



Klimasensitive, hochalpine Kare: Langzeitmonitoring Sattelkar

Zwischenbericht 2024

Mit Unterstützung von Land und Europäischer Union



WIR leben Land
Gemeinsame Agrarpolitik Österreich



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Impressum

Herausgeber: GEORESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Techno-Z Wissenspark Urstein, Urstein Süd 15, 5412 Puch bei Hallein,
www.georesearch.ac.at

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

Fördergeber:



Mit Unterstützung von Land und Europäischer Union



Projektname: Langzeitmonitoring Sattelkar

Version: 1.0

Datum: 07.01.2025

Titelbild: Luftaufnahme des Sattelkar-Schuttkegels (31.10.2024)

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 Kar: Langzeitmonitoring Sattelkar“ untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf das Sattelkar im Obersulzbachtal in den Hohen Tauern Salzburgs. Seit der vorindustriellen Periode (1850-1900) ist die Temperatur in Österreich (ca. +2 °C) doppelt so stark gestiegen wie im globalen Mittel, was zu einem signifikanten Rückgang der Gletscher- und Permafrostbereiche führte.

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 von Wetterstations-, Pegel- und Wettermodelldaten (INCA) zeigt für Sattelkar und Obersulzbachtal eine statistische Zunahme von Starkniederschlägen und Abflussspitzen sowie einen äußerst stark ausgeprägten Lufttemperaturanstieg. Diese Trends (erhöhte Wasserverfügbarkeit, zunehmende Temperaturen) begünstigen die Sediment-Mobilisierung in hochalpinen Karen wie dem Sattelkar und erhöhen die Wahrscheinlichkeit großer Erosionsereignisse.

Oberflächenveränderungen: Fernerkundungsanalysen dokumentieren eine tiefgreifende rückschreitende Bewegung der Schuttfüllung des Sattelkars. Seit dem Jahr 2005 wurden rund 920.000 m³ Sediment aus dem Kar ausgetragen. Davon wurden etwa 560.000 m³ am Talboden abgelagert, 360.000 m³ wurden vom Obersulzbach abtransportiert. Die Fläche der Rutschung betrug im Jahr 2024 rund 19 ha (= 27 Fußballfelder). Auf Basis einer geophysikalisch (Georadar) ermittelten Mindestmächtigkeit von 10 m, kann von einem Gesamtvolume von zumindest 1,7 Mio. m³ ausgegangen werden. Die jährlichen Bewegungsraten sind in der unteren Karhälfte (bis zu 135 m pro Jahr) im Mittel drei bis vier Mal höher als in der oberen Hälfte (bis zu 35 m pro Jahr). Von 2005-2022 wurde ein signifikanter Beschleunigungstrend beobachtet, seit 2022 gehen die Bewegungsraten wieder zurück.

Thermische Untergrundbedingungen: Die in 10 cm Tiefe gemessenen Untergrundtemperaturen liegen im Mittel bei 2,4 °C. Trendanalysen (2016-2023) zeigen einen starken Temperaturanstieg von +0,25 °C pro Jahr (mehr als doppelt so hoch wie der Anstieg der Lufttemperatur). Hydrochemische Analysen von im Sattelkar und Steinkar genommenen Wasserproben demonstrieren isotopisch „leichte“ Wässer (niedriger Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalt), die voraussichtlich abtauenden Permafrostlinsen entstammen.

Ereignisdokumentation von Massenbewegungen: Ein automatisches Kamerasystem liefert kontinuierlich Daten zur Überwachung der Sattelkar-Rutschung. Intensive Massenbewegungsaktivität wurde in den Sommermonaten 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 the pre-industrial period (1850–1900), temperature in Austria (approximately +2 °C) has risen twice as much as the global average, leading to 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 over the last 20 years. The complex landslide was initiated by heavy rainfall in 2005, which lead 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, gauge measurements, and weather model data (INCA) reveals a statistical increase in heavy precipitation and peak runoff, as well as a pronounced rise in air temperature for Sattelkar and Obersulzbachtal. These trends (increased water availability and rising temperatures) promote sediment mobilization in high-alpine cirques such as the Sattelkar and raise the likelihood of major erosion events.

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 m³ of sediment have been transported out of the cirque. Of this, about 560,000 m³ have been deposited on the valley floor, while 360,000 m³ have been evacuated by the Obersulzbach. The area of the landslide was around 19 hectares (equivalent to 27 football fields) in 2024. Based on a geophysically (ground-penetrating radar) determined minimum thickness of 10 meters, a total volume of at least 1.7 million m³ can be assumed. Annual movement rates in the lower half of the cirque (up to 135 m per year) are, on average, three to four times higher than in the upper half (up to 35 m per year). From 2005 to 2022, a significant acceleration trend was observed; however, since 2022, the movement rates have been declining again.

Thermal subsurface conditions: Mean subsurface temperature measured at a depth of 10 cm is 2.4 °C. Trend analyses (2016–2023) 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 and the Steinkar demonstrate isotopically "light" waters (low deuterium and oxygen-18 contents), likely originating from thawing permafrost lenses.

Mass movement event documentation: An automated camera system provides continuous data for monitoring the Sattelkar landslide. Intense mass movement activity has been documented during the summer months.

Inhalt

Impressum	2
Zusammenfassung	3
Summary	4
Inhalt	5
1. Einleitung	6
1.1 Kare im Klimawandel	6
1.2 Das Sattelkar und seine Nachbarkare	7
1.3 Ziele und wissenschaftliche Fragestellungen	11
2. Monitoringkonzept	12
2.1 Meteorologische und hydrologische Bedingungen	13
2.2 Oberflächenveränderungen	15
2.3 Thermische Untergrundbedingungen	17
2.3.1 Untergrundtemperaturen	17
2.3.2 Isotopenchemie	19
2.4 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen	20
3. Ergebnisse und Interpretationen	21
3.1 Meteorologische und hydrologische Bedingungen	21
3.1.1 Niederschlag	21
3.1.2 Abfluss	24
3.1.3 Lufttemperatur	28
3.2 Oberflächenveränderungen	29
3.3 Thermische Untergrundbedingungen	35
3.3.1 Untergrundtemperaturen	35
3.3.2 Isotopenchemie	39
3.4 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen	44
4. Schlussfolgerungen	47
Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit	49
Referenzen	50
Abbildungen	52
Tabellen	54

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 et al. 2018) (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 Niederschlagregimes, 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; Haeberli 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 geschiebeführende 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.

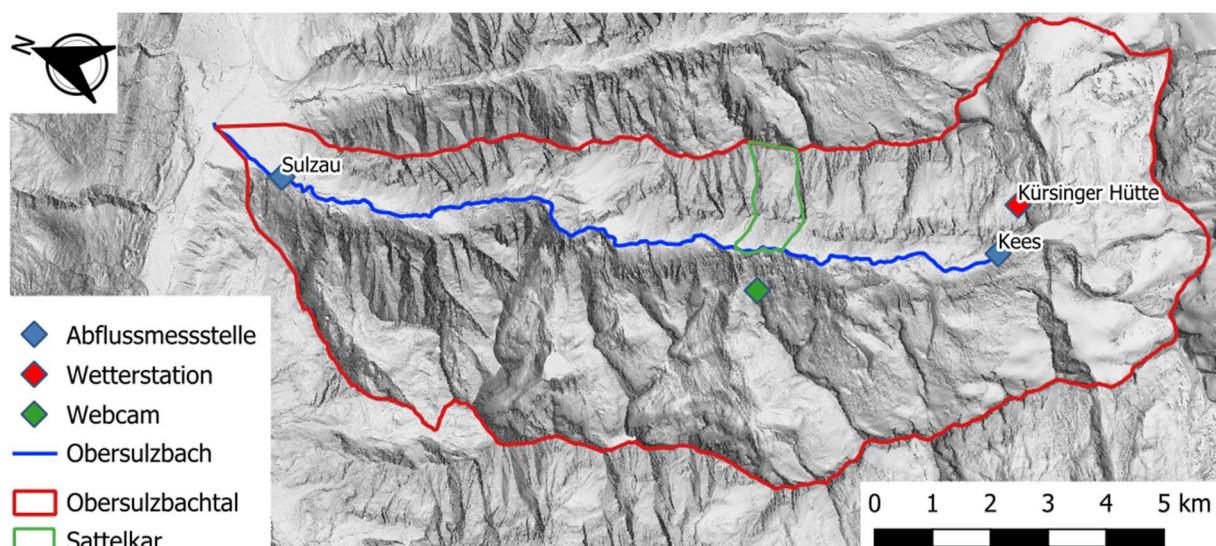


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet. Das Sattelkar ist geprägt von mächtigen Sedimentablagerungen aus den rundum aufragenden Granitgneiswänden und wurde intensiv glazial und periglazial geformt.

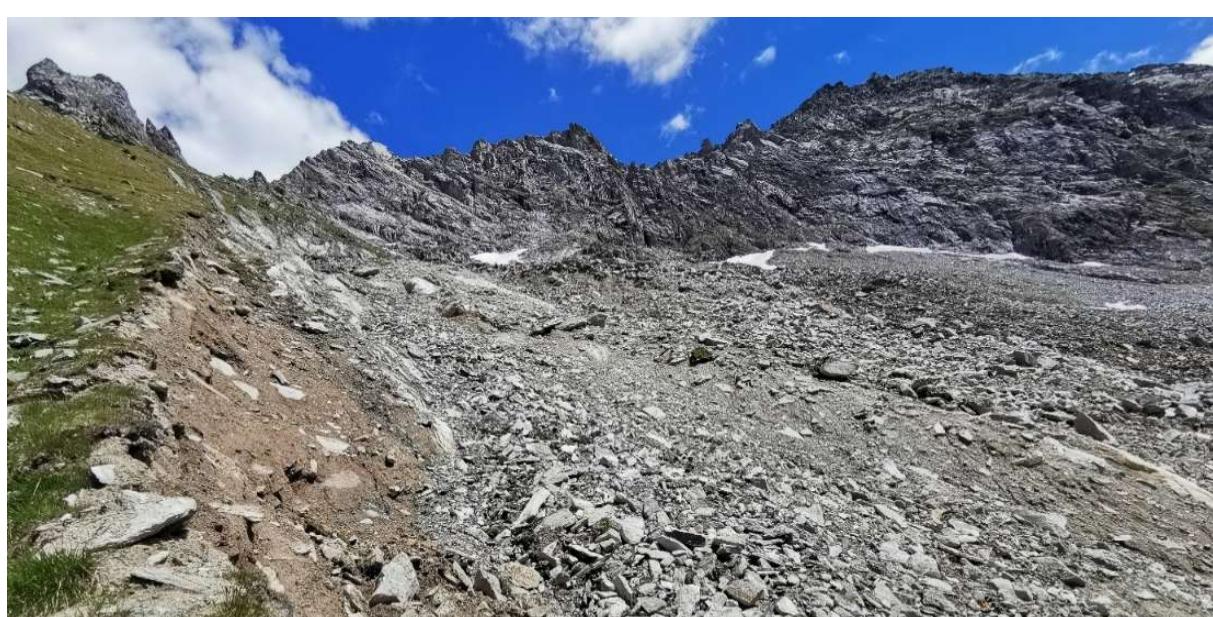


Abbildung 2: Mächtige Sedimentablagerungen und steil aufragende Granitgneiswände prägen das Sattelkar (09.07.2020).

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 (langes 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).

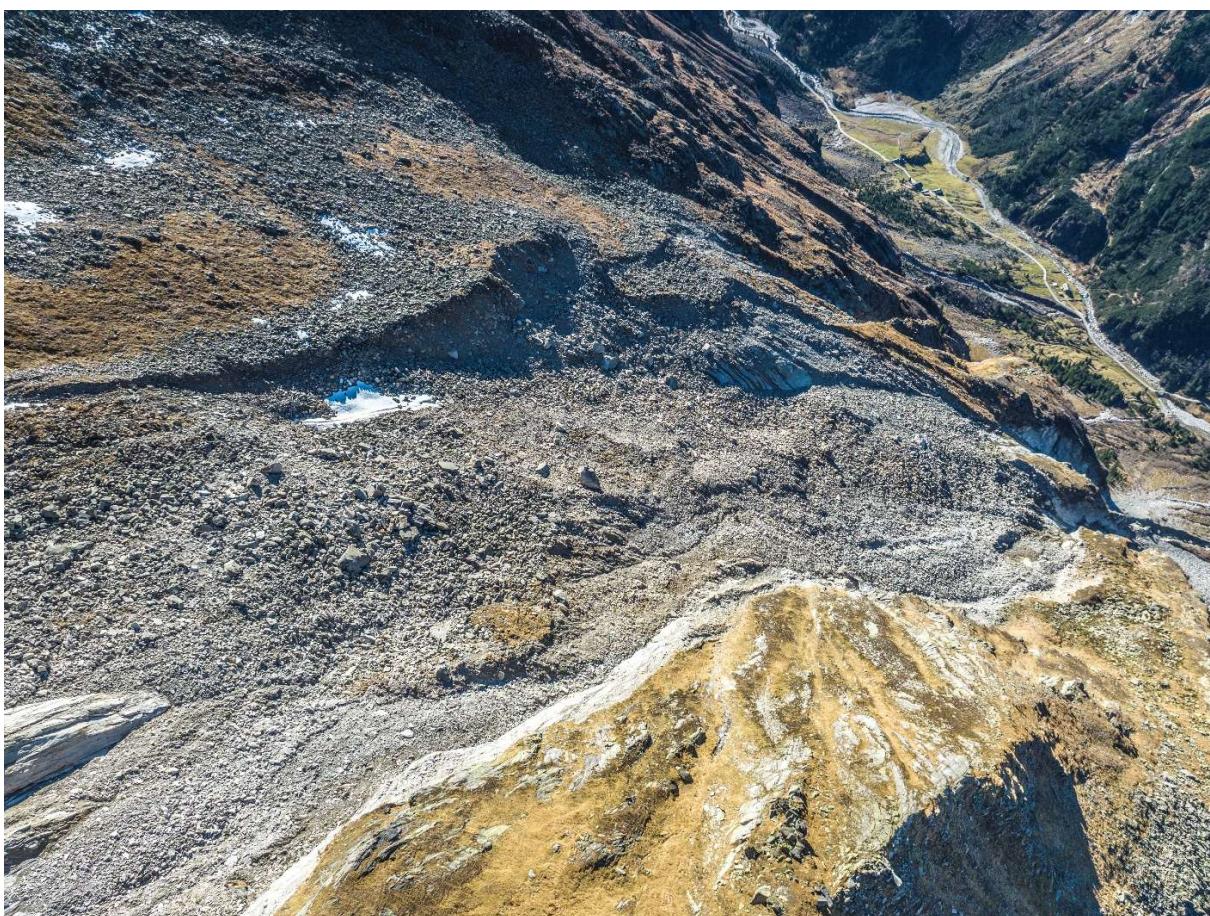


Abbildung 6: UAS-Aufnahme des Sattelkars (31.10.2024).

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 (2024-2027) ist die Erweiterung und Wartung des im Vorgänger-Projekts (2021-2024) eingerichteten Monitoringsystems für die langfristige Überwachung des Sattelkars. Atmosphären-, Oberflächen- und Untergrundbedingungen werden systematisch und kontinuierlich erfasst, die gewonnenen Daten und Informationen bilden eine wertvolle Entscheidungsgrundlage und können für weitere Forschungsprojekte verwendet werden. Im Zentrum der Forschungsaktivitäten stehen wie bereits in den bisherigen Projektperioden die folgenden, wissenschaftlichen Fragestellungen (ergänzt um Frage #3):

- #1: Wie reagieren das Sattelkar und seine Nachbarkare auf veränderte klimatische Rahmenbedingungen?
- #2: Mit welchem aktuellen und zukünftigen Naturgefahrenpotential ist zu rechnen?
- #3: Mit welchen Erfassungs- und Methodenkombinationen können potenziell risikorelevante Veränderungen der Massenbewegungsaktivität am effizientesten ermittelt werden?

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 Kees).
 - Integration der Temperatur- und Niederschlagsdaten des Analyse- und Nowcasting-Modells INCA.
- **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.
 - Isotopenchemie Wasser zur Identifizierung von Schmelzwässern aus Permafrost-Bereichen im Sattelkar und im Steinkar.
- **Domäne 4: Ereignisdokumentation von Muren, Hangrutschungen und Steinschlägen**
 - Permanent installiertes Kamerasystem zur visuellen Überwachung der Massenbewegungsaktivität.

2.1 Meteorologische und hydrologische Bedingungen

Für die Überwachung der atmosphärischen Bedingungen werden Daten der vom Landeshydrographischen Dienst Salzburg betriebenen Wetterstation an der Kürsingerhütte (2.552 m üNN, Abbildung 1) genutzt. Die Betriebszeit der Wetterstation – und damit einhergehend die Verfügbarkeit von Niederschlagsdaten – ist aufgrund der Stromversorgung (Hütte) auf die Periode Frühjahr bis Herbst beschränkt. Die Niederschlagsaufzeichnungen an der Kürsinger Hütte reichen bis ins Jahr 2009 zurück.

Als Ergänzung zu den erhobenen Niederschlagsdaten werden in dieser Berichtsperiode erstmals Niederschlagsdaten (und Lufttemperaturdaten) des Nowcasting-Modells INCA (INtegrated nowcasting through Comprehensive Analysis) der GeoSphere Austria integriert, um ganzjährig repräsentative Daten der Region zur Verfügung zu haben. Das INCA-Wettermodell liefert österreichweit Rasterdaten (1 km), u.a. zu Temperatur und Niederschlag in stündlicher Auflösung. Für den vorliegenden Bericht wurden die Daten der für das Sattelkar repräsentativen Rasterzelle herangezogen (Abbildung 8).

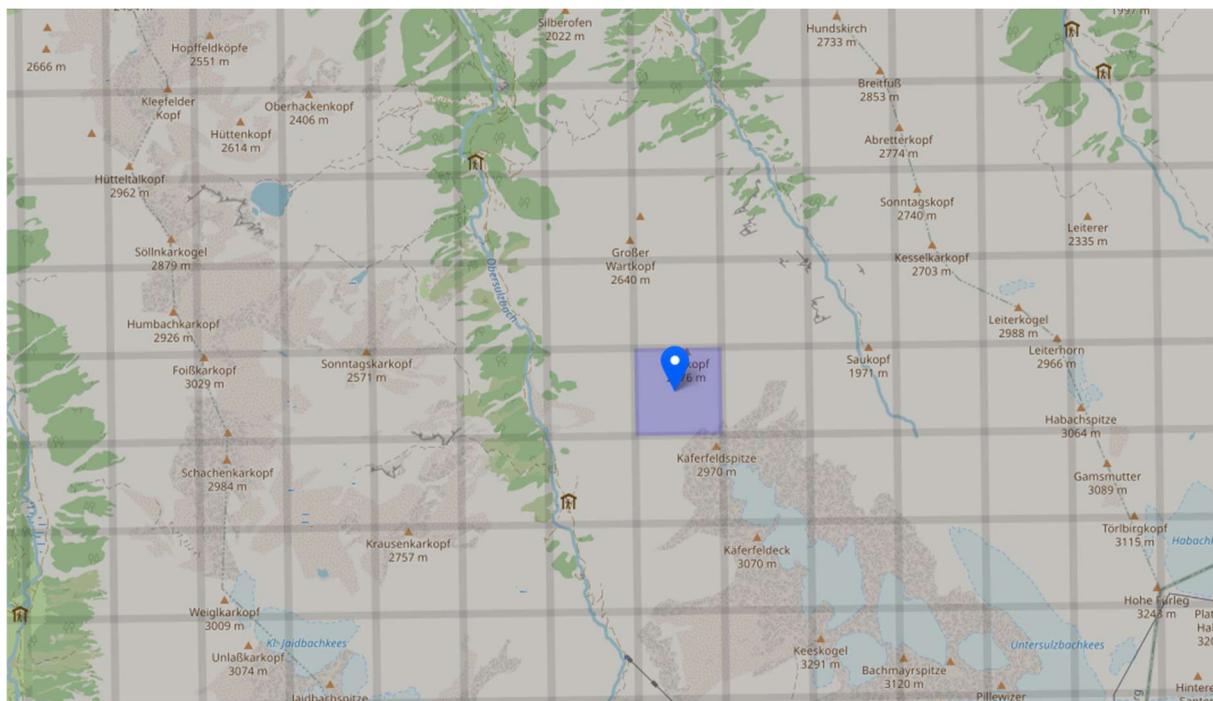


Abbildung 7: Datengrundlage (1 km²-Rasterzelle) der INCA-Analyse für das Sattelkar (Quelle: <https://data.hub.geosphere.at/>).

Die INCA-Datenreihe reicht zurück bis März 2011, neigt in den ersten Jahren jedoch zu einer signifikanten Überschätzung, weswegen im Rahmen des vorliegenden Berichts ausschließlich INCA-Daten ab 2015 verwendet werden.

Im Rahmen des INCA-Modells werden Wettervorhersagemodelle (ALADIN, ECMWF) durch Kombination mit aktuellen Messwerten (Stationsdaten, Radar, Satellit) verbessert und mit Hilfe hochauflösender Geländeinformation verfeinert. Dies ist vor allem für hochalpine Untersuchungsgebiete, wie beispielsweise dem Sattelkar, von großer Bedeutung, da Topographie-Effekte hier in der Regel zu einer kleinräumigen Niederschlagsvariabilität führen. INCA-Niederschlagsdaten repräsentieren aus diesem Grund wertvolle Komplementärinformationen zu Wetterstationsdaten (z.B. Kürsinger Hütte), die das

Niederschlagsgeschehen im meist mehrere Kilometer entfernten Zielgebiet (z.B. Sattelkar) fallweise nicht korrekt abbilden.

Die im Bericht verwendeten Abflussdaten werden an zwei Pegel-Standorten entlang des Obersulzbaches erhoben. Ein Standort befindet sich talaufwärts des Sattelkars, direkt unterhalb des Sulzsees (Pegel „Kees“), der zweite Pegel-Standort liegt am Auslasspunkt des Obersulzbachtals (Pegel „Sulzau“). Das Sattelkar entwässert in etwa in der Mitte der beiden Messstandorte (Abbildung 1).

Pegel ‚Kees‘ repräsentiert ein relativ kleines Einzugsgebiet und wird von Abfluss und Gletscherschmelze des Obersulzbachkees dominiert. Pegel ‚Sulzau‘ liegt am Auslasspunkt des Obersulzbachtals und wird in erster Linie vom lokalen Niederschlagsgeschehen gesteuert. Die Datenaufzeichnung an Pegel ‚Kees‘ startete im Jahr 1989, die Datenaufzeichnung an Pegel ‚Sulzau‘ startete im Jahr 1976.

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 8). Mit Hilfe der GCPs konnten die UAS-Befliegungen mit Erfassungsgenauigkeiten im niedrigen Zentimeterbereich (in der Regel < 10 cm) und einer Auflösung von 6-8 cm durchgeführt werden (Tabelle 1).

Die Berechnung der Höhen- und Volumenveränderungen basiert auf dem digitalen Geländemodell des Landes Salzburg aus dem Jahr 2010 und den neugenerierten Modellen der UAS-Befliegungen. Für die optische Analyse der Bewegungsraten wurden neben den UAS-Daten zusätzlich Orthofotos 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 (Feature Tracking).



Abbildung 8: Installation von Boden-Kontrollpunkten (12.07.2018).

Im Jahr 2024 wurden drei UAV-Befliegungen durchgeführt mit dem Ziel Bewegungsraten innerhalb der Sommerperioden zu erfassen. Die Befliegungen erfolgten am 05.06.2024 (im oberen Bereich des Sattelkars lag zu diesem Zeitpunkt noch eine Schneedecke vor), am 18.07.2024 und am 31.10.2024. Bei der letztgenannten Befliegung wurde neben dem Sattelkar erstmals auch das Steinkar beflogen, welches das höchstgelegene Kar (höchste Permafrostwahrscheinlichkeit) der Nachbarkäre darstellt und große, potenziell Permafrost-beeinflusste, Sedimentmengen beherbergt.

Die Befliegungen des Jahres 2024 erfolgten mit einem leistungsstärkeren UAS-Modell als in den Vorjahren. Das verwendete Modell DJI Matrice M300 RTK ermöglichte erstmals eine vom Talboden ausgehende Befliegung (der Drohnenstart erfolgte direkt bei der Hofrat-Keller-Hütte), das Sattelkar musste nicht betreten werden. Auflösung und Genauigkeit der erfassten Daten unterschieden sich nicht von den Vorjahren (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Befliegungen im gesamten Untersuchungszeitraum 2018-2024. An den mit * markierten Daten konnten die Befliegungen aufgrund schlechter Witterungsverhältnisse nicht an einem Tag durchgeführt werden.

Datum	Ort	System	RMS [m]	Auflösung [cm]
13.07.2018	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro	0,213	8
24.07.2019	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro	0,202	8
04.09.2019	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro	0,073	8
09.07.2020	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,093	8
11.09.2020	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,090	8
07.07.2021*	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,065	6
21.07.2021	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,037	6
08.09.2021	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,058	6
19.07.2022	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,062	6
07.09.2022	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,057	6
18./20.07.2023	Sattelkar	DJI Phantom 4 Pro + Topodrone PPK Kit	0,176	6
12.09.2023	Sattelkar	DJI Matrice M300 RTK + DJI Zenmuse P1 (35mm)	0,039	5
05.06.2024	Sattelkar	DJI Mavic 3E im PPK-Modus	0,052	7
18.07.2024	Sattelkar	DJI Mavic 3E im PPK-Modus	0,093	7
31.10.2024	Sattelkar	DJI Mavic 3E im PPK-Modus	0,139	6
31.10.2024	Steinkar	DJI Mavic 3E im PPK-Modus	0,608	7

2.3 Thermische Untergrundbedingungen

Als Konsequenz des in hochalpinen Regionen besonders stark ausgeprägten Temperaturanstiegs der letzten Jahre und Jahrzehnte, kommt es zu einer signifikanten Erwärmung des Untergrundes. Der mit der Untergrunderwärmung einhergehende Permafrostrückgang beeinflusst die fels-, boden- und eismechanischen Untergrundbedingungen und wirkt sich nachteilig auf die Stabilität des Untergrundes aus. In hochalpinen Regionen kommt es aus diesem Grund in Folge des Permafrostrückgangs vermehrt zu potenziell gefährlichen Massenbewegungen wie Steinschlägen, Felsstürzen, Murgängen und Rutschungen.

Auf Grund von Puffereffekten (Schneedecke, latenter Wärmeumsatz im Untergrund, heterogene physikalische Untergrundeigenschaften etc.) kann die gemessene atmosphärische Erwärmung meistens nicht linear auf den Untergrund übertragen werden. Vielerorts wird aus diesen Gründen eine stark verzögerte bzw. stark tiefendifferenzierte Erwärmung des Untergrundes beobachtet. Das Monitoring der thermischen Untergrundbedingungen in hochalpinen Regionen hat vor diesem Hintergrund eine zentrale Bedeutung. Im Sattelkar und seinen Nachbarkaren werden die thermischen Untergrundbedingungen über die direkte Messung der oberflächennahen Untergrundtemperaturen sowie über isotopenchemische Messungen untersucht.

2.3.1 Untergrundtemperaturen

Für die Messung der oberflächennahen Untergrundtemperatur und die Abschätzung der lokalen Permafrostverhältnisse wurden 30 oberflächennahe Temperatursensoren in einer Tiefe von 10 cm installiert (davon 15 vom Hydrographischen Dienst Land Salzburg) und wie folgt über die untersuchten Käre verteilt: 15 Logger im Sattelkar, je 5 Logger im Ofen-, Mitter- und Steinkar.



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

Die Untergrundtemperaturen im Sattelkar wurden letztmalig am 28.09.2023 ausgelesen (Abbildung 9). Eine neue Gefahrensituation entlang Steiges zum Sattelkar (starker Steinschlag mit erheblichen Blockgrößen) machte eine Neubewertung des Zustiegsrisikos erforderlich. In Abstimmung mit dem Naturraummanagement des Nationalparks Hohe Tauern (Stefan Lerch) wurde in weiterer Folge von einer Begehung des Kares Abstand genommen. Im Sommer 2024 erfolgte somit keine erneute Auslesung der Temperaturlogger im Sattelkar.

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

Auslesedatum	Logger1	Logger2	Logger3	Logger5	Logger6	Logger7	Logger8	Logger9
Seriennr. alt	A51FE0	A51FE4	A51FE2	A51FDA	A51FD7	A51FE3	A51FDB	A51FDF
ersetzt durch:	A5447A	A5447E	A54483		A54479	A5447B		A54482
10.10.2017	x				x			
26.06.2018	x	x	x	x	x	x	x	x
24.07.2019		x	x	x	x	x		x
04.09.2019	x						x	
09.07.2020	x	x	x	x	x	x	x	x
12.08.2021	x	x	x		x	x		
25.07.2022	*	*	*		*	x/*		*
27.09.2023	x	x	x			x		x

Auslesedatum	Logger10	Logger11	Logger12	Logger13	Logger14	Logger15	Logger16	Logger0
Seriennr. alt	A51FD8	A51FD9	A51FD6	A51FDC	A51FDE			A51FE1
ersetzt durch:	A5447F			A54480	A54486		A5447C	
10.10.2017								
26.06.2018	x	x	x	x	x			
24.07.2019		x		x				
04.09.2019	x		x		x			
09.07.2020	x	x	x	x	x			
12.08.2021				x	x			
25.07.2022	*		*	*	*			*
27.09.2023	x			x			x	

2.3.2 Isotopenchemie

Die bisherigen Isotopenchemie-Messkampagnen (Tabelle 3) wurden im Jahr 2024 mit einer Beprobung des Steinkars fortgeführt (im Sattelkar konnten auf Grund des hohen Steinschlagrisikos entlang der Zustiegsroute keine Proben genommen werden). Übergeordnetes Ziel der hydrochemischen Analysen ist die Untersuchung der Wasserherkunft und die Beantwortung der Frage ob die untersuchten Wässer (zumindest anteilig) abtauenden Permafrostvorkommen entstammen.

Die Messkampagnen umfassen die Analyse der Temperatur, der elektrischen Leitfähigkeit und der stabilen Wasserisotope (Deuterium, Sauerstoff-18, Sauerstoff-17). Vor allem letztere dienen als wertvolle natürliche Tracer, die es potenziell ermöglichen, den Ursprung und die Bewegung des Wassers innerhalb eines hydrologischen Systems zu rekonstruieren:

- **1. Deuterium (^2H):** 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}O) und Sauerstoff-17 (^{17}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.

Probenahmedatum	Ort	Probenanzahl	^{18}O	^{17}O	^2H	Temperatur	Elektrische Leitfähigkeit
04.09.2019	Sattelkar	6	x	x	x	x	x
09.07.2020	Sattelkar	26	x		x	x	x
08.09.2021	Sattelkar	19	x		x	x	x
25.07./02.08.2022	Sattelkar	10	x	x	x	x	x
26./27.09.2023	Sattelkar	15	x		x	x	x
25.10.2024	Steinkar	8		x	x	x	x

2.4 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen

Für die Detektion von Murereignissen und gravitativen Massenbewegungen wurde im Frühsommer 2022 unterhalb der Karschwelle, im Bereich des großen Murkegels, ein passives seismisches Monitoringsystem installiert. Im Sommer 2022 wurde die Seismik durch Steinschlag beschädigt. Im Sommer 2023 wurde die Seismik neu installiert, musste jedoch auf Grund eines weiteren Steinschlags wieder außer Betrieb genommen werden. Eine Weiterführung des seismischen Monitorings ist momentan nicht vorgesehen.

Ergänzend zu den seismischen Messungen wurde im Jahr 2022 oberhalb der Hofrat-Keller-Hütte, auf ca. 2.000 m, ein autarkes Kamerasystem (ENLAPS 2024) installiert (Abbildung 10). Die eingesetzte 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. Das System wurde 2023 adaptiert und mit einer robusteren Konstruktion ausgestattet. 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 10: Kamerasystem zur Überwachung des Sattelkars (06.10.2022).

3. Ergebnisse und Interpretationen

3.1 Meteorologische und hydrologische Bedingungen

Die Analyse der meteorologischen und hydrologischen Bedingungen basiert auf Daten des Hydrographischen Dienstes des Landes Salzburg (Niederschlag an der Wetterstation Kürsinger Hütte, Abfluss an den Pegeln Kees und Sulzau). Ergänzend werden im vorliegenden Zwischenbericht erstmalig Temperatur- und Niederschlagsdaten des INCA-Wettermodells (INtegrated nowcasting through Comprehensive Analysis) der GeoSphere Austria verwendet.

3.1.1 Niederschlag

Tabelle 4 zeigt die Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen größer als 20, 30, 40 und 50 mm. Im Berichtsjahr 2024 wurden an der Kürsinger Hütte 14 Tage mit Niederschlagssummen > 20 mm registriert. Seit 2009 wurden nur in den Jahren 2012, 2015 und 2020 höhere Werte gemessen. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen > als 30 mm: Seit 2009 wurde an der Kürsinger Hütte nur in zwei Jahren (2015, 2020) eine größere Tagesanzahl aufgezeichnet.

Bei der Analyse der INCA-Niederschlagswerte wurde auf eine Integration von Daten älter als 2015 verzichtet, da diese eine signifikante Überschätzungstendenz zeigen (Ghaemi et al. 2021). Grundsätzlich zeigen INCA-Daten und die Messwerte der Kürsinger Hütte ähnliche Größenordnungen, bei genauer Betrachtung sind jedoch signifikante Abweichungen ersichtlich, die auf Grund der erheblichen Distanz zwischen Sattelkar und Kürsinger Hütte (~4 km) keine große Überraschung sind. Ähnlich wie an der Kürsinger Hütte zeigen auch die INCA-Daten des Jahres 2024 eine hohe Anzahl an Tagen mit Niederschlagssummen > 20 mm. Bei der Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen > 30 mm liegen die INCA-Werte des Jahres 2024 hingegen in etwa im langjährigen Mittel.

Die Niederschlagswerte der Kürsinger Hütte und des INCA-Modells (Tabelle 4) scheinen auf eine Häufung von Starkniederschlagstagen in den letzten Jahren hinzu deuten. Eine für beide Datenquellen durchgeführte Trendanalyse (lineare Regression) bestätigt diesen Eindruck (Abbildung 11). An der Kürsinger Hütte zeigt die Zeitreihenanalyse (2009-2024) eine zunehmende Häufigkeit von Tagesniederschlägen > 20 mm und > 30 mm. Erstere stieg im Beobachtungszeitraum um 0,2 Tage pro Jahr, zweitere um 0,1 Tage pro Jahr (Anm.: Die Daten des Jahres 2022 wurden auf Grund der kurzen Betriebsdauer der Wetterstation von nur 82 Tagen aus der Trendanalyse ausgeschlossen). Für die kürzere INCA-Zeitreihe (2015-2024) zeigt die Trendanalyse für „> 20 mm-Tage“ eine Zunahme von 0,4 Tagen pro Jahr und für „> 30 mm-Tage“ eine Zunahme von 0,1 pro Jahr. Für Niederschlagssummen > 40 mm und > 50 mm wurden auf Grund der geringen Ereigniszahlen keine Trendanalysen durchgeführt.

Die starke Streuung der analysierten Werte um die Regressionsgeraden (das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt für drei von vier Regressionen im Bereich von 0,1) und die relativ niedrige statistische Signifikanz der Zusammenhänge (die p-Werte liegen in drei Fällen bei etwa 0,25, in einem Fall bei 0,66) zeigt, dass die identifizierten Niederschlagstrends mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sind. Eine Ausdehnung des Beobachtungszeitraums (Fortsetzung der Analyse in den Folgejahren) ist aus diesem Grund von großer Bedeutung.

Tabelle 4: Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen größer als 20, 30, 40 und 50 mm an der Wetterstation Kürsinger Hütte („KH“) und auf Basis des INCA-Wettermodells („INCA“). Die NS-Station an der Kürsinger Hütte war im Jahr 2024 190 Tage in Betrieb (20.05.-25.11.2024). In den Vorjahren war die Station typischerweise 150-200 Tage in Betrieb. Eine Ausnahme bildet das Jahr 2022, in dem die Niederschlagsmessung nur 82 Tage lang aktiv war. INCA-Niederschlagsdaten älter als 2015 zeigen eine signifikante Überschätzungstendenz und werden aus diesem Grund nicht verwendet.

	> 20 mm		> 30 mm		> 40 mm		> 50 mm	
	KH	INCA	KH	INCA	KH	INCA	KH	INCA
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	15	6	3	1	0	0	0
2016	10	14	5	5	0	2	0	1
2017	10	20	4	6	0	1	0	1
2018	10	14	5	8	2	3	1	0
2019	11	10	1	3	1	2	1	0
2020	16	16	8	5	6	3	2	2
2021	12	16	6	6	4	3	2	2
2022	4	15	2	4	0	1	0	0
2023	13	22	5	8	3	1	2	1
2024	14	18	6	4	0	1	0	0

Die Betrachtung der Top Ten der gemessenen Tagesniederschlagssummen der letzten 15 Jahre (2009-2023) unterstreicht die Ergebnisse der Regressionsanalyse und demonstriert ebenfalls 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 fünf Jahre. Der höchste Tagesniederschlag im Jahr 2024 wurde am 8. Oktober gemessen (38,5 mm).

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.

Ein direkter Vergleich der Messdaten der Kürsinger Hütte (2009-2024) mit den INCA-Modelldaten (2015-2024) ist auf Grund der unterschiedlichen Länge der Zeitreihen nur bedingt möglich. Neben den erwartbaren Abweichungen zeigt sich hinsichtlich Größenordnungen und Zeitpunkten dennoch fallweise eine hohe Übereinstimmung der beiden Datenquellen (vier korrespondierende Wertepaare bei den Tagessummen, drei bei den Stundensummen) (Tabelle 5, Tabelle 6).

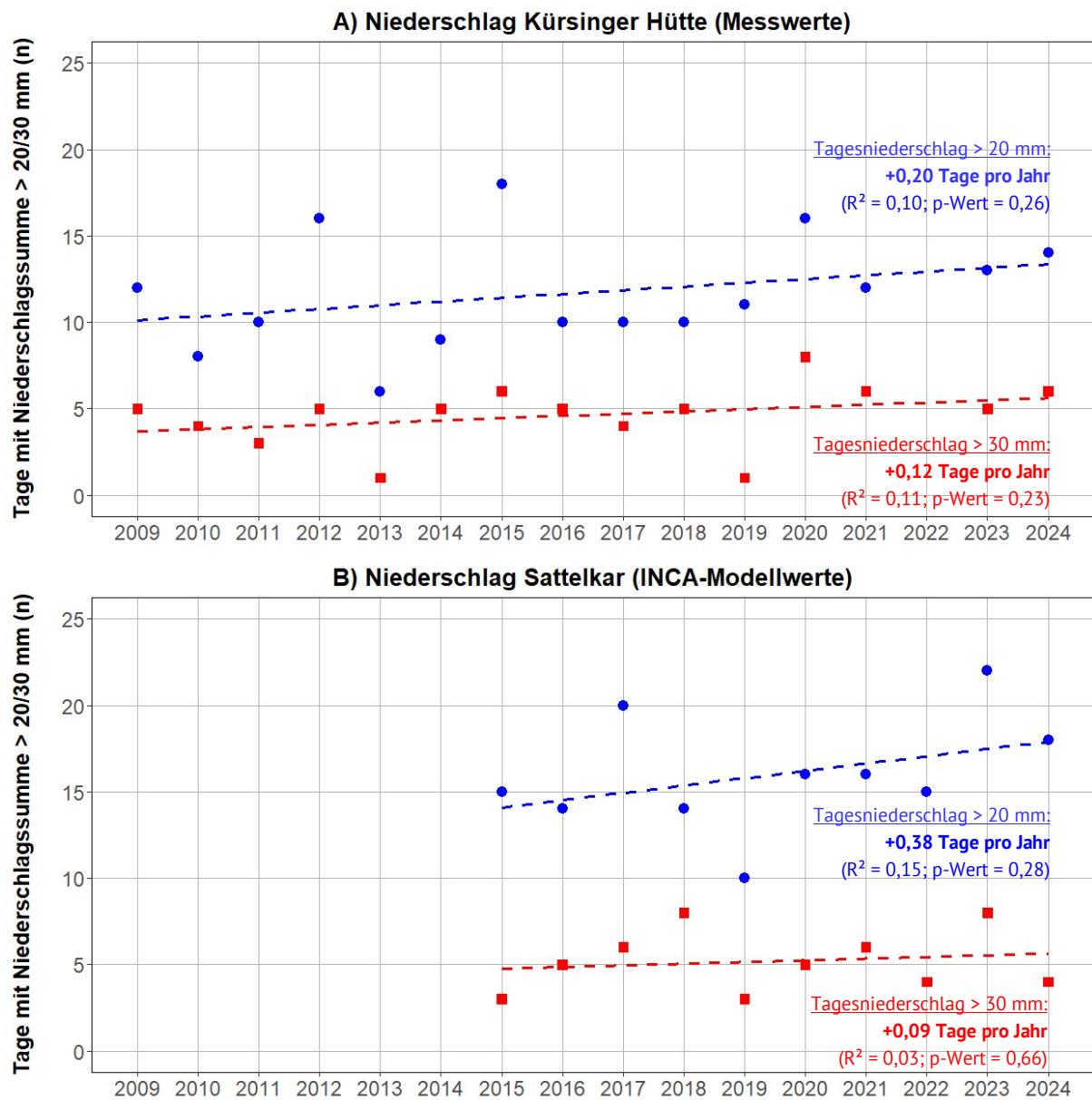


Abbildung 11: Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen größer als 20 mm (blau) bzw. 30 mm (rot) für (A) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009-2024) und (B) Sattelkar auf Basis von INCA-Wettermodell (2015-2024). Regressionsanalysen zeigen für Messdaten (Kürsinger Hütte) und Modelldaten (INCA) eine trendhafte Zunahme von Starkniederschlägen. Kürsinger Hütte: Das Jahr 2022 wurde auf Grund der geringen Betriebsdauer der Niederschlagsmessung aus der Trendanalyse ausgeschlossen.

Tabelle 5: Die zehn höchsten Niederschlags-Tagessummen für (a) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009-2024) (linke Tabellenhälfte) und (b) Sattelkar auf Basis des INCA-Modells (2015-2024) (rechte Tabellenhälfte). Korrespondierende Wertepaare sind farblich hervorgehoben.

(a) Wetterstation Kürsinger Hütte			(b) Sattelkar (INCA-Wettermodell)		
Rang	Datum	Tagessumme Niederschlag [mm]	Rang	Datum	Tagessumme Niederschlag [mm]
1	28.08.2023	100,1	1	05.08.2016	76,7
2	29.08.2020	82,9	2	29.08.2020	71,8
3	18.07.2021	76,2	3	28.08.2023	64,0
4	30.07.2014	76,1	4	17.07.2021	62,5
5	27.04.2009	70,1	5	16.08.2021	58,7
6	17.07.2021	65,1	6	19.08.2017	53,9
7	03.10.2020	62,8	7	25.09.2020	50,6
8	11.06.2014	60,4	8	03.08.2020	49,6
9	19.08.2017	57,2	9	28.07.2019	49,3
10	22.09.2023	54,9	10	12.09.2024	47,0

Tabelle 6: Die zehn höchsten Niederschlags-Stundensummen für (a) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009-2024) (linke Tabellenhälfte) und (b) Sattelkar auf Basis des INCA-Modells (2015-2024) (rechte Tabellenhälfte). Korrespondierende Wertepaare sind farblich hervorgehoben.

(a) Wetterstation Kürsinger Hütte			(b) Sattelkar (INCA-Wettermodell)		
Rang	Datum	Stundensumme Niederschlag [mm]	Rang	Datum	Stundensumme Niederschlag [mm]
1	11.06.2014 19:00	37,8	1	23.05.2016 15:00	31,2
2	04.08.2015 21:00	22,1	2	14.08.2021 19:00	24,1
3	18.07.2023 15:00	19,8	3	25.07.2019 16:00	19,9
4	01.09.2015 21:00	17,7	4	21.07.2024 17:00	16,2
5	06.08.2020 19:00	16,5	5	16.08.2021 16:00	15,9
6	11.06.2014 20:00	14,9	6	04.08.2015 21:00	15,6
7	16.08.2021 14:00	14,4	7	26.08.2017 17:00	15,1
8	05.08.2022 16:00	14,0	8	01.09.2015 21:00	14,4
9	05.07.2018 18:00	14,0	9	28.06.2022 14:00	13,5
10	17.08.2023 17:00	13,4	10	03.10.2020 11:00	13,3

3.1.2 Abfluss

Im Rahmen der Abflussanalyse werden Messdaten der Pegel ‚Kees‘ (2 040 m) und ‚Sulzau‘ (882 m) herangezogen (siehe Kapitel 2.1). Die sommerlichen Tagesmittelwerte des Abflusses im Vergleichszeitraum 2009-2024 liegen am Pegel ‚Kees‘ bei etwa $3,5 \text{ m}^3$ pro Sekunde (Schwankungsbreite: 0-18 m^3 pro Sekunde) und am Pegel Sulzau bei rund $10,5 \text{ m}^3$ pro Sekunde (Schwankungsbreite: 1-80 m^3 pro Sekunde).

Der Niederschlagsanalyse folgend wurde auch im Rahmen der Abflussdatenauswertung eine Trendanalyse (lineare Regressionsanalyse) durchgeführt. Analysiert wurde einerseits die gesamte verfügbare Zeitreihe (Kees: 1989-2004, Sulzau: 1977-2024) und andererseits der Vergleichszeitraum der Niederschlagsmessung an der Kürsinger Hütte (2009-2024).

Am Pegel ‚Kees‘ wurde die Anzahl der Tage mit Abflussmittelwerten $> 8 \text{ m}^3$ extrahiert (= rund 200 Tage seit Messbeginn im Jahr 1989) (Abbildung 12A). Über den Gesamtzeitraum (1989-2024) ist keine nennenswerte Veränderung zu erkennen (-0,04 Tage pro Jahr). Über den Vergleichszeitraum der Niederschlagsmessung (2009-2024) zeigt sich ein leichter Anstieg (+0,11 Tage pro Jahr), der eine ähnliche Größenordnung aufweist, wie der Niederschlagsanstieg (vergleiche Abbildung 11A). Zu beachten ist die große Streuung der Werte um die Regressionsgerade (niedrige R^2 -Werte) und die niedrige statistische Signifikanz der Zusammenhänge (hohe p-Werte). Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass es am Pegel ‚Kees‘ bei Spitzenabflüssen zu einer seitlichen Überströmung des Messquerschnitts kommen kann, weswegen Abflussmaxima potenziell untererfasst werden.

Für den Pegel ‚Sulzau‘ wurde die Anzahl der Tage mit Abflussmittelwerten $> 22 \text{ m}^3$ extrahiert (= rund 200 Tage seit Messbeginn im Jahr 1977). Sowohl für den Gesamtzeitraum (1977-2024) als auch für den Vergleichszeitraum (2009-2024) zeigt sich ein klarer Anstieg der Tagesanzahl mit Spitzenabflüssen, der für den ersten Fall (1977-2024) hochsignifikant ausfällt (p-Wert = 0).

Tabelle 7: Die zehn höchsten Abfluss-Tagesmittelwerte für (a) Pegelmessstelle „Kees“ und (b) Pegelmessstelle „Sulzau“ in der Beobachtungsperiode 2009-2024 (absteigend gereiht).

(a) Pegel Kees			(b) Pegel Sulzau		
Rang	Datum	Tagesmittelwert Abfluss [m^3]	Rang	Datum	Tagesmittelwert Abfluss [m^3]
1	18.07.2021	18,4	1	31.07.2014	80,1
2	17.07.2021	15,5	2	18.07.2021	69,1
3	31.07.2014	14,1	3	28.08.2023	59,7
4	29.07.2019	12,6	4	12.06.2019	46,1
5	28.08.2023	12,3	5	17.07.2021	45,1
6	17.07.2010	12,3	6	11.06.2019	44,0
7	11.06.2010	11,3	7	29.07.2019	41,6
8	04.09.2009	11,1	8	13.08.2014	39,9
9	17.07.2009	11,0	9	04.09.2009	37,9
10	12.07.2016	10,8	10	30.08.2020	37,6

Auch bei der Betrachtung der absoluten Spitzenabflüsse (Top-Ten der Tagesmittelwerte seit 2009) zeigt sich in den letzten Jahren eine steigende Tendenz. Am aussagekräftigeren Pegel ‚Sulzau‘ (größeres Einzugsgebiet) wurden sieben der größten zehn Tagesmittelwerte in den letzten sechs Jahren registriert (Tabelle 7). Absoluter Spitzenreiter unter den Tagesabflüssen ist der 31.07.2014 ($83,9 \text{ m}^3$) – an diesem Tag ereigneten sich in Folge von intensivem Geschiebetransport und Muraktivität signifikante Infrastrukturschäden im Obersulzbachtal. Die gemessenen Spitzenabflüsse (Stundenmittel) während des folgenschweren Unwetters

Ende Juli 2014 lagen bei mehr als 120 m^3 pro Sekunde am Pegel „Sulzau“ (Abbildung 13) bzw. bei mehr als 20 m^3 pro Sekunde am Pegel „Kees“ (Tabelle 7). Ähnlich hohe Abflusswerte ($> 120 \text{ m}^3$ pro Sekunde im Stundenmittel, $69,1 \text{ m}^3$ im Tagesmittel) wurden am Pegel „Sulzau“ am 18.07.2021 gemessen, wobei in diesem Fall keine schweren Murschäden beobachtet wurden.

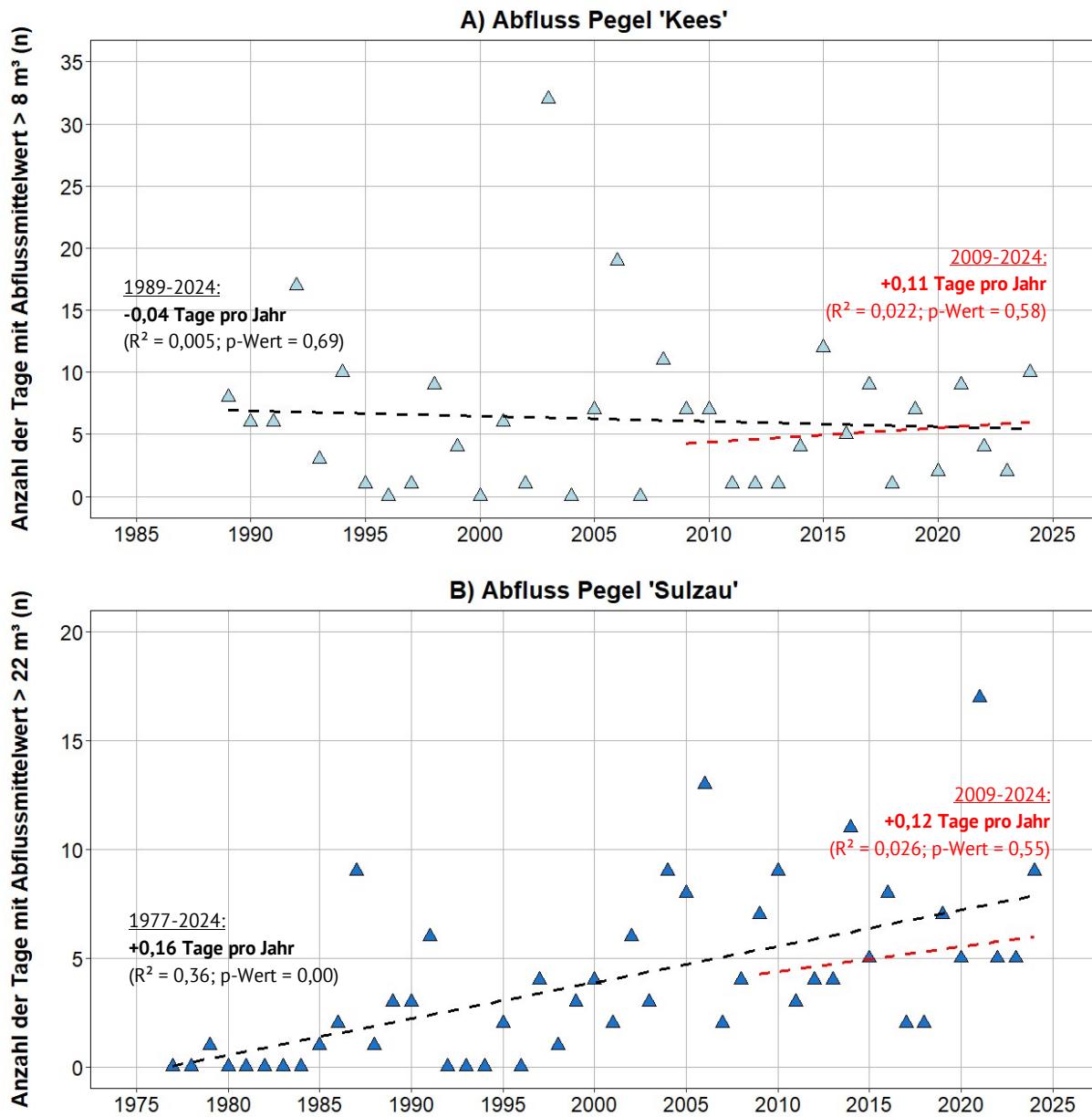


Abbildung 12: Anzahl der Tage mit Spitzenabflüssen für (A) Pegel ‚Kees‘ ($> 8 \text{ m}^3$) und (B) Pegel ‚Sulzau‘ ($> 22 \text{ m}^3$) für die Gesamtzeitreihe (schwarz) und für den Vergleichszeitraum der Niederschlagsmessung an der Kürsinger Hütte (rot).

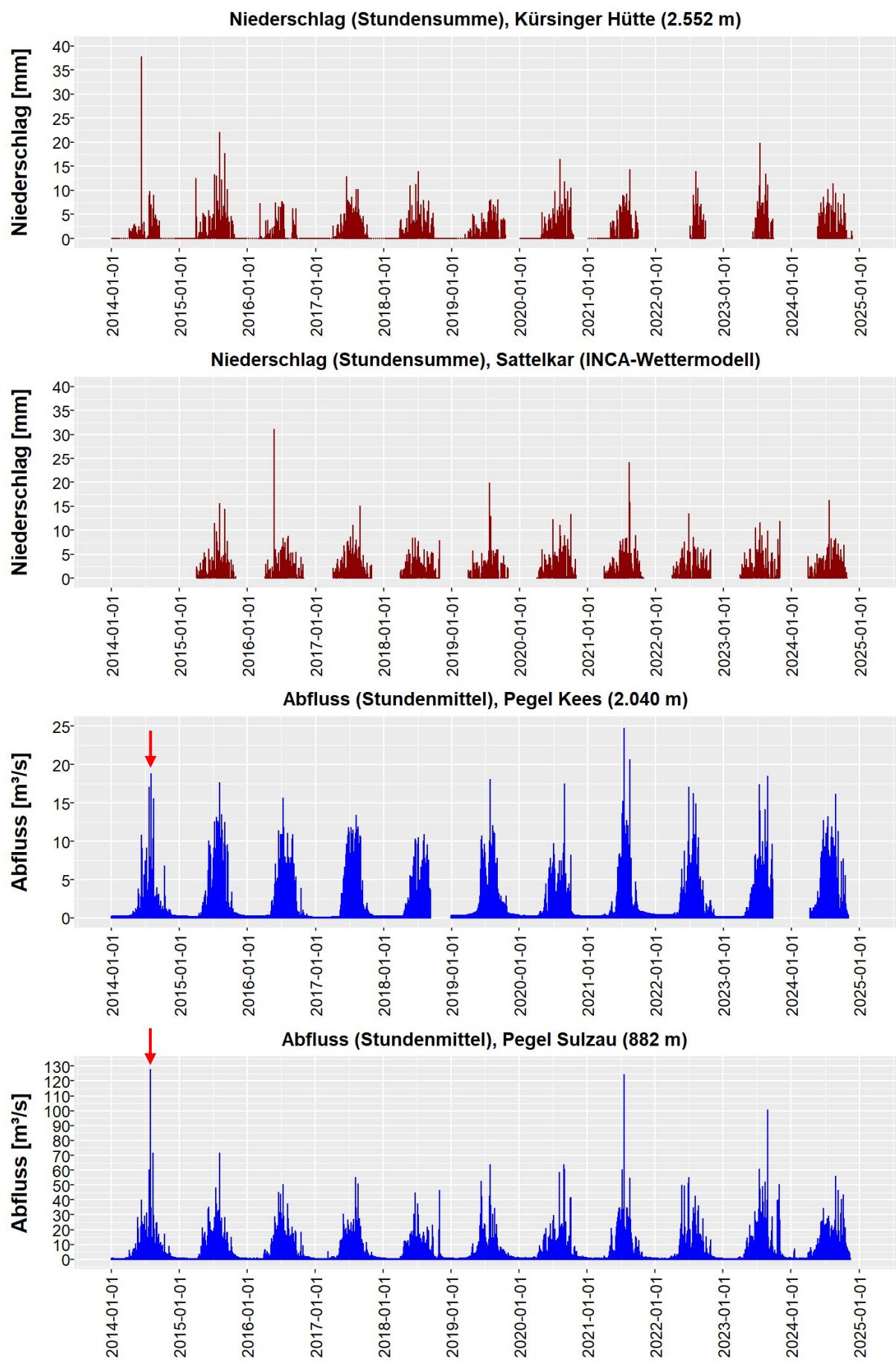


Abbildung 13: Niederschlags- und Abflussverlauf 2014-2024. Rote Pfeile markieren das bis dato letzte große Murereignis am 30./31.07.2014.

3.1.3 Lufttemperatur

Die Analyse der vorliegenden Lufttemperaturdaten demonstriert einen deutlichen Erwärmungstrend. Die INCA-Modellwerte zeigen für das Sattelkar in der Gesamtjahresbetrachtung einen mittleren Temperaturanstieg von $0,08^{\circ}\text{C}$ pro Jahr (Abbildung 14A) (Anm.: Für die Wetterstation an der Kürsinger Hütte konnten auf Grund von erheblichen Lücken in den Wintermonaten keine Ganzjahresanalysen durchgeführt werden).

Noch deutlicher fällt die Erwärmung in den für hochalpine Naturgefahren- und Massenverlagerungsprozesse besonders relevanten Sommermonaten aus. Analysen der Mess- und Modellwerte zeigen für Sattelkar und Kürsinger Hütte eine starke – und statistisch hochsignifikante – Erwärmung von mehr als $0,1^{\circ}\text{C}$ pro Jahr (Abbildung 14B).

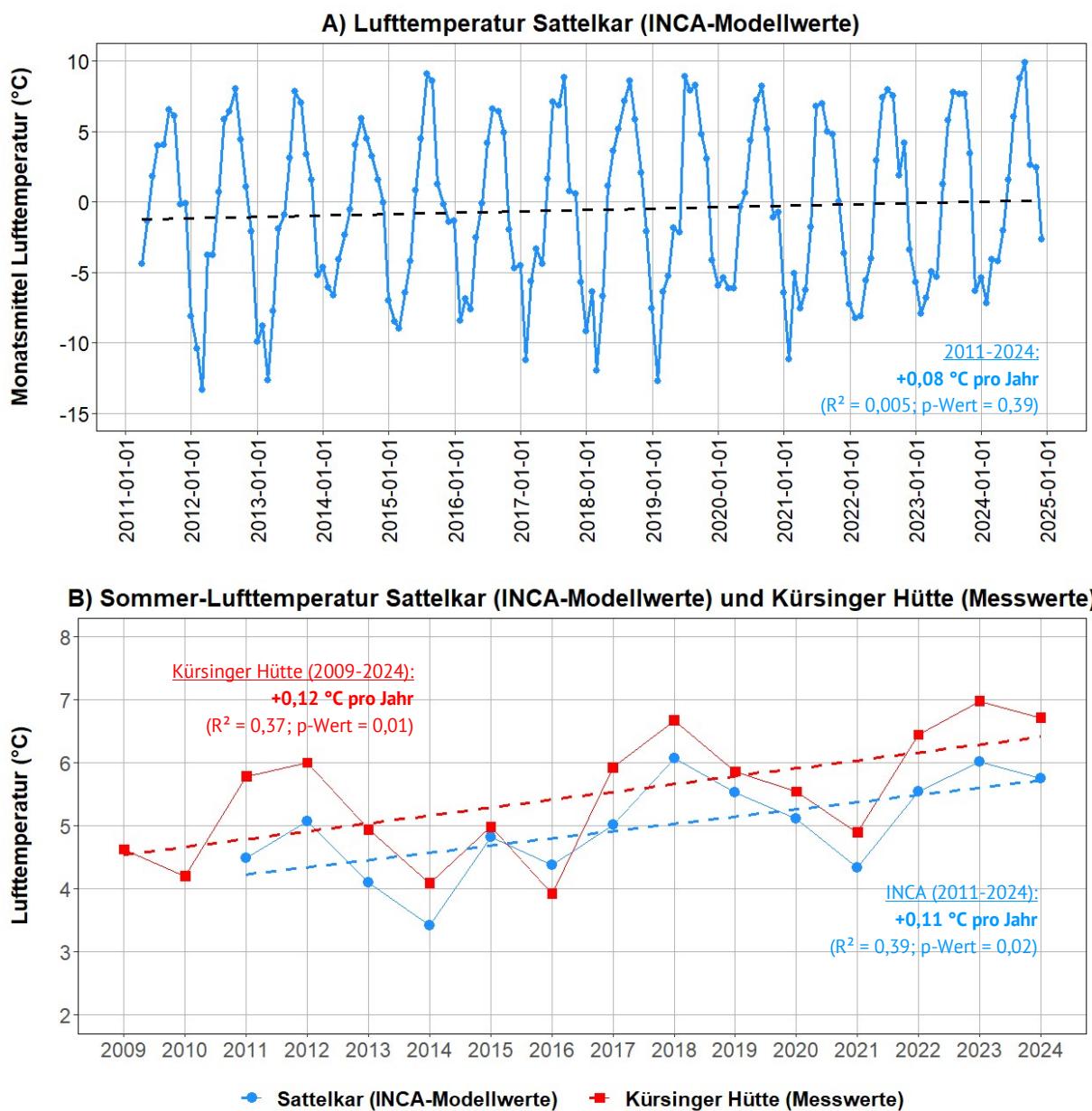


Abbildung 14A: INCA-Monatsmittel der Lufttemperatur für das Sattelkar. B: Mittlere Sommer-Lufttemperatur (Mai-September) für Sattelkar (INCA) und Kürsinger Hütte (Messwerte). Die Trendanalyse zeigt eine deutliche Erwärmung, die im Sommer besonders stark ausgeprägt ist.

3.2 Oberflächenveränderungen

Bis zur Initiierung der Sattelkar-Rutschung im Jahr 2005 dominierte eine in der oberen Karhälfte liegende Blockgletscher-ähnliche Landform das Landschaftsbild. Unterhalb des Blockgletschers schloss eine fast flächendeckende Vegetationsbedeckung an, die nur von einigen größeren Blöcken durchsetzt wurde (Abbildung 16). Starkniederschläge im Frühjahr 2005 führten direkt oberhalb der Karschwelle zu starker lokaler Erosion und zur Degradation der Vegetationsdecke, die sich in den Folgejahren zu einer tiefgreifenden, rückwärtschreitenden Bewegung entwickelte und die gesamte Sedimentfüllung des Sattelkars erfasste.

Im Jahr der Bewegungsinitiierung (2005) und den beiden Folgejahren war eine besonders rasche Vergrößerung der betroffenen Fläche zu beobachten. Bereits im Jahr 2007 betrug die Fläche der aktiven Rutschmasse rund 11,4 ha. Bis zum Jahr 2018 wuchs die Größe der betroffenen Fläche auf 17,4 ha an. In den sechs Jahren danach wurde ein verlangsamter Flächenzuwachs registriert – bis zum Sommer 2024 vergrößerte sich die Fläche „nur“ mehr weitere 1,4 ha. Die aktuelle Fläche (31.10.2024) beträgt 18,8 ha (+0,3 ha gegenüber Vorsommer) (Abbildung 15).

Um die Bewegungsrate der Sattelkar-Rutschmasse zu bestimmen, wurden die Transportdistanzen markanter Einzelblöcke in den vorliegenden Orthofotos vermessen (optisches feature tracking). Die Verwendung von Bestandsdaten aus den frühen 2000ern erlaubt dabei eine ungefähre Rekonstruktion der Bewegungsraten seit der Initiierung im Jahr 2005 und zeigt eine kontinuierliche Beschleunigung der Bewegung bis zum Sommer 2022, welcher eine deutliche Trendumkehr einlautete. In den Jahren 2022-2024 blieben die Bewegungsraten deutlich hinter den Vorjahren zurück. Ob die beobachtete Abnahme der letzten zwei Jahre auf Materialerschöpfungseffekte (abnehmender Materialnachschub), limitierte Transportkapazität (reduzierte Wasserverfügbarkeit) oder sonstige morphologische bzw. rheologische Effekte zurückzuführen ist, muss durch weitere Messungen und Beobachtungen geklärt werden.

Die Betrachtung der Bewegungsgeschwindigkeiten der Sattelkar-Rutschmasse zeigt eine deutliche Zweiteilung zwischen niedrigen Bewegungsraten in der oberen Hälfte des Sattelkars und hohen Geschwindigkeiten in der unteren Hälfte, die im gesamten Beobachtungszeitraum Bestand hat. Im Schnitt sind die in der unteren Sattelkar-Hälfte beobachteten Bewegungsraten etwa drei bis vier Mal höher als in der oberen Hälfte, wobei das qualitative Bewegungsmuster (Anstieg von 2005-2022, Abnahme 2022-2024) nahezu identisch ausgeprägt ist (vergleiche Abbildung 17A und D).

Zur jahreszeitlichen Differenzierung des Massenbewegungsverhaltens wurde die Sommerperiode (= Zeitraum zwischen Frühsommer-Befliegung (~ Juli) und Spätsommer-Befliegung (~ September)) mit dem Restjahresperiode (~ Oktober bis Juni) verglichen (Abbildung 17B-C und E-F). Dabei zeigt sich ein deutlicher Kontrast zwischen hohen Bewegungsraten im Sommer und vergleichsweise niedrigen Bewegungsraten in der Periode Herbst bis Frühjahr. Erneut manifestiert sich ein erheblicher Bewegungsunterschied zwischen dem unteren Bereich der Rutschung mit (normalisierten) sommerlichen Spitzenraten von mehr als 150 Metern pro Jahr und dem oberen Bereich der Rutschung, in dem die (normalisierten) sommerlichen Raten nie über 40 Meter pro Jahr hinausgehen. In der Periode Oktober bis Juni zeigen die Bewegungswerte eine vergleichsweise geringe jährliche Variabilität – im unteren Teil liegen die Raten typischerweise zwischen zehn und 30 Metern pro Jahr, im oberen Teil

zwischen fünf und zehn Metern pro Jahr. Über den oberen und unteren Bereich gemittelt sind die sommerlichen Raten rund drei Mal so hoch wie im Rest des Jahres (~ Oktober bis Juni). Stichprobenartig durchgeführte Georadar-Messungen aus dem Jahr 2022 lassen auf eine mittlere Mächtigkeit von zumindest 10 m schließen, woraus sich als grober Schätzwert ein Gesamtvolumen der Rutschmasse von zumindest 1,7 Mio. m³ ergibt. Die multitemporale Analyse (Zeitreihenvergleich) der mittels UAV-Photogrammetrie erstellten digitalen Oberflächenmodelle ermöglicht die Bestimmung von Volumenänderungen der Sattelkar-Rutschmasse. Für das aktuelle Jahr zeigt der Datenvergleich mit dem Vorjahr (Sommer 2023 versus Sommer 2024) einen Netto-Volumenverlust (Materialabtrag) von rund 10 000 m³. Für den Talbereich (Schuttkegel und Bachbett) zeigt die Analyse ebenfalls einen Verlust (-25 000 m³) und unterstreicht damit die Relevanz des fluviatilen Austrags durch den Obersulzbach (Abbildung 18).

Über den gesamten Beobachtungszeitraum – Gegenüberstellung von ALS-Daten des Landes Salzburg aus dem Jahr 2010 mit der aktuellsten GEORESEARCH-Befliegung vom 31.10.2024 wurden über 920.000 m³ Sediment aus dem Kar transportiert (Muren, Steinschläge, Suspensionstransport). Im Bereich des Talbodens wurden etwa 560.000 m³ Material akkumuliert. Die Differenzmenge (360.000 m³) wurde zum größten Teil vom Obersulzbach abtransportiert bzw. in geringerem Ausmaß im Rahmen von Bauarbeiten am Murkegel (technische Schutzmaßnahmen) entfernt (Abbildung 19).

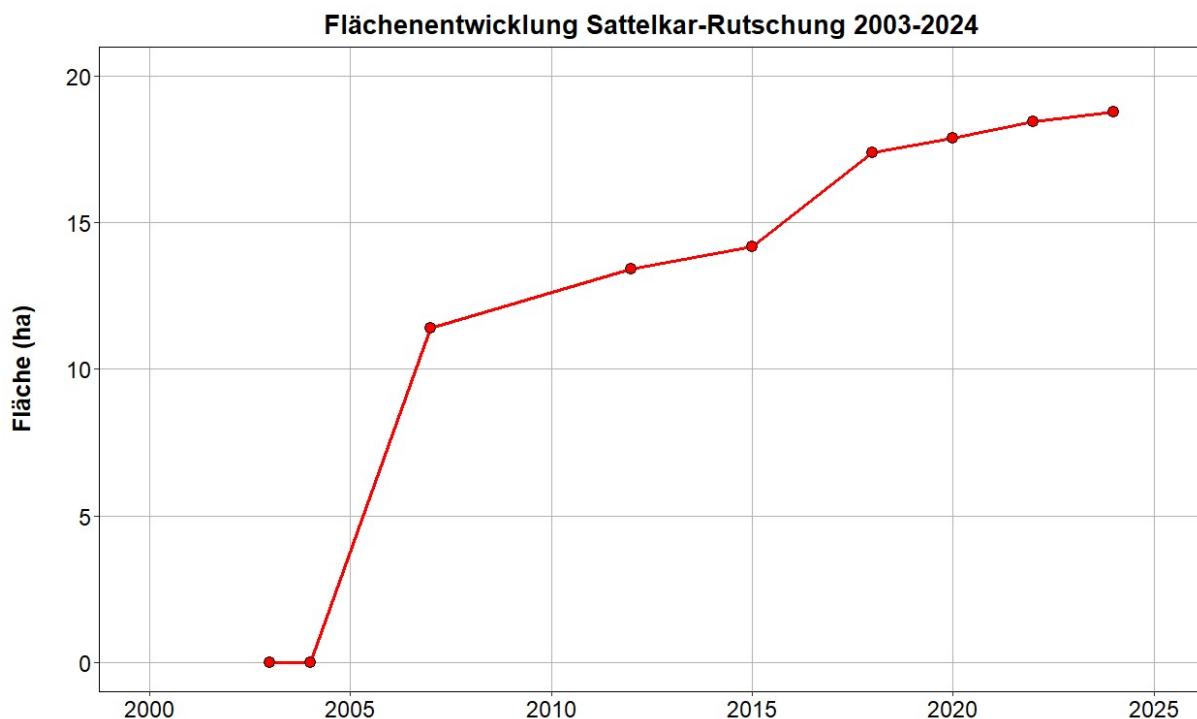


Abbildung 15: Flächenentwicklung der Sattelkar-Rutschung im Zeitraum 2003-2024 (siehe auch Abbildung 16).

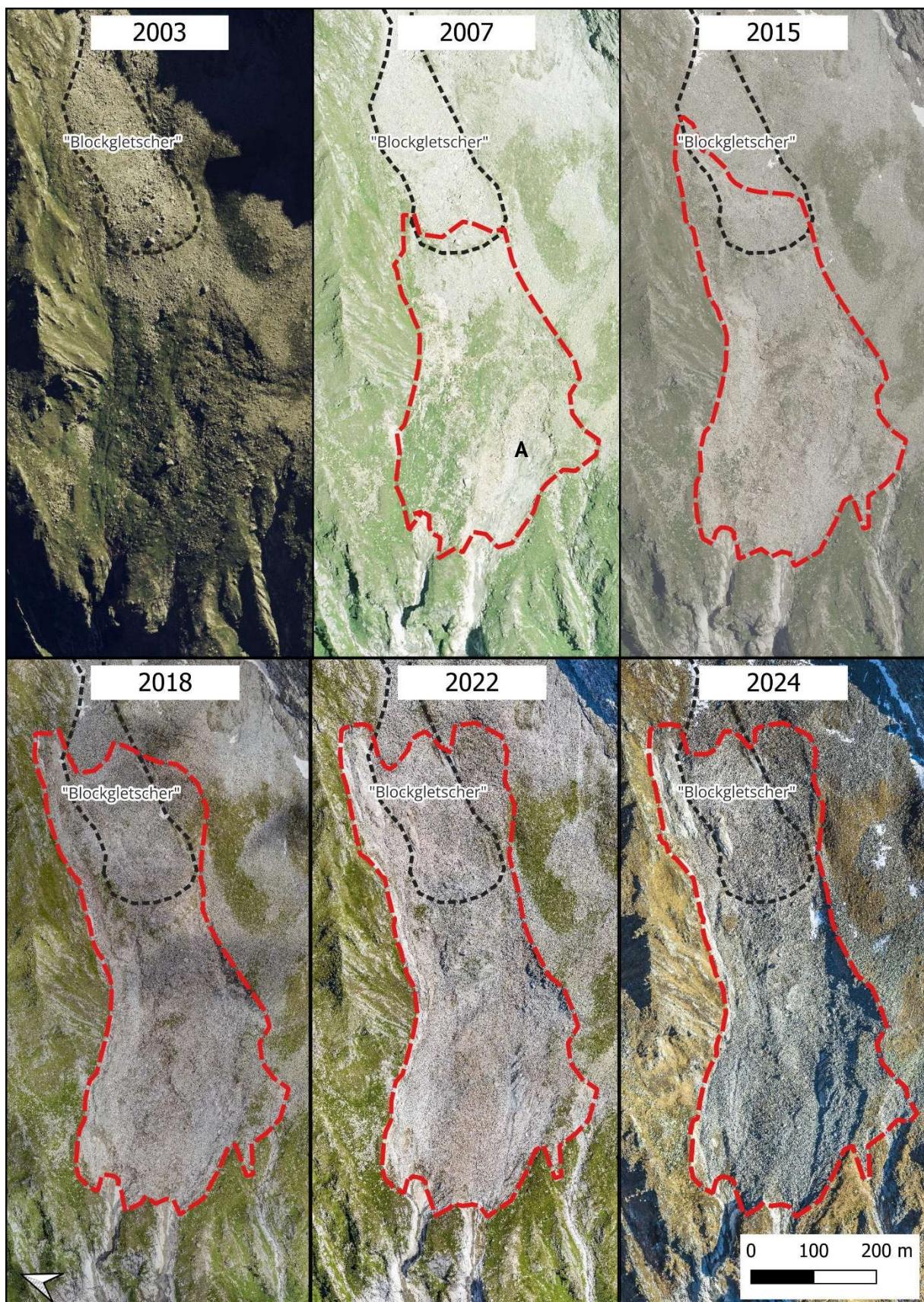


Abbildung 16: Orthofotovergleich 2003-2024 (Quelle: SAGIS sowie UAV-Befliegungen GEORESEARCH). Das Orthofoto des Jahres 2003 zeigt das Sattelkar vor Initiierung der Massenbewegung. Im Jahr 2007 ist im unteren Abschnitt des Kares, der durch Starkniederschläge des Jahres 2005 initiierte Anrißbereich ersichtlich (siehe „A“). Auf den Orthofotos der Folgejahre (2012-2024) ist die rapide, rückwärtsgerichtete Vergrößerung der Sattelkar-Rutschung deutlich zu erkennen.

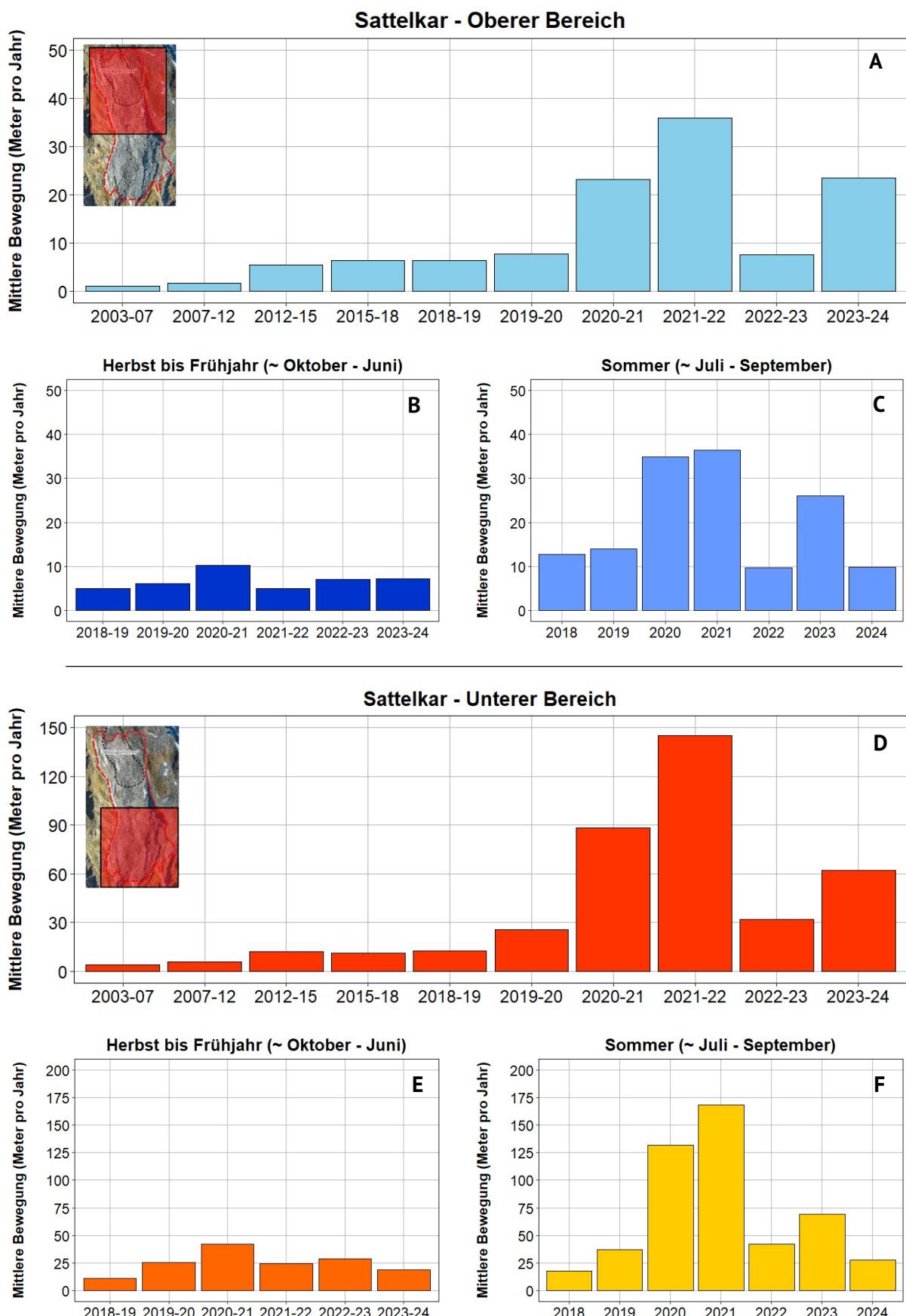


Abbildung 17: Bewegungsraten der Sattelkar-Rutschung von 2003-2024 – gemessen mittels optischer Verfolgung von Einzelblöcken (Feature Tracking). Von der Initiierung im Jahr 2005 bis in den Sommer 2022 ist eine kontinuierliche Geschwindigkeitszunahme zu beobachten, die sich in den letzten zwei Jahren (2022-2024) in eine Verlangsamung umkehrt (siehe A und D). Die Bewegungsraten im Sommer sind etwa drei Mal höher als im Rest des Jahres.

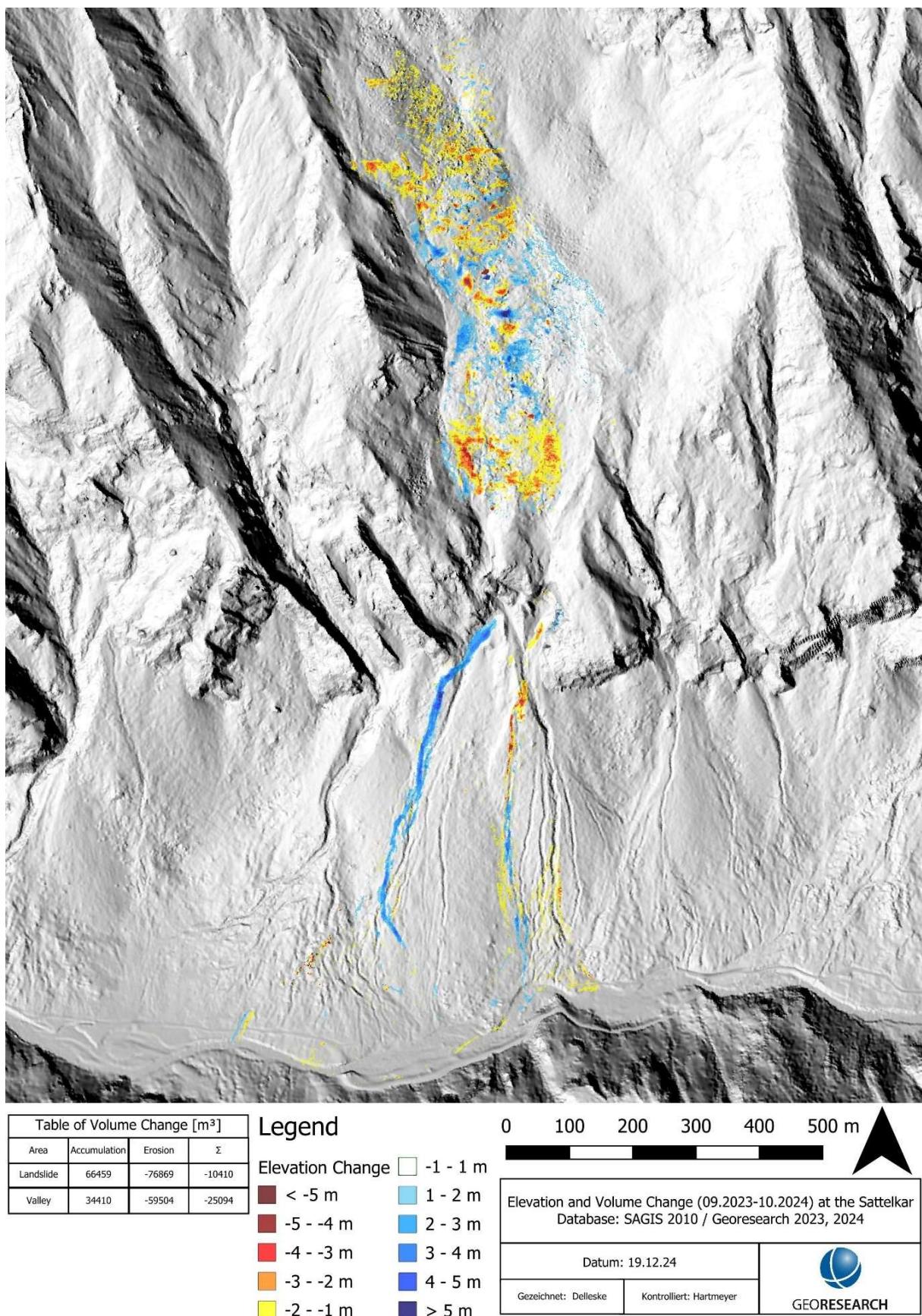


Abbildung 18: Höhen- und Volumenveränderung im Erosions- und Akkumulationsbereich der Sattelkar-Rutschung im aktuellen Jahr (Sommer 2023 bis Sommer 2024).

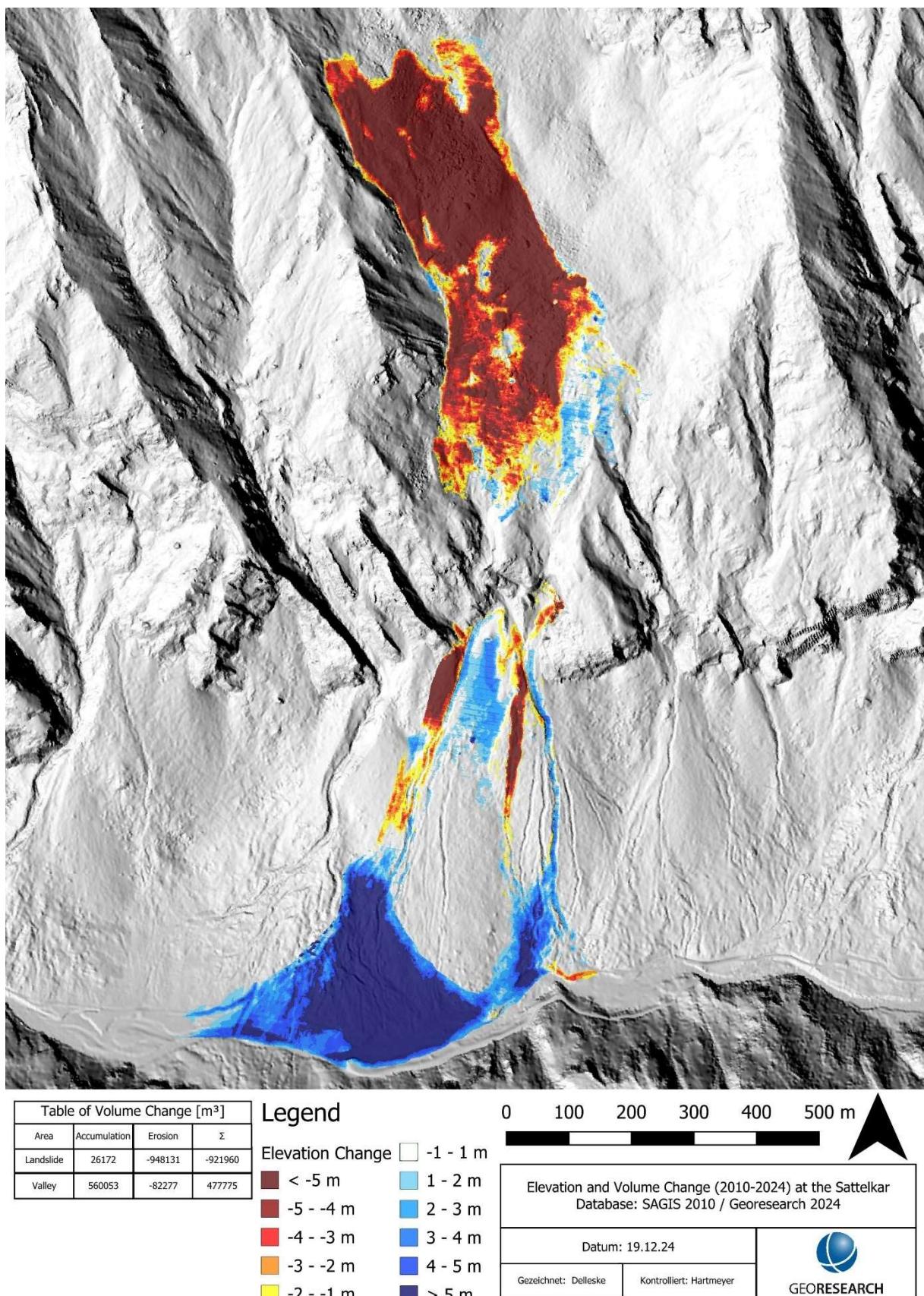


Abbildung 19: Höhen- und Volumenveränderung im Erosions- und Akkumulationsbereich der Sattelkar-Rutschung im Gesamtbeobachtungszeitraum rekonstruiert durch Datenvergleich zwischen Airborne-Laserscanning-Daten des Landes Salzburg 2010 und der aktuellsten GEORESEARCH-Befliegung am 31.10.2024).

3.3 Thermische Untergrundbedingungen

3.3.1 Untergrundtemperaturen

Die Untergrundtemperatur im Sattelkar wird mit hochpräzisen Miniaturloggern (Geoprecision M-Log 5W, Genauigkeit: $\pm 0.1^\circ\text{C}$) 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 20 zeigt die Lage der oberflächennahen Temperatursensoren im Sattelkar. Die Logger-Standorte #4 und #15 wurden durch die rückschreitende Erosion der Karfüllung erodiert (Loggerverlust). Die Standorte #13 und #9 wurden im Sommer 2017 – vermutlich durch Starkniederschlagsereignisse – freigelegt und direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Aus diesem Grund sind die an den Standorten #13 und #9 nachfolgend gemessenen Mittel- und Maximaltemperaturen als nicht repräsentativ einzustufen (Tabelle 8).

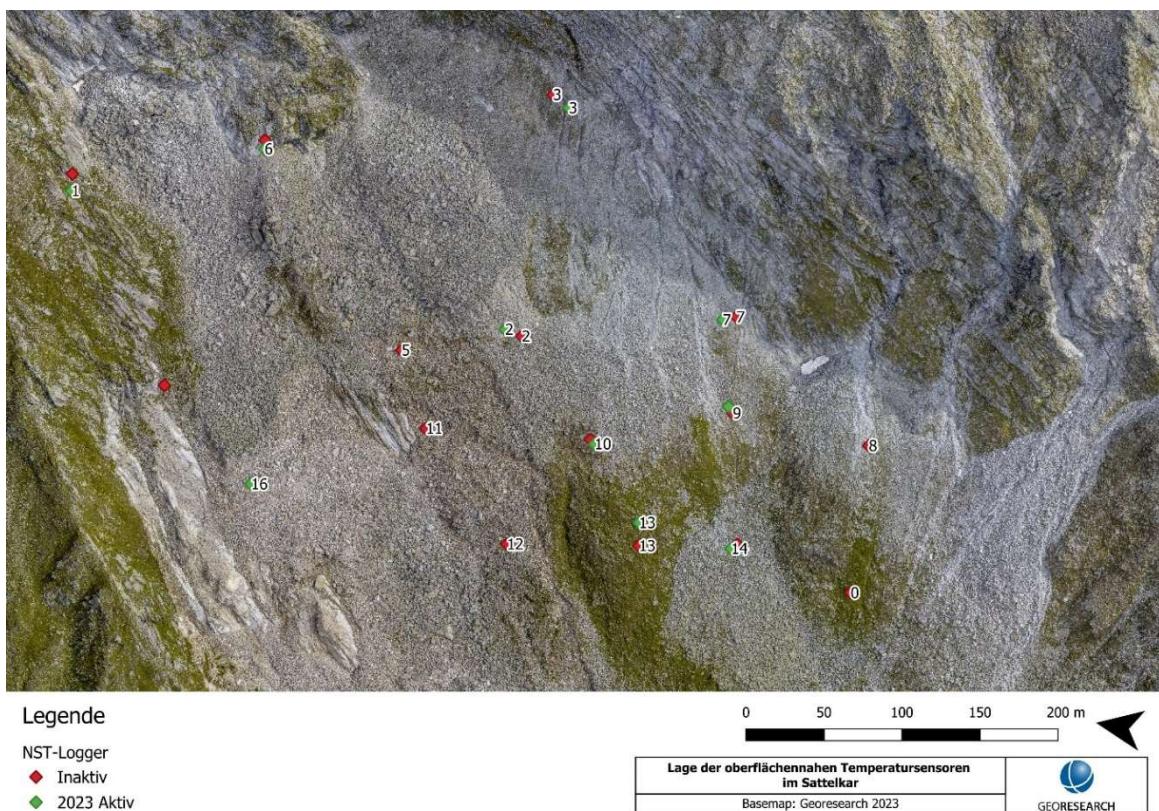


Abbildung 20: Lage der oberflächennahen Temperatursensoren Sattelkar.

Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse aller Untergrundtemperatur-Logger im Sattelkar im gesamten Beobachtungszeitraum (22.10.2015 bis 27.09.2023). Im Jahr 2024 konnten die Logger auf Grund eines akuten, neu aufgetretenen Steinschlagrisikos entlang des Sattelkarzustiegs nicht ausgelesen werden (siehe Kapitel 2.3).

Die gemessene Untergrundtemperatur der Logger #1-14 (Logger #4 und #15 lieferten keine Daten) lag über den gesamten Beobachtungszeitraum im Mittel bei $2,4^\circ\text{C}$. Trendanalysen (lineare Regression) zeigen dabei einen sehr hohen mittleren Temperaturanstieg von rund

+0,25 °C pro Jahr (+2,5 °C pro Jahrzehnt), der deutlich über dem Anstieg der mittleren Lufttemperatur im Sattelkar liegt (+0,08 °C pro Jahr; vergleiche Abbildung 14A). Das Sattelkar erwärmte sich in den letzten Jahren somit deutlich rascher als die oberflächennahe Atmosphäre (Abbildung 21). Die Ursachen für die beobachtete erhebliche Untergrunderwärmung im Sattelkar könnten in der überproportional starken Erwärmung der Sommermonate begründet sein (+0,11-0,12 °C pro Jahr; vergleiche Abbildung 14B) und potenziell durch lokale Schneedeckeneffekte und vermehrten Eintrag von warmem Niederschlagswasser weiter verstärkt werden.

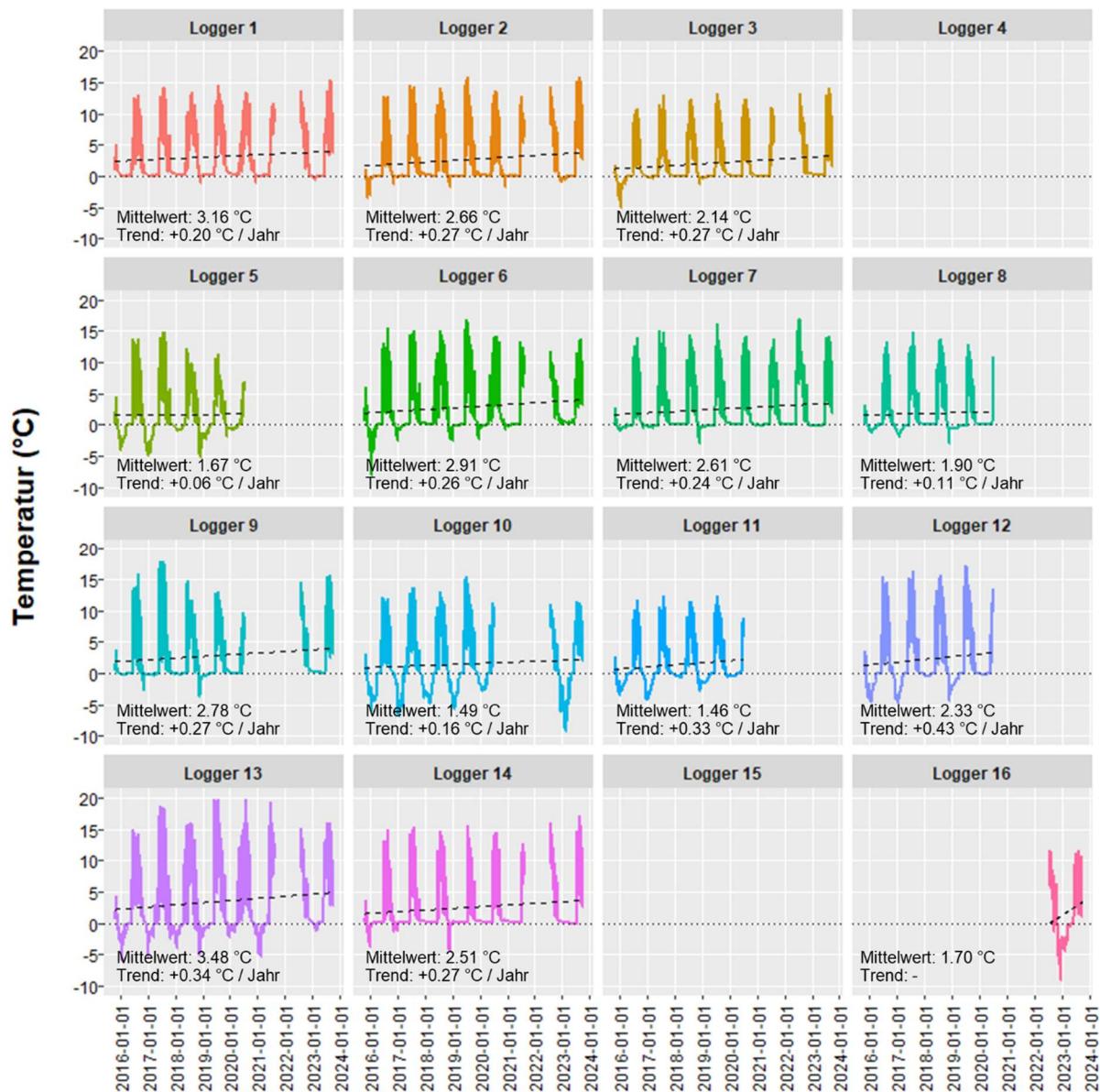


Abbildung 21: Untergrundtemperaturen im Sattelkar im gesamten Beobachtungszeitraum (22.10.2015 bis 27.09.2023). Die gemessenen Temperaturen zeigen eine auffallend starke trendhafte Zunahme von durchschnittlich +0,25 °C pro Jahr.

Trotz der rapiden Erwärmung der letzten Jahre bzw. Jahrzehnte weisen niedrige Winter-Untergrundtemperaturen 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

Tabelle 8: Temperaturdaten (Durchschnitt (MW), Minimum (MIN), Maximum (MAX), Winter (WIN)) aus dem Sattelkar für den Zeitraum 01.01.2016 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.

2016				2017				2018				2019				
MW	MIN	MAX	WIN	MW	MIN	MAX	WIN	MW	MIN	MAX	WIN	MW	MIN	MAX	WIN	
(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°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	^a 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
MW^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
2020				2021				2022								
MW	MIN	MAX	WIN	MW	MIN	MAX	WIN	MW	MIN	MAX	WIN	(°C)	(°C)	(°C)	(°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	^a 38,1	-0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
# 14	2,7	0,0	21,8	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MW^b	2,8	-0,8	19,2	-0,2	2,4	-0,1	19,3	-0,0	3,2	-0,1	24,4	0,1				

^a Standort mit starker direkter Strahlungsbeeinflussung

^b 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. 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.

niedrige Untergrundtemperaturen und dementsprechend auf eine hohe Permafrostwahrscheinlichkeit hin. So lag die Untergrundtemperatur 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 9 zeigt die oberflächennahen Untergrundtemperaturen aus dem Ofen- Mitter- und Steinkar für 2019/2020. In allen drei Karen ist mit letzten lokalen 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 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)
Ofenkar 1	1,9	-1,1	13,1	-0,1	1,8	-1,3	12,9	0,2
Ofenkar 2	1,4	-3,5	14,8	-0,4	1,6	-5,1	13,7	-0,1
Ofenkar 3	-0,1	-7,8	16,1	-5,4	0,7	-5,2	12,5	-2,3
Ofenkar 4	2,6	-2,8	23,1	-0,1	2,6	-1,3	17,0	-0,1
Ofenkar 5	1,6	-6,0	21,3	-1,2	1,5	-8,4	18,9	-0,2
Mitterkar 1	1,0	-4,6	15,6	-1,2	0,8	-6,0	15,7	-1,1
Mitterkar 2	2,0	-1,8	17,6	0,6	1,8	-2,1	15,8	0,2
Mitterkar 3	1,6	-1,6	21,7	0,1	-	-	-	-
Mitterkar 4	1,3	-1,2	13,5	-0,4	1,4	-0,5	13,4	0,0
Mitterkar 5	2,0	0,1	14,1	0,3	2,3	0,1	15,8	0,3
Steinkar 1	0,4	-7,5	11,9	-3,2	0,6	-6,7	10,4	-3,5
Steinkar 2	0,8	-1,9	10,8	-1,0	-	-	-	-
Steinkar 3	1,6	-0,6	11,2	-0,1	1,5	-0,3	10,3	-0,1
Steinkar 4	1,8	-0,1	9,7	0,3	2,1	-0,3	9,8	0,4
Steinkar 5	1,6	-0,3	10,9	-0,3	1,6	-0,6	10,2	-0,5
Mittelwert	1,4	-2,7	15,0	-0,8	1,6	-2,9	13,6	-0,5
Mittelwert Ofenkar	1,5	-4,2	17,7	-1,4	1,6	-4,3	15,0	-2,5
Mittelwert Mitterkar	1,6	-1,8	16,5	-0,2	1,6	-2,1	15,1	-0,1
Mittelwert Steinkar	1,2	-2,1	10,9	-0,9	1,4	-2,0	10,2	-0,9

3.3.2 Isotopenchemie

Im Bereich des **Sattelkars** konnten im Jahr 2024 auf Grund der erschwertes Zugänglichkeit (Steinschlagrisiko) keine weiteren Isotopenproben genommen werden. In den Vorjahren (2019–2023) wurden im Sattelkar insgesamt 76 Wasserproben entnommen und 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}O und ^{16}O lag im Mittel bei -88,4 ‰. Delta-Deuterium (δD , Verhältnis der stabilen Wasserstoff-Isotope ^2H und ^1H) 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 ($\delta^{18}\text{O}$, δD) sind konsistent mit regionalen Vergleichsstudien vom Kitzsteinhorn (Lechner 2015) und liegen auf der GMWL (Global Meteoric Water Line) nach Craig (1961) (Abbildung 22), was die grundsätzliche Plausibilität der Analyse-Ergebnisse demonstriert. 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 δD -Werte < -100 ‰ auf. Das isotopisch schwere Sommer-Niederschlagswasser weist prinzipiell deutlich höhere Werte auf und kann die niedrigen Analysewerte daher nicht erklären. Verzögerter Abfluss von winterlichem Niederschlagswasser (= Schneeschmelze) würde eine

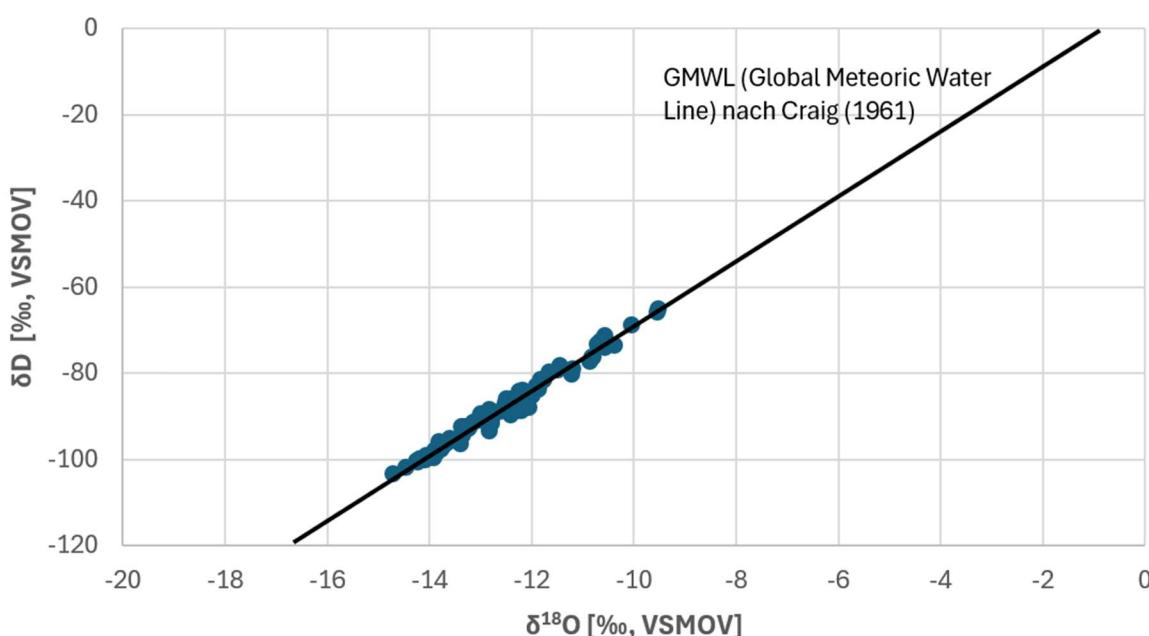


Abbildung 22: δD - vs. $\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm der Wasserproben ($n = 76$), die zwischen September 2019 und September 2023 im Sattelkar gesammelt wurden. Sämtliche Proben liegen auf der GMWL nach Craig (1961).

mögliche Erklärung für die niedrigen Messwerte liefern, dies scheint jedoch v.a. für die lange nach der Schneeschmelzperiode genommenen September-Proben (z.B. Probe 190903/0001, 04.09.2019: $\delta^{18}\text{O} = -14.72 \text{ ‰}$, $\delta\text{D} = -103.40 \text{ ‰}$, $T = 2.5 \text{ °C}$; Probe 190903/0003, 04.09.2019: $\delta^{18}\text{O} = -14.47 \text{ ‰}$, $\delta\text{D} = -101.86 \text{ ‰}$, $T = 3.1 \text{ °C}$) keine zutreffende Begründung zu sein.

Viel eher könnten die niedrigen Isotopenwerte der genannten Proben hingegen mit dem Abtauen von (alten) Permafrost-Vorkommen im Inneren der Sattelkar-Rutschung in Zusammenhang stehen. Der potenziell im Untergrund der Sattelkar-Sedimentfüllung 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}O) als das aktuelle Niederschlagswasser. Dementsprechend wären im Permafrost-Schmelzwasser vergleichsweise niedrige Deuterium- und ^{18}O -Konzentrationen (= stark negative Promille-Werte) zu erwarten, genau wie in den hier diskutierten Proben aus dem Sattelkar.

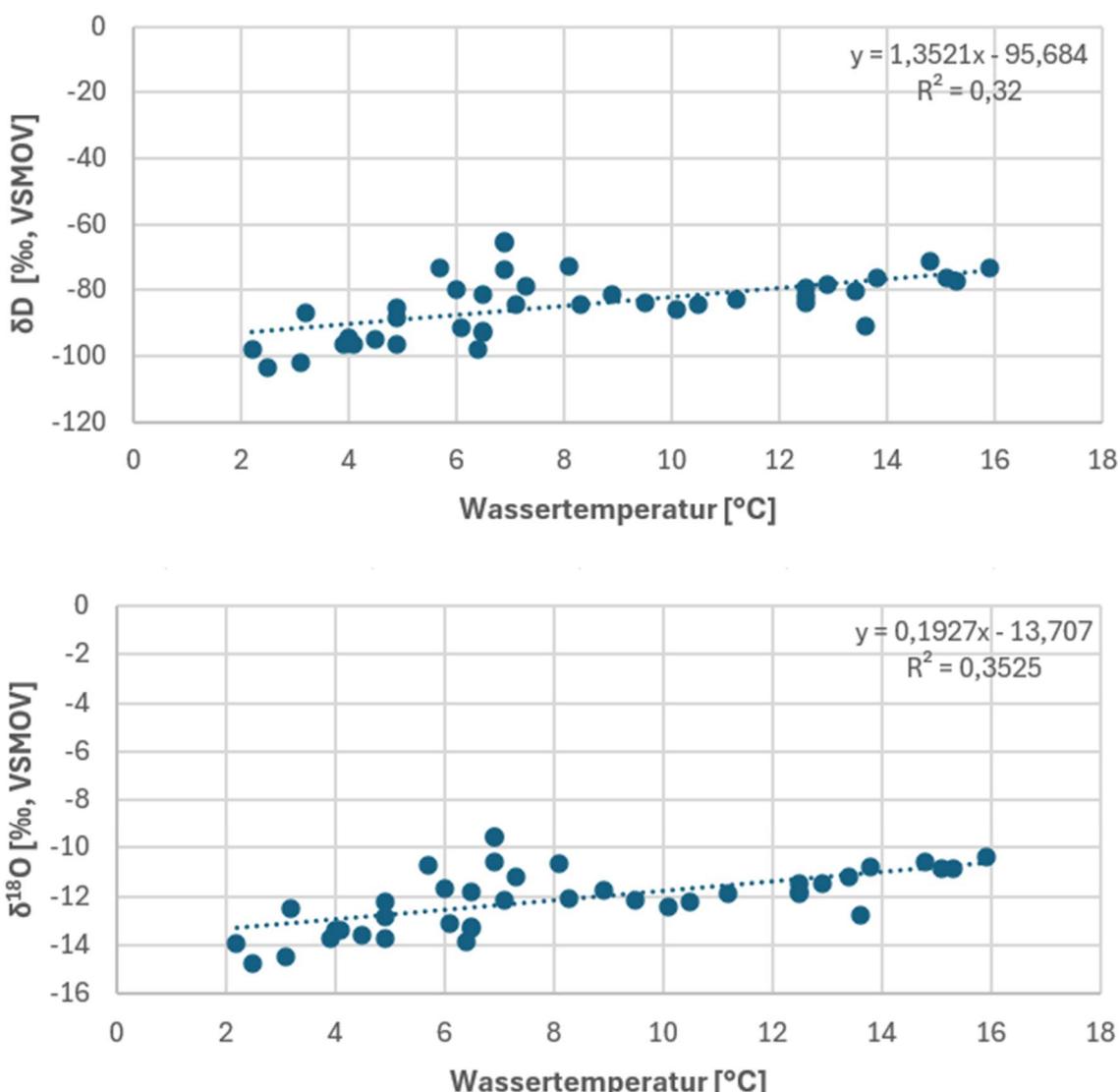


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Wassertemperatur zum Zeitpunkt der Probenahme und δD -Gehalt (oben) bzw. $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalt (unten). Um den Einfluss von Wässern aus der Schneeschmelze auszuschließen, wurden nur die im Monat September (04.09.2019, 08.09.2021, 27.09.2023) genommenen Wasserproben 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 abtauernder Permafrostlinsen zurückzuführen sein könnte.

Die vereinzelt auftretenden Wässer mit stark abgereichertem Isotopengehalt (wenig Deuterium, wenig ^{18}O) lassen somit auf das Vorliegen vereinzelter 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}O -Gehalt zeigt, wobei mit sinkender Wassertemperatur, eine Abnahme des Deuterium- bzw. ^{18}O -Gehalts zu beobachten ist (Abbildung 23). Kalte Wässer stammen demnach eher aus tauenden Permafrostkörpern und weisen folgerichtig eine starke Deuterium- bzw. ^{18}O -Abreicherung auf.

Die chronologische Auswertung der Isotopenauswertungen könnte bereits erste Hinweise auf ein komplettes Abtauen des Permafrosts im Sattelkar beinhalten (Abbildung 24, Abbildung 25). Während die im September 2019 und im Juli 2020 genommenen Proben noch zahlreiche Wässer mit sehr niedrigen Deuterium- und ^{18}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 Rahmen-

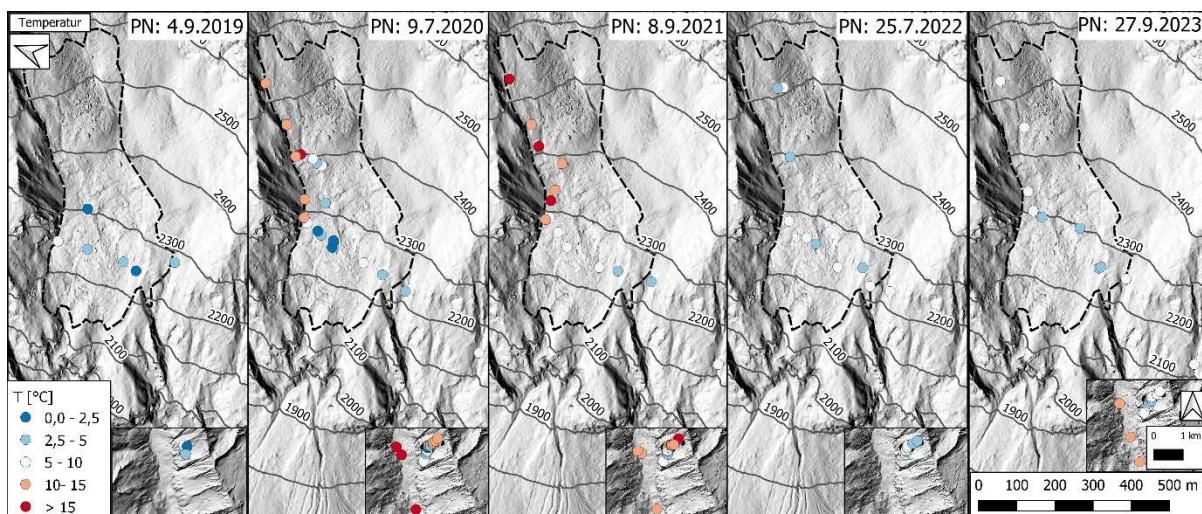


Abbildung 24: Bei der Probenahme gemessene Wassertemperatur.

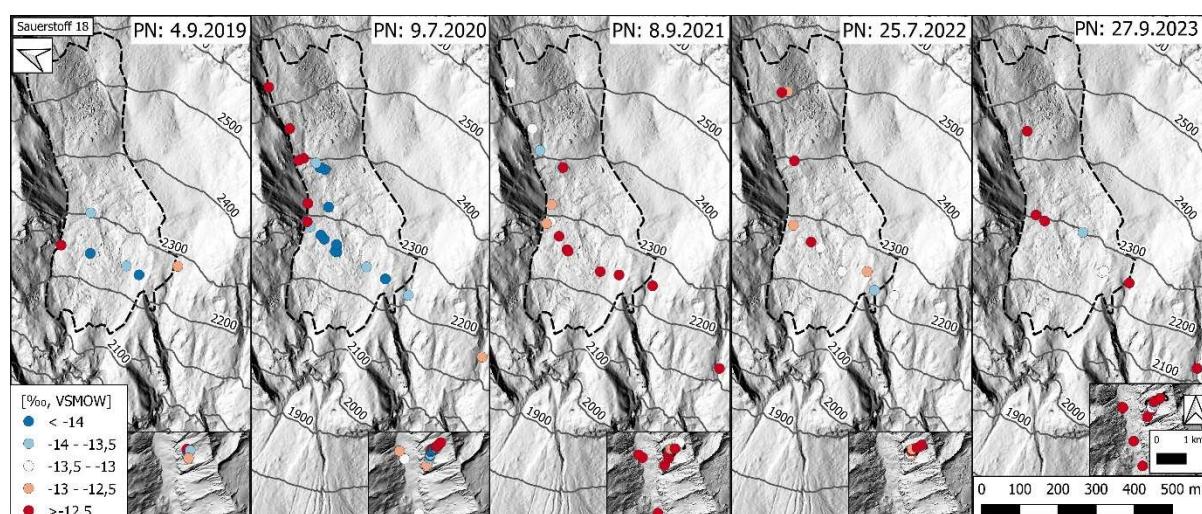


Abbildung 25: Abreicherung von ^{18}O (Sauerstoff-18) gegenüber VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Je geringer der Wert, desto weniger schwerer Sauerstoff (^{18}O) ist in der Probe enthalten.

bedingungen (z.B. langanhaltende Hitzewelle ohne Niederschlag) möglich ist. Weitere Isotopenbeprobungen des Sattelkars in den kommenden Projektjahren könnten hier wertvolle Aufschlüsse liefern.

Im Jahr 2024 wurde erstmals eine Isotopenbeprobung des **Steinkars** durchgeführt, wobei insgesamt acht Proben genommen wurden (Abbildung 26, Tabelle 10). Das Steinkar ist das südlichste und höchstgelegene der vier benachbarten Kare (Sattelkar, Ofenkar, Mitterkar, Steinkar). In der südlichen Hälfte des Steinkars befindet sich ein großer Blockgletscher, der einen markanten Zeiger für (vergangene) Permafrostbedingungen darstellt (Anm.: Blockgletscher entstehen durch die langfristige Kriechbewegung eines dauerhaften Schutt-Eis-Gemisches, das nur unter Permafrostbedingungen existieren kann).

Die Wassertemperatur am Quellaustritt unmittelbar unterhalb der Blockgletscherstirn betrug zum Zeitpunkt der Probenahme am 25.10.2024 nur 1.1 °C (Probe 01). Die niedrige Temperatur legt den Schluss nahe, dass es sich bei der genommenen Probe um kürzlich entstandenes Schmelzwasser handeln muss, da längere Fließstrecken zwischen Schmelzzeitpunkt und Probenahmezeitpunkt unweigerlich zu einer Erhöhung der Wassertemperatur beigetragen hätten. Auf Grund der schneefreien Bedingungen zum Zeitpunkt der Probenahme kann Schneeschmelze als Herkunftsart ausgeschlossen werden, wodurch die Schmelze von Untergrundeis aus dem Permafrostkörper des Blockgletschers als einzige plausible Erklärung verbleibt.

Die an der Blockgletscherstirn genommenen Wasserprobe weist einen Deuterium-Wert von -111.1 ‰ und einen ^{18}O -Wert von -15.51 ‰ auf. Es sind dies die mit Abstand niedrigsten („leichtesten“) Isotopenwerte unter allen im Sattel- und Steinkar genommenen Wasserproben. Dies liefert ein weiteres Indiz für die „Eisschmelz-Theorie“ und legt den Schluss nahe, dass es sich bei der entnommenen Wasserprobe – zumindest anteilig – um Schmelzwasser aus altem Permafrost-Eis handelt, das sich während kühler klimatischer Epochen bildete (= niedriger Anteil schwerer Isotope) und in der aktuellen Warmphase abtaut.

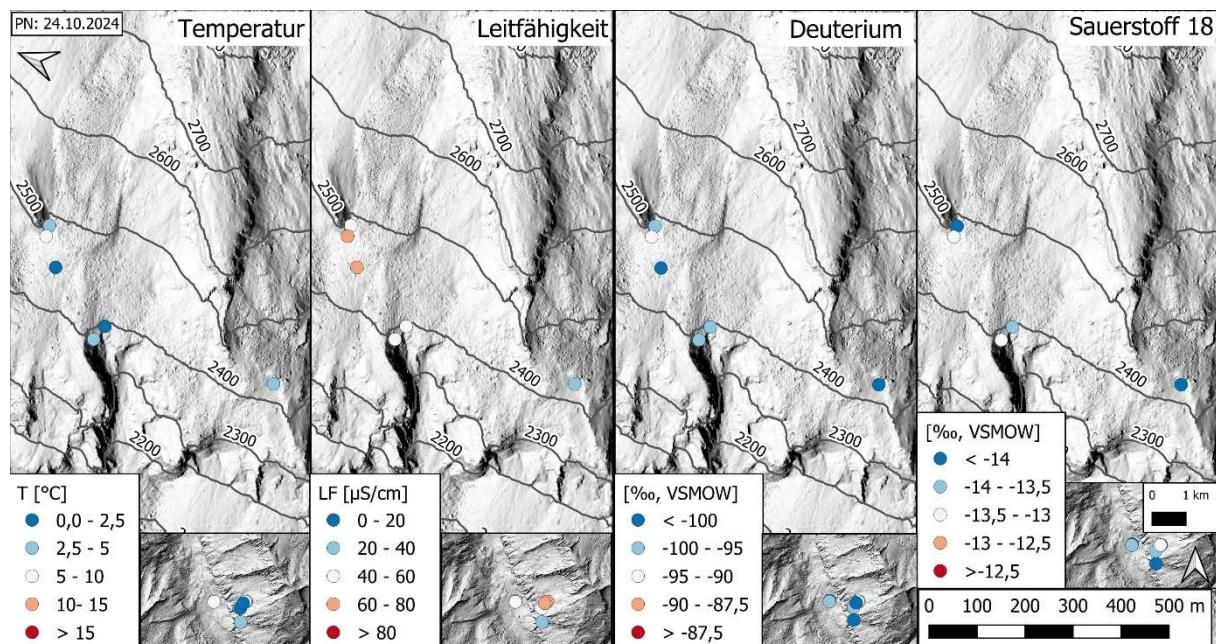


Abbildung 26: Ergebnisse der Wasserprobenahme im Steinkar am 25.10.2024.



Abbildung 27A: Blockgletscher im Steinkar (Drohnenaufnahme vom 31.10.2024). **B:** Wasserprobenahme unterhalb der Blockgletscherstirn am 25.10.2024.

Tabelle 10: Ergebnisse der Isotopenbeprobung des Steinkars am 25.10.2024.

Probenummer	Datum	Temperatur (°C)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
1	25.10.2024	1,1	-15,51	-111,1
2	25.10.2024	5,1	-13,38	-93,5
3	25.10.2024	3,4	-14,11	-97,9
4	25.10.2024	2,3	-13,91	-99,3
5	25.10.2024	2,7	-13,35	-95,7
6	25.10.2024	4,1	-14,93	-106,2
7	25.10.2024	6,4	-13,75	-96,5
8	25.10.2024	6,1	-14,06	-100,0

3.4 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen

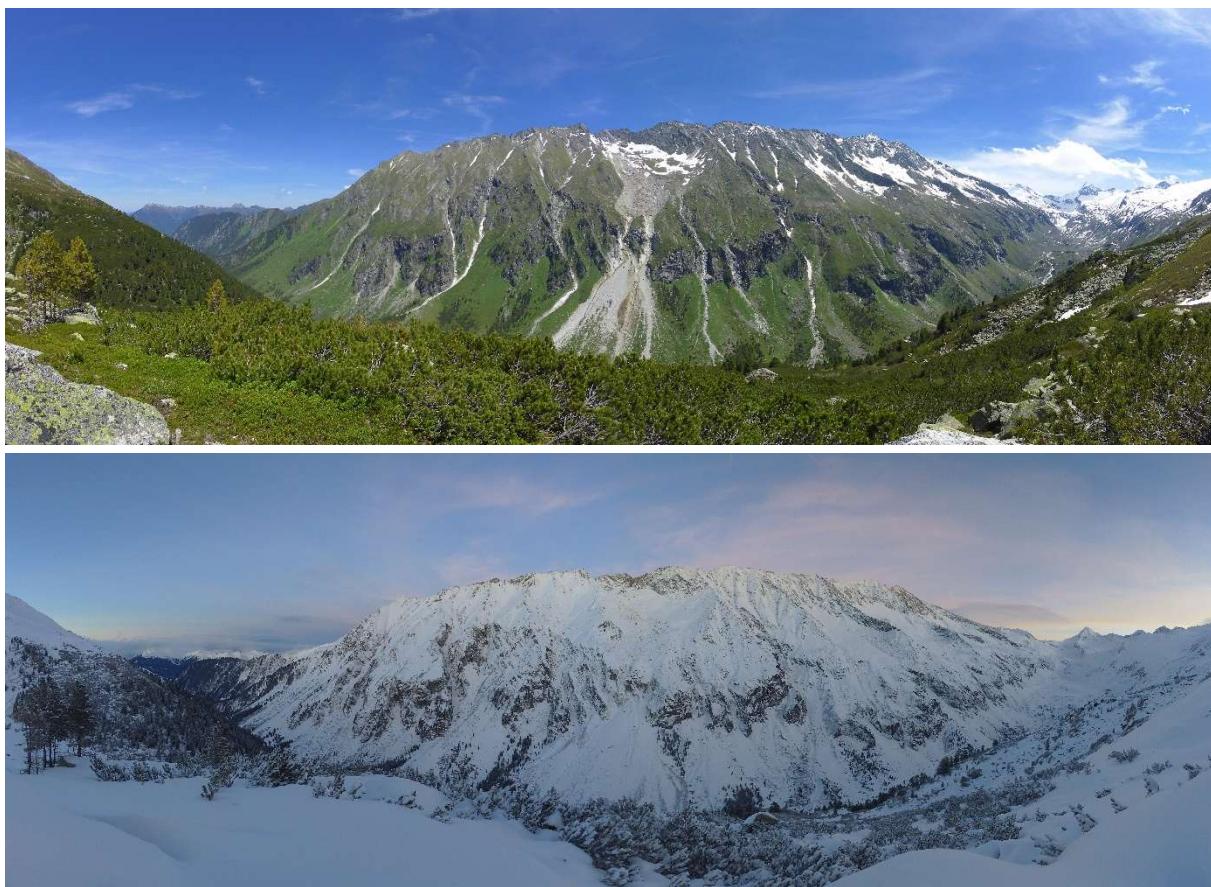


Abbildung 28: Sommeraufnahme (18.06.2024) und Winteraufnahme (15.12.2024) des automatischen Kamerasytems.

Im Jahr 2022 wurde oberhalb der Hofrat-Keller-Hütte eine vollautomatische, hochauflösende Webcam installiert. Das System wurde im Jahr 2023 gewartet und an die fordernden hochalpinen Umweltbedingungen angepasst. Am 03.04.2024 kam es in Folge von Speicherungsproblemen zu einem kurzfristigen Ausfall des Kamerasytems, das durch den Einsatz einer robusteren Speicherkarte gelöst wurde. Erforderliche Firmware-Updates wurden am 05.06.2024 und am 31.10.2024 durchgeführt.

Alle Daten werden auf eine KI-unterstützte Serverinfrastruktur übertragen und können unter dem folgenden Weblink abgerufen werden:

https://my.tikee.io/time_lapses/60569/photo_gallery/c5aefc55-7e72-44d0-8a94-d8512ed314a1

Das automatische Kamerasytem liefert kontinuierlich hochwertige Aufnahmen des Sattelkars und seiner Umgebung (Abbildung 28). Der multitemporale Vergleich von Bildern (Zeitscheibenvergleich) ermöglicht dabei eine qualitative Abschätzung der Massenbewegungsaktivität im Sattelkar und auf dem darunterliegenden Schuttkegel. Auf den nachfolgenden Bildpaaren werden exemplarisch Foto-Vergleiche für die Sommerperiode 2022 (Abbildung 29-Abbildung 31) und die Sommerperiode 2024 (Abbildung 32) dargestellt.



Abbildung 29: Vergleich der Webcam-Bilder zu Beginn und Ende der Sommerperiode 2024 (linkes Bild: 04.07.2024, rechtes Bild: 09.10.2024). Im linken Bild sind Blöcke sichtbar, die während der Sommerperiode bewegt/ausgetragen wurden und daher im rechten Bild nicht mehr sichtbar sind.



Abbildung 30: Vergleich der Webcam-Bilder zu Beginn und Ende der Sommerperiode 2024 (linkes Bild: Frühsommer 04.07.2024, rechtes Bild: Spätsommer 09.10.2024). In der rechten Aufnahme des Schuttfächers ist eine stärkere Auswaschung der Rinne erkennbar, einzelne Blöcke wurden weitertransportiert (siehe auch Detailausschnitt).



Abbildung 31: Detailausschnitt zu Abbildung 30.



Abbildung 32: Vergleich der Webcam-Bilder zu Beginn und Ende der Sommerperiode 2022 (linkes Bild: 19.07.2022, rechtes Bild: 08.10.2022). Veränderung der Lage von grobblockigem Material, rot markiert.

4. Schlussfolgerungen

Im Jahr 2005 führten sommerliche Starkniederschläge im unteren Drittel des Sattelkars zur Degradation der Vegetationsdecke und zu starker lokaler Erosion. Seitdem dokumentieren Luftbildanalysen, Zeugenberichte, Schadensereignisse und nicht zuletzt Messdaten zahlreiche Murereignisse und die Initiierung einer komplexen Großrutschung. Mittlerweile ist eine Fläche von rund 19 ha betroffen, das Gesamtvolumen der Rutschmasse liegt vermutlich im Bereich von etwa zwei Millionen m³. Allein seit dem Jahr 2010 (Datum der ersten 3D-Geländeerkundung) wurden mehr als 920.000 m³ Sediment aus dem Sattelkar ausgetragen. Davon wurden rund 560.000 m³ am Talboden akkumuliert, etwa 360.000 m³ wurden vom Obersulzbach aufgenommen und abtransportiert.

Die Bewegungsraten der Rutschmasse zeigten von 2005 bis 2022 einen signifikanten Beschleunigungstrend. Seit 2022 ist wiederum ein deutlicher Rückgang der Bewegungsraten zu beobachten. Potenzielle Ursachen dieser Abnahme könnten u.a. in abnehmendem Materialnachschub oder reduzierter Wasserverfügbarkeit begründet sein. Die beobachteten jährlichen Bewegungsraten sind in der unteren Karhälfte (bis zu 135 m pro Jahr) im Mittel drei bis vier Mal höher als in der oberen Hälfte (bis zu 35 m pro Jahr) und weisen darüber hinaus eine deutliche saisonale Differenzierung auf: Die sommerlichen Bewegungsraten (~ Juli bis September) sind im Schnitt drei Mal so hoch wie in der Periode Herbst bis Frühjahr (~ Oktober bis Juni).

Die Analyse der meteorologischen und hydrologischen Rahmenbedingungen der jüngeren Vergangenheit zeigt eine statistische Zunahme von Starkniederschlagsereignissen und Abflussspitzen sowie einen äußerst stark ausgeprägten Lufttemperaturanstieg. Diese Trends (erhöhte Wasserverfügbarkeit, zunehmende Temperaturen) begünstigen grundsätzlich die Mobilisierung von Sediment in hochalpinen Karen und tragen daher mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer allgemeinen Erhöhung großer Erosionsereignisse bei.

Ein direkter kausaler Zusammenhang zwischen der beobachteten Häufung von Starkniederschlagsereignissen und den hohen Bewegungsraten der letzten Jahre ist plausibel, könnte letztlich jedoch nur durch ein aufwändiges, zeitlich sehr hochauflöstes Bewegungsmonitoring und komplementären Niederschlagsmessungen geklärt werden. Generell ist festzuhalten, dass simple, monokausale Erklärungsansätze (z.B. „je stärker der Regen, desto schneller die Rutschung“) mit Sicherheit zu kurz greifen, da sie dem komplexen Bewegungsregime der Sattelkar-Rutschung nicht gerecht werden. Interne Faktoren wie unterirdische Wasserwegigkeit, Korngrößen Zusammensetzung, temporäre Wassersättigung, Materialerschöpfungseffekte, Kohäsionsunterschiede durch vorliegende Permafrostlinsen u.v.m. spielen hinsichtlich des Bewegungsverhaltens eine wesentliche Rolle und müssen bei Prognoseerstellungen 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 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 Ergebnisse von Isotopenbeprobungen aus dem Sattel- und Steinkar (sehr „leichte“ Schmelzwässer mit geringem Deuterium- bzw. Sauerstoff-18-Gehalt, die auf eine Entstehung unter kalten klimatischen Bedingungen hinweisen) auf sporadische und im Abtauen begriffene Permafrostvorkommen innerhalb der Sattelkar-Rutschmasse hin.

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

- Die Morphometrie (Form) des Kares begünstigt die Ablagerung (und Mobilisierung) großer Sedimentmengen.
- Durch die klimatische Erwärmung kommt es zu einer allgemeinen Abnahme der Untergrundfestigkeit durch Permafrostdegradation und verstärkten Wassereintrag.
- Ausgehend von der Karschwelle ist seit dem Jahr 2005 eine rapide rückschreitende Vergrößerung der aktiven Rutschmasse zu beobachten.
- Der Blockgletscher-ähnlichen Landform im oberen Bereich des Kares wurde durch rückschreitende Erosion das mechanische Widerlager entzogen, was zu einem stromartigen Zerfließen der Landform führte.
- Die entstandene unkonsolidierte Schuttoberfläche ist stark erosionsanfällig und reagiert hochsensibel auf intensiven Wassereintrag (Starkniederschläge, Schneeschmelze) – die Folge: hohe Bewegungsraten, die sich jedoch nicht in einer Zunahme großer Einzelereignisse manifestieren, sondern durch verstärkten, „kontinuierlichen“ Massenaustrag.

Die Nachbarkare Ofen- Mitter- und Steinkar zeigen momentan keine mit dem Sattelkar vergleichbaren Destabilisierungstendenzen. Die Morphometrien der Kare weisen jedoch große Ähnlichkeiten mit dem Sattelkar auf – 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

Im Jahr 2024 wurden wieder zahlreiche Tätigkeiten im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit wie auch Publikationen in peer-reviewed Journals durchgeführt, u.a.:

- Hartmeyer, I., Keuschnig M., Krautblatter, M.: Permafrost degradation in the Eastern Alps: Insights from three long-term monitoring sites in the Hohe Tauern Range, Salzburg, Austria. Proceedings 14th D-A-CH Permafrost Conference 2024. p 8, 2024
- Offer, M., Keuschnig, M., Weber, S., Hartmeyer I., Krautblatter, M.: Hydrothermal processes in steep rock wall permafrost. Proceedings 14th D-A-CH Permafrost Conference 2024. p 9, 2024
- Otto, J-C., Schroeckh T.R., Keuschnig, M.: [Assessing rock glacier activity in the Austrian Alps using radar interferometry and image correlation techniques](#). EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-13150, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-13150>, 2024.
- 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, 2024.

Referenzen

- Anker, Franz; Fegerl, Ludwig; Hübl, Johannes; Kaitna, Roland; Neumayer, Florian; Keuschnig, Markus (2016): Geschiebetransport in Gletscherbächen der Hohen Tauern: Beispiel Obersulzbach. In: *Wildbach- und Lawinenverbauung* 80, 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.
- Ghaemi, E.; Foelsche, U.; Kann, A.; Fuchsberger, J. (2021): Evaluation of Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) precipitation analysis using a dense rain-gauge network in southeastern Austria. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 25 (8), S. 4335–4356. DOI: 10.5194/hess-25-4335-2021.
- 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.
- 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.

IPCC; Masson-Delmotte, Valerie; Zhai, P.; Pörtner, Hans-Otto; Roberts, Debra; Skea, Jim et al. (2018): 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.

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, Marc; Formayer, Herbert; Gobiet, Andreas; Marke, Thomas; Schöner, Wolfgang; Revesz, Michael (2021): Past and future changes of the Austrian climate – Importance for tourism. In: *Journal of Outdoor Recreation and Tourism* 34, S. 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), S. 169–183.

Abbildungen

<i>Abbildung 1: Untersuchungsgebiet. Das Sattelkar ist geprägt von mächtigen Sedimentablagerungen aus den rundum aufragenden Granitgneiswänden und wurde intensiv glazial und periglazial geformt.</i>	7
<i>Abbildung 2: Mächtige Sedimentablagerungen und steil aufragende Granitgneiswände prägen das Sattelkar (09.07.2020).</i>	7
<i>Abbildung 3: Umriss der Blockgletscher-ähnlichen Landform im Sattelkar (16.07.2018).</i>	8
<i>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).</i>	8
<i>Abbildung 5: Stromartiges Abrutschen von Hangschutt und Felssturzablagerungen, Sattelkar (12.07.2018).</i>	9
<i>Abbildung 6: UAS-Aufnahme des Sattelkars (31.10.2024).</i>	9
<i>Abbildung 7: Datengrundlage (1 km²-Rasterzelle) der INCA-Analyse für das Sattelkar (Quelle: https://data.hub.geosphere.at/).</i>	13
<i>Abbildung 8: Installation von Boden-Kontrollpunkten (12.07.2018).</i>	15
<i>Abbildung 9: Wartung und Auslesen der Untergrundtemperaturen im Sattelkar (28.09.2023)</i>	17
<i>Abbildung 10: Kamerasystem zur Überwachung des Sattelkars (06.10.2022).</i>	20
<i>Abbildung 11: Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen größer als 20 mm (blau) bzw. 30 mm (rot) für (A) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009-2024) und (B) Sattelkar auf Basis von INCA-Wettermodell (2015-2024). Regressionsanalysen zeigen für Messdaten (Kürsinger Hütte) und Modelldaten (INCA) eine trendhafte Zunahme von Starkniederschlägen. Kürsinger Hütte: Das Jahr 2022 wurde auf Grund der geringen Betriebsdauer der Niederschlagsmessung aus der Trendanalyse ausgeschlossen.</i>	23
<i>Abbildung 12: Anzahl der Tage mit Spitzenabflüssen für (A) Pegel ‚Kees‘ (> 8m³) und (B) Pegel ‚Sulzau‘ (> 22 m³) für die Gesamtzeitreihe (schwarz) und für den Vergleichszeitraum der Niederschlagsmessung an der Kürsinger Hütte (rot).</i>	26
<i>Abbildung 13: Niederschlags- und Abflussverlauf 2014-2024. Rote Pfeile markieren das bis dato letzte große Murereignis am 30./31.07.2014.</i>	27
<i>Abbildung 14A: INCA-Monatsmittel der Lufttemperatur für das Sattelkar. B: Mittlere Sommer-Lufttemperatur (Mai-September) für Sattelkar (INCA) und Kürsinger Hütte (Messwerte). Die Trendanalyse zeigt eine deutliche Erwärmung, die im Sommer besonders stark ausgeprägt ist.</i>	28
<i>Abbildung 15: Flächenentwicklung der Sattelkar-Rutschung im Zeitraum 2003-2024 (siehe auch Abbildung 18).</i>	30
<i>Abbildung 16: Orthofotovergleich 2003-2024 (Quelle: SAGIS sowie UAV-Befliegungen GEORESEARCH). Das Orthofoto des Jahres 2003 zeigt das Sattelkar vor Initiierung der Massenbewegung. Im Jahr 2007 ist im unteren Abschnitt des Kares, der durch Starkniederschläge des Jahres 2005 initiierte Anrißbereich ersichtlich (siehe „A“). Auf den Orthotos der Folgejahre (2012-2024) ist die rapide, rückwärts verlaufende Vergrößerung der Sattelkar-Rutschung deutlich zu erkennen.</i>	31
<i>Abbildung 17: Bewegungsraten der Sattelkar-Rutschung von 2003-2024 – gemessen mittels optischer Verfolgung von Einzelblöcken (Feature Tracking). Von der Initiierung im Jahr 2005 bis in den Sommer 2022 ist eine kontinuierliche Geschwindigkeitszunahme zu beobachten, die sich in den letzten zwei Jahren (2022-2024) in eine Verlangsamung umkehrt (siehe A und D). Die Bewegungsraten im Sommer sind etwa drei Mal höher als im Rest des Jahres.</i>	32
<i>Abbildung 18: Höhen- und Volumenveränderung im Erosions- und Akkumulationsbereich der Sattelkar-Rutschung im aktuellen Jahr (Sommer 2023 bis Sommer 2024).</i>	33
<i>Abbildung 19: Höhen- und Volumenveränderung im Erosions- und Akkumulationsbereich der Sattelkar-Rutschung im Gesamtbeobachtungszeitraum rekonstruiert durch Datenvergleich zwischen Airborne-Laserscanning-Daten des Landes Salzburg 2010 und der aktuellsten GEORESEARCH-Befliegung am 31.10.2024).</i>	34
<i>Abbildung 20: Lage der oberflächennahen Temperatursensoren Sattelkar.</i>	35
<i>Abbildung 21: 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.</i>	36

Abbildung 22: δD - 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).

39

Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Wassertemperatur zum Zeitpunkt der Probenahme und δD -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 Schmelzwässer abtäuender Permafrostlinsen zurückzuführen sein könnte.

40

Abbildung 24: Bei der Probenahme gemessene Wassertemperatur.

41

Abbildung 25: 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.

41

Abbildung 26: Ergebnisse der Wasserprobenahme im Steinkar am 25.10.2024.

42

Abbildung 27A: Blockgletscher im Steinkar (Drohnenaufnahme vom 31.10.2024). B: Wasserprobenahme unterhalb der Blockgletscherstirn am 25.10.2024.

43

Abbildung 28: Sommeraufnahme (18.06.2024) und Winteraufnahme (15.12.2024) des automatischen Kamerasystems.

44

Abbildung 29: Vergleich der Webcam-Bilder zu Beginn und Ende der Sommerperiode 2024 (linkes Bild: 04.07.2024, rechtes Bild: 09.10.2024). Im linken Bild sind Blöcke sichtbar, die während der Sommerperiode bewegt/ausgetragen wurden und daher im rechten Bild nicht mehr sichtbar sind.

45

Abbildung 30: Vergleich der Webcam-Bilder zu Beginn und Ende der Sommerperiode 2024 (linkes Bild: Frühsommer 04.07.2024, rechtes Bild: Spätsommer 09.10.2024). In der rechten Aufnahme des Schuttfächers ist eine stärkere Auswaschung der Rinne erkennbar, einzelne Blöcke wurden weitertransportiert (siehe auch Detailausschnitt).

45

Abbildung 31: Detailausschnitt zu Abbildung 30.

45

Abbildung 32: Vergleich der Webcam-Bilder zu Beginn und Ende der Sommerperiode 2022 (linkes Bild: 19.07.2022, rechtes Bild: 08.10.2022). Veränderung der Lage von grobblockigem Material, rot markiert.

46

Tabellen

<i>Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Befliegungen im gesamten Untersuchungszeitraum 2018-2024. An den mit * markierten Daten konnten die Befliegungen aufgrund schlechter Witterungsverhältnisse nicht an einem Tag durchgeführt werden.</i>	16
<i>Tabelle 2: Übersicht der im Sattelkar ausgelegten Temperaturlogger. x = ausgelesen, * = ersetzt durch einen neuen Logger.</i>	18
<i>Tabelle 3: Übersicht der entnommenen Wasserproben zur Bestimmung der Temperatur, Leitfähigkeit und Isotopenverhältnisse der Parameter Deuterium, Sauerstoff-18 und Sauerstoff-17.</i>	19
<i>Tabelle 4: Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen größer als 20, 30, 40 und 50 mm an der Wetterstation Kürsinger Hütte („KH“) und auf Basis des INCA-Wettermodells („INCA“). Die NS-Station an der Kürsinger Hütte war im Jahr 2024 190 Tage in Betrieb (20.05.-25.11.2024). In den Vorjahren war die Station typischerweise 150-200 Tage in Betrieb. Eine Ausnahme bildet das Jahr 2022, in dem die Niederschlagsmessung nur 82 Tage lang aktiv war. INCA-Niederschlagsdaten älter als 2015 zeigen eine signifikante Überschätzungstendenz und werden aus diesem Grund nicht verwendet.</i>	22
<i>Tabelle 5: Die zehn höchsten Niederschlags-Tagessummen für (a) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009-2024) (linke Tabellenhälfte) und (b) Sattelkar auf Basis des INCA-Modells (2015-2024) (rechte Tabellenhälfte). Korrespondierende Wertepaare sind farblich hervorgehoben.</i>	24
<i>Tabelle 6: Die zehn höchsten Niederschlags-Stundensummen für (a) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009-2024) (linke Tabellenhälfte) und (b) Sattelkar auf Basis des INCA-Modells (2015-2024) (rechte Tabellenhälfte). Korrespondierende Wertepaare sind farblich hervorgehoben.</i>	24
<i>Tabelle 7: Die zehn höchsten Abfluss-Tagesmittelwerte für (a) Pegelmessstelle „Kees“ und (b) Pegelmessstelle „Sulzau“ in der Beobachtungsperiode 2009-2024 (absteigend gereiht).</i>	25
<i>Tabelle 8: Temperaturdaten (Durchschnitt (MW), Minimum (MIN), Maximum (MAX), Winter (WIN)) aus dem Sattelkar für den Zeitraum 01.01.2016 bis 31.12.2022. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.). Im Jahr 2021 fielen 13 Logger aus – Ausfallsache ist vermutlich niedrige Batteriespannung nach rund fünf Jahren Laufzeit. Im Jahr 2022 wurden zehn neue Temperaturlogger ausgelegt.</i>	37
<i>Tabelle 9: 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>	38
<i>Tabelle 10: Ergebnisse der Isotopenbeprobung des Steinkars am 25.10.2024.</i>	43