteinander zu verknüpfen. Im Vergleich zum letztjährigen Modell ist das präzierte Modell der Felsrutschung besser mit Messdaten definiert, eine optimale Übereinstimmung mit den Daten wurde jedoch noch nicht erreicht. Es sind daher weitere Überarbeitungen geplant. Im Rahmen dieser Überarbeitungen wird auch Lage und Verlauf der basalen Gleitfläche definitiv festgelegt, nachdem dieses Jahr noch auf eine Anpassung verzichtet wurde (im Jahr 2020 etablierte Messzeitreihen waren für eine abschliessende Entscheidung für bzw. gegen eine Anpassung noch zu kurz). Sobald die Anpassungen im geologischen Modell vorgenommen sind, wird auch ein definitives kinematisches Modell der Rutschung erstellt.

Basierend auf den Erkenntnissen des Jahres 2020 wurden die letztjährigen Abbruchszenarien überprüft. Die 2019 definierten Szenarien und Wirkungsräume sind weiterhin gültig, auch unter Berücksichtigung der Anpassungen beim geologischen Modell.

10. Literaturverzeichnis

- [1] GEOTEST AG (2019): «Kandersteg, «Spitze Stei», Expertenbericht Phase A und B», Bericht Nr. 1418139.1.
- [2] GEOTEST AG (2019): «Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement, Ergebnisse und Auswertungen 2019», Bericht Nr. 1418139.2.
- [3] NDR Consulting, Hunziker Gefahrenmanagement (2020): Spitze Stei Sekundärprozesse, Faktenblätter und Erläuterungen.
- [4] Hunziker, Zarn & Partner (2020): «Spitze Stei» Tertiärprozesse: Auswirkungen auf die Kander in Kandersteg, Projekt A-1124.
- [5] CSD, SLF (2020): Zweitmeinung zu geologischem Modell, Szenarien und Wirkungsbereiche «Spitze Stei», Kandersteg, Bern, Bericht Nr. BE09940.100.
- [6] CSD, SLF (2020): Zweitmeinung zu geologischem Modell, Szenarien und Wirkungsbereiche «Spitze Stei», Kandersteg, Bern, Präsentation, 6. März 2020.
- [7] GEOTEST AG (2020): «Kandersteg, «Spitze Stei», Sicherheitskonzept Gemeinde», Bericht Nr. 1418139.6.

- [8] SLF (2020): Bericht terrestrisches Laserscanning Spitze Stei Kandersteg, BE, Juli 2020
- [9] SLF (2020): Bericht terrestrisches Laserscanning Spitze Stei Kandersteg, BE, September 2020
- [10] GEOTEST AG (2020): «Kandersteg, «Spitze Stei», Permafrostuntersuchungen», Bericht Nr. 1418139.9.
- [11] GEOTEST AG (2020): «Kandersteg, «Spitze Stei», Auswertung historische Orthophotos», Bericht Nr. 1418139.11.
- [12] SLF, Uni Fribourg (2019): Auswertung terrestrisches Laserscanning Spitze Stei, Kandersteg, BE, 11.07.2019 – 09.08.2019
- [13] KAWA, Abt. Naturgefahren (2020): Einflussfaktoren auf Bewegungsraten 2020.
- [14] Flotron (2020): DTM Spitze Stei 04.09.2020, Befliegung im Auftrag vom Amt für Wald und Naturgefahren Kanton Bern.
- [15] GEOTEST AG (2020): «Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement 2019, Felsabbruch 20.12.2019: Kurzdokumentation, Bericht Nr. 1418139.4.
- [16] Gamma Remote Sensing (2019): Kurzdokumentation der Messkampagne „bim Spitze Stei“ mit dem GAMMA Portable Radar Interferometer (GPRI), Präsentation.
- [17] KAWA, Abt. Naturgefahren (2019): Bericht zur Analyse der Bewegungsraten und deren Einflussparameter.
- [18] Kenner, R. and Noetzli, J. and Hoelzle, M. and Raetzo, H. and Phillips, M. (2019): Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps. *The Cryosphere*. 1925-1941.
- [19] SLF, WSL (2009): Bauen im Permafrost – ein Leitfaden für die Praxis.
- [20] Noetzli, J., B. K. Biskaborn, H. H. Christiansen, K. Isaksen, P. Schoneich, S. Smith, G. Vieira, L. Zhao and D. A. Streletskiy (2019): Permafrost thermal state. [in "*State of the Climate 2018*"]. *American Meteorological Society*, 100(9): 21-22.
- [21] Aaron, J., McDougall, S. Rock avalanche mobility: The role of path material, *Engineering Geology*, 257 (2019), 105126
- [22] SLF (2018): Modellierung des Cengalo Bergsturzes mit verschiedenen Rahmenbedingungen, Bondo, GR, Gutachten G2017.20
- [23] Hilbich C., Hauck C. (2019): Geophysikalische Untersuchungen im Gebiet des „Spitze Stei“, Berner Oberland, Juli 2019, Bericht, Oktober 2019, Departement Geowissenschaften Universität Fribourg, 09.10.2019, Fribourg

- [24] NDR/Hunziker Gefahrenmanagement (2020): Spitze Stei, Besprechung Szenarien Sturz, Aktennotiz vom 20.03.2020.
- [25] SLF (2020): Relevanz von Permafrost für die Felsbewegungen am Spitze Stei, Kandersteg (BE), Präsentation, 6. März 2020.
- [26] Gamma Remote Sensing (2019): InSAR Zeitserie 1991–2019 «Bim Spitze Stei», Präsentation.

Anhang 1: Feldarbeiten Spitze Stei 2020

1. GPS/Reflektoren

Datum	Arbeiten
26.12.2019	- Ersatz GPS 4 nach Absturz Spitze Stei
25.06.2020	- Verschiebung GPS 4 um ca. 30 m in den hinteren Bereich des Spitze Steis - Verschiebung/Neuausrichtung Refl. 54 (Korrektur: -44 cm)
21.07.2020	- Verschiebung GPS 3 - Verschiebung GPS 8 - Installation Regenmesser
12.08.2020	- Neuinstallation Refl. 77, 78, 79 - Neuinstallation GPS 11, 12, 13
21.09.2020	- Verschiebung/Neuausrichtung Refl. 22 (Korrektur: -144 cm) - Verschiebung/Neuausrichtung Refl. 76 (Korrektur: +115 cm) - Ersatz Refl. 17 nach Absturz (Korrektur: -1'458 cm)
08.10.2020	- Repositionierung Tachymeter (bei Bauarbeiten verschoben)
09.10.2020	- Neuinstallation Refl. 80, 81
20.10.2020	- Ersatz GPS 12 - Neuinstallation Refl. 82, 83, 84
17.12.2020	- Installation Zusatzbatterien bei GPS

2. Terrestrischer Laserscanner (TLS) und Radar

Datum	Arbeiten
09.06.2020	- Installation Geopraevent Radar
20.07.2020	- TLS-Messung SLF, Erstmessung 2020

19.08.2020	- Erstmessung GPRI Winteregg
24 - 26.08.2020	- Zweitmessung GPRI Winteregg - Erstmessung GPRI Westgrat
19.09.2020	- TLS-Messung SLF, Zweitmessung 2020
21.09.2020	- Zweitmessung GPRI Westgrat
06.10.2020	- Installation neue Schutzhütte nach Sturmschaden - Reparatur Geopraevent Radar
10.12.2020	- Abbau Geopraevent Radar

3. Thermistoren/Inklinometer

Datum	Arbeiten
30.01.2020 – 25.02.2020	- Abteufung und Instrumentierung Bohrlöcher Westgrat, Gipfel, Zentrum
08.02.2020	- Nullmessung TB 1, Westgrat
20.02.2020	- Inklinometermessung Westgrat (1. Folgemessung)
11.03.2020	- Inklinometermessung Westgrat (2. Folgemessung)
03.04.2020	- Inklinometermessung Westgrat (3. Folgemessung) - Unterhalt Thermistorenketten
21.07.2020	- Inklinometermessung Westgrat (4. Folgemessung)
09.10.2020	- Inklinometermessung Westgrat (5. Folgemessung)

4. Timelapse-Kameras

Datum	Arbeiten
25.11.2019	- Verschiebung Kamera West zum Ostgrat
09.06.2020	- Installation Kamera Rosshubel
25.06.2020	- Abspannung Kamera Rosshubel
21.09.2020	- Einmessen Kamera Ostgrat - Einmessen Kontrollpunkte Kamera Ostgrat

5. Drohne

Datum	Arbeiten
19.08.2020	- Befliegung mit Drohne zur Erstellung von Schrägaufnahmen
27.08.2020	- Befliegung mit Vermessungsdrohne - Einmessung Kontrollpunkte Westgrat
04.09.2020	- Befliegung Oeschibach / Spitze Stei durch Flotron (LiDAR, Fotogrammetrie)
21.09.2020	- Befliegung mit Vermessungsdrohne - Wiederholungsmessung Kontrollpunkte Westgrat - Einmessen Kontrollpunkte Ostgrat

6. Regenmesser

Datum	Arbeiten
21.07.2020	- Installation Regenmesser

7. Begehungen

Datum	Arbeiten
25.06.2020	<ul style="list-style-type: none">- Route: Ostgrat-Gipfel-Westgrat- ANG: N. Hählen, J. Häberle, C. Brönnimann- NGB: I. Kallen- GEOTEST: C. Kienholz
19.08.2020	<ul style="list-style-type: none">- Route: Ostgrat-Gipfel-Westgrat- ANG: N. Hählen, J. Häberle, C. Brönnimann- GEOTEST: K. Graf, D. Tobler, R. Riner, C. Kienholz
21.09.2020	<ul style="list-style-type: none">- Route: Ostgrat-Gipfel, Westgrat/Westflanke per Helikopter- ANG: N. Hählen, C. Brönnimann- CSD: V. Gischig, S. Schneider- GEOTEST: K. Graf, C. Kienholz

Anhang 2: Abbildungen und Karten Laserscan (TLS)

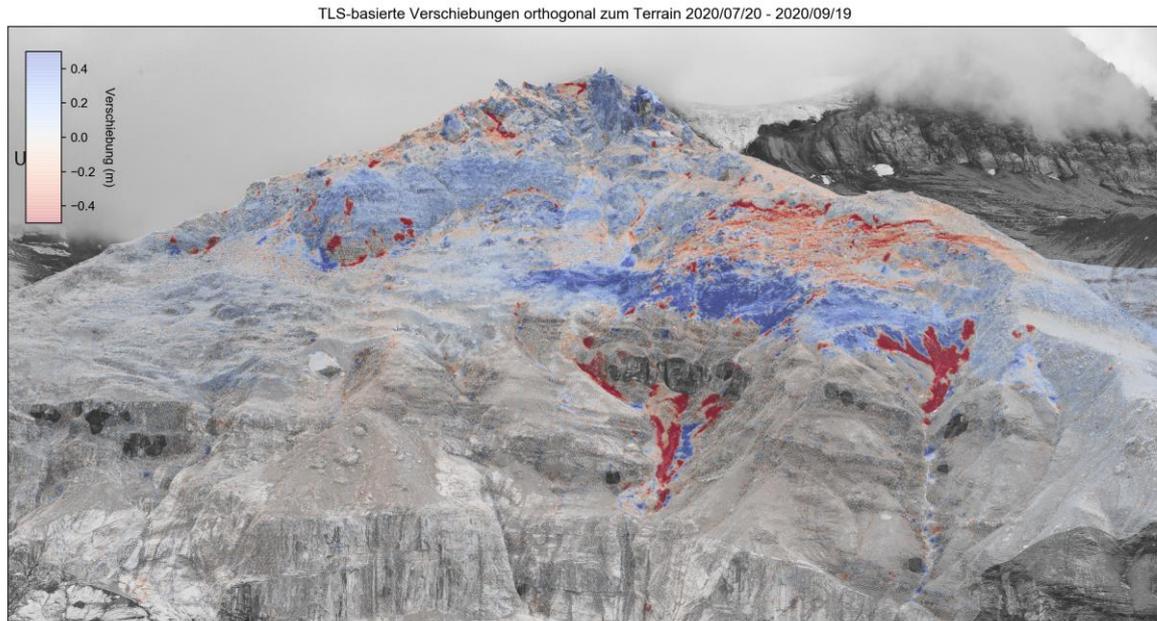
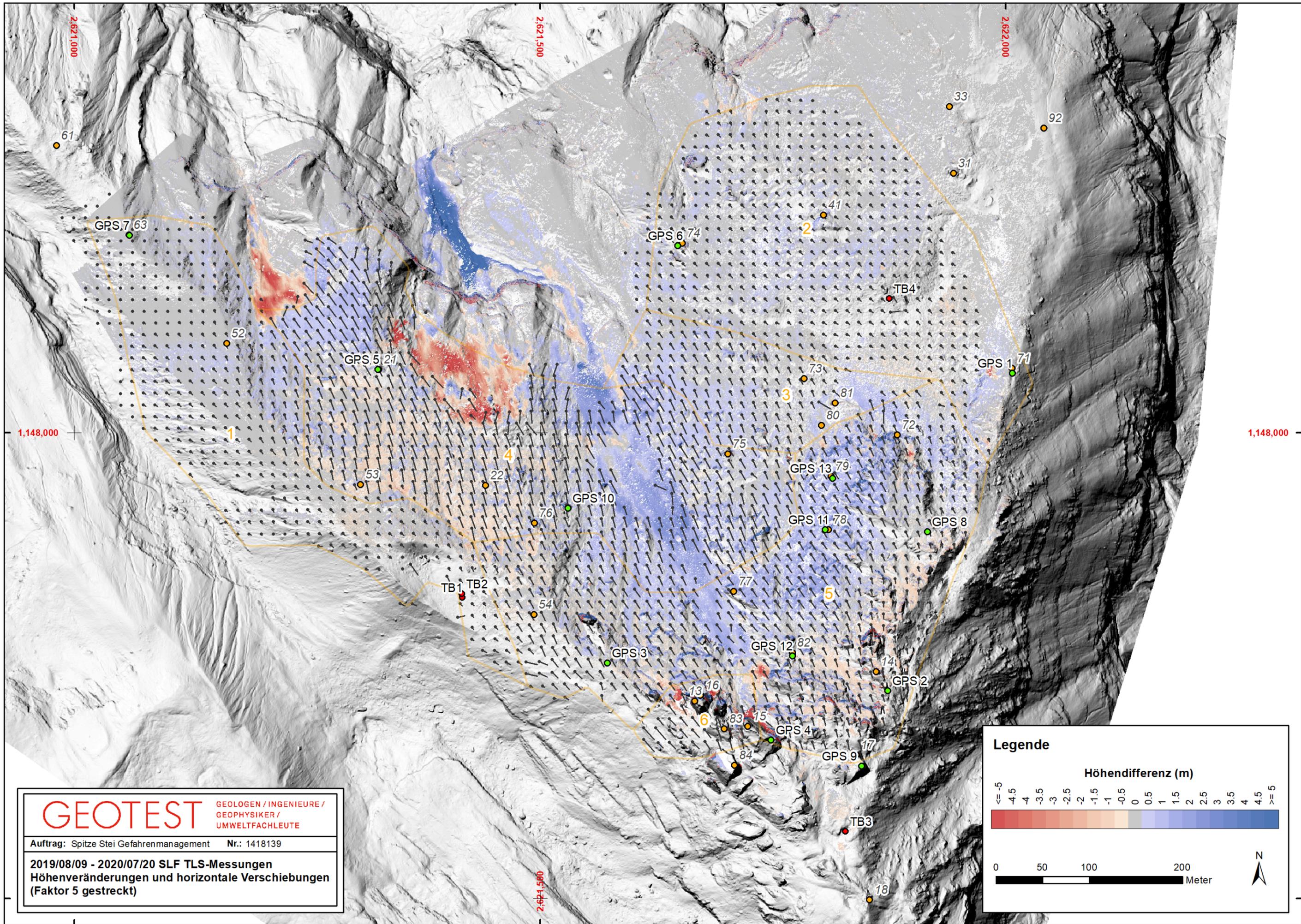


Abbildung 1: TLS-basierte Verschiebungen orthogonal zur Terrainoberfläche für den Zeitraum 20.07.2020 – 20.09.2020. Rottöne zeigen Bereiche, in welchen das Gelände bei der Zweitmessung tiefer lag als bei der Erstmessung (Materialverluste aufgrund plötzlicher Sturz- oder Rutschprozesse oder kontinuierlicher Rutschbewegungen). Blautöne zeigen Bereiche an, in welchen das Gelände bei der Zweitmessung höher lag. Eigene Darstellung basierend auf TLS Daten des SLF und Aufnahmen der Kamera Rosshubel.



GEOTEST GEOLOGEN / INGENIEURE /
 GEOPHYSIKER /
 UMWELTFACHLEUTE

Auftrag: Spitze Stei Gefahrenmanagement Nr.: 1418139

2019/08/09 - 2020/07/20 SLF TLS-Messungen
 Höhenveränderungen und horizontale Verschiebungen
 (Faktor 5 gestreckt)

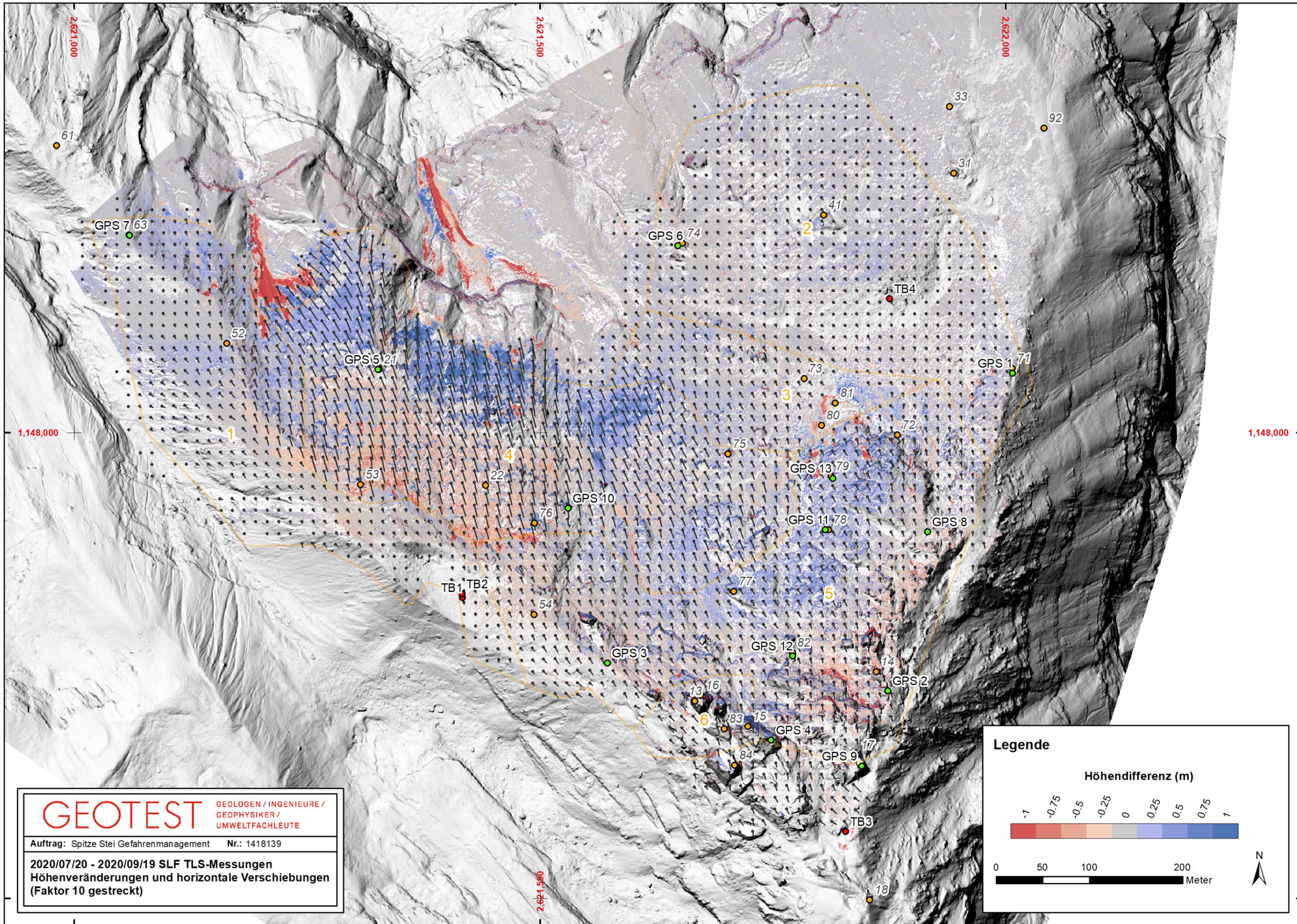
Legende

Höhendifferenz (m)

<= -5	-4.5	-4	-3.5	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	>= 5
-------	------	----	------	----	------	----	------	----	------	---	-----	---	-----	---	-----	---	-----	---	-----	------

0 50 100 200 Meter

N



GEOTEST GEologen / INGENIEURE /
 GEOPHYSIKER /
 UMWELTFACHLEUTE

Auftrag: Spitze Stei Gefahrenmanagement Nr.: 1418139

2020/07/20 - 2020/09/19 SLF TLS-Messungen
 Höhenveränderungen und horizontale Verschiebungen
 (Faktor 10 gestreckt)

Legende

Höhendifferenz (m)

-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1
----	-------	------	-------	---	------	-----	------	---

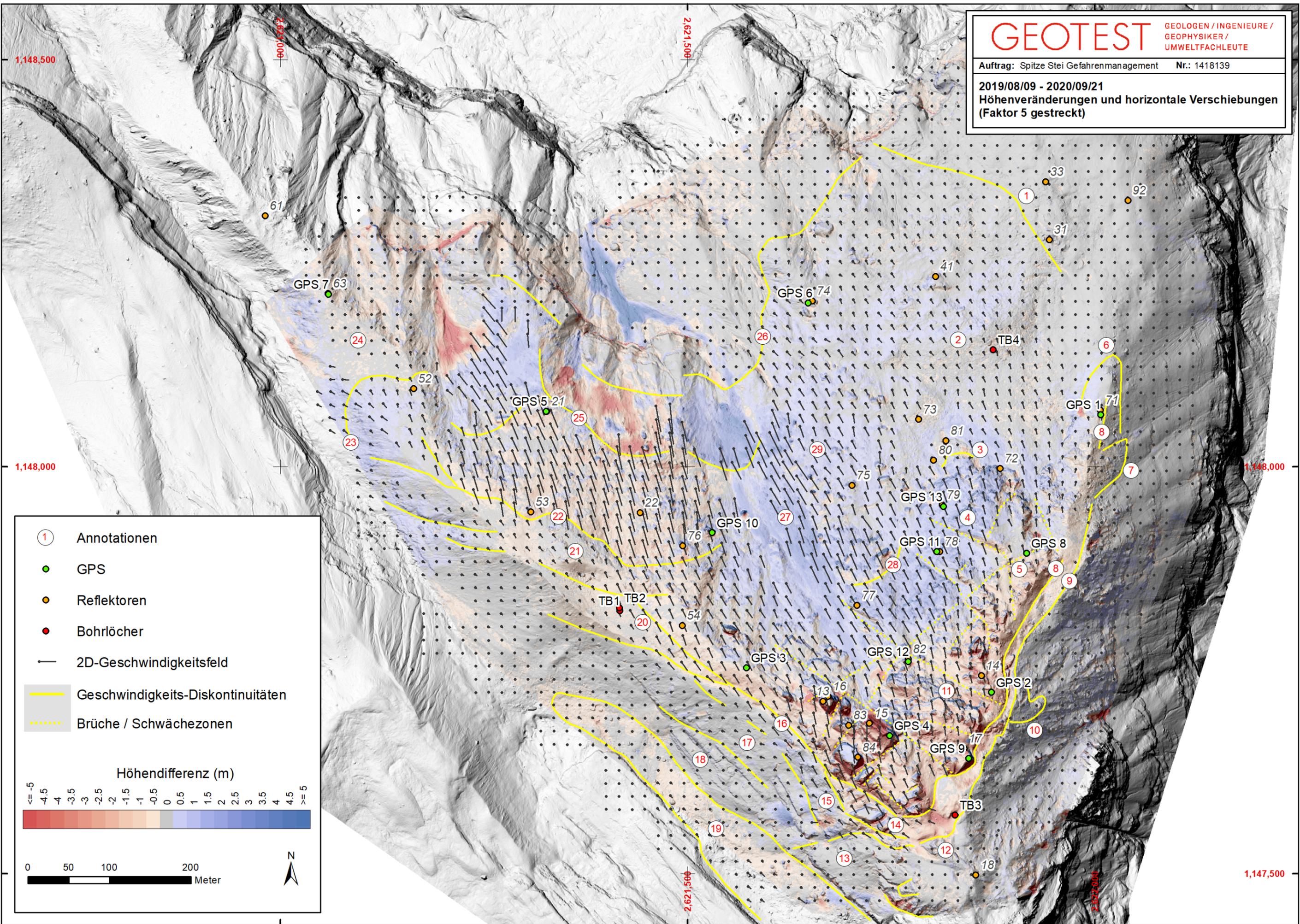
0 50 100 200 Meter

N

1418139.12
Kandersteg, "Spitze Stei" Gefahrenmanagement

GEOTEST GEOLOGEN / INGENIEURE /
GEOPHYSIKER /
UMWELTFACHLEUTE

Anhang 3: Karten Drohnenmessungen



- ① Annotationen
- GPS
- Reflektoren
- Bohrlöcher
- 2D-Geschwindigkeitsfeld
- Geschwindigkeits-Diskontinuitäten
- Brüche / Schwächezonen

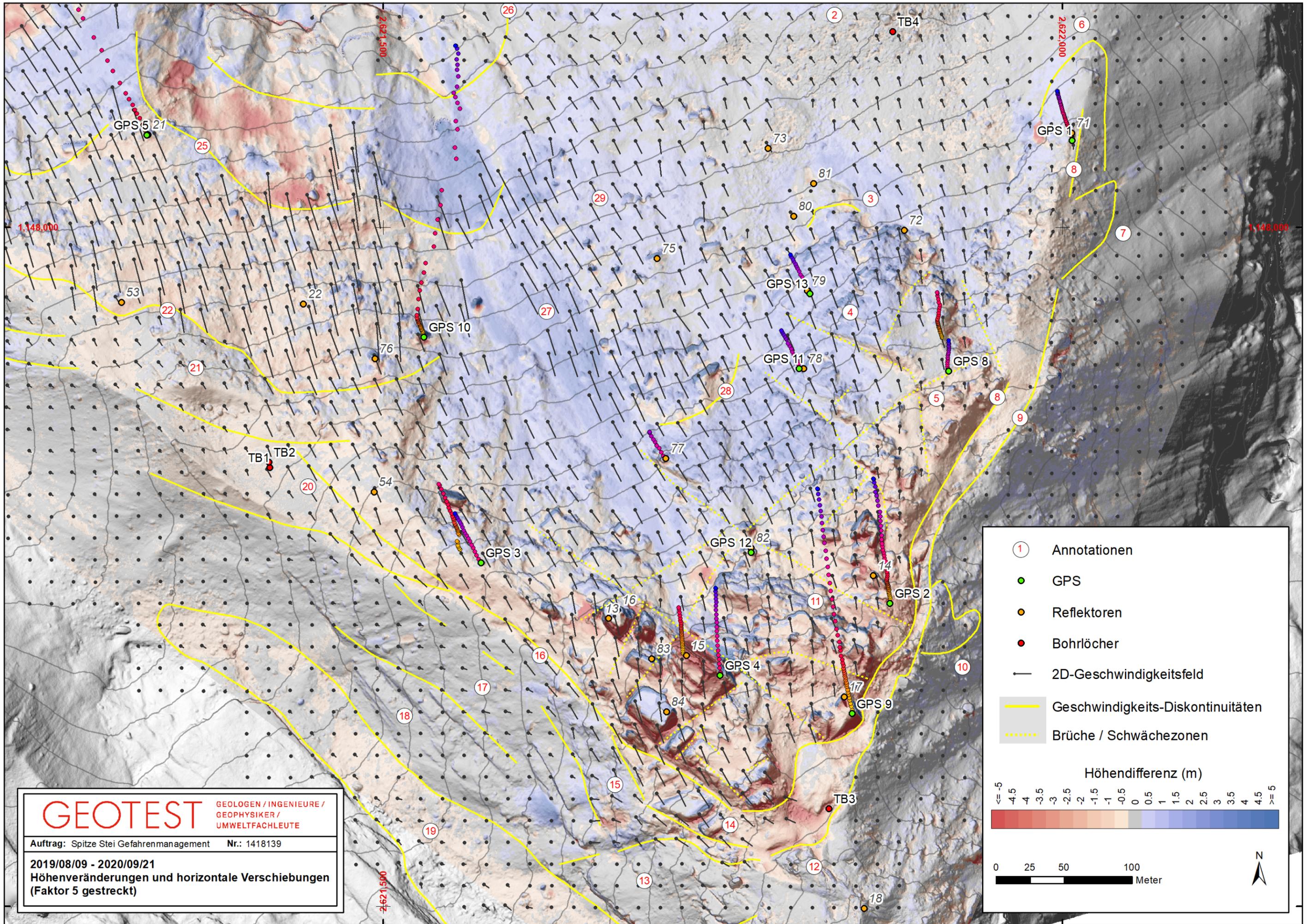
Höhendifferenz (m)

<= -5	-4.5	-4	-3.5	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	>= 5
-------	------	----	------	----	------	----	------	----	------	---	-----	---	-----	---	-----	---	-----	---	-----	------

0 50 100 200 Meter

N

1,147,500



GEOTEST GEOLOGEN / INGENIEURE /
 GEOPHYSIKER /
 UMWELTFACHLEUTE

Auftrag: Spitze Stei Gefahrenmanagement Nr.: 1418139

2019/08/09 - 2020/09/21
 Höhenveränderungen und horizontale Verschiebungen
 (Faktor 5 gestreckt)

- ① Annotationen
- GPS
- Reflektoren
- Bohrlöcher
- 2D-Geschwindigkeitsfeld
- Geschwindigkeits-Diskontinuitäten
- - - Brüche / Schwächezonen

Höhendifferenz (m)

<= -5 -4.5 -4 -3.5 -3 -2.5 -2 -1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 >=5

0 25 50 100 Meter

N

Anhang 4: Fotodokumentation Diskontinuitäten Spitze Stei

Auf den folgenden Karten werden im unteren Panel die kartierten Diskontinuitäten gezeigt. Als Basiskarte dient ein drohnen-basiertes Orthomosaik vom 21.09.2020; Standorte der Reflektoren und GPS sind mit grünen bzw. orangen Punkten eingezeichnet. Das obere Panel zeigt Drohnen-Schrägaufnahmen des Gebietes, aufgenommen am 19.08.2020. Schwarz nummerierte Punktmarkierungen in den beiden Panels dienen der räumlichen Orientierung. Rot nummerierte Markierungen werden im Bericht diskutiert. Der Standort der Drohne zum Zeitpunkt der Schrägaufnahme ist im unteren Panel mit einem roten Punkt markiert. Räumliche Abfolge der Karten: Ostgrat-Gipfel-Westgrat.

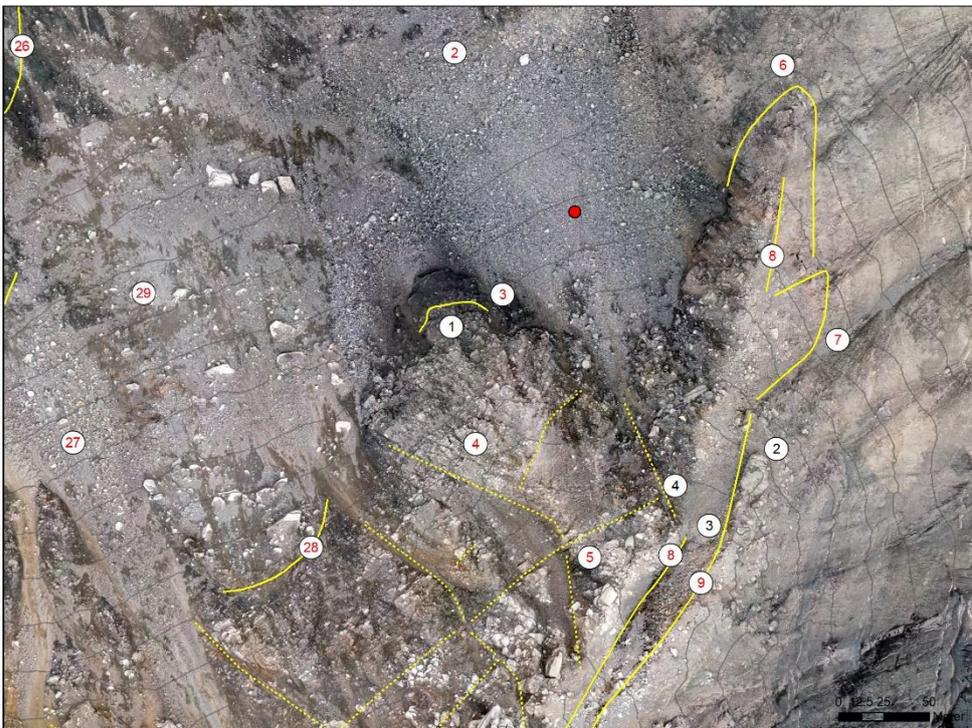
Die ausgezogenen Linien markieren Geschwindigkeitsdiskontinuitäten, welche i.d.R. auch geomorphologischen Elementen entsprechen (z.B. Ausbisslinien Felsrutschung, Anbruchkanten Schuttrutschung). Die Diskontinuitäten wurden manuell kartiert, basierend auf den 2020 erhobenen flächigen Datensätzen, insbesondere:

- drohnen-basierte Orthofotos und Höhenmodelle
- TLS-basierte Höhenmodelle
- Fotos der Timelapse-Kameras
- Feldbeobachtungen/Feldfotos

Punktmessungen (GPS, Reflektoren) und Radardaten wurden zur Validierung beigezogen.

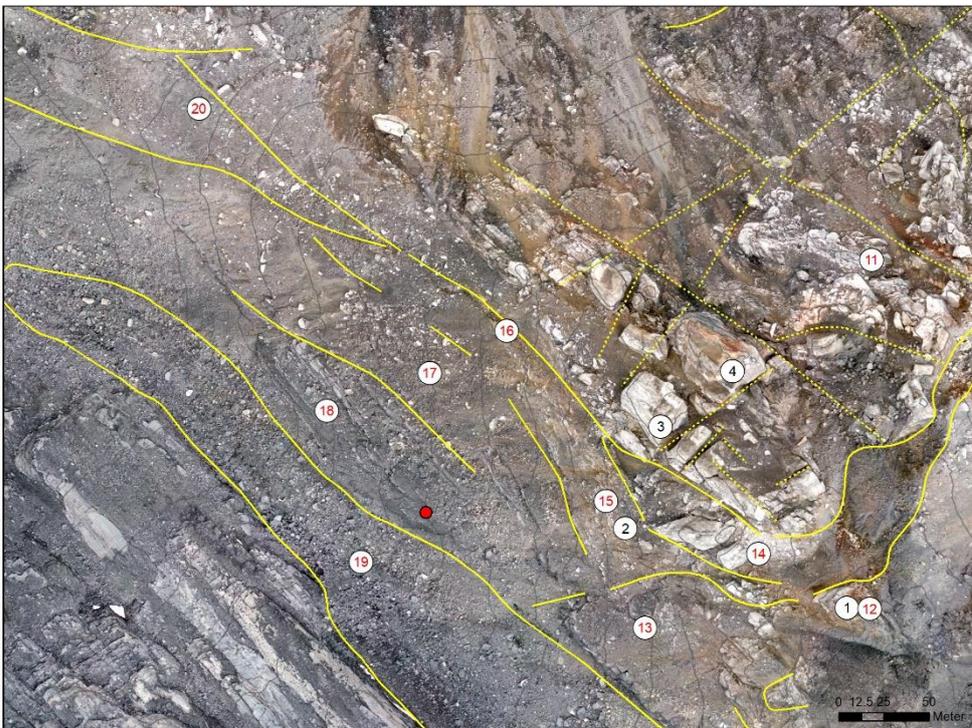
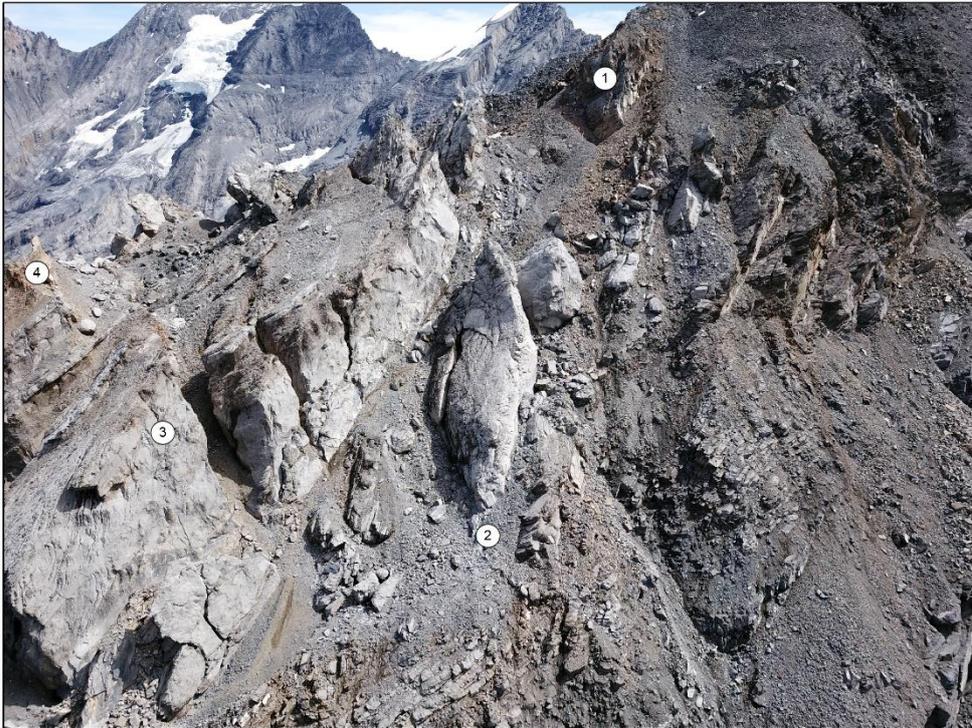
Die gestrichelten Linien entsprechen Brüchen / Schwächezonen innerhalb des Felsteils der Rutschung. Die entsprechenden Kartierarbeiten basierten primär auf der visuellen Auswertung von Drohnen-Schrägaufnahmen, Orthophotos und Höhenmodellen.

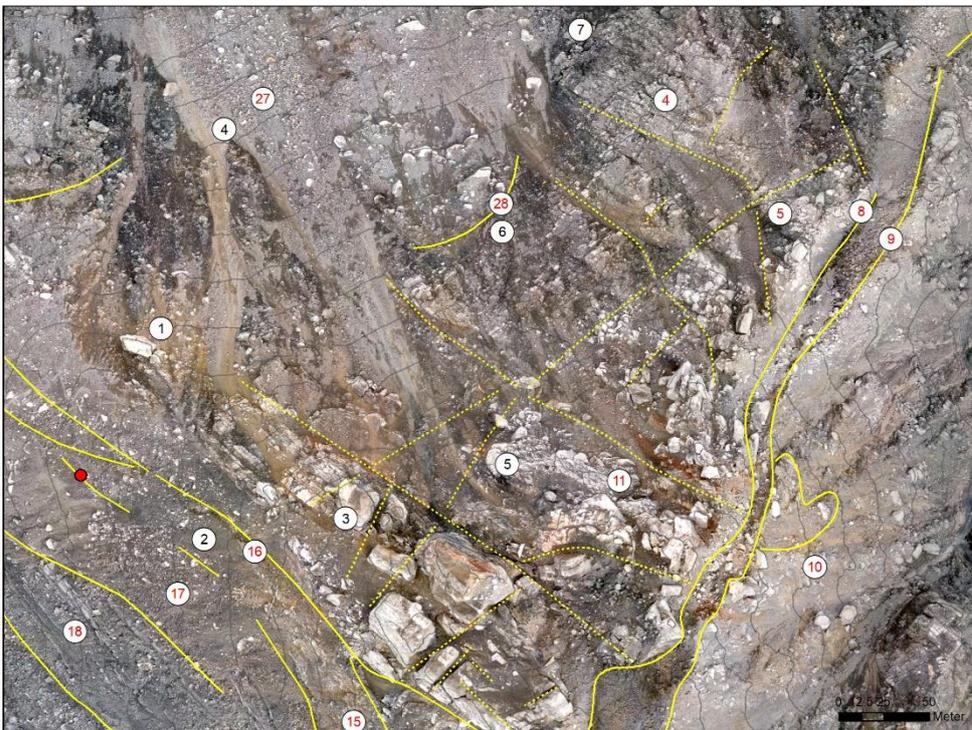








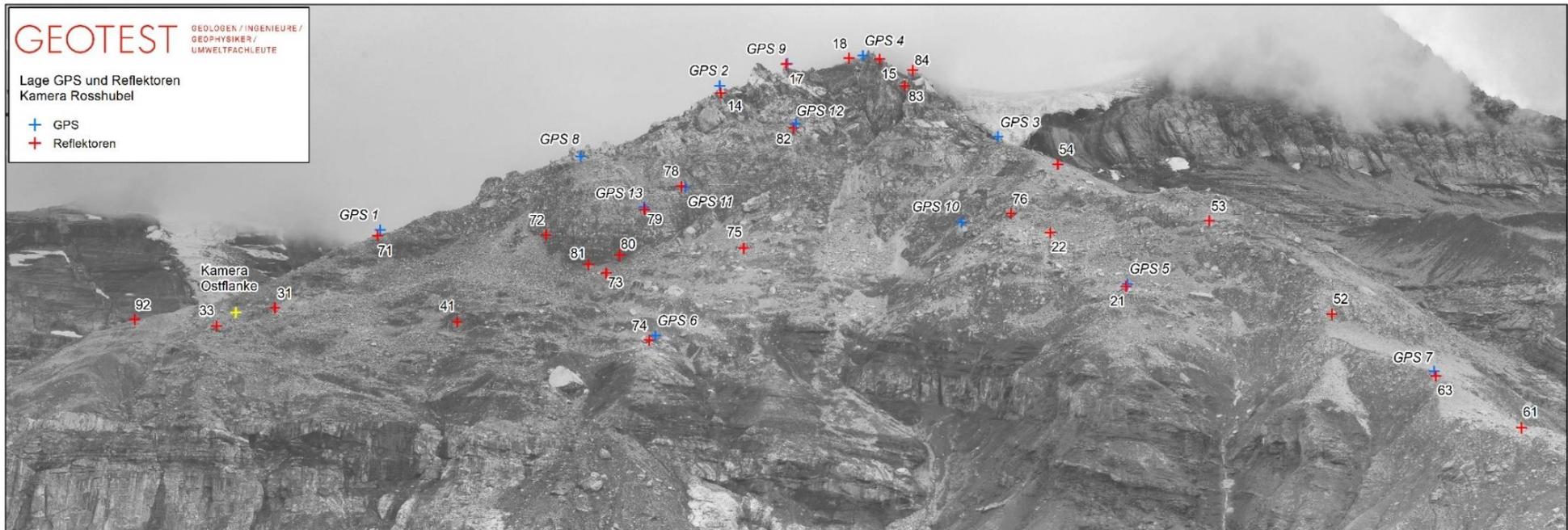


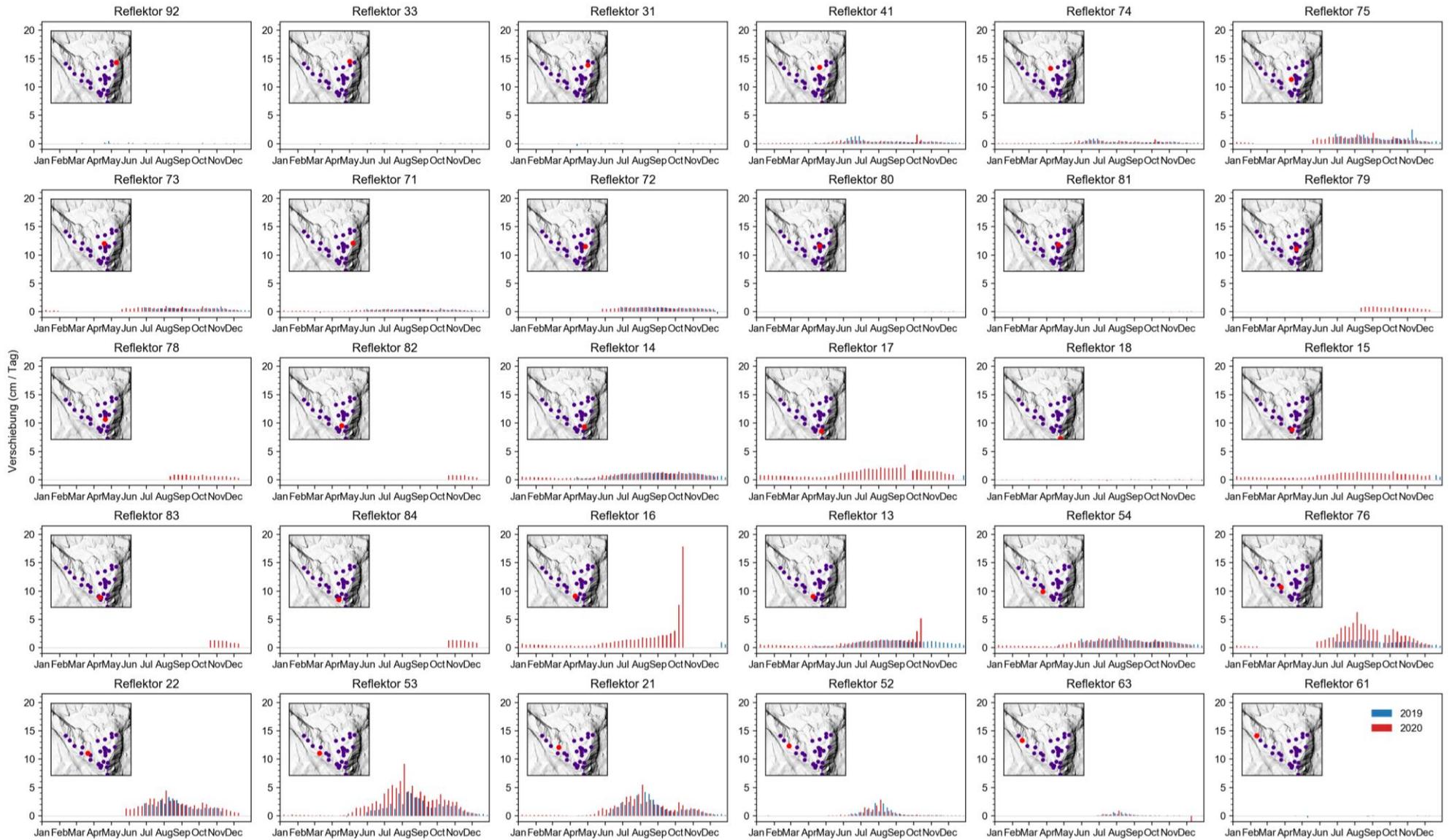






Anhang 5: Übersicht Reflektoren/GPS





1418139.12

Kandersteg, "Spitze Stei" Gefahrenmanagement

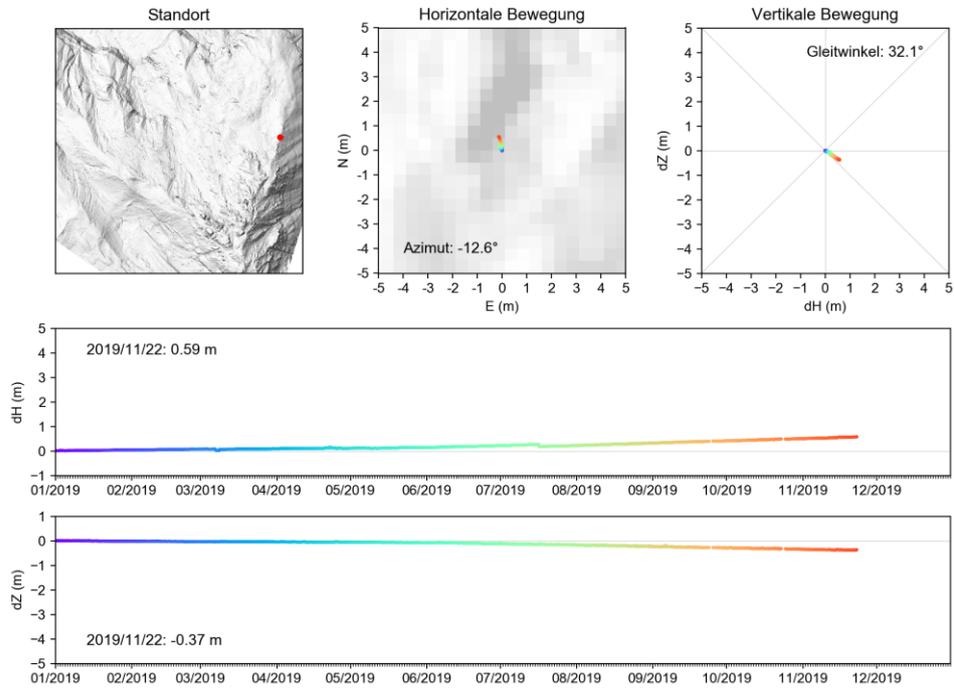
Abbildung 1: Wöchentlich gemittelte Verschiebungsraten für die geodätisch vermessenen Reflektoren. Blaue Balken entsprechen dem Jahr 2019, rote Balken dem Jahr 2020. Die hohen Bewegungsraten bei Reflektor 13 und 16 wurden vor dem Absturz des betreffenden Felspfeiles erreicht.

Anhang 6: GPS-Gleitwinkel, 2019 – 2020

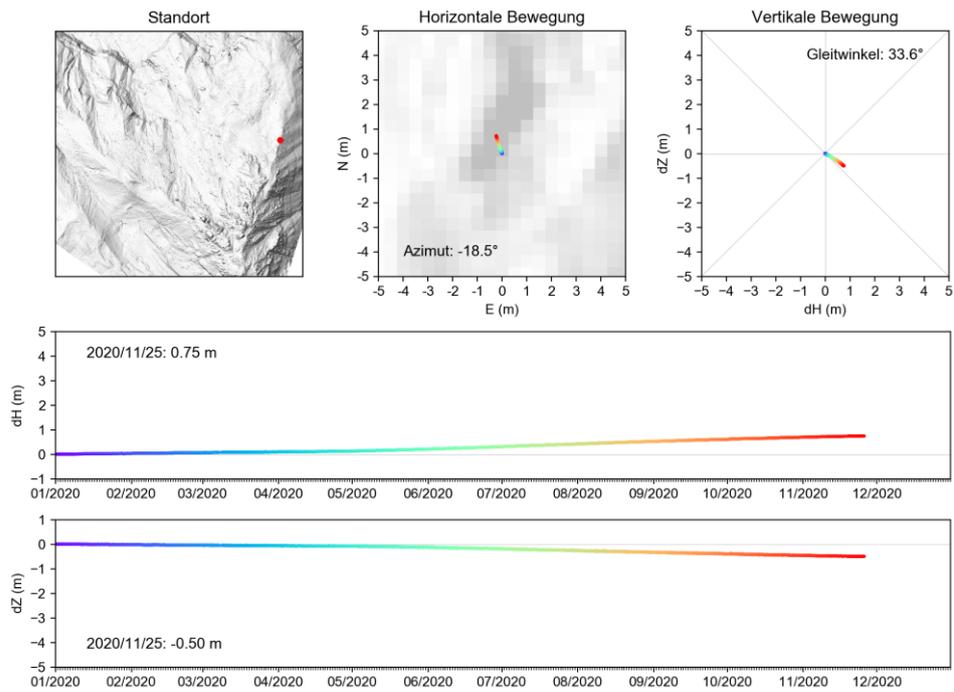
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen jeweils die Lage des GPS (Panel oben links), die horizontalen Bewegungen (oben Mitte) sowie die vertikalen Bewegungen (oben rechts). Die durchschnittlichen Bewegungsazimute (Nord=0°) und Gleitwinkel (horizontal=0°) sind in den Panels annotiert. Die unteren Panels zeigen die kumulativen Zeitreihen der horizontalen (dH) und vertikalen (dZ) Bewegungen. Der Farbton ist eine Funktion der Zeit.

Pro Jahr und GPS wurde eine separate Abbildung erstellt; bei Umplatzierungen wurde ebenfalls eine neue Abbildung erstellt.

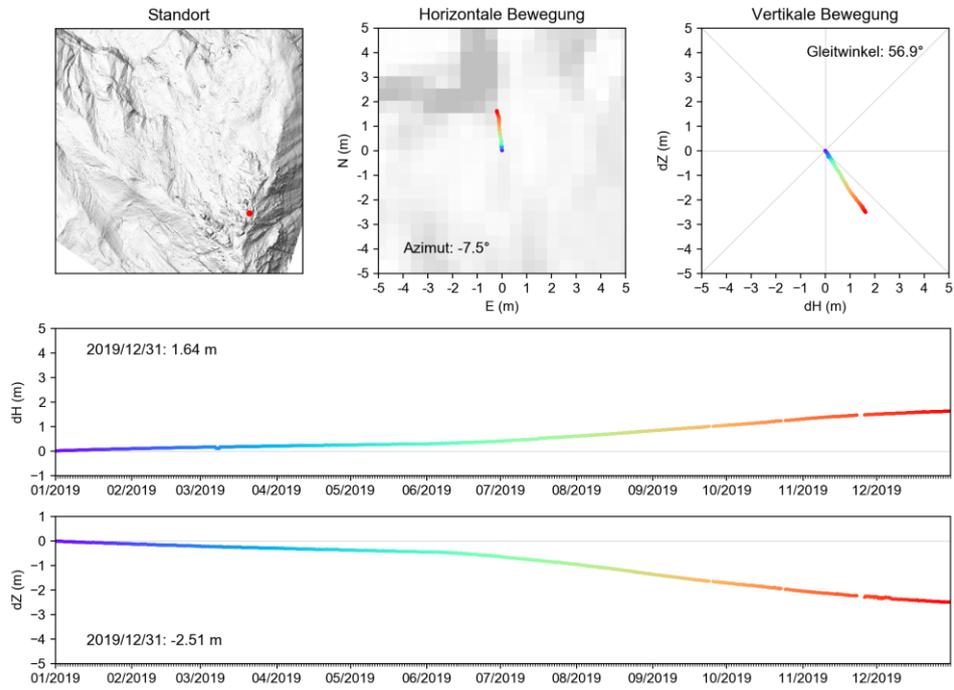
GPS 1 Jahr 2019



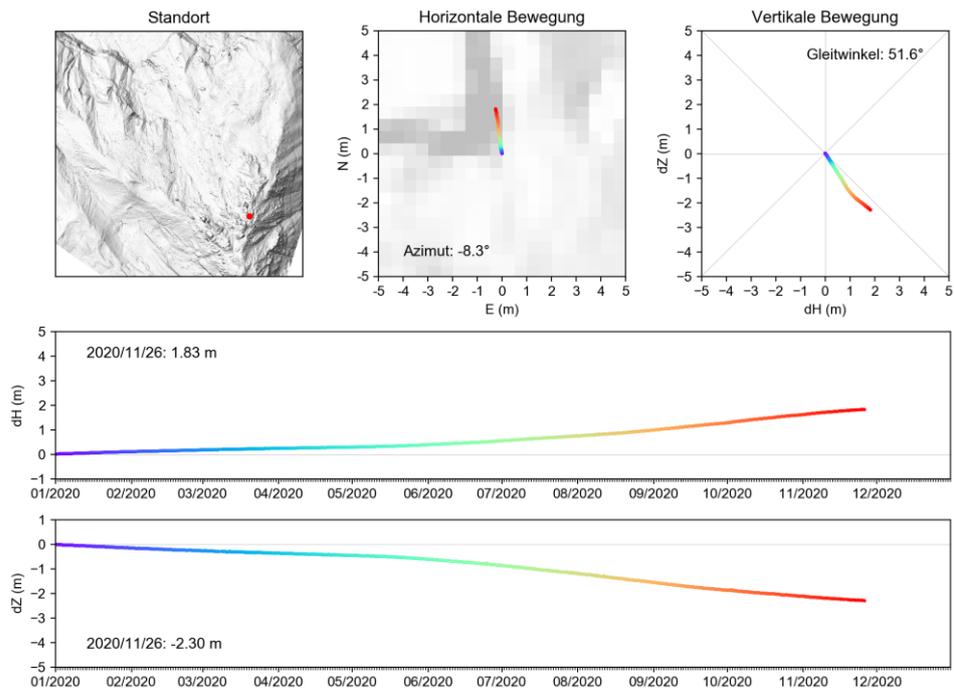
GPS 1 Jahr 2020



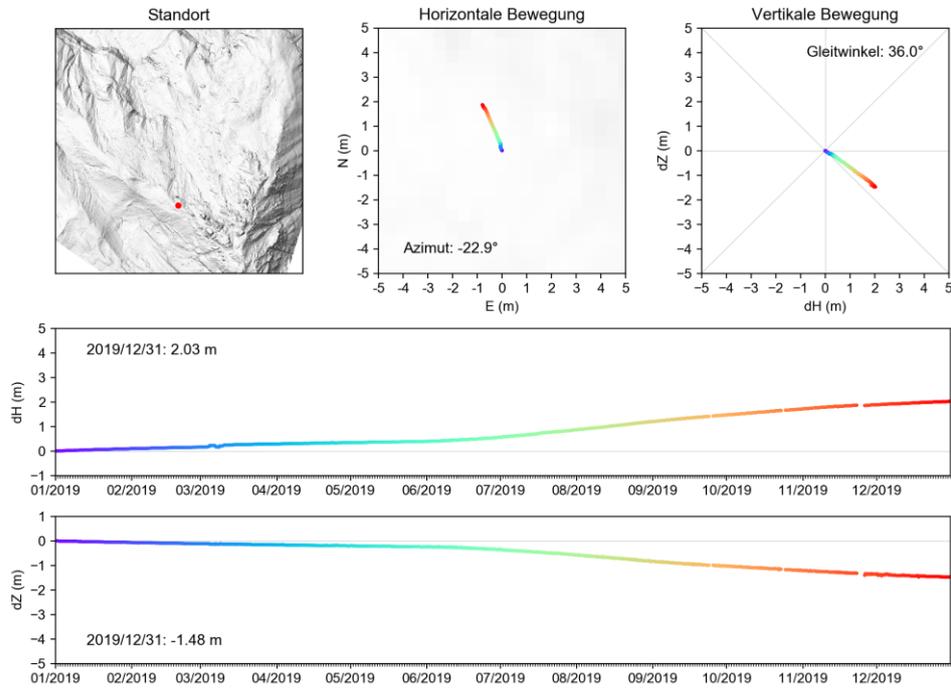
GPS 2 Jahr 2019



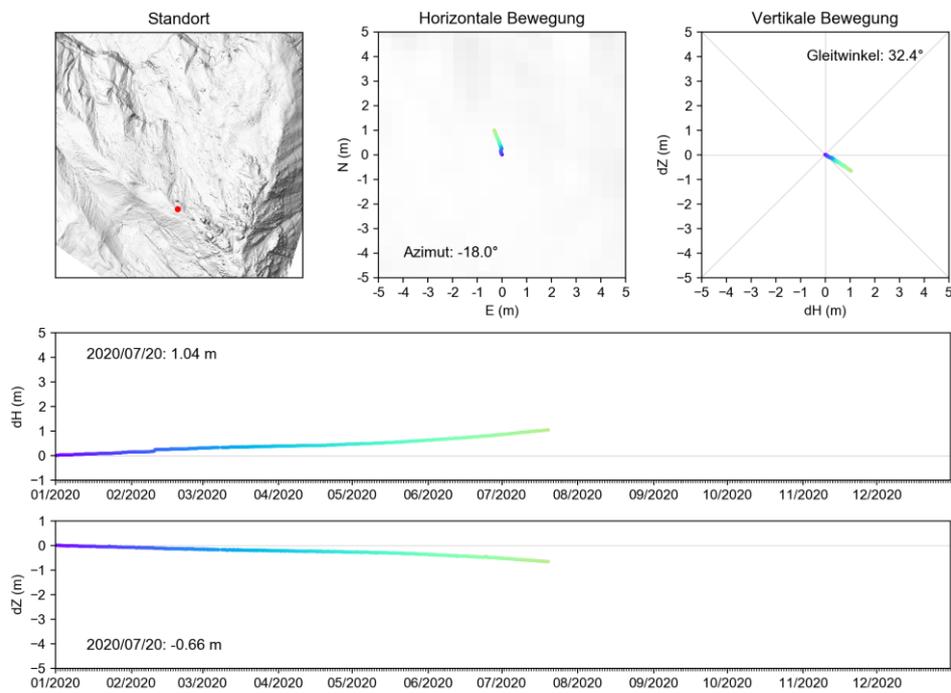
GPS 2 Jahr 2020

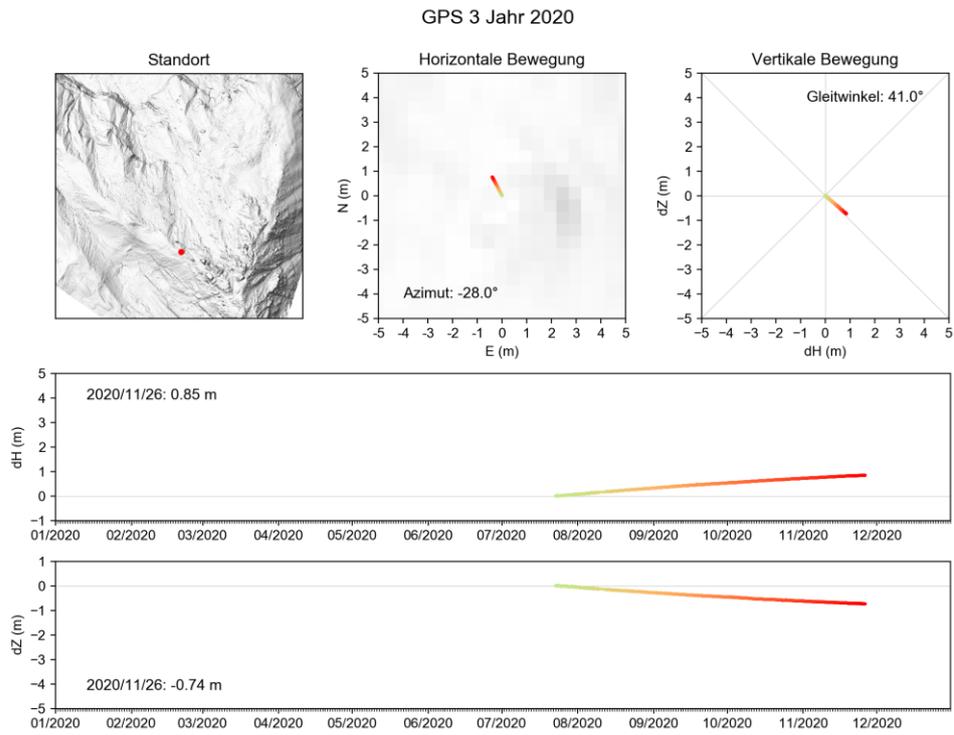


GPS 3 Jahr 2019

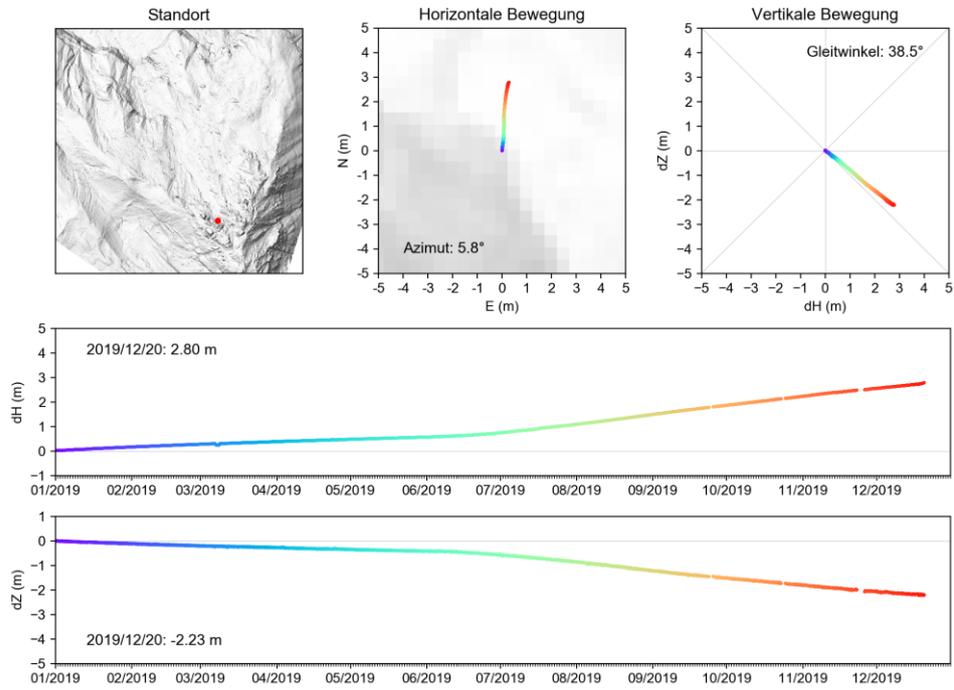


GPS 3 Jahr 2020

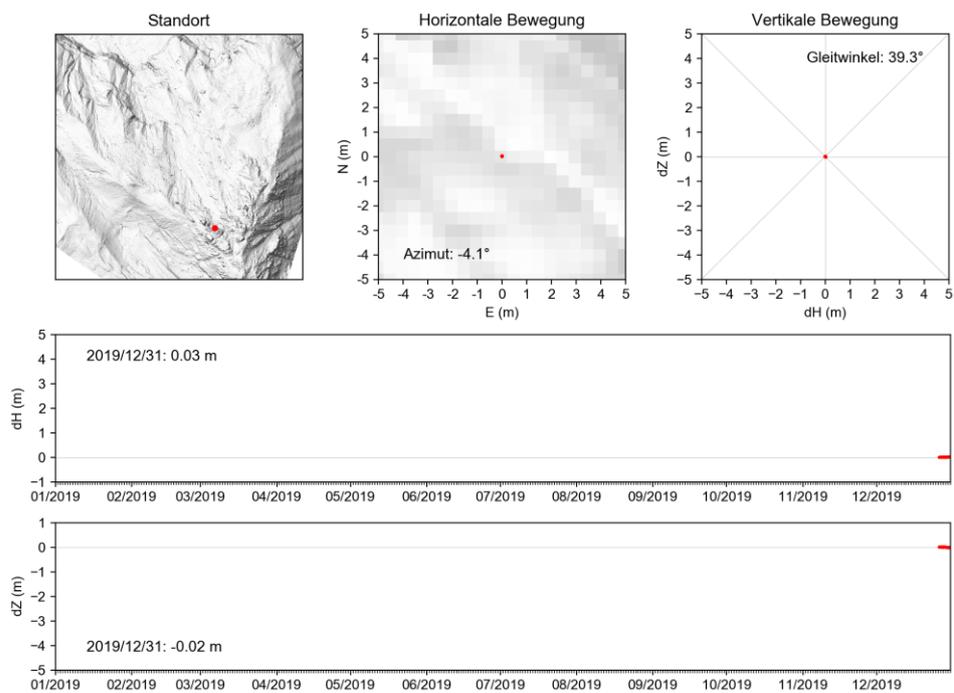




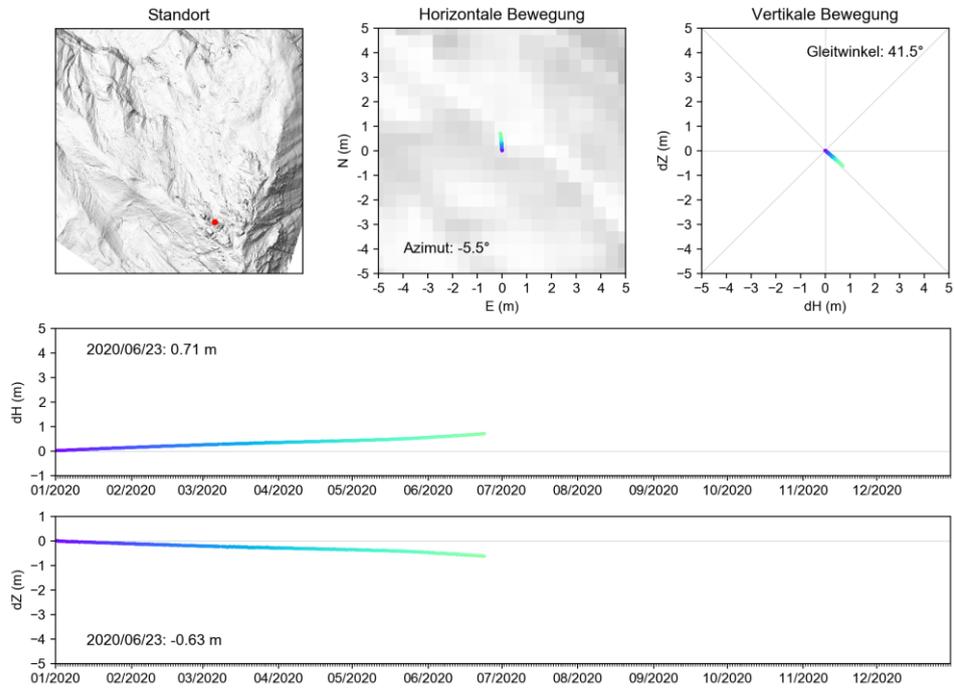
GPS 4 Jahr 2019



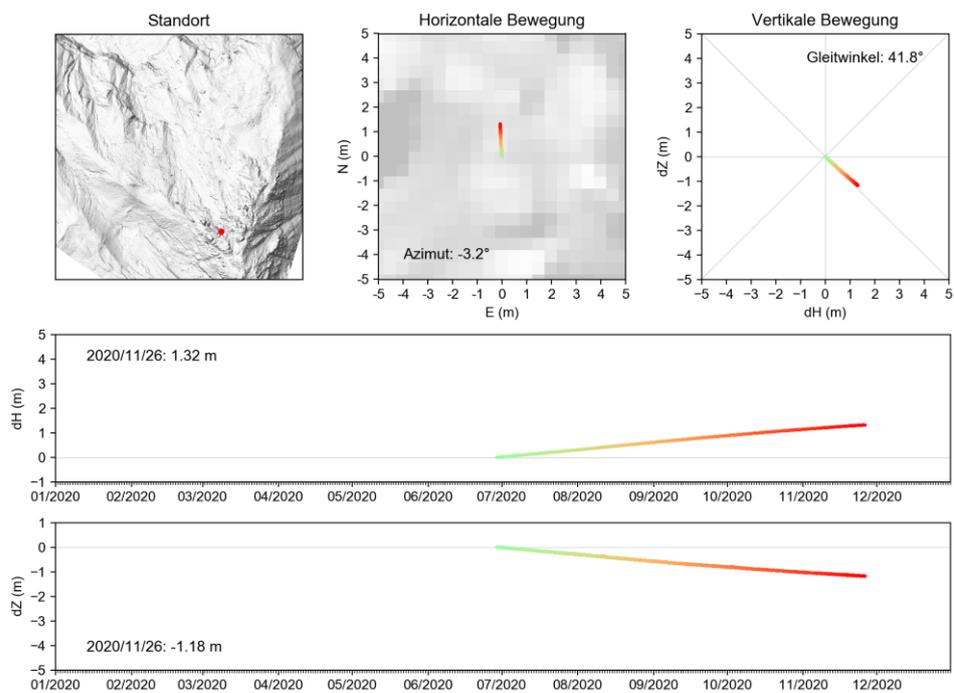
GPS 4 Jahr 2019



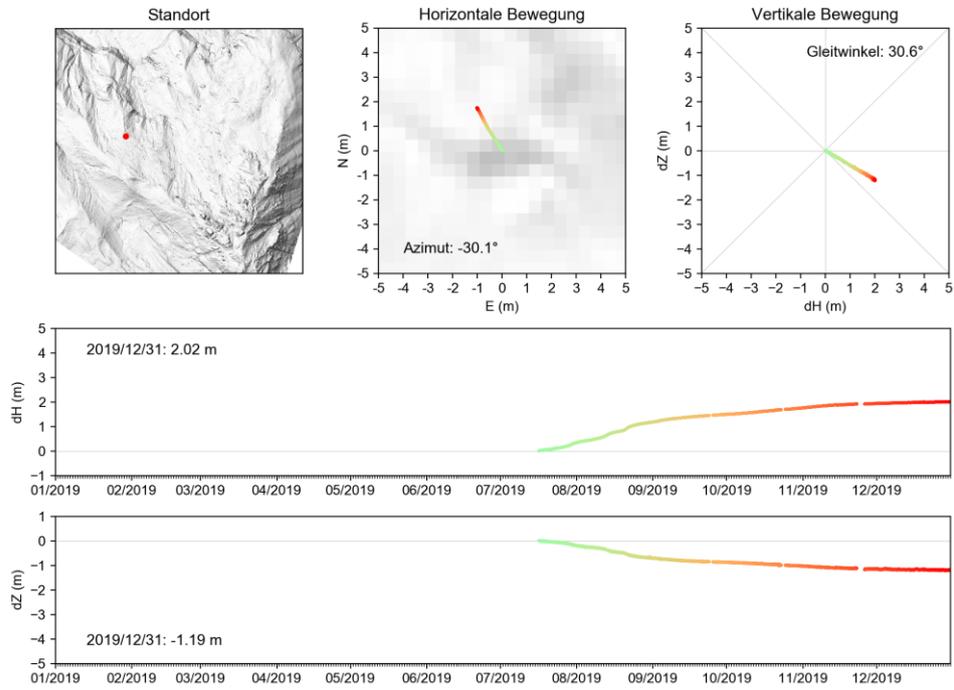
GPS 4 Jahr 2020



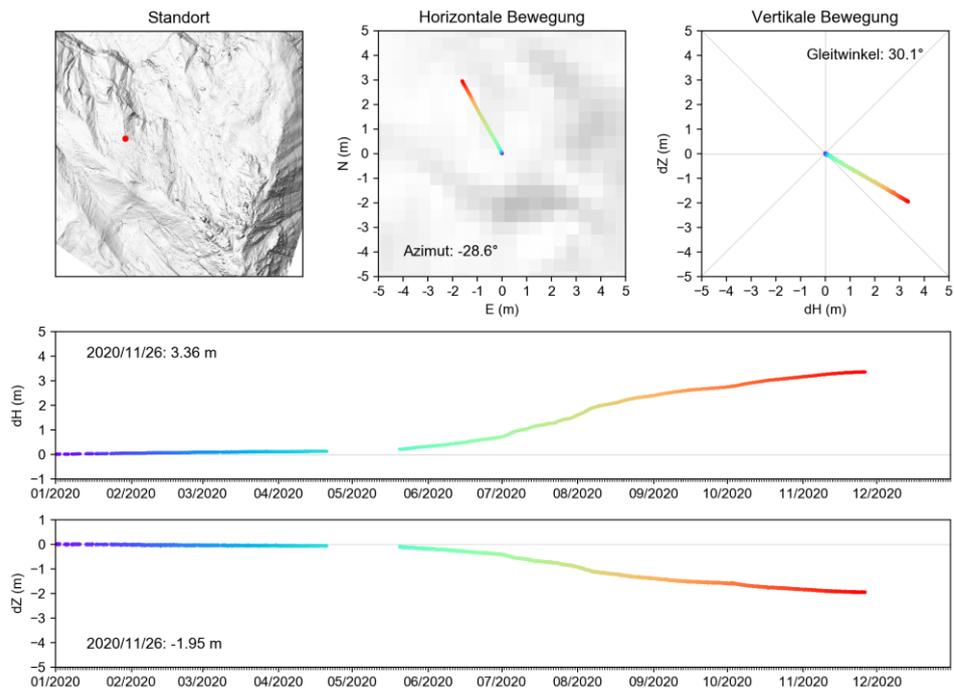
GPS 4 Jahr 2020



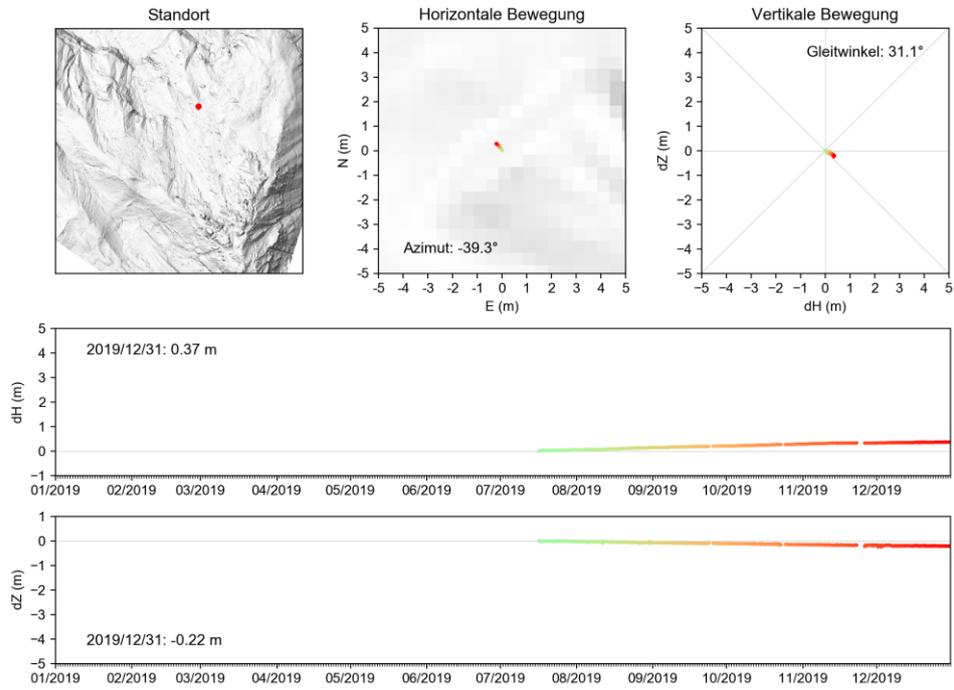
GPS 5 Jahr 2019



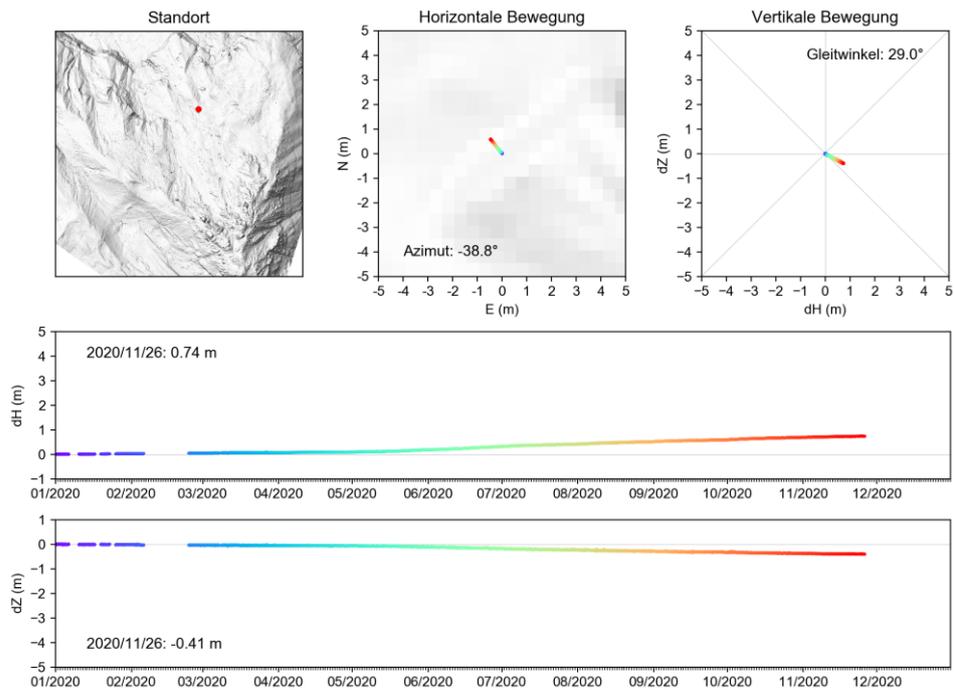
GPS 5 Jahr 2020



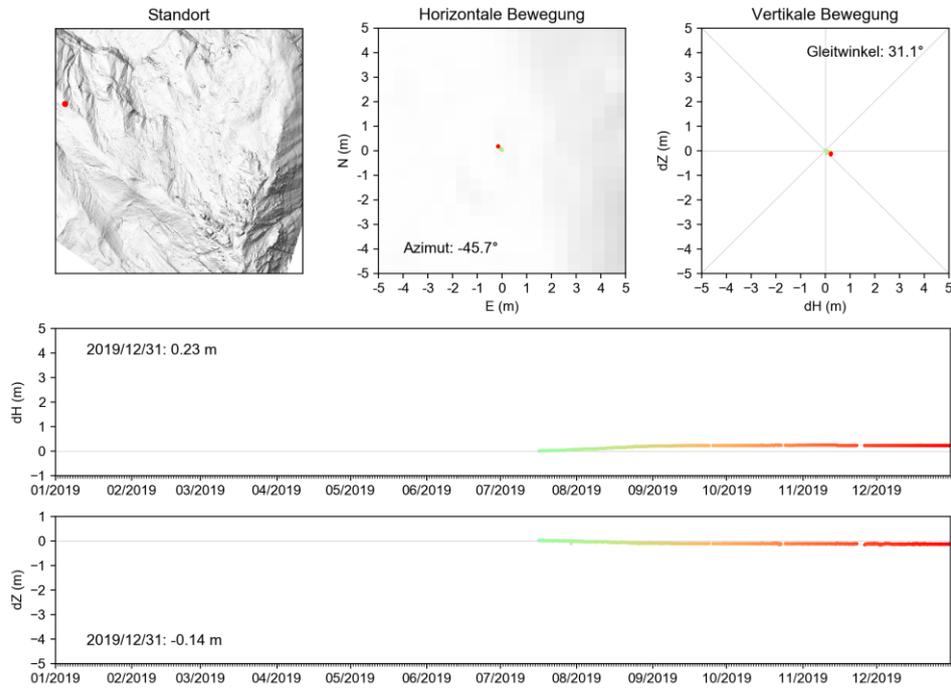
GPS 6 Jahr 2019



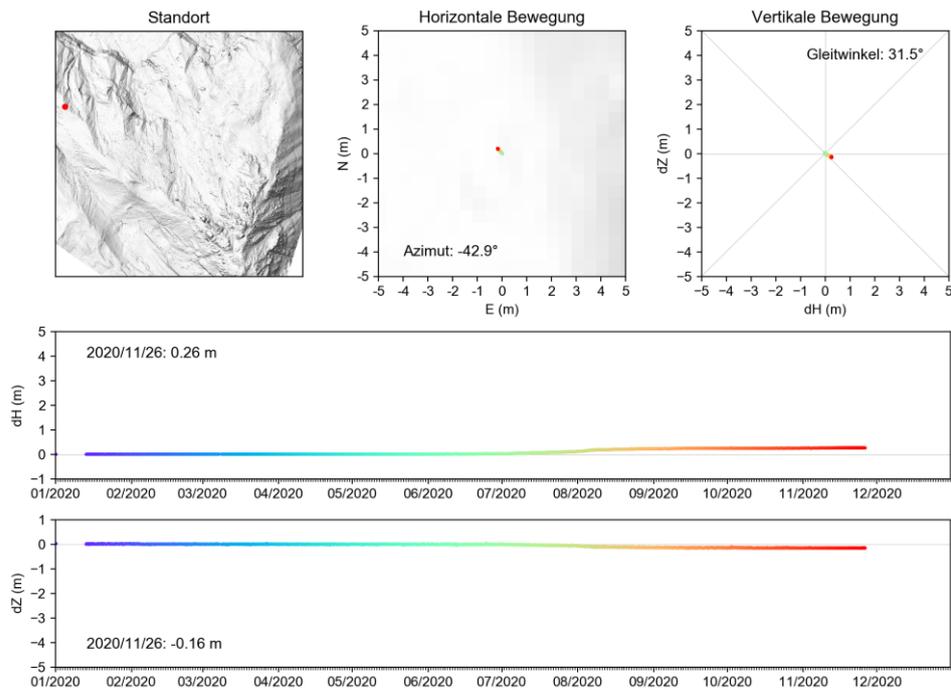
GPS 6 Jahr 2020



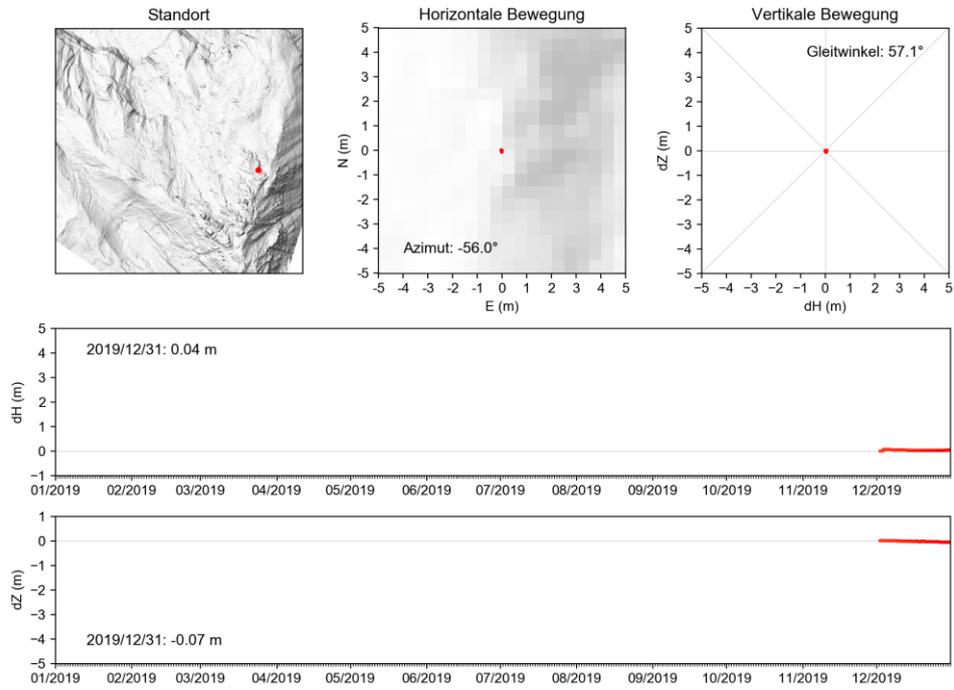
GPS 7 Jahr 2019



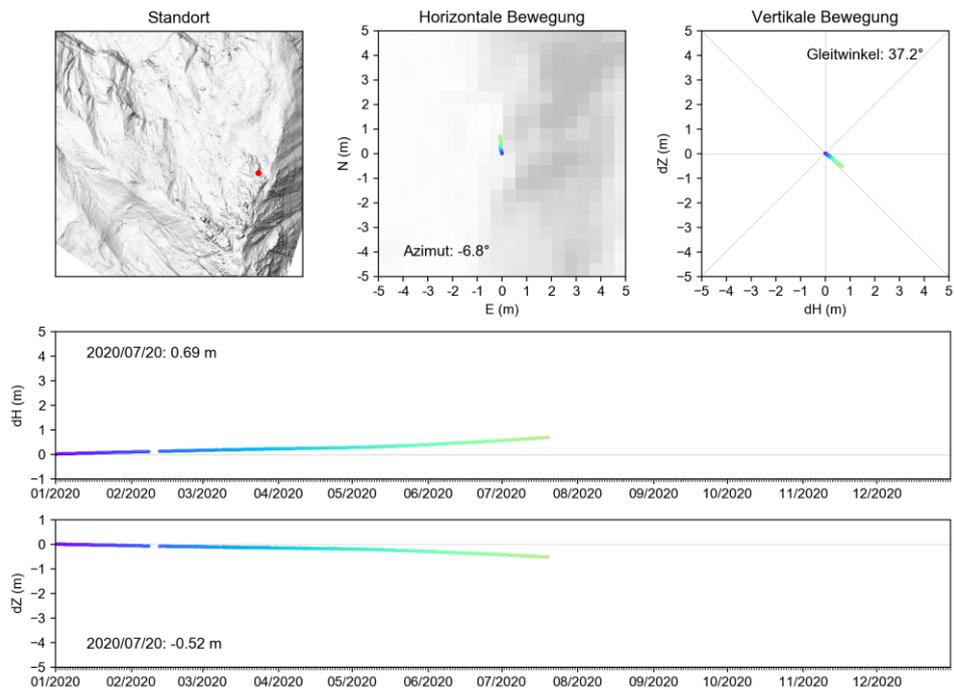
GPS 7 Jahr 2020

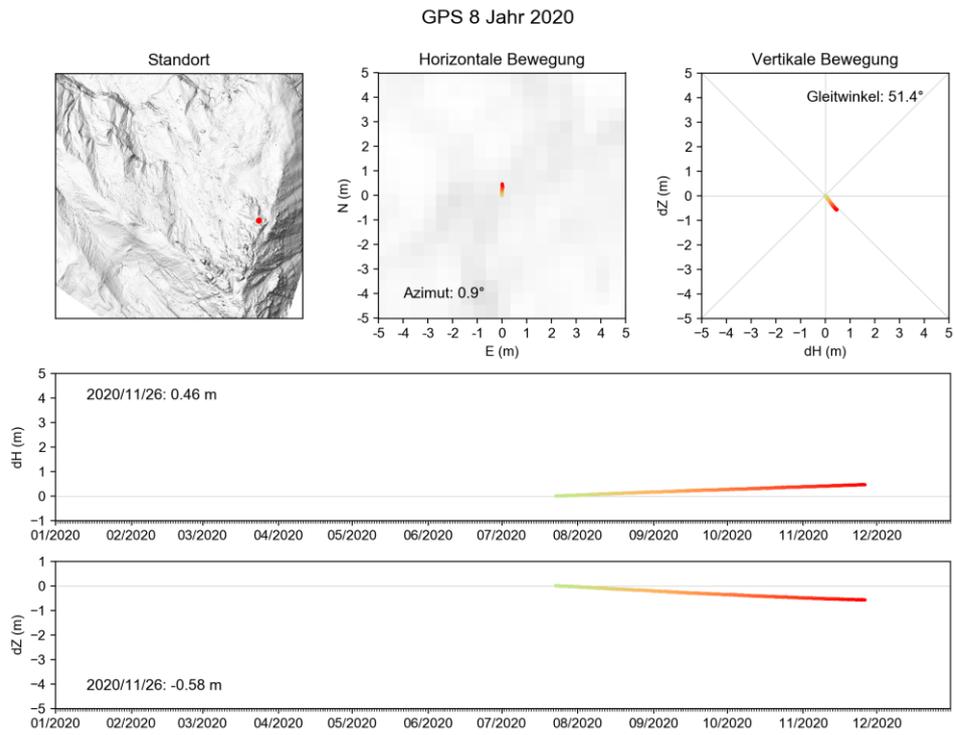


GPS 8 Jahr 2019

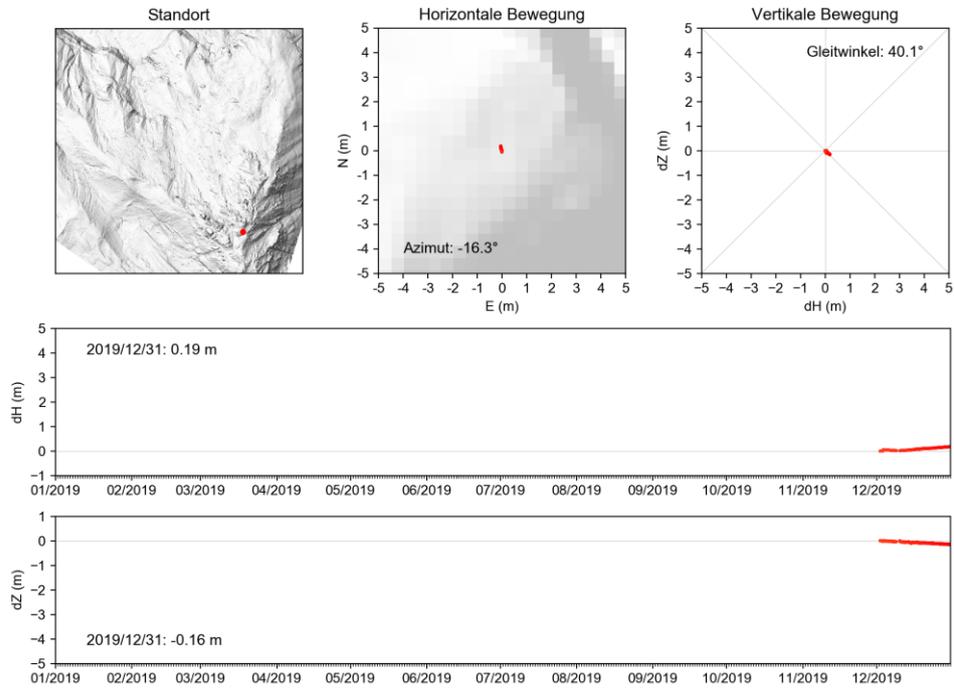


GPS 8 Jahr 2020

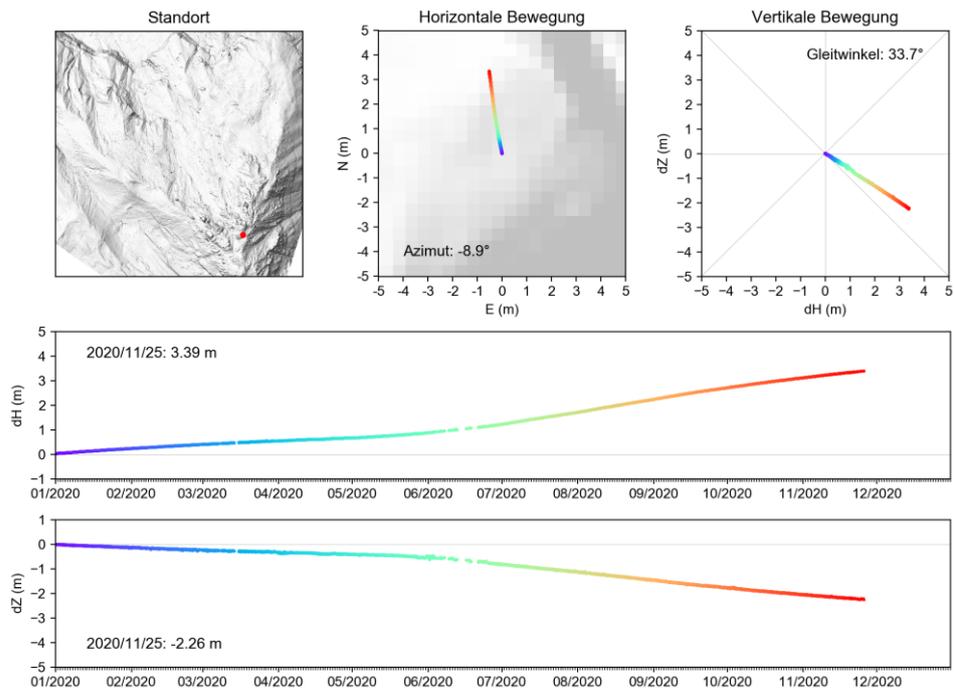




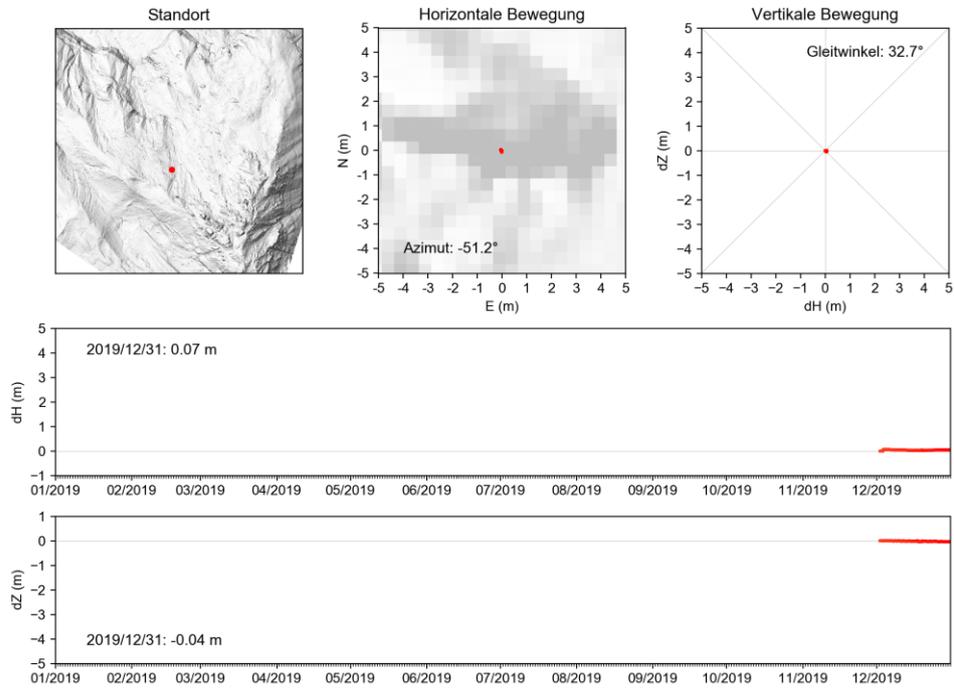
GPS 9 Jahr 2019



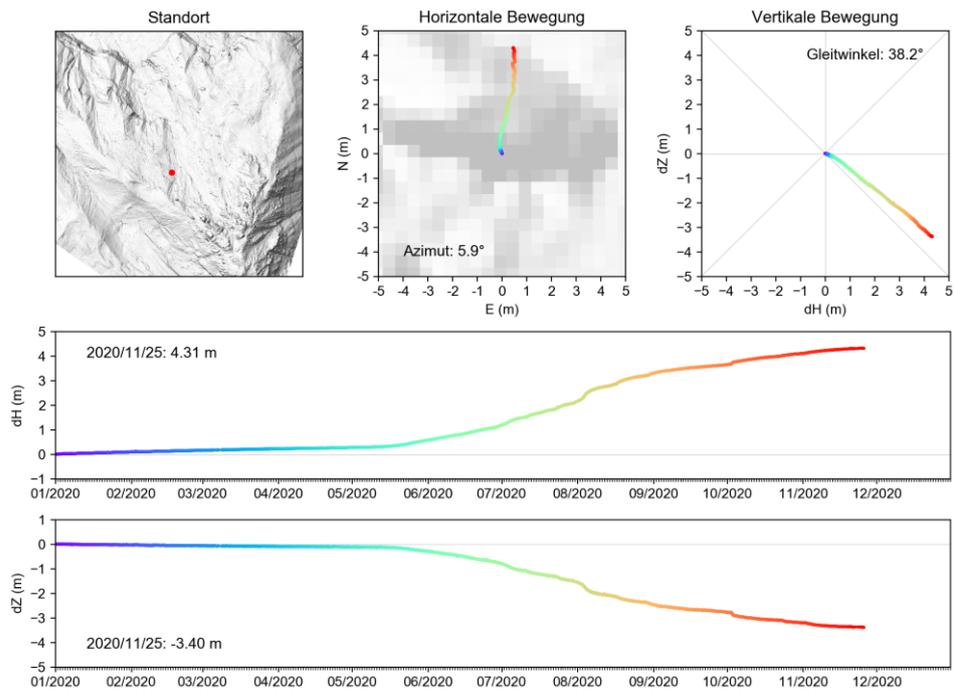
GPS 9 Jahr 2020



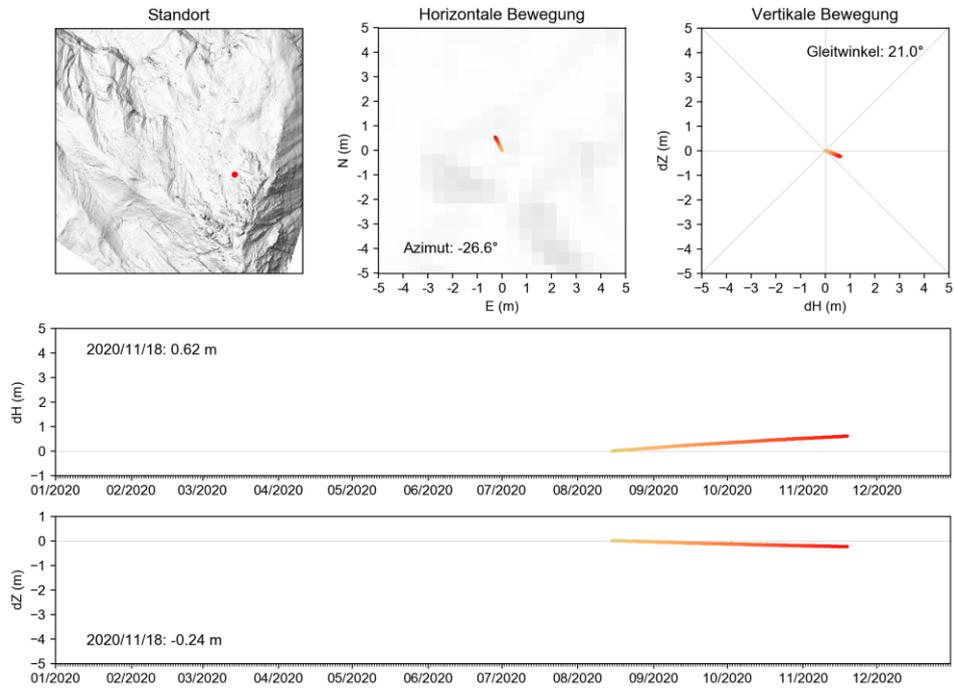
GPS 10 Jahr 2019



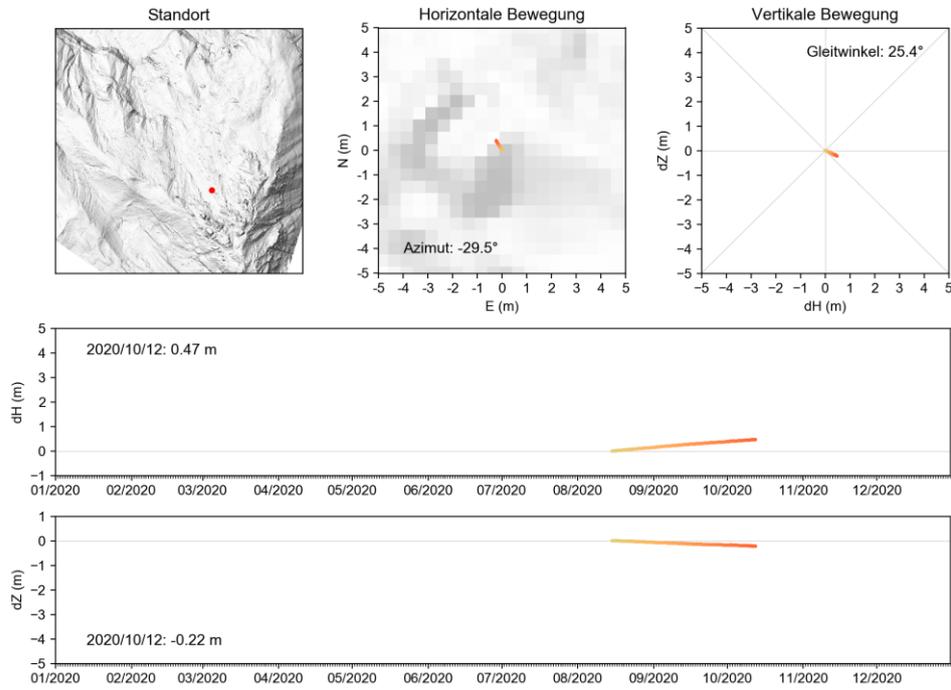
GPS 10 Jahr 2020



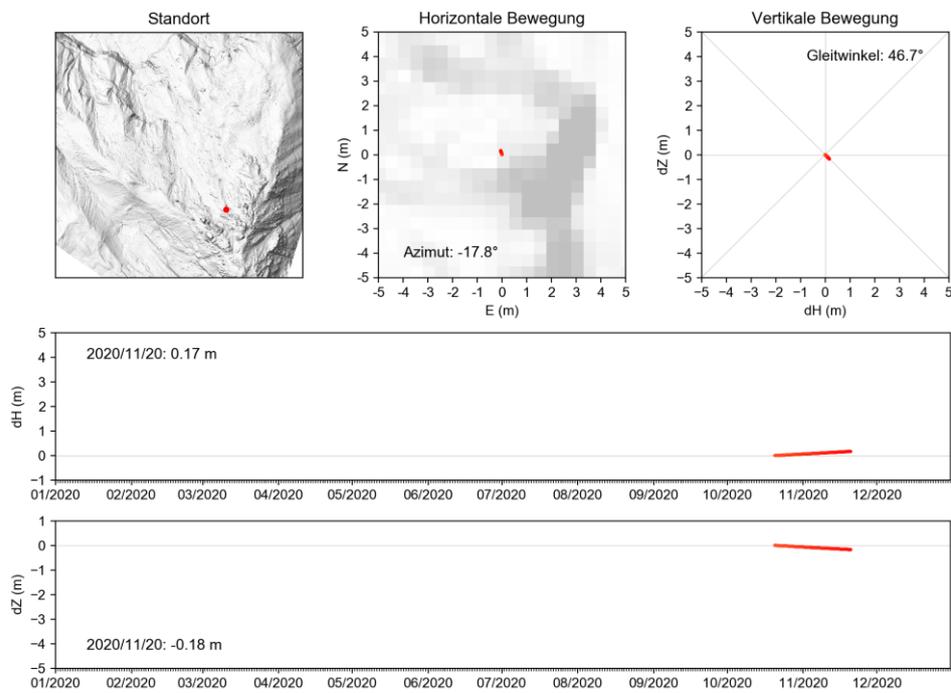
GPS 11 Jahr 2020



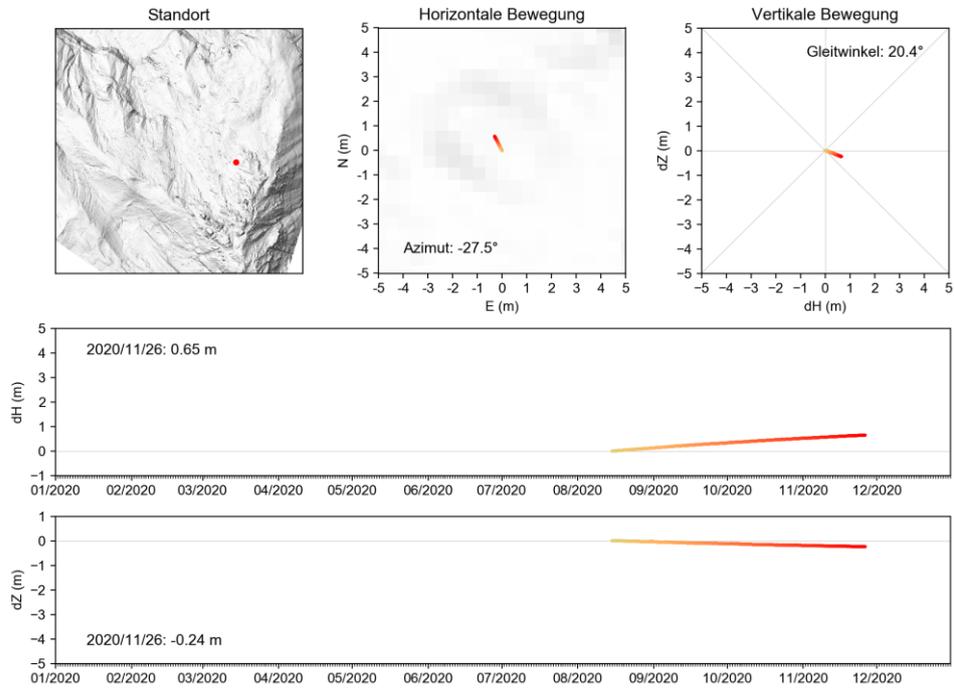
GPS 12 Jahr 2020



GPS 12 Jahr 2020



GPS 13 Jahr 2020



Anhang 7: Übersicht Ereignisse 2020

Nachfolgend werden die Ereignisse des Jahres 2020 tabellarisch zusammengefasst (Stand November 2020, nur grössere Ereignisse aufgeführt).

Datum	Beschrieb
21.01.2020	Abbruch unterhalb des Spitze Steis (Bereich Refl. 11 - 13)
09.05.2020	Felsabbruch (Grössenordnung 20 - 50 m ³) im Bereich der Felsrutschung unterhalb des Ostgrates.
18.06.2020	<p>Materialausbruch im frontalen Bereich der Schuttrutschung an der Wesflanke. Beim Ereignis wurden schätzungsweise 5'000 - 10'000 m³ Material mobilisiert. Ein Teil des Materials verblieb in der Ausbruchnische. Ein weiterer Teil des Materials stürzte ab und wurde im flacheren Bereich unterhalb zwischengelagert. Das zwischengelagerte Material wurde bis am Abend des 18. Juni teilweise remobilisiert und gelangte bis in den inneren Chalberspissibach. Anschliessend geschiebereicher Abfluss / Murgang bis hinunter zur Skibrücke. Rinderstutzbrücke wurde überführt.</p> 

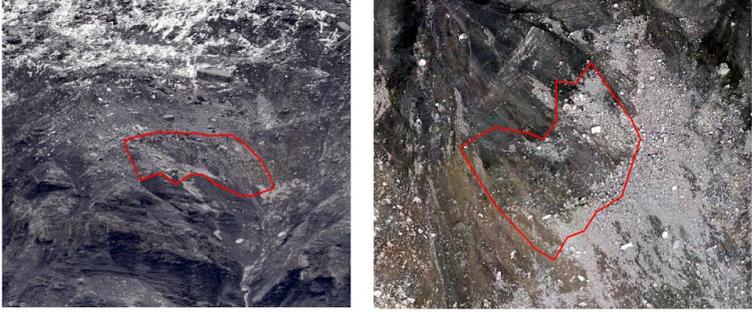


Bildquelle: N. Hählen

21.06.2020	Abbruch eines Stückes des talseitigen Stumpfes des Spitze Stei.
04.08.2020	Kleiner Abbruch im Bereich der Felsrutschung unterhalb des Ostgrates.

<p>16.08.2020</p>	<p>Murgang im Oeschibach ohne vorgängige grössere Ereignisse im Bereich der Rutschung Spitze Stei. Brücke Rinderstutz, Tirolerwehr und eine der Verkehrsvereinsbrücken wurden zerstört.</p>  <p>Bildquelle: N. Hählen</p>
<p>31.08.2020</p>	<p>Starke Beschleunigung bei den Reflektoren 74 und 75, ähnlich wie im November 2019. Kein Absturz.</p>

	<p>Deformations (mm/d) 31.08.2020 06:01 (UTC), average 100 interferograms in 1.2 hours ($\langle \Delta T \rangle = 0.7h$)</p> <p>GEO PRÆVENT</p> <p>Interferograms</p> <p>Time [h]</p> <p>Start End</p> <p>Y (m)</p> <p>X (m)</p>
<p>16.09.2020</p>	<p>Absturz Felspaket bei Reflektor 17</p>
<p>21.09.2020</p>	<p>Kollaps eines Teils eines Felsfeilers im Gipfelbereich.</p>
<p>02.10.2020</p>	<p>Abbruch von Schuttpaket aus Westflanke, ca. 5000 m³.</p>

	
12.10.2020	<p>Abbruch Felspfeiler bei den Reflektoren 13 und 16, Kubatur ca. 10'000 m³.</p> 
16.10.2020	<p>Kleiner Nachbruch westlich der ehemaligen Reflektoren 13 und 16.</p>