



GEORESEARCH



Klimasensitive, hochalpine Kare: Projekt Sattelkar

Endbericht 2021



Impressum

Herausgeber: GEORESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Wissenspark Salzburg-
Urstein, Urstein Süd 13, 5412 Puch bei Hallein, www.georesearch.ac.at

Autoren: Markus Keuschnig, Robert Delleske, Ingo Hartmeyer

Fördergeber:



Nationalpark Hohe Tauern



Geographischer Dienst
Salzburg



Hydrographischer Dienst
Salzburg



die.wildbach
Landwirtschaft
Salzburg

Mit Unterstützung von Bund und Europäischer Union

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie



 Europäische Union
Europäischer Landwirtschaftsfonds für
die Entwicklung des ländlichen Raums
Machtesort Europa in die ländlichen
Gebiete

Titelbild: Drohnenaufnahme Sattelkar (08.09.2020, R. Delleske)



Inhalt

Impressum	1
Inhalt	2
Einleitung	3
Kare im Klimawandel	3
Das Sattelkar und seine Nachbarkare	4
Ziele und wissenschaftliche Fragestellungen	6
Monitoringkonzept.....	7
Atmosphärische und hydrologische Bedingungen	7
Oberflächenveränderungen	7
Thermische Untergrundbedingungen	8
Ereignisdokumentation von Massenbewegungen	9
Ergebnisse	10
Atmosphärische und hydrologische Bedingungen	10
Oberflächenveränderungen	12
Thermische Untergrundbedingungen	16
Ereignisdokumentation von Massenbewegungen	18
Diskussion	20
Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit	21
Abbildungsverzeichnis	22
Tabellenverzeichnis	23
Referenzen	24



Einleitung

Kare im Klimawandel

Die durchschnittliche Jahrestemperatur ist in Österreich seit 1880 um rund 2 °C gestiegen (APCC 2014). Diese Temperaturerhöhung liegt weit über dem globalen Durchschnitt von 0,86 °C (IPCC 2018). Damit einhergehend zeigen Beobachtungen einen generellen Anstieg der Schneegrenze und einen massiven Rückgang der Gletscher- und Permafrostbereiche (IPCC 2019). Weitgehend unabhängig von den Emissionsszenarien ist mit einem weiteren Temperaturanstieg von 1,4 °C bis 2050 in Österreich zu rechnen (APCC 2014). Auch bis 2100 ist im Alpenraum eine stärkere Temperaturerhöhung als im weltweiten Mittel zu erwarten, ein Anstieg von bis zu 5,8 °C („business as usual“ Szenario RCP8.5, Olefs et al. (2021)) ist möglich. Dies bewirkt einen weiteren Rückgang der Gletscher- und Permafrostbereiche, einen Anstieg der 0 °C Grenze und damit einhergehende Veränderungen des Niederschlagsregimes der Bodenfeuchte, Schneedeckmächtigkeit und -dauer (Vorkauf et al. 2021). Eine Konsequenz ist die damit verbundene Zunahme an hochalpinen Naturgefahren wie Hangrutschungen, Steinschlägen oder Felsstürzen (Krautblatter et al. 2013; GAPHAZ 2017; Haerberli et al. 2021). Diese stellen einen relevanten Risikofaktor für Mensch und Infrastruktur dar, dessen Bedeutung in naher Zukunft weiter zunehmen wird.

Kare sind kesselförmige, konkave Landformen, die hauptsächlich von Gletschern erodiert wurden (Evans 2013) und beherbergen meist große Sedimentmengen. Sie befinden sich unterhalb von Berggipfeln und Kämmen, sind Kar-aufwärts und zur Seite durch steile Felswände gekennzeichnet und Kar-abwärts, meist hin zu einer markanten Karschwelle, offen. Aufgrund ihrer hochalpinen Lage können sie rezent noch von Permafrost oder Gletschern beeinflusst sein und reagieren daher besonders sensitiv auf klimatische Veränderungen. Mit dem Rückzug des Eises werden Felsareale und Lockermaterial freigelegt und deren Temperaturhaushalt beeinflusst. Daraus resultieren Schwächungen des Gebirges (Krautblatter et al. 2013), in gefrorenen Schuttalagerungen kann dies zu rapidem Permafrostrückgang führen, welcher die Sedimentverfügbarkeit drastisch erhöht. Verbunden mit einer erhöhten Wasserverfügbarkeit (z.B. Schmelzen von Schnee und Eis oder Starkniederschläge) kann das Lockermaterial remobilisiert werden – mögliche Folgen: Hangrutschungen und Muren.

Besonders in den letzten Jahren konnten alpenweit zahlreiche Murgänge aus hochalpinen Karen dokumentiert werden. Aktuelle Studien aus den nördlichen Kalkalpen weisen auf eine klimabedingte Zunahme von Murgängen hin, Starkniederschläge mit mehr als 35 mm/d haben sich seit 1921 nahezu verdoppelt (Dietrich and Krautblatter, 2018). Beobachtungen in der Natur können jedoch nur schwer auf einzelne „Ursache-Wirkung“ Prozesse reduziert werden. Unter anderem reagieren Untergrundbedingungen, wie Permafrost, oft stark verzögert auf äußere Einflüsse. Wechselwirkungen zwischen atmosphärischen Einflüssen, Oberflächeneigenschaften und Untergrundbedingungen sind bis jetzt wenig erforscht, langfristige Datenreihen sind kaum vorhanden. Diese sind aber von kritischer Bedeutung für ein verbessertes Prozessverständnis, die Identifikation von Schwellenwerten, für die Kalibrierung von numerischen Modellen und in weiterer Folge für eine verbesserte Vorhersage der zukünftigen Entwicklung.

Das Sattelkar und seine Nachbarkare

Das Sattelkar, in einer Seehöhe zwischen 2130 und 2730 m üNN. gelegen, stellt ein typisches hochalpines Kar dar. Es befindet sich im Obersulzbachtal, Gemeinde Neukirchen am Großvenediger, Salzburg (Abbildung 1). Es ist geprägt von großen Sedimentablagerungen der rundum aufragenden Granitgneiswände und wurde intensiv glazial und periglazial geformt (Abbildung 2).

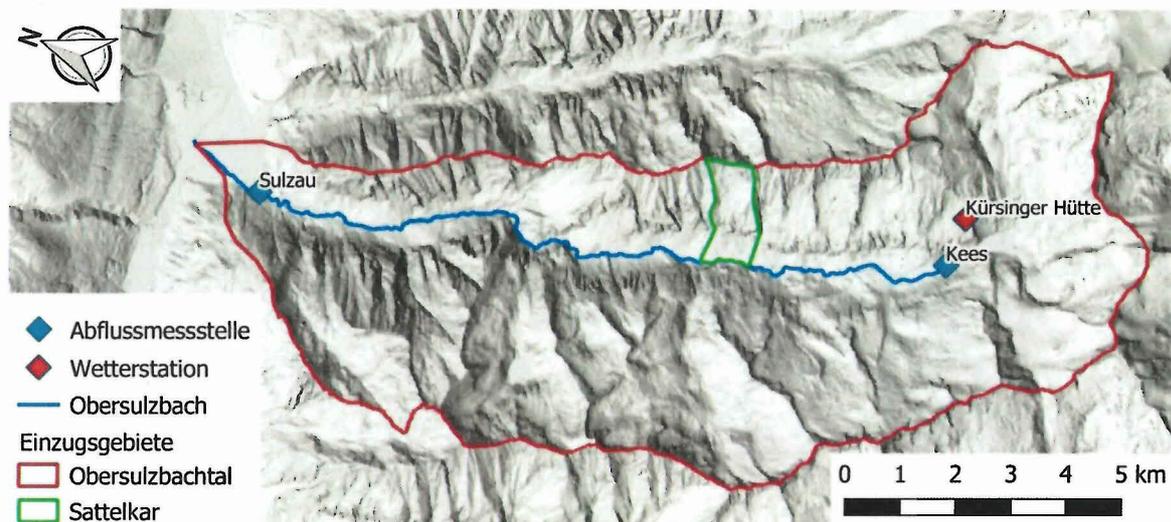


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet.



Abbildung 2: Große Sedimentablagerungen und steil aufragende Granitgneiswände prägen das Sattelkar (09.07.2020).

Aufgrund der topographischen Lage und Höhe kann auf Basis von Permafrostmodellen sporadisch mit Permafrostvorkommen gerechnet werden (Schrott et al. 2012). Im Sattelkar ist auch ein Blockgletscher vorhanden (Abbildung 3), aufgrund seiner Höhenlage (2.600 m üNN) und seinem grobblockigen Material (kühlende Wirkung) können noch Eisvorkommen im Untergrund vorhanden sein.

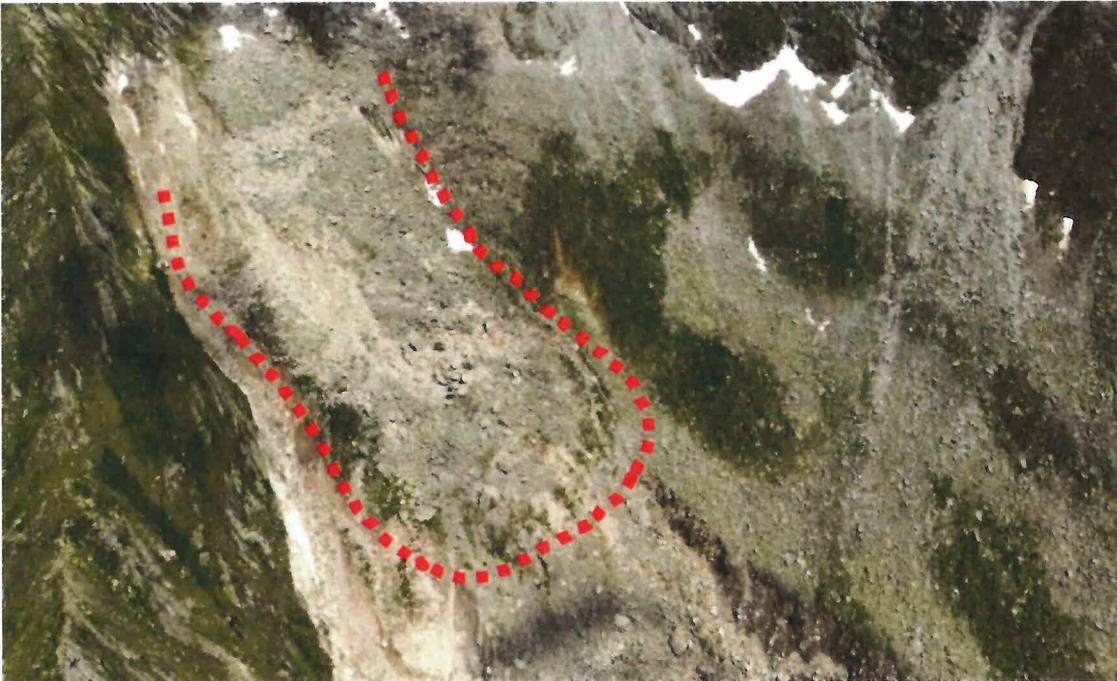


Abbildung 3: Blockgletscher (rote Punkte), Sattelkar (16.07.2018).

An der Karschwelle beginnend hat sich die Lockermaterialbedeckung des Sattelkars seit 2005 rasant rückschreitend in Bewegung gesetzt. Geschlossene Vegetationsbereiche sind großflächig zu Schuttbereichen degradiert (Abbildung 4).



Abbildung 4: Der untere Bereich des Sattelkars; deutlich zu sehen ist die erhöhte Dynamik an Massenverlagerungsprozessen (25.07.2019).



Das Material bestehend aus grobblockigem Hangschutt und Felssturzmaterial mit teils hausgroßen Komponenten und einer durchschnittlichen Mächtigkeit von mindestens 10 m, rutscht stromartig in Richtung Karschwelle ab (Abbildung 5).



Abbildung 5: Stromartiges Abrutschen von Hangschutt und Felssturzablagerungen, Sattelkar (12.07.218).

Zuletzt führte im August 2014 ein Starkniederschlagsereignis zu einem Murgang von 170.000 m³ (Anker et al. 2016), welcher den Obersulzbach verlegte, erhebliche Sachschäden verursachte und zusammen mit einer generellen Hochwassersituation im Obersulzbachtal zu einer schwerwiegenden Verwüstung des Mittel- und Unterlaufes führten. In unmittelbarer Nachbarschaft zum Sattelkar existieren talaufwärts drei weitere Kare mit ähnlicher Genese und topographischen Gegebenheiten wie Exposition oder Hangneigungen. Ofenkar, Mitterkar und Steinkar liegen geringfügig höher als das Sattelkar, größere Massenumlagerungsprozesse konnten bis jetzt noch nicht dokumentiert werden.

Ziele und wissenschaftliche Fragestellungen

Das Hauptziel dieses Projekts ist die Konzeption, Installation und Wartung eines Monitoringsystems für die langfristige Überwachung des Sattelkars. Atmosphäre, Oberflächen- und Untergrundbedingungen sollen systematisch und kontinuierlich überwacht werden und als Basis für weitere Forschungsprojekte dienen. Unter anderem konnten folgende, wissenschaftliche Fragestellungen bearbeitet werden:

- Wie verändern sich das Sattelkar und seine Nachbarkare unter veränderten Klimabedingungen?
- Mit welchem aktuellen und zukünftigen Naturgefahrenpotential ist zu rechnen?



Monitoringkonzept

Für die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Oberfläche und oberflächennahem Untergrund wurde ein systemisches Monitoringkonzept umgesetzt. Dieses basiert auf vier Überwachungsdomänen (i) Atmosphärische und hydrologische Bedingungen, (ii) Oberflächenveränderungen, (iii) Thermische Untergrundbedingungen, sowie (iv) Ereignisdokumentation von Massenbewegungen.

Atmosphärische und hydrologische Bedingungen

Für die Überwachung der atmosphärischen Bedingungen wurde die automatische Wetterstation (AWS) bei der Kürsingerhütte (2.552 m üNN, Abbildung 1) durch den Hydrographischen Dienstes des Landes Salzburg adaptiert. Die automatische Wetterstation bietet insbesondere repräsentative Niederschlagswerte für das Sattelkar und Obersulzbachtal. Die Betriebszeit der AWS ist aufgrund der Stromversorgung (Hütte) auf die Periode Frühjahr bis Herbst beschränkt. Die Pegelstände und Abflussraten werden an zwei Standorten entlang des Obersulzbaches erhoben. Ein Standort befindet sich talaufwärts im Bereich unterhalb des Sulzsees (Kees), der zweite Standort im Bereich des Talausgangs (Sulzau). Das Sattelkar entwässert ca. in der Mitte der beiden Messstandorte (Abbildung 1).

Oberflächenveränderungen

Oberflächenveränderungen wurden mit Fernerkundungsmethoden wie UAS (Unmanned Aircraft Systems, Drohnen) sowie Erdbeobachtungssatelliten (u.a. Sentinel 1, 2 und Planet Dove) erfasst. Für die präzise Erfassung der Bewegungs- und Erosionsraten wurden 9 permanente Boden-Kontrollpunkte (GCPs – Ground Control Points) installiert und mit DGPS (Differential Global Positioning System) verortet (Abbildung 6).

Die Berechnung der Höhen- und Volumenveränderungen basiert auf dem DGM des Landes Salzburg (2010) und der neu berechneten DSMs aus den UAS-Befliegungen. Für die optische Analyse der Bewegungsraten wurden neben den UAS Daten zusätzlich Orthophotos des Landes Salzburg (SAGIS) aus den Jahren 2003, 2007, 2012 und 2015 verwendet. Die Berechnung der Bewegungsvektoren und -raten basiert auf einer manuellen, optischen Verfolgung von eindeutig identifizierbaren Blöcken über die Zeit.



Abbildung 6: Installation von Boden-Kontrollpunkten (12.07.2018).

Mit Hilfe der GCPs konnten die UAS-Befliegungen mit Erfassungsgenauigkeiten im unteren cm-Bereich und einer Auflösung von 7 cm durchgeführt werden (Abbildung 7). Alle Befliegungen (07/2018, 07/2019, 09/2019, 07/2020 und 09/2020) wurden mit einem DJI Phantom 4 pro System mit integriertem DGPS und der Planungssoftware UGCS durchgeführt.



Abbildung 7: UAS-Befliegung Sattelkar, DJI Phantom 4 pro mit integriertem DGPS (09.07.2020).

Thermische Untergrundbedingungen

Für die Erfassung der thermischen Untergrundbedingungen bzw. der Permafrostbedingungen wurden 30 oberflächennahe Temperatursensoren (GST – Ground Surface Temperature

Logger, davon 15 vom Hydrographischen Dienst Land Salzburg) in 10 cm Tiefe installiert (Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung, Abbildung 8) und jährlich ausgelesen.



Abbildung 8: Installation der oberflächennahen Temperatursensoren (03.08.2018).

Ereignisdokumentation von Massenbewegungen

Für die Detektion von Murereignissen wurde im Jahr 2020 (August – Oktober) eine passive Seismik unterhalb der Karschwelle im Bereich des großen Murkegels für erste Testmessungen installiert (Abbildung 9). Das System ist autark konzipiert und basiert auf einer Raspberry Shake 3D Einheit mit drei 4.5 Hz Geophonen und einer Aufnahmefrequenz von 100 Hz.



Abbildung 9: Autarkes, passives Seismik System (12.10.2020).



Ergebnisse

Atmosphärische und hydrologische Bedingungen

Tabelle 1 zeigt die Anzahl der Tage kategorisiert nach Niederschlagssummen (Tagesmittelwerte). Besonders in den Jahren 2009, 2014 (letztes großes Murereignis) und 2020 ist eine Häufung von Starkniederschlägen mit > 40 mm pro Tag erkennbar. Im Jahr 2020 wurde das bisherige Maximum an Niederschlagstagen mit > 20 mm (n=32) und > 40 mm (n=8) erreicht. Im Allgemeinen ist kein genereller Niederschlagstrend erkennbar.

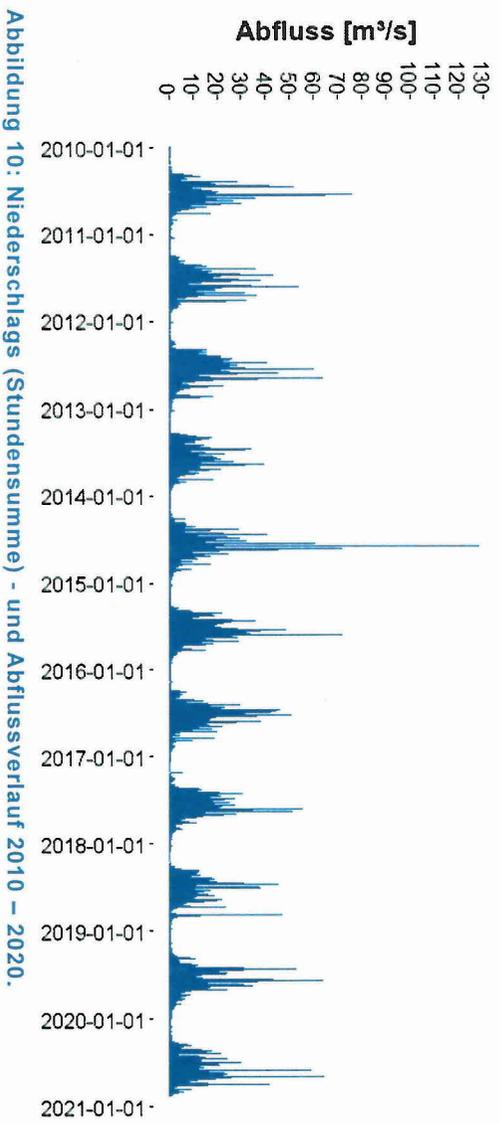
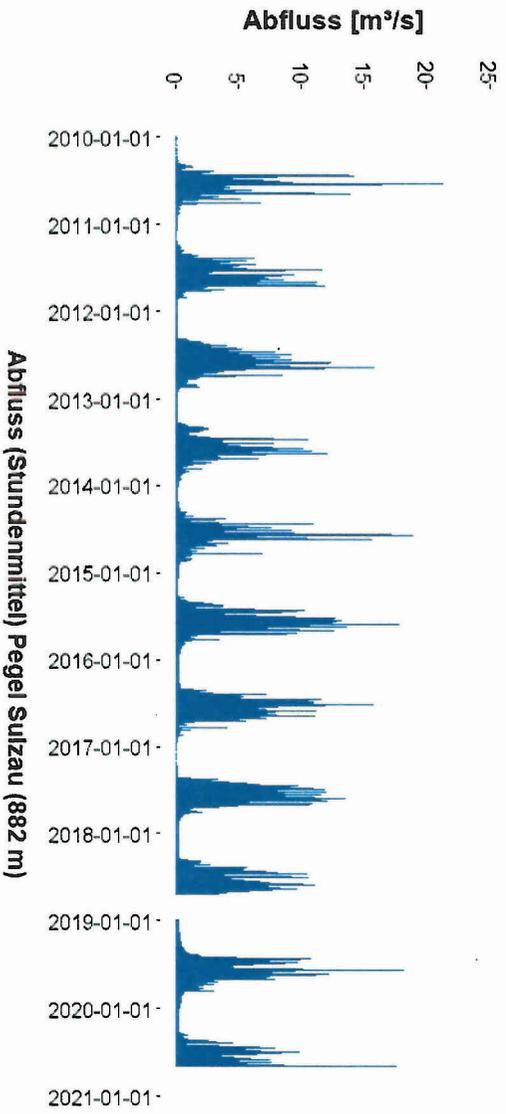
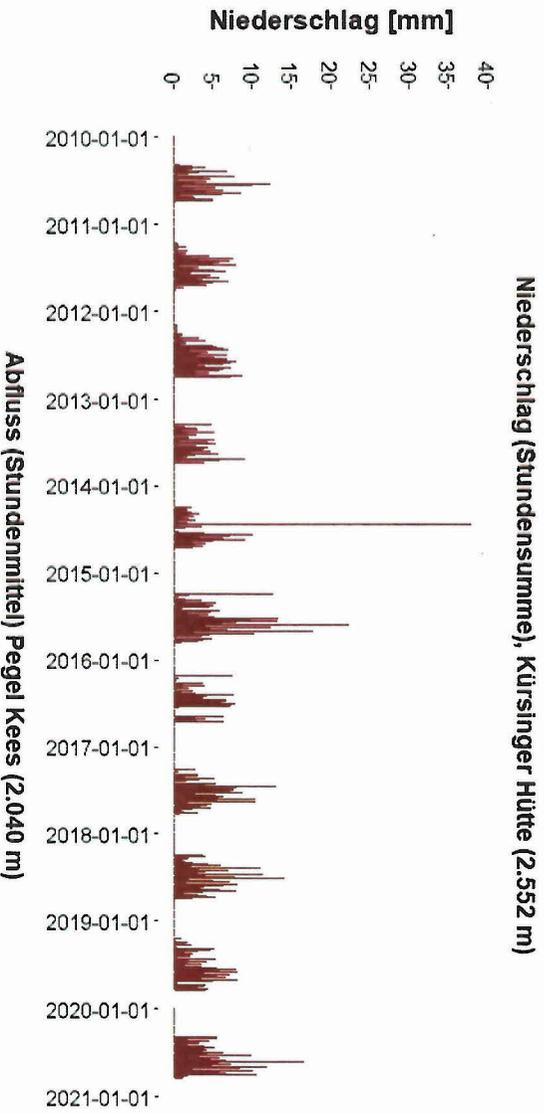
Tabelle 1: Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen größer als 20, 30, 40 und 50 mm.

	> 20 mm	> 30 mm	> 40 mm	> 50 mm	Total
2009	12	5	3	2	22
2010	8	4	2	1	16
2011	10	3	1	0	14
2012	16	5	2	1	24
2013	6	1	0	0	7
2014	9	5	3	2	19
2015	18	6	1	0	25
2016	10	5	0	0	15
2017	10	4	0	0	14
2018	10	5	2	1	18
2019	11	1	1	1	14
2020	16	8	6	2	32

Tabelle 2 zeigt die zehn höchsten Tagessummen des Niederschlags im Beobachtungszeitraum 2009-2020 mit dem Tageshöchstwert von 82,9 mm am 29.08.2020. In Abbildung 10 ist der Niederschlags- und Abflussverlauf für die Periode 2010-2020 dargestellt. Das Stundenmaximum des Niederschlag (37,8 mm) wie auch der maximale Abfluss von mehr als 120 m³ pro Sekunde (Sulzau) wurden im Jahr 2014 erfasst.

Tabelle 2: Die zehn höchsten Tagessummen des Niederschlags in der Beobachtungsperiode 2009-2020, absteigend gereiht.

Datum	Niederschlag (mm)
29.08.2020	82,9
30.07.2014	76,1
27.04.2009	70,1
03.10.2020	62,8
11.06.2014	60,4
19.08.2017	57,2
06.06.2009	52,5
17.07.2010	52,3
28.07.2019	51,2
03.08.2020	50,0



Oberflächenveränderungen

In Abbildung 11 ist die Höhen- und Volumenveränderung im Bereich des Sattelkars in der Periode 2010-2020 dargestellt. Die Trennung zwischen dem Kar- und Talbereich befindet sich im Bereich der Karschwelle. Insgesamt wurden rund 520.000 m³ Sediment aus dem Kar transportiert (Muren, Steinschläge, Suspensionstransport). Im Bereich des Talbodens wurden etwa 315.000 m³ akkumuliert. Die Differenzmenge wurde bereits zum größten Teil vom Obersulzbach abtransportiert bzw. im Rahmen von Bauarbeiten am Murkegel (technische Schutzmaßnahmen) entfernt.

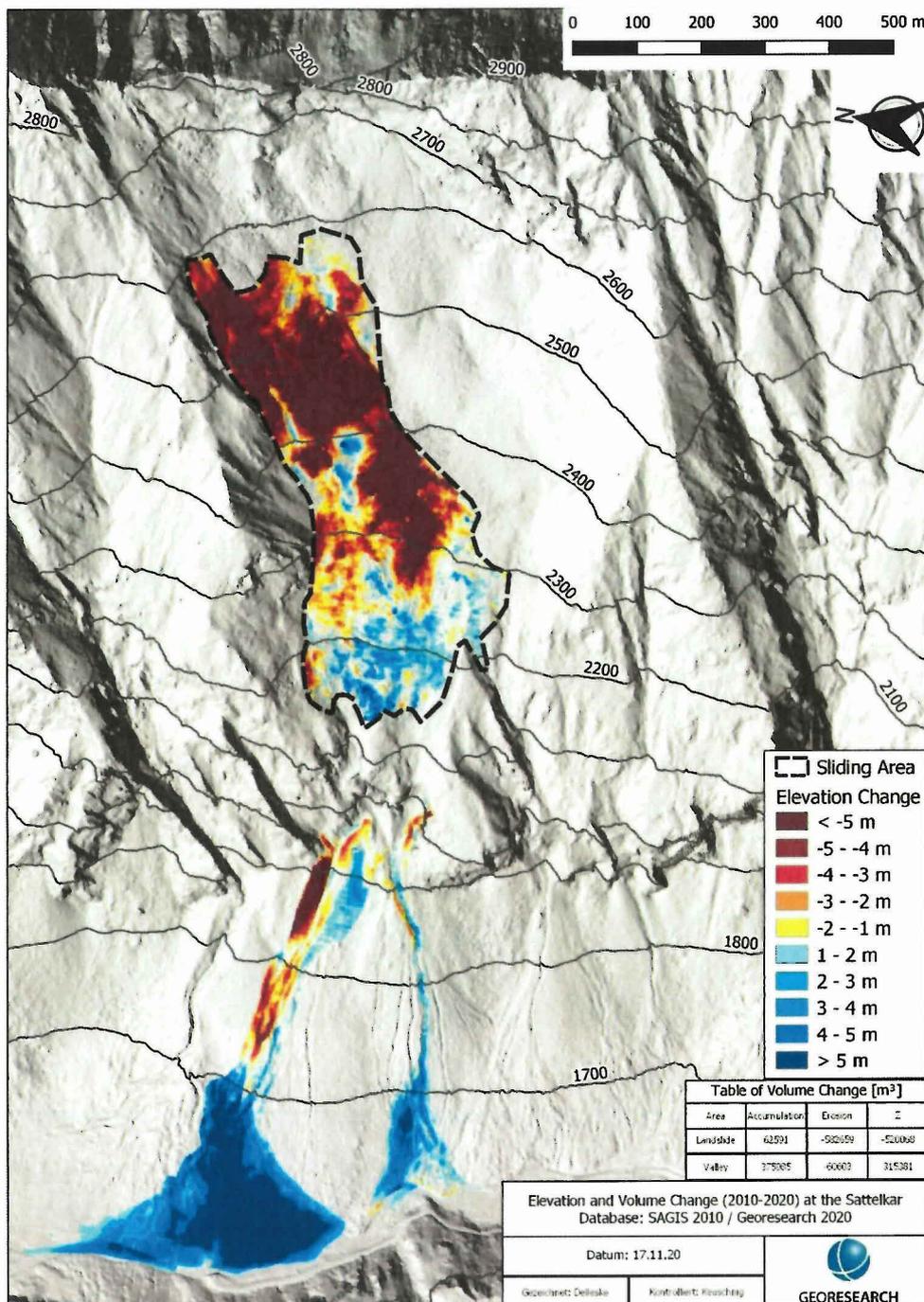
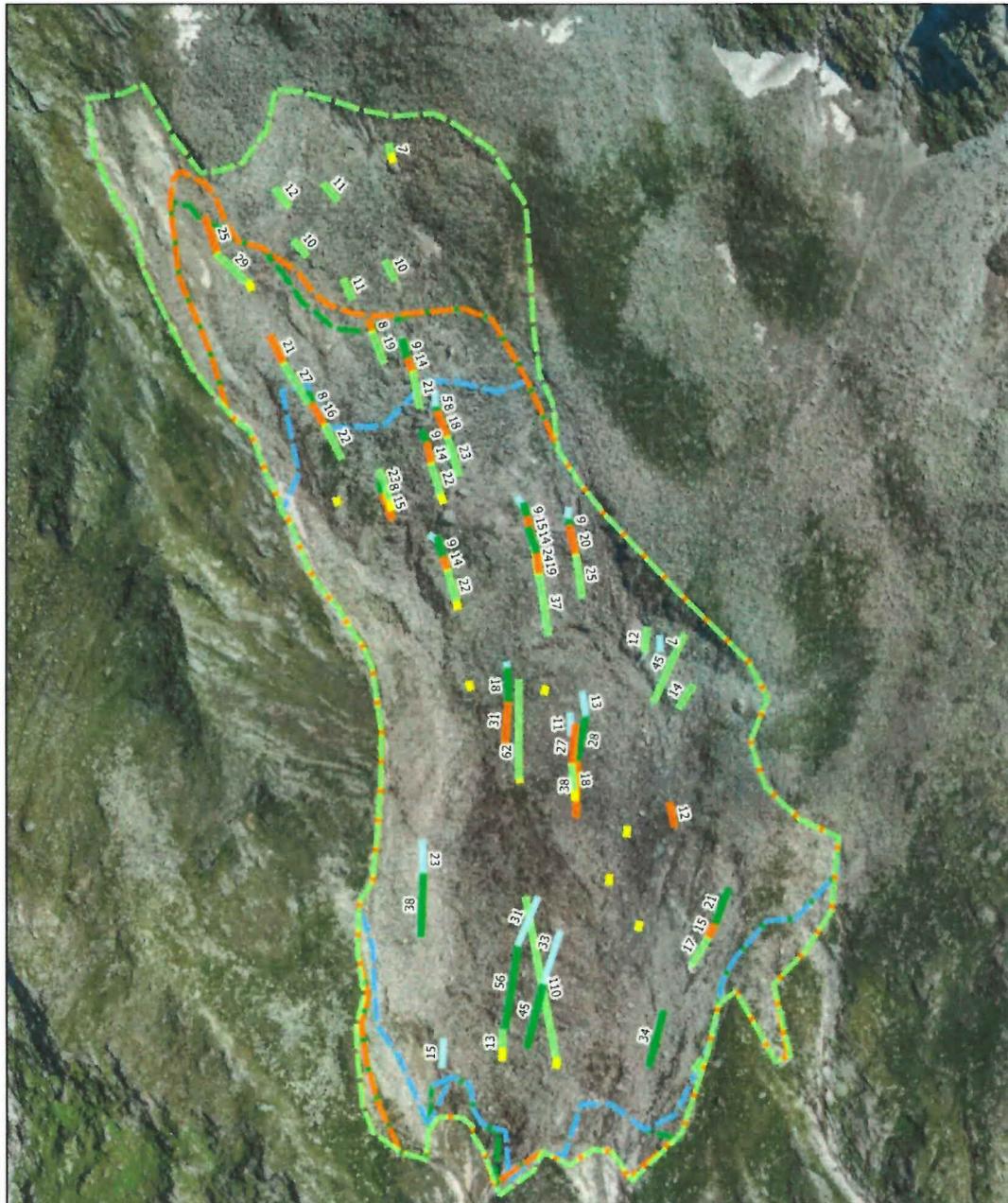


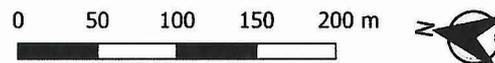
Abbildung 11: Höhen- und Volumenveränderung Sattelkar und Talbereich in der Periode 2010 bis 2020.



Seit 2005 findet eine tiefgreifende, rückschreitende Bewegung der Schuttfüllung des Kares statt. Drohnen- und Satelliten-basierte Geländeanalysen zeigen, dass Größe und Geschwindigkeit der Rutschung weiterhin zunehmen (Abbildung 12, Abbildung 13). Aktuell umfasst die Rutschung eine Fläche von > 17 ha ein Volumen von > 1,7 Mio. m³.

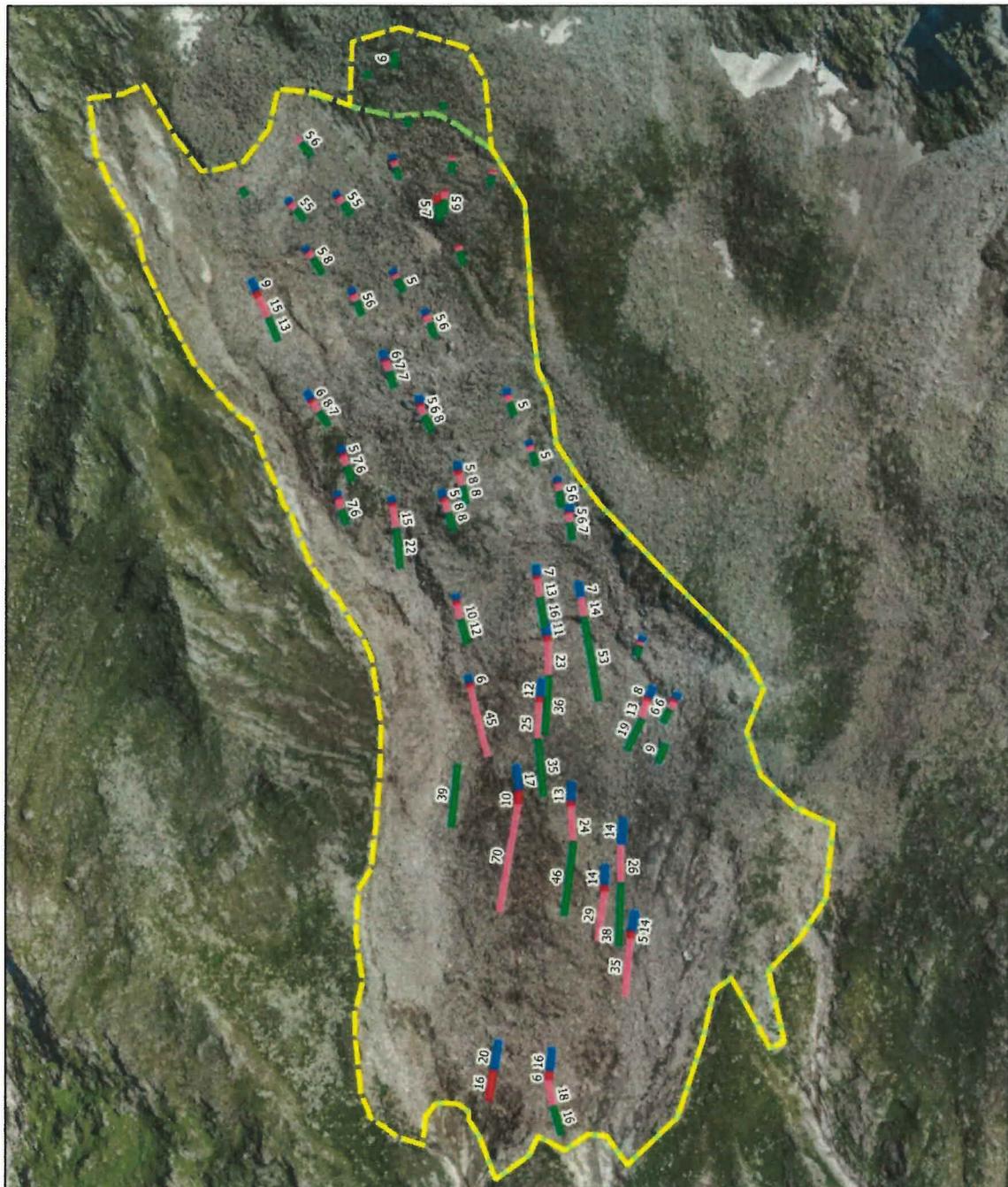


- | | |
|---|---|
| Block Movement per Period [m]* | Sliding Area |
| — 2003 to 2007 | Slide 2018 |
| — 2007 to 2012 | Slide 2015 |
| — 2012 to 2015 | Slide 2012 |
| — 2015 to 2018.07 | Slide 2007 |
| — 2018.07 to 2018.09 | |
- * no all Values < 6m are labeled



Area Change and Block Movement at the Sattelkar Landslide 2003 - 2018 Database: SAGIS 2003 - 2018 / Georesearch 2018 - 2020	
Datum: 17.11.20	
Gezeichnet: Deleske	Kontrolliert: Feuschnig
GEORESEARCH	

Abbildung 12: Flächenveränderung Sattelkar und Bewegungsraten einzelner Blöcke pro Zeitperiode (2003 – 2018).



Block Movement per Period [m]*

2018.09 to 2019.07

2019.07 to 2019.09

2019.09 to 2020.07

2020.07 to 2020.09

* no all Values < 6m are labeled

Sliding Area

Slide 2020

Slide 2018

0 50 100 150 200 m



Area Change and Block Movement at the Sattelkar Landslide 2018 - 2020 Database: SAGIS 2003 - 2018 / Georesearch 2018 - 2020	
Datum: 17.11.20	
Gezeichnet: Delleske	Kontrolliert: Keuschnig
 GEORESEARCH	

Abbildung 13: Flächenveränderung Sattelkar und Bewegungsraten einzelner Blöcke pro Zeitperiode (2018 – 2020).

Abbildung 14 zeigt die auf das Jahr normalisierten durchschnittlichen Bewegungsraten. Gut zu erkennen ist die Zunahme der Bewegungsraten in den oberen Karbereichen.

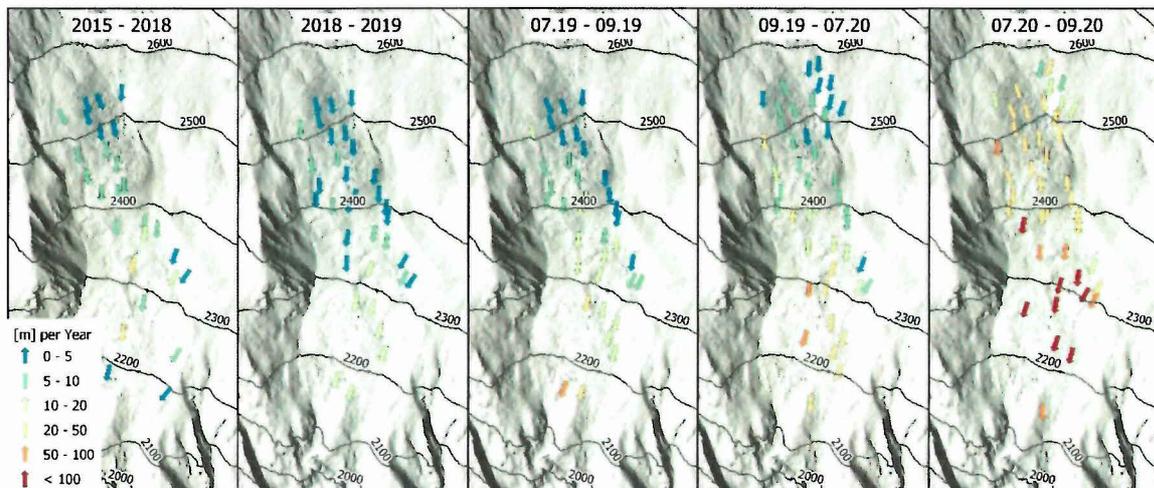


Abbildung 14: Auf das Jahr normalisierte Bewegungsraten (Meter pro Jahr).

Die absoluten Bewegungsraten innerhalb eines Jahres sind in Abbildung 15 dargestellt. Im Jahr 2020 wurden Bewegungsraten bis zu 50 m innerhalb der Sommermonate gemessen.

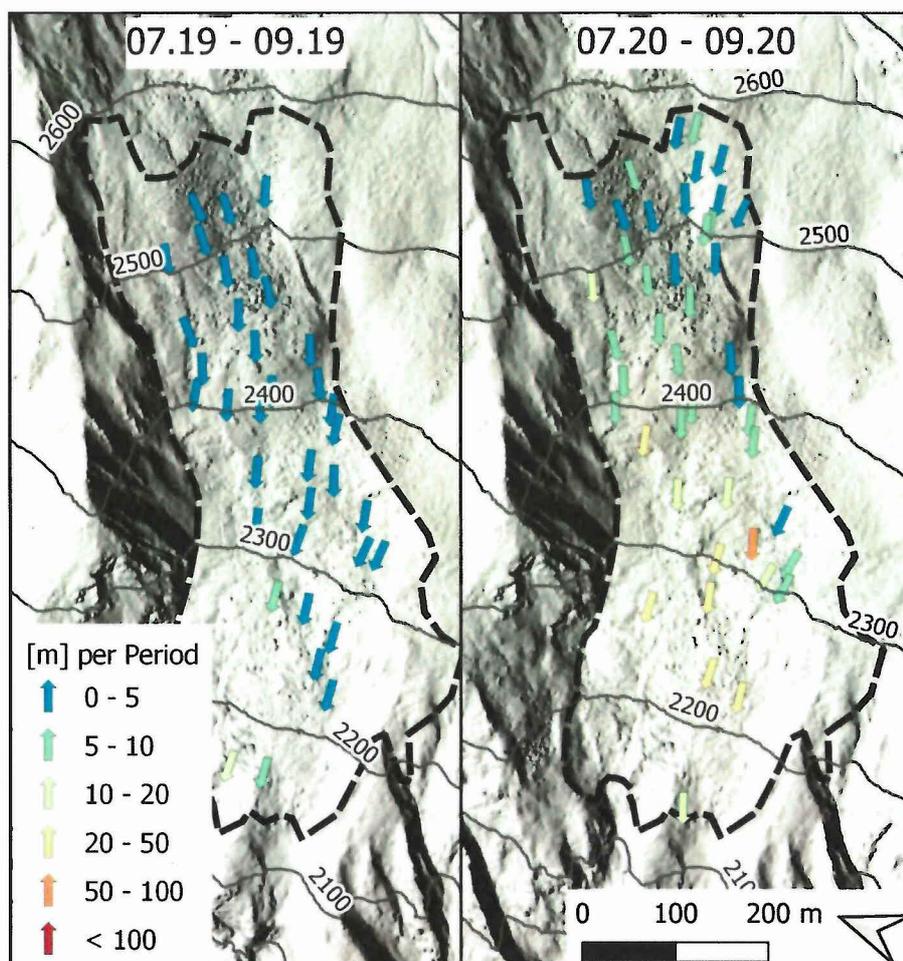


Abbildung 15: Absolute Bewegungsraten Sattelkar 2019, 2020.

Thermische Untergrundbedingungen

Abbildung 16 zeigt die Lage der oberflächennahen Temperatursensoren im Sattelkar. Die Logger-Standorte #4 und #15 wurden durch die rückschreitende Erosion des Kares zerstört. Die Analyse der GST (Ground Surface Temperature) Daten aus dem Sattelkar im Zeitraum 01.01.2016 bis 31.12.2019 zeigt eine positive MAGST (Mean Annual Ground Surface Temperature) von ca. 2 °C bei allen Logger-Standorten. (Tabelle 3). Die Standorte #13 und #9 wurden im Sommer (2017) durch Starkniederschlagsereignisse freigelegt und direkter Sonneneinstrahlung exponiert. Aus diesem Grund ist die MAGST über diesen Zeitraum nicht aussagekräftig. Die Logger-Standorte #5 sowie #10-13 weisen über die Jahre hinweg negative Temperaturen an der Basis der winterlichen Schneedecke auf und deuten auf zumindest sporadische Permafrostvorkommen hin. Ein leichter Erwärmungstrend der winterlichen Durchschnittstemperaturen ist dabei von -1,1 °C auf -0,6 °C zu erkennen. Tabelle 4 zeigt die GST-Daten aus dem Ofen- Mitter- und Steinkar erstmalig für 2019. In allen drei Karen ist mit Permafrostvorkommen zu rechnen, die Winterdurchschnittstemperaturen für das Jahr 2019 waren im Ofenkar (-1,4 °C) und Steinkar (-0,9 °C) kälter als im Sattelkar (-0,6 °C). Das Mitterkar weist mit -0,2 °C die höchste Temperatur auf.

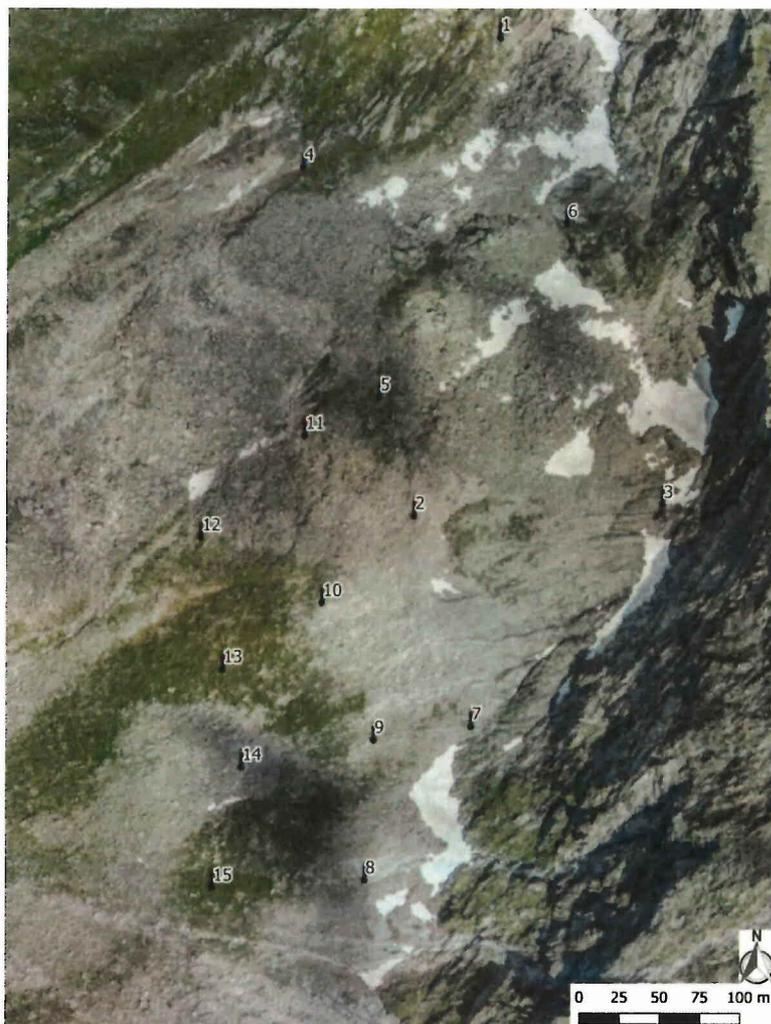


Abbildung 16: Lage der oberflächennahen Temperatursensoren Sattelkar.



Tabelle 3: Temperaturdaten (Durchschnitt, Minimum, Maximum, Winter) aus dem Sattelkar für den Zeitraum 01.01.2016 bis 31.12.2019. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.). Rot markierte Standorte zeigen potentielle, sporadische Permafrostvorkommen.

Logger	2016				2017				2018				2019			
	Mittel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Winter (°C)	Mittel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Winter (°C)	Mittel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Winter (°C)	Mittel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Winter (°C)
1	2,7	0,0	20,2	0,1	3,1	0,0	20,9	0,1	3,5	-1,8	18,8	0,2	3,3	0,1	19,6	0,2
2	2,1	-2,9	17,3	-0,1	2,7	-0,1	20,5	0,1	2,9	-2,1	19,3	0,2	2,7	0,0	21,8	0,1
3	1,4	-5,4	14,7	-1,0	2,2	-0,5	16,9	-0,2	2,3	-1,5	16,4	0,0	2,3	-0,4	18,1	-0,1
5	1,7	-4,6	19,9	-1,6	2,1	-5,0	21,7	-1,9	2,1	-6,9	19,6	-0,8	1,7	-2,6	12,6	-1,2
6	1,9	-8,6	22,5	-1,6	2,6	-2,7	21,7	-0,2	3,7	-3,3	20,5	0,2	3,0	-2,7	23,3	-0,1
7	2,0	-1,6	22,0	-0,3	2,6	-0,6	23,5	-0,2	2,7	-4,1	22,0	0,1	2,7	-0,3	24,2	-0,2
8	1,8	-1,2	18,5	-0,6	2,2	-1,8	20,1	-0,9	2,7	-3,6	18,5	0,0	1,9	-0,6	16,8	-0,5
9	2,5	-5,9	^a 39,0	-0,1	3,3	-1,3	^a 46,2	-0,2	2,5	-5,2	^a 43,0	-0,1	2,5	-0,5	15,1	-0,3
10	1,3	-6,0	16,5	-3,9	1,5	-6,8	20,5	-3,4	1,7	-4,9	19,9	-3,9	2,1	-5,7	22,2	-3,4
11	1,1	-4,4	14,9	-1,6	1,5	-4,3	18,7	-1,9	2,2	-3,0	15,0	-0,5	2,0	-1,5	16,4	-1,1
12	1,9	-4,6	18,8	-1,9	2,4	-4,8	18,7	-1,9	3,2	-4,8	18,5	-0,3	2,8	-2,5	20,7	-1,1
13	2,6	-6,4	21,2	-1,6	3,2	-5,7	^a 45,2	-1,1	3,7	-10,6	^a 44,0	-1,0	3,9	-3,2	52,7	-0,5
14	2,1	-3,7	22,3	0,1	2,5	-0,5	22,0	0,1	2,8	-5,7	20,9	0,2	2,2	0,0	22,0	0,2
Mittel ^b	1,8	-3,9	18,9	-1,1	2,3	-2,5	20,5	-0,9	2,7	-3,8	19,0	-0,4	2,4	-1,5	19,8	-0,6

^a Standort mit starker direkter Strahlungsbeeinflussung

^b Mittlere Temperatur aller Logger ohne den stark strahlungsbeeinflussten Logger_09 und Logger_13

Tabelle 4: Temperaturdaten (Durchschnitt, Minimum, Maximum, Winter) aus dem Ofenkar, Mitterkar und Steinkar für den Zeitraum 01.01.2019 bis 31.12.2019. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.).

Logger	2019			
	Mittel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Winter (°C)
Ofenkar 1	1,9	-1,1	13,1	-0,1
Ofenkar 2	1,4	-3,5	14,8	-0,4
Ofenkar 3	-0,1	-7,8	16,1	-5,4
Ofenkar 4	2,6	-2,8	23,1	-0,1
Ofenkar 5	1,6	-6,0	21,3	-1,2
Mitterkar 1	1,0	-4,6	15,6	-1,2
Mitterkar 2	2,0	-1,8	17,6	0,6
Mitterkar 3	1,6	-1,6	21,7	0,1
Mitterkar 4	1,3	-1,2	13,5	-0,4
Mitterkar 5	2,0	0,1	14,1	0,3
Steinkar 1	0,4	-7,5	11,9	-3,2
Steinkar 2	0,8	-1,9	10,8	-1,0
Steinkar 3	1,6	-0,6	11,2	-0,1
Steinkar 4	1,8	-0,1	9,7	0,3
Steinkar 5	1,6	-0,3	10,9	-0,3
Mittelwert Ofenkar	1,5	-4,2	17,7	-1,4
Mittelwert Mitterkar	1,6	-1,8	16,5	-0,2
Mittelwert Steinkar	1,2	-2,1	10,9	-0,9

Ereignisdokumentation von Massenbewegungen

Abbildung 17 zeigt die seismischen Signale der seit 2020 installierten passiven Seismik während einer Schönwetterperiode am 17.09.2020. Es werden ca. alle 5 min. Ereignisse mit verschiedener Dauer und Amplitude erfasst. Am 29.08.2020 wurde die höchste Niederschlags-Tagessumme von 82,9 mm erfasst. Die seismischen Signale (Abbildung 18) zeigen am Anfang des Tages ähnliche Signale wie in Abbildung 17. Eine Zunahme der allgemeinen Amplitude im Tagesverlauf kann mit der erhöhten Wasserführung der Gerinne in Zusammenhang gebracht werden. Große Ereignisse mit maximaler Amplitude und einer Dauer von mehreren Minuten weisen auf einen erhöhten Geschiebetransport oder kleineren Muren hin. Aufgrund des kurzen Erfassungszeitraums (August bis Oktober 2020) kann eine genaue Zuordnung nach Ereignistypen und Herkunft noch nicht durchgeführt werden.

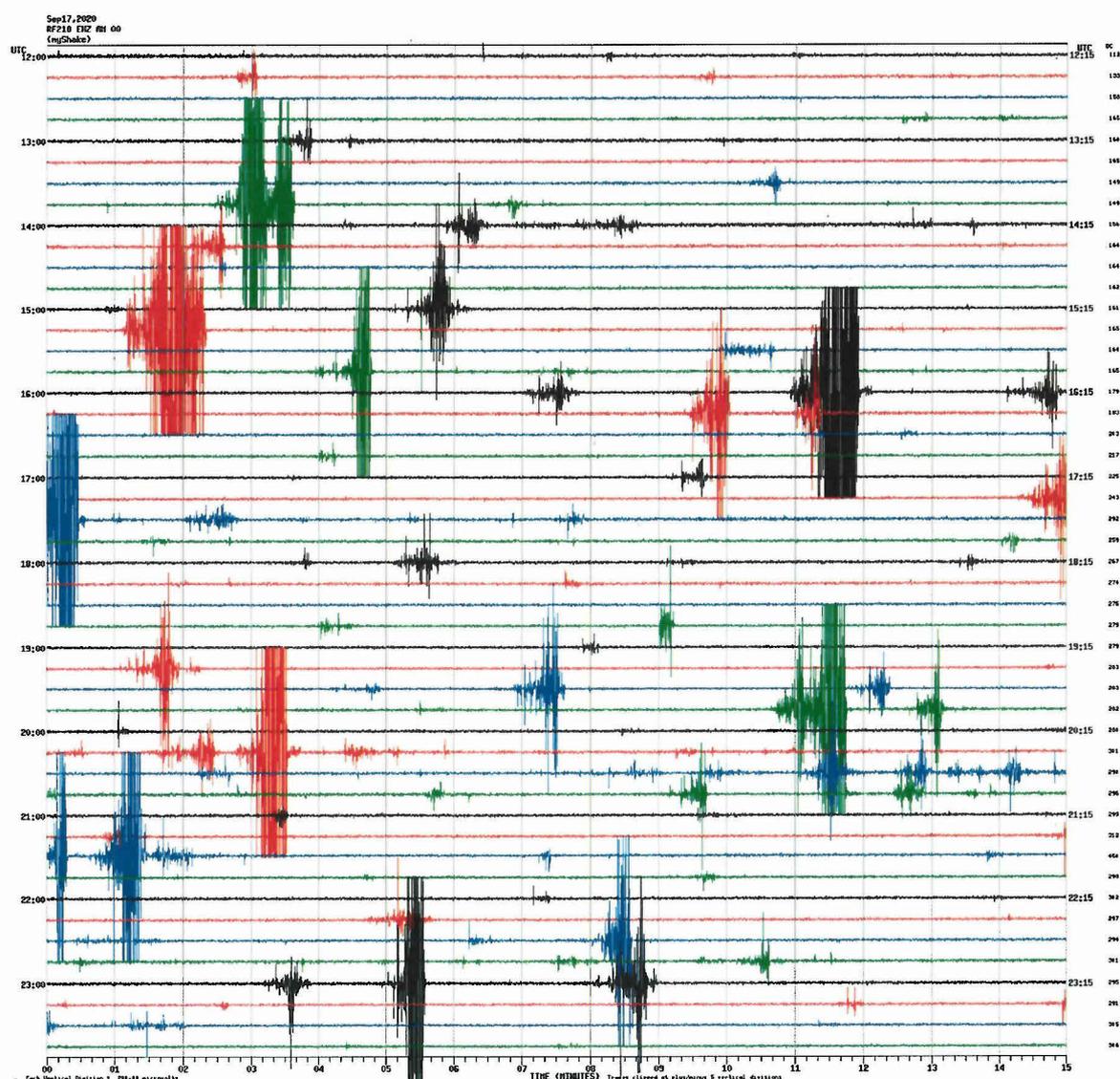


Abbildung 17: Seismische Signale während eines typischen Sommertags (17.09.2020).

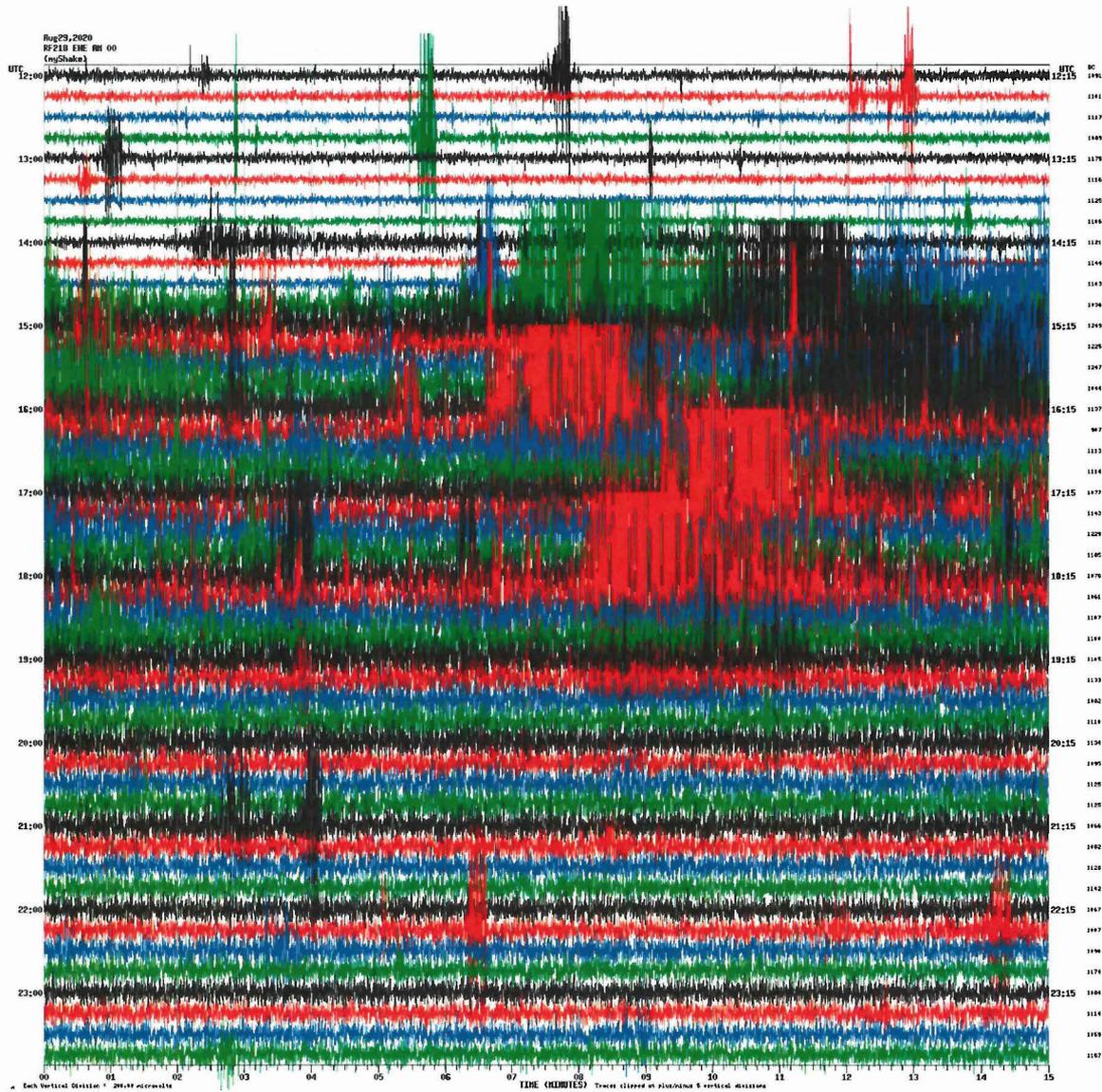


Abbildung 18: Seismische Signale während eines Tages mit Starkniederschlägen (29.08.2020).



Diskussion

Luftbildanalysen, Zeugenberichte und Schadensereignisse dokumentieren eine vermehrte Aktivität der Karsedimente und eine Zunahme der Murereignisse seit dem Sommer 2005. Seither nehmen die Fläche (Abbildung 12, Abbildung 13) und die Bewegungsrate der Rutschung weiter zu (vgl. Kapitel Ergebnisse, Abbildung 14). Mittlerweile sind über 17 ha und über 1,7 Mio. m³ Lockermaterial mit Raten von bis zu 50 m/a (2020) in Bewegung. Mehr als 500.000 m³ Material wurden bereits seit 2010 aus dem Sattelkar ausgetragen (Abbildung 11). Die sehr hohe Bewegungsrate im Jahr 2020 geht einher mit den meisten Niederschlagstagen > 20 mm (n=32) und dem Tag mit der höchsten gemessenen Niederschlagssumme von 82,9 mm am 29.08.2020. Trotz der Zunahme der Rutschungsdynamik (Fläche und Raten) seit 2005 ist keine Korrelation mit Starkniederschlägen erkennbar (Tabelle 1). Die Dynamik der Rutschung ist daher mit den Niederschlagsdaten allein nicht zu erklären. Auch bei den Murgängen konnte seit 2014 keine weitere Zunahme beobachtet werden. Eine mögliche Erklärung ist, dass (i) im Kar selbst noch größere Umlagerungsprozesse stattfinden und große, mobilisierbare Sedimentmengen noch nicht an der Karschwelle angekommen sind (Abbildung 11) und (ii) viel Material durch Steinschlagprozesse (Abbildung 17) und kleinere Muren/Geschiebetransporte während Tagen mit stärkeren Niederschlägen (Abbildung 18) abtransportiert wird.

Das Vorkommen von sporadischem Permafrost im Sattelkar ist sehr wahrscheinlich. Die Temperaturdaten (Tabelle 3) zeigen an mehreren Stellen negative Temperaturen an der Basis der winterlichen Schneedecke. Seit 2016 haben sich die oberflächennahen Untergrundtemperaturen tendenziell erwärmt, von einer einhergehenden Festigkeitsabnahme des Untergrundes ist auszugehen. Wie in Abbildung 3 zu erkennen, befindet sich auf ca. 2.600 m üNN ein Blockgletscher, der sich zu großen Teilen bereits mit der Rutschung mitbewegt. Ob es sich dabei noch um einen aktiven Blockgletscher handelt (Bewegung durch interne Eisdeformation) kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht beantwortet werden.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse und Interpretationen kann folgende Modellvorstellung zur Destabilisierung des Sattelkars angenommen werden:

- Form und Morphometrie des Kares begünstigen große Sedimentablagerungen und deren Mobilisierbarkeit.
- Allgemeine Abnahme der Bodenfestigkeiten durch Permafrostdegradation, Veränderung der Bodenfeuchte bzw. Wasserverfügbarkeit und Durchlässigkeit.
- Rückschreitende Erosion, ausgehend von der Karschwelle seit dem Jahr 2005.
- Dem Blockgletscher wird durch die rückschreitende Erosion das mechanische Widerlager genommen – und beginnt zu rutschen.
- Die Karsedimente destabilisieren sich weiter, immer mehr Material kann durch Starkniederschläge mobilisiert werden – die Folge: Muren.

Die Nachbarke Ofen- Mitter- und Steinkar weisen (noch?) keine mit dem Sattelkar vergleichbaren Destabilisierungstendenzen auf. Die Morphometrie der Kare ist ähnlich dem Sattelkar, die Permafrosttemperaturen sind aber aufgrund der Höhenlage noch ein wenig kälter (Tabelle 4). Sollte es zu einem ähnlichen Ereignis wie 2005 beim Sattelkar kommen, kann es aufgrund der ähnlichen Rahmenbedingungen zu Destabilisierungen der Nachbarkare kommen.



Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit

Hermle, D., Keuschnig, M., Hartmeyer, I., Delleske, R., and Krautblatter, M.: Challenging the timely prediction of landside early warning systems with multispectral remote sensing: a novel conceptual approach tested in the Sattelkar, Austria, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-18>, in review, 2021.

Hermle, D., Gaeta, M., Keuschnig, M., Mazzanti, P., and Krautblatter, M.: Multi-temporal analysis of optical remote sensing for time-series displacement of gravitational mass movements, Sattelkar, Obersulzbach Valley, Austria, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-8011, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-8011>, 2021.

Keuschnig, M., Hermle, D., and Krautblatter, M.: A conceptual approach on optimising lead time for the forecasting of landslides using remote sensing systems, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-17267, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-17267>, 2020

Hermle, D., Keuschnig, M., and Krautblatter, M.: Potential of multisensor assessment using digital image correlation for landslide detection and monitoring, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-16982, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-16982>, 2020

Massiver Felsrutsch in Hohen Tauern wirft Fragen auf (2020): ORF Salzburg, 25.09.2020 - <https://salzburg.orf.at/stories/3068524/>

IPA - International Permafrost Association (2018). Reports from the Adhering Bodies of the International Permafrost Association. ISSN 2221-3775.

Otto J-C., Hartmeyer I., Keuschnig M. (2018): Naturgefahren in alpinen Permafrostregionen und Permafrostmonitoring. Geographische Rundschau 11-2018.

Natur schafft Wissen - Nationalpark Hohe Tauern (2018): ORF 3, Land der Berge.



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchungsgebiet.....	4
Abbildung 2: Große Sedimentablagerungen und steil aufragende Granitgneiswände prägen das Sattelkar (09.07.2020).....	4
Abbildung 3: Blockgletscher (rote Punkte), Sattelkar (16.07.2018).....	5
Abbildung 4: Der untere Bereich des Sattelkars; deutlich zu sehen ist die erhöhte Dynamik an Massenverlagerungsprozessen (25.07.2019).....	5
Abbildung 5: Stromartiges Abrutschen von Hangschutt und Felssturزابlagerungen, Sattelkar (12.07.218).....	6
Abbildung 6: Installation von Boden-Kontrollpunkten (12.07.2018).....	8
Abbildung 7: UAS-Befliegung Sattelkar, DJI Phantom 4 pro mit integriertem DGPS (09.07.2020).....	8
Abbildung 8: Installation der oberflächennahen Temperatursensoren (03.08.2018).....	9
Abbildung 9: Autarkes, passives Seismik System (12.10.2020).....	9
Abbildung 10: Niederschlags (Stundensumme) - und Abflussverlauf 2010 – 2020.....	11
Abbildung 11: Höhen- und Volumenveränderung Sattelkar und Talbereich in der Periode 2010 bis 2020.....	12
Abbildung 12: Flächenveränderung Sattelkar und Bewegungsraten einzelner Blöcke pro Zeitperiode (2003 – 2018).....	13
Abbildung 13: Flächenveränderung Sattelkar und Bewegungsraten einzelner Blöcke pro Zeitperiode (2018 – 2020).....	14
Abbildung 14: Auf das Jahr normalisierte Bewegungsraten (Meter pro Jahr).....	15
Abbildung 15: Absolute Bewegungsraten Sattelkar 2019, 2020.....	15
Abbildung 16: Lage der oberflächennahen Temperatursensoren Sattelkar.....	16
Abbildung 17: Seismische Signale während eines typischen Sommertags (17.09.2020).....	18
Abbildung 18: Seismische Signale während eines Tages mit Starkniederschlägen (29.08.2020).....	19



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen größer als 20, 30, 40 und 50 mm. .	10
Tabelle 2: Die zehn höchsten Tagessummen des Niederschlags in der Beobachtungsperiode 2009-2020, absteigend gereiht.....	10
Tabelle 3: Temperaturdaten (Durchschnitt, Minimum, Maximum, Winter) aus dem Sattelkar für den Zeitraum 01.01.2016 bis 31.12.2019. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.). Rot markierte Standorte zeigen potentielle, sporadische Permafrostvorkommen.....	17
Tabelle 4: Temperaturdaten (Durchschnitt, Minimum, Maximum, Winter) aus dem Ofenkar, Mitterkar und Steinkar für den Zeitraum 01.01.2019 bis 31.12.2019. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.).....	17



Referenzen

- Anker, F.; Fegerl, L.; Hübl, J.; Neumayer, F.; Keuschnig, M.; Kaitna, R. (2016): Geschiebetransport in Gletscherbächen der Hohen Tauern: Beispiel Obersulzbach (177), pp. 86–96.
- APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Edited by Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Wien, Österreich.
- Evans, I. S. (2013): GLACIAL LANDFORMS, EROSIONAL FEATURES | Major Scale Forms. In : Encyclopedia of Quaternary Science: Elsevier, pp. 847–864.
- GAPHAZ (2017): Assessment of Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions – Technical Guidance Document. Edited by Allen, S., Frey, H., Huggel, C. Standing Group on Glacier and Permafrost Hazards in Mountains (GAPHAZ) of the International Association of Cryospheric Sciences (IACS) and the International Permafrost Association (IPA). Zurich, Switzerland / Lima, Peru.
- Haeberli, Wilfried; Whiteman, C. A.; Shroder, John F. (2021): Snow and ice-related hazards, risks, and disasters. Second edition. Amsterdam: Elsevier.
- IPCC (2018): Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
- IPCC (2019): High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
- Krautblatter, Michael; Funk, Daniel; Günzel, Friederike K. (2013): Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space. In *Earth Surf. Process. Landforms* 38 (8), pp. 876–887. DOI: 10.1002/esp.3374.
- Olefs, M.; Formayer, H.; Gobiet, A.; Marke, T.; Schöner, W.; Revesz, M. (2021): Past and future changes of the Austrian climate – Importance for tourism. In *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, p. 100395. DOI: 10.1016/j.jort.2021.100395.
- Schrott, L.; Otto, J.-C.; Keller, M. (2012): Modelling alpine permafrost distribution in the Hohe Tauern region, Austria. In *Austrian Journal of Earth Science* Vol 105 (2), pp. 169–183.
- Vorkauf, Maria; Marty, Christoph; Kahmen, Ansgar; Hiltbrunner, Erika (2021): Past and future snowmelt trends in the Swiss Alps: the role of temperature and snowpack. In *Climatic Change* 165 (3-4). DOI: 10.1007/s10584-021-03027-x.