
Bericht Nr. 1418139.2

Einwohnergemeinde Kandersteg, Kandersteg

**Kandersteg, "Spitze Stei"
Gefahrenmanagement**

Ergebnisse und Auswertungen 2019

Zollikofen, 12. Dezember 2019

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
Rachel Riner	Gesamter Bericht
Kaspar Graf	Geologie
Reto Hänni	Geologie und 3D-Modell
Alexandre Loyer	Stabilitätsanalysen
Christian Kienholz	Bildauswertungen
Martin Scherler	Permafrost
Supervision	Visierte Inhalte
Daniel Tobler	Gesamter Bericht
Hinweise	

GEOTEST AG



Daniel Tobler



Rachel Riner

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
2.	Vorgehen und ausgeführte Untersuchungen	5
2.1	Vorgehen.....	5
2.2	Ausgeführte Untersuchungen	6
3.	Geologisch-geomorphologische Situation	7
4.	Untersuchungsergebnisse/Auswertung	8
4.1	Geländebefunde.....	8
4.2	Terrestrische Messungen	13
4.2.1	Tachymeter und GPS-Messungen.....	13
4.2.2	Verschiebungsvektoren / Bewegungspfade	18
4.2.3	Bildauswertungen hochauflösende Kamera	19
4.2.4	Geophysikalische Messungen	21
4.2.5	Radarmessungen.....	24
4.2.6	Auswertungen Satellitendaten	25
4.2.7	Permafrostmessungen Station Doldenstock.....	26
4.3	3D-Modell.....	28
4.4	Stabilitätsanalyse	32
5.	Beurteilung	35
5.1	Morphologische und geologische Disposition.....	35
5.2	Kausalität	36
5.3	Kinematik	37
5.4	Zu erwartende Entwicklung.....	40
6.	Szenarien	42
6.1	Primärprozesse	42
6.2	Sekundärprozesse	43
7.	Unsicherheiten	43
8.	Gefahrenmanagement	45
8.1	Wirkungsbereiche Primär- und Sekundärprozesse	45
8.2	Überwachungskonzept	45
9.	Weitere Schritte.....	47
10.	Schlussbemerkungen.....	48
11.	Literaturverzeichnis	49

Anhang:

- Karte der Phänomene (1:5'000)	1
- Übersichtskarte mit Standorten ausgeführter Messungen (Messpunkte, GPS, Profile Geophysik, Profilsuren QP)	2
- Fotodokumentation der Feldbegehungen	3
- Messkonzept GPS- und Tachymetermessungen (1:10'000)	4
- Deformationen und Geschwindigkeiten GPS- und Tachymetermessungen	5
- Bildauswertungen hochauflösende Kamera	6
- Resultate und Auswertungen Stabilitätsanalyse	7

1. Einleitung

Das Gebiet um den „Spitze Stei“ oberhalb des Oeschinensees wird seit Mitte 2018 überwacht. Im Winter 2018/19 erfolgte eine umfassende Gefahrenbeurteilung, worauf basierend Sicherheitszonen ausgeschieden und ein Monitoringkonzept für die Primärprozesse erarbeitet wurde (vgl. Bericht Nr. 1418139.1). Ab dem Frühling 2019 wurden das Gefahrenmanagement sowie das Basismonitoring (automatisierte Tachymetermessungen, GPS-Messungen, Kameraüberwachung) operativ. Zusätzlich wurden weitere Daten mittels Geländebegehungen, Drohnenbefliegungen, geophysikalischen Messungen (Uni Freiburg) und Radarmessungen sowie Auswertung von Satellitendaten (Gamma Remote Sensing) erhoben.

Mit dem Ziel die Abbruchszenarien und –mechanismen zu präzisieren sowie weitführende Schritte im Gefahrenmanagement zu definieren, wurden sämtliche erhobene Daten ausgewertet, in einem 3D-Modell zusammengeführt und das geologische Modell präzisiert sowie Stabilitätsanalysen ausgeführt.

Der vorliegende Bericht baut auf dem Bericht Nr. 1418139.1 auf und umfasst das aufgrund der Datenerhebungen 2019 präzierte geologische Modell und die daraus abgeleiteten Abbruchszenarien. Weiter werden offene Fragen sowie das weiterführende Gefahrenmanagement diskutiert.

2. Vorgehen und ausgeführte Untersuchungen

2.1 Vorgehen

Die Szenariendefinition sowie das Gefahrenmanagement stützen auf den Felderhebungen-/Messungen (u.a. Geophysik, Radarmessungen) sowie den Datenauswertungen, dem 3D-Modell und den Stabilitätsanalysen ab.

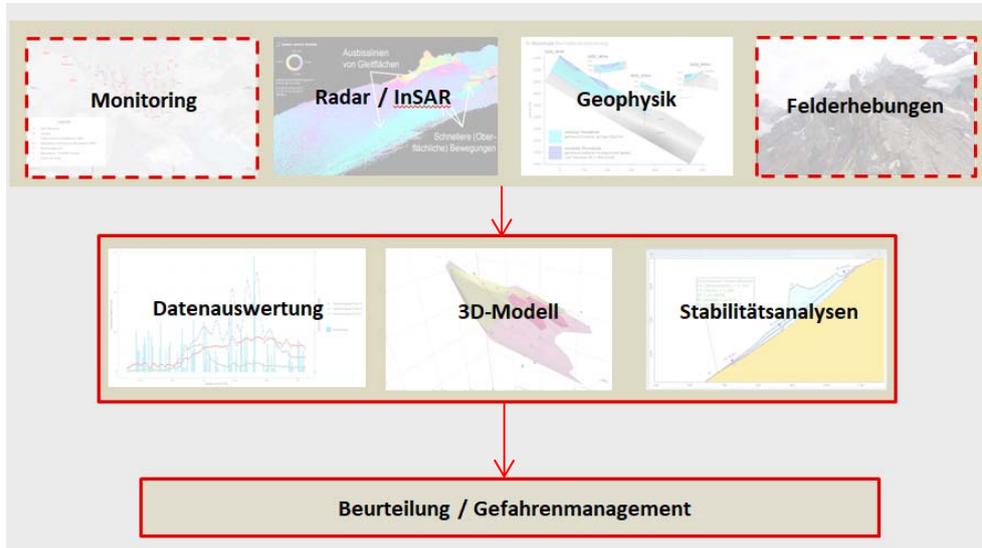


Abbildung 1: Vorgehenskonzept zur Beurteilung der Situation sowie für das Gefahrenmanagement (rot umrandet: Arbeiten, welche durch GEOTEST ausgeführt wurden; rot gestrichelt: Arbeiten, welche in Zusammenarbeit mit Drittfirmen ausgeführt wurden).

2.2 Ausgeführte Untersuchungen

GEOTEST AG

- Implementierung Basismonitoring
- Geländeaufnahmen (03.07.2019, 06.08.2019 und 23.10.2019)
- Laufende Auswertung und Lagebeurteilung
- Wöchentliche Berichterstattung (Mitte Mai – Mitte September), ab Mitte September 2-wöchentlich
- Drohnenflug inkl. Erstellung 3D-Geländemodell
- Auswertung sämtlich erhobener Daten
- Präzisierung geologisches Modell
- Sensitivitätsanalyse und Stabilitätsberechnungen
- Bildauswertung hochauflösende Kamera
- Präzisierung Abbruchszenarien und zu erwartende Entwicklung
- Berichterstattung
- Diverse Sitzungen mit Gemeinde, Abteilung Naturgefahren sowie weiteren Projektbeteiligten

Dritte

Folgende Drittinstitutionen waren an den Datenerhebungen und Auswertungen involviert (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammenstellung der Leistungen durch Dritte

Institution	Untersuchung	Dokumentation
KAWA, Abt. Naturgefahren	<ul style="list-style-type: none">• Datenauswertungen• Geländebegehungen• Aufnahme Oberflächentemperaturen	[14][15][17]
Wyss&Früh AG	<ul style="list-style-type: none">• Tachymetrische Messungen	[30][31]
GAMMA Remote Sensing	<ul style="list-style-type: none">• Radarmessungen• Auswertung InSAR-Daten	[5][6]
Universität Fribourg	<ul style="list-style-type: none">• Geophysikalische Untersuchungen (Geoelektrik)• Laserscan (Daten liegen noch nicht vor)	[11]
SED	<ul style="list-style-type: none">• Seismische Untersuchungen	[28]

3. Geologisch-geomorphologische Situation

Das Gebiet am „Spitze Stei“ bildet eine prominente, nach Norden zum Öschinensee abfallende Pyramide aus Fels und Lockermaterial. Morphologisch ist die keilförmige Felsbastion zwischen der Zunge des Doldenhorngletschers im Osten und der Gleitfläche des postglazialen Bergsturzes Üssere Fisistock - Kleindoldenhorn im Westen eingebettet. Die Fläche des fraglichen Gebietes umfasst rund 0.6 km² von ca. 2'900 m ü. M. im Süden bis ca. 2'100 m ü. M. zum Steilabbruch im Norden.

Das Untersuchungsgebiet gehört tektonisch zur Doldenhorn-Decke. Die in Bewegung befindliche Felsmasse beim „Spitze Stei“ besteht aus Öhrli-Kalk, der stratigraphisch normal auf Zementsteinschichten liegt. Die Schichten fallen rund 30° gegen NW ein. An der Basis des Öhrli-Kalkes befinden sich geringmächtige Einschaltungen von Öhrli-Mergel. Diese bilden die basale Gleitfläche beim Fisistock-Bergsturz und vermutlich auch beim „Spitze Stei“. Unmittelbar südlich des „Spitze Steis“ biegen die Schichten in einer liegenden Synklinale um. Das Faltenscharnier ist anhand der Zementsteinschichten sehr gut erkennbar (vgl. Abbildung 2). Das Gebiet südlich davon bis zum Gipfel des Doldenhorns besteht aus Quinten-Kalk.

Das gesamte Gebiet wird von NW-SE streichenden, konjugierten Brüchen durchschlagen.

Der Öhrli-Kalk zeigt starke Anzeichen von in-situ Verwitterung (Frostsprengung). Beim Lockergestein der Rutschmasse handelt es sich primär um in-situ verwitterten Öhrli-Kalk und nur untergeordnet um Sturzablagerungen bzw. Gehängeschutt.

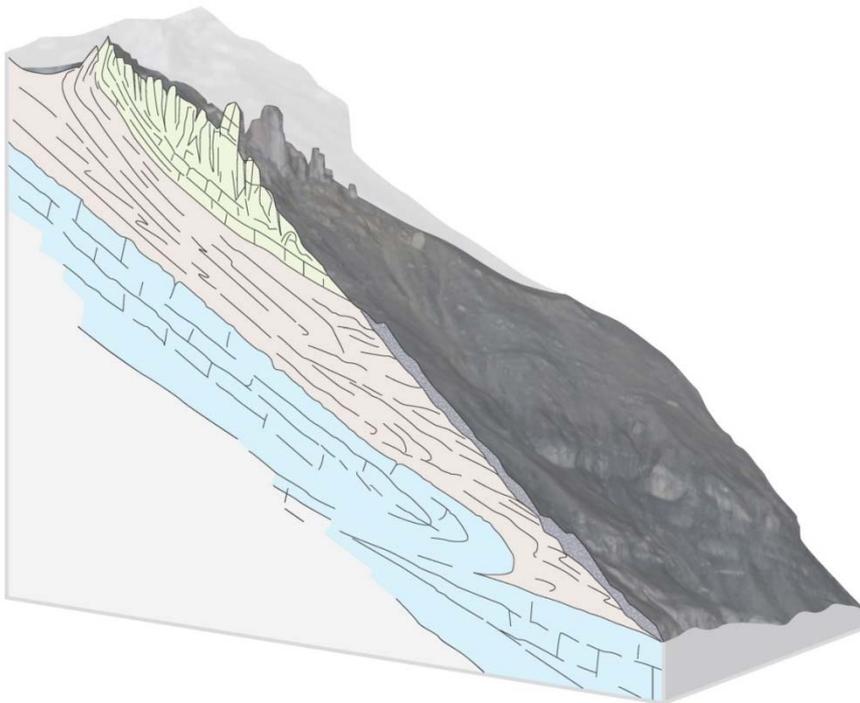


Abbildung 2: Blockdiagramm mit schematischer Darstellung des Schichtverlaufs beim „Spitze Stei“ (Gelb: Öhrlikalke; Rosa: Zementsteinschichten; Blau: Quinten-Fm.).

4. Untersuchungsergebnisse/Auswertung

4.1 Geländebefunde

Gipfelbereich

Im Gipfelbereich sind die stark zerklüfteten und lokal zerscherten Kalke der Öhrli-Fm. aufgeschlossen; entlang des Westgrates sind sie anstehend, jedoch von Schutt bedeckt. Das Schichteinfallen des intensiv zerbrochenen Gebirges beträgt rund 30° nach NW. Weit geöffnete, steilstehende Kluftsysteme durchschlagen den

Fels vermutlich bis in die Zementsteinschichten im Liegenden hinunter. Die dadurch gebildeten, freistehenden Felstürme von bis zu 200'000 m³ Volumen sind teilweise verkippt und zeigen frische, häufig durchschlagende Risse und Brüche (vgl. Abbildung 3). Bergseits des „Spitze Steis“ ist die äusserst unruhige Morphologie durch Nackentälchen, Schollen und Mulden charakterisiert. An den Abrisskanten der einzelnen Schollen kommt ein eisreicher Schuttkörper sowie stark verwitterter Fels mit eisgefüllten Klüften zum Vorschein (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 3: Zerrütteter Gipfelbereich. Ansicht vom Staubbach aus.



Abbildung 4: Aufgeschlossener Permafrostkörper. Links im Bild: Lockergestein in einer Eismatrix; Rechts im Bild: verwitterter Fels mit eisgefüllten Klüften.

Westgrat und Westflanke

Entlang des Westgrates bis auf eine Höhe von ca. 2'600 m ü. M. ist stark verwitterter und durch die Rutschbewegungen zerrütteter Öhrlikalk aufgeschlossen. Anlässlich der Begehung vom 23. Oktober liessen sich neue, bis mehrere Dekameter Tiefe und mehrere Meter breite Zerrspalten verfolgen. Der westliche Fuss des „Spitze Steis“ ist seit einem Sturz-/Rutschereignis im September 2019 z.T. freigelegt. Analoge Strukturen sind auch im Kleinen an verschiedenen Stellen sichtbar.

Die unterhalb des Grates anschliessende, bis über 40° steile Westflanke stellt einen relativ mächtigen (ca. 15m) aufgelockerten und schuttbedeckten Felskörper dar. Der blockige und sehr locker gelagerte Verwitterungsschutt weist an der Oberfläche grosse Hohlräume auf. Am Übergang zum Grat haben sich durch die aktiven Bewegungen aktuell mehrere Meter mächtige, übersteilte Abrisskanten gebildet. Die Morphologie der aktiven Westflanke ist durch Nackentälchen, Schollen sowie aktive, regressiv ausgebildete Abrisskanten geprägt (vgl. Abbildung 5). Unterhalb von Kote ca. 2'500 m ü. M. verläuft der Grat in Form einer alten Seitenmoräne, welche kaum mehr Anzeichen auf aktive Bewegungen aufweist.



Abbildung 5: Rechts im Bild: Primäre und sekundäre Abrisskanten in der Schuttbedeckten Westflanke (rot gestrichelte Linien); Links: Blockgletscher (blau gestrichelte Linie). (Bildquelle: map.geo.admin.ch, Stand: 2018).

Ostgrat und Ostflanke

Entlang des Ostgrats bis auf Kote 2'600 m ü. M. ist wiederum Öhrlikalk abgeschlossen. Das Gebirge zeigt zwar noch die ursprüngliche nordvergente Schichtung, ist aber durch die tiefgründige Schubbewegung ebenfalls stark zerrüttet und weist gratparallele Nackentäler auf. Unterhalb von Kote 2'600 m ü. M. wird das Terrain abrupt flacher und ist mit Gehängeschutt unbekannter Mächtigkeit bedeckt. Es sind kaum Anzeichen aktiver Rutschbewegungen vorhanden.

In einer distalen Geländevertiefung westlich des Grates hat sich ein rund neun Hektar grosser Blockgletscher mit charakteristischen, lobenförmigen Fließstrukturen und Zerrspalten gebildet.

Nordflanke (Zentrum)

In der Flanke nördlich der Gipfelzone (ca. 2'500 m ü. M.) bestehen markante Abriss- und Erosionskanten. Der hier anstehende Mergel- und Tonschiefer der Zementsteinformation liegt unter einer flachgründigen Lockermaterialbedeckung. Die Morphologie wird durch steile, aktive Steinschlagrunsen geprägt. Talseitig sowie zum Doldenhorngletscher hin sind die senkrecht abfallenden Felswände aus Quinten-Kalk aufgeschlossen.

Entwicklung der Felsinstabilität im Sommer 2019

Im Verlauf des Sommers 2019 haben die Rutschphänomene zugenommen. Die Hinweise auf die Existenz von Permafrost konnten aufgrund der beobachteten Phänomene erhärtet werden. Insbesondere im Gipfelbereich, entlang des Westgrates sowie innerhalb der Westflanke sind die Rutschphänomene verstärkt. Im Übergang des Gipfels zum Westgrat (Höhe Pt. 13) zeigten sich ab September Lockergesteins- und Felsrutsche und in Richtung Staubbach frische, oberflächliche Schuttablösungen.

Trotz der für Rutschungen langanhaltenden ausserordentlich hohen Bewegungsraten mit mehreren Beschleunigungsphasen durch Niederschlagsereignisse kam es nicht zu nennenswerten Sturz- oder Rutschereignissen. Kleinere Ereignisse wurden aufgrund von Staubwolken sowie akustischen Signalen registriert. Die Bildanalysen (vgl. auch Kapitel 4.2.3) zeigen aktive Bewegungen unterhalb des „Spitze Steis“ und damit eine stetige Verlagerung des Geschiebes in die Vorfluter.

Am 13.11.2019 wurde lokal eine massive Beschleunigung in Zentrumsbereich bei Pt. 75 und 73 gemessen. Am darauffolgenden Tag wurde eine nach oben scharf begrenzte Anrisskante beobachtet. Die Kubatur des mobilisierten Fels- und Lockermaterials wird auf 0.7 bis 1.4 Mio. Kubikmeter geschätzt. Die Bewegungen klangen nach dem spontanen Abbruch sehr rasch auf die durchschnittlichen Werte ab. Der Auslöser für dieses Phänomen ist nicht geklärt. Es ist durchaus möglich, dass die bruchhafte Deformation bis in den Fels hinein verlief. Ein Zusammenhang zwischen dem Gefrieren der Wasserfließwege und damit kurzfristig entstandenen Porenwasserüberdrücke kann nicht ausgeschlossen werden.

Hydro(geo)logische Phänomene

Während der Boden Anfangs Juli noch trocken erschien, zeigten sich bereits im August viele Nassstellen. Im Übergang vom Schutt zu den Steilwänden waren ab Juni Quellaustritte sichtbar. Dies insbesondere bis zum Ende der Schneeschmelze sowie nach besonders warmen Tagen. Bis Ende Mai war die Schneedecke zusammenhängend. Anfangs Juli 2019 waren noch einzelne Schneeflecken vorhanden. Oberhalb der Ausbruchsnische des Oeschisee-Bergsturzes wurde kein Oberflächenabfluss festgestellt. Niederschlag und Schmelzwasser infiltrieren direkt in den Schutt- und Felskörper.

4.2 Terrestrische Messungen

4.2.1 Tachymeter und GPS-Messungen

Die Tachymeter- und GPS-Messungen werden durch die Firmen Wyss & Früh AG, sowie Geosat betrieben. Das Messsystem wurde seit 2018 weiter ausgebaut (vgl. Abbildung 6). Die Datenübertragung erfolgt automatisch auf das Datenportal der Geopraevent AG. Mit den Messungen werden die Oberflächenbewegungen punktuell erfasst. Die tägliche Datenauswertung und Lagebeurteilung erfolgt seit dem 17.04.2019 durch die GEOTEST AG; vorher wurden die Auswertungen durch die Abteilung Naturgefahren durchgeführt. Eine detaillierte Analyse der Entwicklung der Bewegungsraten sowie der Einflussfaktoren wurde durch die Abteilung Naturgefahren gemacht und ist im Bericht [16] beschrieben.

Tabelle 2: Historie vorhandener Messsysteme.

Messsystem	Zeitperiode
<ul style="list-style-type: none">Händische Tachymetermessungen	Mitte August 2018 – 17.04.2019
<ul style="list-style-type: none">Automatisierte GPS-Messungen (GPS1 – GPS4)	13.12.2018 - heute
<ul style="list-style-type: none">Automatisierte Tachymetermessungen	17.04.2019 - heute
<ul style="list-style-type: none">Ausbau automatisiertes GPS-Messungen (GPS1 – GPS7)	16.07.2019 - heute

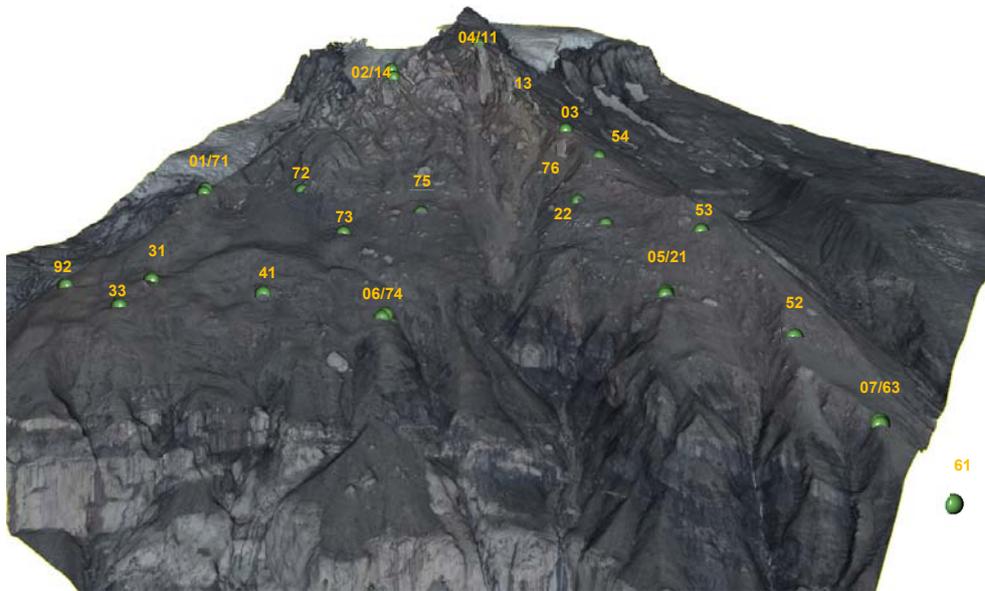


Abbildung 6: Übersicht der Messpunkte am „Spitze Stei“.

Die Messungen zeigen im August 2018 Geschwindigkeiten von rund 1 cm/Tag im Gipfelbereich sowie in der Westflanke oben. Gemäss [16] gingen die Bewegungsraten Anfangs Herbst 2018 sehr rasch zurück, blieben über den Winter 2018/19 auf tiefem Niveau und erreichen ihren Tiefpunkt im April 2019. Der Gipfel weist zu diesem Zeitpunkt Bewegungen von ca. 0.25 cm/Tag auf. In den restlichen Bereichen betragen die Geschwindigkeiten < 0.2 cm/Tag.

Ab Anfang Juni erfahren sämtliche Bereiche mit dem Einsetzen der Schneeschmelze eine Beschleunigung. Flachgründige Lockermaterialbereiche beschleunigen stärker als die Felsbereiche [16]. Im Verlauf des Sommers konnten drei verschiedene Bewegungsdomänen / -bereiche unterschieden werden: Gipfel-/ Felsbereich, Westflanke, Blockgletscher. Für die Auswertungen wurden jeweils repräsentative Punkte der Zonen ausgewählt (Gipfel-/Felsbereich: Pt. 11 / Westflanke: Pt. 53 / Blockgletscher: Pt. 41). Totalverschiebungen und Geschwindigkeiten der einzelnen Messpunkte sind im Anhang 5 dargestellt.

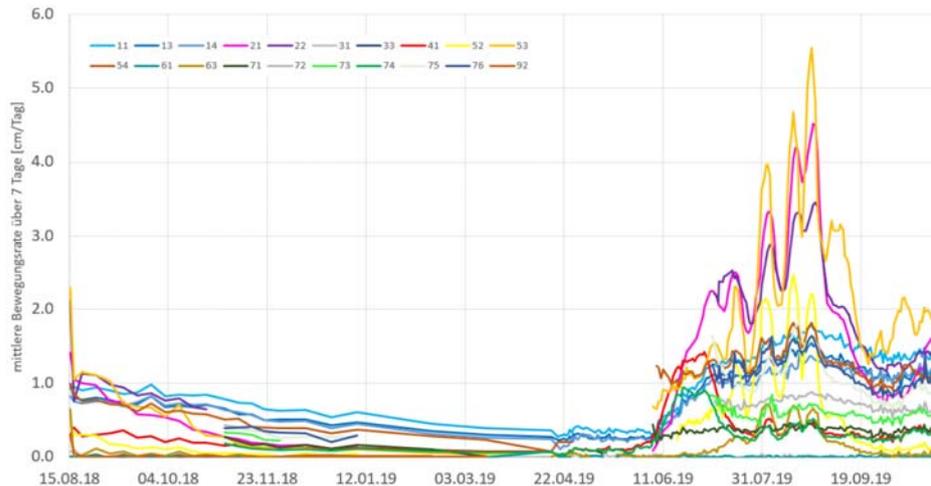


Abbildung 7: Verlauf der Bewegungsraten ab August 2019. Bildquelle: KAWA, Abt. Naturgefahren [16].

Fels-/Gipfelbereich

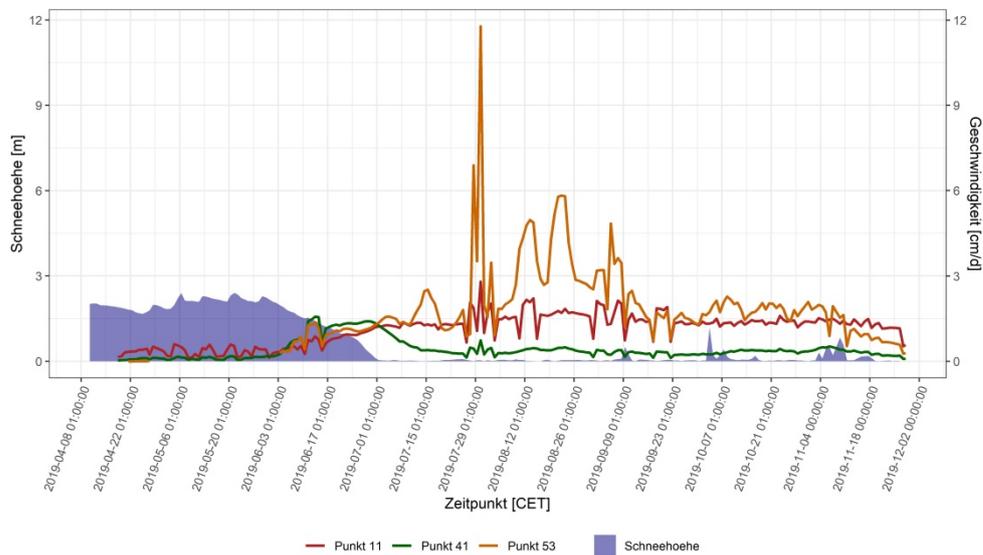
Im Gipfelbereich (Pt. 11, 13, 14) steigen die über sieben Tage gemittelte Geschwindigkeiten bis Anfangs Juli 2019 auf rund 1.3 cm/Tag und erreichen ihr Maximum gegen Ende August mit rund 3.2 cm/Tag. Auf Niederschlagsereignisse sowie Temperaturschwankungen reagiert der Felsbereich nur schwach. Nach einer leichten Abnahme der Bewegungsraten im September 2019 steigen die Raten wieder an und zeigen bisher keinen markanten Rückgang. Die jährlichen Durchschnittsgeschwindigkeiten (April – November 2019) liegen bei rund 1 cm/Tag. Die Totalverschiebung seit April 2019 beträgt rund 1.9 bis 2.4 m (Pt. 14 resp. Pt. 11)

Die Messpunkte am Fussbereich der Gipfelzone (Pt. 71, 72, 73, 75, 76) zeigen im August maximale Geschwindigkeiten von 0.8 bis 3.6 cm/Tag (Pt. 71 resp. Pt. 75). Die jährlichen Durchschnittsgeschwindigkeiten liegen bei 0.3 bis 1.1 cm/Tag. Der spontane Sprödbbruch am 13.11.2019 mit Verschiebungen von 10 cm (Pt. 75) resp. 2 cm (Pt. 73) innerhalb von 4.5 h war im Beobachtungszeitraum ein einmaliges Ereignis. Die Totalverschiebung seit April 2019 beträgt 0.6 bis maximal 1.6 m (Pt. 71 resp. Pt. 75).

Westflanke

Die Geschwindigkeiten in der Westflanke (Pt. 21, 22, 52, 53, 54, 63) beschleunigen mit der Schneeschmelze mit Ausnahme von Pt. 63 auf ein für Rutschkörper ausserordentliches Geschwindigkeitsniveau von rund 2 cm/Tag und reagieren bis En-

de August 2019 jeweils schnell und ausgeprägt auf Niederschlagsereignisse sowie Temperaturschwankungen. Die maximal erreichte Geschwindigkeit in der Westflanke liegt bei 11.8 cm/Tag (Pt. 53). Im September 2019 sinken die Geschwindigkeiten auf rund 1 cm/Tag und nehmen danach infolge Niederschlag wieder zu (ca. 1.5 – 2 cm/Tag). Die Totalverschiebung beträgt seit April 2019 im aktiven Teil der Westflanke 1.6 bis 3.4 m (Pt. 76 resp. 53). Die Messpunkte entlang der Anrisskante (insbesondere Pt. 53) reagieren meist als erstes auf Niederschläge [16].



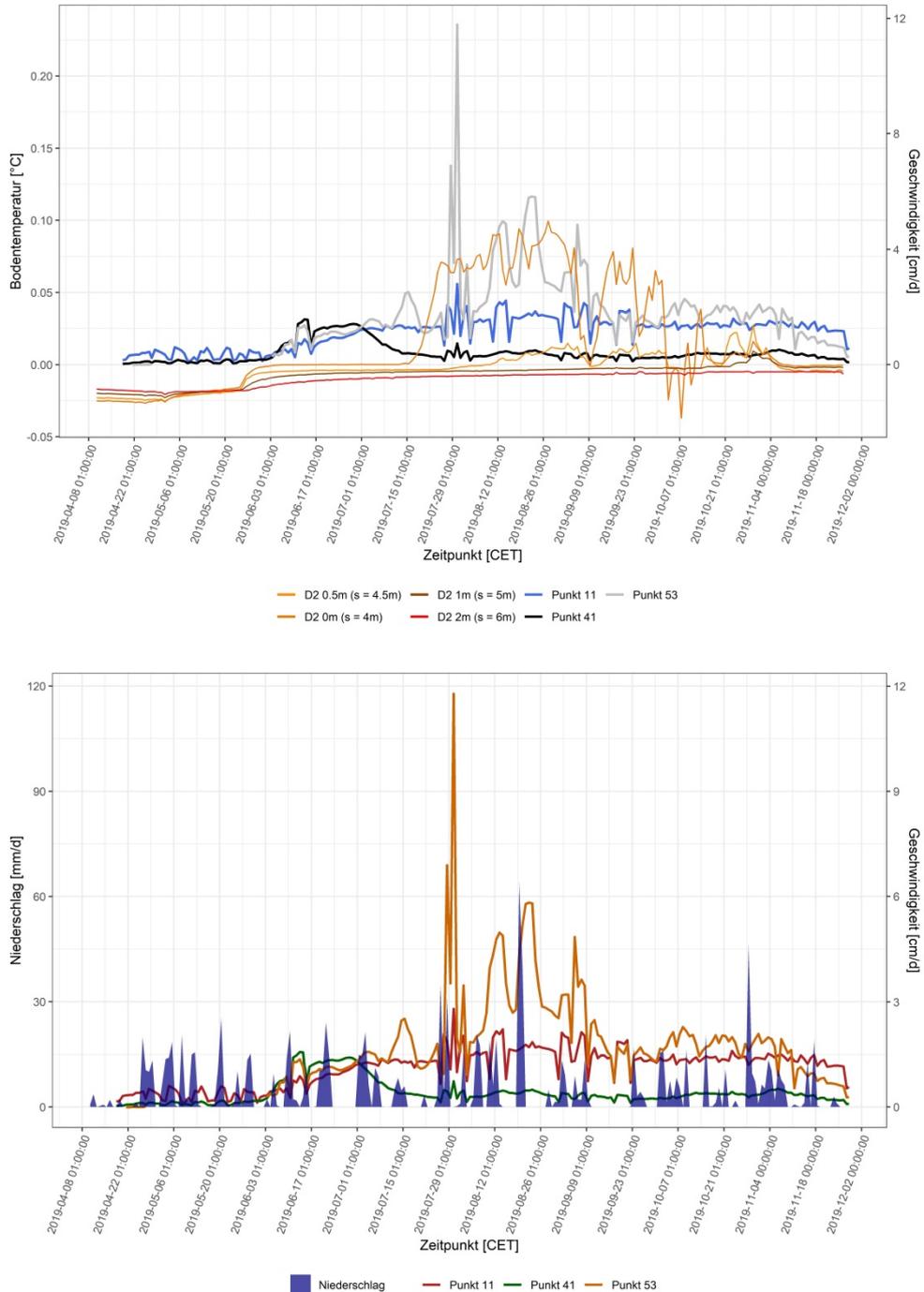


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Einflussfaktoren Schneehöhe, Bodentemperatur, des Niederschlag (gemessen bei der Permafroststation Doldenstock auf 2'560 m ü. M.) und der Geschwindigkeitsentwicklung während der Beobachtungsperiode April – November 2019.

Blockgletscher

Der Blockgletscher (Pt. 41, 74) reagiert zuerst auf die Schneeschmelze und erreicht seine maximale Geschwindigkeit Ende Juni (ca. 1.6 cm/Tag). Mit Abschluss der Schneeschmelze sinken die Geschwindigkeiten jedoch kontinuierlich auf rund 0.4 cm/Tag und bleiben danach relativ konstant. Die Totalverschiebung beträgt hier rund 0.7 bis 0.9 m (Pt. 74 resp. 41)

4.2.2 Verschiebungsvektoren / Bewegungspfade

Basierend auf den händischen Tachymetermessungen, welche die Wyss & Früh AG vom 13.08.2018 – 15.04.2019 vornahm sowie einer Nachmessung am 30.09.2019, können die horizontalen Verschiebungsvektoren sowie die berechneten Gleitwinkel zwischen der Nullmessung der Nachmessung berechnet werden. Weiter wurden durch die GEOTEST AG basierend auf den GPS-Messungen die Bewegungspfade der GPS-Stationen erstellt.

Die Verschiebungsvektoren sowie die Bewegungspfade zeigen, dass sich die instabilen Gebirgsteile 2018/19 generell Richtung NW bis NNW bewegen. Eine Ausnahme bildet der Gipfelbereich, dessen Bewegung klar gegen Norden gerichtet ist. Die Vertikalkomponente im Gipfelbereich sowie beim Pt. 52 sind beachtlich. So haben die Vektoren im Gipfelbereich (Pt. 13 und 14) sowie beim Pt. 53 in der Westflanke Neigungen von 56° resp. 42° (restliche Messpunkte: 22 – 36°) [30].

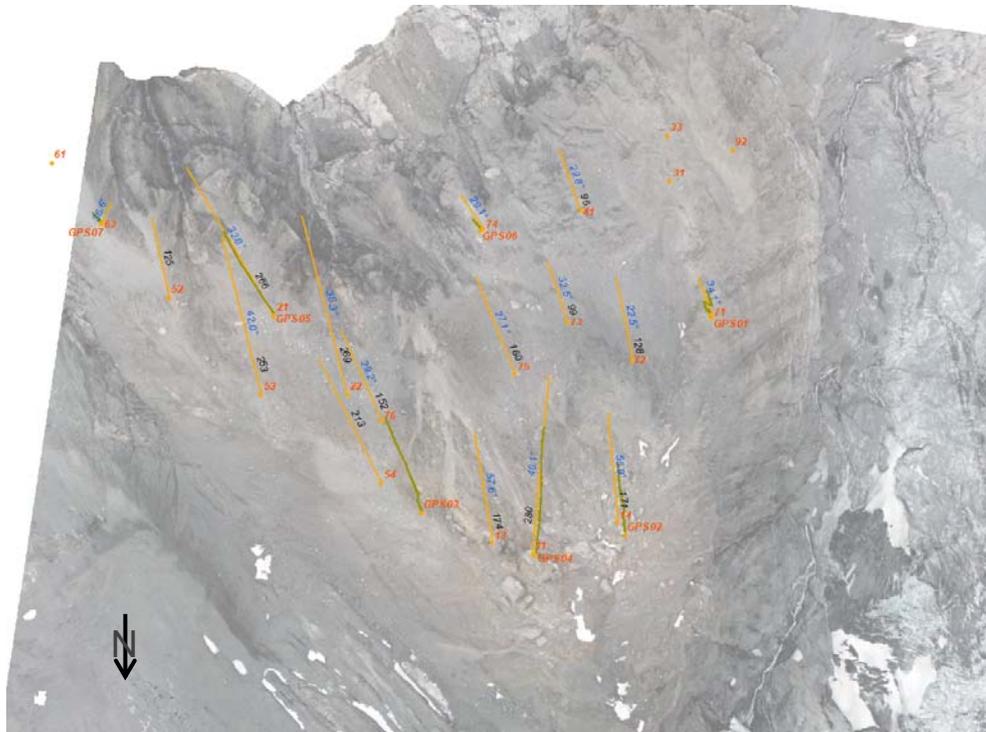


Abbildung 9: Darstellung (nicht massstäblich) der Bewegungsvektoren (gelb) inkl. Angaben zu Verschiebungsbeträge und Gleitwinkel sowie der Bewegungspfade GPS-Stationen (grün). Bildquelle: Orthofoto GEOTEST AG, 2019.

4.2.3 Bildauswertungen hochauflösende Kamera

Im Mai 2019 installierte die Geopraevent AG eine hochauflösende „DefoxTime-lapse“ Kamera auf dem Hochplateau östlich der Doldenhornhütte. Von diesem Standort deckt die Kamera den „Spitze Stei“ und die darunterliegende instabile Flanke ab (vgl. Abbildung 10). Die Kamera war über den Zeitraum Mai – November 2019 in Betrieb. Das abgedeckte Gebiet war von Mitte Juli bis Ende Oktober mehrheitlich schneefrei, was Voraussetzung für gute Bildvergleiche ist. Ziel der Bildauswertung war das Monitoring der Rutschbewegungen mit einem redundanten (unabhängigen) System und die Detektion allfälliger Sturzereignisse. Zu Testzwecken wurde neben der visuellen Bildauswertung auch eine automatisierte Deformationsanalyse durchgeführt (Abbildung 11, Anhang 6). In dem als Feature Tracking bezeichneten automatisierten Verfahren werden zunächst Objekte (z.B. Felsblöcke) eines Referenzfotos mathematisch beschrieben. Diese Beschreibung erlaubt die Objektdetektion in weiteren Fotos und damit die Berechnung der Objektverschiebung.



Abbildung 10: Blickfeld der hochauflösenden Kamera in Richtung „Spitze Stei“
Bildquelle: Geopraevent AG, 2019.

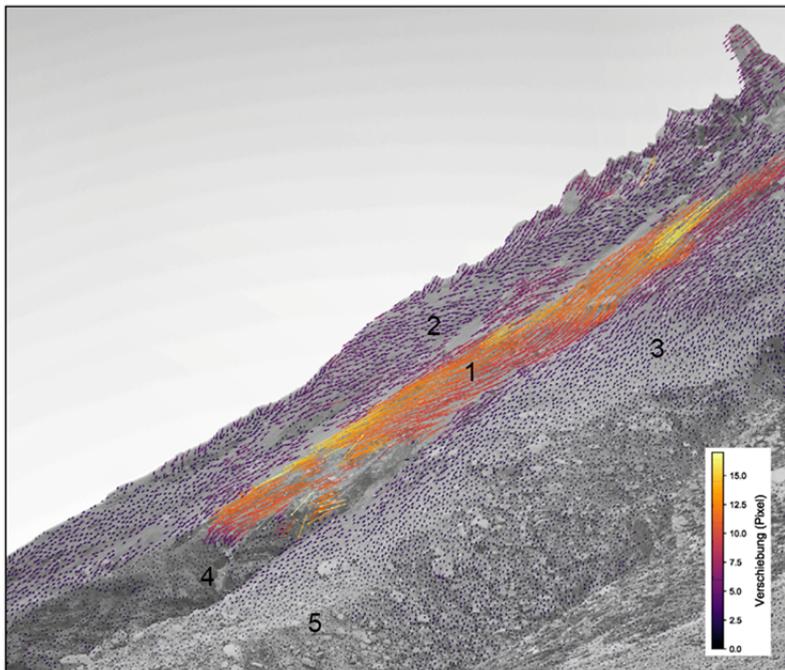


Abbildung 11: Automatisch detektierte Verschiebungen unterhalb des „Spitze Stei“, Zeitraum 02.08.2019 – 27.10.2019. Die abgebildeten Vektoren sind um Faktor 10 verlängert. Ersichtlich ist die schnell fließende oberflächliche Rutschung (1), umgeben von langsamer bewegendem Schutt (2 und 3). Der anstehende Fels am Fusse der Rutschung ist weitgehend stabil (4). Generell ist hangabwärts eine Verlangsamung der Bewegungen feststellbar (5). Schuttverlagerungen durch Sturzprozesse werden mit diesem Verfahren herausgefiltert und sind somit nicht dargestellt.

Die Bildauswertung ergab die folgenden Resultate:

- Es besteht eine schnelle, oberflächliche Rutschung unterhalb des „Spitze Stei“ im Bereich der schuttgefüllten Runse (Verschiebungen bis zu 18 Pixel über drei Monate). Am Fuss der Rutschung stürzt der Schutt sporadisch über den anstehenden Fels, der sich aktuell nicht oder nur minimal bewegt (vgl. Abbildung 11). Die Rutschung beschleunigte ab Mitte Juli, erreichte Höchstgeschwindigkeiten Mitte August und verlangsamte sich im September wieder deutlich.
- Der „Spitze Stei“ selber scheint insbesondere im oberen Kompartiment eine Rotation (um die Vertikalachse) talwärts nach Norden zu erfahren.
- Ausserhalb der Schuttrunse sind die Bewegungen noch klar messbar, aber weniger ausgeprägt als innerhalb (5 – 10 Pixel über 3 Monate). Am Hangfuss nehmen die Bewegungen generell ab. Das Feature Tracking zeigt auch auf, dass die ehemalige Seitenmoräne des Doldenhorngletschers versackt ist (vgl. Anhang 6).

Materialausbrüche fanden in mehreren Gebieten statt, u.a. direkt beim „Spitze Stei“ (vgl. Anhang 6). Alle grösseren Materialumlagerungen geschahen zwischen dem 11. und 14. August. In diesem Zeitraum wurden in der oberflächlichen Rutschung auch die höchsten Geschwindigkeiten gemessen.

4.2.4 Geophysikalische Messungen

Die geophysikalischen Messungen wurden zwischen dem 12. und 16. Juli 2019 durch die Uni Fribourg ausgeführt. Sie hatten zum Ziel Strukturen im Untergrund beim „Spitze Stei“ zu erkennen sowie das Vorhandensein und mögliche Einflüsse des Permafrosts für die Bewegungen zu analysieren [11].

Der Bericht dazu ist in der Beilage einzusehen. Die Untersuchungen ergaben gemäss [11][10] zusammengefasst folgende Resultate:

- Lithologische Übergänge: Im Gipfelbereich liegt der Übergang zwischen den Kalken und den Mergel in mindestens 80 m Tiefe; im weiteren Verlauf des Westgrates steigt diese Schichtgrenze an und wird zwischen Pt. 52 und 63 in rund 50 m Tiefe erkannt.
- Im Bereich der Felspfeiler um den „Spitze Stei“ besteht mit hoher Wahrscheinlichkeit Permafrost und es ist deshalb mit eisgefüllten Klüften zu rechnen.

- Im unteren Teil des Ostgrates sind die Tonschiefer direkt an der Oberfläche anstehend; hier bestehen keine Indikationen auf tiefgründigen, eishaltigen Permafrost mit Ausnahme des Endes des Querprofils, welches sich auf dem kleinen Blockgletscher befindet. Wichtig: Mit der angewandten Methodik würde kalter Fels mit Temperaturen $< 0^{\circ}\text{C}$ ohne relevante Wasser- resp. Eisanteile nicht erkannt.
- Minimale und maximale Permafrostverbreitung entlang des Westgrates sind in Abbildung 12 dargestellt.

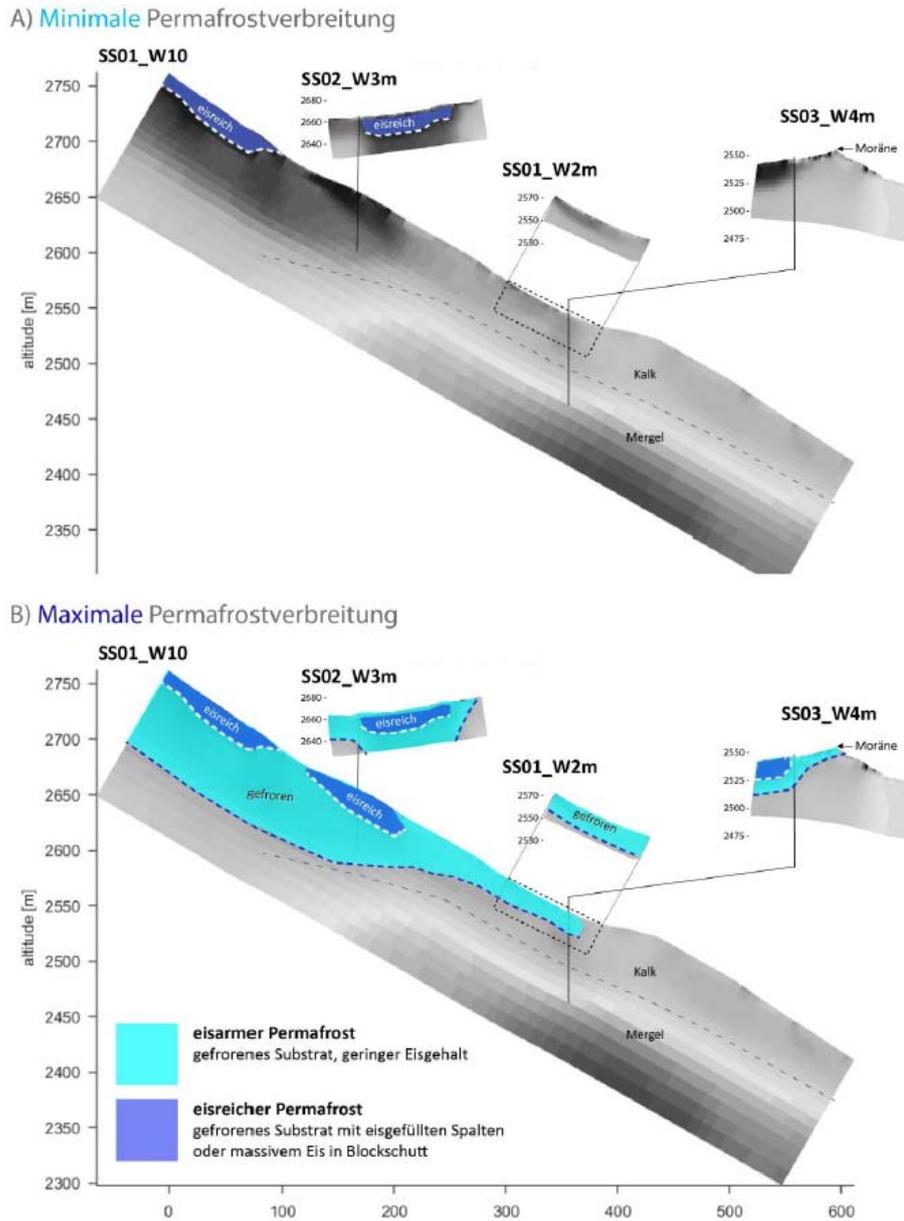
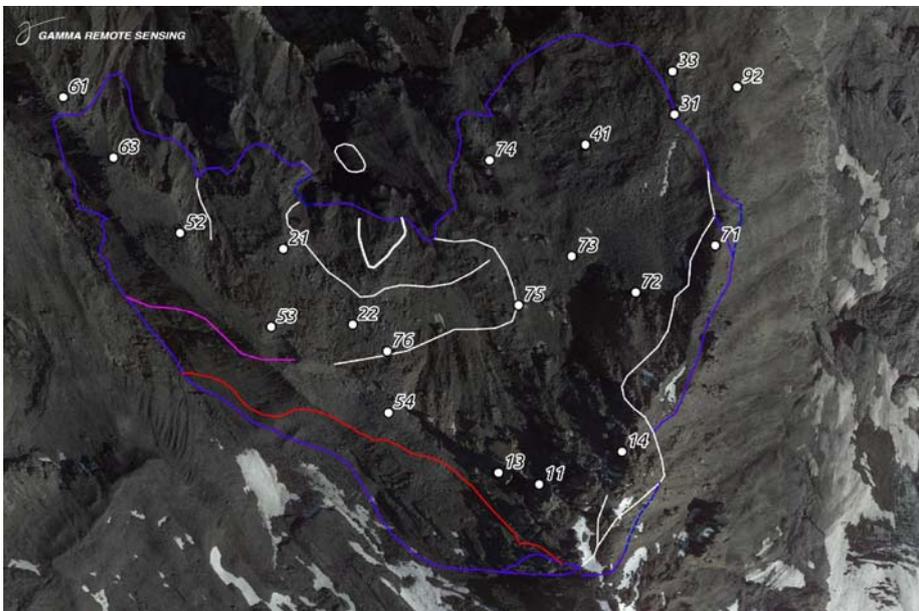


Abbildung 12: Schematische Darstellung der minimalen und maximalen Permafrostverbreitung entlang des Westgrates gem. Interpretation der ERT Daten (Bildquelle: Hilbich und Hauck, Uni Fribourg [10]).

4.2.5 Radarmessungen

Die Messungen wurden zwischen dem 5. – 9. August 2019 mit dem GAMMA Portable Radar Interferometer (GPRI) durch die Firma Gamma Remote Sensing durchgeführt und ausgewertet. Die Radarinterferometrie hat zum Ziel, mögliche Rutschkompartimente voneinander zu unterscheiden und Erkenntnisse über die Lage der Gleitflächen zu gewinnen. Die Dokumentation ist in [5] zu finden. Die Messungen zeigen folgende Resultate:

- Die maximale Ausdehnung der Instabilität kann sehr gut definiert werden.
- Es gibt Kompartimente mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (z.B. frontale Rutschscholle mit maximalen Geschwindigkeiten¹ von 16 cm/Tag).
- Vom Standort mit Sicht in die Westflanke kann die basale Gleitebene mit Geschwindigkeiten² von ca. 1.5 mm/Tag detektiert werden. Darüber liegen mindestens zwei weitere Gleitebenen mit Geschwindigkeiten von ca. 12 mm/Tag.



¹ Gemessen im Zeitraum vom 5. – 6. August 2019.

² Gemessen im Zeitraum vom 6. – 8. August 2019.



Abbildung 13: Oben: Blaue Linie illustriert die maximale Ausdehnung der Instabilität. Unten: Sicht in die Westflanke mit der Illustration der Ausbisslinien (blau: basale Gleitfläche; rot und rosa: sekundäre Gleitflächen).

4.2.6 Auswertungen Satellitendaten

Die Auswertung der InSAR-Satellitendaten (Zeitreihe 1991 – 2019) erfolgte im Herbst 2019 durch die Firma Gamma Remote Sensing. Sie hat zum Ziel, die Entwicklung der Bewegungen sowie die Bewegungsraten am „Spitze Stei“ zu rekonstruieren. Die Dokumentation ist in [6] zu finden. Die Auswertungen zeigen folgende Resultate:

- 1991: Erstmalige Beobachtung lokaler Bewegungen unter Pt. 53 (ca. 0.5 cm/12 Tage)
- 1999: Bewegungen unterhalb Pt. 53 inkl. Pt. 21 und 22; erstmalige Beobachtung der Lage der Gleitfläche an der Westschulter unter Pt. 54.
- 2005: Anzeichen für eine weitere Gleitfläche unter Pt. 52
- 2007: Deutliche Ausbildung der Gleitfläche unter Pt. 52
- 2009: Ggf. stärkere Bewegungen im Ostbereich; ansonsten Analog 2007
- 2016: Verschiebung der Gleitfläche unter Pt. 63



Resultate: Zeitreihe an den Punkten 52, 53 und 63

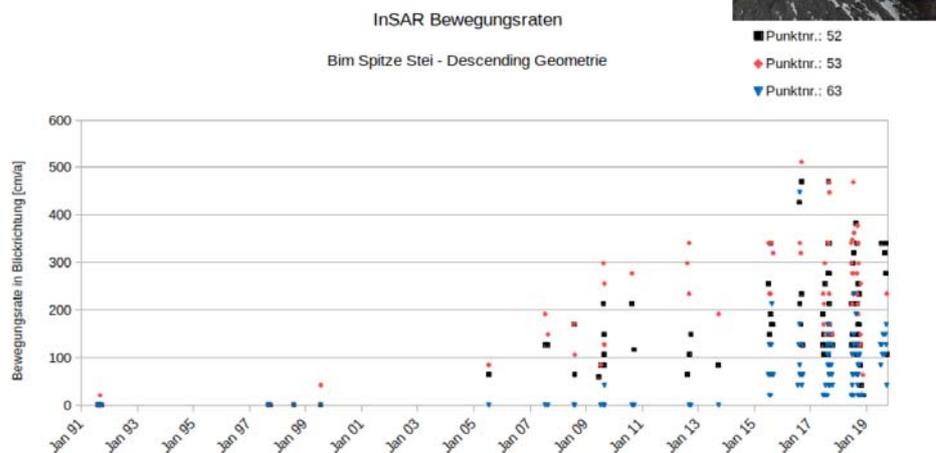


Abbildung 14: Zeitreihe an den Punkten 52, 53 und 63. Die ersten InSAR-Datensätze zeigen bis 2005 keine bis sehr geringfügige Bewegungen. Ab 2005 sowie 2017 nehmen die Bewegungen deutlich zu und bleiben auf hohem Niveau [6].

4.2.7 Permafrostmessungen Station Doldenstock

Die Permafrostmessstation liegt im Blockgletscher nördlich des Doldenhorns auf 2'560 m ü. M. Die seit Ende August 2016 Daten liefernde Station besteht aus zwei Thermistorenketten (Tiefe 20.5 m und 16.5 m) sowie einer Wetterstation, welche Temperatur sowie Schnee- und Niederschlagsmenge aufzeichnet. Die Temperaturlogger-Daten können nicht uneingeschränkt auf den „Spitz Stei“ übertragen werden (Blockgletscher vs. Permafrost-Felskörper, anderes Mikroklima), zeigen jedoch einen Trend, welcher durchaus übernommen werden kann (vgl. auch [16], Kap. 2.6). Die Aufzeichnungen der Wetterdaten sind repräsentativ. Die Daten der Messstation (Zeitperiode Sommer 2017 – 2018) sind im Bericht der Abt. Naturgefahren (2019) [16] detailliert ausgewertet und beschrieben. Aus den Messungen und Auswertungen [16] können zusammengefasst folgende Schlüsse gezogen werden:

- Im Herbst (November) wird der Boden mit dem Einschneien von atmosphärischen Einflüssen weitgehend entkoppelt. Die Bodentemperaturen beginnen in 1 m Tiefe ab Mitte Januar, in 2 m Tiefe ab Mitte Februar zu

sinken. Vorher wirkt der Zero-Curtain-Effekt³. Das Temperaturminimum wird aufgrund der verzögerten Wärmeleitung in den Untergrund jeweils erst im Frühjahr (April/Mai) erreicht.

- Im Frühling (ca. Mitte April) setzt die Erwärmung des Bodens in 1 m Tiefe nahezu zeitgleich mit der Erwärmung der Oberfläche ein und erfolgt abrupt, was auf in den Untergrund einsickerndes Schmelzwasser (advektive Wärmeübertragung) hinweisen dürfte [26].
- Der Zero-Curtain-Effekt ist im Herbst (Nov. – Jan.) und Frühling (Mai/Juni – Juli) deutlich sichtbar (vgl. Abbildung 15). Er setzt ein, sobald die Schneedecke taut und Wasser an deren Basis gelangt. Beim Kontakt mit dem kalten Boden gefriert das Wasser wieder. Dabei wird latente Wärme frei welche im Untergrund rasch zu einer Erwärmung auf 0°C führt.
- Die Temperaturen am Doldenstock sind in den Winterhalbjahren 2017/18 und 2018/19 in grossen Tiefen (10 m) deutlich weniger stark unter den Nullpunkt gesunken als im Vorjahr. Dies kann unter anderem auf die Schneedeckenentwicklung in diesen Jahren zurückgeführt werden. In den letzten beiden Wintern erreichte die Schneedecke früh eine isolierende Mächtigkeit und hemmte dadurch die Auskühlung des Untergrunds im Herbst/Winter.
- Die Mächtigkeit der Auftauschicht (active layer) bei der Messstation Doldenstock beträgt lediglich 1.5 m bis 2 m. Dies lässt jedoch nicht direkt auf die Mächtigkeit am „Spitze Stei“ schliessen, da dort auch andere Prozesse (insbesondere Luftzirkulation) wirken.

³ Der Zero-Curtain-Effekt beschreibt eine Phase im Herbst und Frühjahr während der die Bodentemperaturen bei 0°C verharren. Diese Verzögerung wird durch den Phasenübergang des Wassers (flüssig-fest/fest- flüssig) verursacht, bei dem grosse Mengen an latenter Wärme das Auskühlen im Herbst und die Erwärmung im Frühjahr verzögern.

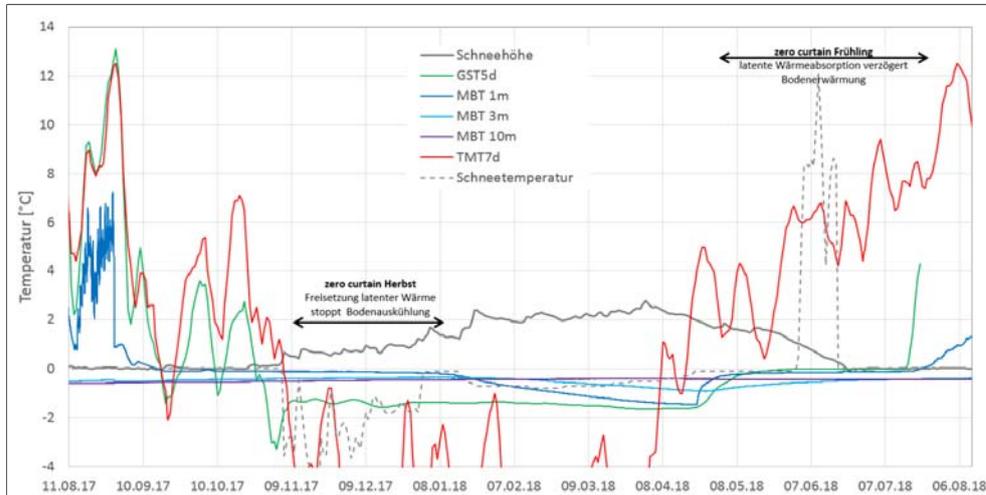


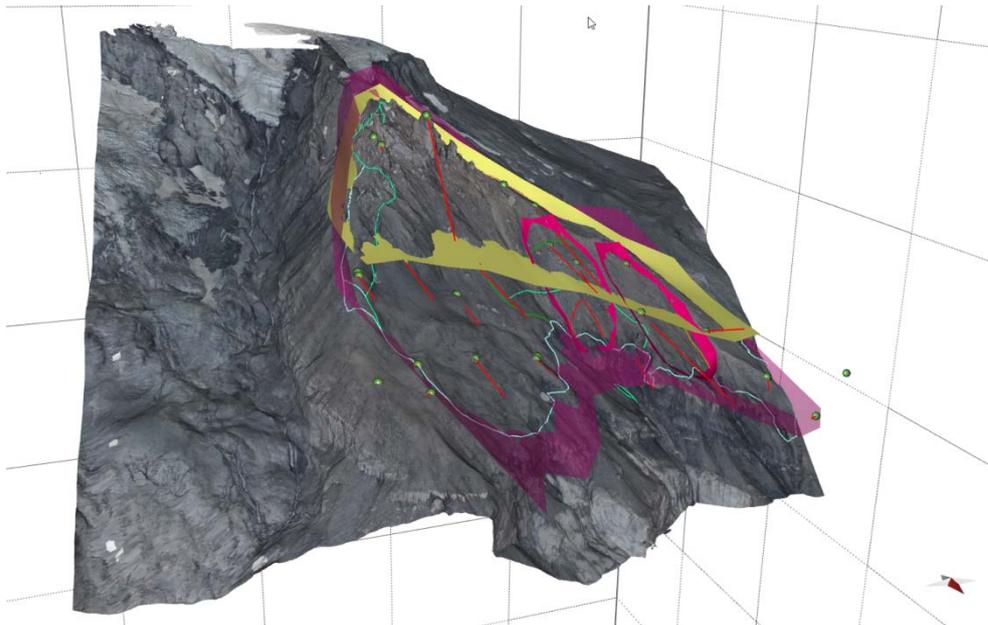
Abbildung 15: Auszug aus [16] mit den temperaturrelevanten Parameter bei der Doldenstock Messstation der Jahresperiode 2017 – 2018 (GST5d: Oberflächentemperatur, 5-Tagesmittel; MBT xm: mittlere Bodentemperatur in 1, 3 und 10 m Tiefe; TMT7d: mittlere Lufttemperatur 7-Tagesmittel).

4.3 3D-Modell

Am 09.08.2019 wurde der „Spitze Stei“ mit einer RTK-Drohne systematisch fotografiert und darauf basierend ein hochauflösendes 3D-Terrainmodell erstellt. Mit der Software Move™ wurden anschliessend sämtliche georeferenzierte Daten in integriert und ein geologisches 3D-Modell mit konstruierten, sich überlagernden Gleitflächen entworfen. Auf eine Klufthanalyse musste aufgrund der starken Zerrüttung verzichtet werden. Die Haupttrennflächen sind aufgrund der Luftbildanalysen erkannt, jedoch vorerst noch nicht ins Modell integriert.

Übersicht geologisches Modell

Geländebeobachtungen und Messungen deuten auf ein komplexes Modell mit mehreren Gleitflächen hin. Die gesamte Flanke des „Spitze Steis“ bewegt sich auf einer tiefliegenden, „basalen“ Gleitfläche und wird durch die drei Teilsysteme (Felsrutschung im Gipfel-/Felsbereich, Schuttrutschung(en) in der Westflanke und Blockgletscher) überlagert (vgl. Abbildung 16). Der Blockgletscher ist für das Gefahrenmanagement von untergeordneter Bedeutung und wird daher nicht weiter erläutert. Obere, untere und seitliche Begrenzungen der tiefliegenden Gleitfläche sind aufgrund von Beobachtungen und redundanten Messungen gut abgrenzbar. Die innere Beschaffenheit der Gleitfläche ist heute nicht bekannt. Insbesondere ist unklar, ob die gesamte Bewegung entlang einer scharf begrenzten, durchgehenden Fläche erfolgt oder ob es sich um mehrere Gleitzonen mit Abstufungen handelt.



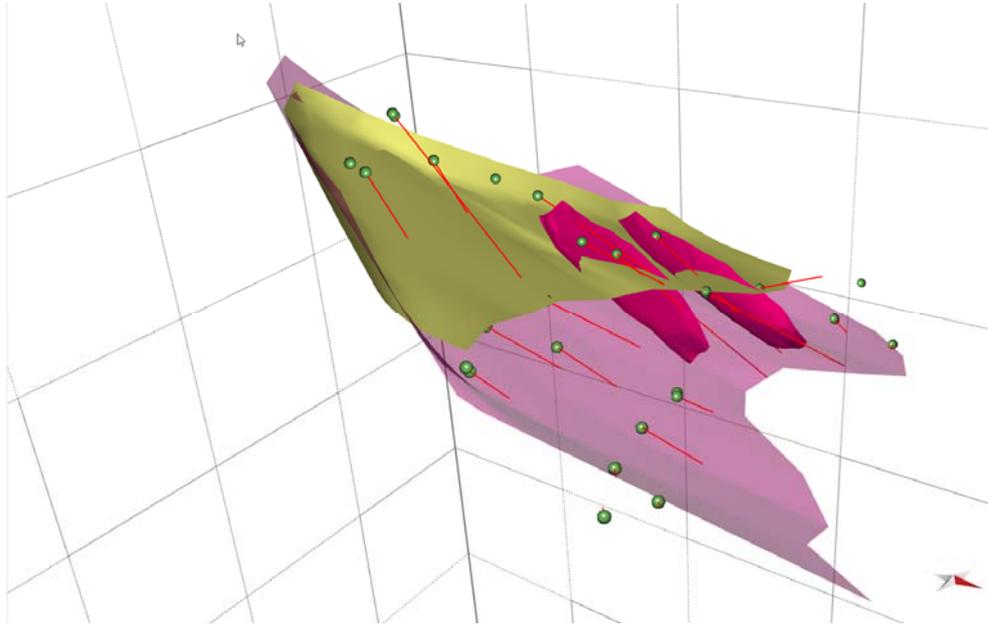


Abbildung 16: Ansicht des 3D-Modells mit den modellierten Gleitflächen (violett: Basale Gleitfläche; Gold: Gleitfläche Felsrutschung; Pink: Gleitflächen Schuttrutschung) sowie Bewegungsvektoren (10fach überhöht).

Tiefgründige Gebirgsinstabilität

Die grossräumige Instabilität umfasst die gesamte Flanke von Gipfel, über den Ost- und Westgrat bis zu den steilaufragenden Felsformationen. Die Abgrenzung der maximalen Ausdehnung basiert auf den Radarmessungen, den InSAR-Auswertungen sowie den Tachymetermessungen (vgl. Kapitel 4.2). Die Gebiete um die Punkte Pt. 61, 31, 33 und 92 zeigen keine oder nur geringfügige Bewegungen und liegen ausserhalb der maximalen Ausdehnungslinie gem. [5]. Die Gleitfläche verläuft vermutlich entlang des lithologischen Kontakts Öhrlikalk/Zemensteinschichten. Die Gleitfläche ist leicht konkav und verläuft schichtparallel mit rund 30° von SE nach NW.

Die Mächtigkeit der Gebirgsinstabilität beträgt beim Ostgrat 20 – 40 m und beim Westgrat 60 – 80 m. Das maximale Volumen beträgt somit rund 20 Mio. Kubikmeter. Die Bewegungsrichtung ist parallel zur Schichtung gegen NW. Die Bewegungsraten auf dieser Fläche liegen gemäss den Radarmessungen (vgl. Kapitel 4.2.5) bei 1.5 mm/Tag, was sich durch die terrestrischen Messungen bestätigen lässt. So wiesen in diesem Zeitraum auch die Punkte ausserhalb der aktiven Fels- und Schuttrutschungen (Pt. 41, 74 und 63) Bewegungsraten im mm-Bereich auf.

Die Konstruktion der basalen Gleitfläche basiert auf der maximalen Ausbisslinie (vgl. Kapitel 4.2.5) in Kombination der aufgrund geologischer Überlegungen wahrscheinlichen Tiefe der Gleitfläche und wurde mit den Geophysikdaten (Kontakt Kalke/Mergel) plausibilisiert. Es handelt sich aber klar um eine konstruierte geologische Schwächezone, welche sich durch die Messungen nur indirekt manifestiert.

Felsrutschung Gipfel-/Felsbereich

Die Felsrutschung umfasst den gesamten Fels-/Gipfelbereich (Gebiete oberhalb 2'600 m ü. M.). Die Gleitfläche entspricht vermutlich der Grenzfläche zwischen Öhrli-Kalk und Öhrli-Mergel. Sie korrespondiert mit der Geländestufe auf rund 2'600 m ü. M. und verläuft keilförmig auf dem Westgrat weiter bis auf rund 2'300 m ü. M. Sie ist ebenfalls leicht konkav und verläuft schichtparallel mit rund 35° gegen NW. Die durchschnittliche Mächtigkeit der Felsrutschung beträgt ca. 15 bis 20 m; das Volumen umfasst deshalb rund 5.5 Mio. Kubikmeter. Felderhebungen und geophysikalische Messungen [11] weisen auf einen beachtlichen Anteil an Klufteis hin.

Dieser Bereich ist mit Bewegungen von bis zu 3.2 cm/Tag während den Sommermonaten äusserst aktiv. Die Messpunkte beim Gipfel (Pt. 11, 13 und 14) bewegen sich mit Jahresdurchschnittsgeschwindigkeiten von durchschnittlich 1 cm/Tag gegen Norden; die unteren Messpunkte Pt. 72, 75, 76 ebenfalls mit rund 1 cm/Tag sich Richtung NW.

Die Konstruktion der Gleitfläche basiert somit auf den Geländebefunden, der Geophysik sowie den Deformationsmessungen. Insbesondere die Ausbisslinie entlang der Westflanke konnte im Feld bis auf Kote ca. 2'600 m ü. M. auskartiert werden.

Schuttrutschung Westflanke

Die Schuttrutschung innerhalb der Westflanke reicht von der parallel zum Westgrat verlaufenden Anrisskante bis zu den Steilstufen der Quinten-Kalken. Die Rutschung ist in verschiedene Teilrutschungen zerlegt, welche sich im Sommer mit bis zu 11.8 cm/Tag talwärts bewegen. Der mehrheitlich zu Schutt zerfallene Fels gleitet vermutlich auf weniger kompetenten Gesteinsschichten ab. Die Morphologie sowie die terrestrischen Messungen lassen mehrere Teilpakete vermuten. Für die Volumenberechnung wurden der Einfachheit halber zwei Gleitkörper ausgewiesen. Das bewegte Volumen umfasst je 300'000 m³. Die Bewegungen sind gegen NW gerichtet.

Die Konstruktion der Gleitflächen basiert auf morphologischen Phänomenen (oberster und unterste Begrenzung der Schuttrutschungen) sowie der Bewegungscharakteristik (vgl. Kapitel 4.2.1).

4.4 Stabilitätsanalyse

Mit der Stabilitätsanalyse werden die verschiedenen Stabilitätszustände innerhalb der Fels- und Schuttrutschung modellhaft abgeschätzt. Die Charakterisierung von Standsicherheitsbedingungen (Krafteinwirkung auf der Rutschmasse) erlaubt es, Rückschlüsse auf den aktuellen Stabilitätszustand, die Einflussfaktoren sowie auf mögliche Versagensmechanismen zu ziehen.

Als Einschränkung für die Belastbarkeit der Resultate muss beachtet werden, dass hinsichtlich Lage, Ausbildung und Kinematik der Gleitfläche(n) aktuell grosse Unsicherheiten bestehen, welche nur mit erheblichem Aufwand an Sondierungen zu reduzieren wären.

Die Stabilitätsbetrachtungen erfolgen entlang ebener Diskontinuitäten in zweidimensionalen Schnitten. Der „Spitze Stei“ ist aber aufgrund der tektonischen Deformation in eine komplexe nach Süden stirnende und nach Osten steilgestellte Faltenform zerlegt. Die zerbrochenen und zerscherten Öhrlikalke bilden den Überrest des Faltenkerns.

Die Standsicherheit der Felsrutschung (Gipfel-/Felsbereich) und der Schuttrutschung in der Westflanke wurde mit der Analyse des Grenzgleichgewichts betrachtet. Die Methode der Grenzgleichgewichte beruht auf der Bestimmung der rückhaltenden und treibenden Kräfte, wobei sich aus deren Verhältnis ein Sicherheitsfaktor (FS) berechnen lässt ($FS > 1$ standsicher; $FS < 1$ nicht standsicher; $FS = 1$ labil). Die Stabilitätsanalyse erfolgte mit Slide2 von Rocscience, ein Softwarepaket, welches den Sicherheitsfaktor entlang von Längsschnitten berechnet und den Grenz-zustand probabilistisch unter Verwendung verschiedener Eingangsparameter bestimmt (Sensitivitätsanalyse).

Modellansatz

Die Lockergesteins- und Felsrutschung (Westflanke und Gipfel-/Felsbereich) wurden als reine Translationsrutschungen modelliert. Die Felsmasse wird als isotropes Material betrachtet, welche wie ein Lockermaterial, geringe homogene Festigkeiten aufweist. Der fragmentierte „Spitze Stei“ wird durch das Modell (Method of slices) adäquat abgebildet, da im Modellansatz die Wechselwirkung einzelner Fragmente (Slices) innerhalb des Rutschkörpers berücksichtigt wird. Die Materialeigenschaften wurden mit dem Mohr-Coulomb Bruchkriterium (scheinbare Kohäsion „c“, Reibungswinkel „φ“) beschrieben.

Es wurden drei verschiedene Modellansätze gewählt (*conventional Bishop's modified method of slices*, *Spencer Method*, *Morgenstern & Price*), um die Sensitivität der Ansätze auf das Endergebnis zu überprüfen. Generell kann festgehalten werden, dass komplexere Methoden (z.B. Spencer) schlechter konvergieren als einfache Methoden (z.B. *Bishop*).

Geologisch-geomechanisches Modell und hydrostatische Bedingungen

Für die Stabilitätsanalyse wird ein stark vereinfachtes geologisches Modell⁴ verwendet (vgl. Kapitel 4.3) in der Annahme, dass die Fels- resp. Schuttrutschung auf einer vordefinierten Gleitfläche (hier: Felsoberfläche) abgeleitet. Der unter der Gleitfläche liegende Fels wird als standsicher angenommen. Die Berechnung des Sicherheitsfaktors erfolgt lediglich für die Gleitfläche. Die geometrischen Randbedingungen (oberen und unteren Begrenzungen der Instabilitäten, Gleitfläche) wurden aufgrund der Feldbeobachtungen und den konstruierten Gleitflächen (3D-Modell) übernommen (vgl. Abbildung 16). Um den Versagensmechanismus zu erörtern, wurde sowohl die Felsrutschung als auch die Schuttrutschung aufgrund morphologischer Kriterien in drei Teilrutschungen (Kopfbereich, Mitte, Fuss) unterteilt. Es wurden minimale und maximale hydrostatische Druckverhältnisse betrachtet.

Sensitivitätsanalyse geomechanische Parameter und Stabilitätsanalyse

Die geomechanischen Parameter (φ und c^*) wurden lediglich für die Gleitfläche am Beispiel der Schuttrutschung mittels einer Sensitivitätsanalyse abgeschätzt. Als Erstabschätzung für den Reibungswinkel φ dienten die beobachteten Böschungswinkel in den verschiedenen Teilbereichen der Westflanke. Dabei wird angenommen, dass die Scherfestigkeit des Felsmaterials sich dem minimalen Reibungswinkel der Standsicherheit $FS \geq 1$ annähert (Annahme: kein Permafrost, kein hydrostatischer Druck, keine Kohäsion).

Die aus der Sensitivitätsanalyse resultierende obere und untere Bandbreite für die geomechanischen Parameter im stabilen und instabilen Zustand sind in der Abbildung 17 dargestellt, wobei die gemessene, (scheinbare) Kohäsion in Permafrostkörpern sich mit Temperatur und der Tiefe ändert und zwischen 0 und 240 kPa liegt. Die Bandbreite der Reibungswinkel wurde zwischen 27° und 39° ⁵ variiert. Die

⁴ Im Modell (vgl. Anhang 7) werden folgende Bezeichnungen verwendet: Schutt-/Felsrutschung = „activ layer (fract. Marls)“; Gleitfläche = shear zone (weak layer) front; stabil angenommener Fels = Bedrock (Malm)

⁵ Ein Vergleich mit der Literatur zeigt, dass die Kohäsion im Permafrost zwischen 0 und 800 kPa liegen kann [25] und die Reibungswinkel in Gehängeschutt (Niesendecke) zwischen 30° und 40° liegt [23].

hydrostatische Kraft wurde einheitlich über das ganze Rutschpaket verteilt. Die Wirkungen des Porenwasserdrucks wurde von der Gleitfläche (=minimale Sättigung) bis zur Oberfläche (=vollständige Sättigung) betrachten. Die Stabilitätsanalyse wurde mittels verschiedenen Modellansätzen basierend auf dieser Parameterverteilung durchgeführt.

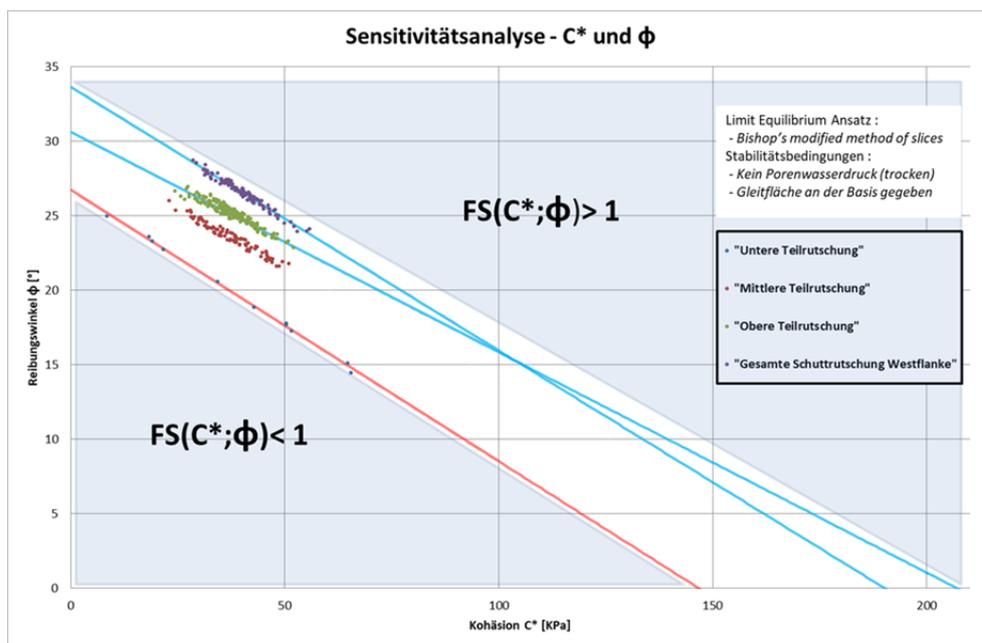


Abbildung 17: Verteilung des Mohr-Coulomb Bruchkriteriums für die Kalibrierung des Modells, wobei die Schuttablagerungen in der Westflanke als stabil angenommen werden. Anhand dieser Sensitivitätsanalyse wurde die Parameterverteilung der Gleitfläche für den probabilistischen Ansatz gewählt.

Resultate

Die Resultate sind im Anhang 7 jeweils für die verschiedenen Stabilitätsansätze (deterministisch und probabilistisch) sowie die unterschiedlichen Zustände (ohne Wasser / mit Wasser) dargestellt. Die Resultate können wie folgt zusammengefasst werden:

- Kohäsionsänderungen spielen eine massgebende Rolle. Im System vom „Spitze Stei“ müsste im gesättigten Zustand die Gleitfläche eine Kohäsion von ca. > 140 kPa aufweisen (vgl. Anhang 7), um noch stabil zu sein. Dies kann sinnvoll nur durch das Vorhandensein von Permafrost erklärt werden. Man kann davon ausgehen, dass die heutige Stabilität des „Spitze Steis“ massgeblich durch den Permafrost beeinflusst wird und die zunehmende Instabilität eine Folge der Permafrostdegradation ist.

- Es darf angenommen werden, dass der Reibungswinkel auf der Gleitfläche über die Zeit konstant bleibt. Somit wird die Stabilität maßgeblich durch die Änderung der Kohäsion und die Änderung der Sättigung (infolge Schmelzwasser, Niederschlag, Permafrostdegradation) beeinflusst.
- Im Zustand ohne Permafrost (d.h. ohne Kohäsion) wird das System bereits mit einem geringen Wassereintrag instabil. Daraus kann gefolgert werden, dass der „Spitze Stei“ ohne Permafrost instabil wäre bzw. mit zunehmender Permafrostdegradation destabilisiert wird.
- Die Stabilität der frontalen Teilrutschungen ist bei allen Berechnungsansätzen und Zuständen jeweils stabiler, als die oberen Teilbereiche. Dies lässt vermuten, dass der Fuss im Grundsatz eine stabilisierende Funktion hat. Dieser Aspekt ist unter Berücksichtigung anderer Beobachtungen (hufeisenförmige Morphologie, kein Nachrutschen der oberen Teilbereiche beim Ereignis vom 13.11.2019, etc.) zu diskutieren.

5. Beurteilung

5.1 Morphologische und geologische Disposition

Folgende Faktoren beeinflussen die Instabilität des Gebirgsstockes:

- Morphologie: Die Rutschmasse bildet eine nach Norden schiefgestellte Gebirgspyramide mit einem senkrechten Abbruch zum Tal hin. Der „Spitze Stei“ sitzt bildlich gesprochen am oberen Ende einer schiefen Bahn.
- Lithologie, bzw. Schichtaufbau: Eine mächtige Abfolge von inkompetenten (weichen) Tonschiefern folgt über einem kompakten Kalksockel. Darüber liegen wiederum stark zerbrochene und verwitterte Kalke, welche den Gipfel bilden.
- Tektonik: Die Gesteinsabfolge ist in komplexe Falten gelegt; die obersten Kalktürme sind Fragment eines Faltenkerns und wurden durch die Kräfte der Gebirgsbildung nach Süden und Osten steilgestellt und intensiv sowie tiefgreifend zerbrochen.
- Prähistorische Sturzereignisse: Der „Spitze Stei“ ist ein Relikt früherer Bergsturzereignisse [21] [29], d.h. er bildet quasi eine Restmasse, welche weder beim postglazialen Bergsturz vom Doldenhorn (West) noch bei dem vergleichsweise jungen „Öschinensee Bergsturz“ abgestürzt ist. Durch die Ereignisse wurden jedoch die Westflanke und der Fuss des „Spitze Stei“ geschwächt.

5.2 Kausalität

Die Gründe der massiven Zunahme der gravitativen Bewegungen lassen sich aus der geologischen Grunddisposition und den Einflüssen der Klimaerwärmung ableiten. Dies insbesondere aus den folgenden Parametern:

- Permafrostdegradation: Durch den massiven Rückzug des Gletschers und die zunehmend rasche Ausaperung wird das gesamte Fels- und Schuttgebiet freigelegt und ist zunehmend der Verwitterung ausgesetzt. Durch den Eisschwund im Schutt und in den Felsklüften verliert das Gebirge einen massgeblichen Stützfaktor. Zudem begünstigt die damit einhergehende fehlende Versiegelung der Oberfläche das Eindringen von Wasser. Mit zunehmender Verlagerung des Temperaturprofils gegen den Nullpunkt, wird der Permafrostkörper instabiler. Ab 1990 resp. 2000 lässt sich in den Permafrostgebieten der Schweiz infolge Klimaerwärmung [24], ein positiver Temperaturtrend beobachten (vgl. Abbildung 20).
- Hydrostatischer Druck: Die Stabilitätsanalysen (vgl. Kapitel 4.4) zeigen, dass der „Spitze Stei“ ohne Eis und Wasser in einem semistabilen Zustand wäre. Sobald sich entlang der Klüfte ein massgeblicher Wasserdruck (aufschmelzendes Klufteis, Öffnen der Klüfte durch differenzielle Bewegungen) aufbaut, verringert sich die Stabilität dramatisch. Sofern der Wasserdruck zusätzlich entlang der Gleitfläche wirkt, kann die Auftriebswirkung die Scherwiderstände vermindern.
- Wärmeeintrag: In die Tiefe fortschreitende/vordringende Zirkulation führt durch Konvektion zu massiver Erhöhung des Wärmeeintrages entlang selektiver Fliesswege. Erneutes Einfrieren in den Wintermonaten erweitert Gesteinsrisse, womit sich die Permeabilität erhöht. In den Schuttkörpern kann die Bildung von Eislinsen zu Frosthebung führen, welche lokal spontane Rutschungen auslösen können.

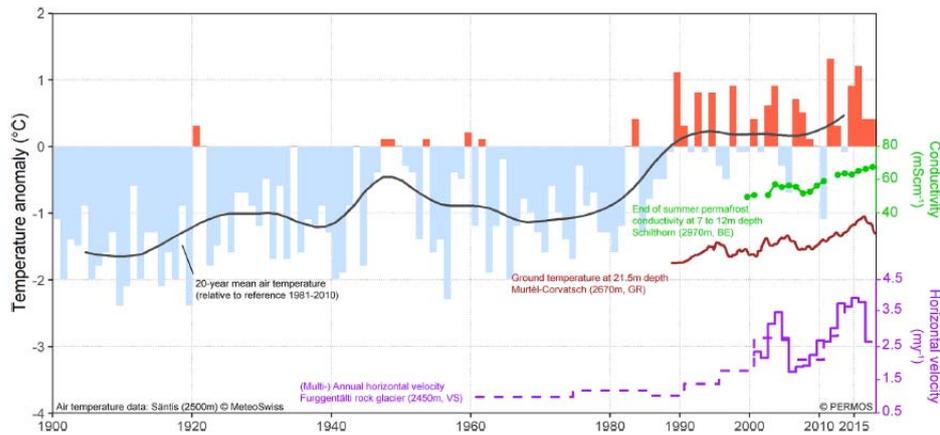


Abbildung 18: Die jährlichen Lufttemperaturanomalien (relativ zur Normperiode 1981 – 2010) gemessen auf dem Säntis (2500 m ü. M.) ist in blauen und roten Balken und deren gemittelter Wert als schwarze Linie dargestellt. Entwicklung von Permafrostparametern gemessen an ausgewählten Standorten des PERMOS-Messnetzes Permafrosttemperatur (braune Linie), Horizontalgeschwindigkeit der Blockgletscher (violette Linie) und Permafrost-Konduktivität (grüne Punkte und Linie). (Bildquelle: [24]).

Eine Beschreibung der oben ausgeführten Prozesse auf der saisonalen Skala findet sich im konzeptionellen Modell für den Wärmefluss im Boden von Draebing et al. [2]. Die detaillierte Beschreibung der Prozesse am „Spitze Stei“ anhand dieses Modells ist in [16] nachzulesen.

5.3 Kinematik

Am „Spitze Stei“ wurden ab dem Jahre 2004 massgebliche Bewegungen beobachtet, welche seither zugenommen haben (vgl. Kapitel 4.2.6). Zudem weist der „Spitze Stei“ ein für eine Felsackung bzw. –rutschung atypisches Verhalten auf. Diese beiden Aspekte lassen sich nur mit dem Modell eines eisreichen, aufgelösten Fels- und Schuttkörpers erklären.



Abbildung 19: Verlauf der Einflussfaktoren im Zeitraum 2018 – 2019 (Bildquelle: [16]). Oben: Normalisierte Darstellung der über alle Punkte gemittelten Bewegungsrate der Schneehöhe und der Bodentemperatur; Mitte: Verlauf der einzelnen Einflussfaktoren (normalisierte Werte); Unten: Einflussfaktoren addiert (normalisierte Werte).

Die Bewegungsmessungen zeigen, dass alle Teilsysteme am „Spitze Stei“ mit wenig Verzögerung auf Wassereintrag reagieren, wenn auch in unterschiedlicher Weise (vgl. Kapitel 4.2.1 oder auch [16]).

Die massgeblichen Einflussfaktoren auf die beobachteten Bewegungen sind die Schneeschmelze, Niederschläge sowie Temperaturanstiege. Alle Grössen haben auch einen direkten Einfluss auf das verstärkte Auftauen des Permafrosts (vgl. Abbildung 19 sowie Kapitel 4.2.1).

Der Anteil der Schneeschmelze ist für das Gesamtsystem am stärksten, wohingegen die Niederschläge vor allem in der Schuttrutschung der Westflanke wirken. Die Felsrutschung beschleunigte zehn Tage nach dem Einsetzen der Schneeschmelze; die Geschwindigkeiten verblieben danach auf hohem Niveau. Die Schuttrutschung zeigte starke Beschleunigungen insbesondere infolge von Niederschlägen, jedoch erst nachdem der „active layer“ aufgetaut war (vgl. Abbildung 8). Erst dann kann das Wasser in oder unter den Permafrostkörper eindringen.

Die mit dem Wasser konvektiv eingebrachte Wärme führt zu einer raschen und effektiven Erwärmung sowohl des „active layers“ als auch des Permafrostkörpers [27]. Zudem wird die Disposition der Bildung weiterer präferenzierter Fliesswege (positive Rückkoppelung; vgl. Abbildung 20) erhöht.

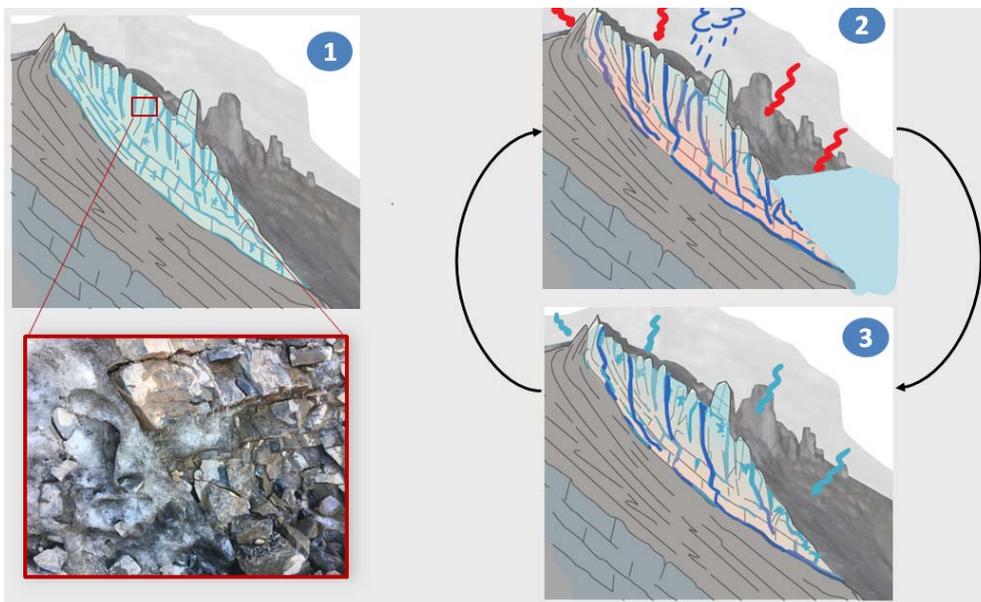


Abbildung 20: Systematische Skizze des Auftauprozesses am „Spitze Stei“. 1: Der gefrorene Gebirgskörper in seinem ursprünglichen Zustand; 2: Mit Beginn des Auftaus des Permafrosts dringt Schmelz- und Niederschlagswasser ein. Diese bilden effektive Wasserfließwege und bringen Wärme bis an die Basis des Gebirgskörpers; 3: Im Winter kühlt nur die oberste Schicht zu. Die Fließwege bleiben offen und die Wärme im Gebirgskörper bleibt bestehen.

Aufgrund der geologischen Gegebenheiten, den bisherigen Feldbeobachtungen und Messungen lässt sich vereinfacht ein Modell einer alten, tiefgründigen Fels-sackung auf einer nordwestvergenten, mehr oder weniger ebenen Gleitfläche postulieren. Die Sackung, bzw. der noch mehr oder weniger deutliche Merkmale des ursprünglichen Felsverbandes aufweisende Gebirgstheil, wird von unterschiedlich mächtigen Schutthalden bedeckt. Durch prähistorische Sturzereignisse aus der Front und durch die langanhaltende Erosion, hat sich eine stark zerklüftete, konkave, vom Ostgrat über das Zentrum bis zum Westgrat reichende (bogenförmige) Fels- und Schuttfront gebildet, aus der aktive Schuttrunsen bis an die hohe Felskante hinunter reichen. Verschiedene Bereiche der Sackung- bzw. Rutschung weisen unterschiedliche Deformationsraten auf. Für die Felstürme im Zentrum und die Westflanke kann eine zweite, höhergelegene Gleitfläche postuliert werden.

Aufgrund der starken Fragmentierung des Gebirges sowie vermutlich unterschiedlichen Degradation des Permafrostes sind hinsichtlich der Abbruchszenarien Kaskaden- und Dominoeffekte⁶ denkbar.

5.4 Zu erwartende Entwicklung

Einordnung der aktuellen Bewegungen

Die durchschnittlichen Bewegungen im 2019 sind mit rund 10 mm/Tag im Felsbereich beachtlich. Ein Vergleich mit anderen Rutsch- und Bergsturzereignissen zeigt, dass es z.B. beim Felssturz in Preonzo bei dieser Geschwindigkeit zu einem Abbruch kam. Andere Fälle (z.B. Randa) wiesen 10 Tage vor dem Abbruch vergleichbare Geschwindigkeiten auf (vgl. Abbildung 21). Entgegen dieser Beobachtungen kam es beim „Spitze Stei“ in der fraglichen Periode zu keinem nennenswerten Abbruch. Es ist zu beachten, dass die dokumentierten Rutschungen unterschiedliche (geologische) Dispositionen aufweisen und in diesem Sinn nur bedingt Rückschlüsse auf einen Abbruchzeitpunkt gemacht werden können.

⁶ Der Kaskadeneffekt beschreibt Sturzprozesse, welche sich unabhängig voneinander, jedoch in zeitlich kurzer Abfolge ereignen. Der Dominoeffekt beschreibt Sturzprozesse, welche sich gegenseitig beeinflussen (z.B. Ablösung im Fussbereich führt zu einer Destabilisierung der oberen Felspakete, weshalb diese ebenfalls abstürzen).

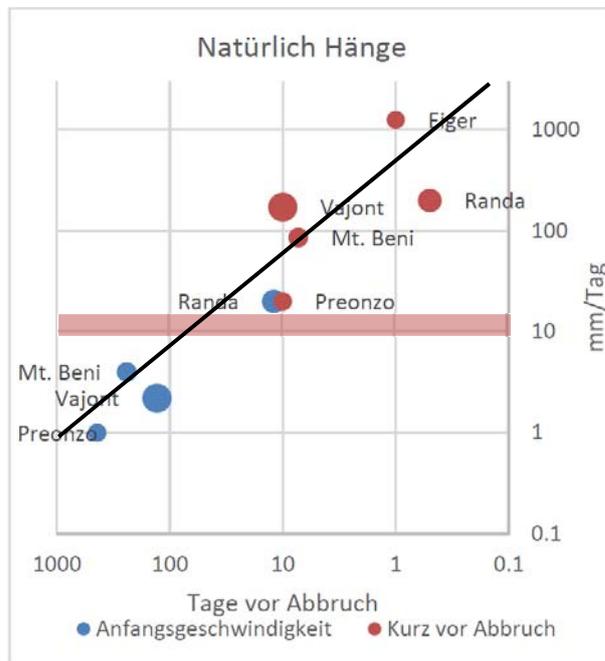


Abbildung 21: Felsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Zeitpunkt vor dem Abbruch bei natürlichen Hängen (Bildquelle: CDS, 2019 [1]). Roter Balken: Der „Spitze Stei“ mit seiner durchschnittlichen Geschwindigkeit von rund 10 mm/Jahr (Zeitraum April – November 2019 im Gipfelbereich).

Zu erwartende Entwicklung

Aufgrund folgender Indizien erwarten wir in den nächsten Jahren eine weitere Zunahme der Bewegungen.

- Der „Spitze Stei“ ist aufgrund der geologischen Disposition bereits geschwächt und hat eine erhöhte Rutschdisposition.
- Das System befindet sich in einem positiven Rückkoppelungsprozess, welcher die Permafrostdegradation fördert. Damit wird der Abbau der rückhaltenden Kräfte begünstigt.
- Die Fels- und Schuttrutschung wurden in den letzten zwei Jahrzehnten nachhaltig aktiviert.
- In den letzten zwei Jahren sind starke Beschleunigungen der gesamten Masse zu beobachten.
- Die Bewegungsraten sind anhaltend hoch, insbesondere im vierten Quartal 2019.

Folgerung

Aufgrund der bisherigen Entwicklung wird ein Rückgang der Bewegungsraten des aktiven Systems in den nächsten Jahren nicht erwartet.

Lokale Abbrüche von mehreren 100'000 m³ bis 1 Mio. Kubikmeter aus der Lockergesteinsmasse und aus dem Felsbereich sind grundsätzlich möglich. Ausmass und Reichweite eines sich daraus entwickelnden Sturzereignisses können heute, aufgrund fehlender Erfahrung nicht abschliessend beantwortet werden.

6. Szenarien

6.1 Primärprozesse

Aufgrund der Einschätzung in Kapitel 5.4 können in den nächsten 10 Jahren (2020 bis 2030) folgende Abbruchszenarien skizziert werden:

- 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 Eintretenswahrscheinlichkeit der Abbruchszenarien nimmt mit der jeweiligen Ereignisgrösse ab (vgl. Abbildung 22).

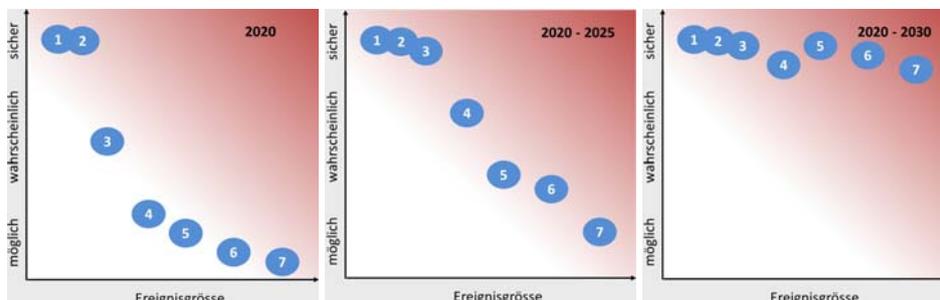


Abbildung 22: Entwicklung der Eintretenswahrscheinlichkeit mit betrachtetem Zeithorizont.

Das Eintreten eines „Null“-Szenarios (Beruhigung des Systems ohne Absturz) sowie eines Totalabsturzes von 20 Mio. Kubikmeter wird zum heutigen Zeitpunkt ausgeschlossen. Diese Szenarien werden daher nicht eigenständig aufgeführt.

6.2 Sekundärprozesse

Die in [9] beschriebenen Sekundärprozesse im Transit- und Ablagerungsraum eines möglichen Bergsturzes sind nach wie vor gültig (Impulswelle, Druckwelle, Murgänge aus der Bergsturzmasse). Bereits heute können kleine Niederschlagsmengen einen geschiebereichen Abfluss oder kleine Murgänge auslösen, welche den Siedlungsraum sowie bestehende Infrastrukturen (LWK, Zugangswege, touristische Anlagen) tangieren. Dies wird sich im nächsten Jahr akzentuieren. Präventive Massnahmen, Interventionsmöglichkeiten im Ereignisfall sowie ein Konzept für die Geschiebebewirtschaftung sind zurzeit in Ausarbeitung.

Aufgrund der bestehenden Disposition muss auch im Winterhalbjahr mit Fels- und Bergsturzereignissen gerechnet werden. In solchen Situationen sind unmittelbare Murgänge denkbar. Die Reichweiten eines solchen Szenarios werden detaillierter abgeklärt. Ebenso werden unmittelbare Murgänge im Sommerhalbjahr infolge Abbrüche aus eisreichem Fels- und Lockermaterial untersucht.

7. Unsicherheiten

Geologisches Modell

Das geologische Modell basiert auf indirekten Erhebungsmethoden sowie einem Beobachtungszeitraum von etwas mehr als einem Jahr. Unsicherheiten bestehen u.a. in der Lage, Form und dem Aufbau der Gleitfläche(n). Aufgrund des komplexen Aufbaus und starken Fragmentierung des „Spitze Steis“ ist es wahrscheinlich, dass weitere Gleitflächen und Teilsysteme vorliegen, welche noch unbekannt sind. Das bestehende Modell ist daher laufend zu überprüfen und mit den aktuellen Messungen abzugleichen. Es ist angedacht die präziseren Bildauswertungen zu automatisieren, um zeitnah flächige Informationen zu den Bewegungen zu erhalten.

Versagensmechanismen

In Bezug auf die Versagensmechanismen konnte das Modell mit den Stabilitätsanalysen präzisiert werden (vgl. auch offene Fragen in Kapitel 4.4), jedoch müssen die heute vorhandenen Modellvorstellungen durch die Erkenntnisse aus den weite-

ren Beobachtungen ergänzt werden. Insbesondere spontane Deformationen (Ereignis vom 13.11.2019) und mögliche Folgeprozesse (spontaner Absturz) können noch nicht abschliessend eingeordnet werden.

Zusätzliche Stabilitätsanalysen ermöglichen die in Kapitel 4.4 beschriebenen Bandbreiten der geomechanischen Parameter (insbesondere für die Felsrutschung) einzuschränken. Daraus können dann weitere Erkenntnisse über die Sensitivität der Rutschsysteme und somit auch über das Abbruchverhalten gewonnen werden.

Ausdehnung/Degradation Permafrost

Zum heutigen Zeitpunkt können kaum Aussagen zum Temperaturverlauf innerhalb des Permafrostkörpers, dem Eisgehalt und der Entwicklung der Permafrostdegradation gemacht werden. Diese Aspekte sind jedoch entscheidend, um Aussagen zur weiteren Stabilitätsentwicklung, zu den Abbruchmechanismen sowie zum Aspekt der unmittelbaren Murgangbildung aufgrund eines hohen Eisgehalts zu machen. Mit gezielten Bohrungen inkl. Thermistorenausbau, flächigen Georadarmessungen und Bodentemperaturmessungen können die hierfür notwendigen Datengrundlagen erhoben werden.

Abbruchzeitpunkt/-verhalten

Grosse Unsicherheiten bestehen in Bezug auf den Abbruchzeitpunkt sowie das Abbruchverhalten (Kaskaden- und Dominoeffekte). Der Abbruchzeitpunkt resp. das Einsetzen der Szenarien wird u.a. massgeblich durch den weiteren Verlauf der Permafrostdegradation und somit auch von den Witterungsbedingungen in den nächsten Jahren abhängen. Wie die Stabilitätssituation nach vollständiger Degradation aussieht, kann lediglich aufgrund der Stabilitätsanalysen abgeschätzt werden. In Bezug auf den Ablauf von Dominoeffekten wird erwartet, dass aufgrund der starken Fragmentierung des Gebirges zwischen den Teilabbrüchen jeweils ein Zeitfenster von Stunden bis Tagen liegt. Diese Annahme muss aber basierend auf den Beobachtungen laufend überprüft und zeitnah angepasst werden.

8. Gefahrenmanagement

8.1 Wirkungsbereiche Primär- und Sekundärprozesse

Die ursprünglichen Reichweiten und Folgeprozesse (vgl. [9]) sind generell nach wie vor gültig. Aufgrund neuer Erkenntnisse sind die Wirkungsbereiche unter Berücksichtigung folgender Kriterien zu überprüfen bzw. neu zu beurteilen:

- Modellierung der Reichweiten der Abbruchszenarien 5.5 Mio. und 20 Mio. Kubikmeter unter Berücksichtigung der präzisierten Quellen der Abbruchgebiete, Orientierung der Gleitflächen inkl. Überprüfung möglicher Folgeprozesse (Impulswellen im See etc.).
- Überprüfung (ggf. mit Modellierungen) der Auswirkung von Dominoeffekten (Abbrüche mit gegenseitiger Beeinflussung; Topographieeffekte nachgeschalteter Sturzereignisse im Ablagerungsgebiet etc.)
- Murgangbildung im Hochwinter aufgrund eingeschlossener Schneemassen (u.a. durch Bergsturzimpakt ausgelöste Lawinen).
- Der Sekundärprozess Murgang ist in Bezug auf die räumlichen und zeitlichen Prozessabläufe unbedingt detaillierter zu untersuchen.

8.2 Überwachungskonzept

Monitoring

Das Basismonitoring bestehend aus GPS- und Tachymetermessungen sowie einer hochauflösenden Kamera mit seitlichem Blick ins Rutschgebiet hat sich in den Grundzügen bewährt. Aufgrund der Erfahrungen 2019 sind folgende Punkte zu optimieren:

Bei anhaltender Bewölkung, bzw. liegenden Nebelbänken sowie ausgedehnter Schneedecke ist die Kontinuität der Tachymetermessungen nicht gewährleistet. Zur Überwachung sind lediglich die GPS-Messungen verfügbar. Das Ereignis vom 13.11.2019 hat die Möglichkeit lokaler, spontaner Ereignisse gezeigt, welche mit der GPS-Abdeckung nicht registriert werden konnte. Das GPS-Netz wurde unter anderem deshalb Ende November 2019 mit drei weiteren Messstandorten (Gipfel sowie Übergang Fels-/Lockermaterial) ergänzt.

Die GPS-Stationen wurden durch den Föhnsturm vom 23.11.2019 beschädigt, so dass es zu einem Totalausfall des gesamten Messsystems kam. Ggf. ist zu überprüfen, ob die GPS-Station robuster ausgestattet oder anderweitige Massnahmen zur Verhinderung eines Totalausfalls ergriffen werden können.

Die hochauflösende Kamera auf dem Westgrat ermöglichte keinen Einblick in die aktive Westflanke. Die Kamera wurde deshalb im November 2019 auf den Ostgrat versetzt, so dass 2020 die massgeblichen aktiven Bereiche visuell einsehbar sein sollten (mit gewissen Einschränkungen für die optionale Überwachung mit Bildauswertung). Was bisher fehlte, ist ein hochauflösender Einblick ins Gebiet vom Rosshubel aus (die bestehende Kamera hat eine ungenügende Auflösung für die Beobachtung. Wichtige Phänomene wie z.B. Wasserläufe, kleinere Sturzereignisse, konnten bisher nur mit der Roundshot-Kamera des Hotels beobachtet werden. Um eine bessere Einsicht ins gesamte Gebiet zu gewährleisten, empfehlen wir dringend die Installation einer weiteren hochauflösenden Kamera mit frontalem Blick auf den „Spitze Stei“ auf dem Rosshubel.

Aktuell werden Messdaten durch die FachexpertInnen manuell zwei bis drei Mal täglich konsultiert. Es hat sich gezeigt, dass mit diesem System Ereignisse im Gebiet (auch in Form von Systemausfällen) nicht genügend zeitnah registriert werden. Es bedarf einer automatisierten Überprüfung, so dass die Verantwortlichen mittels automatisierter Warnung auf Veränderungen aufmerksam gemacht werden. Ein einfaches SMS-Warnsystem ist zurzeit in Prüfung/Test und kann bei Bedarf weiter ausgebaut werden.

Frühwarnsysteme

Der Ausbau vom Basismonitoring zum Frühwarnsystem wurde ansatzweise im Nachgang an das Ereignis vom 13.11.2019 getestet. Der Testbetrieb des Radarsystems hat klare Limitierungen der Aussagekraft infolge Schneefall bzw. Schneedecke aufgezeigt. Im Winter werden Bewegungen <5 cm/Tag schwierig zu detektieren sein; Grössere Bewegungen >5 cm/Tag können hingegen mit einem automatisierten System detektiert werden. Im Sommer können Felsbewegungen um 1 cm/Tag automatisiert gemessen werden.

Die Testphase hat weiter gezeigt, dass es eine Eichungsperiode des Radars bis zum autonomen Betrieb des Frühwarnsystems notwendig sein wird. Wir gehen davon aus, dass sich die Rutschung im Frühjahr 2020 bereits auf einem erhöhten Geschwindigkeitsniveau befinden wird, wir empfehlen daher, das Radar im Juni/Juli 2020 zur Installation vorzusehen, um eine allfällige Krisenphase zuverlässig zu überwachen

Überwachung Winter 2019/20

Für den Winter 2019/20 wird die automatisierte Überwachung der Messspiegel solange wie möglich aufrechterhalten. Sobald die Spiegel mehrheitlich eingeschneit

und nicht mehr sichtbar sind, wird die automatische Messung eingestellt und auf manuelle Messungen umgestellt (Messintervall je nach Situation 2 – 4 x monatlich). Die GPS-Messungen sollten im gesamten Winterhalbjahr zu Verfügung stehen.

Gefahrenstufen

Die definierten Gefahrenstufen werden grundsätzlich nochmals diskutiert und auf den heutigen Kenntnisstand angepasst. So sind u.a. auch spontane Ereignisse und entsprechende Auswirkungen neu zu berücksichtigen.

Die Sicherheitszonen sind je nach Ergebnis der neu modellierten Wirkungsräume anzupassen.

9. Weitere Schritte

Bis März 2020 werden in Bezug auf die Primärprozesse folgende Punkte überprüft und entsprechende Arbeiten umgesetzt:

- Wirkungsräume der Primär- und Sekundärprozesse aufgrund der aktuellen Erkenntnissen präzisieren; Plausibilisierung und Anpassung Sicherheitszonen
- Generell automatisierte Datenauswertung inkl. Warn-, Alarmierung und SMS-Warndienst
- Ausbau GPS-Messnetz (November 2019); Überprüfung Ausstattung der GPS-Stationen
- Laufende Überprüfung der Gefahrenstufen und Sicherheitszonen

Weiterführende technische Untersuchungen / Zukünftiges Monitoring:

- Installation des Radars im Juni/Juli 2020; ggf. Dauerbetrieb für Frühwarn-dienst
- Ausbau Messung der Oberflächentemperaturen/BTS [10] (UTL)
- Etablierung automatisierter Bildauswertung auf Basis der hochauflösenden Kamera (Lösen der Probleme mit der Autofocus-Funktion)
- Sondierbohrungen inkl. Thermistorenausbau und Georadarmessungen
- Modellierung der Permafrostdegradation unter Berücksichtigung der diskutierten Wärmeeinträge
- Wiederholungsbefliegung mit Drohne; Bildvergleiche und Volumenberechnungen

- Option: Montage hochauflösende Kamera auf Rosshubel
- Option: Laserscan von verschiedenen Standorten
- Option Versetzen autonomer Testlogger für T-Messungen

10. Schlussbemerkungen

Mit den Untersuchungen und dem Monitoring 2019 konnten zahlreiche neue Erkenntnisse gewonnen und darauf basierend das geologische Modell erheblich präzisiert werden. So sind die Geometrien und Kausalitäten erheblich besser bekannt als im Frühjahr 2019. Aufgrund fehlender Erkenntnisse realer Abbrüche bestehen hinsichtlich der Abbruchszenarien noch erhebliche Kenntnislücken. Die heutigen Modellvorstellungen sind mit den Beobachtungen sowie weiteren Untersuchungen zu überprüfen und laufend zu präzisieren.

Die Erkenntnisse und Beobachtungen vom 2019 bringen auch zahlreiche neue Fragen, welche im Rahmen der Untersuchungen 2020 zu beantworten sind.

Die Erkenntnisse von 2019 zeigen auch mögliche Optimierungen hinsichtlich Datenerhebung und –auswertung sowie Kommunikation, welche aktiv angegangen werden müssen. Ziel ist einen optimalen Ablauf im Monitoring sowie in der Frühwarnung zu erreichen. Vorschläge hierfür wurden in Kapitel 8 bereits formuliert.

11. Literaturverzeichnis

- [1] CSD (2019) : Grossrutschung und Sackungsmasse Brienz/Brinzauls ; Deformationsraten von grossen Hangrutschungen – Literaturstudie, 12.04.2019, Thusis, 7 S.
- [2] Draebing D., Krautblatter, M. Dikau R. (2014): Interaction of thermal and mechanical processes in steep permafrost rock walls: a conceptual approach. In: Geomorphology 226:226-235.
- [3] Gamma Remote Sensing (2018): Radarinterferometrische Analyse Bewegungen 2018 bis 8. August 2018, 5 Folien.
- [4] Gamma Remote Sensing AG (2018): Radarinterferometrische Auswertung Gleitflächen, 10. Dezember 2018, 28. Folien.
- [5] Gamma Remote Sensing (2019): Kurzdokumentation der Messkampagne „bim Spitze Stei“ mit dem GAMMA Portable Radar Interferometer (GPRI), Präsentation, S. 24, Gümligen.
- [6] Gamma Remote Sensing (2019): Kurzdokumentation InSAR Zeitserie 1991-2019 „Bim Spitze Stei“, Präsentation, S. 17, Gümligen.
- [7] Gemeinde Kandersteg (2019): Protokoll Besprechung „Spitzer Stein“, neue Erkenntnisse und weiteres Vorgehen inkl. Beilagen (Präsentation GEOTEST AG), 18.03.2019, Kandersteg.
- [8] Gemeinde Kandersteg (2019): Protokoll Besprechung „Spitzer Stein“, neue Erkenntnisse und weiteres Vorgehen inkl. Beilagen (Präsentationen Abt. Naturgefahren und GEOTEST AG), 14.08.2019, Kandersteg.
- [9] GEOTEST AG (2019): Bericht Nr. 1418139.1, Einwohnergemeinde Kandersteg, Kandersteg, „Spitze Stei“, Expertenbericht Phase A und B, 08.04.2019, Zollikofen.
- [10] Haerberli, W. (1973). Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 9, 221-227.
- [11] Hilbich Chr., Hauck Chr. (2019): Geophysikalische Untersuchungen im Gebiet des „Spitze Stei“, Berner Oberland, Juli 2019, Bericht, Oktober 2019, Departement Geowissenschaften Universität Fribourg, 09.10.2019, S. 21, Fribourg
- [12] Jaboyedoff et al. (2012): Fast assessment of susceptibility of massiv rock instabilities, 7 S.
- [13] KAWA, Abt. Naturgefahren (2018): Grundlagenbericht Gefahrenmanagement „Spitze Stei“, Dezember 2018, 45 S.
- [14] KAWA, Abt. Naturgefahren (2019): Fotodokumentation, Befliegung vom 01.10.2019 – Veränderungen anhand von Fotovergleichen.

- [15] KAWA, Abt. Naturgefahren (2019): Fotodokumentation, freigelegtes Eis, Begehung vom 01.10.2019.
- [16] KAWA, Abt. Naturgefahren (2019): Bericht zur Analyse der Bewegungsraten und deren Entflussparameter, 18. November 2019, 40 S.
- [17] KAWA, Abt. Naturgefahren (2018): Überwachung spitze Stei, Fotodokumentation Tachymeterische Messpunkte, 24.10.2018.
- [18] Knapp S. (2018): Wiederkehrintervalle von Fels- und Bergstürzen abgeleitet aus sedimentologischen Untersuchungen (Oeschinensee und Eibsee), Forschungsstelle Rutschungen Weiterbildungsseminar 2018, 3 S.
- [19] Knapp et al., Multistage Rock-Slope Failures Revealed in Lake Sediments in a Seismically Active Alpine Region (Lake Oeschinen, Switzerland), *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, 20 S.
- [20] Kenner et al. (2019): How rock glaciers hydrology, deformation velocities and ground temperatures interact: Examples from the Swiss Alps, *Permafrost and periglac. Processes*, 23.07.2019, 12 S.
- [21] Koepfli et al. (2005): The Oeschinensee rock avalanche, Bernese Alps, Switzerland: a co-seismic failure 2300 years ago? *Swiss Journal of Geosciences*, 2018, 18 S.
- [22] Krautblatter M., Funk, D., Günzel, F.K. (2013): Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space; *Eraht surface processes and landforms*, 38, 876-887, DOI: 10.1002/esp.3374.
- [23] Loye A., Jaboyedoff M., Pedrazzini A. (2009): Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1643–1653, Institute of Geomatics and Risk Analysis, University of Lausanne, Lausanne.
- [24] Mollaret et al. (2019): Mountain permafrost degradation documented through a network of permanent electrical resistivity tomography sites, 30.09.2019, 22 S.
- [25] Mamott P., Weber S., Schröder T., Krautblatter M. (2018): A temperature- and stress-controlled failure criterion for ice-filled permafrost rock joints, *The Cryosphere*, 12, 333-3353.
- [26] PERMOS (2019): Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. Noetzli, J., Pellet, C. and Staub, B. (eds.), *Glaciological Report Permafrost No. 16-19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences*, 104 S.
- [27] Scherler M., Hauck C., Hoelzle M., Stähli M. and Völksch I.: (2010), Melt-water infiltration into the frozen active layer at an alpine permafrost site. *Permafrost Periglac. Process.*, 21: 325-334. doi:[10.1002/ppp.694](https://doi.org/10.1002/ppp.694)

- [28] SED (2019): Seismic investigation of the rock slope instability Spitze Stei (Oeschinensee) BE, 19.08.2019, 6 S.
- [29] Tinner et all (2005): Der nacheiszeitliche Bergsturz im Kandertal (Schweiz): Alter und Auswirkungen auf die damalige Umwelt, Ecolgae Geologicae Helvetiae, 2005, 15 S.
- [30] Wyss&Früh AG (2019): Monitoring Spitze Stei, Berechnung des Gleitwinkels, Messung 0 (Pt. 71 – 76 Messung 12) – Messung 24, 02.10.2019, Unterseen.
- [31] Wyss&Früh AG (2019): Basismonitoring Spitze Stei, Verschiebungsvektoren horizontal, Messung 0 – Messung 24, Massstab 1:10'000 inkl. Messdaten, 02.10.2019, Unterseen.

Karte der Phaenomene
1 : 5'000

1148500



1148500

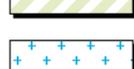
1148000

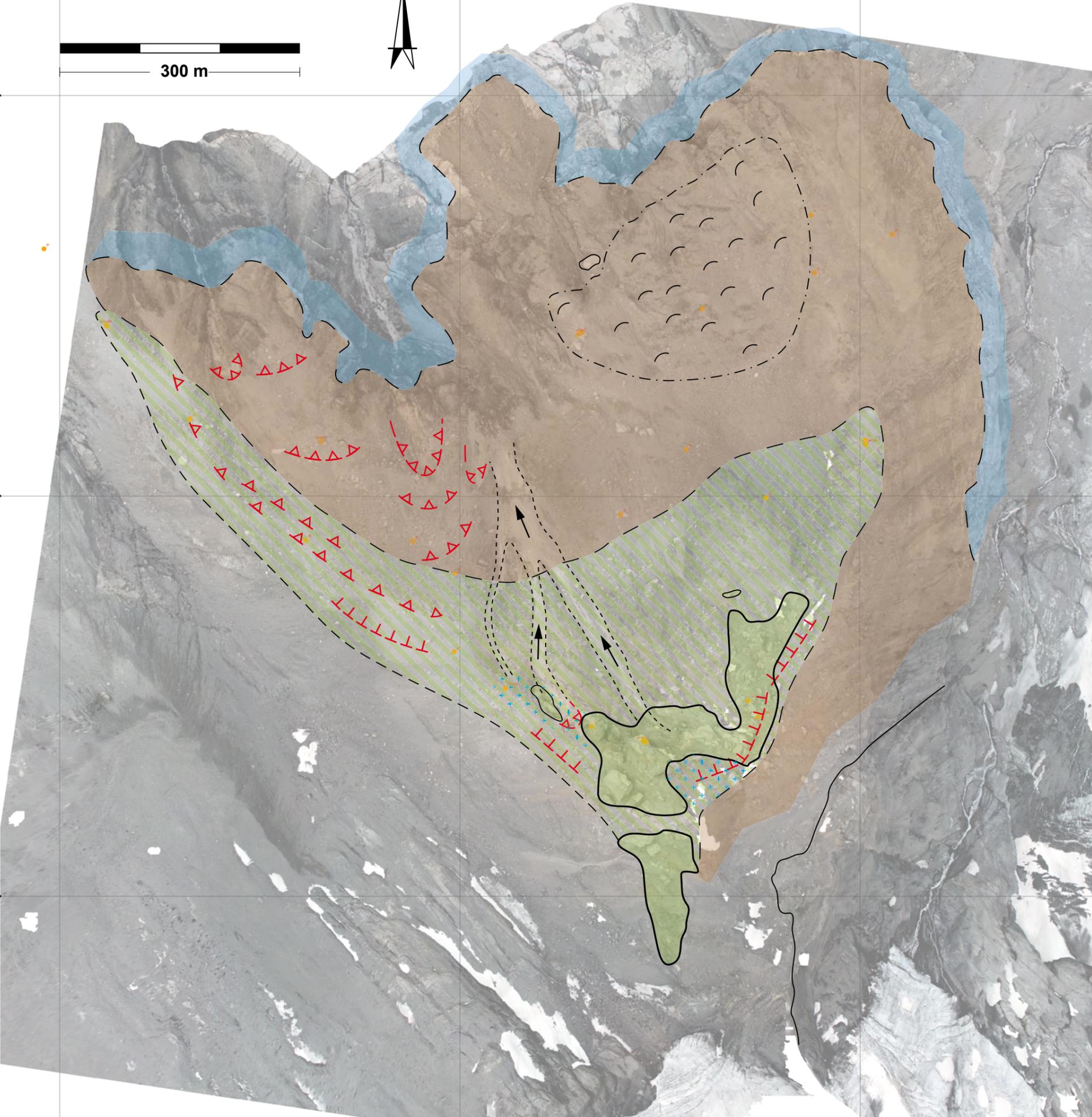
1148000

1147500

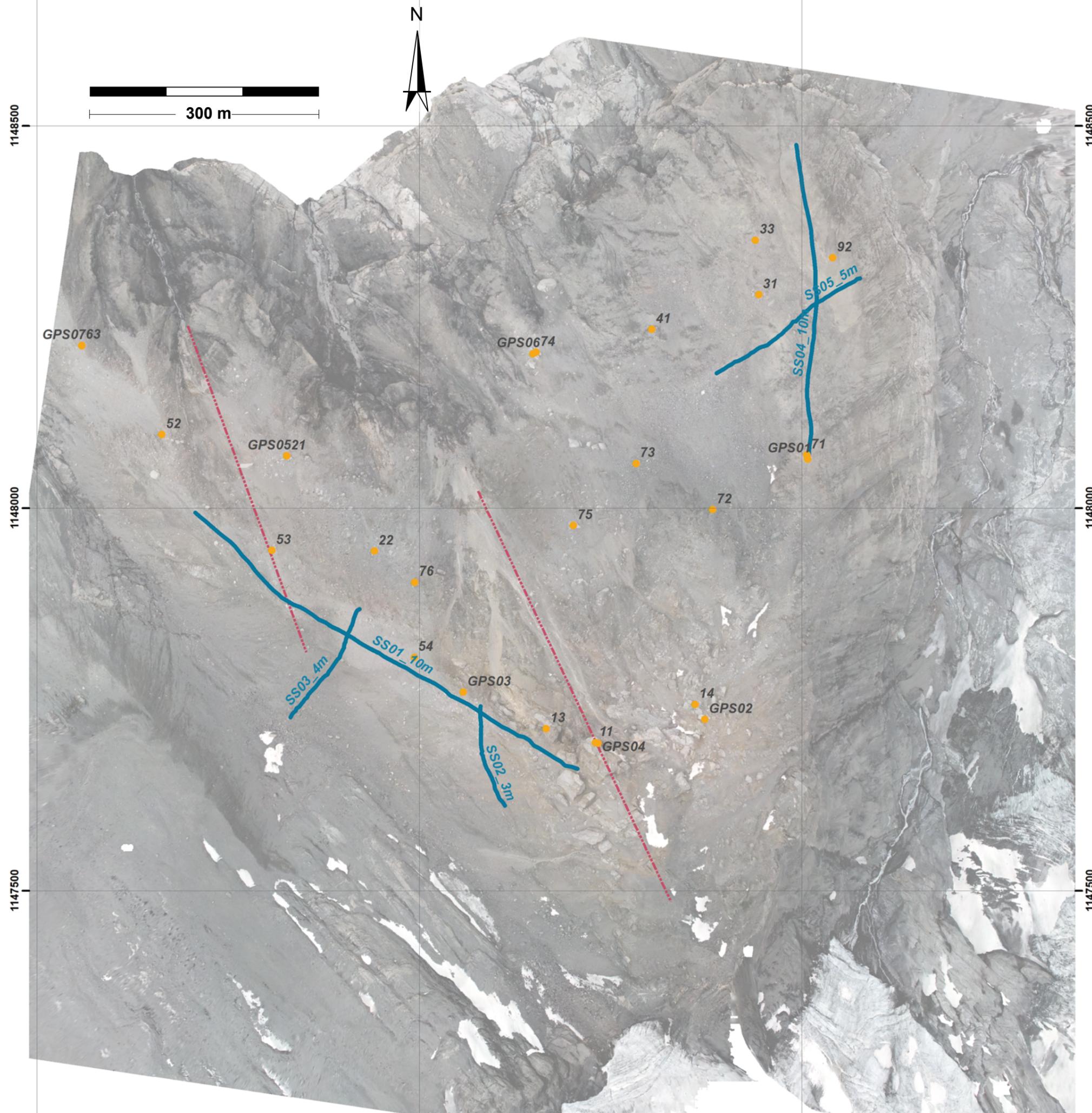
1147500

LEGENDE

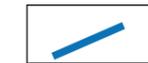
-  zerrütteter Fels
-  zerrütteter Fels unter geringmächtigem Schutt
-  Nackentälchen
-  Abbruchkante im Lockermaterial
-  Steinschlagrinne
-  Blockgletscher
-  Öhrlikalk
-  Quintner-Formation
-  Zementsteinschichten unter geringmächtigem Schutt
-  Öhrlikalk unter geringmächtigem Schutt
-  Aufgeschlossener Permafrostkörper



Übersichtskarte Messpunkte/-profile
1 : 5'000



LEGENDE

-  Profile Geophysik
-  Profile Stabilitätsberechnungen
-  Messpunkte (GPS und Tachymetrie)

Anhang 3: Fotodokumentation



Abbildung 1: Ansicht Westgrat und Gipfelbereich



Abbildung 2: Ansicht Gipfel-/Felsbereich (Blickrichtung Südost)



Abbildung 3: Ansicht Gipfelbereich (Blickrichtung Ost)



Abbildung 4: Ansicht Gipfelbereich (Blickrichtung Nordwest)



Abbildung 5: Ansicht Gipfelbereich (Blickrichtung Nordwest, von schräg oben)

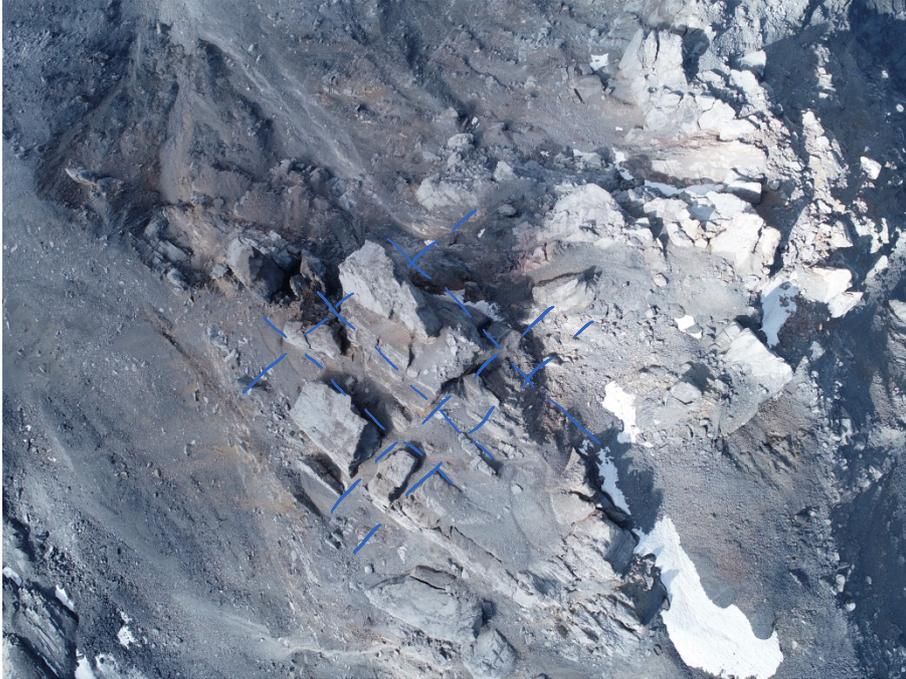


Abbildung 6: Ansicht Gipfelbereich (Vogelperspektive)



Abbildung 7: Ansicht Gipfel-/Felsbereich (Blickrichtung Südwest)



Abbildung 8: Ansicht Gipfel-/Felsbereich (Blickrichtung Süd)

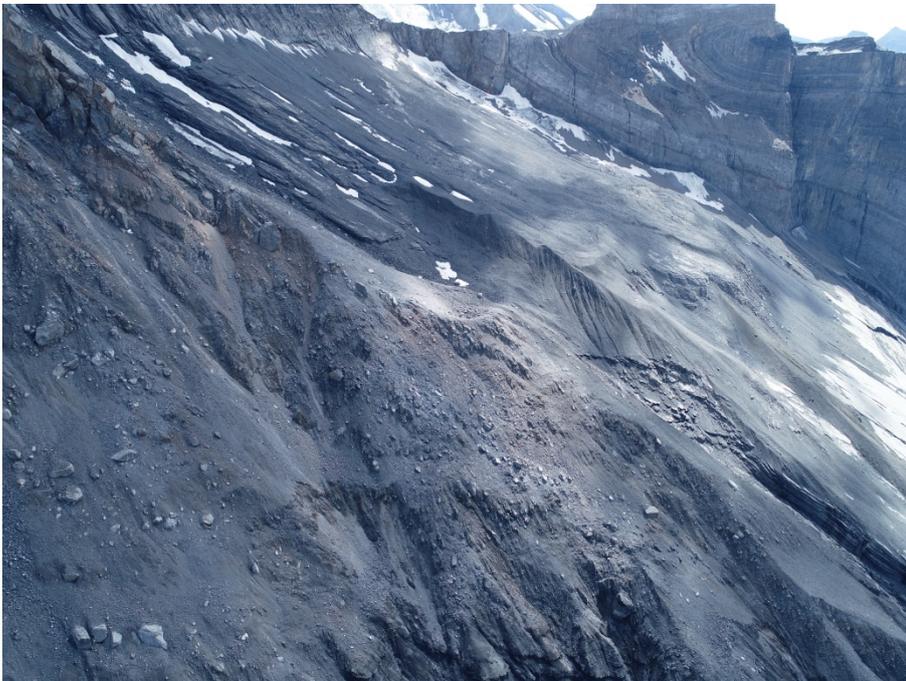


Abbildung 9: Ansicht Westflanke (Blickrichtung West)



Abbildung 10: Ansicht Westflanke (Blickrichtung Nordwest)



Abbildung 11: Ansicht Westflanke (Blickrichtung Nordwest, von schräg oben)



Abbildung 12: Ansicht Ostflanke und Fels-/Gipfelbereich (Blickrichtung Südwest)

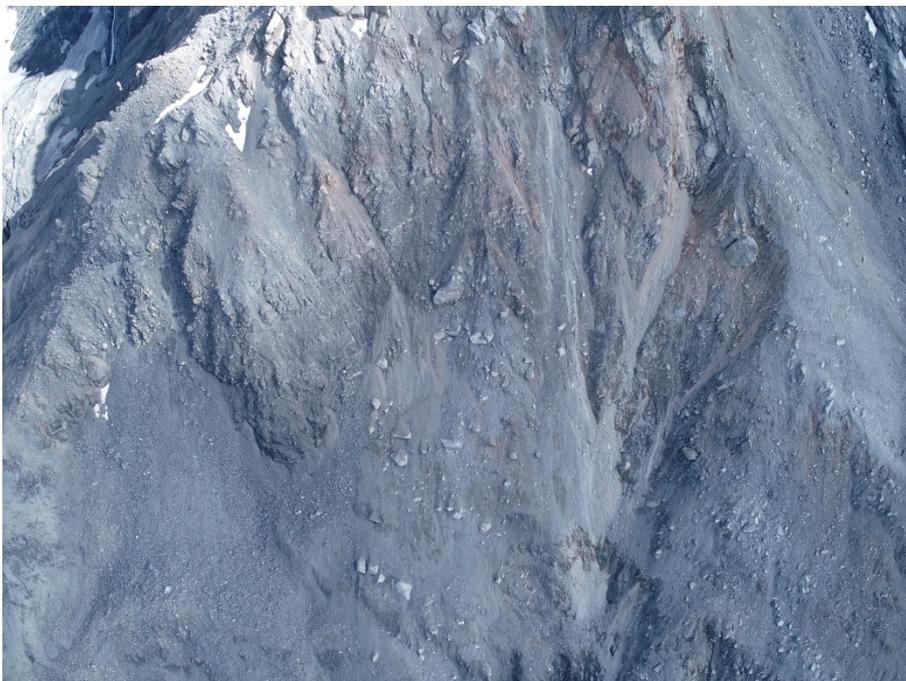


Abbildung 13: Ansicht Zentrum Übergang Fels/Gehängeschutt (Blickrichtung Süd)



Abbildung 14: Ansicht Kontakt Zementsteinschichten / Quinten-Kalke im Fussbereich des „Spitze Steis“



Abbildung 15: Permafrostauflüsse im Gipfelbereich



Abbildung 16: In-Situ Verwitterung durch Frostsprengung des Öhrlikalkes

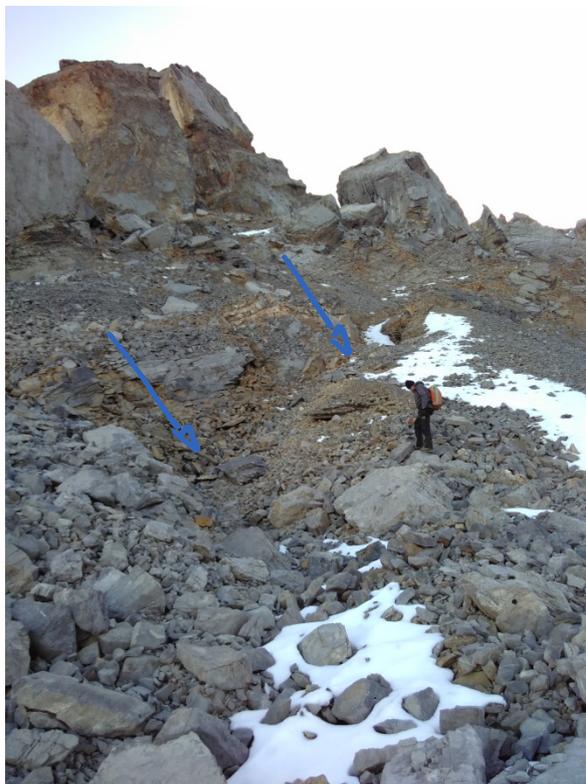


Abbildung 17: Aktive Abrisskante Westgrat (Blickrichtung Süd)



Abbildung 18: Aktive Abrisskante am Westgrat (Oktober 2019)



Abbildung 19: Ansicht des Westgrates (Fotostandort: Westlich des Staubbachs).

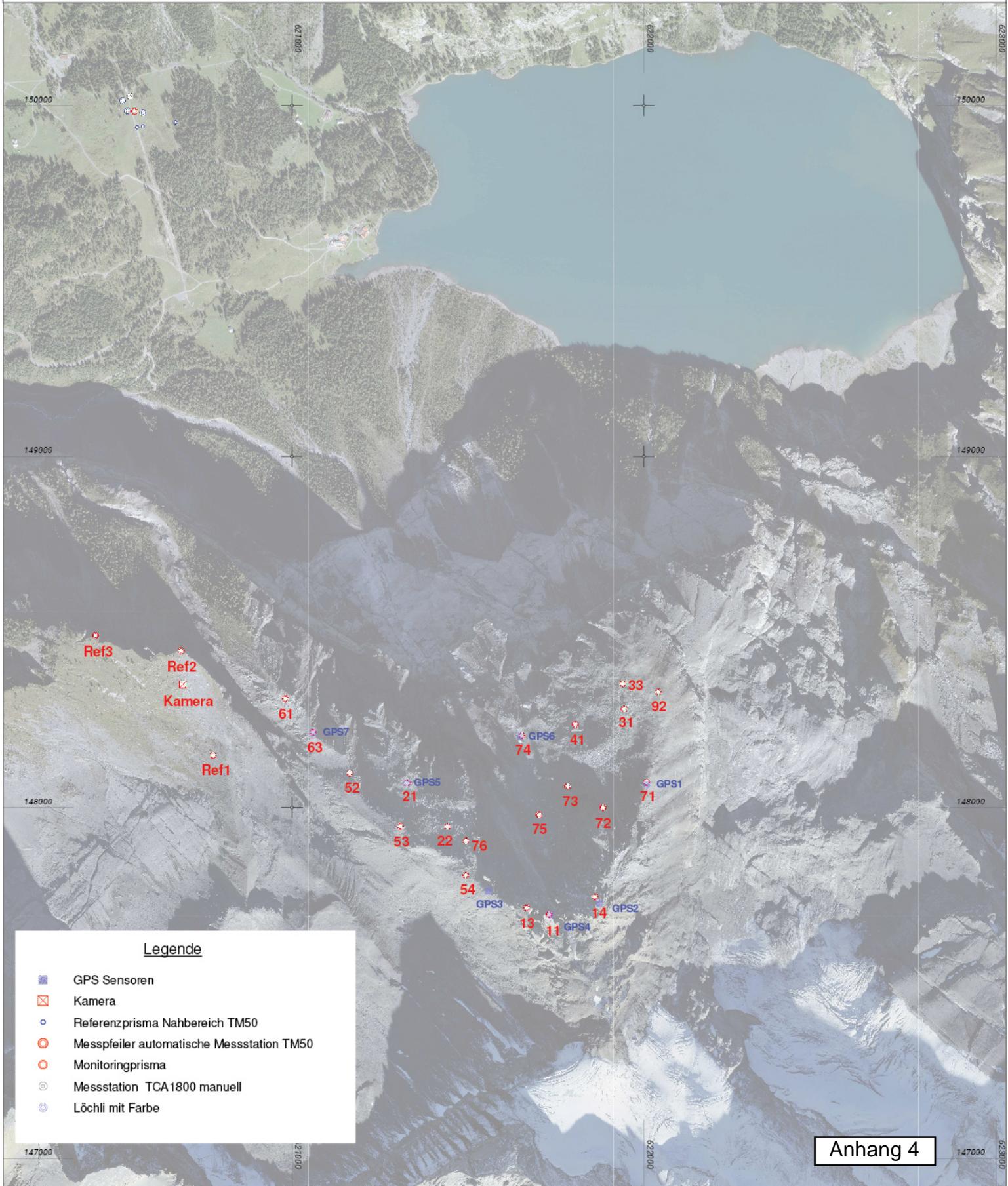
Gemeinde Kandersteg

Masstab 1:10000

Basismonitoring Spitze Stei



06.08.2019
 Wyss + Früh
 Geomatik und Bauvermessung
 Weissenaustrasse 19
 3800 Unterseen



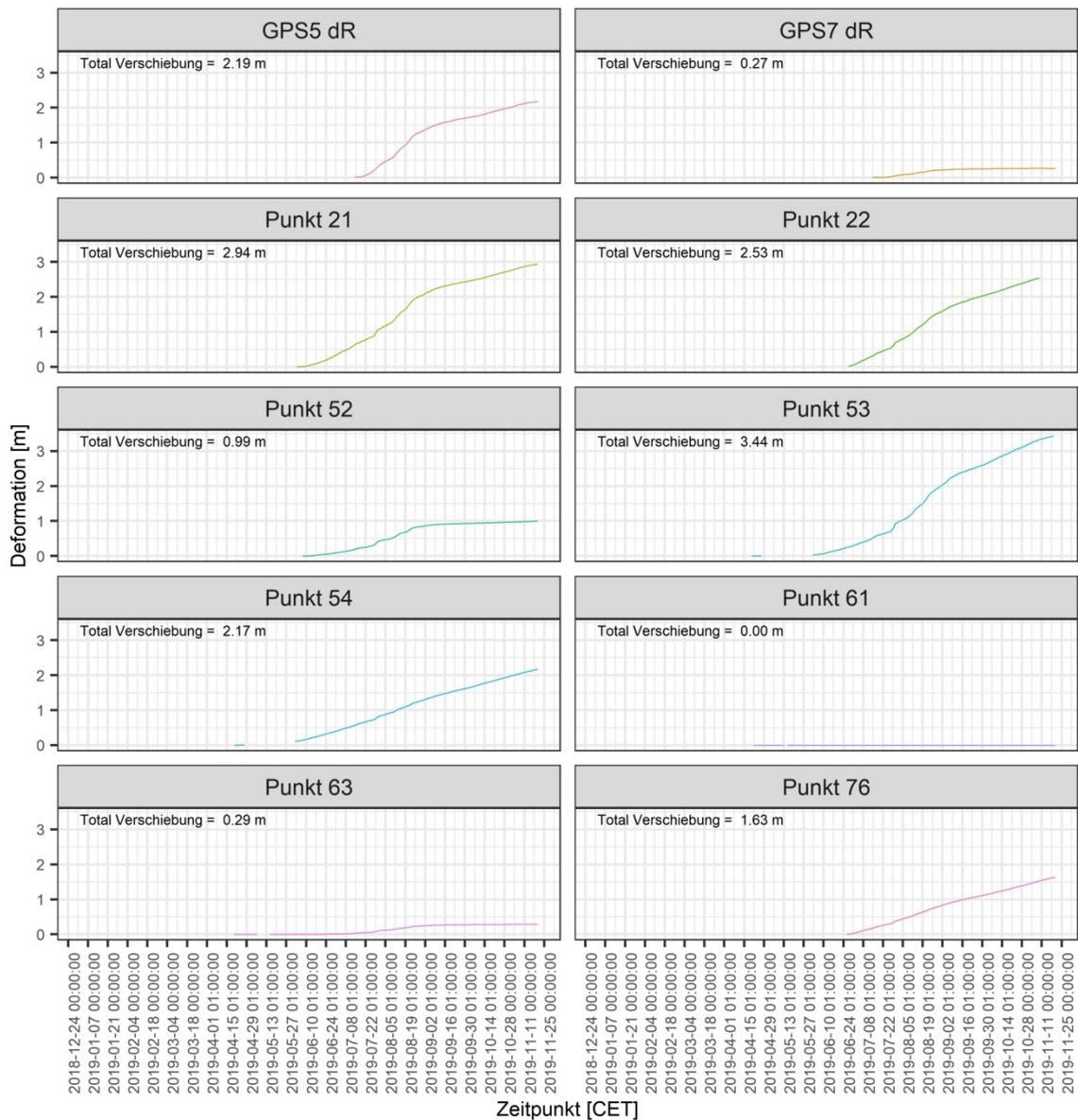
Legende

-  GPS Sensoren
-  Kamera
-  Referenzprisma Nahbereich TM50
-  Messpfiler automatische Messstation TM50
-  Monitoringprisma
-  Messstation TCA1800 manuell
-  Löchli mit Farbe

Anhang 4

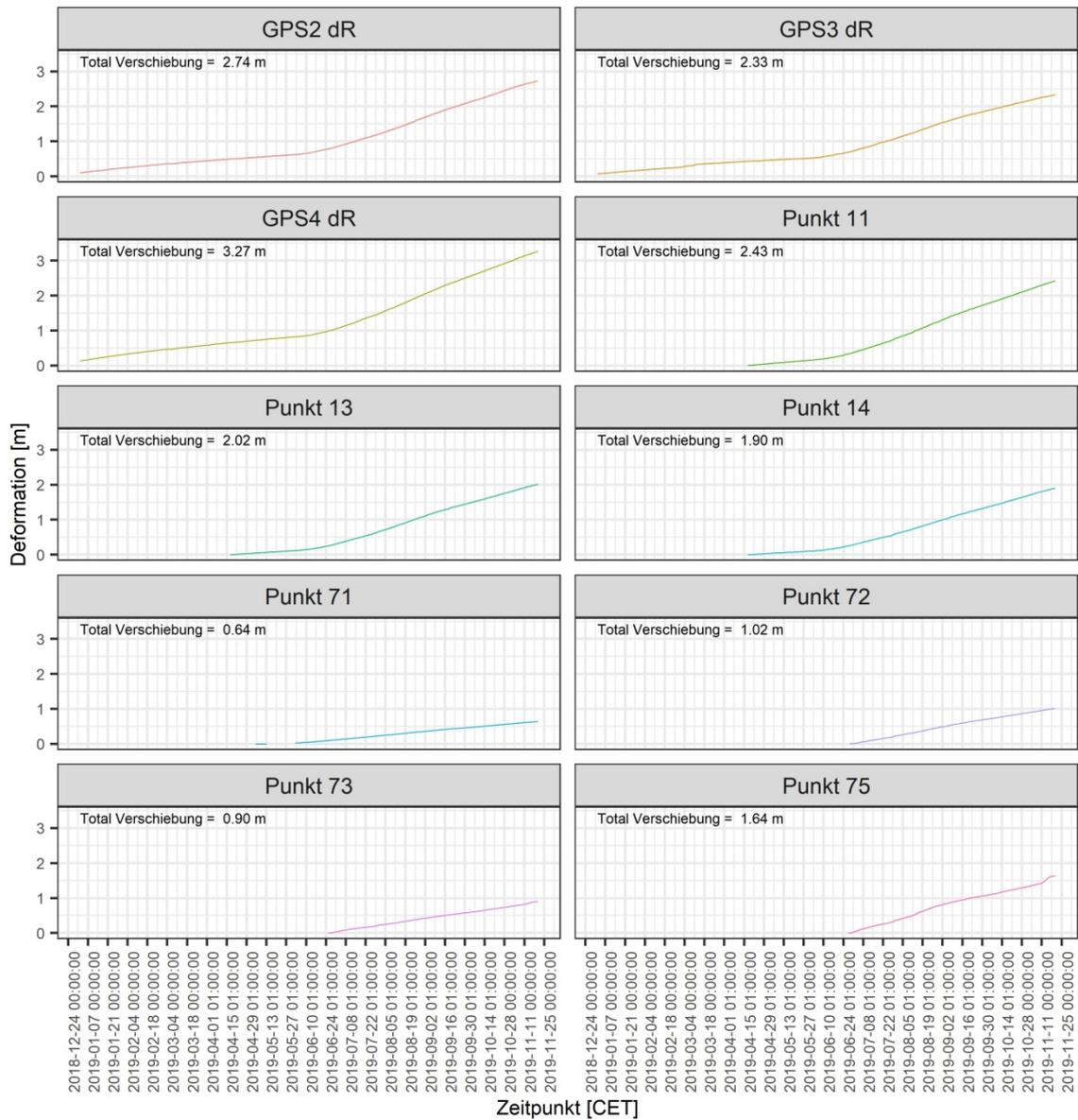
Anhang 5: Deformationen und Geschwindigkeiten GPS- und Tachymetermessungen

1. Deformation Schuttrutschung (Westflanke)



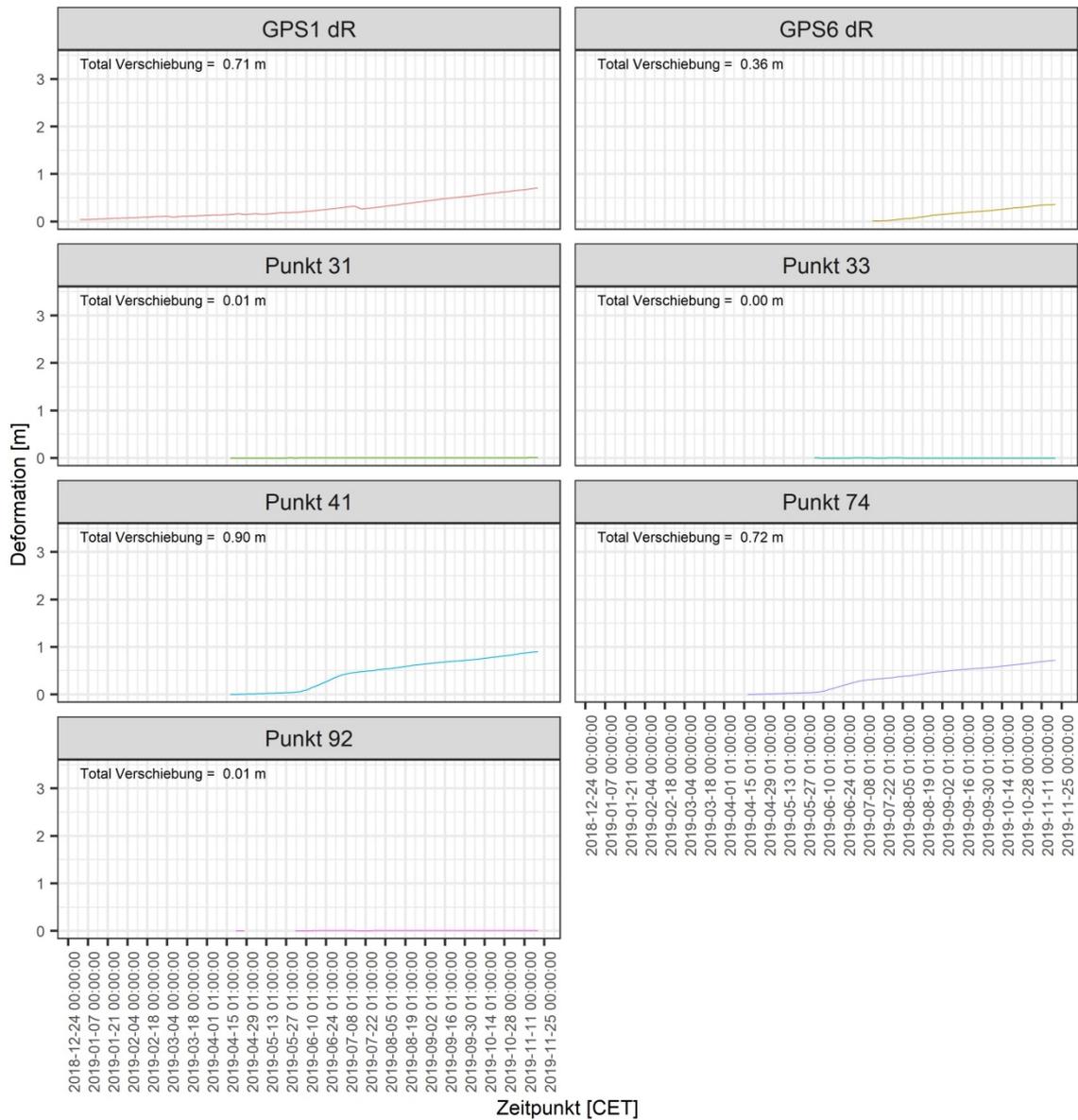
Zeitpunkt der Auswertung: 2019-11-27 10:55:38 / Punkte pro Tag = 1
P:\Projekte\14 Ingenieurgeologie\2018\1418 139 Kandersteg, Spitze Stei\50_Auswertung\Lagebeurteilungen\Gam\1418139_R_Project_1_O_Auswertung_Daten

2. Deformation Felsrutschung (Gipfel- und Felsbereich)



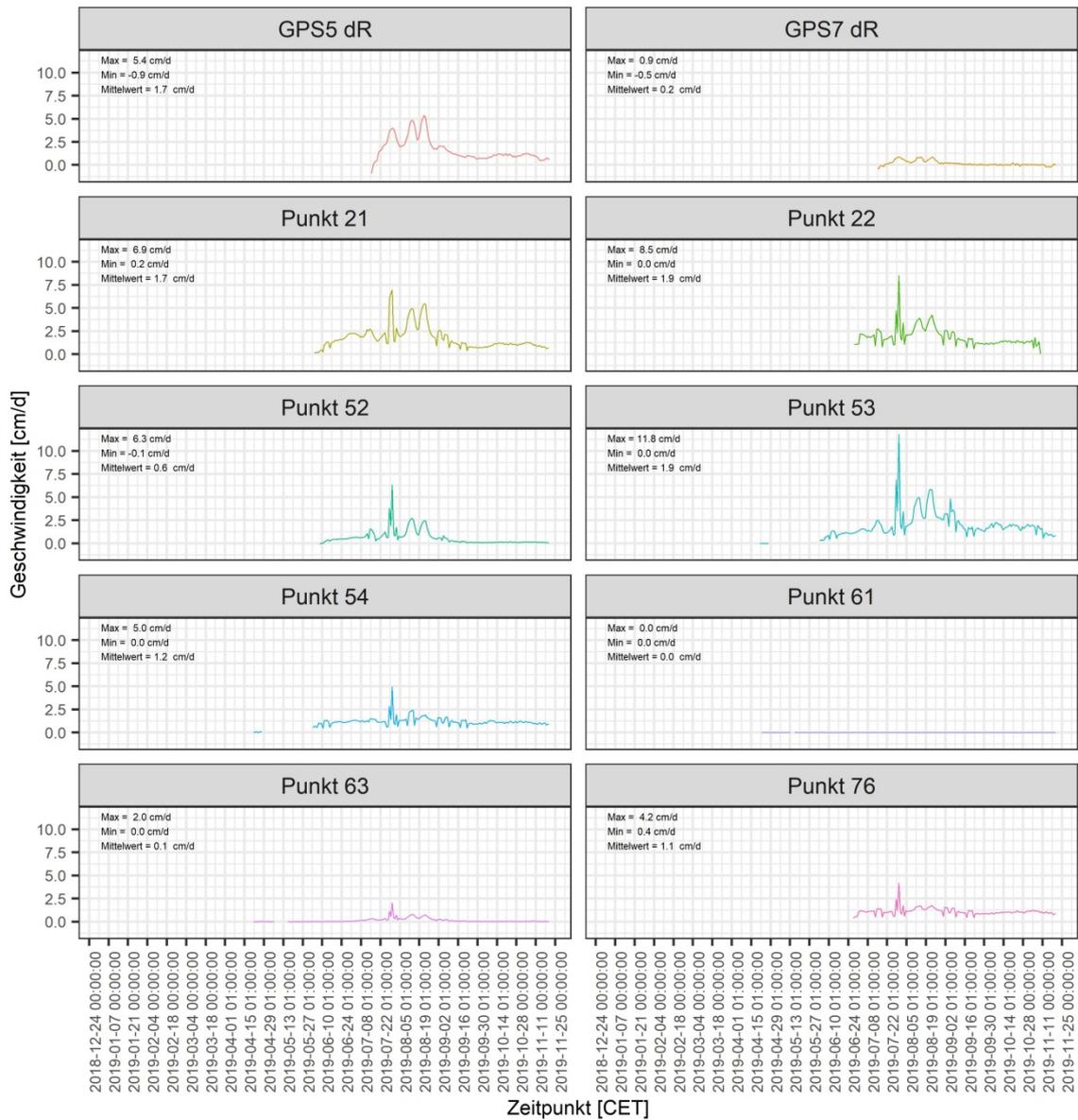
Zeitpunkt der Auswertung: 2019-11-27 10:55:36 / Punkte pro Tag = 1
P:\Projekte\14 Ingenieurgeologie\2018\1418 139 Kandersteg, Spitze Stei\50_Auswertung\Lagebeurteilungen\Gam\1418139_R_Project_1_O_Auswertung_Daten

3. Deformation Blockgletscher und Ostgrat



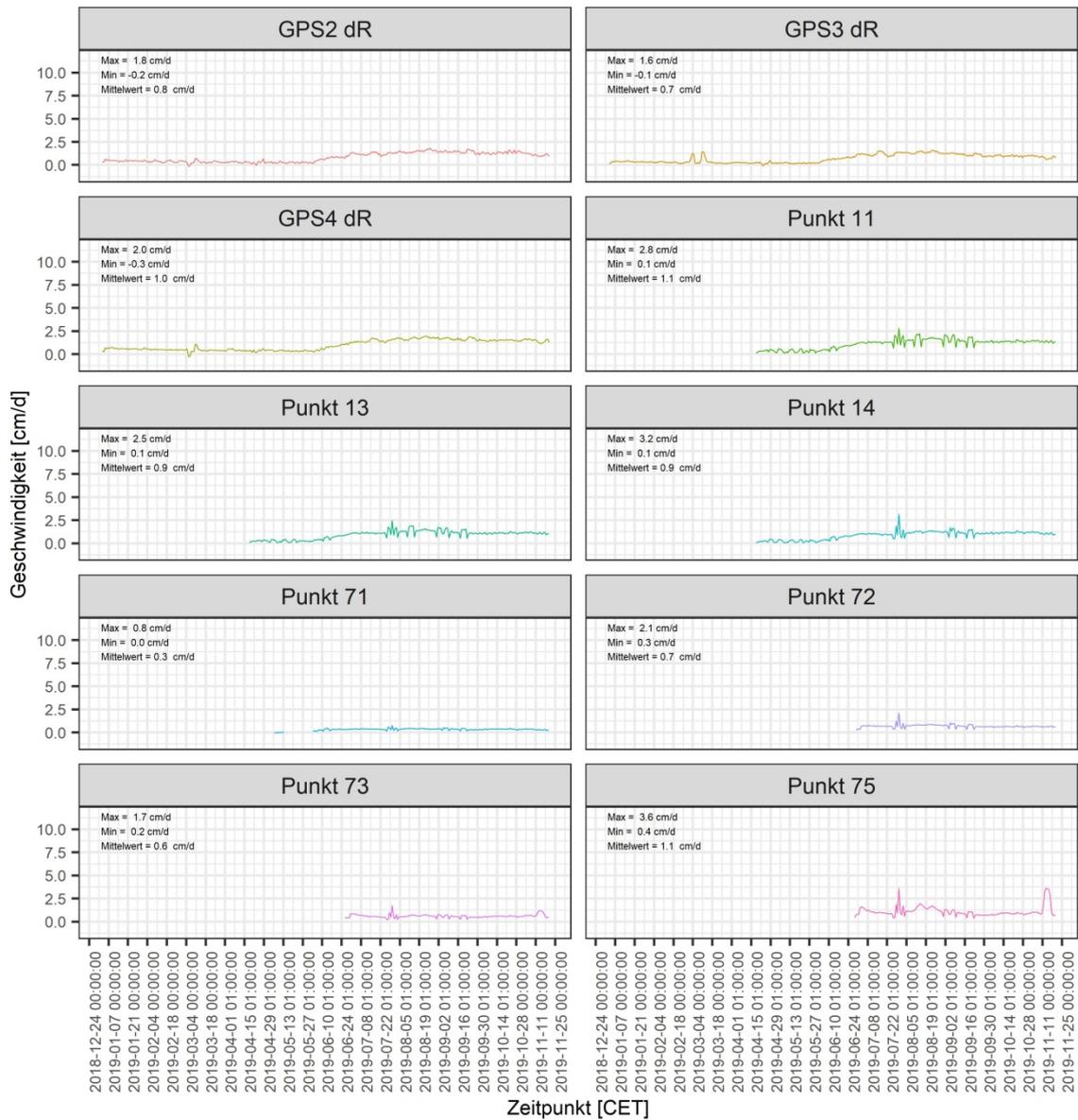
Zeitpunkt der Auswertung: 2019-11-27 10:55:41 / Punkte pro Tag = 1
P:\Projekte\14 Ingenieurgeologie\2018\1418 139 Kandersteg, Spitze Stei\50_Auswertung\Lagebeurteilungen\Gam\1418139_R_Project_1_O_Auswertung_Daten

4. Geschwindigkeit Schuttrutschung (Westflanke)



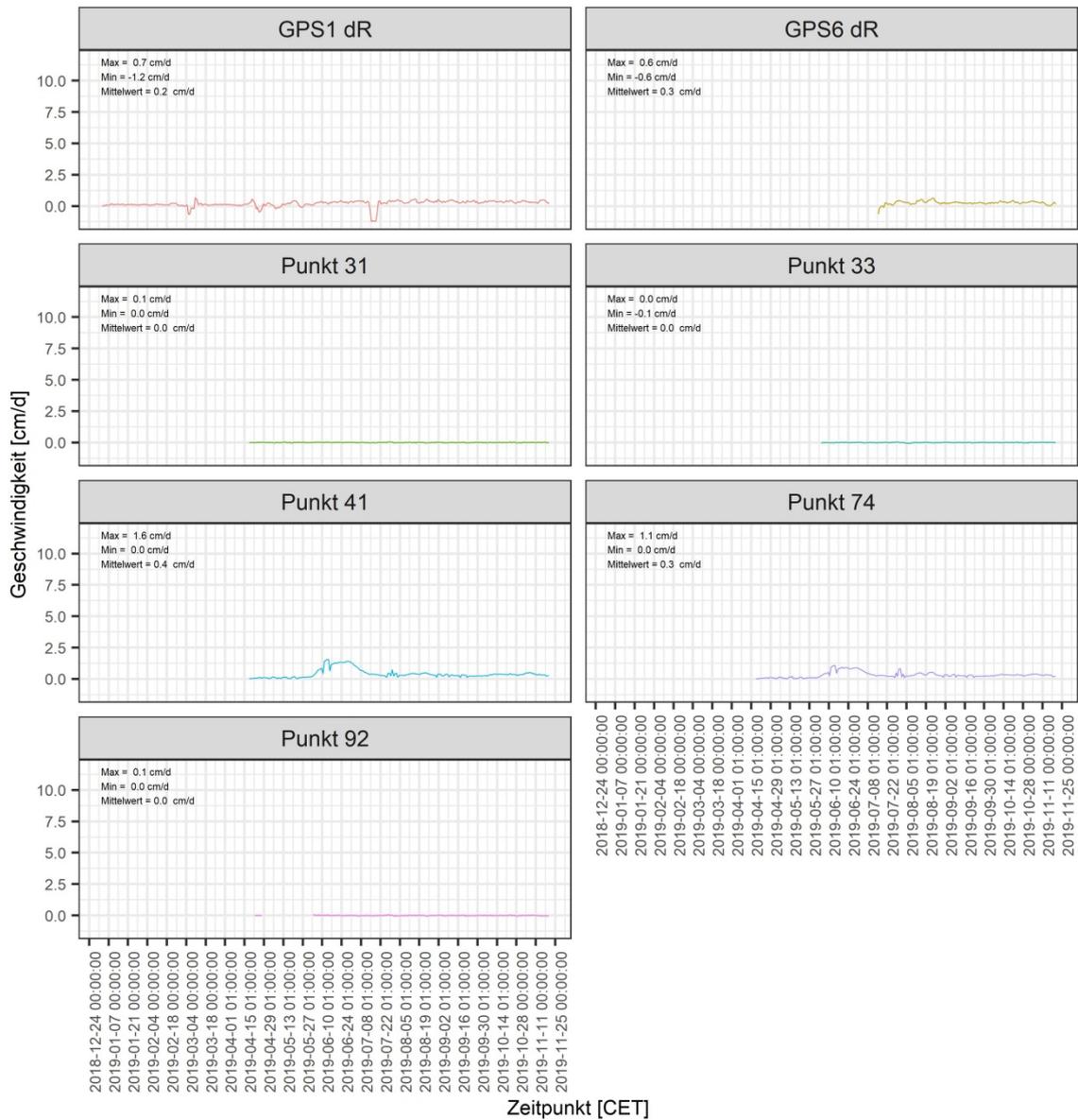
Zeitpunkt der Auswertung: 2019-11-27 10:56:24 / Punkte pro Tag = 1
P:\Projekte\14 Ingenieurgeologie\2018\1418 139 Kandersteg, Spitze Stei\50_Auswertung\Lagebeurteilungen\Gam\1418139_R_Project_1_0_Auswertung_Daten

5. Geschwindigkeit Felsrutschung (Gipfel- und Felsbereich)



Zeitpunkt der Auswertung: 2019-11-27 10:56:22 / Punkte pro Tag = 1
P:\Projekte\14 Ingenieurgeologie\2018\1418 139 Kandersteg, Spitze Stei\50_Auswertung\Lagebeurteilungen\Gam\1418139_R_Project_1_0_Auswertung_Daten

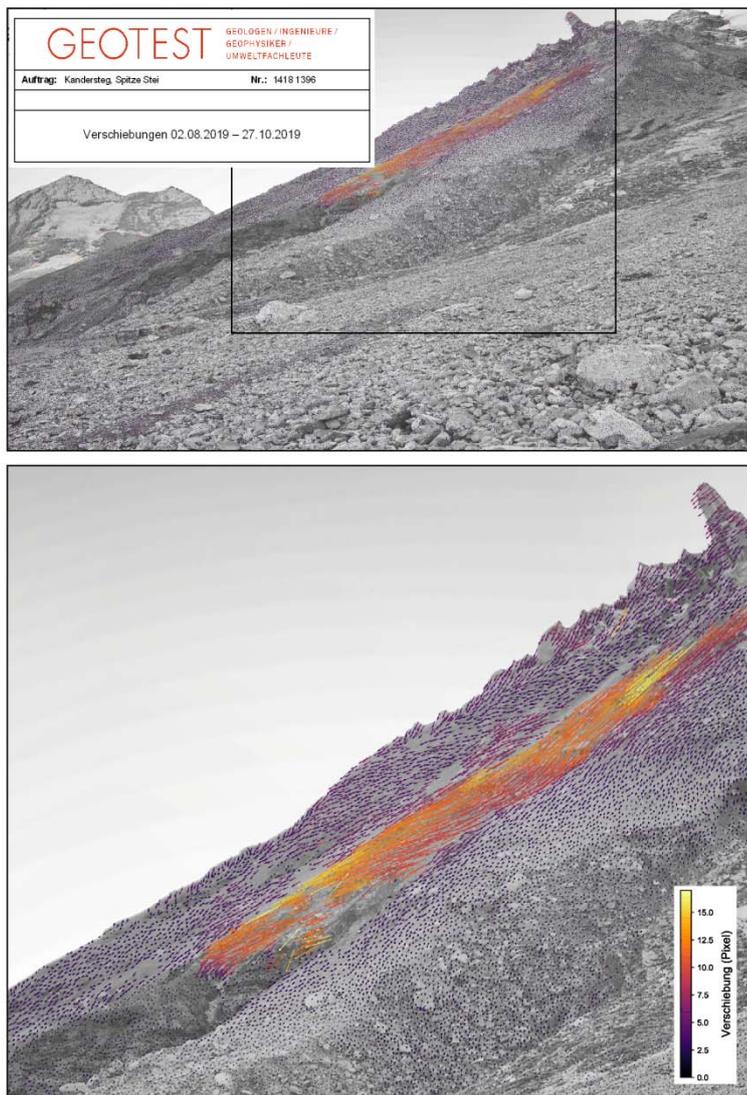
6. Geschwindigkeit Blockgletscher und Ostgrat



Zeitpunkt der Auswertung: 2019-11-27 10:56:27 / Punkte pro Tag = 1
P:\Projekte\14 Ingenieurgeologie\2018\1418 139 Kandersteg, Spitze Stei\50_Auswertung\Lagebeurteilungen\Gam\1418139_R_Project_1_O_Auswertung_Daten

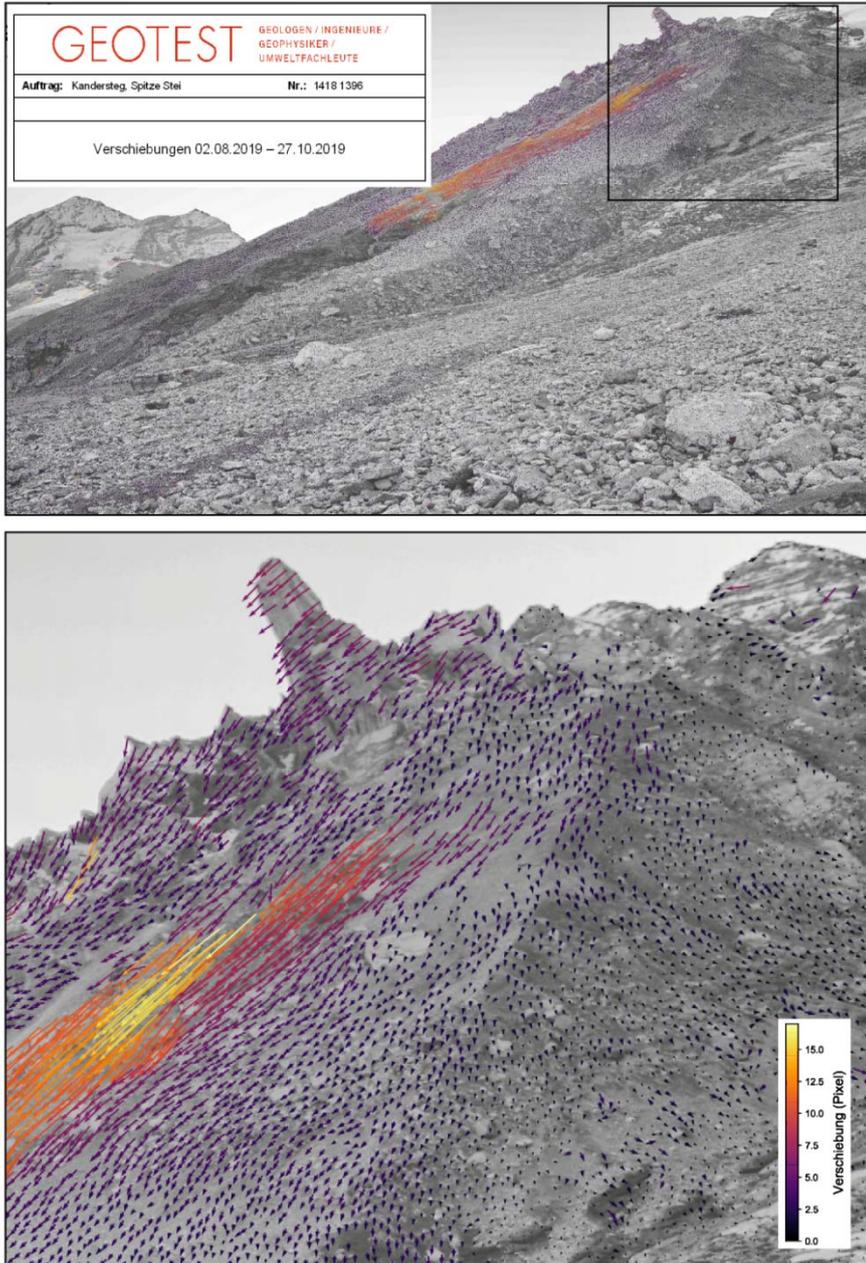
Anhang 6: Bildauswertung hochauflösende Kamera

1. Feature Tracking Schuttrutschung „Gesamt“, August – Oktober 2019



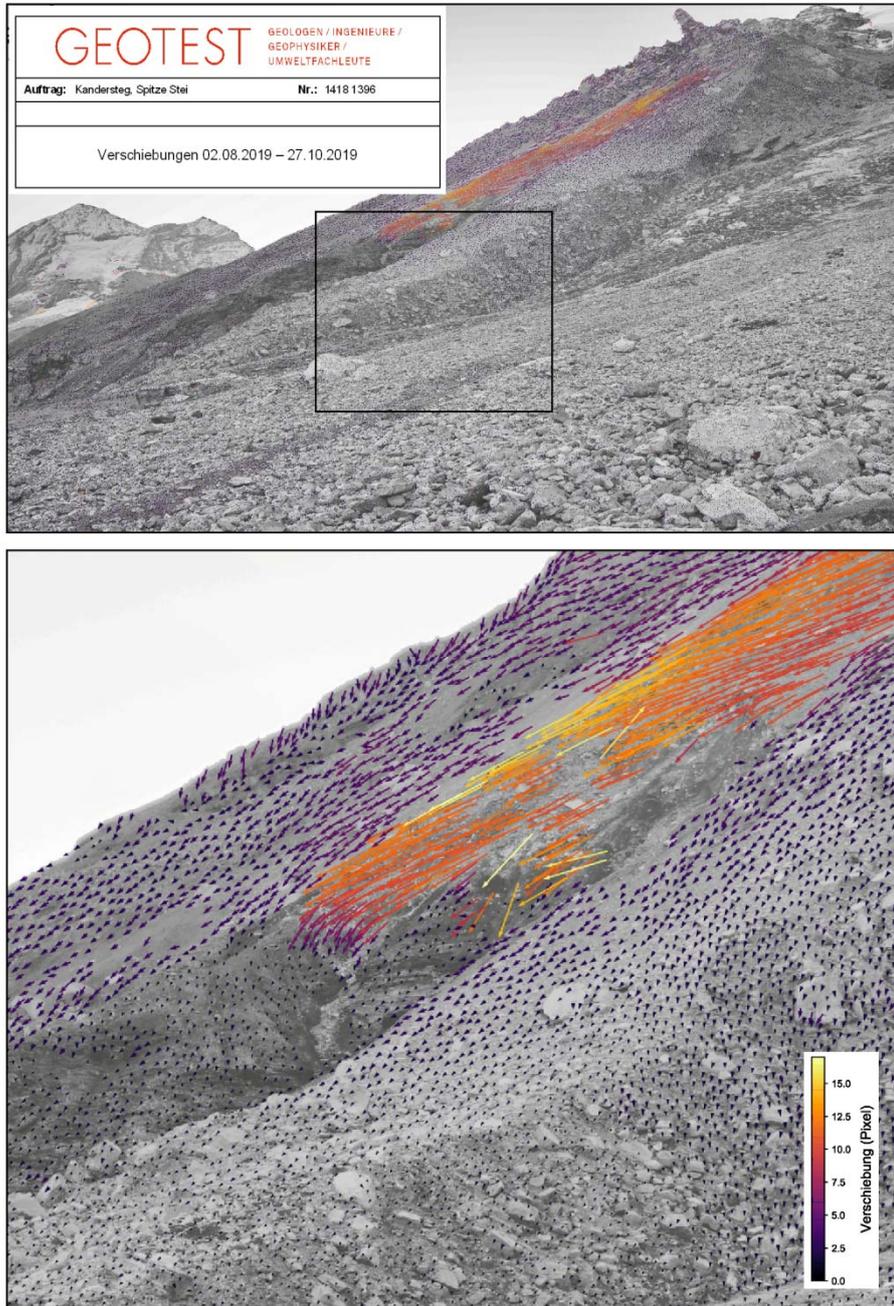
Automatisch detektierte Verschiebungen unterhalb des „Spitze Stei“ für den Zeitraum 02.08.2019 – 27.10.2019. Die abgebildeten Vektoren sind um Faktor 10 verlängert. Ersichtlich ist die schnell fließende oberflächliche Rutschung, umgeben von langsamer fließendem Schutt.

2. Feature Tracking Schuttrutschung „Oben“, August – Oktober 2019



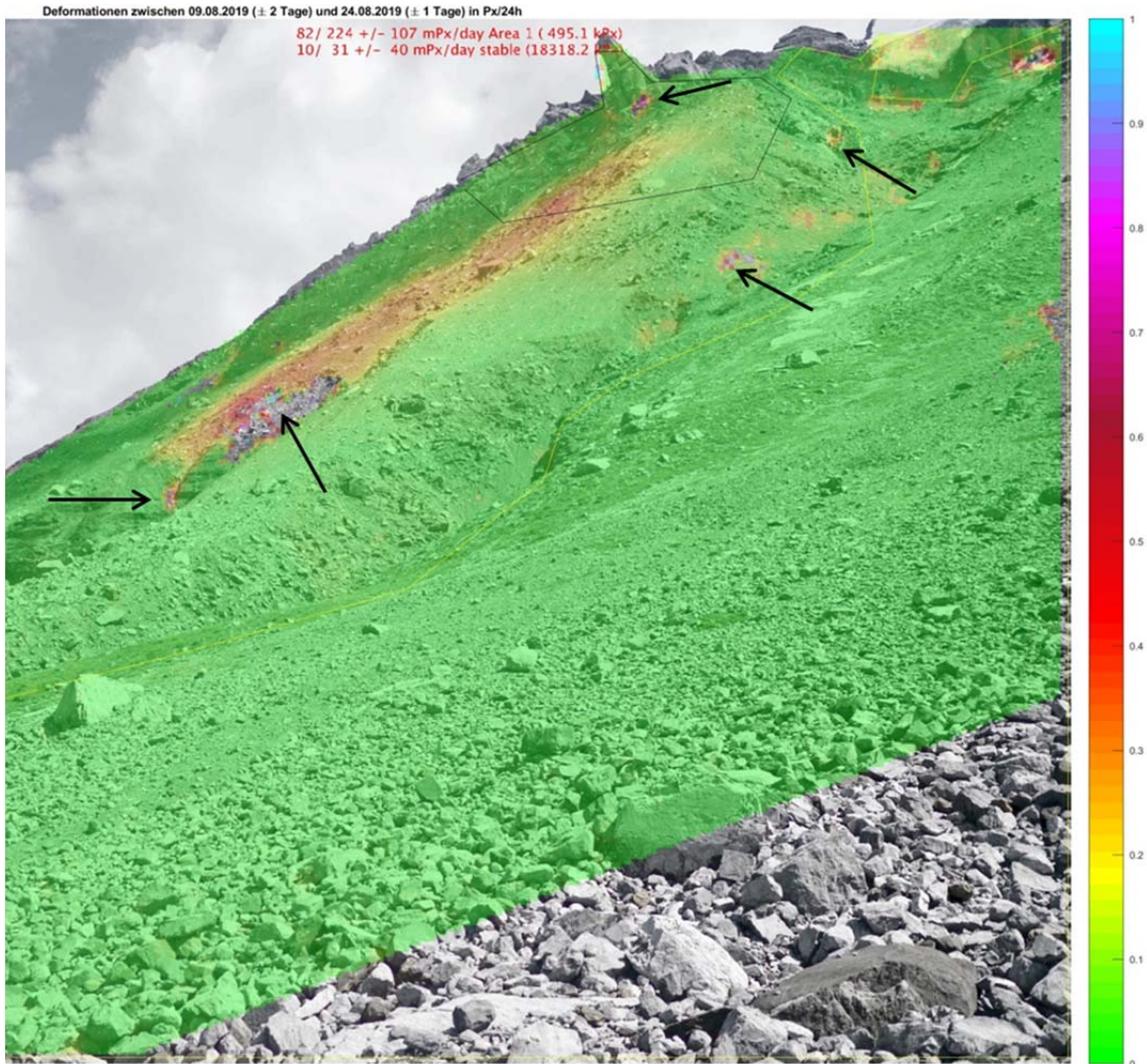
Automatisch detektierte Verschiebungen unterhalb des „Spitze Stei“ für den Zeitraum 02.08.2019 – 27.10.2019. Ersichtlich ist der obere Teil der schnell fließenden Rutschung, der rotierende Felsturm des „Spitze Stei“, sowie die langsam versackende Moräne des Doldenhorngletschers.

3. Feature Tracking Schuttrutschung „Unten““, August – Oktober 2019



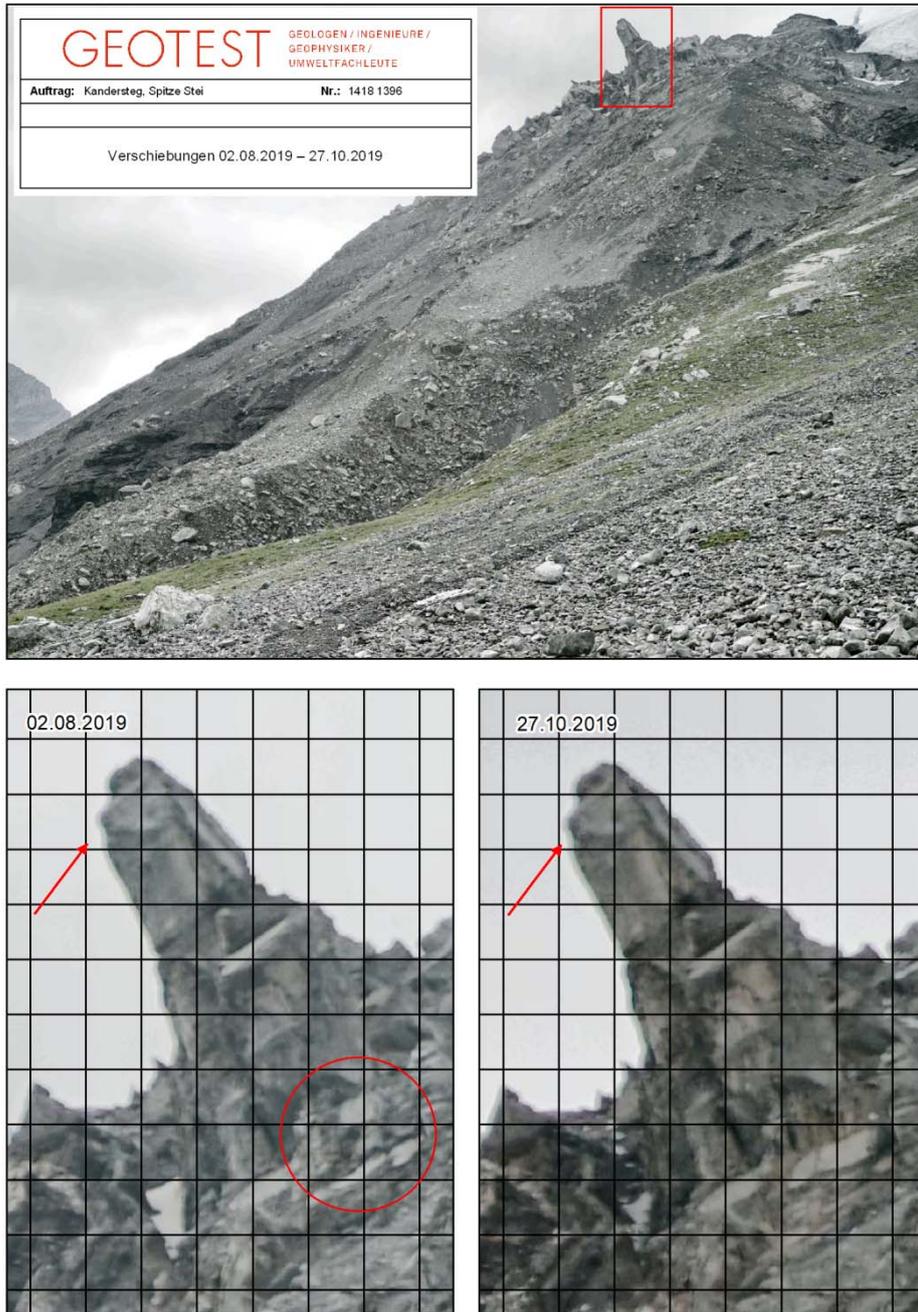
Automatisch detektierte Verschiebungen im unteren Bereich der Schuttrutschung, Zeitraum 02.08.2019 – 27.10.2019. Der anstehende Fels direkt unterhalb der Rutschung ist weitgehend stabil.

4. Feature Tracking Schuttrutschung „Gesamt“, August 2019



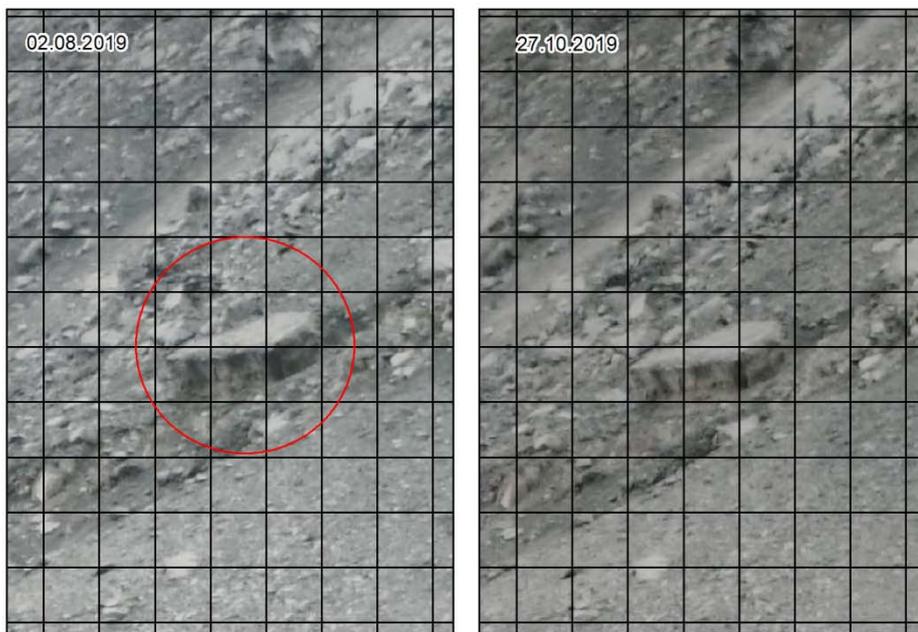
Bewegungsmessungen via Feature Tracking für die Teilperiode 09.08.2019 – 24.08.2019. Rote Farbtöne repräsentieren hohe Bewegungsgeschwindigkeiten. Fehlende Messungen bzw. Fehlmessungen im Bereich der Pfeile deuten auf Materialausbrüche/Materialumlagerungen hin. Die Materialumlagerungen geschahen allesamt zwischen dem 11. und 14. August.

5. Visueller Vergleich „Spitze Stei“



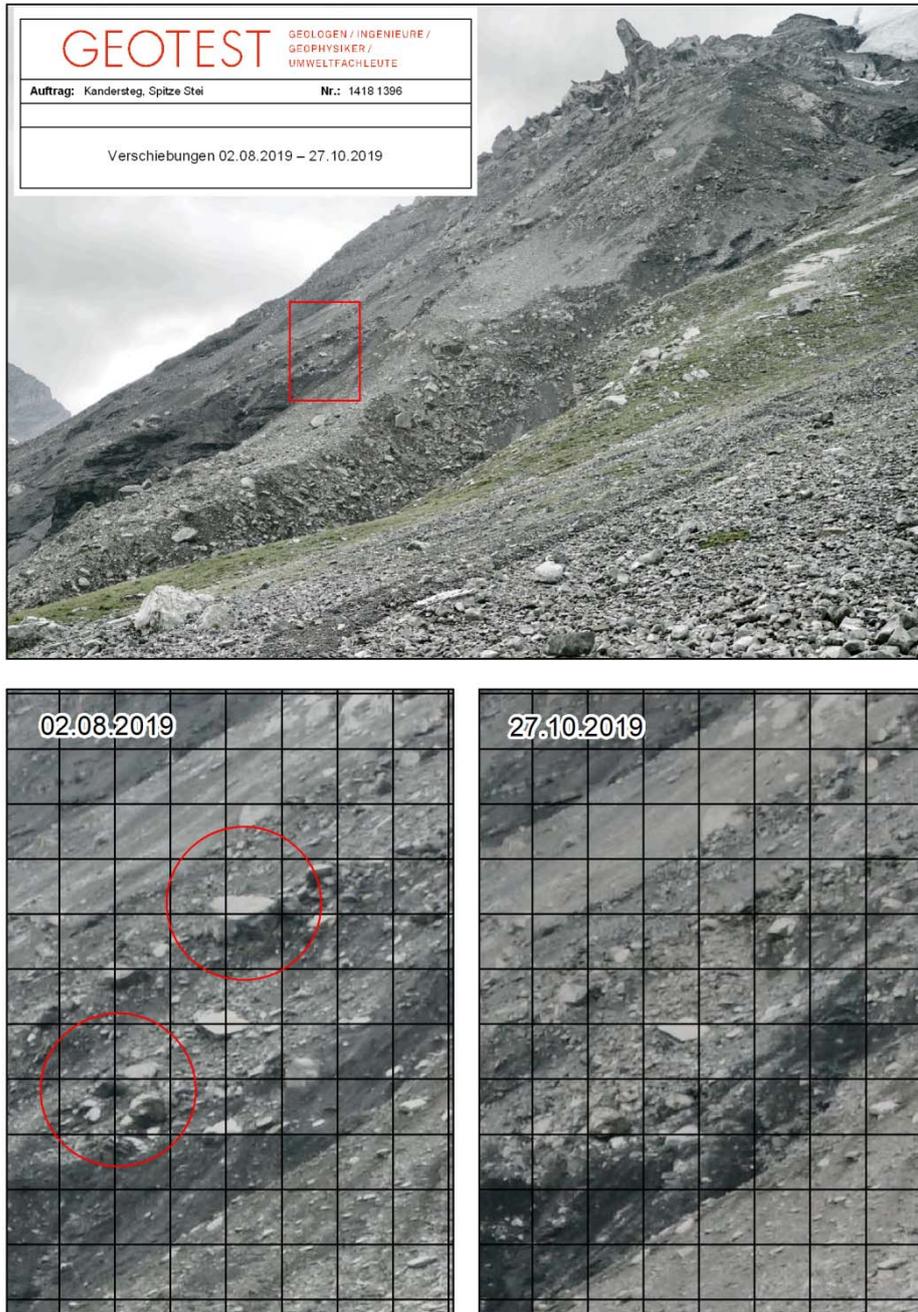
Herausgelöster/abgestürzter Block im Bereich des „Spitze Stei“ (roter Kreis). Der Vergleich der koregistrierten Fotos (vom 02.08.2019 und 27.10.2019) bestätigt eine signifikante Rotation des Felsturmes (gut sichtbar im Bereich des roten Pfeiles). Das überlagerte Gittermuster dient als Referenz.

6. Visueller Vergleich Rutschung „Mitte“



Schnell bewegender und versackender Block im mittleren Bereich der oberflächlichen Rutschung.

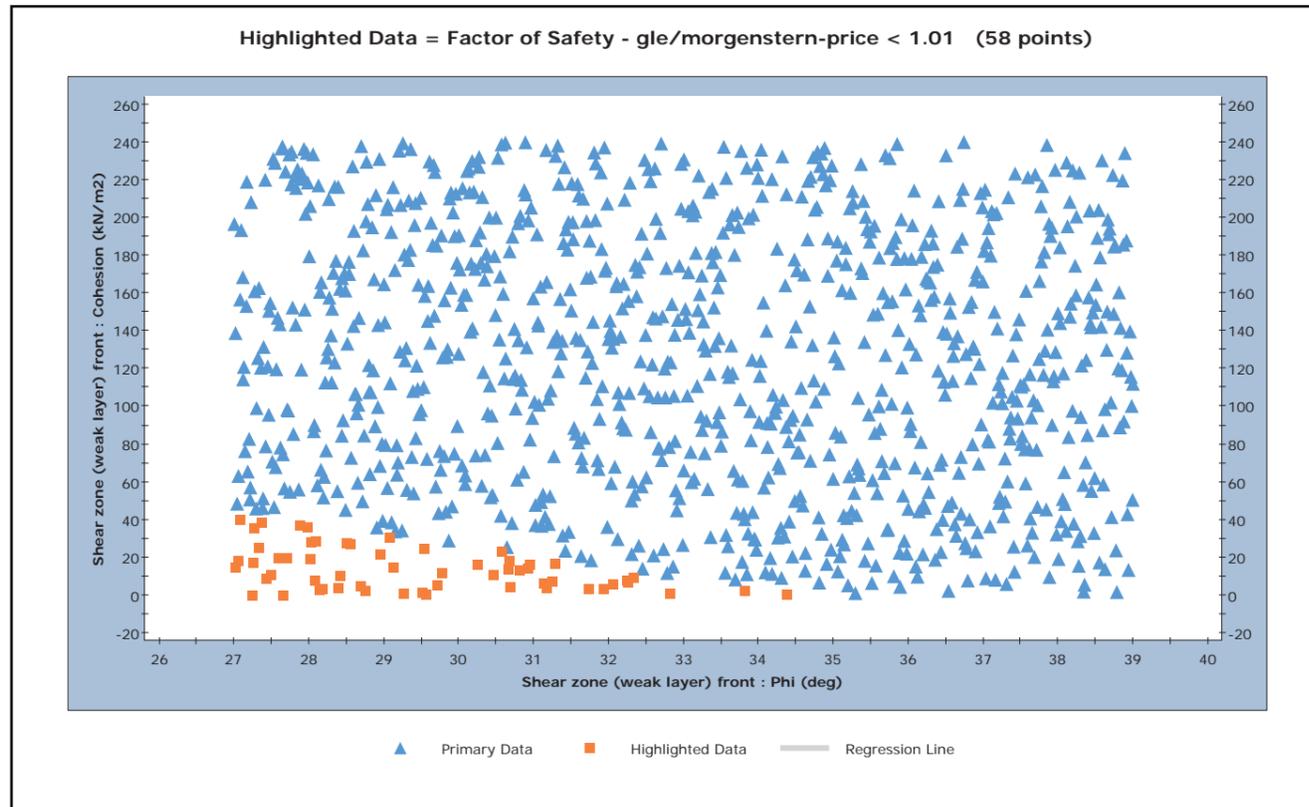
7. Visueller Vergleich Rutschung „Unten“



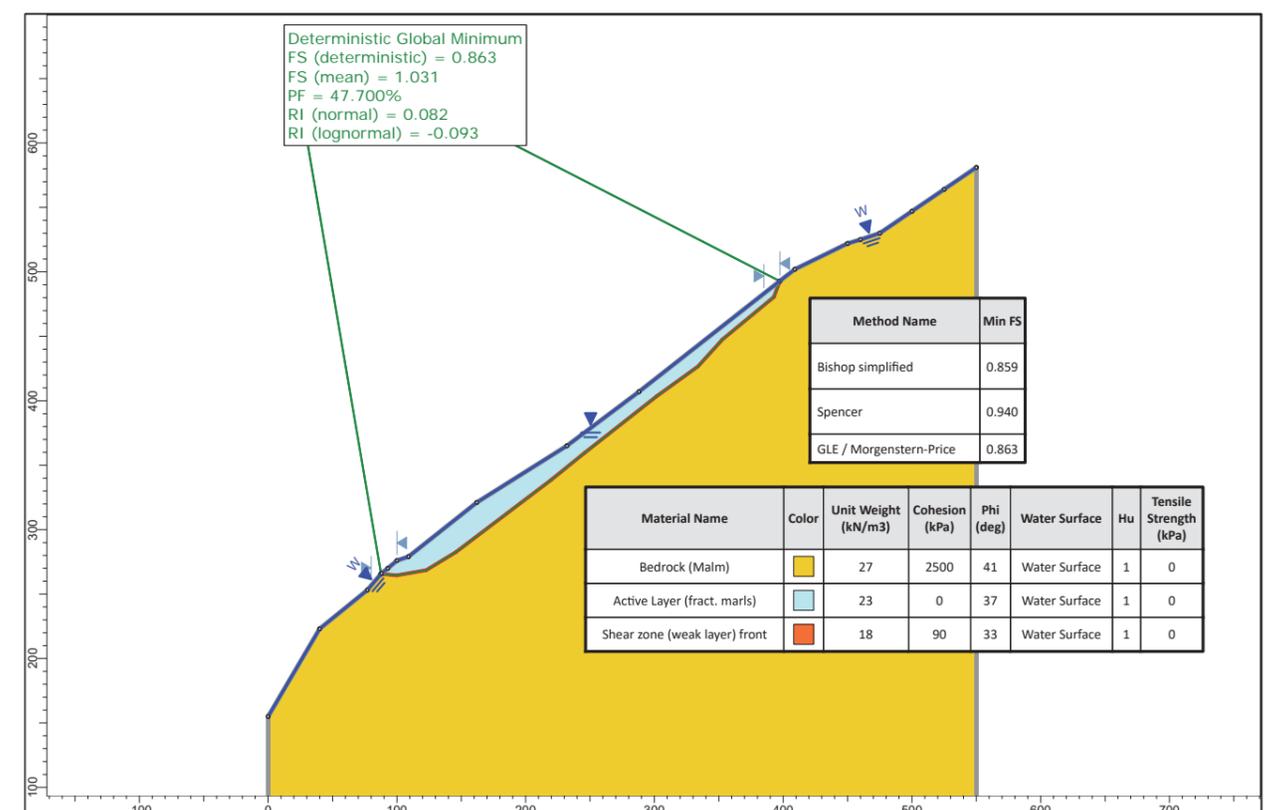
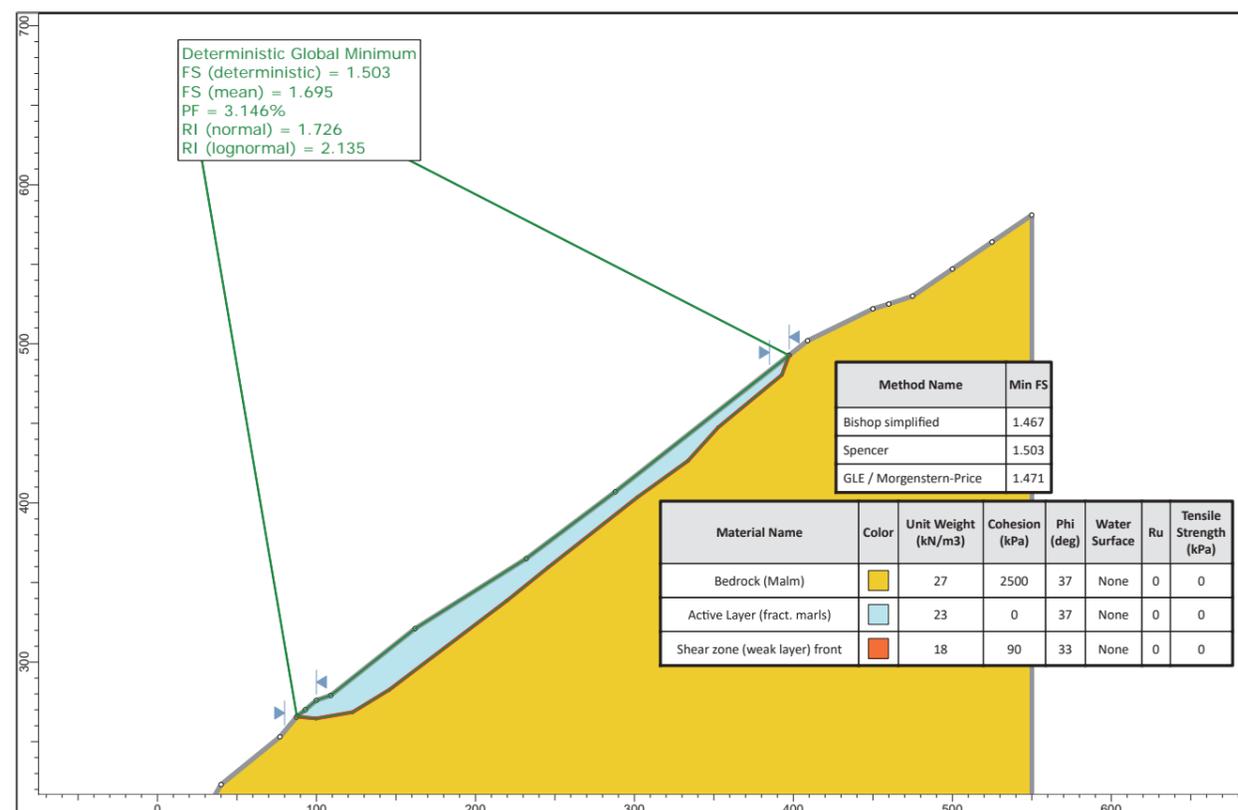
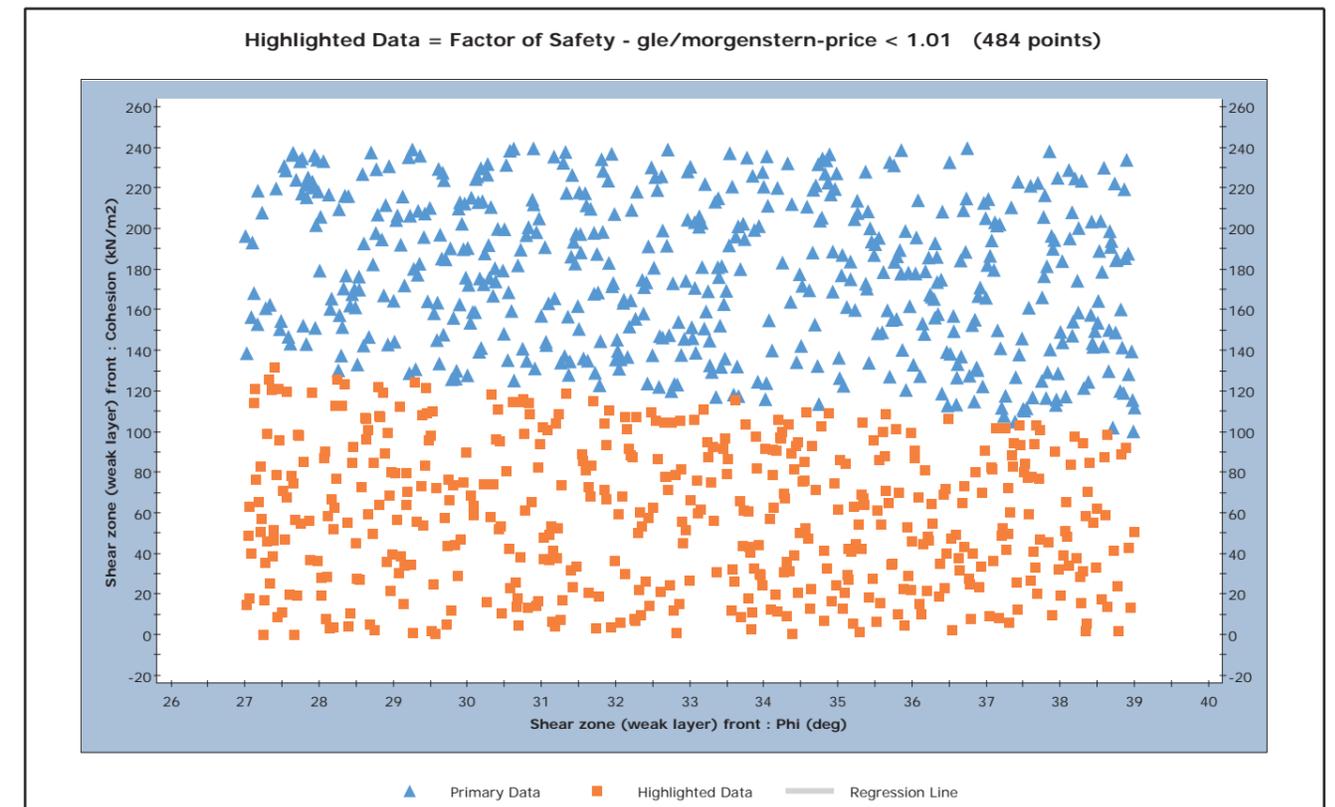
Abgestürzte Blöcke im unteren Bereich der oberflächlichen Rutschung. Der Vergleich der koregistrierten Fotos bestätigt generell schnelle Bewegungen.

Anhang 7.1 - Resultate Stabilitätsanalysen - Schuttrutschung

Schuttrutschung: trockener Zustand

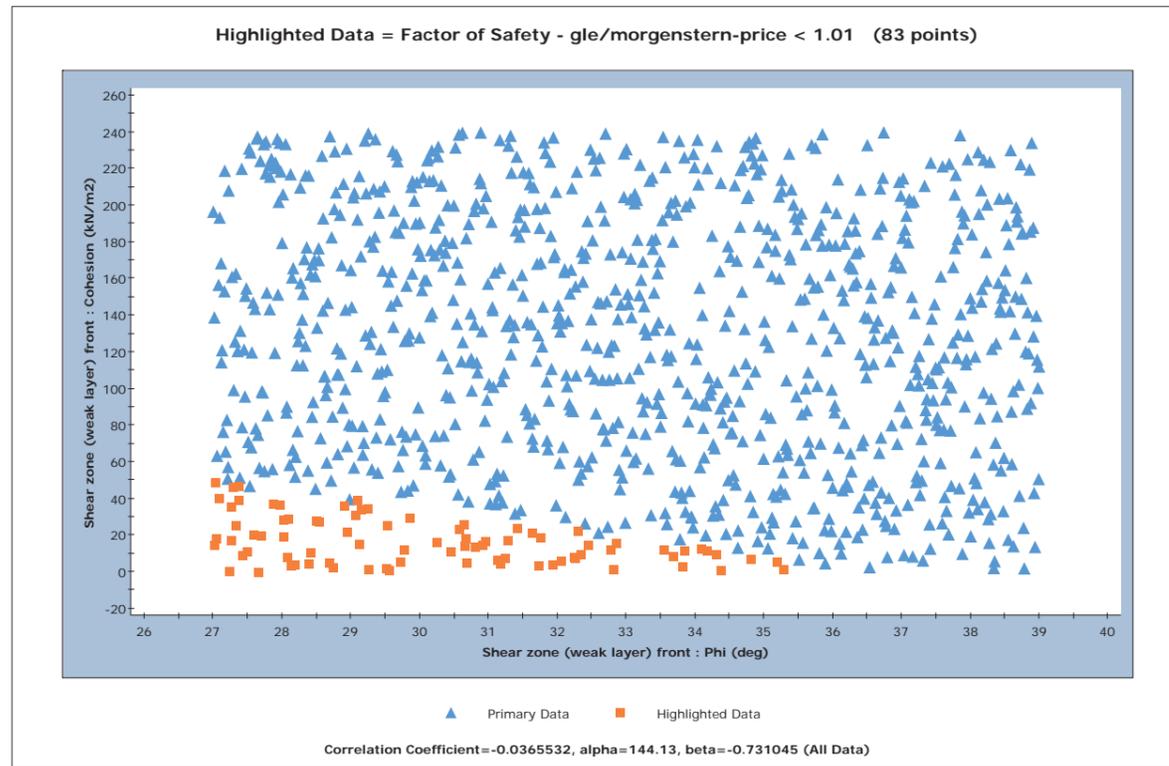


Schuttrutschung: gesättigter Zustand

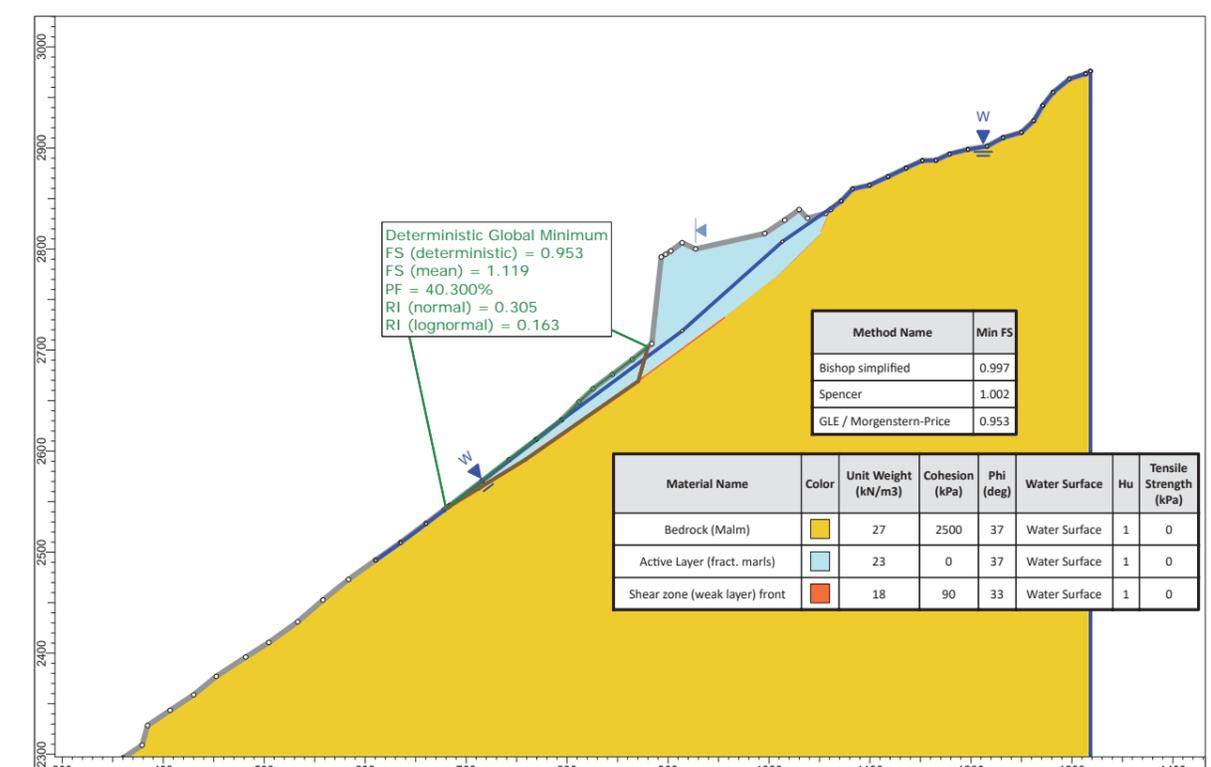
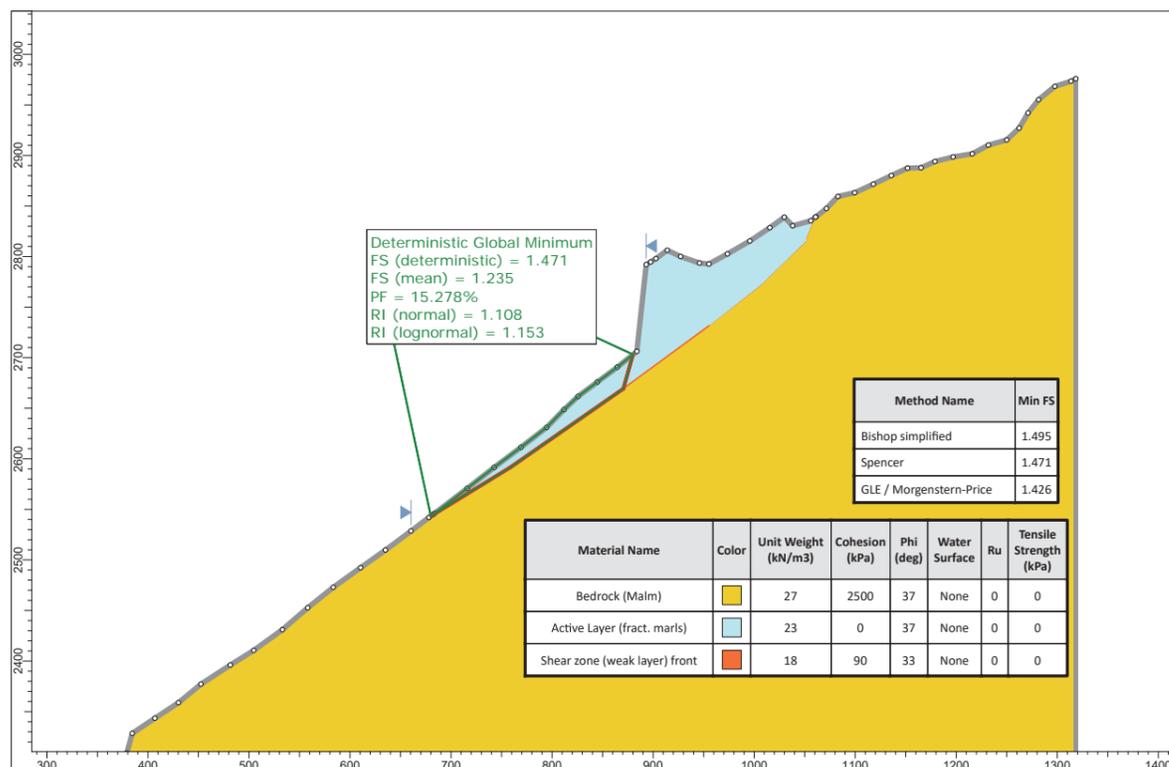
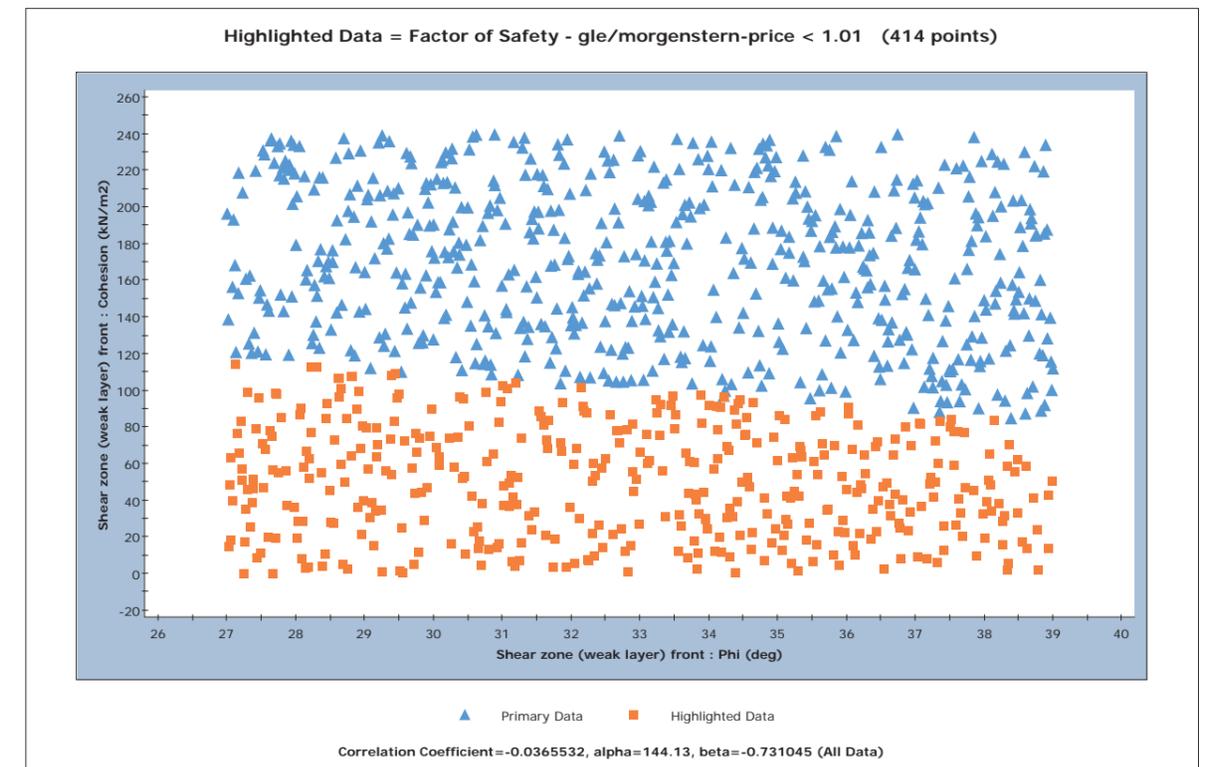


Anhang 7.2 - Resultate Stabilitätsanalysen - Felsrutschung

Felsrutschung: trockener Zustand

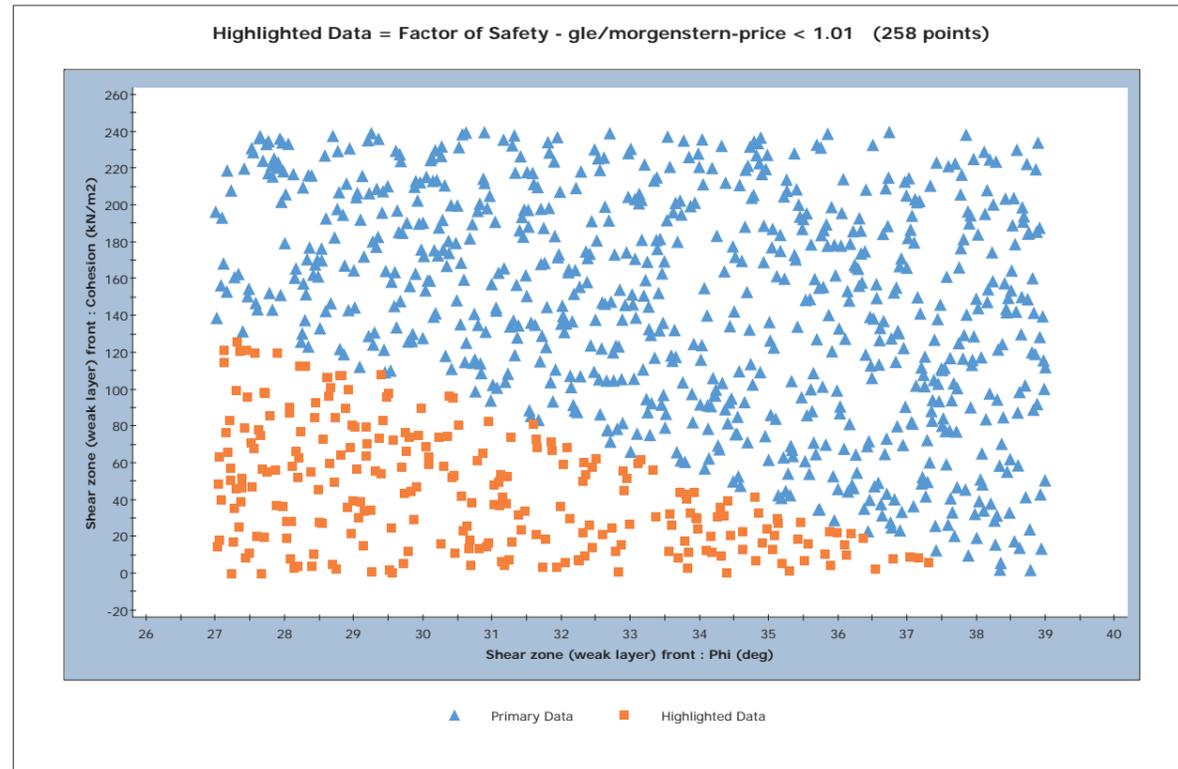


Felsrutschung: gesättigter Zustand

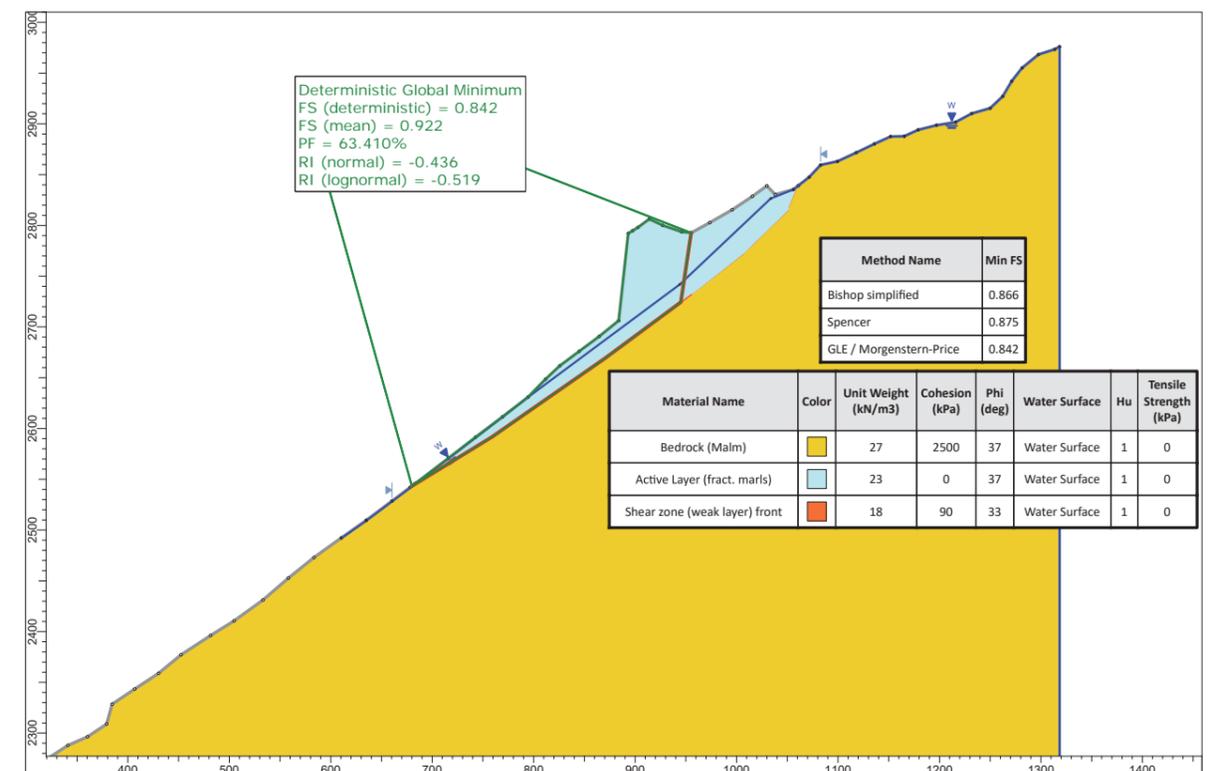
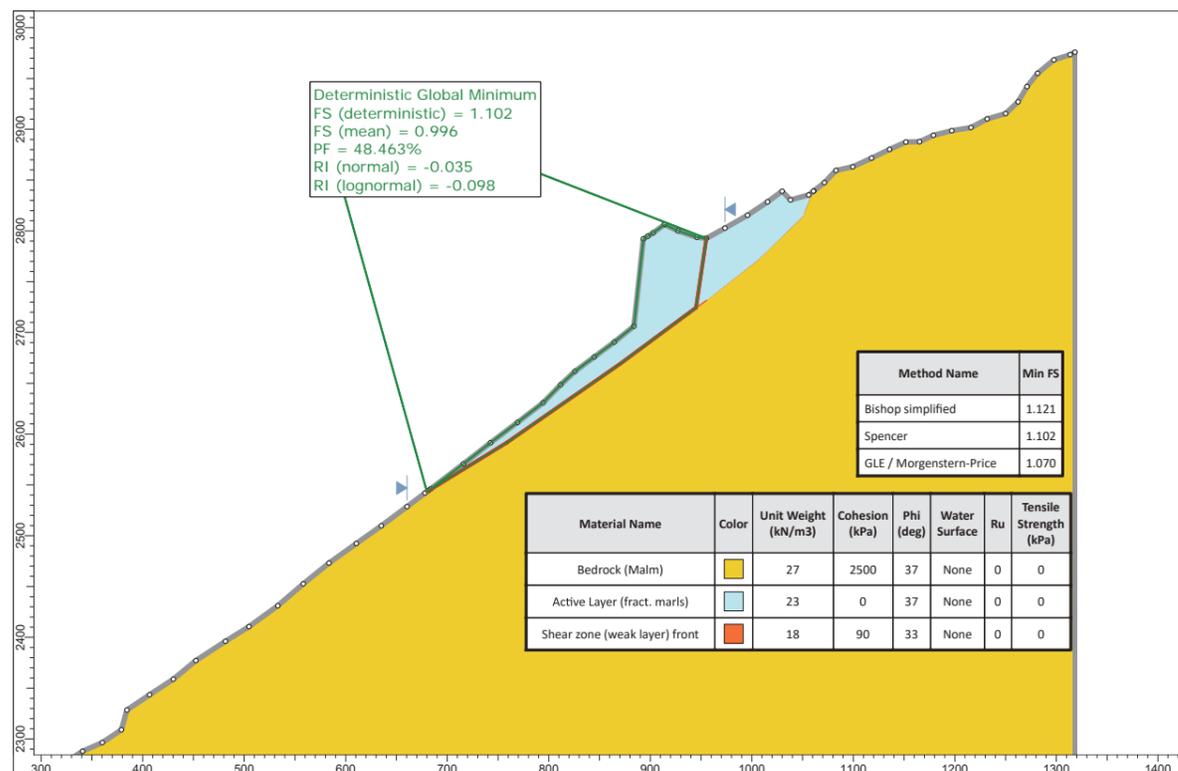
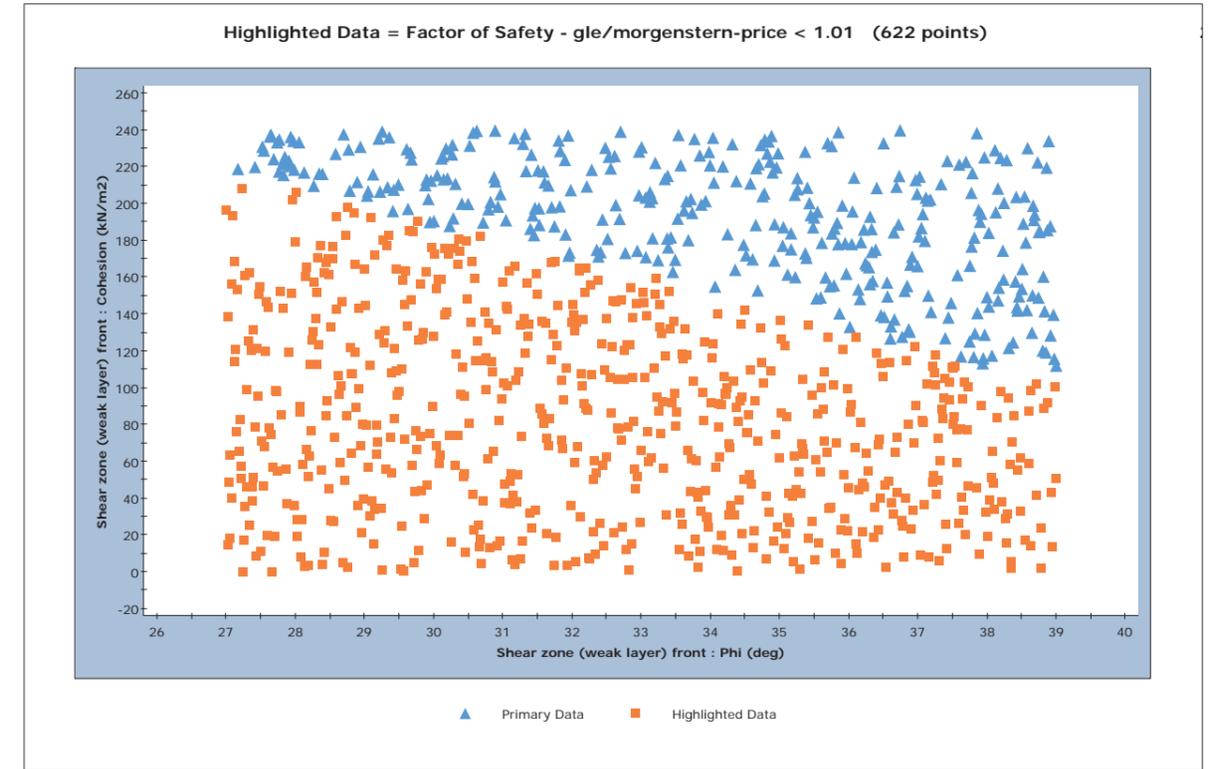


Anhang 7.3 - Resultate Stabilitätsanalysen - Felsrutschung

Felsrutschung: trockener Zustand

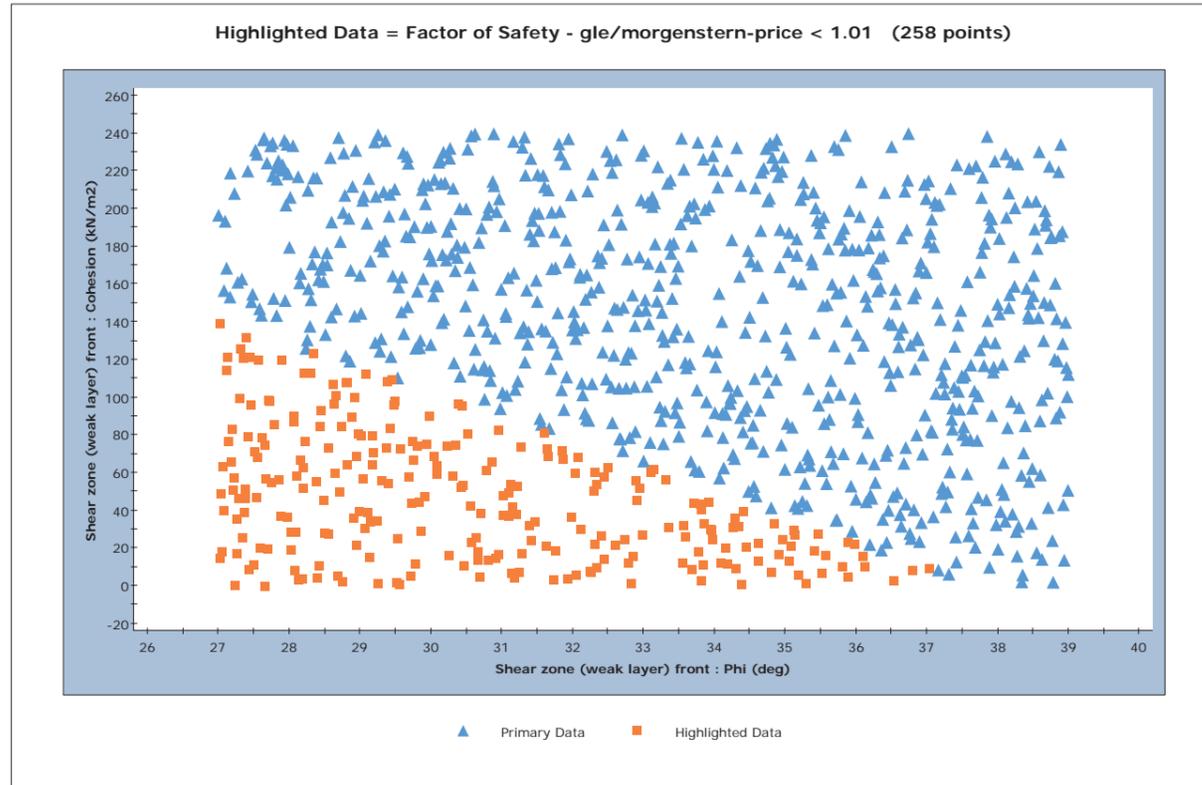


Felsrutschung: gesättigter Zustand



Anhang 7.4 - Resultate Stabilitätsanalysen - Felsrutschung

Felsrutschung: trockener Zustand



Felsrutschung: gesättigter Zustand

