



GEORESEARCH



# Klimasensitive, hochalpine Kare: Langzeitmonitoring Sattelkar

*Endbericht (2021-2024)*

# Impressum

Herausgeber: GEORESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Techno-Z Wissenspark  
Urstein, Urstein Süd 15, 5412 Puch bei Hallein,  
[www.georesearch.ac.at](http://www.georesearch.ac.at)

Autoren: Markus Keuschnig, Robert Delleske, Ingo Hartmeyer, Magdalena  
Kutschar

Fördergeber:



Nationalpark Hohe Tauern



Geologischer Dienst  
Salzburg



Hydrographischer Dienst  
Salzburg



Wildbach- und  
Lawinerverbauung

Mit Unterstützung von Bund und Europäischer Union

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

  
**LE 14-20**  
Entwicklung für den Ländlichen Raum

Europäische Union  
  
Europäischer Landwirtschaftsfonds für  
die Entwicklung des ländlichen Raums:  
Hier investiert Europa in die ländlichen  
Gebiete

Projektname: Langzeitmonitoring Sattelkar

Version: 1.0

Datum: 31.05.2024

Titelbild: Automatisches Kamerasystem und Sattelkar (Oktober, 2022)

## Vertraulichkeitsausschluss

Dieses Dokument enthält vertrauliche Informationen und ist ausschließlich für den Empfänger bestimmt. Der Inhalt dieses Dokuments, einschließlich Informationen zur verwendeten Methodik von GEORESEARCH und zum Know-how, darf weder ganz oder teilweise durch irgendwelche Mittel an Dritte weitergegeben oder für andere Zwecke verwendet werden, ohne die ausdrückliche schriftliche Genehmigung von GEORESEARCH.

## Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt „Klimasensitive, hochalpine Kare: Langzeitmonitoring Sattelkar“ untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf das Sattelkar im Obersulzbachtal in den Hohen Tauern Salzburgs. Seit dem Jahr 1880 ist die durchschnittliche Jahrestemperatur in Österreich um rund 2 °C gestiegen, was weit über dem globalen Durchschnitt (ca. 1 °C) liegt und einen signifikanten Rückgang der Gletscher- und Permafrostbereiche verursachte.

Im Sattelkar (2130-2730 m üNN), ist seit rund 20 Jahren eine signifikante Intensivierung der Massenverlagerungsprozesse zu beobachten. Ursprünglicher Auslöser der mittlerweile den gesamten Karboden erfassenden Rutschung waren Starkniederschläge im Jahr 2005, die zu starker lokaler Erosion und einer Degradation der Vegetationsdecke im unteren Karbereich (unmittelbar oberhalb der Karschwelle) führten. Durch rückschreitende Erosion wurden in den Folgejahren auch die mittleren und oberen Bereiche der Karfüllung inklusive des lokalen Blockgletschers erfasst.

Ein umfassendes Monitoring wurde implementiert, um meteorologische und hydrologische Bedingungen zu beobachten, Oberflächen- und Untergrundveränderungen zu identifizieren und Massenbewegungen zu dokumentieren. Die wichtigsten Ergebnisse umfassen:

**Meteorologische und hydrologische Bedingungen:** Die Analyse der Wetterstationsdaten an der Kürsinger Hütte zeigt eine Häufung von Starkniederschlägen (> 40 mm) in den letzten vier Jahren (2020-2023). Die höchste Tagessumme seit Aufzeichnungsbeginn betrug 100,1 mm am 28.08.2023. Auch die Abflussspitzenwerte (sieben der zehn höchsten Werte seit Aufzeichnungsbeginn) wurden in den letzten vier Jahren verzeichnet.

**Oberflächenveränderungen:** Fernerkundungsbasierte Analysen (Drohnenkarten, Luftbilder) dokumentieren eine tiefgreifende rückschreitende Bewegung der Schuttfüllung des Sattelkars. Seit dem Jahr 2005 wurden rund 920.000 m<sup>3</sup> Sediment aus dem Kar ausgefragt. Davon wurden etwa 590.000 m<sup>3</sup> am Talboden abgelagert, 330.000 m<sup>3</sup> wurden durch den Obersulzbach abtransportiert. Die Fläche der Rutschung betrug im Jahr 2023 rund 17 ha (= 25 Fußballfelder). Auf Basis einer geophysikalisch (Georadar) ermittelten Mindestmächtigkeit von 10 m, kann von einem Gesamtvolumen von zumindest 1,7 Mio. m<sup>3</sup> ausgegangen werden. Die Bewegungsraten im unteren Teil der Rutschmasse betragen im Jahr 2023 mehr als 50 Meter pro Jahr.

**Thermische Untergrundbedingungen:** Die in 10 cm Tiefe gemessenen Untergrundtemperaturen liegen im Mittel bei 2,4 °C. Trendanalysen (2016-2022) zeigen einen starken Temperaturanstieg von durchschnittlich +0,25 °C pro Jahr (mehr als doppelt so hoch wie der Anstieg der Lufttemperatur). Hydrochemische Analysen von im Sattelkar genommenen Wasserproben demonstrieren isotopisch „leichte“ Wässer mit niedrigen Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalten, die voraussichtlich abtauenden Permafrostlinsen entstammen.

**Ereignisdokumentation von Massenbewegungen:** Passive seismische Messungen und das automatische Kamerasystem liefern kontinuierliche Daten zur Überwachung der Sattelkar-Rutschung. Intensive Massenbewegungsaktivität wurde in Verbindung mit Starkniederschlägen dokumentiert.

## Summary

The research project "Climate-sensitive high-alpine cirques: Long-term monitoring Sattelkar" investigates the effects of climate change on the Sattelkar in the Obersulzbach valley, Hohe Tauern Range, Salzburg. Since 1880, the average annual temperature in Austria has increased by around 2 °C, which is well above the global average (approximately 1 °C) and has caused significant glacier retreat and permafrost degradation.

In the Sattelkar (2130-2730 m a.s.l.), a significant intensification of mass movement processes has been observed for the last 20 years. The complex landslide was initiated by heavy rainfall in 2005, which led to severe local erosion and degradation of the vegetation cover in the lower cirque area (just above the cirque threshold). Through retrogressive erosion in the following years, the middle and upper areas of the cirque fill, including the local rock glacier, were successively mobilized.

A comprehensive monitoring system was implemented to observe meteorological and hydrological conditions, identify surface and subsurface changes, and document mass movements. The key findings include:

**Meteorological and hydrological conditions:** The analysis of weather station data from the Kürsinger Hütte shows a clustering of heavy rainfall events (> 40 mm) in the last four years (2020-2023). The highest daily total since the beginning of records was 100.1 mm on August 28, 2023. Furthermore, the highest peak runoff values (seven out of the ten highest on record) were observed in the past four years as well.

**Surface changes:** Remote sensing analyses (drone data, aerial images) document a profound retrogressive movement of the debris fill of the Sattelkar. Since 2005, approximately 920,000 m<sup>3</sup> of sediment have been transported out of the cirque. Of this, about 590,000 m<sup>3</sup> have been deposited on the valley floor, while 330,000 m<sup>3</sup> have been evacuated by the Obersulzbach. The area of the landslide was around 17 hectares (equivalent to 25 football fields) in 2023. Based on a geophysically (ground-penetrating radar) determined minimum thickness of 10 meters, a total volume of at least 1.7 million m<sup>3</sup> can be assumed. The movement rates in the lower part of the landslide mass exceeded 50 meters per year in 2023.

**Thermal subsurface conditions:** Mean subsurface temperature measured at a depth of 10 cm is 2.4 °C. Trend analyses (2016-2022) show a significant temperature increase of +0.25 °C per year on average (more than twice the increase of air temperature). Hydrochemical analyses of water samples taken in the Sattelkar demonstrate isotopically "light" waters with low deuterium and oxygen-18 contents, likely originating from thawing permafrost lenses.

**Mass movement event documentation:** Passive seismic measurements and an automated camera system provide data for quasi-continuous monitoring of the Sattelkar landslide. Particularly intensive mass movement activity has been documented in connection with heavy rainfall events.

# Inhalt

Impressum .....	1
Zusammenfassung .....	2
Summary .....	3
Inhalt.....	4
1. Einleitung .....	5
1.1 Kare im Klimawandel.....	5
1.2 Das Sattelkar und seine Nachbarkare .....	6
1.3 Ziele und wissenschaftliche Fragestellungen .....	10
2. Monitoringkonzept .....	11
2.1 Meteorologische und hydrologische Bedingungen.....	12
2.2 Oberflächenveränderungen.....	13
2.3 Thermische Untergrundbedingungen.....	15
2.4 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen .....	18
3. Ergebnisse und Interpretationen .....	20
3.1 Meteorologische und hydrologische Bedingungen.....	20
3.2 Oberflächenveränderungen.....	24
3.3 Thermische Untergrundbedingungen.....	27
3.3.1. Oberflächennahe Temperaturen.....	27
3.3.2. Isotopenchemie .....	32
3.4 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen .....	36
4. Schlussfolgerungen.....	39
Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit.....	41
Referenzen .....	42
Abbildungen.....	44
Tabellen .....	45

# 1. Einleitung

## 1.1 Kare im Klimawandel

Die durchschnittliche Jahrestemperatur ist in Österreich seit 1880 um rund 2 °C gestiegen (APCC 2014; Olefs et al. 2021). 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). Bis zum Jahr 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, Schneedeckenmächtigkeit und -dauer. 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; Hartmeyer et al. 2020) 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 2014) und oft große Sedimentmengen beherbergen. Sie befinden sich unterhalb von Berggipfeln und Graten und sind seitlich/karaufwärts durch steile Felswände gekennzeichnet. Im Bereich der karabwärts gelegenen Öffnung befindet sich meist eine markante Karschwelle. Aufgrund ihrer hochalpinen Lage unterliegen Kare oft (noch) einer direkten Eisbeeinflussung (Permafrost und/oder Gletscher), klimatische Veränderungen wirken sich daher besonders stark auf das lokale Prozessgefüge aus. Der Gletscherrückgang führt in vielen Karen zur raschen Freilegung von Lockermaterial und erhöht damit ebenso die Sedimentverfügbarkeit wie der Permafrostrückgang (Tauen von Untergrundeis), der die Kohäsion des Untergrundmaterials signifikant reduziert. Verbunden mit einer erhöhten Wasserverfügbarkeit (z.B. zunehmende Starkniederschläge, frühe/langanhaltende Schmelze von Schnee und Eis) kann das in großer Menge verfügbare Lockermaterial mobilisiert werden – mögliche Folgen: Hangrutschungen, Muren und geschiefbeführende Hochwässer.

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 und Krautblatter 2019). 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 kaum vorhanden. Diese sind aber von kritischer Bedeutung für ein verbessertes Prozessverständnis, die Identifikation von Schwellenwerten, die Kalibrierung numerischer Modelle und in weiterer Folge für eine verbesserte Vorhersage der zukünftigen Entwicklung.

## 1.2 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). Das Obersulzbachtal ist besonders gut für naturwissenschaftliche Forschungsprojekte geeignet - der menschliche Einfluss auf das natürliche System ist aufgrund des Schutzstatus des Nationalparks Hohe Tauern auf ein Minimum reduziert. Aufgrund der hydrographischen Bedeutung des Tals existieren eine automatische Wetterstation in der Nähe der Kürsinger Hütte und zwei Abflussmessstellen des Landeshydrographischen Dienstes Salzburg. Die Datenreihen wurden vom Land Salzburg zur Verfügung gestellt und für Analysen verwendet.

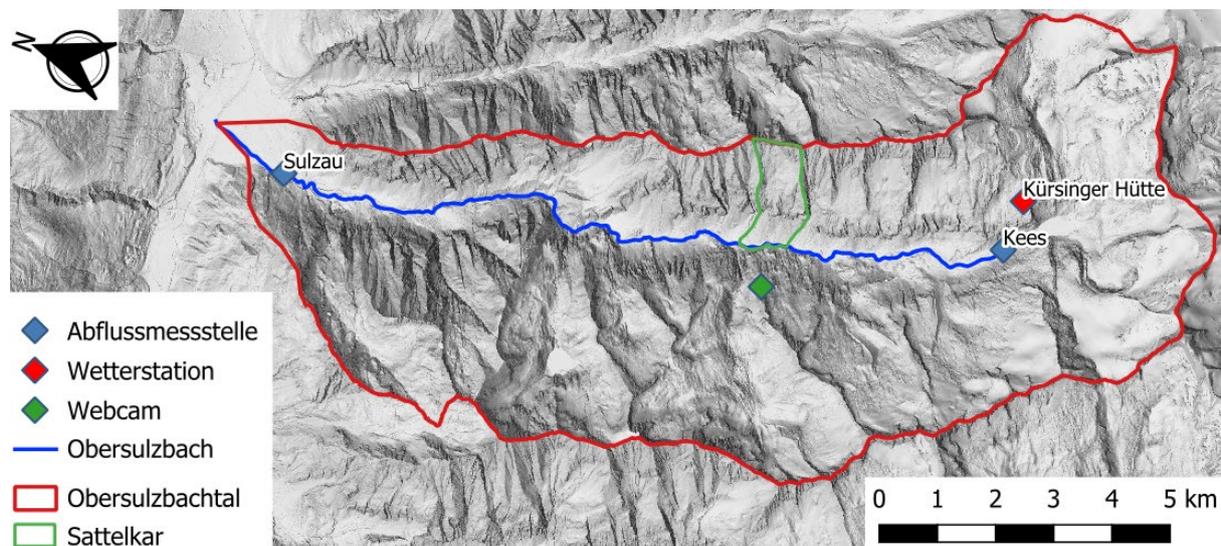


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet. Das Sattelkar ist geprägt von mächtigen Sedimentablagerungen aus den rundum aufragenden Granitgneiswänden und wurde intensiv glazial und periglazial geformt.



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

Aufgrund der topographischen Lage und Höhe zeigen Permafrostmodelle für das Sattelkar sporadische Permafrostvorkommen an (Schrott et al. 2012). Diese Diagnose wird durch eine auf (älteren) Luftbildern erkennbare Blockgletscherform untermauert, deren Entstehung nur mit Permafrostbedingungen (langsameres Schuttkriechen durch Deformation von dauerhaftem Untergrundeis) erklärt werden kann (Abbildung 3).



Abbildung 3: Umriss der Blockgletscher-ähnlichen Landform im Sattelkar (16.07.2018).



Abbildung 4: Unterer Bereich des Sattelkars. Deutlich zu sehen ist die scharfe, durch Vegetationsbewuchs gekennzeichnete Grenze zwischen aktiven und inaktiven Bereichen an der orographisch rechten (nördlichen) Seite der Rutschung (25.07.2019).

An der Karschwelle beginnend hat sich die Lockermaterialbedeckung des Sattelkars im Jahr 2005 in Bewegung gesetzt. Geschlossene Vegetationsbereiche sind seitdem großflächig zu Schuttbereichen degradiert (Abbildung 4). Das mobilisierte Material, bestehend aus grobblockigem Hangschutt und Felssturzmaterial mit teils hausgroßen Komponenten und einer Mächtigkeit von mindestens 10 m, rutscht stromartig in Richtung Karschwelle ab (Abbildung 5).



Abbildung 5: Stromartiges Abrutschen von Hangschutt und Felssturzablagerungen, Sattelkar (12.07.2018).

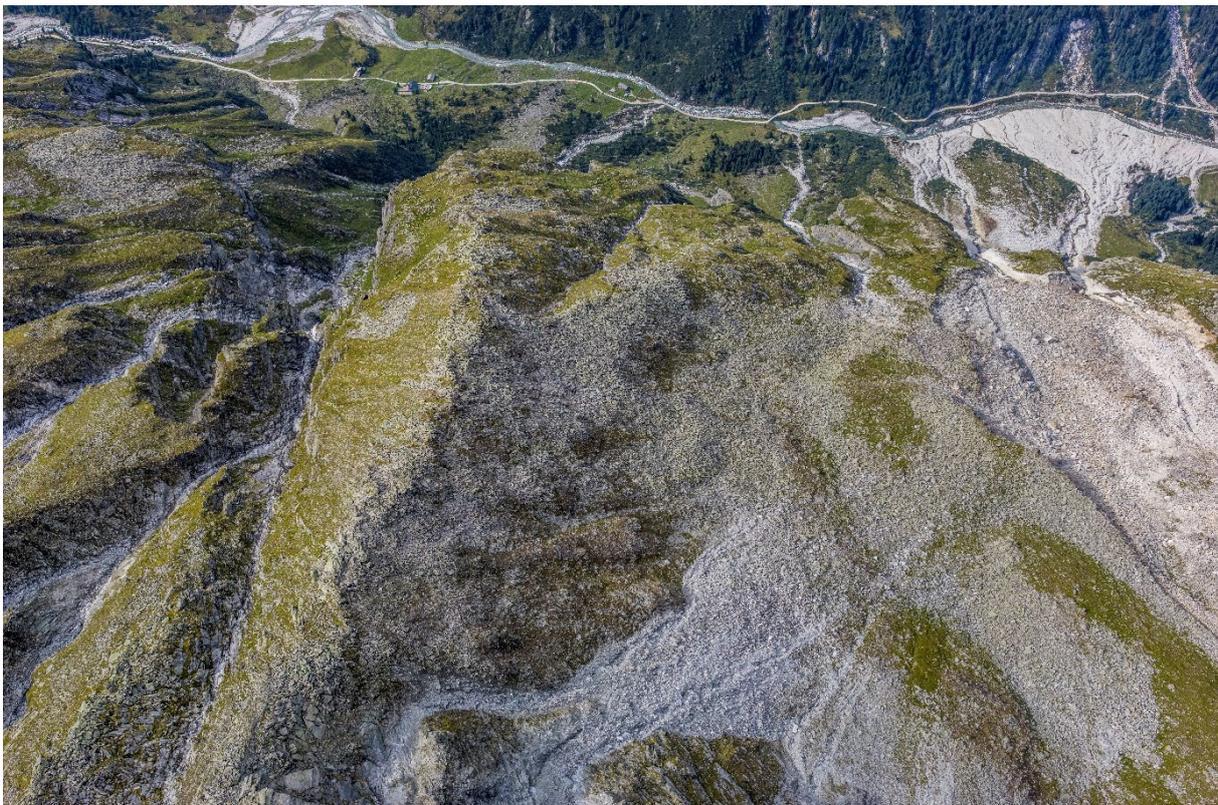


Abbildung 6: UAS-Aufnahme des Sattelkars (12.09.2023).

Geländeanalysen zeigen, dass eine tiefgreifende, rückschreitende Bewegung der Schuttfüllung des Kares in Gang gesetzt wurde. Als Hauptverursacher werden sommerliche Starkniederschläge des Jahres 2005 vermutet, die zu einem Abgleiten bzw. Kriechen der

Schuttfüllung auf dem glatten, darunterliegenden Karboden führten. Detaillierte Luftbildanalysen (Abbildung 6), sowie Augenzeugenberichte und Schadensdokumentation deuten darauf hin, dass die lokale Massenbewegungs- und Muraktivität in den letzten beiden Jahrzehnten deutlich zugenommen haben. Vom Sattelkar ausgehende Muren blockierten den Obersulzbach und führten in Kombination mit der allgemeinen Überflutungssituation im Einzugsgebiet zu schwerwiegenden Schäden im mittleren und oberen Bereich des Obersulzbachs (Anker et al. 2016).

Das Sattelkar verfügt über drei Nachbarkare mit nahezu identischen geomorphologischen Eigenschaften: Das Ofenkar, das Mitterkar und das Steinkar. Trotz ähnlicher topographischer, klimatologischer und hydrologischer Bedingungen konnten in den drei talaufwärts gelegenen Nachbarkaren bislang keine signifikanten Massenbewegungen beobachtet werden. Die Ursachen für diesen Gegensatz (hochaktives Sattelkar versus inaktive Nachbarkare) sind bis dato ungeklärt.

## 1.3 Ziele und wissenschaftliche Fragestellungen

Das Hauptziel des vorliegenden Projekts (2021-2024) war die Erweiterung und Wartung des im Vorgänger-Projekts (2018-2021) installierten Monitoringsystems für die langfristige Überwachung des Sattelkars. Atmosphären-, Oberflächen- und Untergrundbedingungen wurden systematisch und kontinuierlich erfasst, die gewonnenen Daten und Informationen bilden eine wertvolle Entscheidungsgrundlage und können für weitere Forschungsprojekte verwendet werden. Im Zentrum der Forschungsaktivitäten standen die folgenden, wissenschaftlichen Fragestellungen:

- Wie reagieren das Sattelkar und seine Nachbarkare auf veränderte klimatische Rahmenbedingungen?
- Mit welchem aktuellen und zukünftigen Naturgefahrenpotential ist zu rechnen?

## 2. Monitoringkonzept

Für die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Oberfläche und oberflächennahem Untergrund wurde ein systemisches Monitoringkonzept umgesetzt. Dieses basiert auf vier Überwachungsdomänen: (i) Meteorologische und hydrologische Bedingungen, (ii) Oberflächenveränderungen, (iii) Thermische Untergrundbedingungen, sowie (iv) Ereignisdokumentation von Massenbewegungen. Im Folgenden werden die einzelnen Domänen näher erläutert:

- **Domäne 1: Überwachung der meteorologischen und hydrologischen Bedingungen**
  - Analyse der Wetterstationsdaten (Kürsinger Hütte) des Hydrographischen Dienstes des Landes Salzburg.
  - Analyse der Pegelstände und Abflussraten an zwei Messtationen im Bereich des Obersulzbaches (Sulzau und Abfluss Sulzsee).
- **Domäne 2: Überwachung der Oberflächenbedingungen, Bewegungsmuster und -raten:**
  - Jährliche Photogrammetrie-Befliegungen des Sattelkars mit UAS (Unmanned Aerial Systems) zur Analyse von Oberflächenveränderungen, Bewegungs- und Erosionsraten.
- **Domäne 3: Überwachung der thermischen Untergrundbedingungen**
  - Oberflächennahe Temperatursensoren zur Erfassung der Untergrundtemperaturen (Permafrost) und Schneebedeckung.
  - Geoelektrik-Messungen zur Identifizierung gefrorener/ungefrorener Untergrundbereiche.
  - Isotopenchemie Wasser zur Identifizierung von Schmelzwässern aus Permafrost-Bereichen.
- **Domäne 4: Ereignisdokumentation von Muren, Hangrutschungen und Steinschlägen**
  - Permanent installiertes Kamerasystem zur visuellen Überwachung der Massenbewegungsaktivität.
  - Autarke, passive Seismik zur Ereignisdokumentation

## 2.1 Meteorologische und hydrologische Bedingungen

Für die Überwachung der atmosphärischen Bedingungen wurden Daten der vom Landeshydrographischen Dienst Salzburg betriebenen Wetterstation (AWS) bei der Kürsingerhütte (2.552 m üNN, Abbildung 1) genutzt. Die 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 (Pegel „Kees“), der zweite Standort im Bereich des Talausgangs (Pegel „Sulzau“). Das Sattelkar entwässert in etwa in der Mitte der beiden Messstandorte (Abbildung 1).

## 2.2 Oberflächenveränderungen

Oberflächenveränderungen wurden mit Fernerkundungsmethoden wie UAS (Unmanned Aerial Systems, Drohnen) sowie Erdbeobachtungssatelliten (u.a. Sentinel-1, Sentinel-2 und Planet Dove) erfasst. Für die präzise Erfassung der Bewegungs- und Erosionsraten wurden neun permanente Boden-Kontrollpunkte (GCPs – Ground Control Points) installiert und mit DGPS (Differential Global Positioning System) verortet (Abbildung 7). Mit Hilfe der GCPs konnten die UAS-Befliegungen mit Erfassungsgenauigkeiten im niedrigen Zentimeterbereich und einer Auflösung von 6-8 cm durchgeführt werden (Tabelle 1).

Die Berechnung der Höhen- und Volumenveränderungen basiert auf dem DTM des Landes Salzburg (2010) und der neu berechneten DSM 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, 2015 und 2018 verwendet. Die Berechnung der Bewegungsvektoren und -raten basiert auf einer manuellen, optischen Verfolgung von eindeutig identifizierbaren Blöcken über die Zeit.

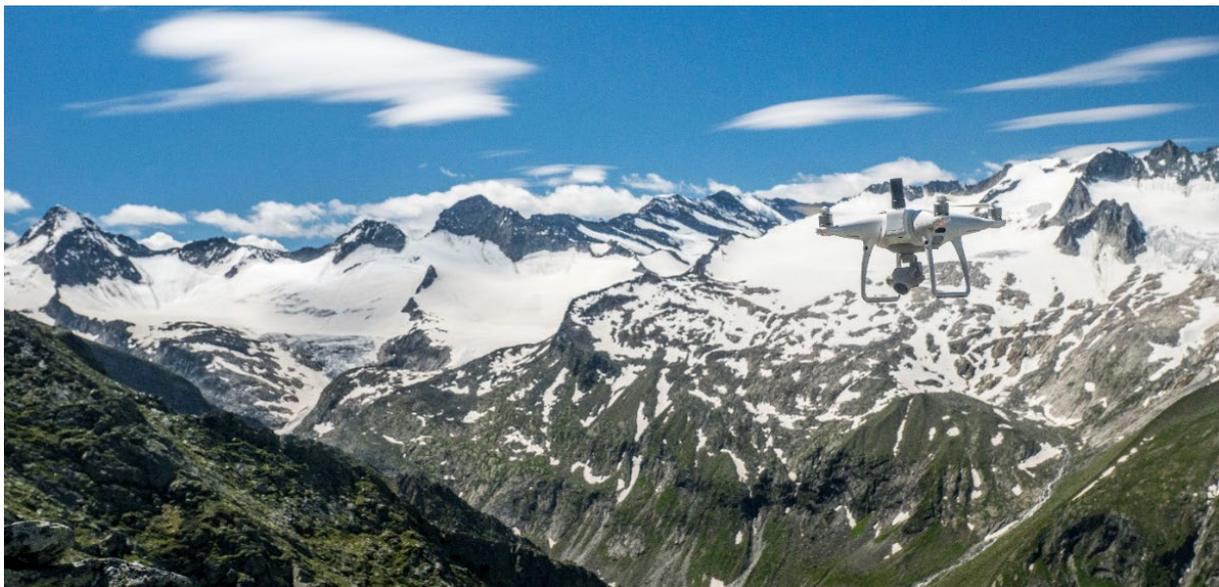


Abbildung 7: Installation von Boden-Kontrollpunkten (12.07.2018).

In der aktuellen Projektperiode (2021-2024) wurden insgesamt sechs Befliegungen durchgeführt mit dem Ziel Bewegungsraten innerhalb der Sommerperioden zu erfassen. Dabei wurde das gesamte Sattelkar bis hin zur gegenüberliegenden Talseite bei sehr guten Lichtverhältnissen und ohne Schneebedeckung photogrammetrisch erfasst (Abbildung 8). Angewendet wurden jeweils drei Flugpläne, die Befliegung wurde vom Sattelkar aus talwärts durchgeführt. Die erste Befliegung des Jahres 2023 wurde am 18 bzw. 20.07. durchgeführt und musste aufgrund schlechter Witterungsverhältnisse auf zwei Flugtage aufgeteilt werden. Dabei wurde eine GSD (Ground Sampling Distance/Bodenauflösung) von 6 cm erreicht. Am 12.09.2023 wurde die zweite Befliegung durchgeführt. Dabei wurde das Untersuchungsgebiet erstmals mit einem leistungsstärkeren UAS (DJI Matrice M300 RTK) befliegen. Der Start erfolgte dabei direkt bei der Hofrat-Keller-Hütte und das Sattelkar musste nicht betreten werden. Mit dieser Plattform-Sensor-Kombination wurde eine Auflösung von 5 cm erzielt.

**Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Befliegungen im gesamten Untersuchungszeitraum 2018-2023. An den mit \* markierten Daten konnten die Befliegungen aufgrund schlechter Witterungsverhältnisse nicht an einem Tag durchgeführt werden.**

	<b>System</b>	<b>RMS [m]</b>	<b>Auflösung [cm]</b>
<b>13.07.2018</b>	DJI Phantom 4 Pro	0,213	8
<b>24.07.2019</b>	DJI Phantom 4 Pro	0,202	8
<b>04.09.2019</b>	DJI Phantom 4 Pro	0,073	8
<b>09.07.2020</b>	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,093	8
<b>11.09.2020</b>	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,09	8
<b>07.07.2021*</b>	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,065	6
<b>21.07.2021</b>	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,037	6
<b>08.09.2021</b>	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,058	6
<b>19.07.2022</b>	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,062	6
<b>07.09.2022</b>	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,057	6
<b>18./20.07.2023</b>	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,176	6
<b>12.09.2023</b>	DJI Matrice M300 RTK + DJI Zenmuse P1 (35mm)	0,039	5



**Abbildung 8: UAS-Befliegung Sattelkar, DJI Phantom 4 pro mit integriertem DGPS (09.07.2020).**

## 2.3 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 (Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung) installiert und jährlich ausgelesen.



Abbildung 9: Wartung und Auslesen der Bodentemperaturen im Sattelkar (28.09.2023)

Die Untergrundtemperaturen im Sattelkar wurden letztmalig am 28.09.2023 ausgelesen (Abbildung 9). Dabei konnte keiner der „alten“ Logger (im Oktober 2015 ausgelegt) mehr ausgelesen werden, da die Loggerbatterien nach fünfjähriger Einsatzdauer (erwartungsgemäß) nicht mehr gebrauchstauglich waren und keine Datenaufzeichnung bzw. keinen Funkkontakt mehr erlaubten.

Alle „neuen“ Logger (im Juli 2022 ausgelegt) konnten gefunden und ausgelesen werden (Tabelle 2). Die Sensoren im Ofen-, Mitter- und Steinkar wurden aufgrund ungünstiger Witterungsverhältnisse nicht begangen. Die nächste Datenauslesung erfolgt voraussichtlich im Sommer 2024.

**Tabelle 2: Übersicht der ausgelegten Temperaturlogger. x = ausgelesen, \* = ersetzt durch einen neuen Logger.**

Auslesedatum	Logger1	Logger2	Logger3	Logger5	Logger6	Logger7	Logger8	Logger9	Logger10	Logger11	Logger12	Logger13	Logger14	Logger15	Logger16	Logger0
<i>Seriennr. alt</i>	A51FE0	A51FE4	A51FE2	A51FDA	A51FD7	A51FE3	A51FDB	A51FDF	A51FD8	A51FD9	A51FD6	A51FDC	A51FDE			A51FE1
<i>ersetzt durch:</i>	A5447A	A5447E	A54483		A54479	A5447B		A54482	A5447F			A54480	A54486		A5447C	
<b>10.10.2017</b>	x					x										
<b>26.06.2018</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
<b>24.07.2019</b>		x	x	x	x	x		x		x		x				
<b>04.09.2019</b>	x						x		x		x				x	
<b>09.07.2020</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
<b>12.08.2021</b>	x	x	x			x		x				x			x	
<b>25.07.2022</b>	*	*	*		*	x/*		*	*			*	*			*
<b>27.09.2023</b>	x	x	x			x		x	x			x				x

Im Verlauf des Projektzeitraums wurden drei umfassende Hydrochemie-Messkampagnen durchgeführt (Tabelle 3), um die Herkunft von Oberflächen- und Quellwasser zu ermitteln. Diese Messkampagnen umfassten die Analyse der Temperatur, der elektrischen Leitfähigkeit und der stabilen Wasserisotope (Deuterium, Sauerstoff-18, Sauerstoff-17). Letztere dienen als besonders wertvolle natürliche Tracer, die es potenziell ermöglichen, den Ursprung und die Bewegung des Wassers innerhalb eines hydrologischen Systems zu verfolgen:

- **1. Deuterium ( $^2\text{H}$ ):** Das Verhältnis von Deuterium zu Wasserstoff in Wasserproben gibt Hinweise auf die Verdunstungs- und Kondensationsprozesse, die das Wasser durchlaufen hat. Unterschiede in den Deuteriumwerten können dabei helfen, zwischen verschiedenen Wasserquellen wie Niederschlagswasser, Grundwasser und Oberflächenwasser zu unterscheiden.
- **2. Sauerstoff-18 ( $^{18}\text{O}$ ) und Sauerstoff-17 ( $^{17}\text{O}$ ):** Die stabilen Sauerstoffisotope werden verwendet, um ähnliche Informationen wie Deuterium zu liefern, jedoch mit einer zusätzlichen Perspektive auf die thermodynamischen Bedingungen, unter denen das Wasser entstanden ist. Die Verhältnisse von  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  und  $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$  können detaillierte Einblicke in die Klimabedingungen zum Zeitpunkt der Wasserbildung geben.

**Tabelle 3: Übersicht der entnommenen Wasserproben zur Bestimmung der Temperatur, Leitfähigkeit und Isotopenverhältnisse der Parameter Deuterium, Sauerstoff-18 und Sauerstoff-17.**

Entnahmedatum	Anzahl der Proben	$^{18}\text{O}$	$^{17}\text{O}$	$^2\text{H}$	Temperatur	Elektrische Leitfähigkeit
04.09.2019	6	x	x	x	x	x
09.07.2020	26	x		x	x	x
08.09.2021	19	x		x	x	x
25.07./02.08.2022	10	x	x	x	x	x
26./27.09.2023	15	x		x	x	x

## 2.4 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen

Für die Detektion von Murereignissen und gravitativen Massenbewegungen wurde unterhalb der Karschwelle, im Bereich des großen Murkegels, ein passives seismisches Monitoringsystem installiert, um erste Testmessungen durchzuführen (Abbildung 10). Das System ist autark konzipiert und basiert auf einer Raspberry Shake 3D Einheit (RaspberryShake 2024), die mit drei 4.5 Hz Geophonen ausgestattet ist. Diese Geophone sind besonders empfindlich und gewährleisten, zusammen mit einer hohen Aufnahmefrequenz von 100 Hz, dass auch kleinere, schnell ablaufende Ereignisse wie Murabgänge präzise erfasst werden können.

Die 4.5 Hz Geophone bieten eine hohe Empfindlichkeit in dem für Murereignisse relevanten Frequenzbereich. Durch die schnelle Aufnahmefrequenz von 100 Hz können detaillierte Daten erfasst werden, was die Analyse und Identifizierung von Ereignissen ermöglicht. Die autarke Charakteristik des Systems stellt sicher, dass die Messungen kontinuierlich und ohne externe Stromversorgung durchgeführt werden können. Diese Konfiguration erlaubt eine langfristige Überwachung der seismischen Aktivitäten im Untersuchungsgebiet.

2023 wurde die Seismik durch Steinschlag beschädigt (Abbildung 10) und vorläufig abgebaut.



Abbildung 10: Steinschlagschäden am autarken Seismik-Monitoring (27.09.2023).

Zusätzlich zum Seismik-Monitoring wurde oberhalb der Hofrat-Keller-Hütte auf ca. 2.000 m ein autarkes Kamerasystem (ENLAPS 2024) installiert (Abbildung 11). Die Kamera verfügt über zwei Objektive zur Erstellung von Panoramaaufnahmen, die Daten werden in Echtzeit mit Mobilfunk übertragen und erlauben eine kontinuierliche Überwachung und Dokumentation der Umgebung (Abbildung 12). Das System wurde 2023 adaptiert und mit einer robusteren Konstruktion versehen. Somit widersteht das System auch sehr hohen Windgeschwindigkeiten und Fotos können frei von Verwacklungen erfasst werden. Diese Verbesserungen erhöhen die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit des Systems unter extremen Wetterbedingungen und gewährleisten eine kontinuierliche Datenaufnahme.



Abbildung 11: Kamerasystem zur Überwachung des Sattelkars (06.10.2022).

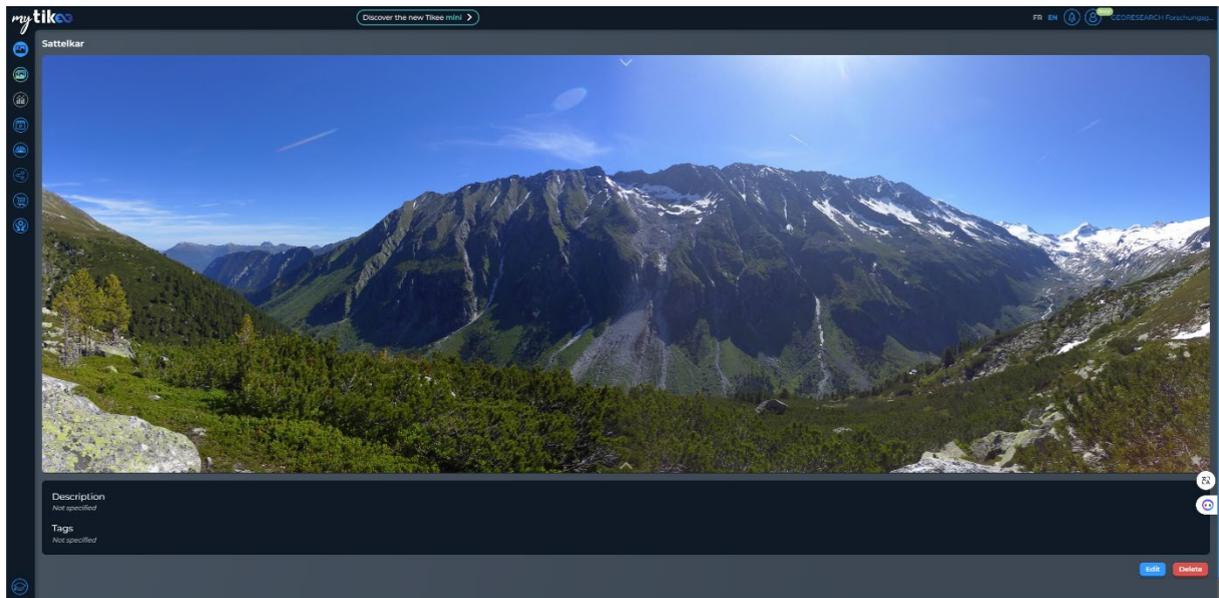


Abbildung 12: Kamerasystem mit KI-unterstützter Plattform zur Datenanalyse.

## 3. Ergebnisse und Interpretationen

### 3.1 Meteorologische und hydrologische Bedingungen

Die Analyse der meteorologischen und hydrologischen Bedingungen basiert auf den Daten des Hydrographischen Dienstes des Landes Salzburg. Tabelle 4 zeigt die Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen größer als 20, 30, 40 und 50 mm. Erkennbar ist eine auffällige Häufung von Starkniederschlagsereignissen (> 40 mm) in drei der letzten vier Jahre (2020, 2021, 2023) (Anm.: Die Datenreihe des Jahres 2022 hat auf Grund der kurzen Betriebszeit der Wetterstation nur eine geringe Aussagekraft). Ob es sich hierbei um eine zufällige Häufung oder um einen (statistisch) signifikanten Langzeittrend handelt, kann nur durch eine langfristig fortgesetzte Analyse der Niederschlagsdaten beantwortet werden.

**Tabelle 4: Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen größer als 20, 30, 40 und 50 mm (Wetterstation Kürsinger Hütte). Die NS-Station an der Kürsinger Hütte war im Jahr 2023 nur 116 Tage in Betrieb (07.06. bis 30.09.2023). In den Vorjahren war die Station typischerweise 150-200 Tage in Betrieb. Eine Ausnahme bildete das Jahr 2022, in dem die Niederschlagsmessung nur 80 Tage lang aktiviert war.**

	> 20 mm	> 30 mm	> 40 mm	> 50 mm
2009	12	5	3	2
2010	8	4	2	1
2011	10	3	1	0
2012	16	5	2	1
2013	6	1	0	0
2014	9	5	3	2
2015	18	6	1	0
2016	10	5	0	0
2017	10	4	0	0
2018	10	5	2	1
2019	11	1	1	1
2020	16	8	6	2
2021	12	6	4	2
2022	4	2	0	0
2023	13	5	3	2

Die Top Ten der Tagesniederschlagssummen der letzten 15 Jahre (2009-2023) unterstreichen eine Häufung von Starkniederschlägen in der jüngsten Vergangenheit (Tabelle 5). Der Maximalwert von 100,1 mm wurde am 28.08.2023 registriert. Die nächstgrößeren Tagessummen wurden am 29.08.2020 (82,9 mm) und am 18.07.2021 (76,2 mm) gemessen. Sechs der zehn höchsten Tagessummen fallen in die letzten vier Jahre.

Spitzenreiter in den Top Ten der Stundenniederschlagssummen ist der 11.06.2014 (19:00-20:00) mit einem Wert von 37,8 mm, gefolgt mit deutlichem Abstand von Ereignissen am 04.08.2015 (22,1 mm) und am 18.07.2023 (19,8 mm) (Tabelle 6). Auch bei den Stundensummen zeigt sich eine Häufung in den letzten Jahren, fünf der zehn größten Ereignisse wurden seit 2020 registriert.

**Tabelle 5: Die zehn höchsten Tagessummen des Niederschlags in der Beobachtungsperiode 2009-2023 (Wetterstation Kürsinger Hütte; absteigend gereiht).**

Rang	Datum	Niederschlag [mm]
1	28.08.2023	100,1
2	29.08.2020	82,9
3	18.07.2021	76,2
4	30.07.2014	76,1
5	27.04.2009	70,1
6	17.07.2021	65,1
7	03.10.2020	62,8
8	11.06.2014	60,4
9	19.08.2017	57,2
10	22.09.2023	54,9

**Tabelle 6: Die zehn höchsten Stundensummen des Niederschlags in der Beobachtungsperiode 2009-2023 (Wetterstation Kürsinger Hütte; absteigend gereiht).**

Rang	Datum	Niederschlag [mm]
1	11.06.2014 19:00	37,8
2	04.08.2015 21:00	22,1
3	18.07.2023 15:00	19,8
4	01.09.2015 21:00	17,7
5	06.08.2020 19:00	16,5
6	11.06.2014 20:00	14,9
7	16.08.2021 14:00	14,4
8	05.08.2022 16:00	14,0
9	05.07.2018 18:00	14,0
10	17.08.2023 17:00	13,4

Auch bei der Betrachtung der Abflussdaten zeigt sich eine leichte Tendenz zu einem verstärkten Auftreten von Spitzenabflüssen in den letzten drei bis fünf Jahren. Am aussagekräftigeren Pegel „Sulzau“ (größeres Einzugsgebiet) wurden sieben der größten zehn Tagesmittelwerte in den letzten fünf Jahren registriert (Tabelle 8). Absoluter Spitzenreiter unter den Tagesabflüssen ist der 31.07.2014 ( $83,9 \text{ m}^3$ ), in dessen Folge es zu intensiver Murtätigkeit und zu signifikanten Infrastrukturschäden im Obersulzbachtal kam. Die gemessenen Spitzenabflüsse (Stundenmittel) während des folgenschweren Unwetters Ende Juli lagen bei mehr als  $120 \text{ m}^3$  pro Sekunde am Pegel „Sulzau“ (Abbildung 13) bzw. bei mehr als  $20 \text{ m}^3$  pro Sekunde am Pegel „Kees“ (Tabelle 7). Ähnlich hohe Abflusswerte ( $> 120 \text{ m}^3$  pro Sekunde im Stundenmittel,  $70,5 \text{ m}^3$  im Tagesmittel) wurden am Pegel „Sulzau“ am 18.07.2021 gemessen, wobei in diesem Fall keine schweren Murschäden auftraten.

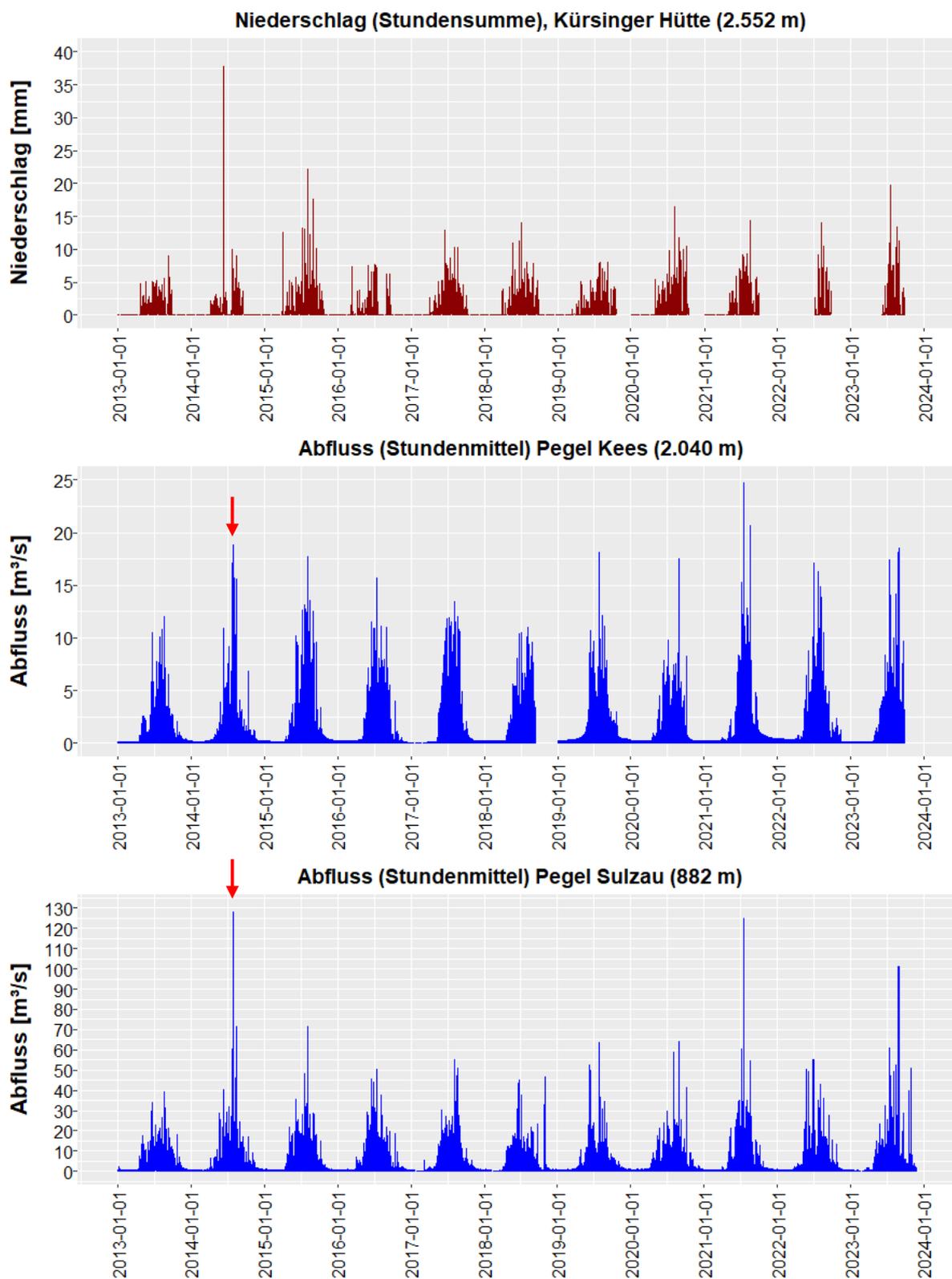


Abbildung 13: Niederschlags- und Abflussverlauf 2013-2023. Rote Pfeile markieren das bis dato letzte große Murreignis im Juli 2014.

**Tabelle 7: Die zehn höchsten Abfluss-Tagesmittelwerte an der Pegelmessstelle „Kees“ in der Beobachtungsperiode 2009-2023 (absteigend gereiht).**

Rang	Datum	Niederschlag [mm]
1	18.07.2021	18,7
2	31.07.2014	14,8
3	17.07.2021	14,3
4	29.07.2019	13,1
5	28.08.2023	12,4
6	17.07.2010	11,5
7	11.06.2010	11,4
8	12.07.2016	11,2
9	04.09.2009	11,1
10	17.07.2009	11,0

**Tabelle 8: Die zehn höchsten Abfluss-Tagesmittelwerte an der Pegelmessstelle „Sulzau“ in der Beobachtungsperiode 2009-2023 (absteigend gereiht).**

Rang	Datum	Niederschlag [mm]
1	31.07.2014	83,9
2	18.07.2021	70,5
3	28.08.2023	58,4
4	12.06.2019	46,7
5	29.07.2019	44,0
6	11.06.2019	43,5
7	17.07.2021	41,1
8	30.08.2020	40,0
9	13.08.2014	39,2
10	04.09.2009	35,8

## 3.2 Oberflächenveränderungen

In Abbildung 14 ist die Höhen- und Volumenveränderung im Bereich des Sattelkars in der Periode 2010-2023 dargestellt. Die Trennung zwischen dem Kar- und Talbereich befindet sich im Bereich der Karschwelle. Insgesamt wurden rund 920.000 m<sup>3</sup> Sediment aus dem Kar transportiert (Muren, Steinschläge, Suspensionstransport). Im Bereich des Talbodens wurden etwa 590.000 m<sup>3</sup> akkumuliert (Stand 2023). Die Differenzmenge (330.000 m<sup>3</sup>) wurde zum größten Teil vom Obersulzbach abtransportiert bzw. in geringerem Ausmaß im Rahmen von Bauarbeiten am Murkegel (technische Schutzmaßnahmen) entfernt.

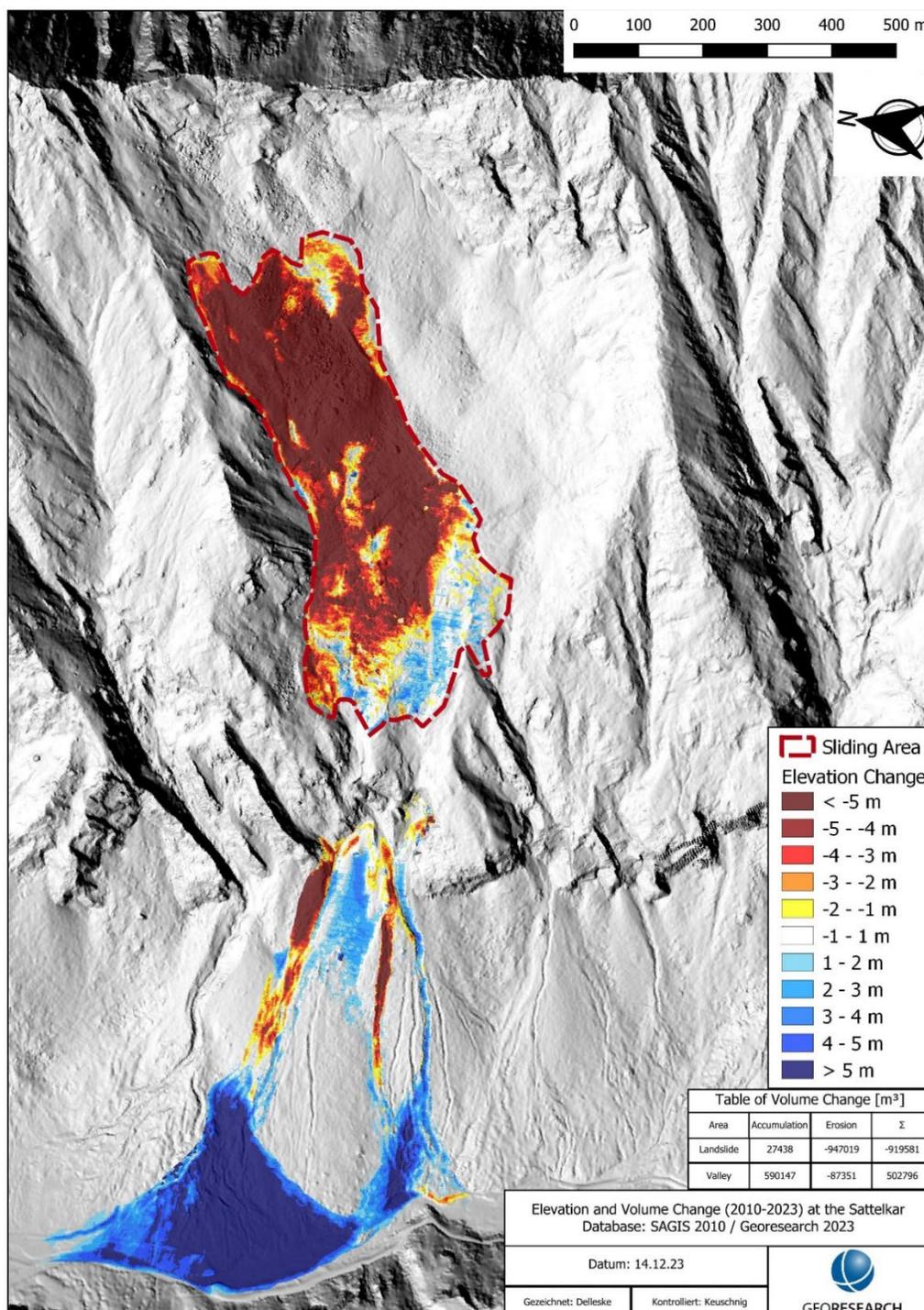


Abbildung 14: Höhen- und Volumenveränderung im Einflussbereich der Sattelkar-Rutschung (2010-2023).

Seit 2005 findet eine tiefgreifende, rückschreitende Bewegung der Schuttfüllung des Kares statt. Initiiert wurde die großflächige Bewegung durch den Abtrag von Lockermaterial direkt oberhalb der Karschwelle in Folge von Starkniederschlägen. Drohnen- und luftbildbasierte Geländeanalysen zeigen, dass Größe und Geschwindigkeit der Rutschung in den letzten knapp zwei Jahrzehnten deutlich zugenommen haben (Abbildung 15).

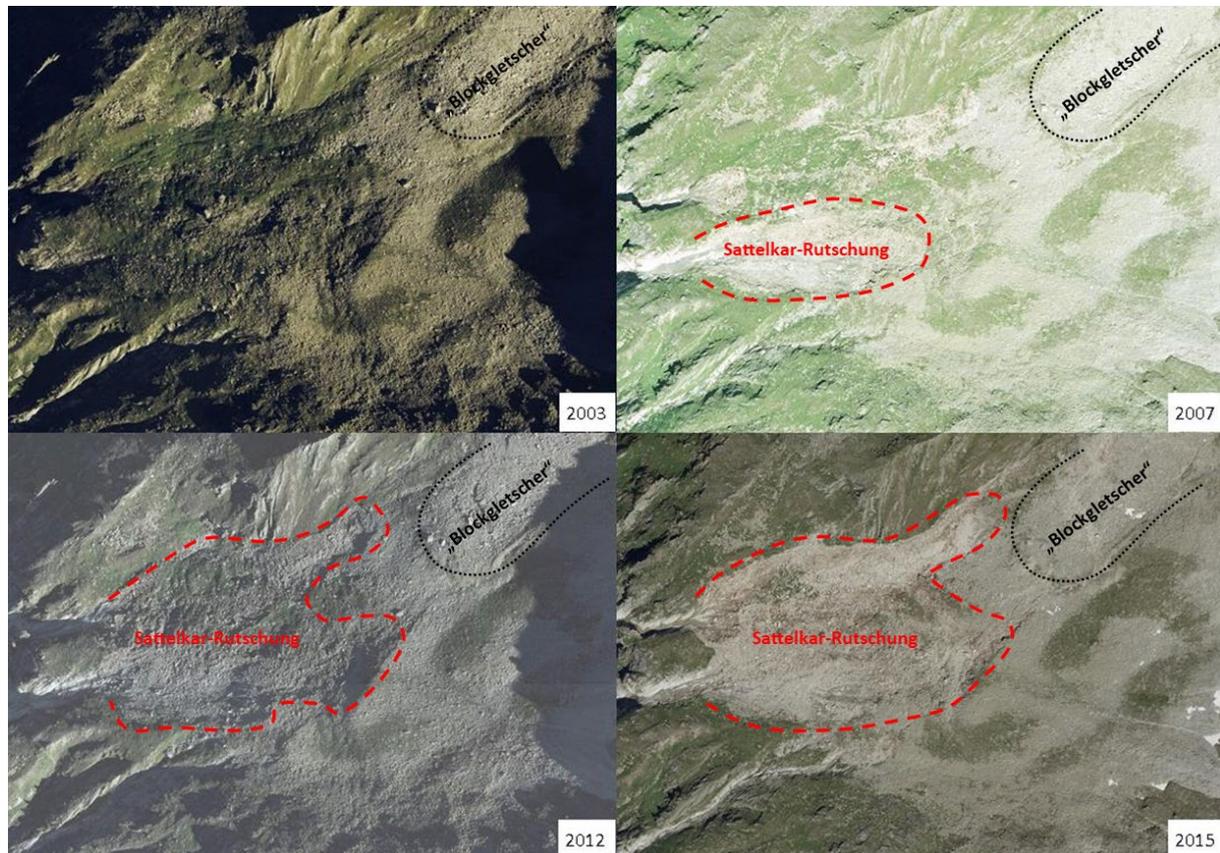
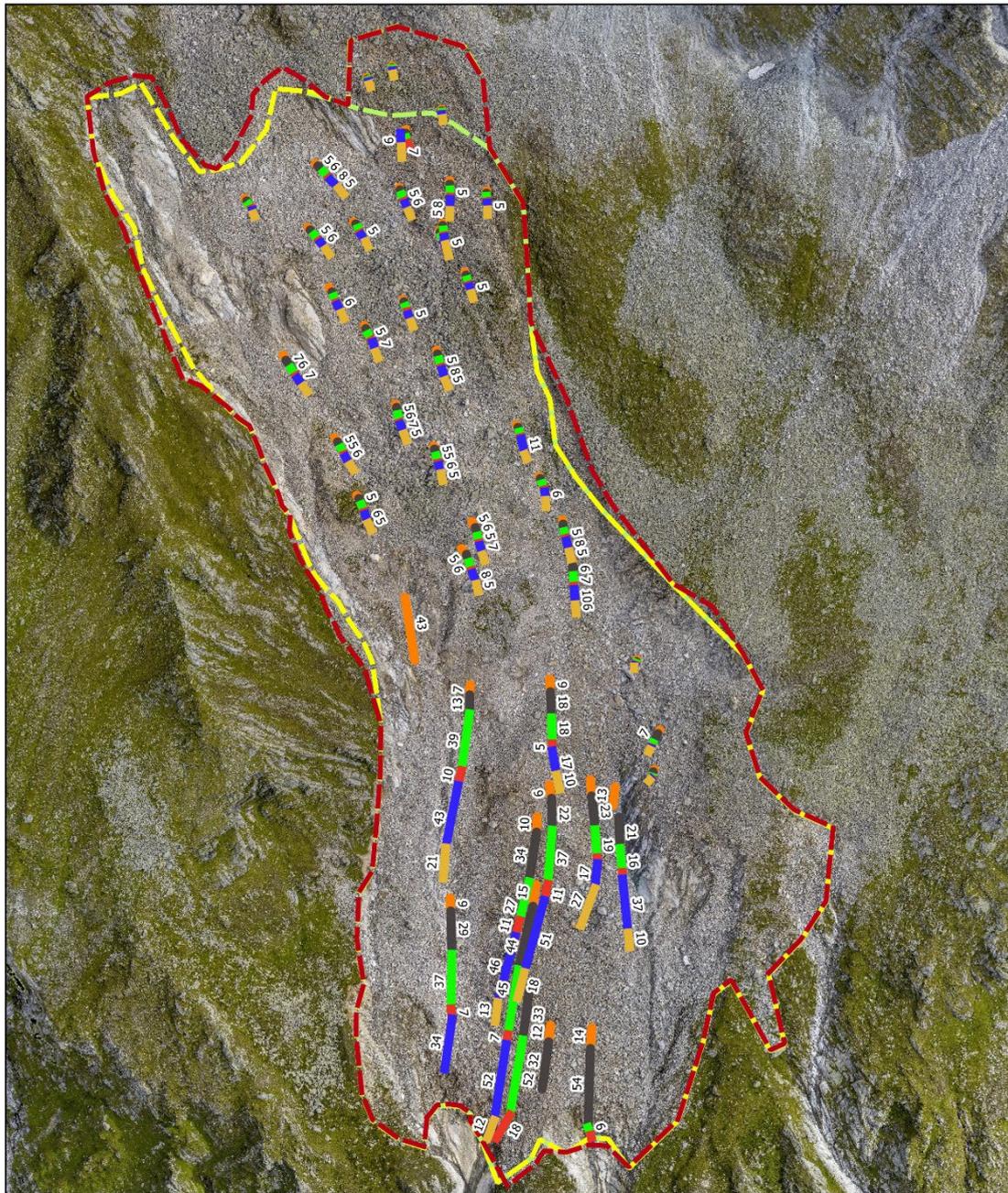


Abbildung 15: Orthofotovergleich der Jahre 2003, 2007, 2012 und 2015. Das Orthofoto des Jahres 2003 zeigt das Sattelkar-Areal vor Initiierung der Rutschung. Unterhalb der Blockgletscher-ähnlichen Landform im rechten oberen Bildbereich (schwarze, punktierte Linie) liegt eine mehr oder weniger flächendeckende Vegetationsbedeckung vor, die nur von einigen größeren Blöcken durchsetzt ist. Im Jahr 2007 ist im unteren Karabschnitt, der durch Starkniederschläge des Jahres 2005 initiierte Anrissbereich bereits deutlich erkennbar. Auf den nachfolgenden Orthofotos der Jahre 2012 und 2015 ist die rapide, rückschreitende Vergrößerung der Sattelkar-Rutschung klar ersichtlich (Quelle: SAGIS).

Aktuell umfasst die Rutschung eine Fläche von rund 17 ha. Stichprobenartig durchgeführte Georadar-Messungen aus dem Jahr 2022 lassen auf eine mittlere Mächtigkeit von zumindest 10 m schließen, woraus sich ein Gesamtvolumen der Rutschmasse von zumindest 1,7 Mio. m<sup>3</sup> ergibt. Die aktuellen Bewegungsraten – abgeleitet aus der manuellen, optischen Verfolgung von eindeutig identifizierbaren Blöcken – ergeben ein differenziertes Bild. Während die Raten im oberen Bereich der Rutschmasse größenordnungsmäßig im Bereich von rund 10 Metern pro Jahr liegen, sind im unteren Bereich Raten von mehr als 50 Meter pro Jahr keine Seltenheit. Die Oberflächengeschwindigkeit der Rutschung nimmt daher von oben nach unten in etwa um das Fünffache (Abbildung 16) zu.



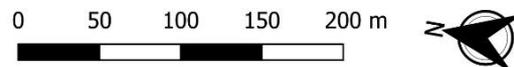
Block Movement per Period [m]\*

- Orange line: 2021.07.07 to 2021.07.21
- Black line: 2021.07.21 to 2021.09.08
- Green line: 2021.09 to 2022.07
- Red line: 2022.07 to 2022.09
- Blue line: 2022.09 to 2023.07
- Yellow line: 2023.07 to 2023.09

\* no all Values > 6m are labeled

Sliding Area

- Red dashed line: Slide 2023
- Yellow dashed line: Slide 2020
- Green dashed line: Slide 2018



Area Change and Block Movement at the Sattelkar Landslide 2021 - 2023 Database: SAGIS 2003 - 2018 / Georesearch 2018 - 2023	
Datum: 15.12.23	
Gezeichnet: Delleske	Kontrolliert: Keuschlg

Abbildung 16: Flächenveränderung der Sattelkarrutschung und Bewegungsraten einzelner Blöcke pro Zeitperiode (2021-2023).

## 3.3 Thermische Untergrundbedingungen

### 3.3.1. Oberflächennahe Temperaturen

Die Untergrundtemperatur im Sattelkar wird mit hochpräzisen Miniaturloggern (Geoprecision M-Log 5W, Genauigkeit:  $\pm 0.1\text{ °C}$ ) gemessen. Für die Temperaturmessung wurden die Logger in einer Tiefe von 10 cm im feinkörnigen Lockermaterial (Sand, Schluff, Erde) vergraben. Eine Ausnahme stellt dabei der am 25.07.2022 ausgelegte Logger #16 dar, der rund 1 m unter der Geländeoberfläche im grobblockigen, aktiven Rutschbereich platziert wurde. Abbildung 17 zeigt die Lage der oberflächennahen Temperatursensoren im Sattelkar. Die Logger-Standorte #4 und #15 wurden durch die rückschreitende Erosion des Kares erodiert.

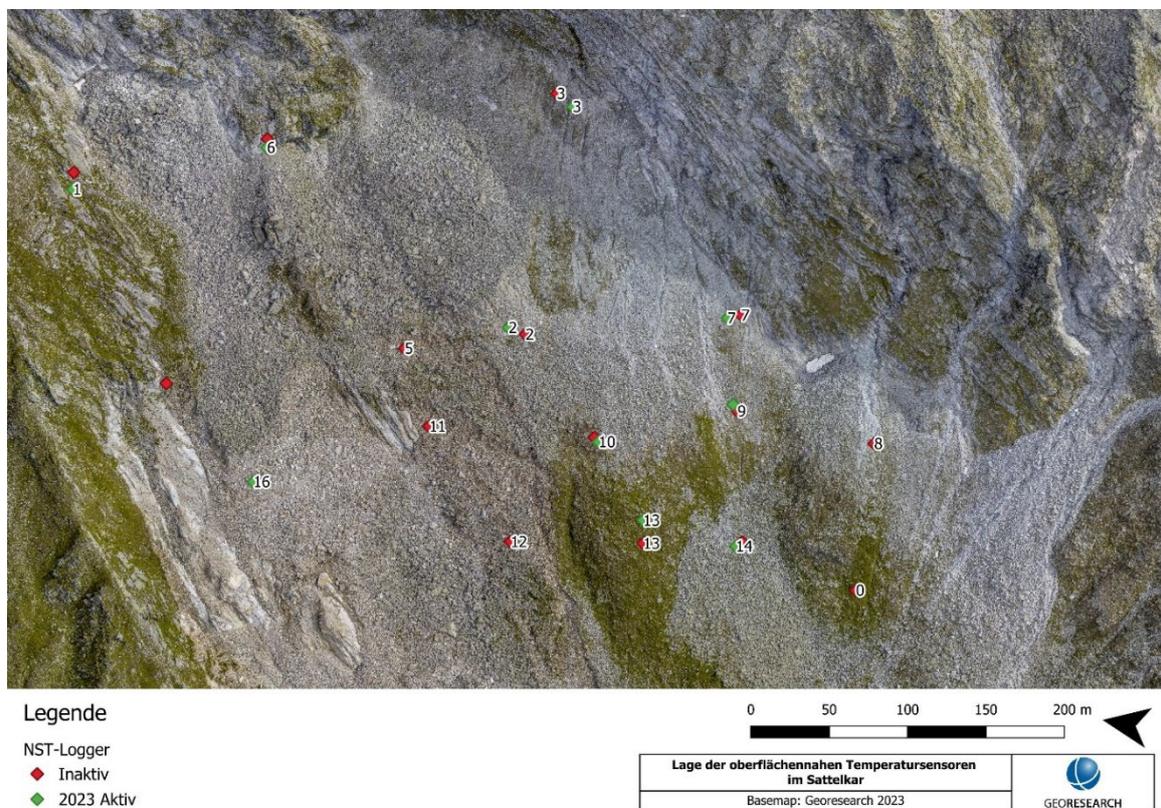
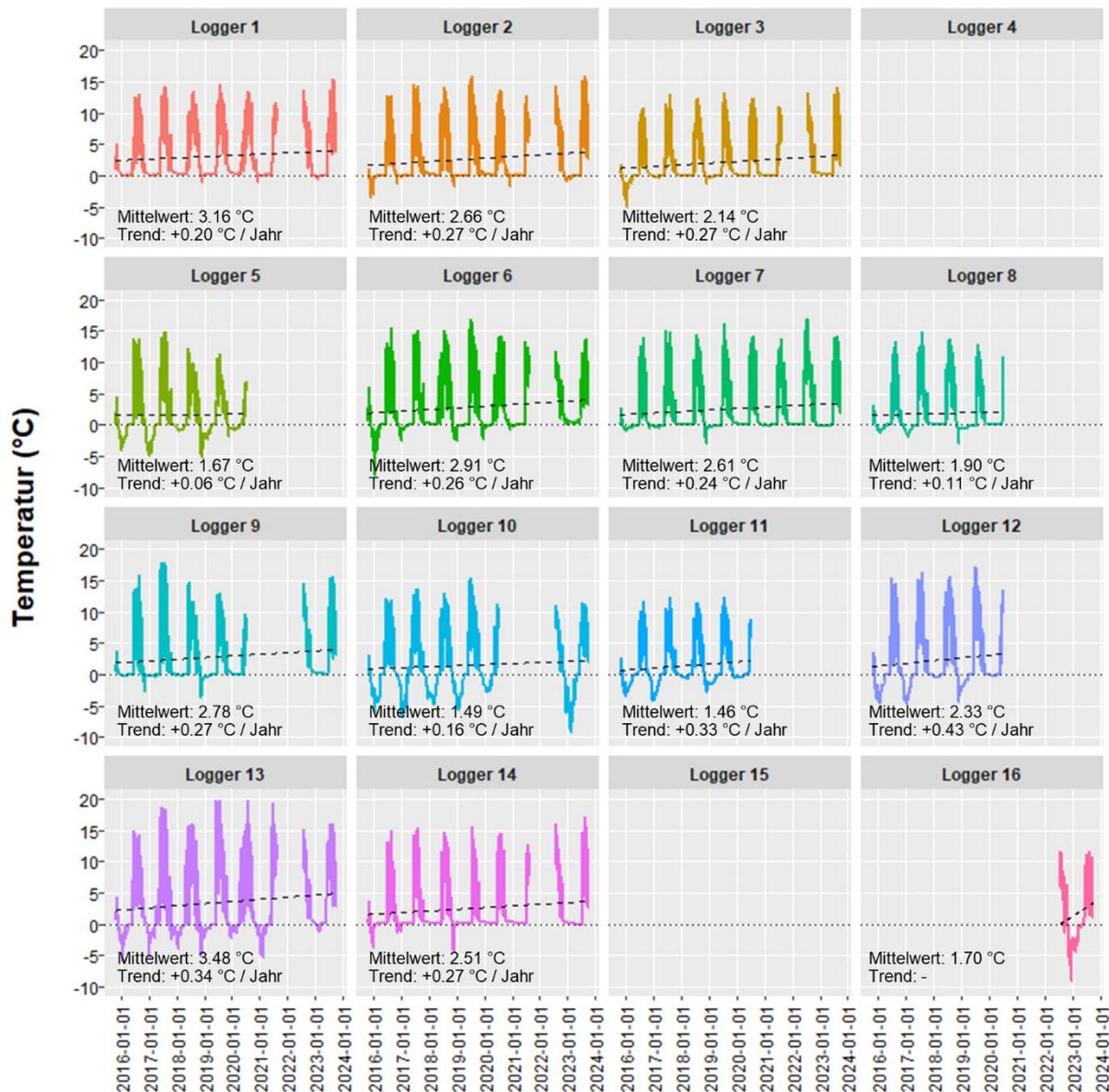


Abbildung 17: Lage der oberflächennahen Temperatursensoren Sattelkar.

Die Standorte #13 und #9 wurden im Sommer 2017 durch Starkniederschlagsereignisse freigelegt und direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Aus diesem Grund ist die Mitteltemperatur über diesen Zeitraum nicht aussagekräftig.

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse aller Bodentemperatur-Logger im Sattelkar im gesamten Beobachtungszeitraum (22.10.2015 bis 27.09.2023). Die gemessene Bodentemperatur der Logger #1-14 (Logger #4 und #15 lieferten keine Daten) lag über den gesamten Beobachtungszeitraum bei  $2.4\text{ °C}$ . Trendanalysen (lineare Regression) zeigen dabei einen sehr hohen mittleren Temperaturanstieg von rund  $+0.25\text{ °C pro Jahr}$  ( $+2.5\text{ °C pro Jahrzehnt}$ ), der deutlich über dem gemessenen Anstieg der Lufttemperatur an vergleichbaren hochalpinen Wetterstationen liegt (z.B. Wetterstation Rudolfshütte:  $+0.06\text{ °C pro Jahr}$ ). Das Sattelkar

erwärmte sich in den letzten Jahren somit deutlich rascher als die oberflächennahe Atmosphäre (Abbildung 18).



**Abbildung 18: Untergrundtemperaturen im Sattelkar im gesamten Beobachtungszeitraum (22.10.2015 bis 27.09.2023). Die gemessenen Temperaturen zeigen eine auffallend starke trendhafte Zunahme von durchschnittlich +0.25 °C pro Jahr.**

Trotz der rapiden Erwärmung der letzten Jahre bzw. Jahrzehnte weisen niedrige Winter-Bodentemperaturen an den Loggerstandorten #5 sowie #10-13 auf sporadische (ausschmelzende) Permafrostvorkommen hin. Auch im hochaktiven Bereich der Sattelkar-Rutschung, wo auf Grund der hohen Bewegungsraten keine langfristigen Temperaturmessungen möglich sind, weisen die vorhandenen Loggerdaten (Logger #16) auf niedrige Bodentemperaturen und eine dementsprechend hohe Permafrostwahrscheinlichkeit hin. So lag die Bodentemperatur an Logger #16 im Zeitraum 01.09.2022 bis 30.08.2023 (= ein volles Jahr) bei nur 0,72 °C. Kaltluftventilation in den Zwischenräumen des grobblockigen Substrats (Blöcke mit mehreren Metern Kantenlänge sind keine Seltenheit) ermöglicht hier eine starke winterliche Abkühlung und führt damit zu einem stark verzögerten Abtauen der

lokalen Permafrostvorkommen (die groben Blöcke der Rutschmasse wirken als thermischer Filter).

Tabelle 11 zeigt die oberflächennahen Untergrundtemperaturen aus dem Ofen- Mitter- und Steinkar für 2019/2020. In allen drei Kare ist mit Permafrostvorkommen zu rechnen, die Wintermitteltemperaturen liegen für alle Kare im negativen Bereich. Das Mitterkar weist mit knapp unter 0 °C das höchste Wintermittel auf.

**Tabelle 9: 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.).**

	2016				2017				2018				2019			
	Mittel	Min	Max	Winter												
<b>Logger</b>	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)												
<b># 1</b>	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
<b># 2</b>	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
<b># 3</b>	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
<b># 5</b>	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
<b># 6</b>	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
<b># 7</b>	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
<b># 8</b>	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
<b># 9</b>	2,5	-5,9	<sup>a</sup> 39,0	-0,1	3,3	-1,3	<sup>a</sup> 46,2	-0,2	2,5	-5,2	<sup>a</sup> 43,0	-0,1	2,5	-0,5	15,1	-0,3
<b># 10</b>	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
<b># 11</b>	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
<b># 12</b>	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
<b># 13</b>	2,6	-6,4	21,2	-1,6	3,2	-5,7	<sup>a</sup> 45,2	-1,1	3,7	-10,6	<sup>a</sup> 44,0	-1,0	3,9	-3,2	<sup>a</sup> 52,7	-0,5
<b># 14</b>	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
<b>Mittel<sup>b</sup></b>	<b>1,8</b>	<b>-3,9</b>	<b>18,9</b>	<b>-1,1</b>	<b>2,3</b>	<b>-2,5</b>	<b>20,5</b>	<b>-0,9</b>	<b>2,7</b>	<b>-3,8</b>	<b>19,0</b>	<b>-0,4</b>	<b>2,4</b>	<b>-1,5</b>	<b>19,8</b>	<b>-0,6</b>

<sup>a</sup> Standort mit starker direkter Strahlungsbeeinflussung

<sup>b</sup> Berechnung des Mittelwerts (unterste Zeile) erfolgte für alle Jahre ohne Miteinbeziehung der stark strahlungsbeeinflussten Logger 9 und 13

Hinweise zu Loggerausfällen: Logger 4 und 15 fielen bereits im ersten Messjahr aus und werden daher nicht gelistet.

**Tabelle 10: Temperaturdaten (Durchschnitt, Minimum, Maximum, Winter) aus dem Sattelkar für den Zeitraum 01.01.2020 bis 31.12.2022. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.). Im Jahr 2021 fielen 13 Logger aus – Ausfallursache ist vermutlich niedrige Batteriespannung nach rund fünf Jahren Laufzeit. Im Jahr 2022 wurden zehn neue Temperaturlogger ausgelegt.**

Logger	2020				2021				2022			
	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	3,2	-1,5	17,6	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
# 2	2,7	-2,4	17,9	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
# 3	2,3	0,0	16,5	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
# 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 6	3,2	-0,9	20,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-
# 7	2,6	-0,1	20,9	0,1	2,4	-0,1	19,3	-0,0	3,2	-0,1	24,4	0,1
# 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 13	3,7	-4,6	<sup>a</sup> 38,1	-0,6	-	-	-	-	-	-	-	-
# 14	2,7	0,0	21,8	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Mittel<sup>b</sup></b>	<b>2,8</b>	<b>-0,8</b>	<b>19,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>2,4</b>	<b>-0,1</b>	<b>19,3</b>	<b>-0,0</b>	<b>3,2</b>	<b>-0,1</b>	<b>24,4</b>	<b>0,1</b>

<sup>a</sup> Standort mit starker direkter Strahlungsbeeinflussung

<sup>b</sup> Berechnung des Mittelwerts (unterste Zeile) erfolgte für alle Jahre ohne Miteinbeziehung der stark strahlungsbeeinflussten Logger 9 und 13

Hinweise zu Loggerausfällen: Logger 5, 8, 9, 10, 11 und 12 fielen im Messjahr 2020/21 auf Grund nachlassender Batteriespannung aus. Logger 1, 2, 3, 6 und 13 fielen im Messjahr 2021/22 aus – ebenfalls wegen niedriger Batteriespannung.

An den Standorten von Logger 1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 13 und 14 wurden am 25.07.2022 neue Temperaturlogger ausgelegt. Ein weiterer Logger (#16) wurde an einem neuen Standort innerhalb der aktiven Sattelkar-Rutschmasse ausgelegt.

Tabelle 11: Temperaturdaten (Durchschnitt, Minimum, Maximum, Winter) aus dem Ofenkar, Mitterkar und Steinkar für den Zeitraum 01.01.2019 bis 31.12.2020. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.).

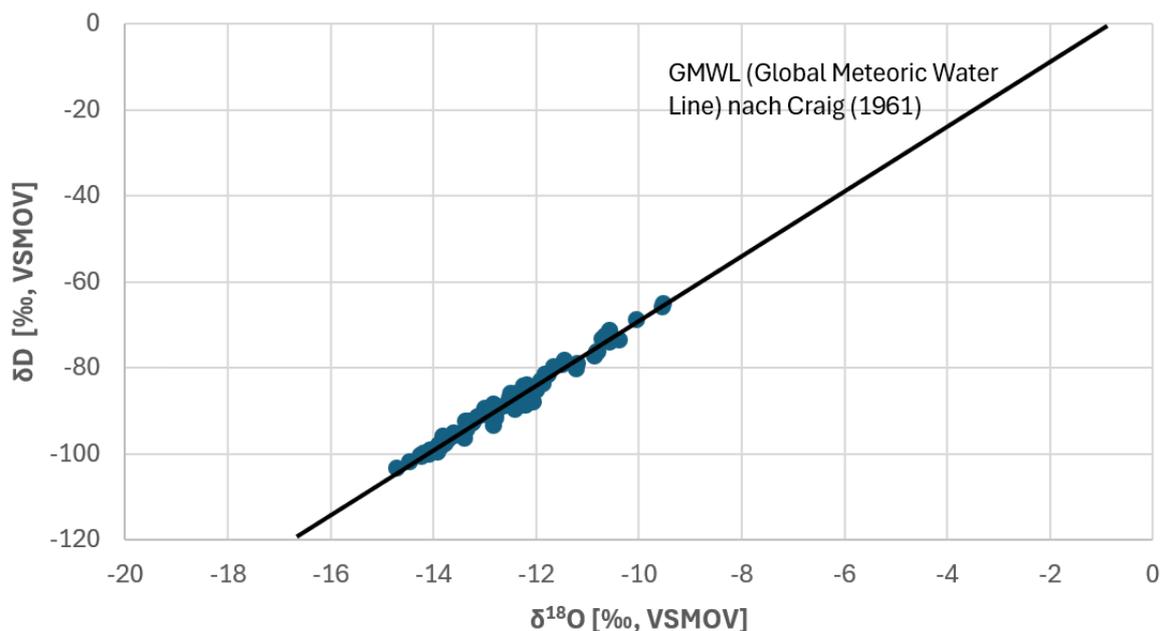
	2019				2020			
	Mittel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Winter (°C)	Mittel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Winter (°C)
<b>Ofenkar 1</b>	1,9	-1,1	13,1	-0,1	1,8	-1,3	12,9	0,2
<b>Ofenkar 2</b>	1,4	-3,5	14,8	-0,4	1,6	-5,1	13,7	-0,1
<b>Ofenkar 3</b>	-0,1	-7,8	16,1	-5,4	0,7	-5,2	12,5	-2,3
<b>Ofenkar 4</b>	2,6	-2,8	23,1	-0,1	2,6	-1,3	17,0	-0,1
<b>Ofenkar 5</b>	1,6	-6,0	21,3	-1,2	1,5	-8,4	18,9	-0,2
<b>Mitterkar 1</b>	1,0	-4,6	15,6	-1,2	0,8	-6,0	15,7	-1,1
<b>Mitterkar 2</b>	2,0	-1,8	17,6	0,6	1,8	-2,1	15,8	0,2
<b>Mitterkar 3</b>	1,6	-1,6	21,7	0,1	-	-	-	-
<b>Mitterkar 4</b>	1,3	-1,2	13,5	-0,4	1,4	-0,5	13,4	0,0
<b>Mitterkar 5</b>	2,0	0,1	14,1	0,3	2,3	0,1	15,8	0,3
<b>Steinkar 1</b>	0,4	-7,5	11,9	-3,2	0,6	-6,7	10,4	-3,5
<b>Steinkar 2</b>	0,8	-1,9	10,8	-1,0	-	-	-	-
<b>Steinkar 3</b>	1,6	-0,6	11,2	-0,1	1,5	-0,3	10,3	-0,1
<b>Steinkar 4</b>	1,8	-0,1	9,7	0,3	2,1	-0,3	9,8	0,4
<b>Steinkar 5</b>	1,6	-0,3	10,9	-0,3	1,6	-0,6	10,2	-0,5
<b>Mittelwert</b>	<b>1,4</b>	<b>-2,7</b>	<b>15,0</b>	<b>-0,8</b>	<b>1,6</b>	<b>-2,9</b>	<b>13,6</b>	<b>-0,5</b>
<b>Mittelwert Ofenkar</b>	<b>1,5</b>	<b>-4,2</b>	<b>17,7</b>	<b>-1,4</b>	<b>1,6</b>	<b>-4,3</b>	<b>15,0</b>	<b>-2,5</b>
<b>Mittelwert Mitterkar</b>	<b>1,6</b>	<b>-1,8</b>	<b>16,5</b>	<b>-0,2</b>	<b>1,6</b>	<b>-2,1</b>	<b>15,1</b>	<b>-0,1</b>
<b>Mittelwert Steinkar</b>	<b>1,2</b>	<b>-2,1</b>	<b>10,9</b>	<b>-0,9</b>	<b>1,4</b>	<b>-2,0</b>	<b>10,2</b>	<b>-0,9</b>

### 3.3.2. Isotopenchemie

Insgesamt wurden 76 Wasserproben ausgewertet. Die während der Probenahme gemessene Wassertemperatur lag im Mittel bei 8,0 °C. Delta-O-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ), also das Maß für das Verhältnis der stabilen Sauerstoff-Isotope  $^{18}\text{O}$  und  $^{16}\text{O}$  lag im Mittel bei -88,4 ‰. Delta-Deuterium ( $\delta\text{D}$ , Verhältnis der stabilen Wasserstoff-Isotope  $^2\text{H}$  und  $^1\text{H}$ ) betrug im Mittel -12,6 ‰. Die Promille-Angaben beziehen sich auf das VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) und zeigen demnach eine sogenannte „Abreicherung“ an schweren Isotopen (Sauerstoff-18 und Deuterium) in den analysierten Wasserproben an. Es gilt: Je niedriger (negativer) der Promille-Wert, desto weniger schwere Isotope sind im Wasser enthalten.

Die in den Sattelkar-Wasserproben gemessenen Isotopenwerte ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) sind konsistent mit regionalen Vergleichsstudien vom Kitzsteinhorn (Lechner 2015) und liegen auf der GMWL (Global Meteoric Water Line) nach Craig (1961) (Abbildung 19), was die Plausibilität der Analyse-Ergebnisse unterstreicht. Auf Grund der auf die Sommersaison beschränkten Datenerfassung – die Probenahme im Sattelkar erfolgte ausschließlich im Juli und September – zeigen die Isotopenwerte erwartungsgemäß eine recht geringe Variabilität (im Winter genommene Proben würden auf Grund des vom Sommer abweichenden („leichteren“) Isotopensignals im Niederschlagswasser wesentlich negativere Werte aufweisen). Der geringen Streuung der Werte zum Trotz sind im Probensatz einige signifikante, negative Abweichungen enthalten. Insgesamt sieben Proben weisen  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte  $< -14$  ‰ und  $\delta\text{D}$ -

Werte  $< -100$  ‰ auf. Das isotopisch schwere sommerliche Niederschlagswasser weist nachweislich deutlich höhere Werte auf und kann die niedrigen Analysewerte nicht erklären. Verzögerter Abfluss von winterlichem Niederschlagswasser (Schneesmelze) würde eine mögliche Erklärung für die niedrigen Messwerte darstellen, dies scheint jedoch v.a. für die lange nach der Schneesmelzperiode genommenen September-Proben (z.B. Probe 190903/0001, 04.09.2019:  $\delta^{18}\text{O} = -14.72$ ,  $\delta\text{D} = -103.40$ ,  $T = 2.5$  °C; Probe 190903/0003, 04.09.2019:  $\delta^{18}\text{O} = -14.47$ ,  $\delta\text{D} = -101.86$ ,  $T = 3.1$  °C) keine zutreffende Begründung zu sein. Viel eher könnten die niedrigen Isotopenwerte der genannten Proben hingegen mit dem Abtauen von (alten) Permafrost-Vorkommen in der Sattelkar-Rutschung zusammenhängen. Der potenziell im Sattelkar-Untergrund vorliegende Permafrostkörper bildete sich mit großer Wahrscheinlichkeit während kühlerer klimatischer Bedingungen und wurde demnach durch Niederschlagswasser gespeist, das eine leichtere Isotopen-Zusammensetzung aufweist (weniger Deuterium, weniger  $^{18}\text{O}$ ) als das aktuelle Niederschlagswasser. Dementsprechend wären im Permafrost-Schmelzwasser vergleichsweise niedrige Deuterium- und  $^{18}\text{O}$ -Konzentrationen (= stark negative Promille-Werte) zu erwarten, genau wie in den hier diskutierten Proben aus dem Sattelkar.



**Abbildung 19:**  $\delta\text{D}$ - vs.  $\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm der Wasserproben ( $n = 76$ ), die zwischen September 2019 und September 2023 im Sattelkar gesammelt wurden. Sämtliche Proben liegen auf der GWML nach Craig (1961).

Die vereinzelt auftretenden Wässer mit stark abgereichertem Isotopengehalt (wenig Deuterium, wenig  $^{18}\text{O}$ ) lassen somit auf das Vorliegen einzelner Permafrostlinsen innerhalb der Sattelkar-Rutschung schließen. Ein großflächiges Permafrostvorkommen scheint auf Grund des fehlenden flächendeckenden Isotopensignals unwahrscheinlich. Ein weiteres Indiz für die Permafrost-These liefert die Auswertung der Wassertemperatur zum Zeitpunkt der Probenahme, die einen Zusammenhang mit dem Deuterium- bzw.  $^{18}\text{O}$ -Gehalt zeigt, wobei mit sinkender Wassertemperatur, eine Abnahme des Deuterium- bzw.  $^{18}\text{O}$ -Gehalts zu beobachten ist (Abbildung 20). Kalte Wässer stammen demnach eher aus tauenden Permafrostkörpern und weisen folgerichtig eine starke Deuterium- bzw.  $^{18}\text{O}$ -Abreicherung auf.

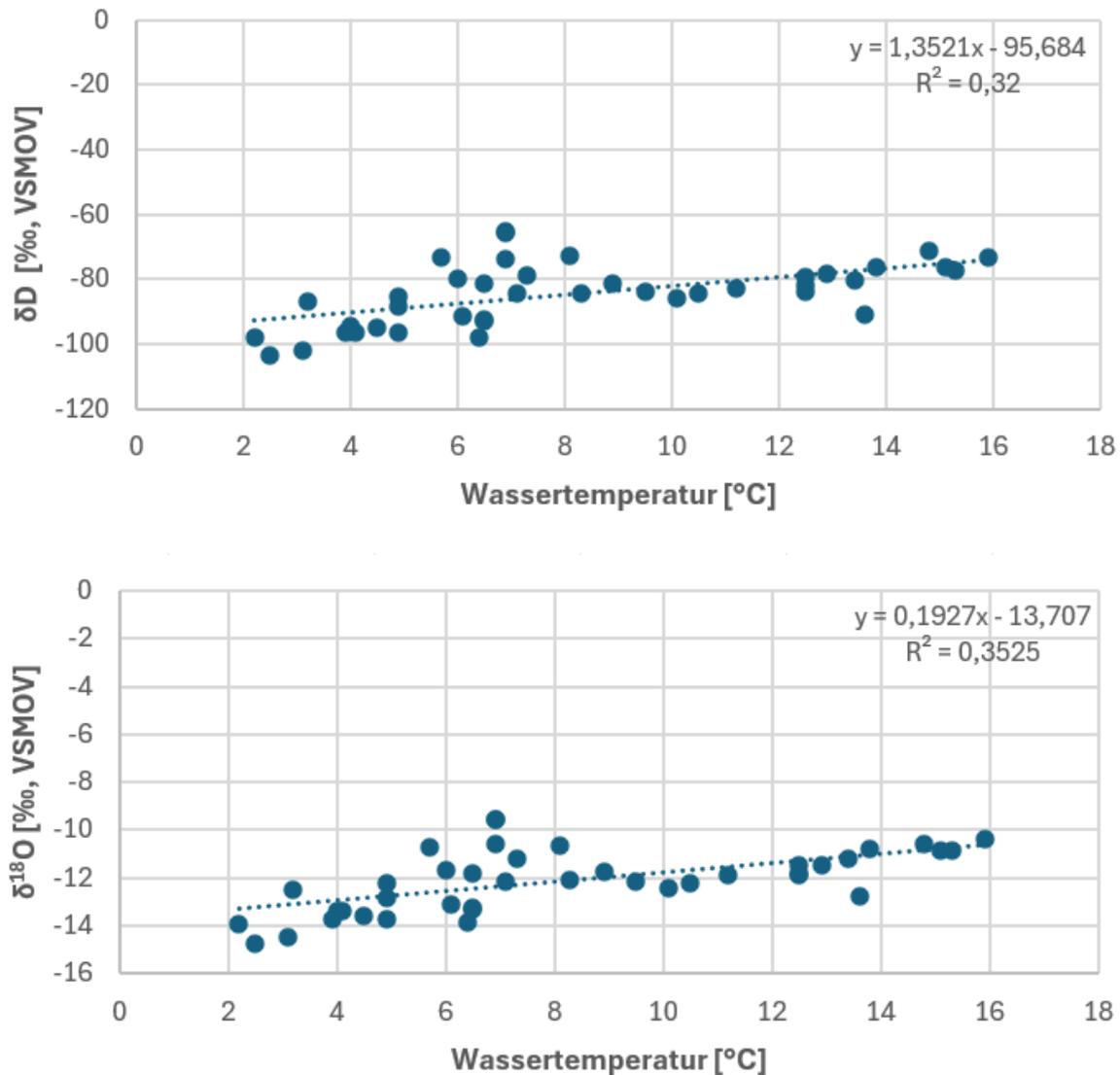


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen Wassertemperatur zum Zeitpunkt der Probenahme und δD-Gehalt (oben) bzw. δ<sup>18</sup>O-Gehalt (unten). Um den Einfluss von Wässern aus der Schneeschmelze auszuschließen, wurden nur die im Monat September (04.09.2019, 08.09.2021, 27.09.2023) genommenen Wasserproben berücksichtigt (n = 40). Mit abnehmender Wassertemperatur zeigt sich im Mittel ein sinkender Deuterium-Gehalt (oben) sowie ein sinkender Sauerstoff-18-Gehalt (unten) – der zum Teil auf Schmelzwässer abtauender Permafrostlinsen zurückzuführen sein könnte.

Die chronologische Auswertung der Isotopenauswertungen könnte bereits erste Hinweise auf ein komplettes Abtauen des Permafrosts im Sattelkar beinhalten (Abbildung 21, Abbildung 22). Während die im September 2019 und im Juli 2020 genommenen Proben noch zahlreiche Wässer mit sehr niedrigen Deuterium- und <sup>18</sup>O-Werten enthalten, fehlen diese in den Folgejahren (2021-2023) nahezu vollends. Möglicherweise ist die Permafrostdegradation im Sattelkar also schon so weit fortgeschritten, dass ein hydrochemischer Nachweis mittels stabiler Wasserisotope nicht bzw. nur mehr unter sehr selten auftretenden Rahmenbedingungen (z.B. langanhaltende Hitzewelle ohne Niederschlag) möglich ist. Weitere Isotopenbeprobungen im Sattelkar kombiniert mit Isotopen-Referenzmessungen im Abfluss des Blockgletschers im Steinkar könnten hier künftig wertvolle Aufschlüsse liefern.

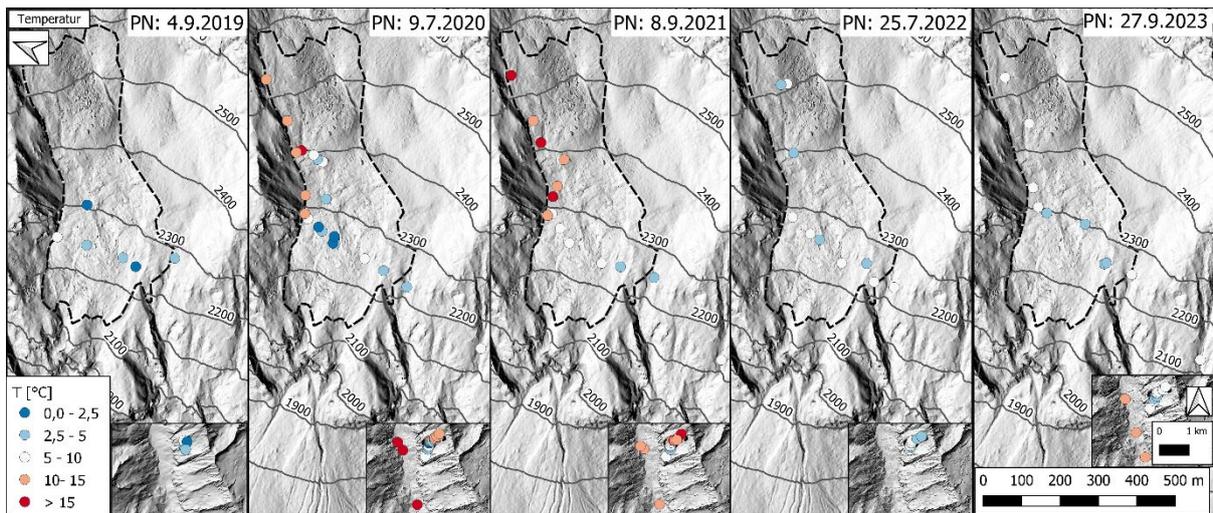


Abbildung 21: Bei der Probenahme gemessene Wassertemperatur.

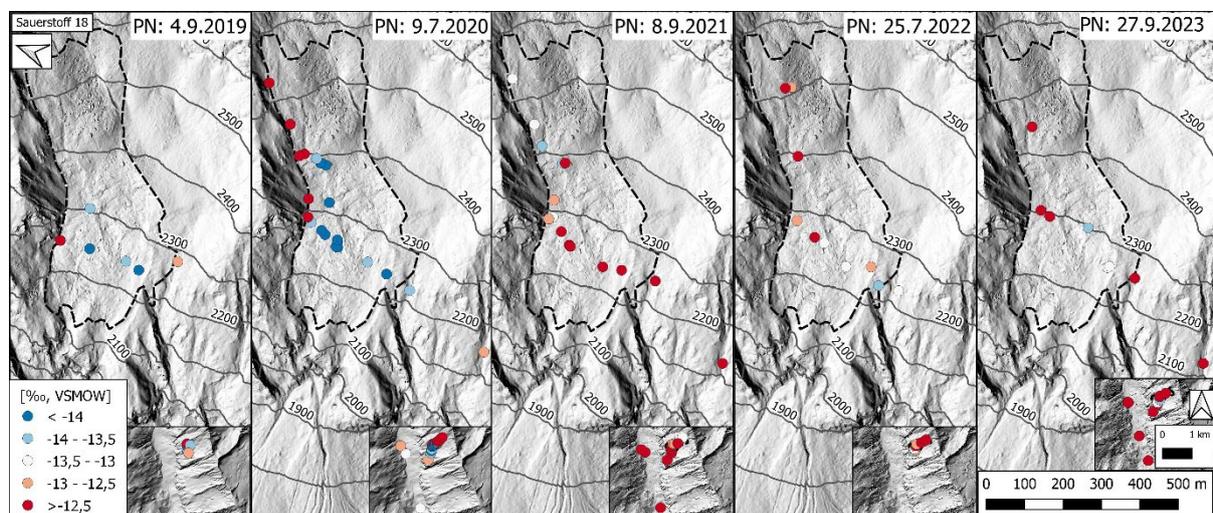


Abbildung 22: Abreicherung von <sup>18</sup>O (Sauerstoff-18) gegenüber VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Je geringer der Wert, desto weniger schwerer Sauerstoff (<sup>18</sup>O) ist in der Probe enthalten.

### 3.4 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen

Abbildung 23 zeigt beispielhaft die seismischen Signale der 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 24) zeigen am Anfang des Tages ähnliche Signale wie in Abbildung 23. Eine Zunahme der allgemeinen Amplitude im Tagesverlauf kann auf die erhöhte Wasserführung der Gerinne zurückgeführt werden. Große Ereignisse mit maximaler Amplitude und einer Dauer von mehreren Minuten weisen auf einen erhöhten Geschiebetransport oder kleinere Muren hin. Aufgrund des kurzen Erfassungszeitraums (Juni bis Oktober 2021) kann eine genaue Zuordnung nach Ereignistypen und Herkunft nicht durchgeführt werden. Im Sommer 2022 wurde die Seismik durch Steinschlag beschädigt. Im Sommer 2023 wurde die Seismik neu installiert, musste jedoch auf Grund eines weiteren Steinschlags (Abbildung 10) wieder außer Betrieb genommen werden – eine Weiterführung des seismischen Monitorings ist vorläufig nicht vorgesehen.

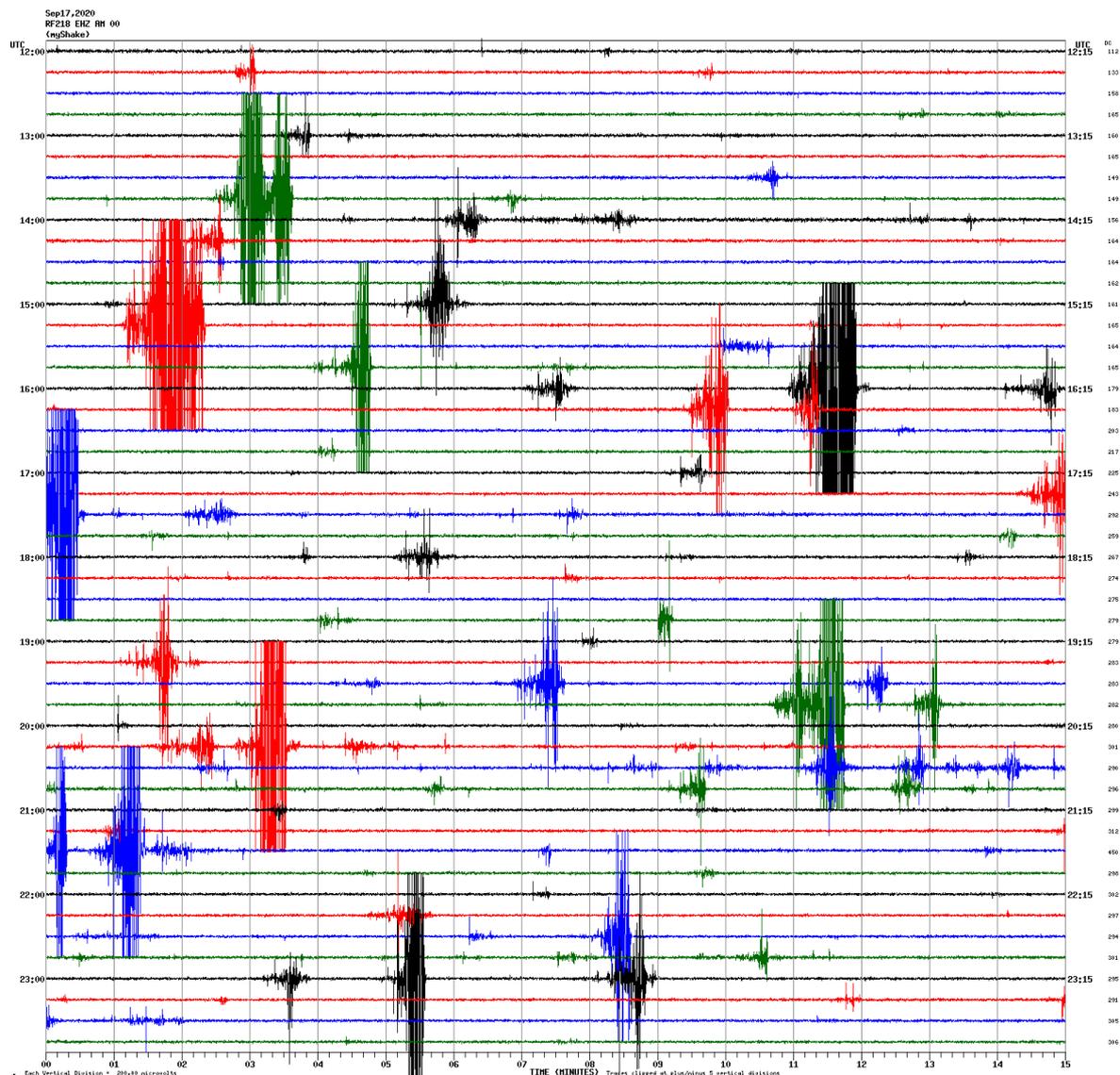


Abbildung 23: Seismische Signale während eines typischen Sommertags (17.09.2020).

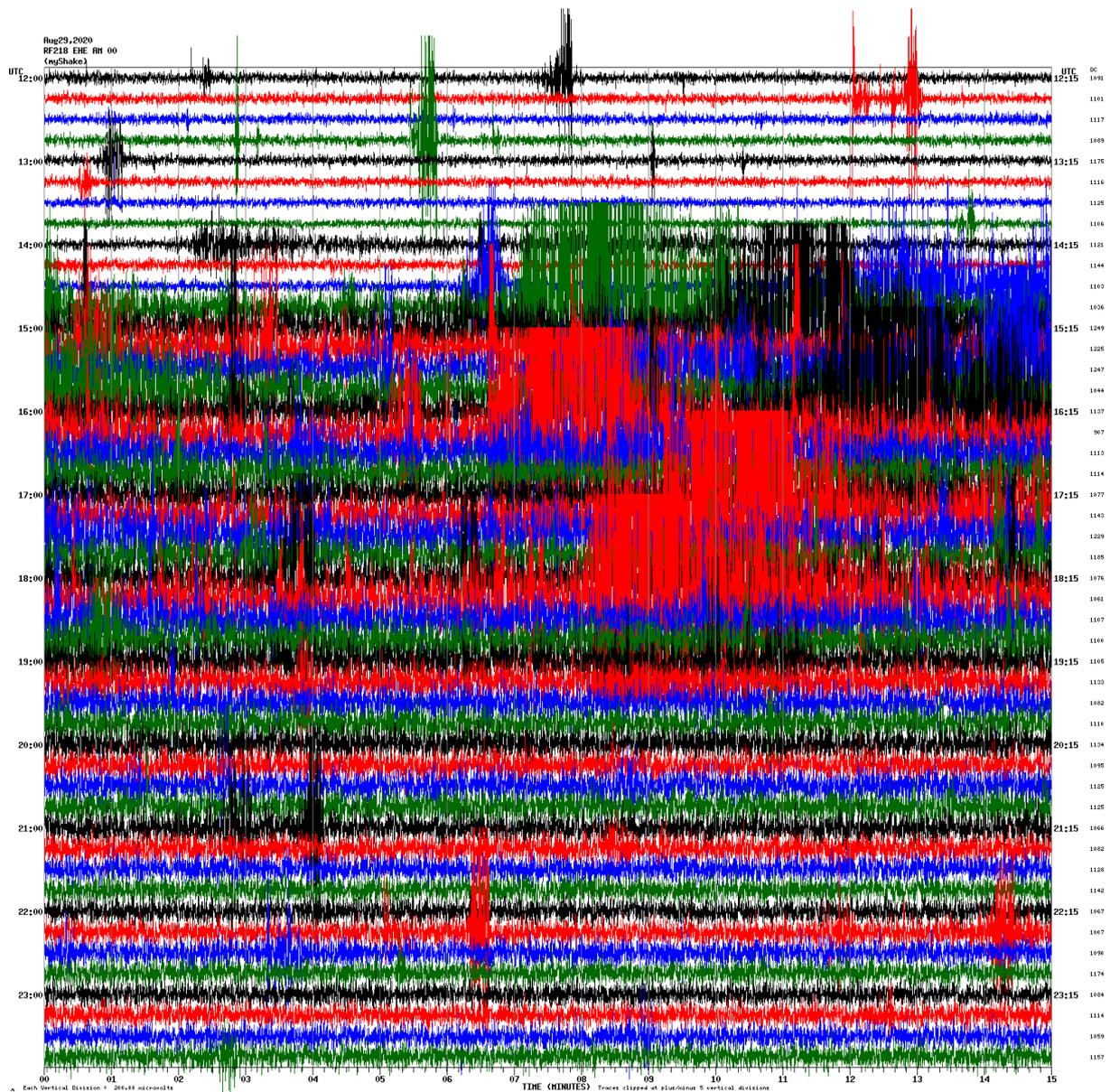


Abbildung 24: Seismische Signale während eines Tages mit Starkniederschlägen (29.08.2020).

Das automatische Kamerasystem liefert kontinuierlich hochwertige Aufnahmen des Sattelkars und seiner Umgebung (Abbildung 25, Abbildung 26). In den Jahren 2022 bis 2023 konnten noch keine großen Veränderungen bzw. Ereignisse visuell detektiert werden. Eine automatische Ereignisdokumentation soll zukünftig mit KI-Unterstützung durchgeführt werden.



Abbildung 25: Automatisches Kamerasystem – Winter (03.12.2023)

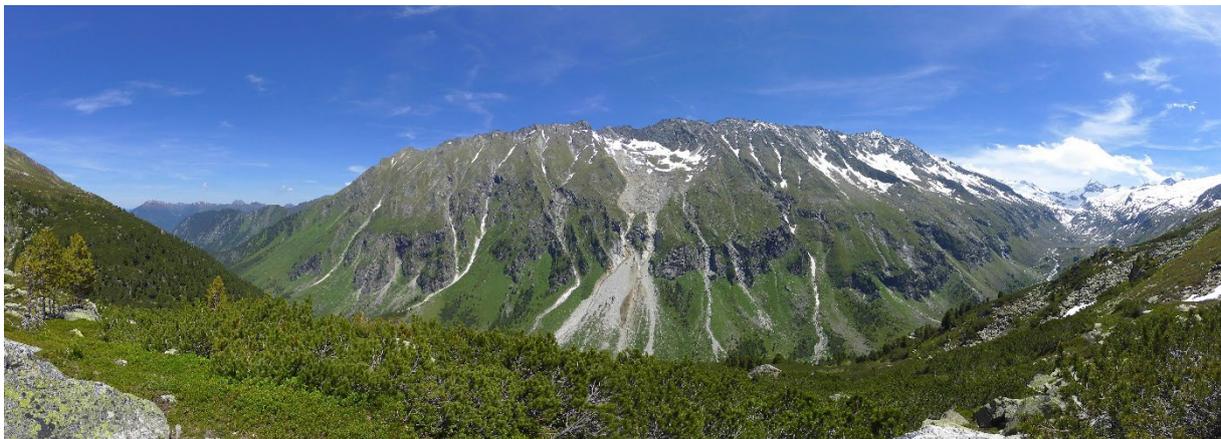


Abbildung 26: Automatisches Kamerasystem – Sommer (18.06.2024).

## 4. Schlussfolgerungen

Sommerliche Starkniederschläge führten im Jahr 2005 zu starker lokaler Erosion im unteren Karbereich. Seitdem dokumentieren Luftbildanalysen, Zeugenberichte, Schadensereignisse und nicht zuletzt Messdaten zahlreiche Murereignisse und die Initiierung einer an Fläche, Volumen und Geschwindigkeit zunehmenden Großrutschung. Mittlerweile sind über 17 ha und vermutlich über 1,7 Mio. m<sup>3</sup> Lockermaterial mit Raten von mehr als 50 Metern pro Jahr (2023) in Bewegung. Seit dem Jahr 2010 wurden mehr als 920.000 m<sup>3</sup> Sediment aus dem Sattelkar ausgetragen. Davon wurden rund 590.000 m<sup>3</sup> am Talboden akkumuliert, etwa 330.000 m<sup>3</sup> wurden vom Obersulzbachtal abtransportiert.

Die Analyse der Niederschlags- und Abflussdaten zeigt eine Häufung von Starkniederschlagsereignissen und Abflussspitzen in den letzten drei bis fünf Jahren. Ein direkter kausaler Zusammenhang zwischen der beobachteten Häufung von Starkniederschlagsereignissen und den hohen Bewegungsraten der letzten Jahre scheint plausibel, könnte letztlich jedoch nur durch ein aufwändiges, zeitlich sehr hochaufgelöstes Bewegungsmonitoring und komplementären Niederschlagsmessungen geklärt werden. Generell ist festzuhalten, dass simple, monokausale Erklärungsansätze (z.B. „je stärker der Regen, desto schneller die Rutschung“) höchstwahrscheinlich zu kurz greifen, da sie dem komplexen Bewegungsregime der Sattelkar-Rutschung nicht gerecht werden. Interne Faktoren wie unterirdische Wasserwegigkeit, Korngrößenzusammensetzung, temporäre Wassersättigung, Materialerschöpfungseffekte, Kohäsionsunterschiede durch vorliegende Permafrostlinsen u.v.m. spielen hinsichtlich des Bewegungsverhaltens eine wesentliche Rolle und müssen bei jeglichen Prognosen berücksichtigt werden. Die kinematische Dynamik der Rutschung ist daher mit Niederschlagsdaten allein nicht zu erklären.

Dies zeigt sich auch bei der Analyse größerer Murereignisse. Seit dem letzten großen Murereignis Ende Juli 2014, wurden keine größeren Murereignisse verzeichnet, obwohl die Tagesniederschlagssummen des 30.07.2014 (76 mm) seither bereits drei Mal – zum Teil sogar sehr deutlich – übertroffen wurden. Eine mögliche Erklärung ist, dass (i) im Kar selbst noch größere Umlagerungsprozesse stattfinden und große, mobilisierbare Sedimentmengen noch nicht an der Karschwelle angekommen sind, bzw., dass es (ii) durch die Beschleunigung der Rutschmasse (> 50 Meter pro Jahr) zu einer grundlegenden Änderung des kinematischen Regimes gekommen ist in dessen Folge das Sediment nicht mehr schubweise (im Zuge sehr großer, einzelner Murereignisse), sondern kontinuierlich durch ständig stattfindende Steinschläge und kleinere Muren/Geschiebetransporte (siehe Ergebnisse der passiven Seismik) abtransportiert wird.

Seit dem Jahr 2016 hat sich die im Sattelkar gemessene oberflächennahe Untergrundtemperatur (Messung in 10 cm Tiefe) mit einer mittleren Rate von +0.25 °C pro Jahr erhöht. Diese trendhafte Erwärmung liegt deutlich über den an vergleichbaren hochalpinen Wetterstationen gemessenen Erwärmungsraten. Trotz der stark steigenden Temperaturwerte deuten die nach wie vor niedrigen Wintertemperaturen sowie die Ergebnisse der Isotopenbeprobungen (sehr „leichte“ Wasser mit geringem Deuterium- bzw. Sauerstoff-18-Gehalt, die auf eine Entstehung unter kalten klimatischen Bedingungen

hinweisen) auf sporadische und im Abschmelzen begriffene Permafrostvorkommen innerhalb der Sattelkar-Rutschmasse hin.

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

- Form und Morphometrie des Kares begünstigen große Sedimentablagerungen und deren Mobilisierbarkeit.
- Durch die klimatische Erwärmung kommt es zu einer allgemeinen Abnahme der Untergrundfestigkeit durch Permafrostdegradation und verstärkten Wassereintrag in das „System Sattelkar“.
- Ausgehend von der Karschwelle ist seit dem Jahr 2005 eine rapide rückschreitende Vergrößerung der aktiven Rutschmasse zu beobachten.
- Der permafrost-bedingten Blockgletscher-ähnlichen Landform im oberen Bereich des Kares wurde durch die rückschreitende Erosion das mechanische Widerlager entzogen, was in den letzten rund fünf Jahren zu einer Desintegration des Blockgletschers und zu einem stromartigen Zerfließen der Landform führte.
- Die Karsedimente destabilisieren sich weiter, immer mehr Material kann durch Starkniederschläge mobilisiert werden – die Folge: erhöhte Bewegungsraten, die sich jedoch nicht in einer Zunahme großer Einzelereignisse manifestieren, sondern durch verstärkten, „kontinuierlichen“ Massenaustrag.

Die Nachbarkare Ofen- Mitter- und Steinkar weisen (noch?) keine mit dem Sattelkar vergleichbaren Destabilisierungstendenzen auf. Die Morphometrien der Kare weisen große Ähnlichkeiten mit dem Sattelkar auf, die Permafrosttemperaturen sind aufgrund der Höhenlage jedoch noch etwas niedriger. Sollte es in den Nachbarkaren zu ähnlichen Niederschlags-/Erosionsprozessen wie im Jahr 2005 im Sattelkar kommen, könnten diese aufgrund der sehr ähnlichen topo-klimatischen Rahmenbedingungen auch in den Nachbarkaren zu einer signifikanten, großflächigen Destabilisierung beitragen.

## Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit

In den Jahren 2021 - 2024 wurden zahlreiche Tätigkeiten im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit wie auch Publikationen in peer-reviewed Journals durchgeführt, u.a.:

- Hartmeyer I., Keuschnig M., Krautblatter M., Otto, J-C., Valentin, G.: Permafrost thaw and its effects on the occurrence of natural hazards: three long-term case studies from the Hohe Tauern range. INTERPRAEVENT Proceedings, <https://www.interpraevent.at/en/proceeding/proceedings-ip-2024>, 2024.
- [Erdkugel und ihre Oberfläche verändern sich](#). ORF TOPOS, 30.09.2023.
- [AI-powered camera system for landslide monitoring](#). GEORESEARCH, NP Hohe Tauern, 22.08.2023.
- [Hochgebirge im Klimawandel, Langzeitmonitoring im Nationalpark Hohe Tauern](#). Ö1 Dimensionen, 27.09.2022
- [9 x Österreich. Erkundungen in Salzburg. Vom Außergebirg ins Innergebirg](#). Ö1 Radiokolleg, 22.09.2022
- [Klimawandel führt in den Alpen zu mehr Muren und Steinschlägen](#). Der Standard, Forschung Spezial, 17.08.2022.
- [Klimawandel im Hochgebirge: „Müssen uns auf große Schäden einstellen“](#). Tiroler Tageszeitung, 21.07.2022.
- [Forschen an der Existenzgrenze: Wo der Klimawandel in den Alpen sichtbar ist](#). Salzburger Nachrichten, 21.07.2022
- Hermle, D., Gaeta, M., Krautblatter, M., Mazzanti, P., and Keuschnig, M.: Performance Testing of Optical Flow Time Series Analyses Based on a Fast, High-Alpine Landslide. Remote Sensing, 14, 455, <https://doi.org/10.3390/rs14030455>, 2022.
- 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., 21, 2753–2772, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2753-2021>, 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.

## Referenzen

- Anker, F.; Fegerl, L.; Hübl, J.; Neumayer, F.; Keuschnig, M.; Kaitna, R. (2016): Geschiebetransport in Gletscherbächen der HohenTauern: Beispiel Obersulzbach (177), S. 86–96.
- APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Hg. v. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Wien, Österreich.
- Craig, H. (1961): Isotopic Variations in Meteoric Waters. In: *Science (New York, N.Y.)* 133 (3465), S. 1702–1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.1702.
- Dietrich, Andreas; Krautblatter, Michael (2019): Deciphering controls for debris-flow erosion derived from a LiDAR-recorded extreme event and a calibrated numerical model (Roßbichelbach, Germany). In: *Earth Surf. Process. Landforms* 44 (6), S. 1346–1361. DOI: 10.1002/esp.4578.
- ENLAPS (2024): Tikee 3 PRO. Hg. v. ENLAPS. ENLAPS. Online verfügbar unter <https://enlaps.io/de/products/camera-timelapse-tikee-3-pro-plus>, zuletzt aktualisiert am 18.06.2024, zuletzt geprüft am 18.06.2024.
- Evans, I. S. (2014): GLACIAL LANDFORMS, EROSIONAL FEATURES | Major Scale Forms. In: Scott A. Elias (Hg.): *Encyclopedia of quaternary science*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, S. 847–864.
- GAPHAZ (2017): Assessment of Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions – Technical Guidance Document. Hg. v. 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.
- Hartmeyer, I.; Delleske, R.; Keuschnig, M.; Krautblatter, M.; Lang, A.; Schrott, L.; Otto, J.-C. (2020): Current glacier recession causes significant rockfall increase: The immediate paraglacial response of deglaciating cirque walls. In: *Earth Surface Dynamics Discussions* 2020, S. 1–25. DOI: 10.5194/esurf-2020-8.
- IPA (2022): IPA Action Group Rock glacier inventories and kinematics. Towards standard guidelines for inventorying rock glaciers. Baseline concepts. Hg. v. IPA. Online verfügbar unter [www.rgik.org](http://www.rgik.org).
- 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), S. 876–887. DOI: 10.1002/esp.3374.

Lechner, Katharina (2015): Karstgeomorphologie und Karsthydrologie am Kitzsteinhorn (Hohe Tauern, Salzburg). Master Thesis, Universität Innsbruck.

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*, S. 100395. DOI: 10.1016/j.jort.2021.100395.

RaspberryShake (2024): Detect Earthquakes & Watch the Earth Move. Hg. v. S. A. Raspberry Shake. Online verfügbar unter <https://raspberrysshake.org/>, zuletzt aktualisiert am 18.06.2024, zuletzt geprüft am 18.06.2024.

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), S. 169–183.

# Abbildungen

Abbildung 1: Untersuchungsgebiet. Das Sattelkar ist geprägt von mächtigen Sedimentablagerungen aus den rundum aufragenden Granitgneiswänden und wurde intensiv glazial und periglazial geformt. _____	6
Abbildung 2: Mächtige Sedimentablagerungen und steil aufragende Granitgneiswände prägen das Sattelkar (09.07.2020). _____	6
Abbildung 3: Umriss der Blockgletscher-ähnlichen Landform im Sattelkar (16.07.2018). _____	7
Abbildung 4: Unterer Bereich des Sattelkars. Deutlich zu sehen ist die scharfe, durch Vegetationsbewuchs gekennzeichnete Grenze zwischen aktiven und inaktiven Bereichen an der orographisch rechten (nördlichen) Seite der Rutschung (25.07.2019). _____	7
Abbildung 5: Stromartiges Abrutschen von Hangschutt und Felssturzlagerungen, Sattelkar (12.07.2018). ____	8
Abbildung 6: UAS-Aufnahme des Sattelkars (12.09.2023). _____	8
Abbildung 7: Installation von Boden-Kontrollpunkten (12.07.2018). _____	13
Abbildung 8: UAS-Befliegung Sattelkar, DJI Phantom 4 pro mit integriertem DGPS (09.07.2020). _____	14
Abbildung 9: Wartung und Auslesen der Bodentemperaturen im Sattelkar (28.09.2023) _____	15
Abbildung 10: Steinschlagschäden am autarken Seismik-Monitoring (27.09.2023). _____	18
Abbildung 11: Kamerasystem zur Überwachung des Sattelkars (06.10.2022). _____	19
Abbildung 12: Kamerasystem mit KI-unterstützter Plattform zur Datenanalyse. _____	19
Abbildung 13: Niederschlags- und Abflussverlauf 2013-2023. Rote Pfeile markieren das bis dato letzte große Murereignis im Juli 2014. _____	22
Abbildung 14: Höhen- und Volumenveränderung im Einflussbereich der Sattelkar-Rutschung (2010-2023). ____	24
Abbildung 15: Orthofotovergleich der Jahre 2003, 2007, 2012 und 2015. Das Orthofoto des Jahres 2003 zeigt das Sattelkar-Areal vor Initiierung der Rutschung. Unterhalb der Blockgletscher-ähnlichen Landform im rechten oberen Bildbereich (schwarze, punktierte Linie) liegt eine mehr oder weniger flächendeckende Vegetationsbedeckung vor, die nur von einigen größeren Blöcken durchsetzt ist. Im Jahr 2007 ist im unteren Karabschnitt, der durch Starkniederschläge des Jahres 2005 initiierte Anrissbereich bereits deutlich erkennbar. Auf den nachfolgenden Orthofotos der Jahre 2012 und 2015 ist die rapide, rückschreitende Vergrößerung der Sattelkar-Rutschung klar ersichtlich (Quelle: SAGIS). _____	25
Abbildung 16: Flächenveränderung der Sattelkarrutschung und Bewegungsraten einzelner Blöcke pro Zeitperiode (2021-2023). _____	26
Abbildung 17: Lage der oberflächennahen Temperatursensoren Sattelkar. _____	27
Abbildung 18: Untergrundtemperaturen im Sattelkar im gesamten Beobachtungszeitraum (22.10.2015 bis 27.09.2023). Die gemessenen Temperaturen zeigen eine auffallend starke trendhafte Zunahme von durchschnittlich +0.25 °C pro Jahr. _____	28
Abbildung 19: $\delta D$ - vs. $\delta^{18}O$ -Diagramm der Wasserproben ( $n = 76$ ), die zwischen September 2019 und September 2023 im Sattelkar gesammelt wurden. Sämtliche Proben liegen auf der GWML nach Craig (1961). _____	33
Abbildung 20: Zusammenhang zwischen Wassertemperatur zum Zeitpunkt der Probenahme und $\delta D$ -Gehalt (oben) bzw. $\delta^{18}O$ -Gehalt (unten). Um den Einfluss von Wässern aus der Schneeschmelze auszuschließen, wurden nur die im Monat September (04.09.2019, 08.09.2021, 27.09.2023) genommenen Wasserproben berücksichtigt ( $n = 40$ ). Mit abnehmender Wassertemperatur zeigt sich im Mittel ein sinkender Deuterium-Gehalt (oben) sowie ein sinkender Sauerstoff-18-Gehalt (unten) – der zum Teil auf Schmelzwasser abtauender Permafrostlinsen zurückzuführen sein könnte. _____	34
Abbildung 21: Bei der Probenahme gemessene Wassertemperatur. _____	35
Abbildung 22: Abreicherung von $^{18}O$ (Sauerstoff-18) gegenüber VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Je geringer der Wert, desto weniger schwerer Sauerstoff ( $^{18}O$ ) ist in der Probe enthalten. _____	35
Abbildung 23: Seismische Signale während eines typischen Sommertags (17.09.2020). _____	36
Abbildung 24: Seismische Signale während eines Tages mit Starkniederschlägen (29.08.2020). _____	37
Abbildung 25: Automatisches Kamerasystem – Winter (03.12.2023) _____	38
Abbildung 26: Automatisches Kamerasystem – Sommer (18.06.2024). _____	38

## Tabellen

<i>Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Befliegungen im gesamten Untersuchungszeitraum 2018-2023. An den mit * markierten Daten konnten die Befliegungen aufgrund schlechter Witterungsverhältnisse nicht an einem Tag durchgeführt werden.</i>	14
<i>Tabelle 2: Übersicht der ausgelegten Temperaturlogger. x = ausgelesen, * = ersetzt durch einen neuen Logger.</i>	16
<i>Tabelle 3: Übersicht der entnommenen Wasserproben zur Bestimmung der Temperatur, Leitfähigkeit und Isotopenverhältnisse der Parameter Deuterium, Sauerstoff-18 und Sauerstoff-17.</i>	17
<i>Tabelle 4: Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen größer als 20, 30, 40 und 50 mm (Wetterstation Kürsinger Hütte). Die NS-Station an der Kürsinger Hütte war im Jahr 2023 nur 116 Tage in Betrieb (07.06. bis 30.09.2023). In den Vorjahren war die Station typischerweise 150-200 Tage in Betrieb. Eine Ausnahme bildete das Jahr 2022, in dem die Niederschlagsmessung nur 80 Tage lang aktiviert war.</i>	20
<i>Tabelle 5: Die zehn höchsten Tagessummen des Niederschlags in der Beobachtungsperiode 2009-2023 (Wetterstation Kürsinger Hütte; absteigend gereiht).</i>	21
<i>Tabelle 6: Die zehn höchsten Stundensummen des Niederschlags in der Beobachtungsperiode 2009-2023 (Wetterstation Kürsinger Hütte; absteigend gereiht).</i>	21
<i>Tabelle 7: Die zehn höchsten Abfluss-Tagesmittelwerte an der Pegelmessstelle „Kees“ in der Beobachtungsperiode 2009-2023 (absteigend gereiht).</i>	23
<i>Tabelle 8: Die zehn höchsten Abfluss-Tagesmittelwerte an der Pegelmessstelle „Sulzau“ in der Beobachtungsperiode 2009-2023 (absteigend gereiht).</i>	23
<i>Tabelle 9: 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.).</i>	30
<i>Tabelle 10: Temperaturdaten (Durchschnitt, Minimum, Maximum, Winter) aus dem Sattelkar für den Zeitraum 01.01.2020 bis 31.12.2022. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.). Im Jahr 2021 fielen 13 Logger aus – Ausfallursache ist vermutlich niedrige Batteriespannung nach rund fünf Jahren Laufzeit. Im Jahr 2022 wurden zehn neue Temperaturlogger ausgelegt.</i>	31
<i>Tabelle 11: Temperaturdaten (Durchschnitt, Minimum, Maximum, Winter) aus dem Ofenkar, Mitterkar und Steinkar für den Zeitraum 01.01.2019 bis 31.12.2020. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.).</i>	32