
Bericht Nr. 14181391.23

Einwohnergemeinde Kandersteg

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

Kinematische Daten 2021 / 3D-Modell Rutschung Spitze Stei

Zollikofen, 20. Oktober 2021

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

Autor(en)	Bearbeitete Themen / Fachbereiche
Christian Kienholz	Auswertung Monitoringdaten, Folgeauswertungen 3D-Modell, Bericht
Reto Hänni	3D-Datenauswertung, Geologie, Bericht
Supervision	Visierte Inhalte
Rachel Riner	Gesamter Bericht
Kaspar Graf	Gesamter Bericht
Hinweise	

GEOTEST AG



Kaspar Graf



Christian Kienholz

Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage	4
2.	Messdaten 2021	5
2.1	Terrestrischer LiDAR.....	5
2.2	Drohnen.....	6
2.2.1	Visuelle Auswertung Höhenmodelle und Orthophotos, Karte der Phänomene	6
2.2.2	Feature Tracking (Horizontalbewegungen)	7
2.2.2.1	Bewegungsfelder Gipfel – Westgrat	9
2.2.2.2	Bewegungsfelder Ostgrat – Blockgletscher	12
2.2.2.3	Bewegungsfeld Westflanke – Zentrum	14
2.2.3	Differenzhöhenmodelle (Höhenveränderung).....	15
2.3	GPS- und Reflektordaten.....	17
3.	3D-Modell	20
3.1	Kompartimente.....	20
3.1.1	Oberste Ebene (Schuttrutschung)	20
3.1.2	Mittlere Ebene (Rutschkörper Gipfel, Westgrat)	22
3.1.3	Unterste Ebene (Rutschkörper Ost).....	27
3.1.4	Mittlere Ebene, Bereich Süd (Gipfel – Pt. 2974 m).....	29
3.2	Geologischer Profilschnitt	31
3.3	Vergleich mit früheren Modellversionen	33
4.	Fazit und Ausblick	34
5.	Quellen.....	35
	Anhang 1 – Bewegungsfelder Sommer 2021 – Herbst 2021	36

1. Ausgangslage

Basierend auf den neuen Messdaten und Feldbeobachtungen wurde das 3D-Modell der Rutschung Spitze Stei überarbeitet. Im Rahmen der Arbeiten wurde die Rutschkinematik genauer bestimmt, die Gleitflächengeometrien überprüft sowie eine detailliertere Abgrenzung der Rutschkompartimente vorgenommen. Das überarbeitete Modell bildet eine wichtige Grundlage für die Präzisierung der Primärprozess-Szenarien.

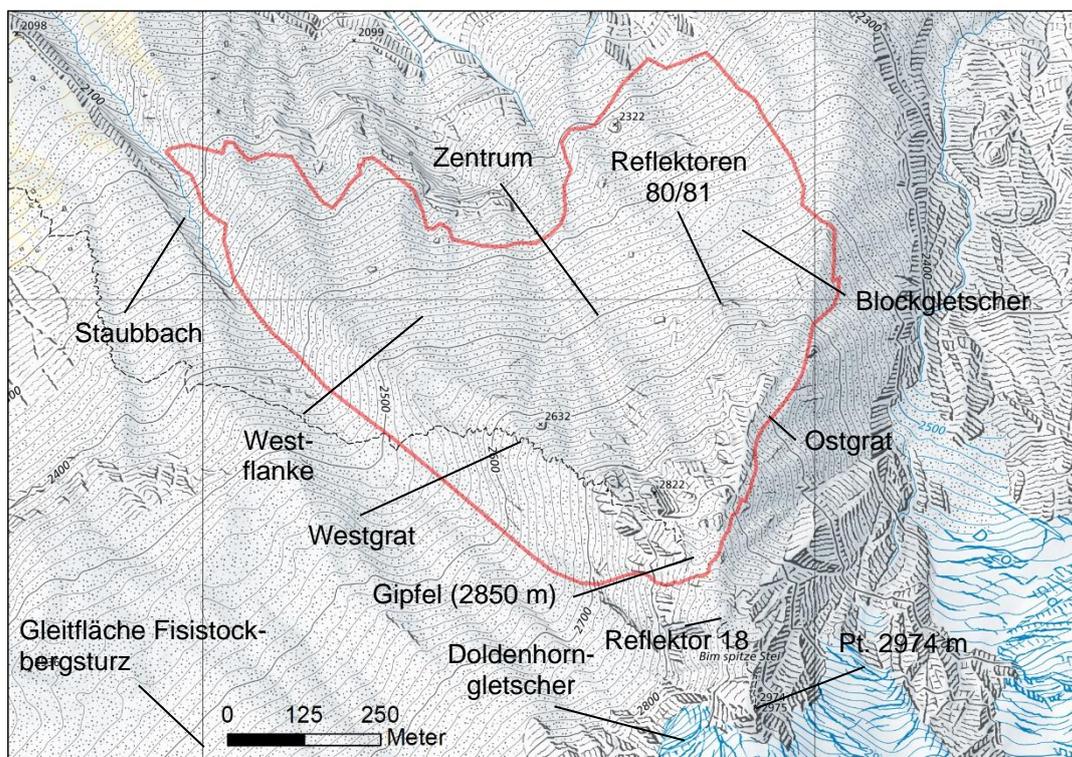


Abbildung 1: Übersichtskarte Spitze Stei. Im Bericht erwähnte Örtlichkeiten sind annotiert. Die rote Linie umfasst den Perimeter der Rutschung Spitze Stei (ca. 0.5 km²) in einem Höhenbereich zwischen 2150 und 2850 m ü. M.

Bezüglich Kinematik gab es bei der Erstellung des 3D-Modelles [1] sowie dessen Überprüfung [2] mehrere offene Punkte, welche mit der Fortführung der bisherigen Messungen sowie neuen Messungen geklärt werden sollten. Ende 2020 war z.B. noch nicht abschliessend geklärt, ob der Bereich um die neu installierten Reflektoren 80/81 (Abbildung 1) stabil ist. Zudem war die Rutschkinematik in den vom Überwachungsstandort Rosshubel abgewandten Bereichen (z.B. südwest-exponierte Bereiche des Westgrates) noch nicht durchgehend und mit genügend hoher

räumlicher Auflösung quantifiziert. Im Gipfelbereich konnten die Bruchverläufe wegen zu kurzer Messdauer noch nicht abschliessend kartiert und mit Messdaten bestätigt werden.

Dank der Messungen vom Überwachungsstandort Rosshubel (Geodätische Vermessung von Reflektoren, GPS, terrestrischer Radar und LiDAR) ist die Kinematik des frontalen Bereiches der Rutschung (West- und Ostflanke, Zentrum, vgl. Abbildung 1) generell besser bekannt als jene der lateralen Bereiche (südwestorientierter Bereich Westgrat, südostorientierter Bereich Ostgrat), welche vom Rosshubel nicht eingesehen werden können. In diesen lateralen, topografisch abgeschatteten Bereichen stammen die bisherigen Informationen zur Kinematik primär von periodischen Kampagnen mit terrestrischem Radar (Messstandorte Westflanke und Winteregg) und Drohnen. Historische Radar-Satellitendaten sowie Luftbilder geben Hinweise zur längerfristigen Entwicklung der Bereiche. Die verfügbaren Daten sowie Stärken und Schwächen der angewendeten Techniken sind in früheren Berichten ([1],[2],[3],[4],[5],[6]) dokumentiert.

2. Messdaten 2021

2.1 Terrestrischer LiDAR

Am 10. August 2021 wurde durch das SLF ein weiterer Laserscan der Rutschung Spitze Stei erstellt, ergänzend zu den bisher verfügbaren je zwei Laserscans aus den Jahren 2019 und 2020. Die vom Überwachungsstandort Rosshubel aus erhobenen 3D-Punktwolken des Rutschgebietes haben eine räumliche Auflösung von 0.5 m oder besser; systematische Fehler zwischen den Punktwolken liegen generell unter 5 cm. Während der frontale Bereich des Rutschgebietes von den Scans vollständig abgedeckt wird, führt die schräge Messgeometrie zu den eingangs erwähnten topografiebedingten Abschattungen entlang des Ost- und Westgrates sowie im Gipfelbereich.

Die Messresultate sind in den jeweiligen Messberichten ([7],[8],[9],[10]) dokumentiert. Im aktuellen Bericht [10] wurde basierend auf den erhobenen Daten (u.a. mittels 3D-Tracking [11]) weiterführende Auswertungen hinsichtlich Rutschkinematik und Gleitflächengeometrie vorgenommen. Diese Auswertungen bilden eine wichtige Grundlage für die nachfolgend beschriebenen Resultate. So wurde das in [10] modellierte Kompartiment für den östlichen Bereich der Rutschung Spitze Stei mit geringen Anpassungen in das aktualisierte 3D-Modell aufgenommen. Die in [10]

erstellten Profile durch die Rutschung wurden bei der Anpassung der Gleitflächen ebenfalls berücksichtigt.

2.2 Drohnen

Der seit 2021 mittels Flächendrohne beflogene Perimeter reicht vom Punkt 2974 m auf Höhe Doldenhornletscher (Abbildung 1) bis in den Bereich der Felswände unterhalb der Rutschung (auf ca. 2100 m ü. M.). Lateral reicht das beflogene Gebiet von westlich des Staubbach-Einschnittes bis ca. 150 m östlich des Ostgrates. Mit den Drohnenbefliegungen werden auch jene Gebiete abgedeckt, die vom Überwachungsstandort Rosshubel nicht eingesehen werden können. Die Auflösung der abgeleiteten Höhenmodelle liegt bei 10 cm (Orthophotos 5 cm) und die Genauigkeit bei rund 5 bzw. 10 cm (1 Standardabweichung horizontal bzw. vertikal).

Der erste Drohnenflug der Saison 2021 fand wegen der späten Ausaperung erst am 20. Juli statt. Die letzte Befliegung wurde am 1. Oktober durchgeführt. Für die Auswertungen 2021 – 2020 wurden die Drohnen

daten vom 1. Oktober 2021 mit einem flugzeuggestützten Laserscan vom 4. September 2020 verglichen, da dieser im Gegensatz zu früheren Multicopter-Befliegungen alle peripheren Rutschbereiche abdeckt und zudem komplett schneefrei ist. Laserscan und Drohnenhöhenmodelle wurden vor den Vergleichen koregistriert [12].

2.2.1 Visuelle Auswertung Höhenmodelle und Orthophotos, Karte der Phänomene

Zur Kartierung der Phänomene (Fokus Ausbisslinien und Brüche) wurden die erhobenen Höhenmodelle und Orthofotos visuell analysiert und mit den Daten der Vorjahre (u.a. Radar, LiDAR, Feldbeobachtungen) abgeglichen. Als Grundlage für die 3D-Modellierung der Rutschkompartimente (Kapitel 3) wurden die Befunde mittels attributierter Linienelemente festgehalten. In der Karte in Abbildung 2 sind die wichtigsten Elemente dargestellt und annotiert. Die kartierten Phänomene sind in den Kapiteln 2.2.2 und 2.2.3 näher beschrieben.

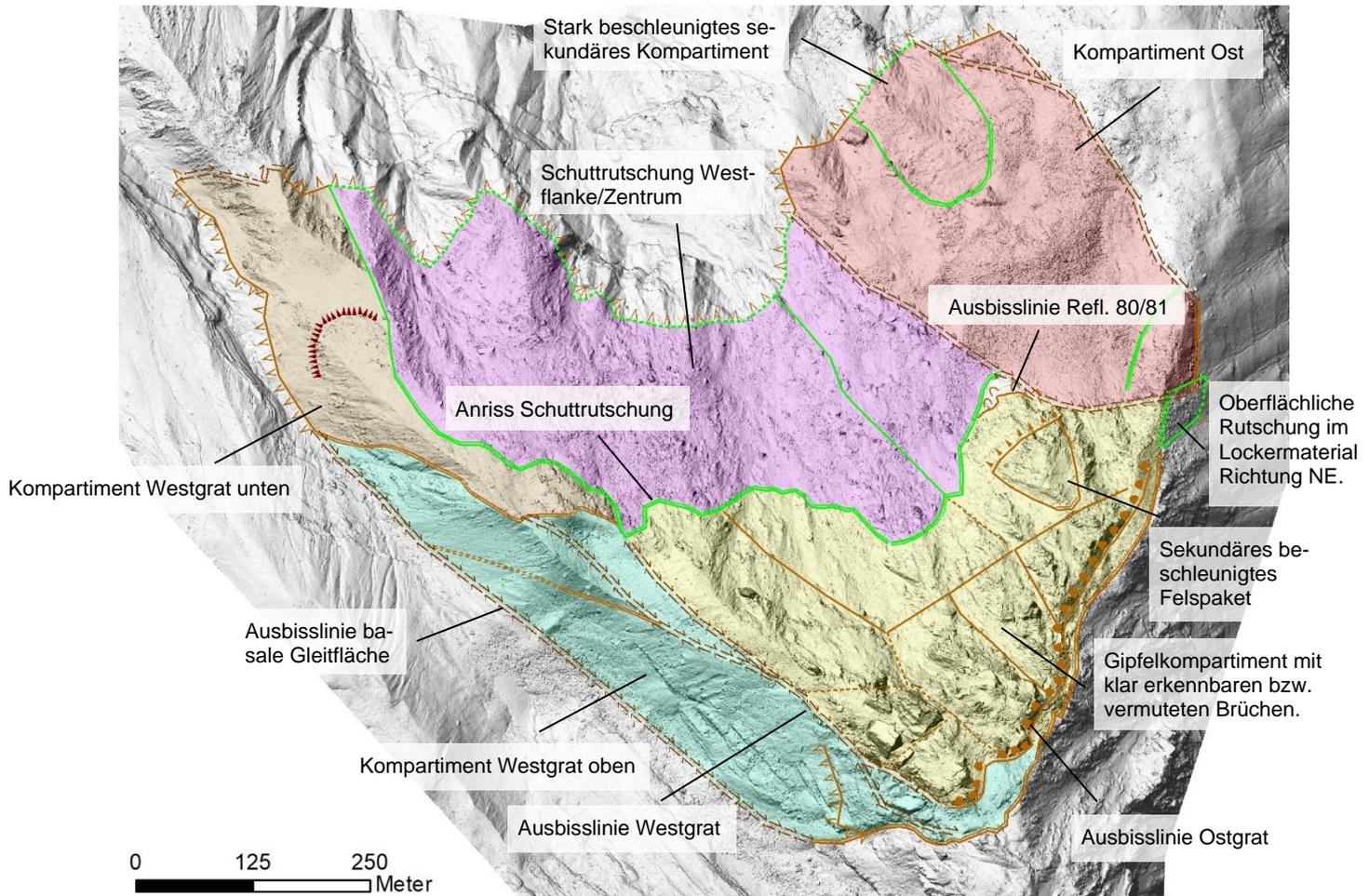


Abbildung 2: Kartierte Phänomene der Rutschung Spitze Stei, basierend auf Drohnendaten, Radar, LiDAR sowie Feldbeobachtungen. Für die Darstellung wurde der KdP-Symbolbaukasten verwendet, die Bedeutung der Symbole teilweise jedoch auf die Rutschung Spitze Stei adaptiert. Die in Kapitel 3 präsentierten, 3D-modellierten Hauptkompartimente der Rutschung sind zur Referenz mit den entsprechenden Farben hinterlegt und annotiert.

2.2.2 Feature Tracking (Horizontalbewegungen)

Zusätzlich zur visuellen Analyse wurde mit den Höhenmodellen ein 2D-Feature-Tracking durchgeführt, mit Fokus auf die Periode 4. September 2020 – 1. Oktober 2021 (ca. 1 Jahr) sowie 20. Juli 2021 – 1. Oktober 2021 (ca. 2.5 Monate). Qualität und Vollständigkeit der resultierenden Bewegungsfelder (Horizontalgeschwindigkeiten) sind von verschiedenen Faktoren abhängig (Tabelle 1).

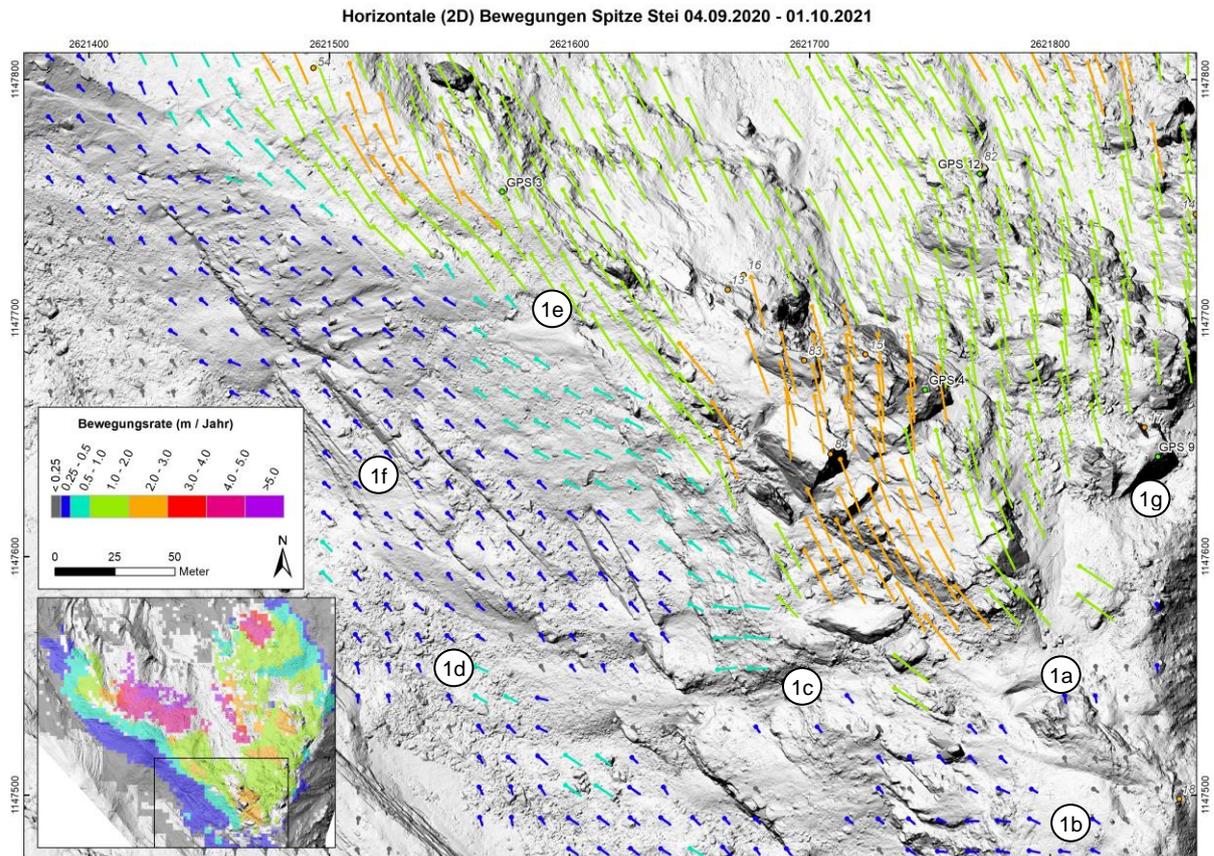
Tabelle 1: Faktoren mit positivem (+) bzw. negativem (-) Einfluss auf Qualität und Vollständigkeit der abgeleiteten Bewegungsfelder

	Herbst 2020 – Herbst 2021	Sommer 2021 – Herbst 2021
+	<p>Grössere Bewegungsbeträge wegen längerer Messdauer → stärkeres Signal und damit gutes Signal-to-Noise Verhältnis auch in langsam bewegendem Bereichen</p> <p>Kaum Schnee in den verglichenen Höhenmodellen → weniger Lücken im abgeleiteten Bewegungsfeld</p>	<p>Hohe Genauigkeit und Auflösung (0.1 m) beider verglichenen Höhenmodelle → höhere Auflösung der Bewegungsfelder und erhöhte Sensitivität bzgl. Verschiebungen</p> <p>Aufgrund kurzer Messdauer weniger Gebiete mit Abstürzen → weniger Lücken im abgeleiteten Bewegungsfeld</p>
-	<p>Aufgrund längerer Messdauer mehr Gebiete mit Abstürzen oder sehr starken Geländeänderungen → zusätzliche Lücken im abgeleiteten Bewegungsfeld</p> <p>LiDAR Höhenmodell 2020 mit geringerer räumlicher Auflösung (0.5 m) → reduzierte Sensitivität bzgl. Verschiebungen</p>	<p>Verbreitet Schnee im ersten Modell → zusätzliche Lücken im abgeleiteten Bewegungsfeld</p> <p>Aufgrund kurzer Messdauer geringe Verschiebungsbeträge → schwächeres Signal und damit teilweise ungenügendes Signal-to-Noise Verhältnis in peripheren, langsam bewegendem Gebieten</p>

Nachfolgend werden die Bewegungsfelder der längeren Periode (4. September 2020 – 1. Oktober 2021) mittels Karten dokumentiert, ergänzend zur Übersichtskarte in Abbildung 2. Die jeweiligen Annotationen ergänzen Beobachtungen aus früheren Berichten (insbesondere [2]). Die Reihenfolge der gezeigten Kartenausschnitte ist wie folgt: Gipfel – Westgrat, Ostgrat – Blockgletscher, Zentrum (Schuttrutschung).

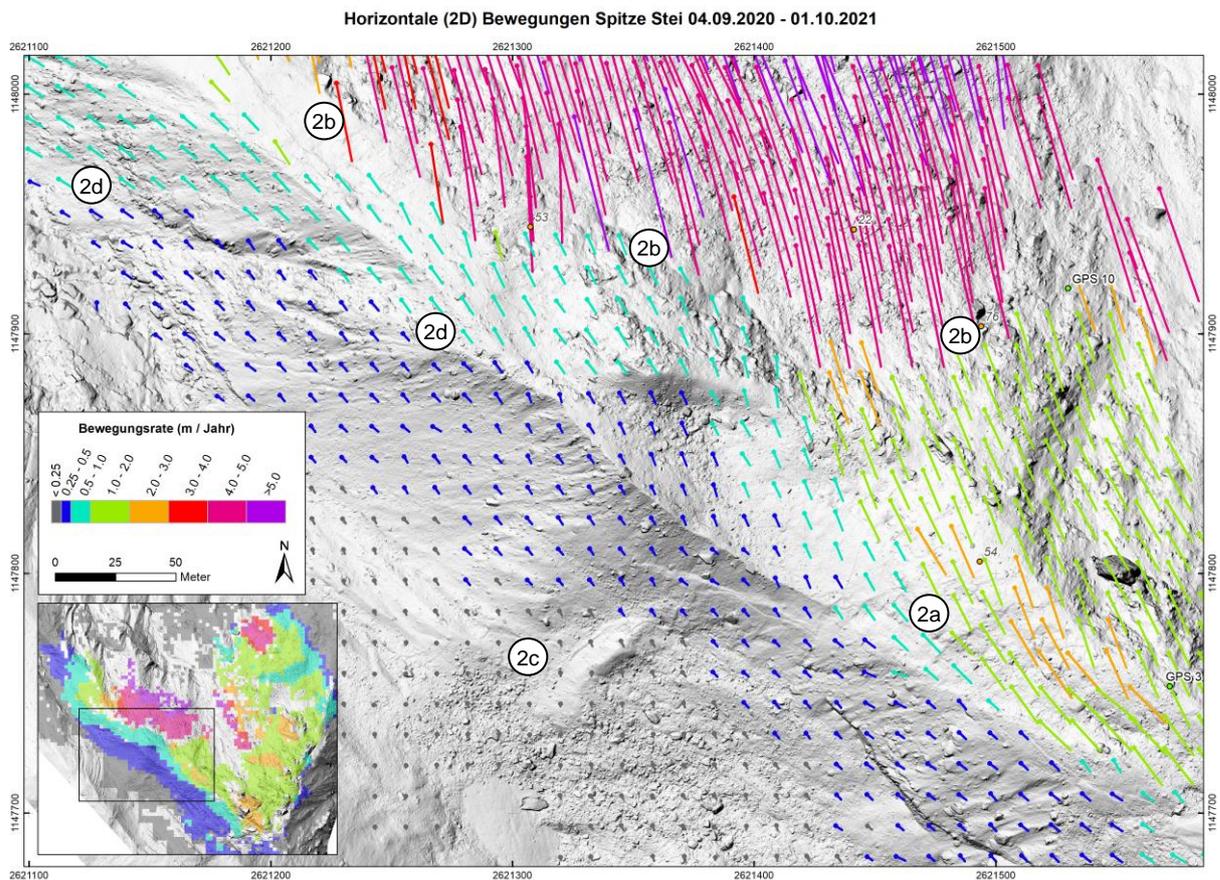
Die räumlich höher aufgelösten Bewegungsfelder für den Zeitabschnitt 20. Juli 2021 – 1. Oktober 2021 sind in Anhang 1 dargestellt. Aufgrund der kürzeren Messdauer (2.5 Monate) sind die Trackingresultate in den langsam bewegendem Bereichen der Rutschung noch nicht überall signifikant. Der Schnee im Höhenmodell vom 20. Juli 2021 führte zudem zu Lücken in den höhergelegenen Bereichen der Rutschung.

2.2.2.1 Bewegungsfelder Gipfel – Westgrat



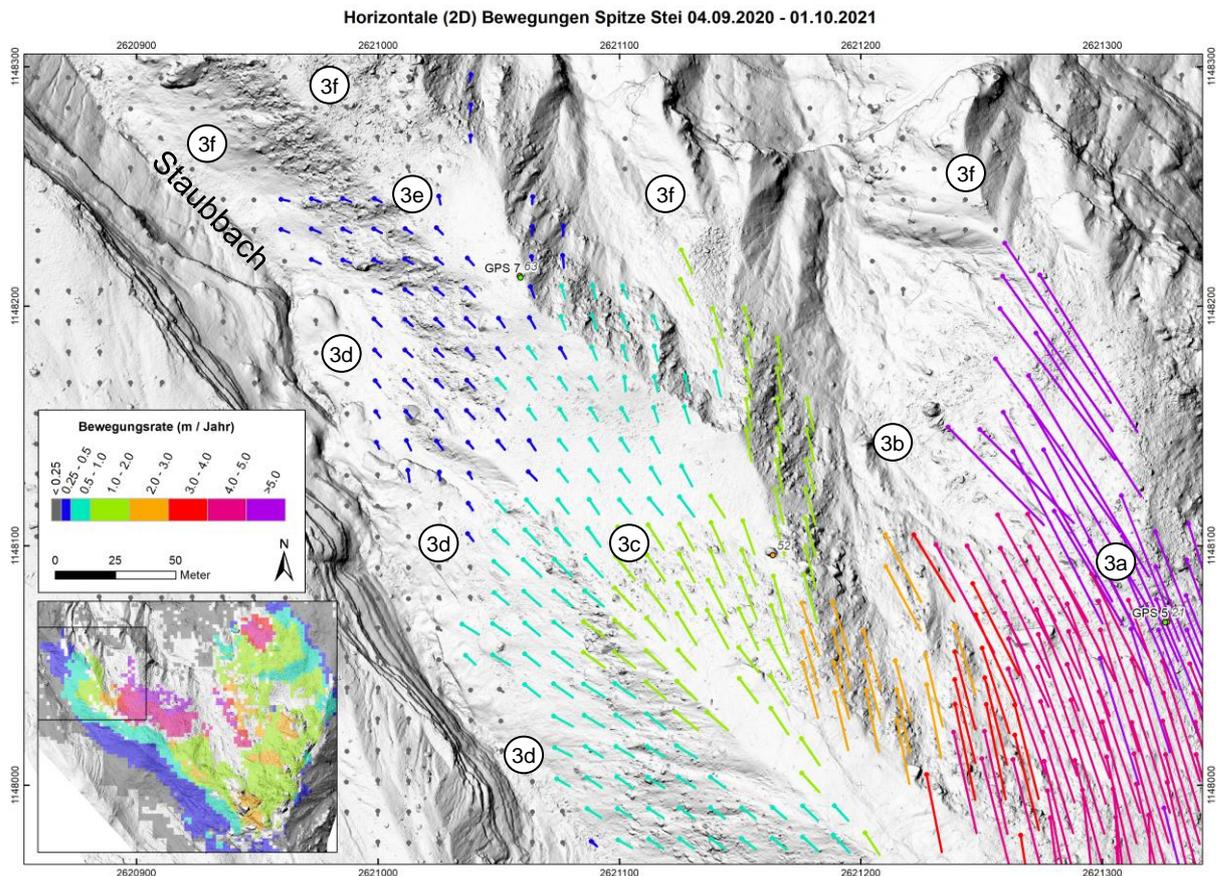
- ①a Gipfelbereich der Rutschung Spitze Stei. Die Ausbisslinie Westgrat verläuft in SE-NW Orientierung hin zum Marker 1e. Der Ausbiss der basalen Gleitfläche verläuft in der Runse in westlicher Richtung hin zum Marker 1c und weiter zu 1d (vgl. auch Abbildung 2).
- ①b Zone mit signifikanten, sekundären Bewegungen ausserhalb des bisher ausgeschiedenen Rutschperimeters.
- ①c Verlauf der basalen Gleitfläche. Nördlich des Markers sekundäre Deformation im anstehenden Fels.
- ①d Oberflächliche Bewegungen im Schutt der Grundmoräne des Doldenhorngletschers. Die Bewegungen maskieren den Ausbiss der basalen Gleitfläche, welcher im Bereich des Markers in NW-Richtung verläuft.
- ①e Scharf ausgeprägte, wahrscheinlich subvertikale Ausbisslinie entlang des Westgrates, von Marker 1a herkommend. Der Ausbiss trennt den sehr aktiven Bereich der Felsrutschung östlich der Ausbisslinie (gelb eingefärbt, Abbildung 2) von einem weniger aktiven Bereich westlich davon (türkis eingefärbt).
- ①f Felsbereich mit signifikanten Bewegungen in NW-Richtung. Teil des oben erwähnten langsamer rutschenden Felspaketes (türkis), welches durch die Ausbisslinie entlang des Westgrates (Punkt 1e) vom schnelleren Bereich (gelb) getrennt ist.
- ①g Beginn Ausbisslinie Ostgrat.

Abbildung 3: ↑ Horizontale Verschiebungen im Gipfelbereich zwischen dem 4. September 2020 und dem 1. Oktober 2021. Die Bewegungsvektoren sind 10-fach verlängert. Einfärbung nach Bewegungsraten (m / Jahr). Die Übersichtskarte unten links zeigt das Bewegungsfeld der Gesamtrutschung sowie die Lage des vergrößerten Kartenausschnittes. In Bereichen ohne Vektoren bzw. ohne Einfärbung in der Übersichtskarte sind keine Messungen verfügbar. In diesen Bereichen war das Tracking aufgrund der starken Geländeänderungen infolge Materialverlusten (Abstürze) bzw. -akkumulationen oder Schneeablagerungen nicht möglich. Das geschummerte Höhenmodell im Hintergrund stammt von der Drohnenbefliegung am 1. Oktober 2021.



- ②a Ausbisslinie Westgrat, aufgrund zunehmend mächtigerer Schuttbedeckung weniger scharf ausgeprägt als weiter grataufwärts. Im Schutt sind mehrere Scherrisse mit SSE-NNW bzw. SE-NW Orientierung erkennbar (vgl. auch Abbildung 2).
- ②b Anriss Schuttrutschung Westflanke (violetter Körper in 3D-Modell).
- ②c Bereich mit geringen, knapp signifikanten Verschiebungen in nordwestlicher Richtung. Basale Gleitfläche verläuft im Bereich des Markers unter Schutt.
- ②d Durchgehend verfolgbare Ausbisslinie zwischen dem schnelleren Bereich im unteren Westgrat (im 3D-Modell braun eingefärbt) und dem langsameren Bereich im oberen Westgrat (türkis). Ausbisslinie durchschlägt Stratigrafie.

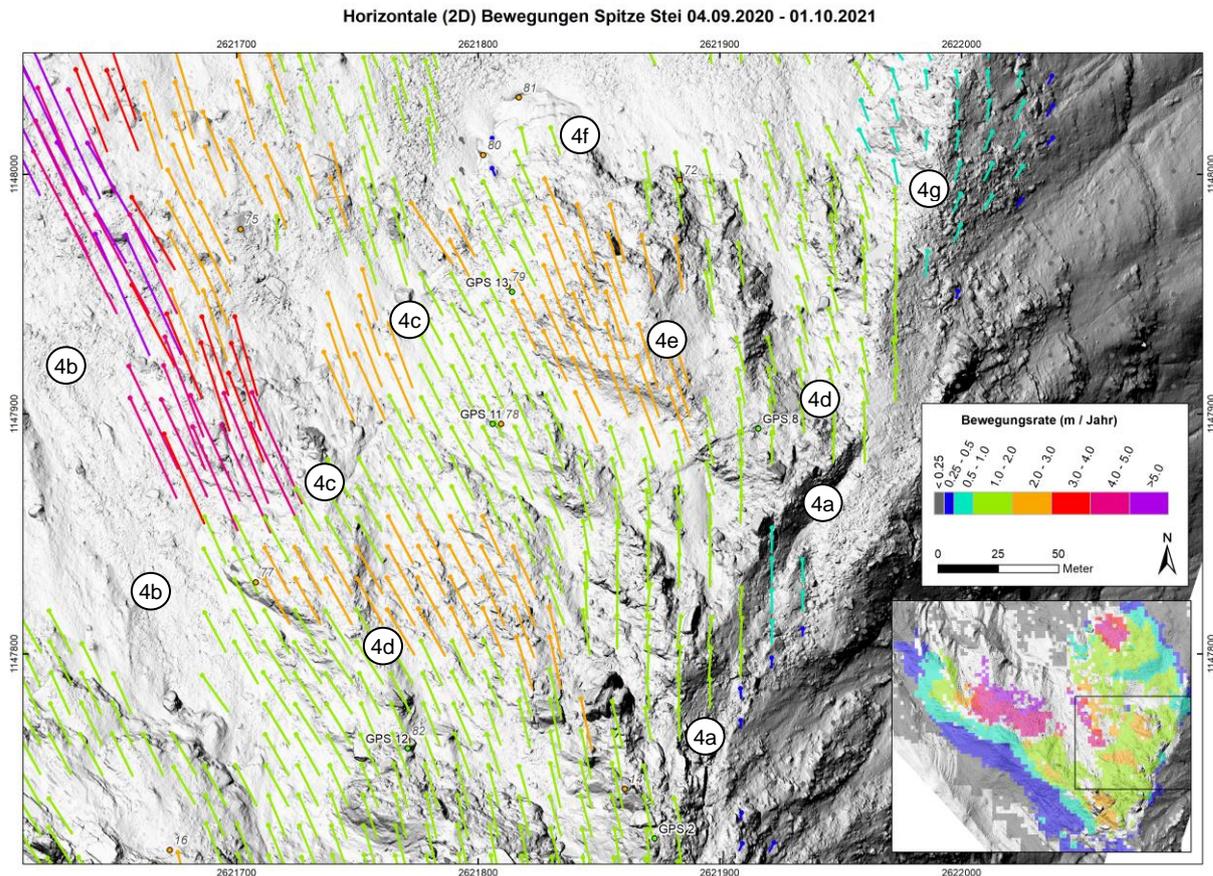
Abbildung 4: Bewegungsfeld mittlerer Westgrat.



- ③a Unterer Bereich der Schuttrutschung Westflanke (violette Kompartiment in 3D-Modell) mit Bewegungsbeträgen > 5 m / Jahr.
- ③b Bereich der Schuttrutschung mit abgestürztem Schuttpaket → fehlende Bewegungsvektoren.
- ③c Bereich im unteren Westgrat (braunes Kompartiment in 3D-Modell) mit starkem Geschwindigkeitsgradienten. Geomorphologisch manifestiert sich der Gradient als lobenförmige Stauchwulst (vgl. Abbildung 2).
- ③d Ausbisslinie der basalen Gleitfläche (braunes Kompartiment) im Einschnitt des Staubbaches. Westlich davon keine Bewegungen.
- ③e Scharfe Ausbisslinie im untersten Bereich des Westgrates. Südwestlich des Markers Bewegungen in Richtung NW (Staubbach). Südöstlich des Markers Bewegungen in Richtung NE (Chalberspissibäche) → stabiler Bereich nördlich des Punktes wirkt als Widerlager. Vgl. auch höher aufgelöste Bewegungsfelder in Anhang 1.
- ③f Stabiler Bereich unterhalb der Rutschung.

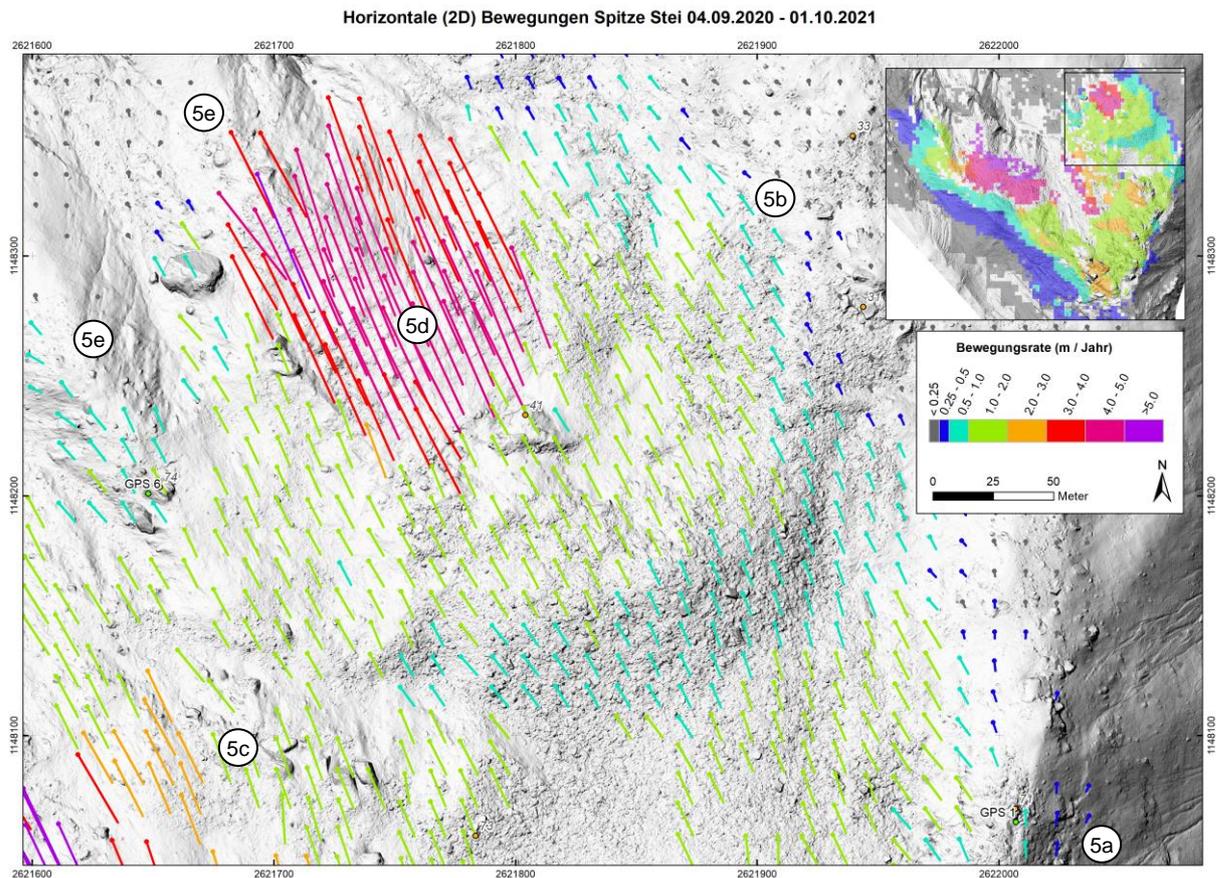
Abbildung 5: Bewegungsfeld unterer Westgrat.

2.2.2.2 Bewegungsfelder Ostgrat – Blockgletscher



- ④a Ausbisslinie Ostgrat. Östlich der Ausbisslinie sind nur in wenigen Bereichen sekundäre Bewegungen feststellbar. Ansonsten gibt es östlich der Ausbisslinie keine signifikanten Verschiebungen.
- ④b Ablagerungen durch Stürze (primär Kollaps Turm 13/16) aus dem Gipfelbereich → fehlende Bewegungsvektoren.
- ④c Anriss Schuttrutschung Zentrum (violettes Kompartiment im 3D-Modell, vgl. Abbildung 2).
- ④d Diskreter Bruch in NE-SW Richtung im Felsbereich (gelbes Kompartiment im 3D-Modell). Bruchverlauf ist im geschummerten Höhenmodell (Hintergrund) visuell erkennbar. Felspaket südlich des Bruches mit stärker nördlicher Bewegungsrichtung als Paket nördlich des Bruches. Vgl. auch höher aufgelöste Bewegungsfelder in Anhang 1.
- ④e Sekundäres Felspaket mit höherer Geschwindigkeit als der Rest des Felspaketes. Vgl. auch höher aufgelöste Bewegungsfelder in Anhang 1.
- ④f Ausbiss bei den Reflektoren 80/81. Im Felsbereich unterhalb des Ausbisses gibt es keine signifikanten Bewegungen (teilweise fehlende Vektoren aufgrund Sturzereignis).
- ④g Östlich des Grates sekundäre, oberflächliche Rutschung in Richtung NE.

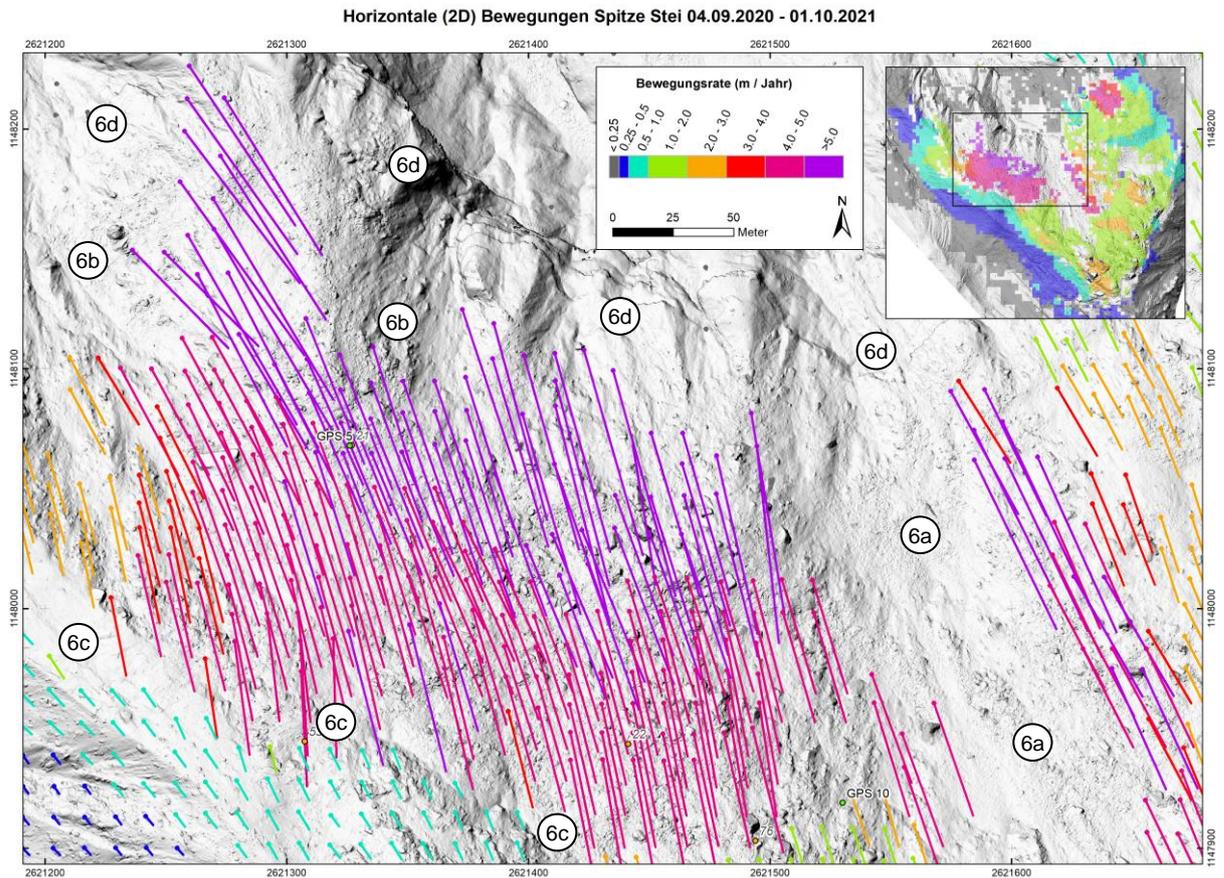
Abbildung 6: Bewegungsfeld mittlerer Ostgrat.



- ⑤a Topographisch weit hinunterreichende Bewegungen östlich des Ostgrates. Marker annotiert den mutmasslichen Anriss des Kompartimentes Ost (im 3D-Modell rot eingefärbt).
- ⑤b Scharfe, östliche Ausbisslinie der Gleitfläche des Kompartimentes Ost.
- ⑤c Übergang zwischen der Schuttrutschung Zentrum sowie dem Kompartiment Ost (vgl. Abbildung 2).
- ⑤d Stark beschleunigtes Kompartiment unterhalb des Blockgletschers.
- ⑤e Stabiler Bereich unterhalb der Rutschung.

Abbildung 7: Bewegungsfeld Bereich unterer Ostgrat / Blockgletscher

2.2.2.3 Bewegungsfeld Westflanke – Zentrum



- ⑥a Sturzablagerungen aus dem Gipfelbereich → fehlende Bewegungsvektoren.
- ⑥b Unterer Bereich Schuttrutschung mit abgestürzten Schuttpaketen.
- ⑥c Anriss Schuttrutschung Westflanke.
- ⑥d Stabiler Bereich unterhalb der Rutschung.

Abbildung 8: Bewegungsfeld Westflanke / Zentrum.

2.2.3 Differenzhöhenmodelle (Höhenveränderung)

Ergänzend zur Berechnung der Horizontalgeschwindigkeiten wurden die erhobenen Daten für die Berechnung der Höhenveränderungen eingesetzt. Im Rahmen der Auswertungen für das 3D-Modell der Rutschung ist insbesondere der Höhenmodellvergleich Herbst 2020 – Herbst 2021 von Interesse (Abbildung 9), da hier die Störungen durch Schneeablagerungen minimal sind. Saisonale Höhenmodellvergleiche (z.B. zur Bestimmung der Sturzkubaturen) können im Bericht «Entwicklung Sommer 2021» [13] eingesehen werden.

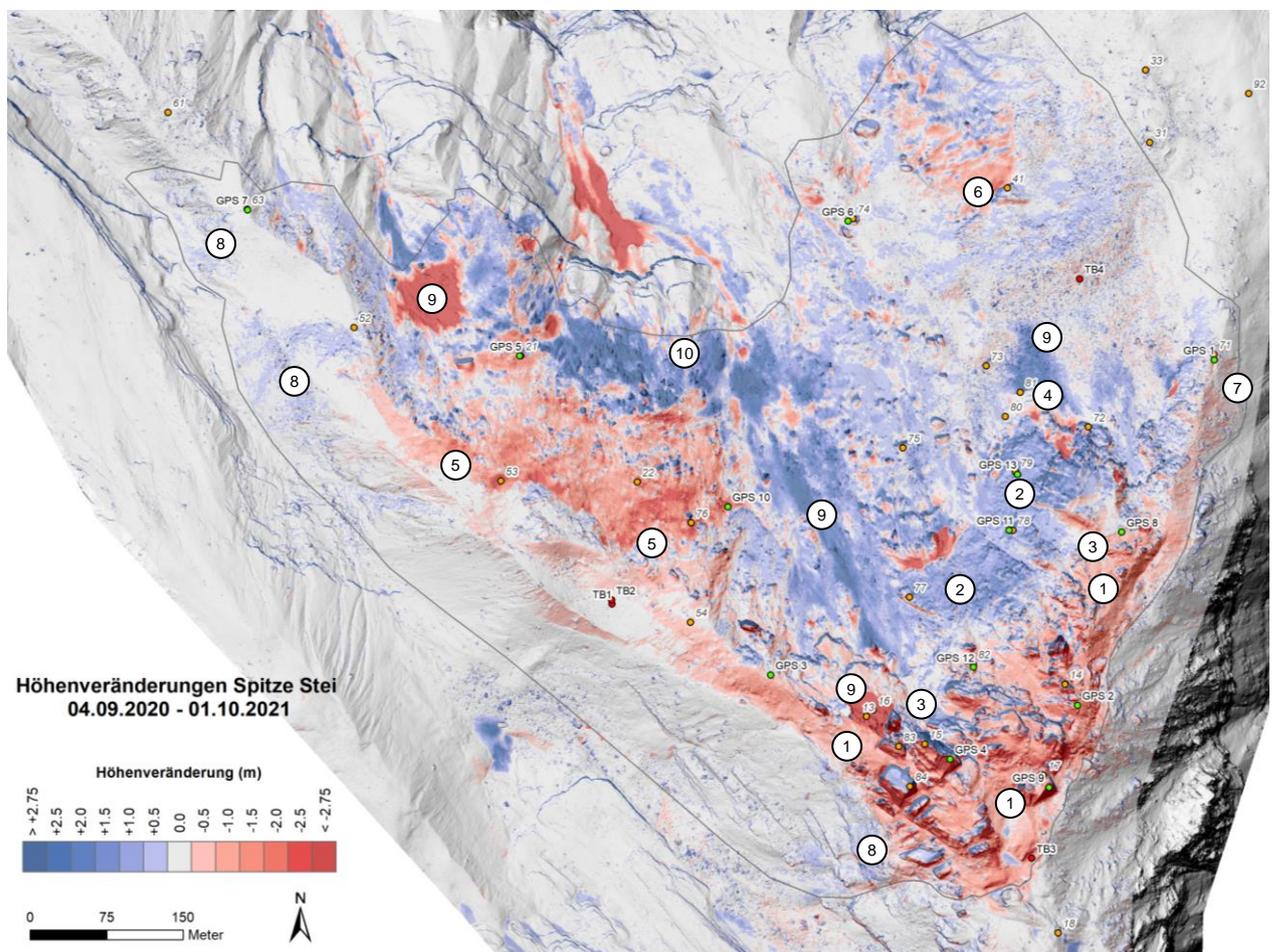


Abbildung 9: Höhenveränderungen Rutschung Spitze Stei während der Periode 4. September 2020 bis 1. Oktober 2021. Rottöne zeigen Bereiche, in welchen das Gelände bei der Zweitmessung tiefer lag als bei der ersten (Materialverluste aufgrund plötzlicher Sturz- oder Rutschprozesse oder kontinuierlicher Rutschbewegungen). Blautöne zeigen Bereiche, in welchen das Gelände bei der Zweitmessung höher lag (Materialakkumulation aufgrund Sturz- oder Rutschprozesse oder kontinuierlicher Rutschbewegungen). Höhenveränderungen $\pm 0,25$ m sind grau eingefärbt. Der Perimeter der Rutschung Spitze Stei ist mit einer grauen Linie eingezeichnet.

Bezüglich 3D-Modell sind mehrere Punkte relevant, welche nachfolgend anhand der Marker in Abbildung 9 diskutiert werden:

- ① Rottöne reflektieren Höhenverluste im Gipfelbereich, die auf eine starke vertikale Bewegungskomponente hindeuten. Die Höhenverluste werden durch Versacken der Felsmasse infolge Extension und/oder durch (Ab-) Gleiten auf einer steilen Gleitfläche (Gleitfläche steiler als Topografie) verursacht.
- ② Blautöne in den darunterliegenden Bereichen reflektieren Höhengewinne, die auf eine Verschiebung der Felsmasse auf einer flacheren Gleitfläche hindeuten (Gleitfläche flacher als Topografie).
- ③ Scharfer Übergang zwischen den Zonen mit Höhengewinnen und -verlusten, welcher bzgl. Orientierung mit den kartierten bzw. vermuteten Brüchen übereinstimmt (Abbildung 6).
- ④ Keine signifikanten Höhenveränderungen unterhalb des Ausbisses bei den Reflektoren 80/81.
- ⑤ Starke Vertikalbewegung im Anrissbereich der Schuttrutschung Westflanke.
- ⑥ Höhenverluste (Vertikalbewegung) im Anrissbereich des beschleunigten Kompartimentes unterhalb des Blockgletschers, Höhengewinne darunter → Hinweis für Rotationsrutschung.
- ⑦ Höhenverluste, die topographisch weit unter den Ostgrat reichen → Hinweis auf tief liegende Gleitfläche.
- ⑧ Lokale Höhengewinne aufgrund der Rutschbewegungen in Richtung Staubbach.
- ⑨ Höhengewinne bzw. Verluste aufgrund von Sturzereignissen (beschrieben in [13]).
- ⑩ Höhengewinne durch Materialakkumulation im Fussbereich der Schuttrutschung.

2.3 GPS- und Reflektordaten

Die Berechnungen der Reflektor- und GPS-Trajektorien wurden mit den diesjährigen Messdaten weitergeführt und bei den Auswertungen für das 3D-Modell berücksichtigt. Die Trajektorien für das Jahr 2021 sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt, jene für die Vorjahre in Bericht [2].

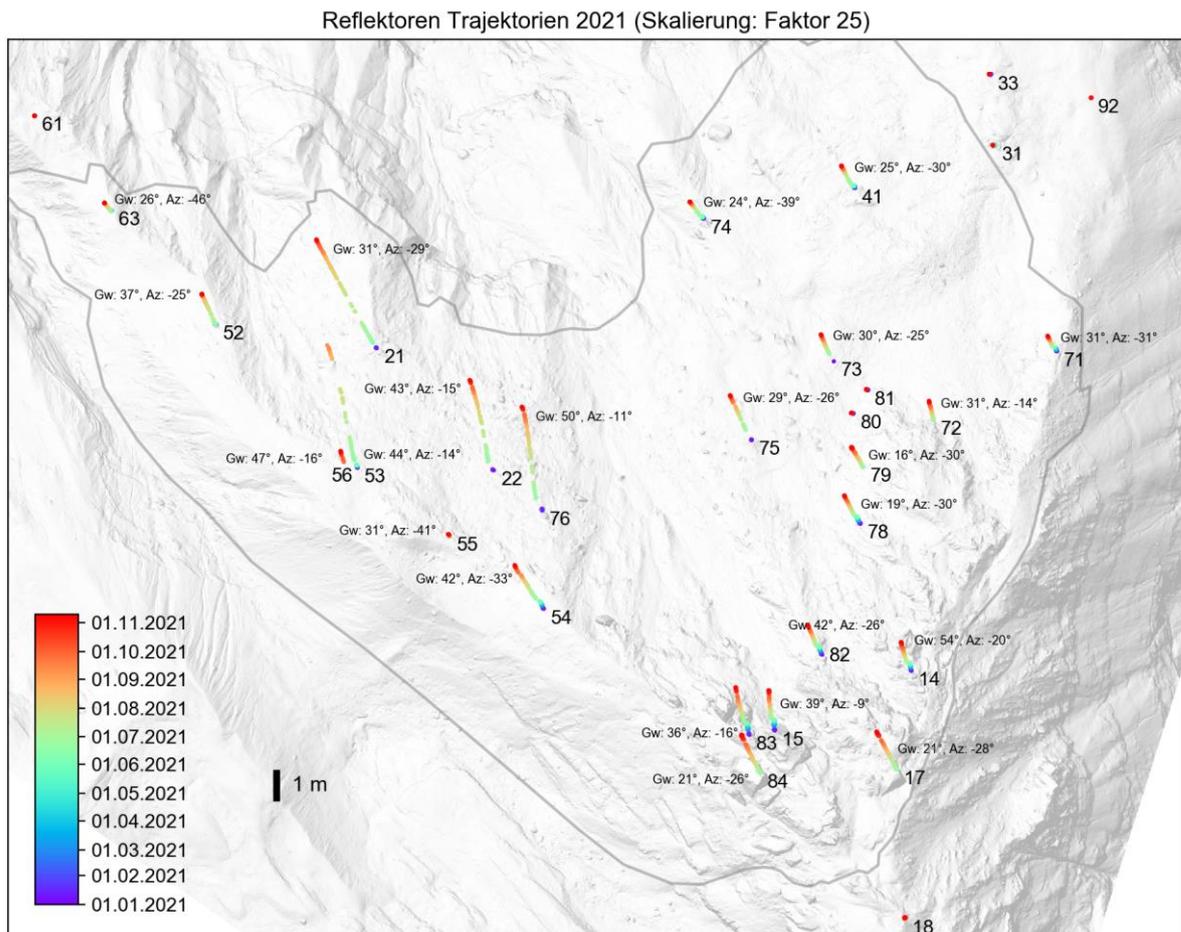


Abbildung 10: Reflektor-Trajektorien des Jahres 2021, um Faktor 25 verlängert (vgl. Massstab). Durchschnittliche Gleitwinkel (Gw) und Azimute (Az) sind annotiert. Die Farbe der Trajektorien variiert als Funktion der Zeit. Die Reflektoren 55 und 56 wurden während der Saison neu installiert.

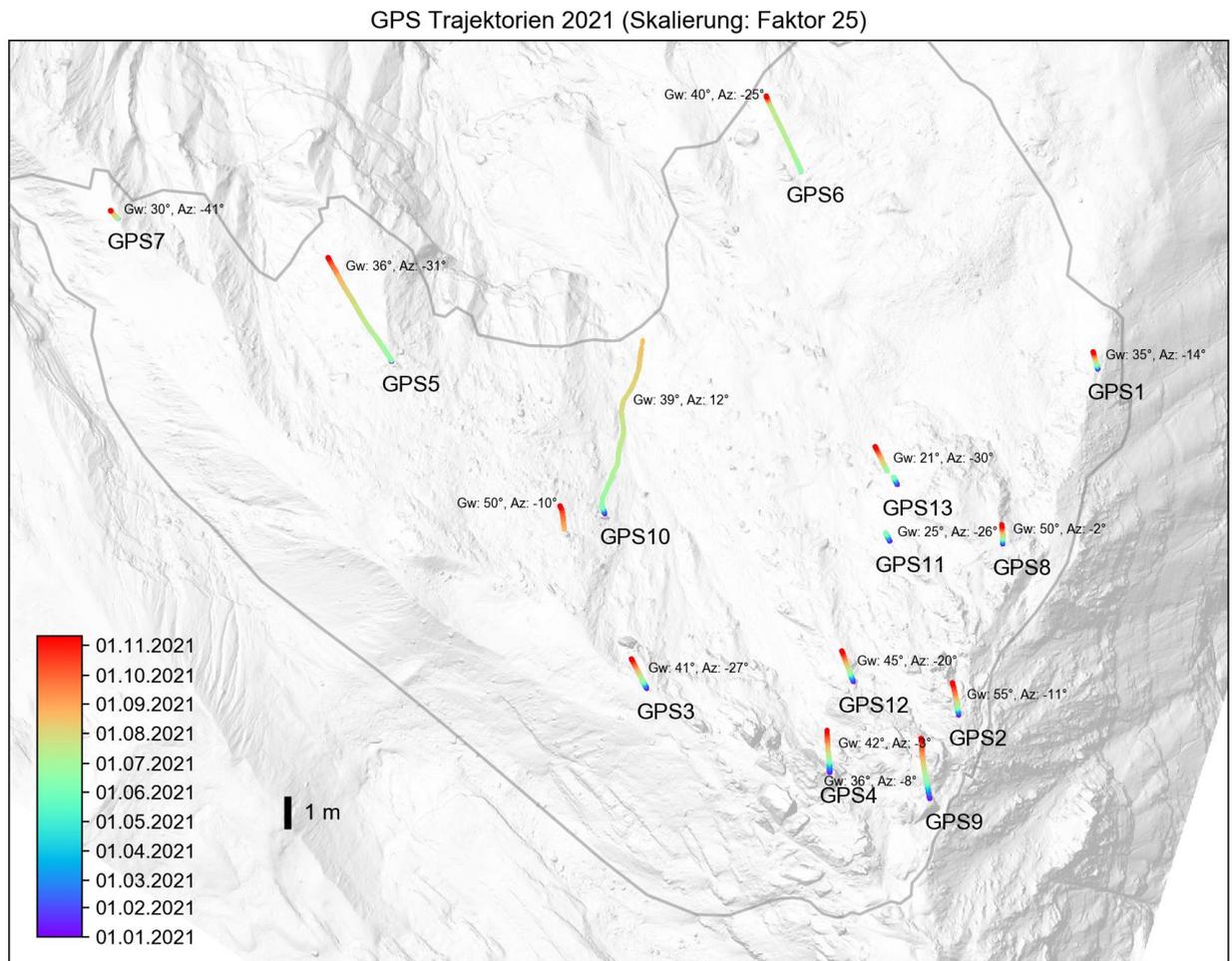


Abbildung 11: GPS-Trajektorien für das Jahr 2021, um Faktor 25 verlängert. Die GPS 5 und 6 wurden im Frühsommer neu installiert; GPS 10 wurde nach einem Absturz versetzt.

Die Punktmessungen der GPS und Reflektoren bestätigen die flächigen Resultate aus den Auswertungen der LiDAR- und Drohnendaten (Feature-Tracking, Berechnung Höhenveränderungen). So liegen die Gleitwinkel im unteren Felsbereich (z.B. GPS 11 und 13, Reflektoren 78 und 79) um 20 bis 25°, im Gipfelbereich hingegen zwischen 35 und 55°. Ausnahmen, z.B. der flache Gleitwinkel von 21° beim Reflektor 84 im Gipfelbereich dürften auf lokale Bewegungen des betreffenden Felsturmes zurückzuführen sein.

Mit den längeren Messzeitreihen bestätigt sich, dass der Felsbereich bei den Reflektoren 80 und 81 stabil ist. Die gemessenen Bewegungen (1 bzw. 2 cm in Sicht- richtung des Tachymeters seit der Installation im Oktober 2021) liegen innerhalb

der Messunsicherheit. Reflektor 18 oberhalb des Gipfelbereiches der Rutschung (Abbildung 10) hat sich seit der Installation Ende 2019 hingegen um fast 13 cm verschoben. Seit Januar 2021 beträgt die Bewegung rund 7 cm, was bestätigt, dass der Bereich um den Messpunkt nicht stabil ist. Im Vergleich zu den restlichen Punkten in der Rutschung sind die Bewegungsraten jedoch deutlich geringer.

Die Messpunkte im Bereich der Westflanke (insbesondere die Reflektoren 22 und 76 sowie GPS 10) weisen während der Sommersaison aufgrund der hohen Aktivität der Schuttrutschung eine nördliche Gleitrichtung, in Fallrichtung des Hanges, auf (Abbildung 10). Während der Wintersaison (stark reduzierte Aktivität der Schuttrutschung) zeigen die Messpunkte hingegen eine nordwestliche Gleitrichtung, in Fallrichtung der Schichtung. Dieses Bewegungsmuster deutet darauf hin, dass die betreffenden Messpunkte neben der Schuttrutschung auch von dem im Gipfelbereich anstehenden Felskompartiment unterlagert sind, welches sich ebenfalls in nordwestlicher Richtung bewegt. Die stärker nördlich orientierten Trajektorien der GPS 4 und 9 sowie der Reflektoren 83/84 im Gipfelbereich sind wahrscheinlich wiederum auf lokale Bewegungen der Felstürme zurückzuführen.

3. 3D-Modell

Die Rutschung Spitze Stei wurde basierend auf den vorgängig beschriebenen Messdaten dreidimensional modelliert. Für die Modellierung wurde die Software Move eingesetzt.

3.1 Kompartimente

Das 3D-Modell der Rutschung umfasst fünf Hauptkompartimente (Abbildung 12). Stratigraphisch liegen die Kompartimente auf drei verschiedenen Ebenen, welche nachfolgend beschrieben werden.

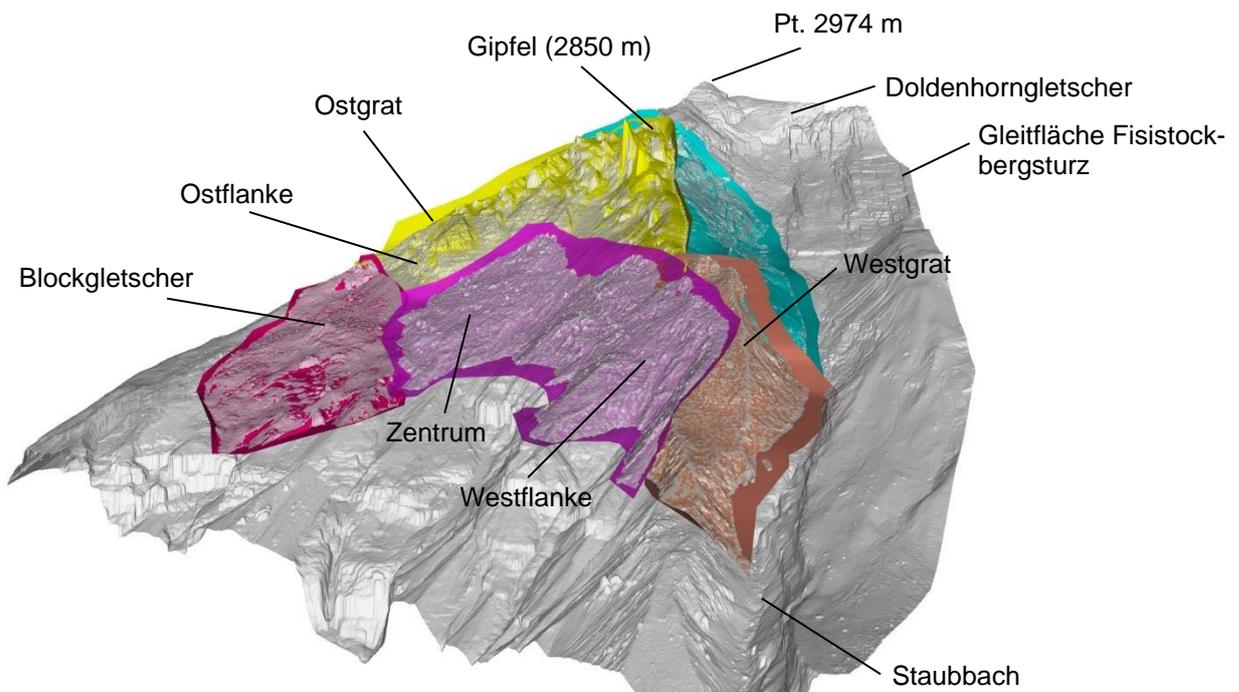


Abbildung 12: 3D-Ansicht der fünf Hauptkompartimente der Rutschung Spitze Stei. Lokalitäten sind annotiert. Vgl. Abbildung 2 für 2D-Ansicht. Das Höhenmodell im Hintergrund zeigt den mittels Drohne (Kapitel 2.2) beflogenen Perimeter.

3.1.1 Oberste Ebene (Schuttrutschung)

Die aus Lockergestein bestehende sekundäre Schuttrutschung (violetter Körper in Abbildung 12) erstreckt sich vom Zentrumsbereich bis zur Westflanke. In den oberen Bereichen fällt die Gleitfläche der Rutschung rotationsartig (40 – 60° steil) ein.

Im unteren Bereich verläuft die Gleitfläche generell flacher (20 – 40°). Der stratigraphische Schichtverlauf wird von der oberflächennahen Rutschung erwartungsgemäss nur bedingt reflektiert. So fällt die Gleitfläche stärker nördlich, in Fallrichtung des Hanges ein als die anstehenden Schichtgrenzen (Abbildung 13).

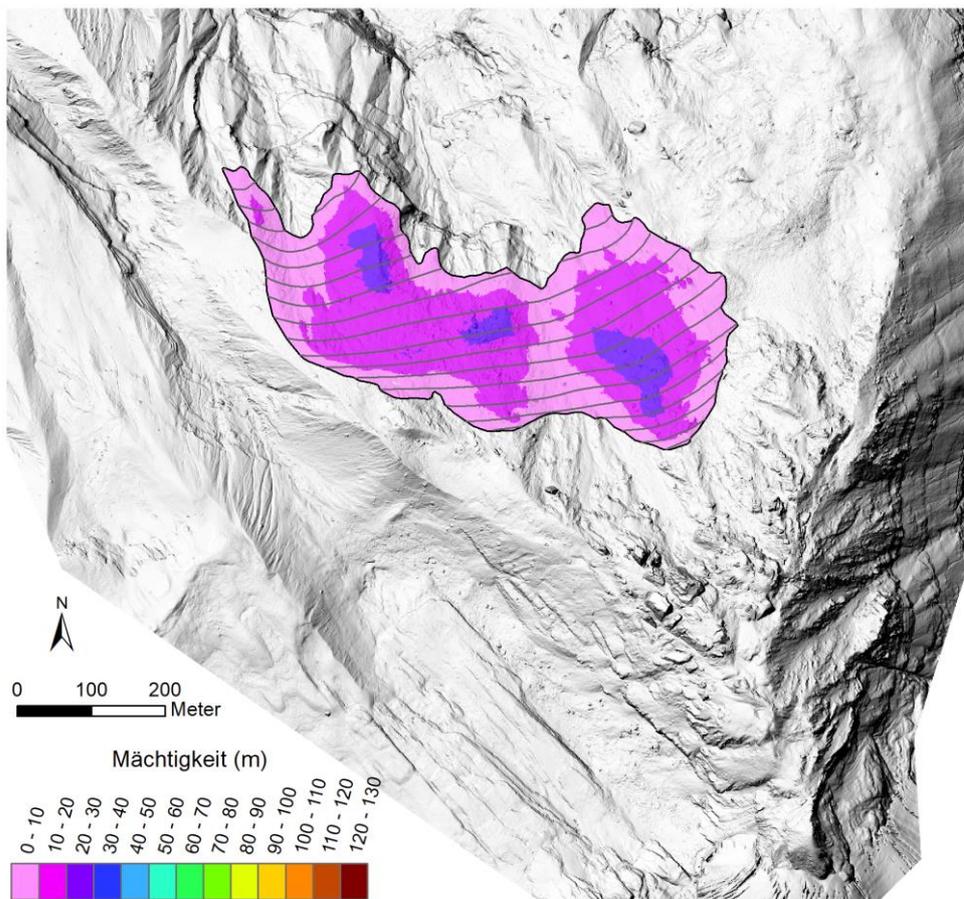


Abbildung 13: Geometrie und Mächtigkeit der 3D-modellierten Schuttrutschung: 20 m-Isohypsen (graue Konturlinien) zeigen den Verlauf der Gleitfläche; Farbtöne die Mächtigkeit.

Das Volumen des modellierten Kompartimentes beträgt rund 1.6 Millionen m³; die durchschnittliche Mächtigkeit liegt bei 11.2 m (Tabelle 2, Abbildung 13). In den Randbereichen der Schuttrutschung liegen die Mächtigkeiten unter 10 m, in mehreren Bereichen werden Mächtigkeiten von 20 m überschritten.

Tabelle 2: Übersichtstabelle zu den Flächen, Volumen und Mächtigkeiten der modellierten Hauptkompartimente der Rutschung Spitze Stei. Da sich die Kompartimente teilweise überlagern, übersteigt die summierte Fläche der einzelnen Kompartimente die Gesamtfläche der Rutschung.

Kompartiment	Fläche (m ²)	Durchschnittliche Mächtigkeit (m)	Volumen (Mio. m ³)
Schuttrutschung (violett)	143'500	11.2	1.6
Gipfel (gelb)	196'800	40.1	7.9
Westgrat oben (türkis)	106'500	37.2	4.0
Westgrat unten (braun)	59'500	19.5	1.2
Ost (rot)	103'700	28.2	2.9
<i>Gesamte Rutschung</i>	<i>510'000</i>	<i>35.2</i>	<i>* 17.6</i>

* Die Kubatur des in Kapitel 3.1.4 präsentierten substabilen Kompartimentes (blau) ist bei den 17.6 Mio. m³ nicht berücksichtigt.

3.1.2 Mittlere Ebene (Rutschkörper Gipfel, Westgrat)

Zur mittleren stratigrafischen Ebene gehört das Felskompartiment des Gipfelbereiches (in Abbildung 12 gelb eingefärbt) sowie die beiden Kompartimente des Westgrates (braun und türkis). Die drei Kompartimente gleiten mit grosser Wahrscheinlichkeit auf einer gemeinsamen, NW-orientierten basalen Fläche, welche mit der nach Osten erweiterten Gleitebene des Fisistock-Bergsturzes kongruent ist. Die Ausbisslinien der extrudierten Gleitebene (grüne Fläche in Abbildung 14) sind ebenfalls mit den beobachteten Ausbissen bei den Reflektoren 80/81, im unteren Bereich der Rutschung sowie im Bereich Staubbach kongruent. Damit kann nun die nach geologischen Gesichtspunkten plausible These, wonach beide Instabilitäten eine ähnliche Gleitflächengeometrie aufweisen, durch Messungen gestützt werden.

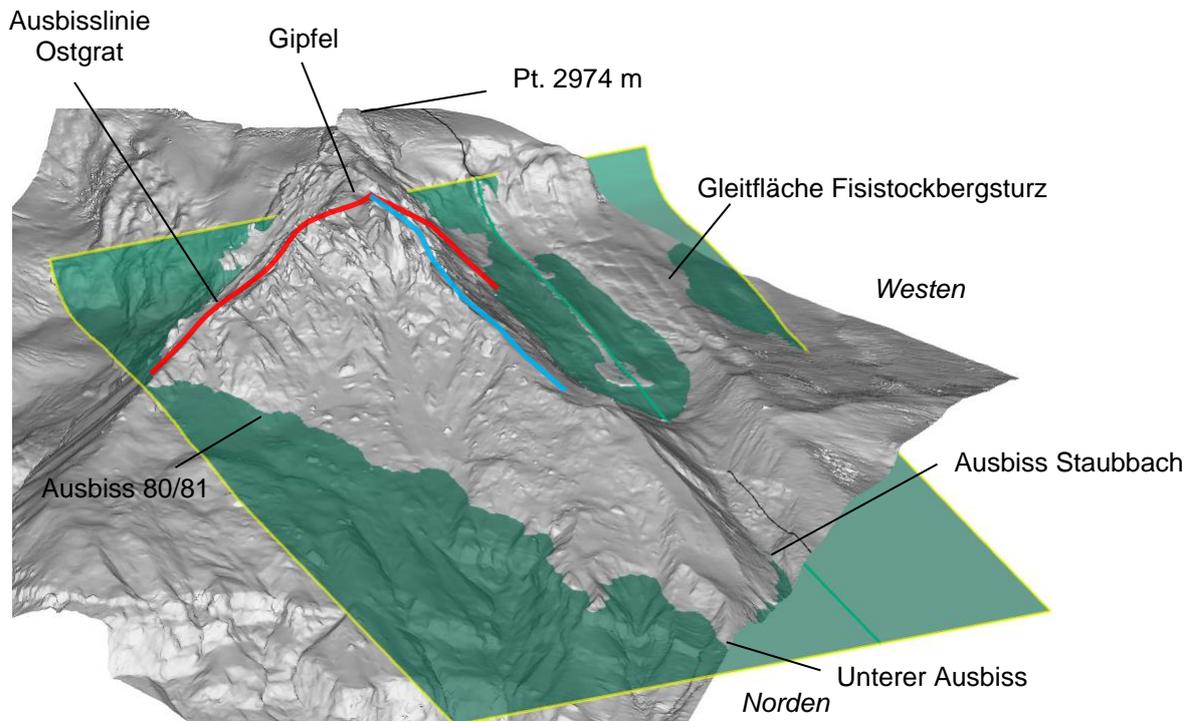


Abbildung 14: In den Bereich der Rutschung Spitze Stei extrudierte Gleitfläche des Fisistockbergsturzes. Die modellierten Ausbisslinien sind mit den beobachteten Ausbissen bei den Reflektoren 80/81, im Bereich Staubbach sowie dem unteren Bereich der Rutschung stimmig.

Gegen Süden versteilt sich die extrudierte Gleitfläche des Fisistock-Bergsturzes erst unterhalb des Punktes 2974 m (Abbildung 14). Die im Falle der Rutschung Spitze Stei entlang dem Ostgrat, im Gipfelbereich sowie dem Westgrat kartierten Ausbisslinien (rote Linien in Abbildung 14) deuten darauf hin, dass hier aktive Gleitflächen bzw. Brüche bereits weiter nördlich auftreten. Die oberflächlichen Verläufe dieser Ausbisslinien können nur mit steil einfallenden Gleitflächen plausibel modelliert werden. Diese münden im Untergrund in die flachere basale Gleitfläche und trennen damit einen nördlichen aktiven Bereich von einem südlichen stabilen bzw. substabilen Bereich, der bisher nicht der aktiven Rutschung Spitze Stei zugeordnet wurde (vgl. Kapitel 3.1.4). Die im Gipfelbereich der Rutschmasse auftretenden starken Vertikalbewegungen (Abbildung 9) dürften eine Folge dieser steilen Gleitflächen sein. Zusätzlich unterliegt der Gipfelbereich einer Extension, was ein Zusammensacken der Masse und somit eine Subsidenz des Geländes begünstigt.

Die Isohypsen in Abbildung 15 zeigen den Verlauf der modellierten Gleitflächen. Im unteren Bereich verläuft die Gleitebene mit einer Neigung um knapp 30 Grad parallel zum nordwest-orientierten Schichtverlauf. Hin zum Anrissbereich der Rutschung versteilt sich die Gleitfläche auf über 50° (listrische Form). Die in den Isohypsen sichtbaren kleinräumigen Veränderungen der Gleitflächenexposition und -steilheit reflektieren entsprechende Veränderungen in den Messdaten.

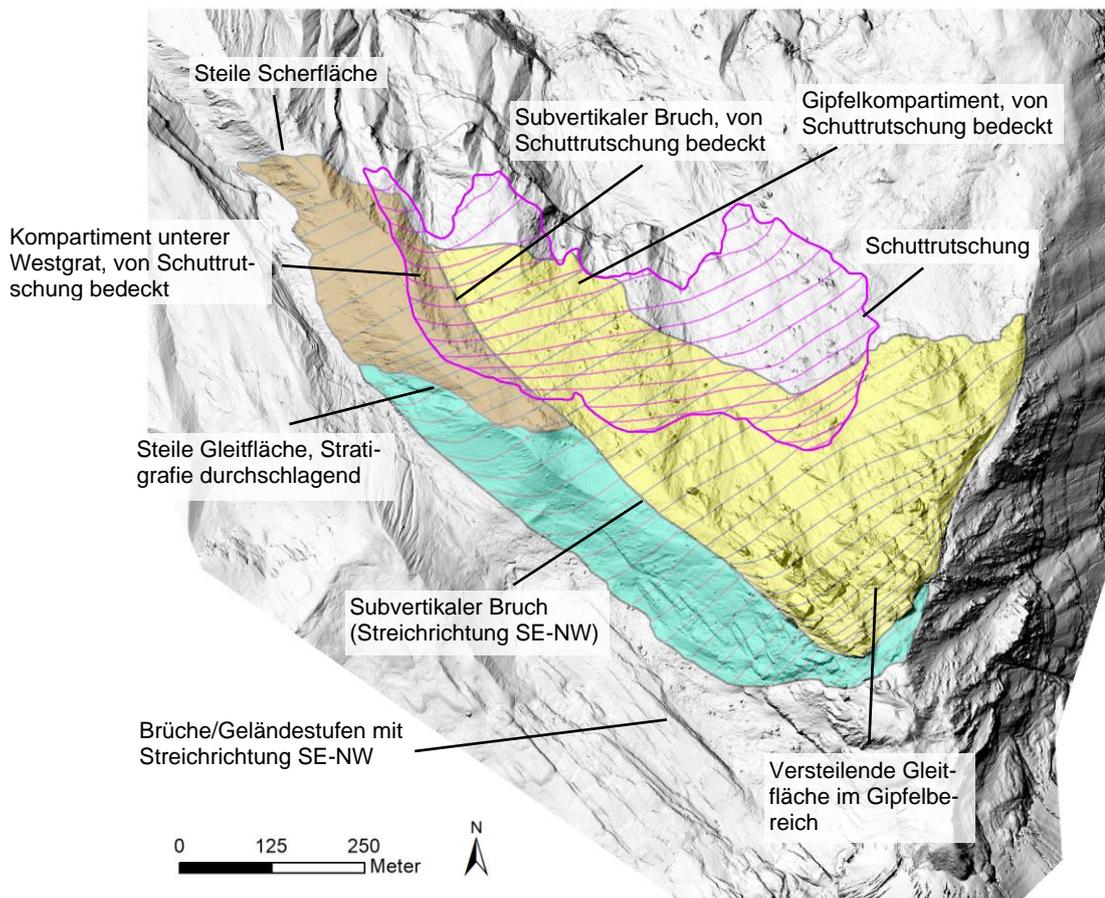


Abbildung 15: Kompartimente des Gipfelbereiches (gelb) sowie des oberen und unteren Westgrates (türkis, braun). Die sekundäre Schuttrutschung, welche die drei Gleitflächen stellenweise überdeckt, ist als violettes Polygon dargestellt. Die Höhenlinien entsprechen 20 m-Isohypsen der jeweiligen Gleitflächen.

Zwischen dem Felskompartiment des Gipfelbereiches (gelb, Bewegungsrate bis zu 3 m/J) und den beiden Kompartimenten des Westgrates (türkis bzw. braun, ≤ 2 m/J) verläuft ein weiterer (sub)vertikaler Bruch in Streichrichtung SE-NW. Der Verlauf dieses Bruches (blaue Linie in Abbildung 14) ist im obersten Bereich des

Westgrates klar ersichtlich, da dort der Fels direkt bzw. unter einer geringmächtigen Lockergesteinsschicht ansteht. Hin zum mittleren Bereich des Westgrates verläuft der Bruch unter einer zunehmend mächtigen Lockergesteinsschicht, in welcher der zunächst scharfe Ausbiss auffächert (Abbildung 2). Im unteren Teil wird der Bruch von der Schuttrutschung bedeckt (Abbildung 15). Da die Schuttrutschung den Hauptteil der oberflächlich gemessenen Bewegung verursacht, ist der Bruchverlauf in den Bewegungsfeldern stark maskiert. Generell scheint der südost-nordwest-orientierte Verlauf des Bruches mit dem Verlauf natürlicher Schwächezonen im anstehenden Gestein zu korrespondieren. Weitere, im Einschnitt des Staubbaches identifizierte Brüche/Geländestufen weisen eine sehr ähnliche Orientierung auf (Abbildung 15).

Der Übergang zwischen dem Kompartiment des oberen Westgrates (in Abbildung 12 türkis, $v < 0.5$ m/J) und dem Kompartiment des unteren Westgrates (braun, $v = 0.5 - 2.0$ m/J) wird durch eine weitere steile Gleitfläche gebildet, welche die Stratigraphie des Westgrates durchschlägt und auf Höhe Staubbach in die basale Gleitfläche mündet (Abbildung 15). Der Ausbiss des braunen Kompartimentes im untersten Bereich des Westgrates entspricht im Modell einer sehr steilen Scherfläche (Abbildung 15).

Das Felskompartiment des Gipfelbereiches (gelb) reicht im Bereich der Westflanke unter die Schuttrutschung (Abbildung 15). Die mit geometrischen und geologischen Erwägungen übereinstimmende These wird durch GPS- und Reflektormessungen im Bereich der Schuttrutschung gestützt (Kapitel 2.3). So zeigen die Messpunkte während der Sommersaison (hohe Aktivität der Schuttrutschung) eine nördliche Gleitrichtung, während der Wintersaison (stark reduzierte Aktivität der Schuttrutschung) hingegen eine nordwestliche Gleitrichtung, ähnlich der Messpunkte im Gipfelbereich der Rutschung.

Im Zentrum reicht das modellierte Kompartiment des Gipfelbereiches hingegen nur knapp unter die Schuttrutschung (Abbildung 15). Neben geometrischen Überlegungen [10] wird diese These durch Messungen gestützt, wonach die Bewegungsraten im Zentrumsbereich generell tiefer als im Rest der Schuttrutschung liegen. Zudem weisen die Messpunkte in dem Bereich saisonal keine signifikanten Veränderungen der Gleitrichtung auf. Somit gleitet hier das Lockergestein der Schuttrutschung direkt auf dem anstehenden stabilen Felsuntergrund.

Die Volumina der drei modellierten Kompartimente betragen 7.9 (Gipfel), 4.0 (Westgrat oben) sowie 1.2 Millionen m^3 (Westgrat unten). Die entsprechenden

durchschnittlichen Mächtigkeiten liegen bei 40, 37 und 20 m (Tabelle 2). Im Gipfelbereich der Rutschung werden lokal Mächtigkeiten von über 100 m erreicht (Abbildung 16).

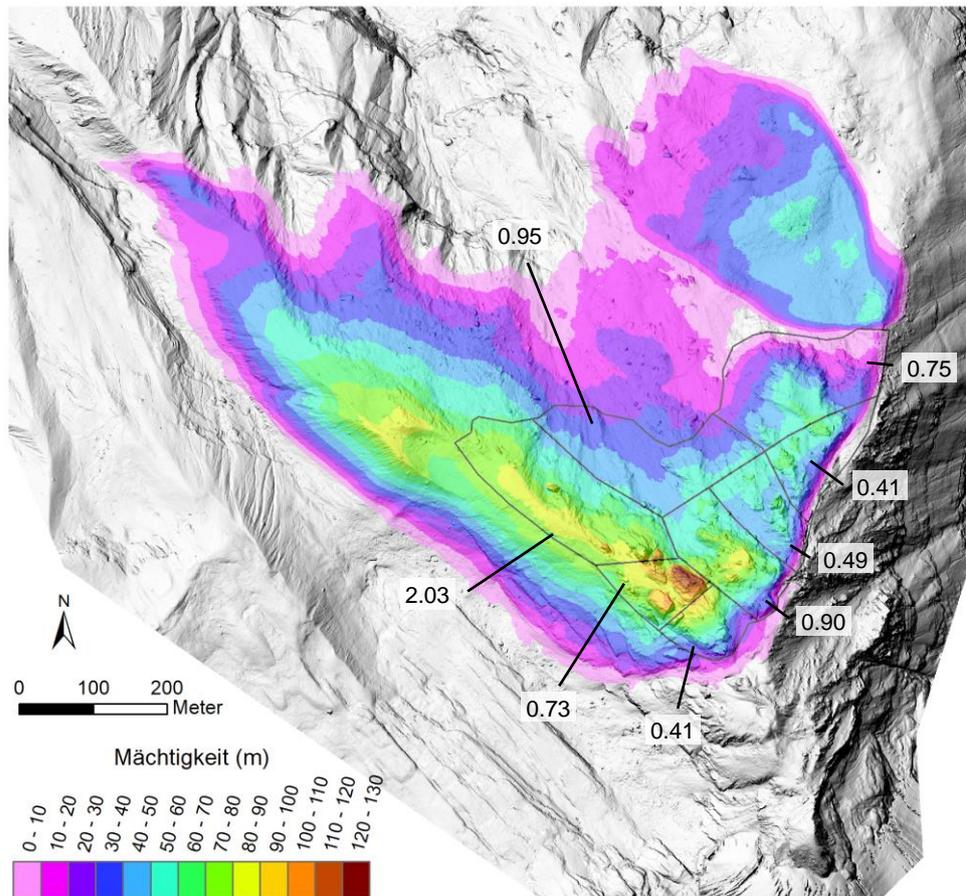


Abbildung 16: Karte des Tiefganges der Rutschung Spitze Stei. Die Volumen der abgegrenzten Subkompartimente des Gipfelbereiches sind annotiert (Millionen m³). Für die Berechnung der Volumenangaben wurden jeweils vertikale Bruchgrenzen angenommen.

Neben den Hauptkompartimenten wurden zwei kleinere Kompartimente des Gipfelbereiches dreidimensional modelliert (Abbildung 17). Das verstärkt aktive Felskompartiment unterhalb des Ostgrates (grün) umfasst ein Volumen von 70'000 m³, wovon 2021 rund 3000 m³ abgestürzt sind. Das sich westlich des Gipfelbereiches in Richtung Staubbach bewegende Kompartiment (dunkelviolet) umfasst ein Volumen von ca. 60'000 m³.

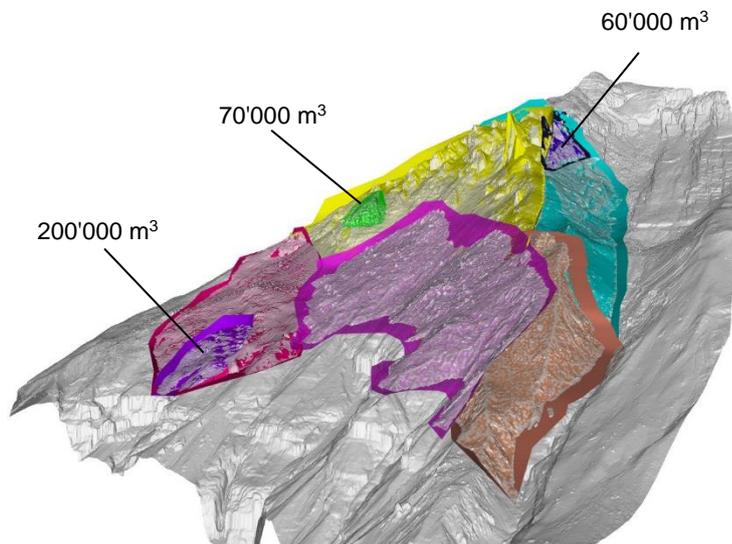


Abbildung 17: 3D-modellierte sekundäre Kompartimente der Rutschung Spitze Stei überlagert über die fünf Hauptkompartimente. Die Volumen der sekundären Kompartimente sind annotiert.

Zusätzlich zu den 3D-Analysen wurde das Gipfelkompartiment mittels 2D-Auswertungen detaillierter analysiert. Dazu wurden im Gipfelbereich mittels kartierter Brüche (Abbildung 2) Subkompartimente abgegrenzt. Für die Volumenbestimmung wurden die Mächtigkeiten über die Kompartimentsflächen integriert. Die Volumen der ausgeschiedenen Kompartimente liegen in der Grössenordnung von 1 bis 2 Millionen m^3 (Abbildung 16). In Abbildung 16 nicht berücksichtigt ist der unter der Schuttrutschung liegende Teil des Gipfelkompartimentes, da in dem Bereich keine Brüche kartierbar sind.

Die über die Grenzen der Subkompartimente hinweg beobachteten ähnlichen Beschleunigungsmuster deuten darauf hin, dass die Kompartimente trotz klarer Trennflächen kinematisch interagieren. Dieser Effekt wird durch die zeitlich synchronen Richtungswechsel von auf verschiedenen Kompartimenten versetzten GPS-Stationen (z.B. 2 und 8) bestätigt.

3.1.3 Unterste Ebene (Rutschkörper Ost)

Die NW-orientierte basale Gleitfläche (grüne Fläche in Abbildung 14) streicht oberhalb der stabilen Reflektoren 80/81 aus. Da das Kompartiment Ost (rotes Kompartiment in Abbildung 12) nordöstlich und zudem tiefer liegt als die Reflektoren 80/81, muss dessen Gleitfläche aus geometrischen Gründen unterhalb der basalen Gleitfläche verlaufen.

Im aktuellen Messbericht [10] des SLF wird die Gleitfläche basierend auf den Resultaten des 3D-Trackings [9] von der unteren Ausbisslinie bis oben zum Ostgrat rekonstruiert. Die Resultate wurden mit lokalen Anpassungen (insbesondere im westlichen und oberen Bereich) in unser aktuelles 3D-Modell übernommen (Abbildung 18). Das Gesamtvolumen des modellierten Kompartimentes beträgt 2.9 Mio. m³, was einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 28.2 m entspricht (Tabelle 2). Von den 2.9 Mio. m³ entfallen rund 200'000 m³ auf ein frontales Kompartiment, das während dem Sommer 2021 besonders aktiv war (violette Kompartiment in Abbildung 17).

Die Gleitfläche des Kompartimentes verläuft bis zu 60 m unter Terrain im dort anstehenden Fels (Abbildung 18). Der Felsteil der Rutschung wird von einem mächtigen Schuttkörper überdeckt. Im zentralen Bereich des Kompartimentes bildet der eisdurchsetzte Schutt einen kleinen Blockgletscher.

Aufgrund der tiefer liegenden Gleitfläche ist das Kompartiment Ost vom Rest der Rutschung kinematisch stark entkoppelt. Dies wird durch die Beobachtung bekräftigt, dass der Bereich bereits deutlich länger in Bewegung ist als die übrige Rutschung ([5],[6]).

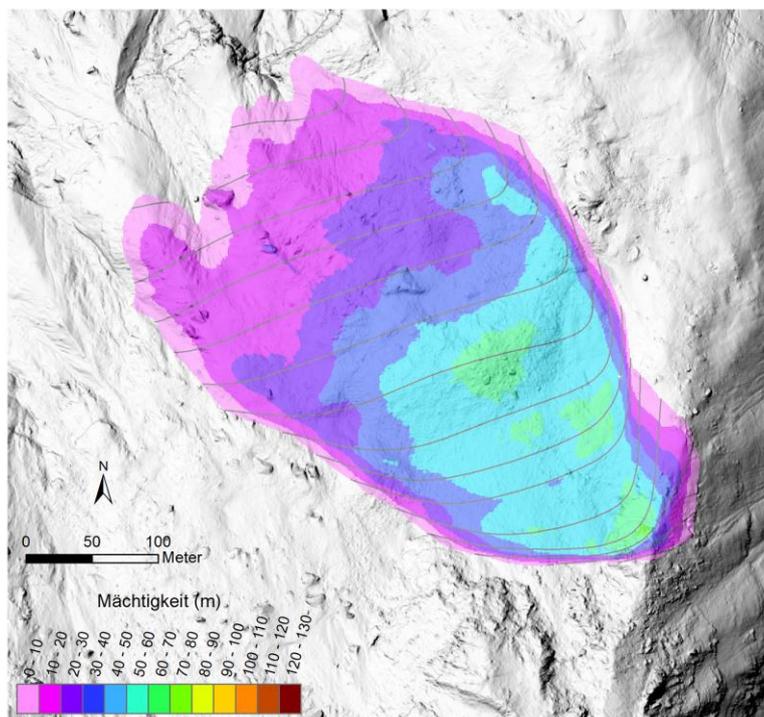


Abbildung 18: Geometrie des 3D-modellierten Kompartimentes Ost: 20 m-Isohypsen (graue Konturlinien) zeigen den Verlauf der Gleitfläche.

3.1.4 Mittlere Ebene, Bereich Süd (Gipfel – Pt. 2974 m)

Die auf der extrudierten Gleitfläche des Fisistock-Bergsturzes aktiv gleitenden Kompartimente wurden in Kapitel 3.1.2 diskutiert. Die hinter den steilen Gleitflächen des Ost- und Westgrates anstehende Restkubatur (in Abbildung 19 bzw. Abbildung 20 blau eingezeichnet) wurde bisher nicht zur Gesamtkubatur der Rutschung gerechnet. Obwohl die Geländemorphologie des 7.2 Mio. m³ Kompartimentes durch Sackungsphänomene geprägt ist, deuten die bisherigen Radar- und Drohnemessungen darauf hin, dass grössere Bereiche des Kompartimentes zumindest substabil sind (maximale Bewegung in der Grössenordnung mm bis wenige cm/Jahr). Insbesondere in der ostexponierten Flanke des Kompartimentes wurden in den Radardaten 2020 (Standort Winteregg, [2]) wie auch in den Drohnendaten 2020 – 2021 keine grossflächigen, signifikanten Bewegungen festgestellt. Hinweise auf Bewegungen gibt es hingegen für die westexponierte Flanke des Kompartimentes sowie den Gratbereich (Radardaten Westgrat [2], Drohnendaten 2020 – 2021). Der einzige Messpunkt des Kompartimentes (Reflektor 18, im Gratbereich platziert, Abbildung 20) weist seit Installation im Januar 2020 eine Bewegungsrate von ca. 7 cm / Jahr auf.

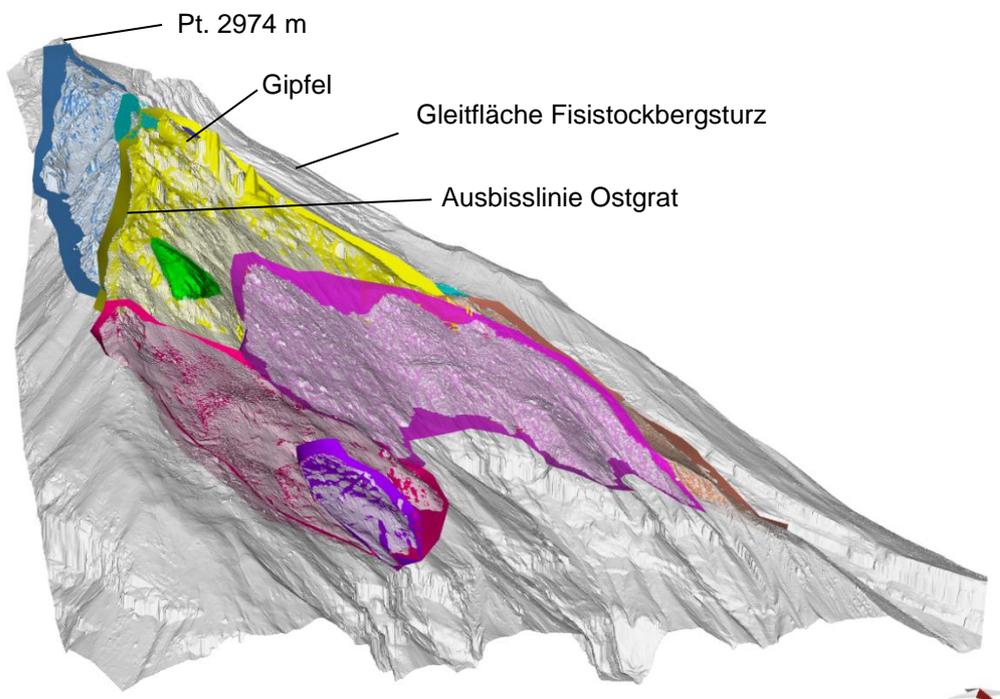


Abbildung 19: Blick von Osten auf die 3D-modellierten Kompartimente der Rutschung Spitze Stei. Die blaue Fläche umfasst das substabile Kompartiment zwischen dem aktiven Ausbiss Ostgrat sowie dem sicher stabilen Pt. 2974 m.

Zum heutigen Zeitpunkt gehen wir davon aus, dass die festgestellten Bewegungen auf sekundäre Rutschungen/Sackungen mit einer Gesamtkubatur in der Grössenordnung einiger 100'000 bis maximal 3 Mio. m³ zurückzuführen sind. Für eine abschliessende Beurteilung sind jedoch zusätzliche Messdaten nötig. Die Drohnenmessungen, welche den Bereich erst seit Sommer 2021 abdecken, werden ab 2022 die dafür nötigen Grundlagen liefern. Eine Wiederholung der Radarmessungen vom Standort Westgrat wäre eine weitere Möglichkeit, die Bewegungen besser zu quantifizieren.

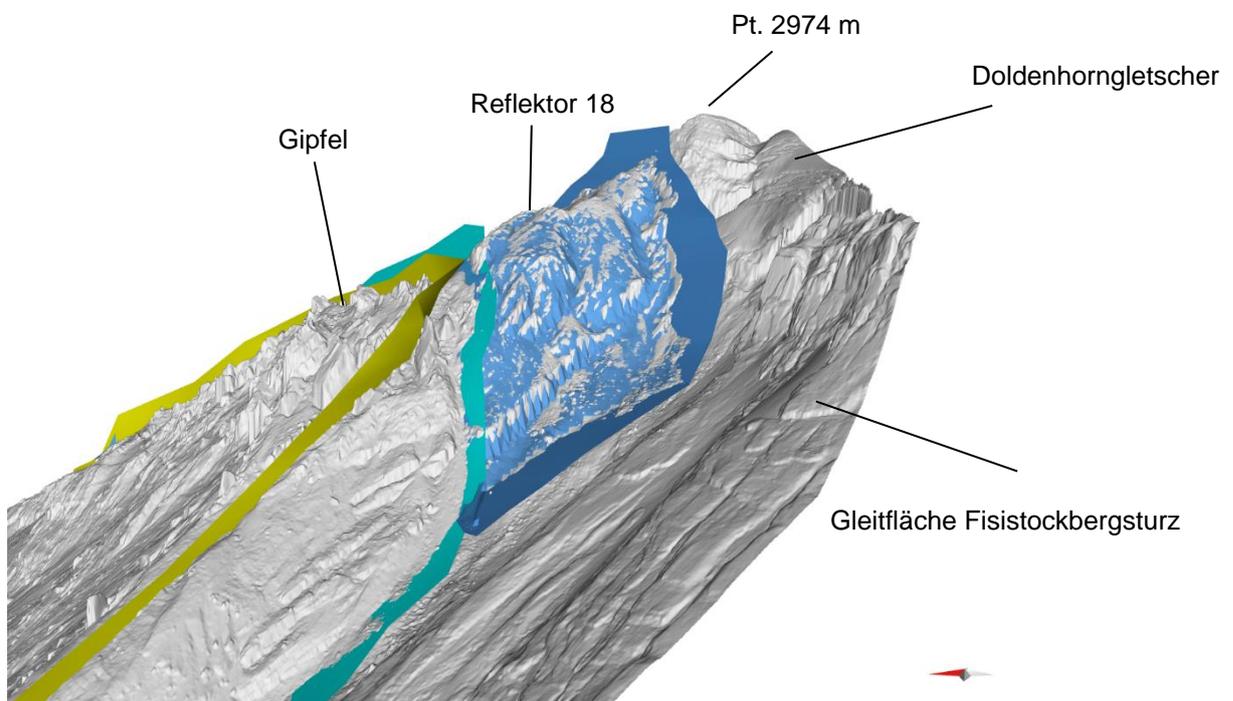


Abbildung 20: Blick von Westen auf die westexponierte Flanke des potenziell instabilen Kompartimentes zwischen dem schnell bewegenden Gipfelbereich sowie dem stabilen Pt. 2974 m.

3.2 Geologischer Profilschnitt

Für einen geologischen Profilschnitt wurde die in Abbildung 21 dargestellte Profilspur gewählt. Die Spur verläuft vom stabilen Pt. 2947 m über den Gipfelbereich bis unter die zentrale Schuttrutschung.

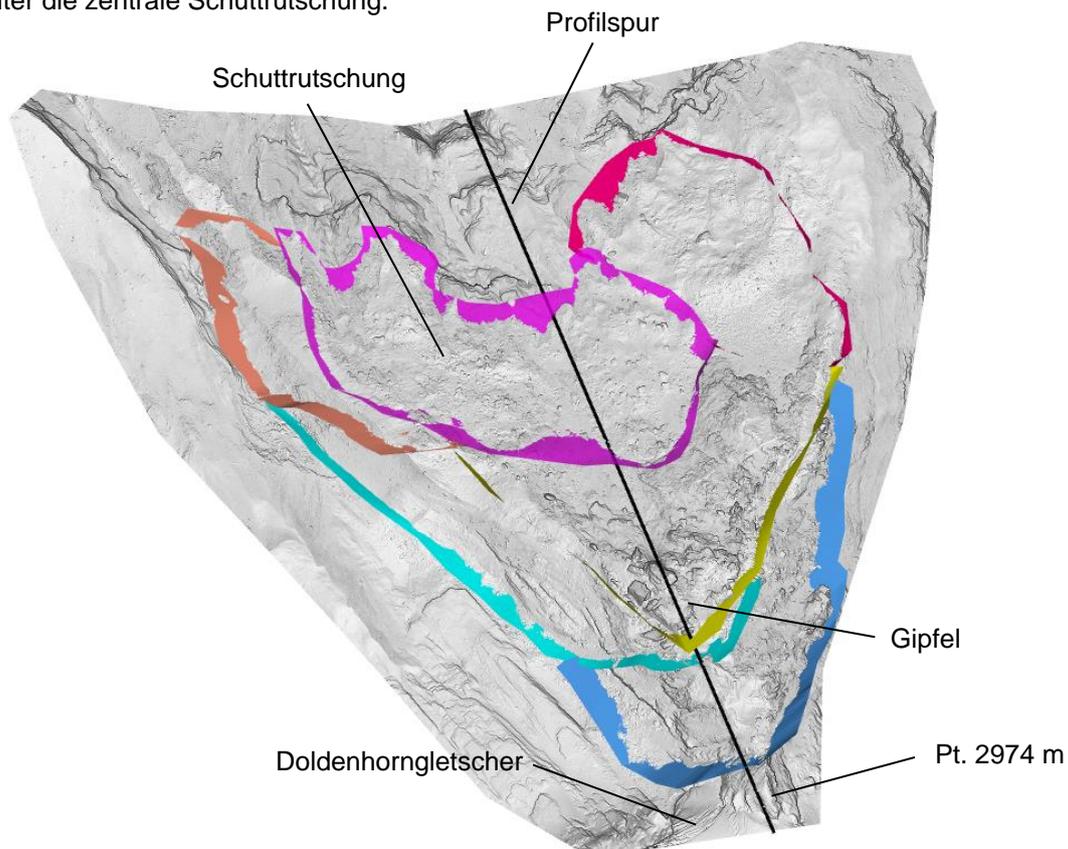


Abbildung 21: Lage der Profilspur.

Die Schichtgrenzen der einzelnen Lithologien wurden anhand der Ostflanke, wo die Stratigraphie einsehbar ist, bestimmt und in die Profilebene projiziert. Anschliessend wurden die Gleitflächen aus dem 3D-Modell mit der Profilebene verschnitten.

Aufgrund der Unzugänglichkeit des Terrains ist eine detaillierte stratigraphische Aufnahme der Schichtfolge nicht möglich. Im Profilschnitt (Abbildung 22) sind daher nur die stratigraphischen Haupteinheiten Quinten-Kalk, Zementstein-Formation und Öhrli-Kalk unterschieden. Diese lassen sich auch aus der Ferne recht gut unterscheiden.

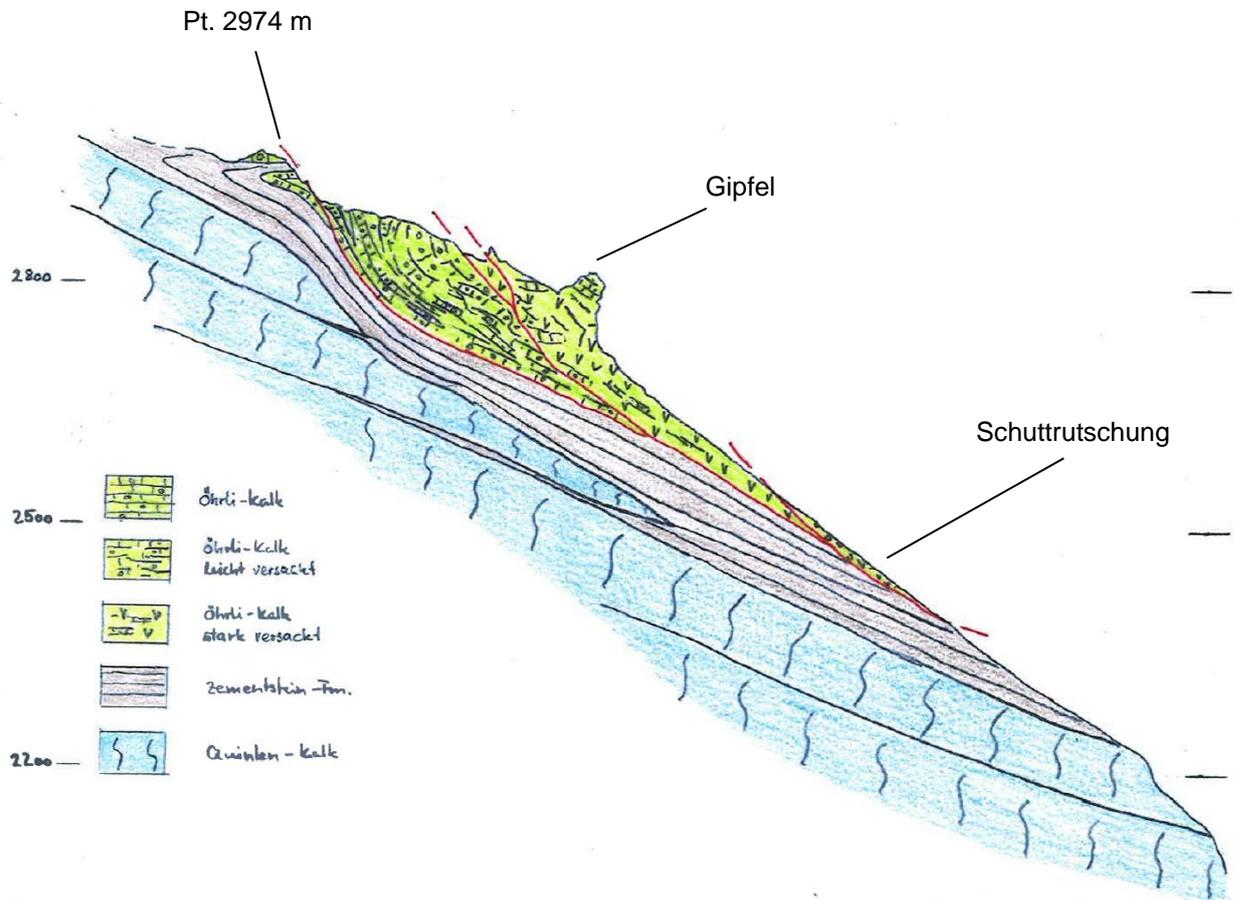


Abbildung 22: Geologischer Profilschnitt Spitze Stei. Die rot eingezeichneten Linien entsprechen den in Abbildung 21 dargestellten Gleitflächen.

Der **Quinten-Kalk** (Malm/Kimmeridgien) ist ein dunkler, fossilarmer, mikritischer Kalk, der in der Doldenhorn-Decke in grosser Mächtigkeit auftritt. Bei der Gebirgsbildung wurde diese Einheit stark zusammengeschoben und lamellenartig zerschlizt. Dabei wurden keilförmig zulaufende Quinten-Kalk-Schuppen in die Zementsteinschichten eingespiesst.

Die **Zementstein-Formation** (Malm/Portlandien) besteht aus einer Wechsellagerung von Mergelschiefern mit Calpionellen-führenden Kalkbänken. Sie ist in der Doldenhorn-Decke weit verbreitet. Die vergleichsweise weiche Wechsellagerung führt zu einer gewissen tektonischen Entkoppelung zwischen Quinten-Kalk und den darüber folgenden Kreidekalken, deren unterste Einheit der Öhrli-Kalk ist.

Der **Öhrli-Kalk** (Untere Kreide/Berriasien) ist ein heller, fossilreicher Kalk, der nebst Ooiden auch Korallen, Gastropoden und Muscheln enthält. Die Sackungsmasse beim Spitzen Stei besteht ausschliesslich aus Öhrli-Kalk.

Es ist auffällig, dass die basale Gleitfläche nicht innerhalb der Zementstein-Formation verläuft, sondern exakt an der Basis des Öhrli-Kalkes. Dies lässt vermuten, dass zwischen der Zementstein-Formation und dem Öhrli-Kalk lokal ein geringmächtiger Horizont aus «Berriasien-Schiefer» vorhanden ist. Ein solcher Horizont ist aus eher südlicheren Faziesgebieten bekannt und in der älteren Literatur nicht ganz korrekt auch als «unterer Öhrli-Mergel» bezeichnet. Bei diesem Horizont handelt es sich wohl um ein reliktsches Äquivalent der in der Wildhorn-Decke verbreiteten Palfris-Formation. Obwohl dies nicht bewiesen ist, wäre es zumindest eine plausible Erklärung für den beobachteten Verlauf der Gleitfläche.

3.3 Vergleich mit früheren Modellversionen

Das letzte vollständige 3D-Modell stammt von 2019 [1]. Ende 2020 wurde auf eine komplette Überarbeitung des 3D-Modelles verzichtet, da Daten neu initiiert Messungen (z.B. Verschiebungsmessungen bei den Reflektoren 80/81) noch nicht signifikant waren [2].

Im Vergleich zum Modell von 2019 konnten die Kompartimente dank der besseren Datenlage detaillierter modelliert werden. Die wichtigsten Änderungen betreffen folgende Punkte:

- Die Kubatur der Schuttrutschung ist im aktuellen Modell infolge des vergrößerten Perimeters (Zentrum bis Westflanke) grösser (Zunahme von 0.6 Mio. m³ auf 1.6 Mio. m³).
- Aufgrund der im Gipfelbereich steiler einfallenden Gleitfläche vergrößerte sich die Kubatur des Gipfelkompartimentes ebenfalls (Zunahme von 5.5 auf 7.9 Mio. m³).
- Die Kubaturen der Kompartimente entlang des Westgrates (im Modell 2019 noch nicht separat ausgewiesen) wurden entsprechend kleiner.
- Mit der Bestätigung des stabilen Bereiches rund um die Reflektoren 80/81 fiel die im Modell 2019 enthaltene Umhüllende um den gesamten Rutschperimeter weg. Zusätzlich mit weiteren Anpassungen (z.B. entlang des Ostgrates) führte dies zu einer Reduktion des Gesamtvolumens der Rutschung von rund 20 Mio. m³ auf aktuell 17.6 Mio. m³ (Tabelle 2).

Neu vorliegende Messungen (Kapitel 3.1.4) deuten darauf hin, dass das bisher nicht zur Rutschung gerechnete Kompartiment zwischen dem Gipfelbereich der

Rutschung und dem Pt. 2947 m (Abbildung 20) nicht vollständig stabil ist. Eine Berücksichtigung der entsprechenden Kubaturen würde die Gesamtkubatur der Rutschung erhöhen. Eindeutige Messdaten werden fürs nächste Jahr erwartet.

4. Fazit und Ausblick

Mit den präsentierten Auswertungen konnte das bisherige 3D-Modell der Rutschung Spitze Stei überprüft, ergänzt und verfeinert werden. Das aktualisierte Modell bildet eine zentrale Grundlage für das laufende Monitoring sowie die weiterführenden Arbeiten (z.B. Szenarienbildung).

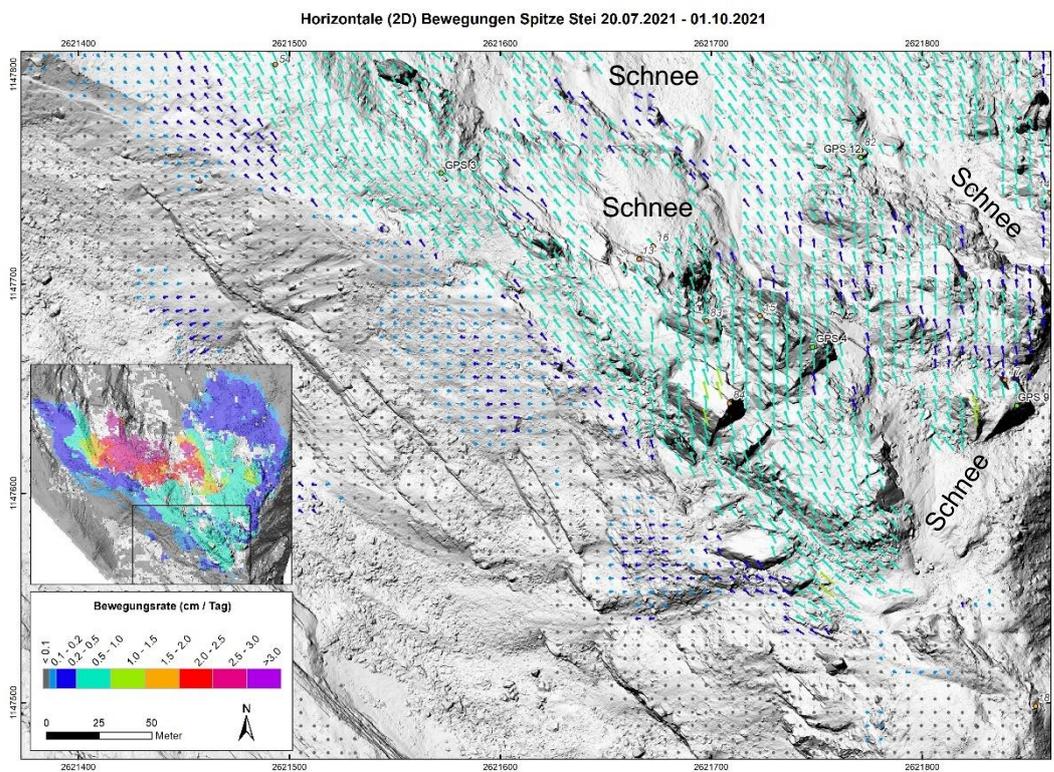
Die Fortführung der bisherigen Überwachung führt zu einer laufenden Verbesserung der Datenlage, die zur periodischen Überprüfung des 3D-Modelles herangezogen werden sollte. Insbesondere von der Fortführung der Drohnenbefliegungen erwarten wir diesbezüglich bereits ab Herbst 2022 neue Erkenntnisse. Zu diesem Zeitpunkt werden Bewegungsfelder vorliegen, welche die Vorteile der beiden hier präsentierten Bewegungsfelder (Tabelle 1) kombinieren. Dies ermöglicht es, signifikante 2D bzw. 3D-Bewegungsraten auch in den Bereichen mit geringster Aktivität zu bestimmen. Weiter können damit auch schwach ausgeprägte Geschwindigkeitsdiskontinuitäten bestimmt werden, was Hinweise auf zusätzliche Gleitflächen oder Brüche liefern dürfte, z.B. im Gipfelkompartiment oder dem Kompartiment des oberen Westgrates. Das entsprechend verbesserte Verständnis erlaubt eine zunehmend sicherere Prognose der zukünftigen Entwicklung des komplexen Gesamtsystems bzw. seiner Teile.

5. Quellen

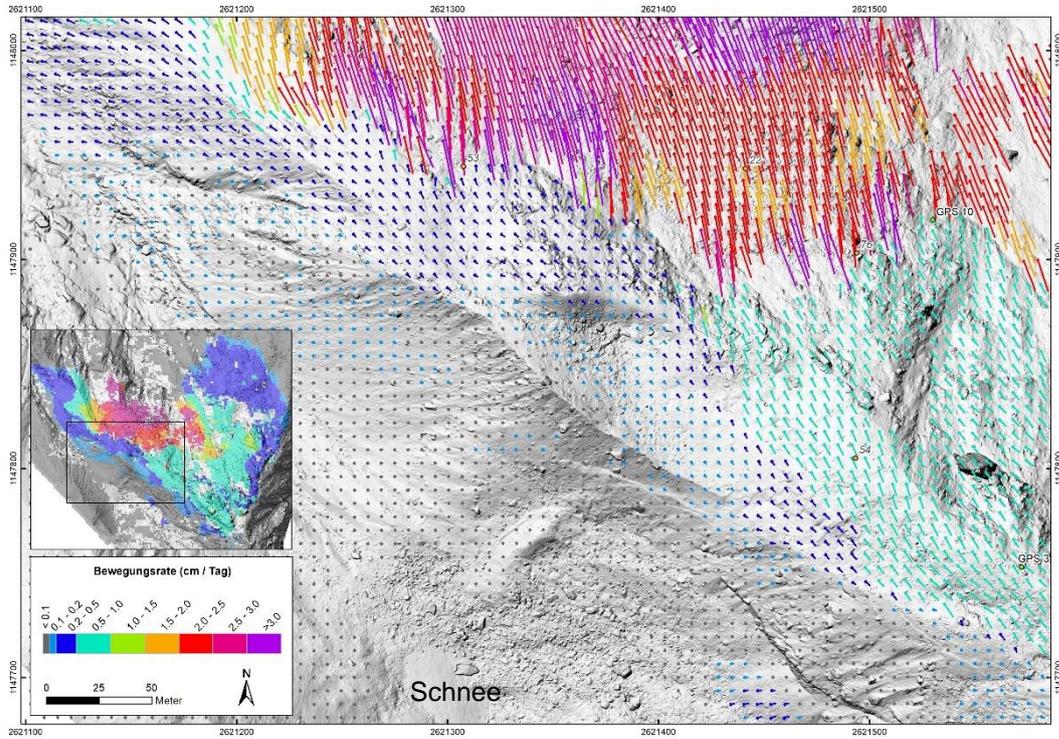
- [1] GEOTEST AG (2019): «Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement, Ergebnisse und Auswertungen 2019», Bericht Nr. 1418139.2.
- [2] GEOTEST AG (2020): Kandersteg, «Spitze Stei», Gefahrenmanagement 2020, Datenerhebungen und Auswertungen 2020, Bericht Nr. 1418139.12.
- [3] Gamma Remote Sensing (2019): Kurzdokumentation der Messkampagne „bim Spitze Stei“ mit dem GAMMA Portable Radar Interferometer (GPRI), Präsentation.
- [4] Flotron (2020): DTM Spitze Stei 04.09.2020, Befliegung im Auftrag vom Amt für Wald und Naturgefahren Kanton Bern.
- [5] Gamma Remote Sensing (2019): InSAR Zeitserie 1991–2019 «Bim Spitze Stei», Präsentation.
- [6] GEOTEST AG (2020): «Kandersteg, «Spitze Stei», Auswertung historische Orthophotos», Bericht Nr. 1418139.11.
- [7] SLF, Uni Fribourg (2019): Auswertung terrestrisches Laserscanning Spitze Stei, Kandersteg, BE, 11.07.2019 – 09.08.2019
- [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] SLF (2021): Bericht terrestrisches Laserscanning Spitze Stei Kandersteg, BE, September 2021
- [11] Gojcic Z., Zhou C., Wegner J.D., Wieser A. (2019). The perfect match: 3d point cloud matching with smoothed densities. In: IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 5545-5554
- [12] Nuth, C. and Kääb, A. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. The Cryosphere, 5(1), pp. 271-290.
- [13] GEOTEST AG (2021): Kandersteg, Rutschung «Spitze Stei», Entwicklung Sommer 2021, Bericht Nr. 1418139.21.

Anhang 1 – Bewegungsfelder Sommer 2021 – Herbst 2021

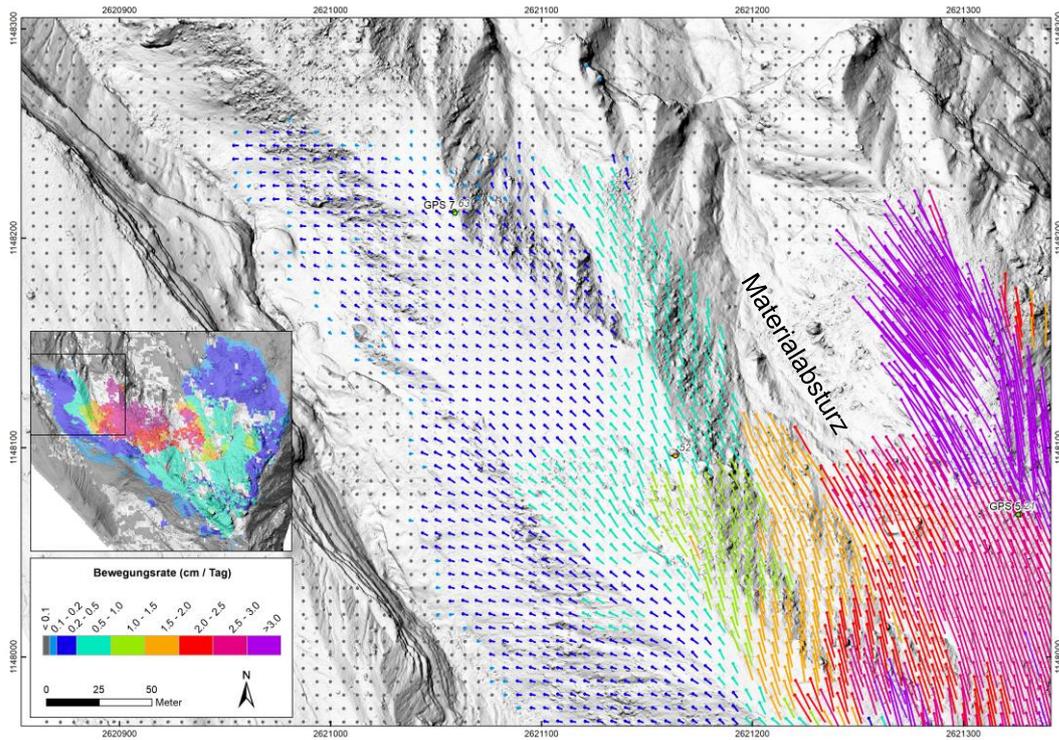
Die nachfolgend abgebildeten Bewegungsvektoren repräsentieren den Zeitraum 20.07.2021 bis 01.10.2021 (73 Tage). Die per Feature-Tracking abgeleiteten Bewegungsvektoren sind 10-fach verlängert. Mit der höheren räumlichen Auflösung der Inputdaten konnte bei den Geschwindigkeitsfeldern eine Auflösung von 5 m erreicht werden.



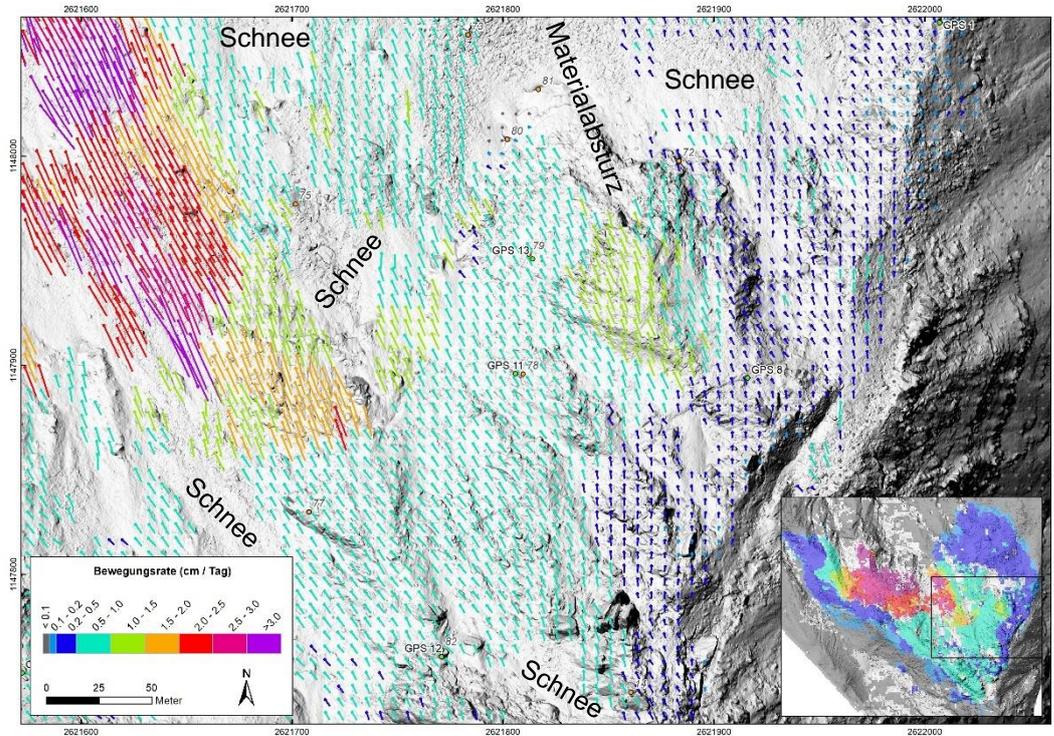
Horizontale (2D) Bewegungen Spitze Stei 20.07.2021 - 01.10.2021



Horizontale (2D) Bewegungen Spitze Stei 20.07.2021 - 01.10.2021



Horizontale (2D) Bewegungen Spitze Stei 20.07.2021 - 01.10.2021



Horizontale (2D) Bewegungen Spitze Stei 20.07.2021 - 01.10.2021

