

Klimasensitive, hochalpine Kare: Langzeitmonitoring Sattelkar

Zwischenbericht 2025

Mit Unterstützung von Land und Europäischer Union



WIR leben Land
Gemeinsame Agrarpolitik Österreich



Impressum

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

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

Fördergeber:



Mit Unterstützung von Land und Europäischer Union



Projektname: Langzeitmonitoring Sattelkar

Version: 1.0

Datum: 09.02.2026

Titelbild: Webcam-Monitoring der Sattelkar-Rutschung (01.10.2025)

Zusammenfassung

Seit der vorindustriellen Periode (1850-1900) ist die Temperatur in Österreich (ca. +2 °C) doppelt so stark gestiegen wie im globalen Mittel. Diese überdurchschnittliche Erwärmung führte zu einem signifikanten Gletscher- und Permafrostrückgang und zu intensiven geomorphologischen Veränderungen in hochalpinen Regionen. Das Forschungsprojekt *Klimasensitive, hochalpine Kare: Langzeitmonitoring Sattelkar* untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf das Sattelkar (2130-2730 m üNN) im Obersulzbachtal (Hohe Tauern, Salzburg), in dem seit rund 20 Jahren eine signifikante Intensivierung der Massenverlagerungsprozesse zu beobachten ist.

Ursprünglicher Auslöser der Rutschung waren Starkniederschläge im Jahr 2005, die zu starker lokaler Erosion und einer Degradation der Vegetationsdecke im unteren Karbereich führten. Durch rückschreitende Erosion wurden in den Folgejahren auch die mittleren und oberen Bereiche der Karfüllung inklusive des lokalen Blockgletschers erfasst. Zur systematischen Erfassung der weiteren Entwicklung wurde ein umfassendes Monitoring etabliert, das sowohl die meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen als auch Oberflächen- und Untergrundveränderungen erfasst. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Meteorologische und hydrologische Bedingungen: Die statistische Analyse von Wetterstations-, Pegel- und Wettermodelldaten (INCA) zeigt für Sattelkar und Obersulzbachtal eine Zunahme von Starkniederschlägen und Abflussspitzen sowie einen stark ausgeprägten Lufttemperaturanstieg. Diese Trends (erhöhte Wasserverfügbarkeit, zunehmende Temperaturen) begünstigen die Sedimentmobilisierung in hochalpinen Karen wie dem Sattelkar und erhöhen die Wahrscheinlichkeit großer Murgänge und Rutschungen.

Oberflächenveränderungen: Seit 2005 wurden knapp 1 Mio. m³ Sediment aus dem Kar ausgetragen. Davon wurden knapp 600.000 m³ am Talboden abgelagert, während etwa 400.000 m³ über den Obersulzbach aus dem System ausgetragen wurden. Die Fläche der Rutschung betrug im Jahr 2025 rund 19 ha (= 27 Fußballfelder). Die mittleren jährlichen Bewegungsraten sind in der unteren Hälfte des Sattelkars mit etwa 22 m pro Jahr mehr als dreimal so hoch wie im oberen Karbereich (rund 7 m pro Jahr). Zudem zeigen die Bewegungsraten eine ausgeprägte saisonale Differenzierung: Während der Sommermonate liegen sie im Mittel etwa drei Mal höher als im restlichen Jahr, was auf eine starke hydraulische Kontrolle der Sattelkar-Rutschung hindeutet. Im Zeitraum 2005-2021 ist ein signifikanter allgemeiner Beschleunigungstrend erkennbar; seither gehen die Bewegungsraten deutlich zurück.

Thermische Untergrundbedingungen: Die in 10 cm Tiefe gemessenen Untergrundtemperaturen liegen im Mittel bei etwa 2,5 °C. Trendanalysen für den Zeitraum 2016–2025 zeigen einen ausgeprägten Temperaturanstieg von rund +0,1 °C pro Jahr. Hydrochemische Analysen von Wasserproben aus dem Sattelkar und dem Steinkar aus den Vorjahren weisen vereinzelt isotopisch „leichte“ Signaturen (niedrige δD- und δ¹⁸O-Werte) auf, die auf einen möglichen Beitrag von abtauenden Permafrostlinsen hindeuten. Die Isotopenbeprobungen im Oktober 2025 weisen im Sattelkar und Steinkar isotopisch schwere

Signaturen auf und enthalten keine Hinweise auf einen Beitrag von Permafrost-Schmelzwässern.

Summary

Since the pre-industrial reference period (1850–1900), air temperatures in Austria have increased by approximately +2 °C, corresponding to roughly twice the global average warming. This above-average temperature rise has led to a pronounced retreat of glaciers and permafrost as well as to intense geomorphic adjustment in high-alpine environments. The research project *Climate-sensitive high-alpine cirques: Long-term monitoring of the Sattelkar* investigates the impacts of climate change on the Sattelkar (2130–2730 m a.s.l.) in the Obersulzbachtal (Hohe Tauern, Salzburg), where a significant intensification of mass-movement processes has been observed for approximately two decades.

The initial trigger of the landslide was a series of intense rainfall events in 2005, which caused strong local erosion and degradation of the vegetation cover in the lower part of the cirque. In the subsequent years, retrogressive erosion progressively affected the central and upper parts of the cirque fill, including the local rock glacier. To systematically document the further evolution of the system, a comprehensive monitoring program was established, encompassing meteorological and hydrological boundary conditions as well as surface and subsurface changes. The main results can be summarized as follows:

Meteorological and hydrological conditions: Statistical analyses of weather station data, discharge records, and meteorological model output (INCA) indicate an increase in the frequency of intense precipitation events and peak discharges, along with a pronounced rise in air temperature in the Sattelkar and the Obersulzbachtal. These trends—characterized by increased water availability and rising temperatures—favour sediment mobilisation in high-alpine cirques such as the Sattelkar and increase the likelihood of large debris flows and landslides.

Surface changes: Since 2005, nearly 1 million m³ of sediment have been mobilized from the cirque. Of this volume, approximately 600,000 m³ were deposited on the valley floor, while about 400,000 m³ were transported out of the system by the Obersulzbach. In 2025, the affected landslide area covered roughly 19 ha (equivalent to about 27 football fields). Mean annual displacement rates in the lower half of the Sattelkar, averaging about 22 m yr⁻¹, are more than three times higher than those observed in the upper cirque area (approximately 7 m yr⁻¹). In addition, the displacement rates show a pronounced seasonal differentiation: during the summer months, mean movement rates are approximately three times higher than during the remainder of the year, indicating a strong hydraulic control of the Sattelkar landslide. A significant overall acceleration trend was observed between 2005 and 2021; since then, movement rates have decreased markedly.

Thermal subsurface conditions: Mean subsurface temperatures measured at a depth of 10 cm are approximately 2.5 °C. Trend analyses for the period 2016–2025 reveal a pronounced temperature increase of around +0.1 °C per year. Hydrochemical analyses of water samples from the Sattelkar and the Steinkar occasionally show isotopically “light” signatures (low δD and δ¹⁸O values), which may indicate a contribution from thawing permafrost lenses. However, isotope sampling conducted in October 2025 in both the Sattelkar and the Steinkar yielded isotopically heavy signatures and provided no evidence for a contribution from permafrost meltwater.

Inhalt

Impressum	2
Zusammenfassung	3
Summary	5
Inhalt	6
1. Einleitung	7
1.1 Kare im Klimawandel	7
1.2 Das Sattelkar und seine Nachbarkare	8
1.3 Ziele und wissenschaftliche Fragestellungen	12
2. Monitoringkonzept	13
2.1 Meteorologische und hydrologische Bedingungen	14
2.2 Oberflächenveränderungen	16
2.2.1 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen	17
2.3 Thermische Untergrundbedingungen	19
2.3.1 Untergrundtemperaturen	19
2.3.2 Isotopenchemie	21
3. Ergebnisse und Interpretationen	22
3.1 Meteorologische und hydrologische Bedingungen	22
3.1.1 Niederschlag	22
3.1.2 Abfluss	27
3.1.3 Lufttemperatur	30
3.2 Oberflächenveränderungen	32
3.2.1 Flächenentwicklung	34
3.2.2 Bewegungsraten	34
3.2.3 Volumenänderungen	36
3.2.4 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen	40
3.3 Thermische Untergrundbedingungen	44
3.3.1 Untergrundtemperaturen	44
3.3.2 Isotopenchemie	48
4. Schlussfolgerungen	54
Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit	56
Referenzen	57
Abbildungen	59
Tabellen	61

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). 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.

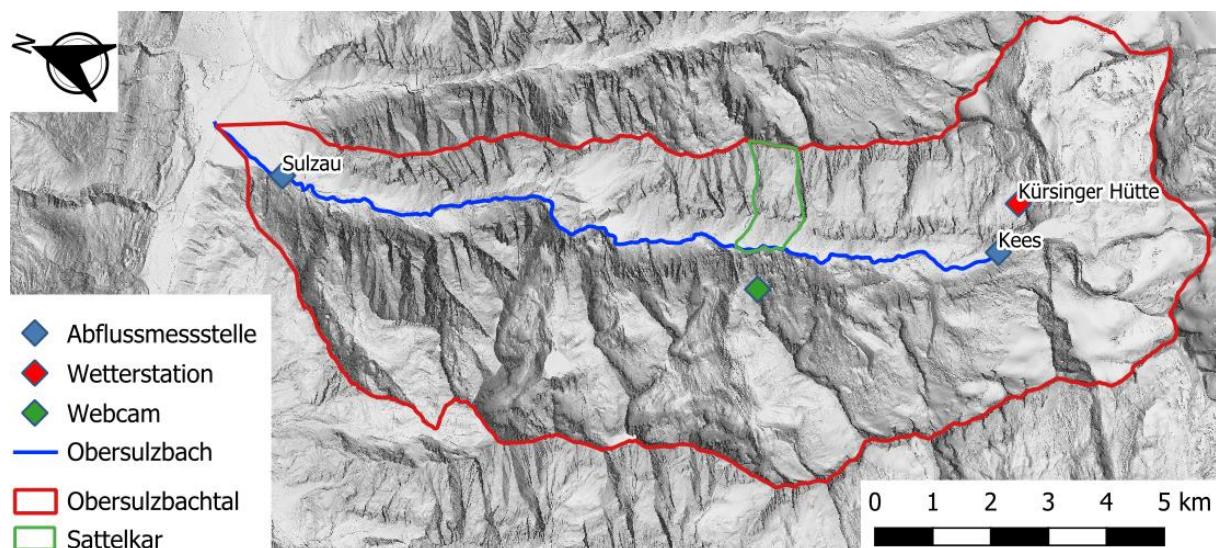


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet. Das Sattelkar ist geprägt von mächtigen Sedimentablagerungen aus den rundum aufragenden Granitgneiswänden und wurde intensiv glazial und periglazial geformt.



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).

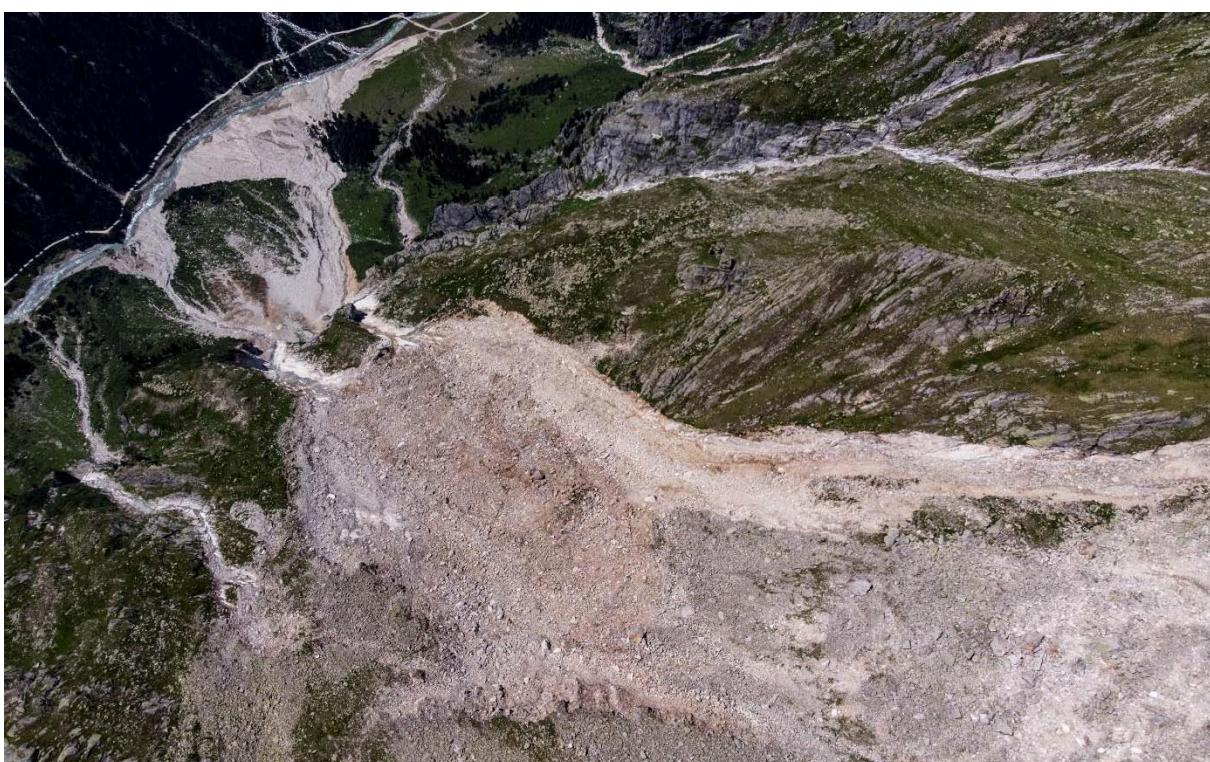


Abbildung 4: Unterer Bereich des Sattelkars. Deutlich zu sehen ist die scharfe, durch Vegetationsbewuchs gekennzeichnete Grenze zwischen aktiven und inaktiven Bereichen an der orographisch rechten (nördlichen) Seite der Rutschung (25.07.2019).

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).

Geländeanalysen zeigen, dass eine tiefgreifende, rückschreitende Bewegung der Schuttfüllung des Kares in Gang gesetzt wurde. Als Hauptverursacher werden sommerliche



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

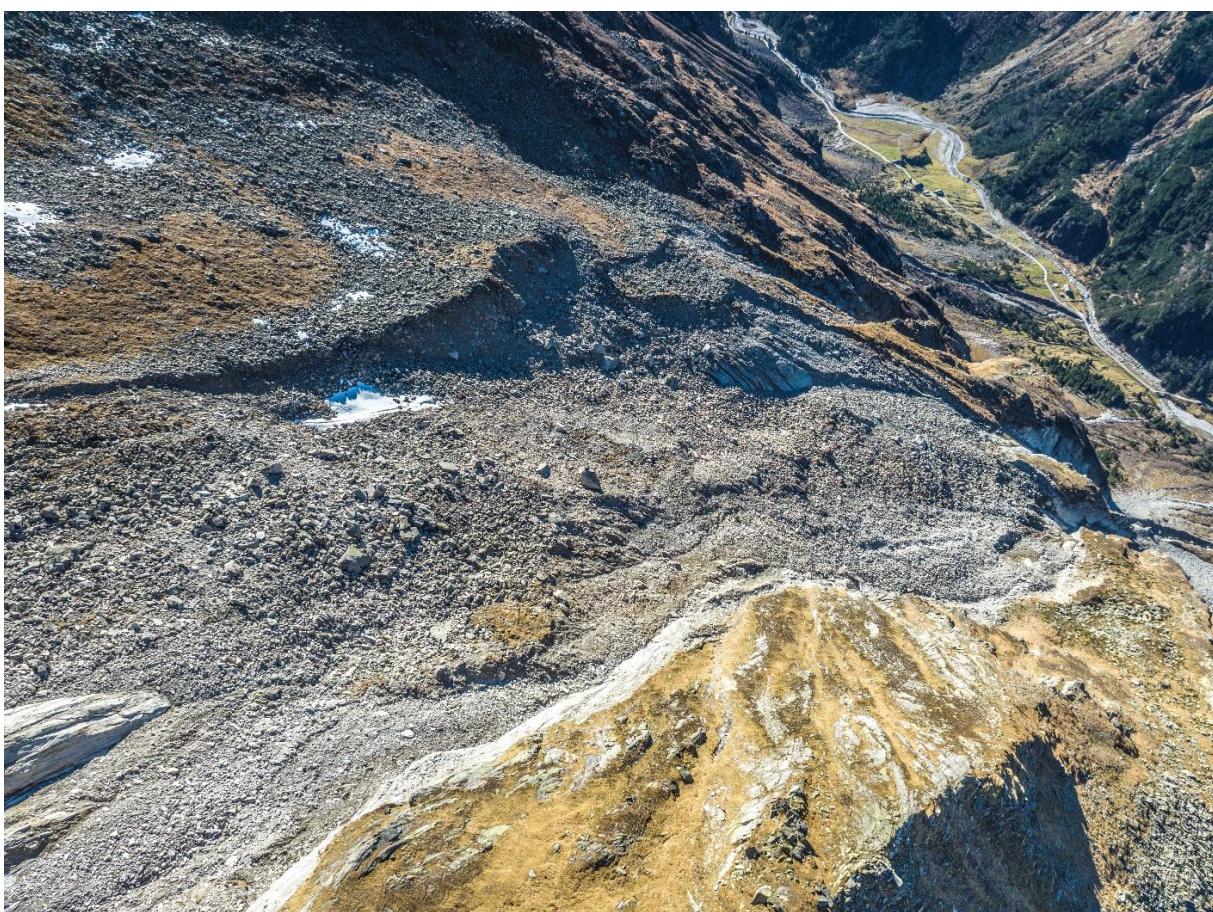


Abbildung 6: UAS-Aufnahme des Sattelkars (31.10.2024).

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?

Monitoringkonzept

Für die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Oberfläche und oberflächennahem Untergrund wurde ein systemisches Monitoringkonzept umgesetzt. Dieses basiert auf drei Überwachungsdomänen: (i) Meteorologische und hydrologische Bedingungen, (ii) Oberflächenveränderungen (inkl. Ereignisdokumentation von Massenbewegungen), sowie (iii) Thermische Untergrundbedingungen. 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 für das Sattelkar und ausgewählte Referenzkare.
- **Domäne 2: Überwachung der Oberflächenbedingungen, Bewegungsmuster und -raten:**
 - Jährliche Photogrammetrie-Befliegungen des Sattelkars mit UAV (Unmanned Aerial Systems) zur Analyse von Oberflächenveränderungen (Flächen- und Volumenänderungen), Bewegungs- und Erosionsraten.
 - Analyse bestehender digitaler Oberflächenmodelle der amtlichen Laserscan-Befliegungen (ALS) des Landes Salzburg.
 - Permanent installiertes Kamerasystem zur visuellen Überwachung der Massenbewegungsaktivität (Ereignisdokumentation von Muren, Hangrutschungen und Steinschlägen).
- **Domäne 3: Überwachung der thermischen Untergrundbedingungen**
 - Oberflächennahe Temperatursensoren zur Erfassung der Untergrundtemperaturen (Permafrost) und Schneebedeckung.
 - Isotopenchemische Wasseranalysen zur Identifizierung von Schmelzwässern aus Permafrost-Bereichen im Sattelkar und im Steinkar.

1.4 Meteorologische und hydrologische Bedingungen

Für die Überwachung der atmosphärischen Bedingungen werden Daten der vom Landeshydrographischen Dienst Salzburg betriebenen Wetterstation an der Kürsinger Hütte (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 wie bereits im letzten Zwischenbericht die Niederschlagsdaten (und Lufttemperaturdaten) des Nowcasting-Modells INCA (INtegrated nowcasting through Comprehensive Analysis) der GeoSphere Austria integriert, um ganzjährig repräsentative Daten der Region verfügbar zu machen. 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 7).

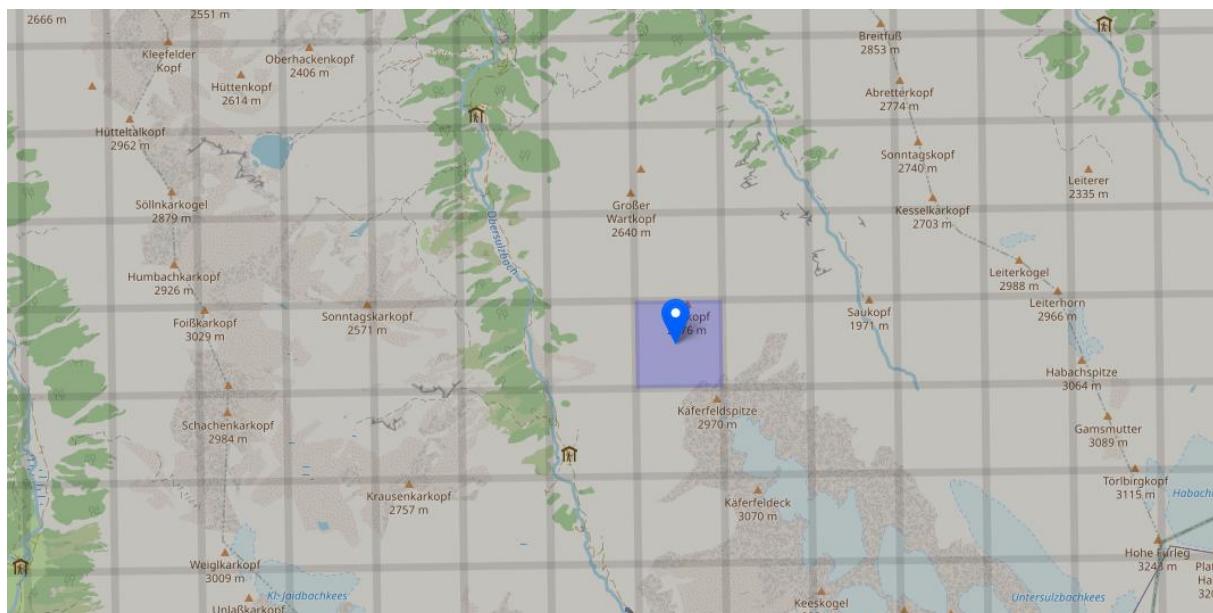


Abbildung 7: Datengrundlage (1 km²-Rasterzelle) der INCA-Analyse für das Sattelkar (Quelle: <https://data.hub.geosphere.at/>).

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

Im Rahmen des INCA-Modells werden Wettervorhersagemodele (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.

Ergänzend zu den INCA-Niederschlagsdaten des Sattelkars wurden im Rahmen des Projekts erstmals auch INCA-Daten weiterer hochalpiner Kare mit ausgeprägter Massenbewegungsaktivität herangezogen und mit dem Sattelkar verglichen. Ziel dieses vergleichenden Ansatzes ist es, die meteorologischen Rahmenbedingungen des Sattelkars in einen regionalen Kontext einzuordnen, ein breiteres Prozessverständnis zu entwickeln und die Repräsentativität der Beobachtungen zu beurteilen.

Als Referenzstandorte wurden das Pilatuskar im Rauriser Tal (nahe Kolm-Saigurn) (siehe Abbildung 8) sowie das Tischlerkar im Kötschachtal (nahe Bad Gastein) ausgewählt. Beide Kare weisen in den vergangenen Jahren eine hohe Dynamik von Massenverlagerungsprozessen sowie einen ausgeprägten Sedimentaustrag auf und eignen sich daher besonders als Vergleichsgebiete.

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 und des Venedigerkees 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.

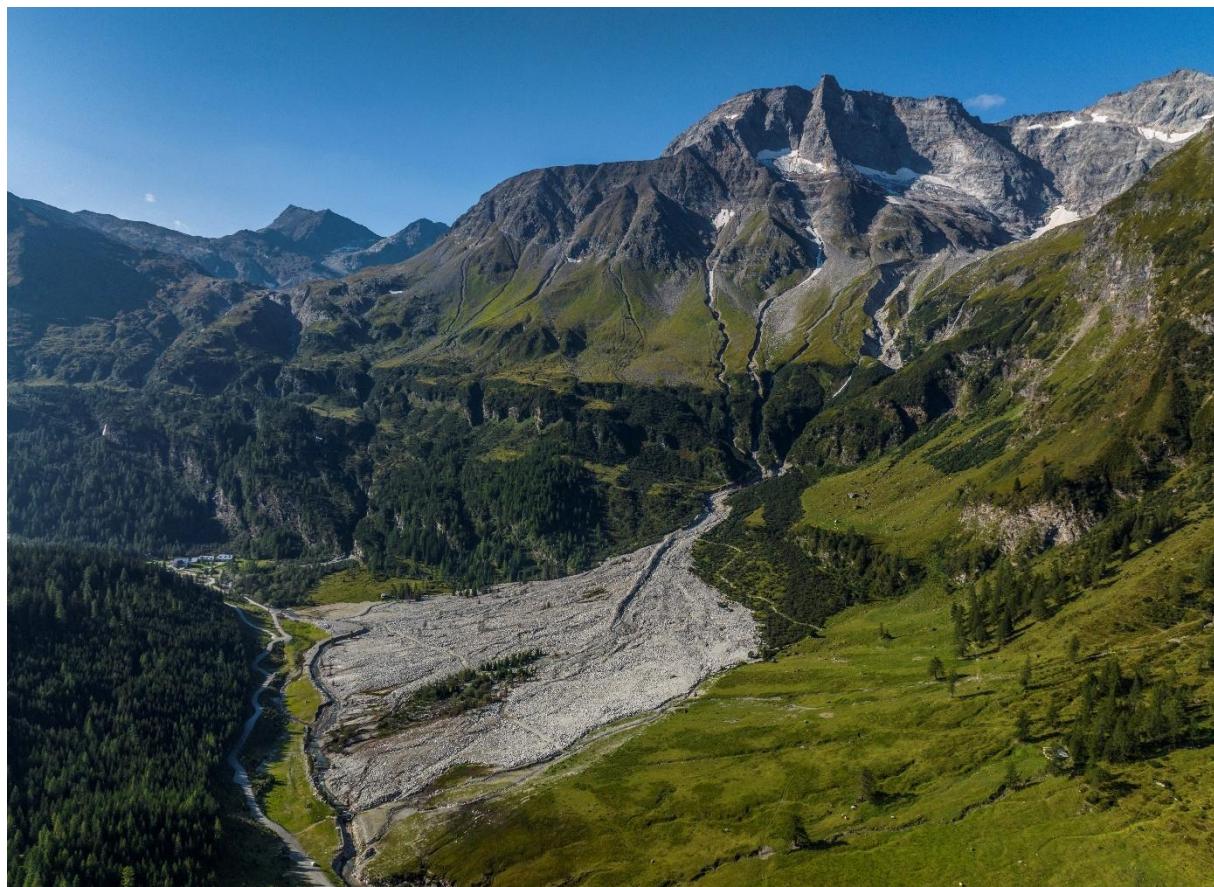


Abbildung 8: Frische Sedimentablagerungen in Folge starker Muraktivität im Pilatuskar (Foto: Robert Delleske, GEORESEARCH, 03.09.2024).

1.5 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 9). 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 Quantifizierung der Flächen-, Höhen- und Volumenveränderungen basiert auf dem digitalen Geländemodell des Landes Salzburg aus den Jahren 2010, 2012 und 2023, sowie den neugenerierten 3D-Modellen aus den UAS-Photogrammetrie-Befliegungen der GORESEARCH. Für die optische Analyse der Bewegungsraten wurde neben den UAS-Daten zusätzlich auf Orthofotos des Landes Salzburg (SAGIS) aus den Jahren 2003, 2007, 2012, 2015 und 2018 zurückgegriffen. Die Berechnung der Bewegungsvektoren und -raten basiert auf einer manuellen, optischen Verfolgung von eindeutig identifizierbaren Blöcken über die Zeit (Feature Tracking).



Abbildung 9: Installation von Boden-Kontrollpunkten (12.07.2018).

Im Jahr 2025 wurden zwei UAV-Befliegungen durchgeführt mit dem Ziel Bewegungsraten innerhalb der Sommerperioden zu erfassen. Die Befliegungen erfolgten am 14.07.2025 und am 03.10.2025 (zu beiden Zeitpunkten lag im oberen Bereich des Sattelkars noch eine Schneedecke vor).

Die Befliegungen des Jahres 2025 erfolgten erneut mit DJI Mavic 3E im PPK-Modus. Das verwendete Modell DJI Matrice M300 RTK ermöglichte erneut eine vom Talboden ausgehende Befliegung (der Drohnenstart erfolgte direkt bei der Hofrat-Keller-Hütte), das Sattelkar musste nicht betreten werden. Die Genauigkeit der Juli-Befliegung liegt aufgrund der hohen Schneedecke deutlich unter den Genauigkeiten der Vorjahre, die Auflösung der Daten unterscheidet sich nicht von der der Vorjahre (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Befliegungen im gesamten Untersuchungszeitraum 2018-2025. An den mit * markierten Daten konnten die Befliegungen aufgrund schlechter Witterungsverhältnisse nicht an einem Tag durchgeführt werden. RMS (Root Mean Square) = Quadratisches Mittel.

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	n.a.	7
14.07.2025	Sattelkar	DJI Mavic 3E im PPK-Modus	0,200	6
03.10.2025	Sattelkar	DJI Mavic 3E im PPK-Modus	0,024	6

1.5.1 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: Kamerasytem zur Überwachung des Sattelkars (06.10.2022).

1.6 Thermische Untergrundbedingungen

Als Konsequenz des in hochalpinen Regionen besonders stark ausgeprägten Lufttemperaturanstiegs der letzten Jahre und Jahrzehnte kommt es zu einer signifikanten Erwärmung des Untergrundes. Der damit einhergehende Rückgang des Permafrosts beeinflusst die fels-, boden- und eismechanischen Eigenschaften des Untergrundes und wirkt sich nachteilig auf dessen Stabilität aus. In hochalpinen Regionen führt der Permafrostrückgang daher vermehrt zu potenziell gefährlichen Massenbewegungen wie Steinschlägen, Felsstürzen, Murgängen und Rutschungen.

Aufgrund von Puffereffekten – wie u.a. der thermischen Isolierung durch die Schneedecke, dem latenten Wärmeumsatz im Untergrund infolge von Phasenübergängen beim Tauen und Frieren sowie heterogenen physikalischen Untergrundeigenschaften – kann die gemessene atmosphärische Erwärmung meist nicht linear auf den Untergrund übertragen werden. Aus diesen Gründen wird vielerorts eine zeitlich verzögerte und/oder stark tiefendifferenzierte Erwärmung des Untergrundes beobachtet. Vor diesem Hintergrund kommt dem Monitoring der thermischen Untergrundbedingungen in hochalpinen Regionen eine zentrale Bedeutung zu. Im Sattelkar und in den angrenzenden Karen werden die thermischen Untergrundbedingungen durch direkte Messungen der oberflächennahen Untergrundtemperaturen sowie mittels isotopenchemischer Untersuchungen erfasst.

1.6.1 Untergrundtemperaturen

Für die Messung der oberflächennahen Untergrundtemperatur und die darauf aufbauende Abschätzung der lokalen Permafrostwahrscheinlichkeit wurden 30 Temperaturlogger (Geoprecision M-Log 5W – Simple, Messgenauigkeit: $\pm 0.1^\circ\text{C}$) in einer Tiefe von 10 cm vergraben – davon 15 vom Hydrographischen Dienst des Landes Salzburg – und wie folgt auf die untersuchten Kare verteilt: 15 Logger im Sattelkar sowie jeweils fünf Logger im Ofen-, Mitter- und Steinkar.



Abbildung 11: Auslesen der Untergrundtemperaturen und Wasserprobennahme im Sattelkar (16.10.2025).

Nachdem in der Berichtsperiode 2024 aufgrund der Gefährdungssituation entlang des Steiges zum Sattelkar auf eine Begehung des Kares verzichtet worden war, konnte das Sattelkar nach einer Neubewertung der Gefahrensituation in der aktuellen Berichtsperiode 2025 erneut mehrfach begangen werden. In diesem Zuge wurden die ausgelegten Temperaturlogger ausgelesen.

Das Auslesen der Daten erfolgte am 16.10. und am 23.10.2025. Logger 1 konnte nicht mehr aufgefunden werden; an seiner Stelle wurde ein neuer Logger ausgelegt (siehe Tabelle 2). Alle übrigen Logger (2, 3, 6, 7, 9, 10, 13, 14 und 16) wurden aufgefunden und erfolgreich ausgelesen.

Tabelle 2: Übersicht der im Sattelkar ausgelegten Temperaturlogger.

Auslesedatum	Logger1	Logger2	Logger3	Logger5	Logger6	Logger7	Logger8	Logger9
<i>Urspr. Seriennr.</i>	A51FE0	A51FE4	A51FE2	A51FDA	A51FD7	A51FE3	A51FDB	A51FDF
<i>ersetzt durch:</i>	A5447A	A5447E	A54483		A54479	A5447B		A54482
	A54484							
10.10.2017	✓				✓			
26.06.2018	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
24.07.2019		✓	✓	✓	✓	✓		✓
04.09.2019	✓						✓	
09.07.2020	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12.08.2021	✓	✓	✓		✓	✓		
25.07.2022	*	*	*		*	✓	*	*
27.09.2023	✓	✓	✓			✓		✓
16./23.10.2025	X *	✓	✓		✓	✓		✓

Auslesedatum	Logger10	Logger11	Logger12	Logger13	Logger14	Logger15	Logger16
<i>Urspr. Seriennr.</i>	A51FD8	A51FD9	A51FD6	A51FDC	A51FDE		
<i>ersetzt durch:</i>	A5447F			A54480	A54486		A5447C
10.10.2017							
26.06.2018	✓	✓	✓	✓	✓		
24.07.2019		✓		✓			
04.09.2019	✓		✓		✓		
09.07.2020	✓	✓	✓	✓	✓		
12.08.2021			✓		✓		
25.07.2022	*			*	*		*
27.09.2023	✓			✓		✓	
16./23.10.2025	✓			✓	✓		✓

✓ erfolgreich ausgelesen
* neuer Logger ausgelegt
X Logger nicht aufgefunden

1.6.2 Isotopenchemie

Die bisherigen Isotopenchemie-Messkampagnen (Tabelle 3) wurden im Jahr 2025 mit einer Beprobung sowohl des Steinkars (15.10.2025) als auch des Sattelkars (16.10.2025) fortgeführt. Aufgrund eines technischen Defekts konnte 2025 die Messung der Wassertemperatur nicht erfolgen. 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 umfassten die Analyse der Temperatur (ausgenommen 2025), 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
15.10.2025	Steinkar	5	x		x	n.a.	x
16.10.2025	Sattelkar	8	x		x	n.a.	x

Ergebnisse und Interpretationen

1.7 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 erneut die Temperatur- und Niederschlagsdaten des INCA-Wettermodells aus dem Bereich des Sattelkars verwendet.

Erstmals werden darüber hinaus zu Vergleichszwecken INCA-Daten aus zwei weiteren hochaktiven Karen der Hohen Tauern herangezogen, dem Pilatuskar im Rauriser Tal sowie dem Tischlerkar im Gasteiner Tal. Beide Kare waren in den vergangenen Jahren durch eine besonders hohe Massenbewegungsaktivität gekennzeichnet und weisen – analog zum Sattelkar – einen ausgeprägten Sedimentaustausch auf.

1.7.1 Niederschlag

Tabelle 4 zeigt die Anzahl der Tage mit Niederschlagssummen größer als 20, 30, 40 und 50 mm. Im Berichtsjahr 2025 wurden an der Kürsinger Hütte sechs Tage mit Niederschlagssummen > 20 mm und vier Tage mit Niederschlagssummen > als 30 mm registriert. Aufgrund eines 54-tägigen Ausfalls der Niederschlagsaufzeichnungen an der Kürsinger Hütte im Zeitraum vom 05.07. bis 27.08.2025 sind diese Werte jedoch nur eingeschränkt aussagekräftig und nicht direkt mit den Vorjahreswerten vergleichbar. Die INCA-Niederschlagsdaten für das Jahr 2025 weisen eine hohe Anzahl an Tagen mit Niederschlagssummen > 20 mm ($n = 18$) sowie > 30 mm ($n = 8$) auf, die in beiden Fällen deutlich über dem langjährigen Mittel liegen.

Bei der Analyse der INCA-Daten wurde bewusst auf die Integration von Daten vor dem Jahr 2015 verzichtet, da für diesen Zeitraum eine systematische Überschätzung der Niederschlagssummen dokumentiert ist (Ghaemi et al. 2021). Grundsätzlich weisen die INCA-Daten und die Niederschlagsmessungen an der Kürsinger Hütte vergleichbare Größenordnungen auf. Bei detaillierter Betrachtung zeigen sich jedoch teils deutliche Abweichungen, die vor dem Hintergrund der räumlichen Distanz zwischen dem Sattelkar und der Kürsinger Hütte von rund 4 km sowie der komplexen topographischen Verhältnisse zu erwarten sind.

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 12). An der Kürsinger Hütte zeigt die Zeitreihenanalyse (2009-2025) eine zunehmende Häufigkeit von Tagesniederschlägen > 20 mm und > 30 mm. Erstere stieg im Beobachtungszeitraum um 0,21 Tage pro Jahr, zweitere um 0,13 Tage pro Jahr (Anm.: Die Daten der Jahre 2022 und 2025 wurden auf Grund der kurzen Betriebsdauer der Wetterstation aus der Trendanalyse ausgeschlossen). Für die kürzere INCA-Zeitreihe (2015-2025) zeigt die Trendanalyse für „> 20 mm-Tage“ eine Zunahme von 0,41 Tagen pro Jahr und für „> 30 mm-Tage“ eine Zunahme von 0,20 pro Jahr. Für Niederschlagssummen > 40 mm und > 50 mm wurden auf Grund der geringen Ereigniszahlen keine Trendanalysen durchgeführt.

Der Vergleich mit den hochaktiven Referenzstandorten Pilatuskar und Tischlerkar ergibt kein einheitliches Bild. Während im Pilatuskar im vergangenen Jahrzehnt eine vergleichsweise deutliche Zunahme der Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen zu beobachten ist (+0,62 Tage für Ereignisse > 20 mm; +0,30 Tage für Ereignisse > 30 mm), zeigt sich im Tischlerkar im selben Zeitraum eine Abnahme der Starkniederschlagshäufigkeit (-0,27 Tage für Ereignisse > 20 mm; -0,28 Tage für Ereignisse > 30 mm).

Die starke Streuung der analysierten Werte um die jeweiligen Regressionsgeraden – das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt bei sechs von acht Regressionen im Bereich von etwa 0,1 – sowie die teils geringe statistische Signifikanz der Zusammenhänge (relativ hohe p-Werte) zeigen, dass die identifizierten Niederschlagstrends mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Angesichts der ausgeprägten räumlichen Heterogenität von Niederschlagsmustern im komplexen alpinen Terrain ist dieses Ergebnis jedoch nicht unerwartet. Eine Verlängerung des Beobachtungszeitraums durch die Fortführung der Analysen in den kommenden Jahren ist daher von zentraler 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 Niederschlagsmessung an der Kürsinger Hütte war im Jahr 2025 nur 94 Tage in Betrieb (01.05.-27.09.2025; Datenlücke von 05.07.-27.08.2025). In den Vorjahren war die Station typischerweise 150-200 Tage in Betrieb.

	> 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
2025*	6	18	4	8	1	0	0	0

*2022: Niederschlagsmessung nur 82 Tage aktiv; 2025: Niederschlagsmessung nur 94 Tage aktiv

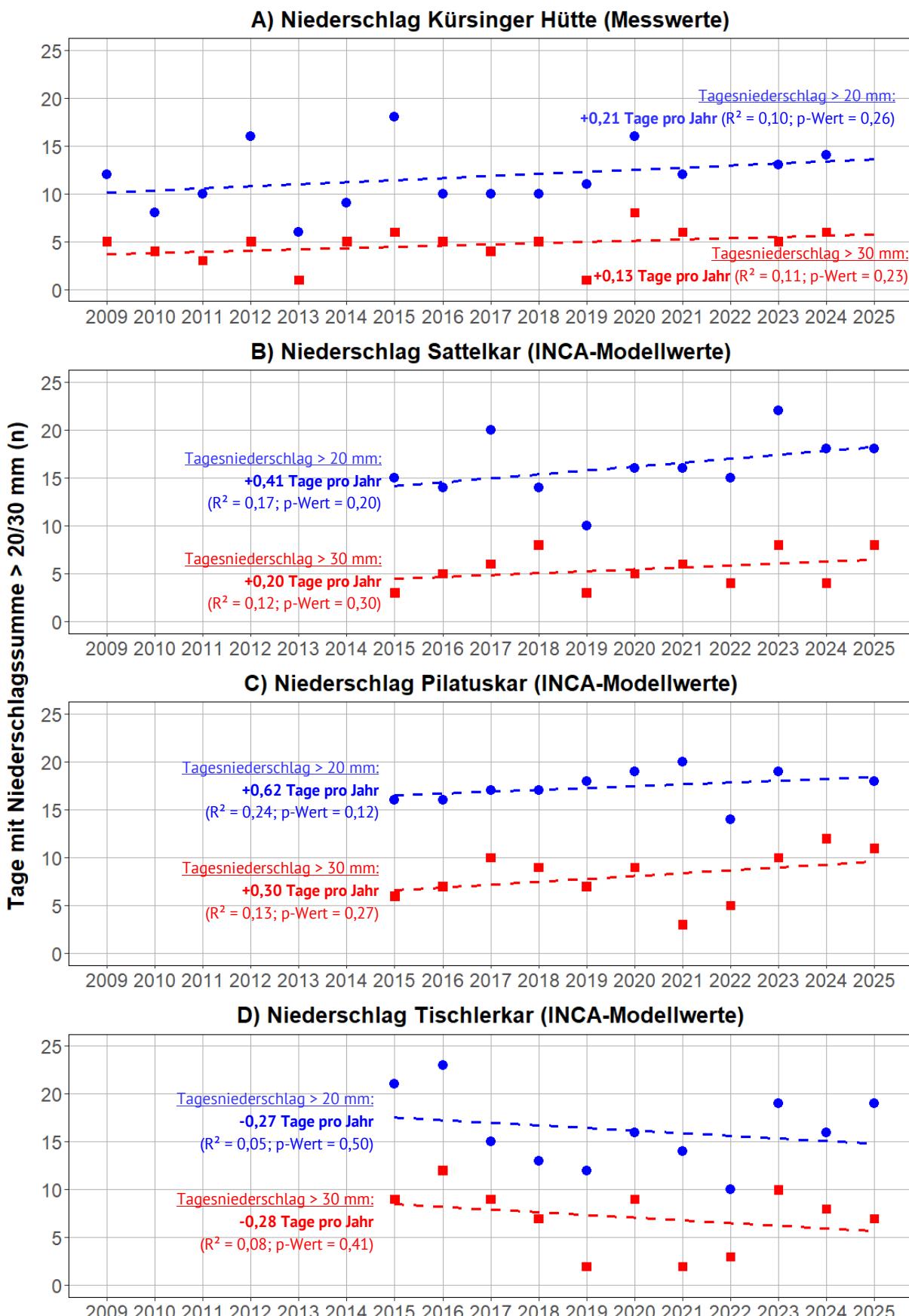


Abbildung 12: Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen größer als 20 mm (blau) bzw. 30 mm (rot) für (A) Wetterstation Kürsinger Hütte, (B) Sattelkar (INCA), (C) Pilatuskar/Rauriser Tal (INCA) und (D) Tischlerkar/Kötschachtal (INCA). An der Kürsinger Hütte wurden die Jahre 2022 und 2025 auf Grund von Datenlücken aus der Trendanalyse ausgeschlossen.

Die Analyse der zehn höchsten an der Kürsinger Hütte gemessenen Tagesniederschlagssummen der letzten 15 Jahre (2009–2023) stützt die Ergebnisse der Regressionsanalyse und weist ebenfalls auf eine Häufung von Starkniederschlagsereignissen in der jüngsten Vergangenheit hin (Tabelle 5). Vier bzw. sechs der zehn höchsten Tagessummen entfallen dabei auf die letzten fünf Jahre.

Tabelle 5: Die zehn höchsten Niederschlags-Tagessummen für (a) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009–2025) (linke Tabellenhälfte) und (b) Sattelkar auf Basis des INCA-Modells (2015–2025) (rechte Tabellenhälfte). Korrespondierende Wertepaare sind farblich hervorgehoben. Die Höchstwerte 2025 werden ggf. in der jeweils letzten Zeile ergänzt.

Top 10 Tagessummen					
(a) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009–25)			(b) Sattelkar (INCA) (2015–25)		
Rang	Datum	Tagessumme [mm]	Rang	Datum	Tagessumme [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	28.08.2025	56,2	10	12.09.2024	47,0
...			...		
			21.	22.05.2025	38,8

Tabelle 6: Die zehn höchsten Niederschlags-Stundensummen für (a) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009–2025) (linke Tabellenhälfte) und (b) Sattelkar auf Basis des INCA-Modells (2015–2025) (rechte Tabellenhälfte). Korrespondierende Wertepaare sind farblich hervorgehoben. Die Höchstwerte 2025 werden in der jeweils letzten Zeile ergänzt.

Top 10 Stundensummen (2009/15 – 2025)					
(a) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009–25)			(b) Sattelkar (INCA) (2015–25)		
Rang	Datum	Stundensumme [mm]	Rang	Datum	Stundensumme [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
...			...		
15.	29.08.2025 01:00	12,2	22.	05.07.2025 18:00	9,3

Der höchste im Jahr 2025 an der Kürsinger Hütte gemessene Tagesniederschlag betrug 56,2 mm und wurde am 28.08.2025 registriert. Dieser Wert entspricht dem zehnhöchsten Tagesniederschlag seit Messbeginn im Jahr 2009. Für denselben Tag berechnete das INCA-Modell einen Tagesniederschlag von 38,2 mm, was Rang 26 innerhalb der INCA-Zeitreihe seit 2015 entspricht (Tabelle 5).

Auch die höchsten Stundenniederschlagssummen des Jahres 2025 erreichen vergleichsweise moderate Rangplätze (Rang 15 an der Messstation Kürsinger Hütte bzw. Rang 22 im INCA-Datensatz; Tabelle 6). Insgesamt stellt das Jahr 2025 damit kein Extremjahr im Hinblick auf einzelne Starkniederschlagsereignisse dar.

Ein direkter Vergleich der Messdaten der Kürsinger Hütte (2009-2024) mit den INCA Modelldaten (2015-2025) 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).

Die Analyse der Top-5-Stunden- und Tagessummen des Jahres 2025 (Tabelle 7, Tabelle 8) zeigt systematische Unterschiede zwischen den modellbasierten Extremwerten der INCA-Zeitreihe und den an der Kürsinger Hütte gemessenen Extremwerten. Abweichungen in der Höhe der Spitzenwerte sind insofern plausibel, als INCA als flächenhaftes Produkt räumlich

Tabelle 7: Die fünf höchsten Niederschlags-Stundensummen des Jahres 2025 im Vergleich INCA-Daten (linke Tabellenhälfte) und Wetterstation Kürsingerhütte (rechte Tabellenhälfte) (absteigend gereiht). Korrespondierende Ereignisse sind farblich hervorgehoben.

Top 5 Stundensummen 2025

a) Wetterstation Kürsinger Hütte			b) Sattelkar (INCA-Wettermodell)		
Datum	Stunde	Stundensumme [mm]	Datum	Stunde	Stundensumme [mm]
29.08.2025	01:00	12,2	05.07.2025	18:00	9,3
28.08.2025	18:00	11,3	15.06.2025	19:00	8,6
26.06.2025	15:00	10,1	14.06.2025	20:00	8,0
28.08.2025	19:00	9,8	28.08.2025	19:00	7,8
05.07.2025	18:00	8,5	23.10.2025	17:00	7,6

Tabelle 8: Die fünf höchsten Niederschlags-Tagessummen des Jahres 2025 im Vergleich INCA-Daten (linke Tabellenhälfte) und Wetterstation Kürsingerhütte (rechte Tabellenhälfte) (absteigend gereiht). Korrespondierende Ereignisse sind farblich hervorgehoben.

Top 5 Tagessummen 2025

a) Wetterstation Kürsinger Hütte		b) Sattelkar (INCA-Wettermodell)	
Datum	Tagessumme [mm]	Datum	Tagessumme [mm]
28.08.2025	56,2	22.05.2025	38,8
02.06.2025	39,1	07.07.2025	38,4
03.06.2025	26,1	28.08.2025	38,2
22.05.2025	25,4	21.08.2025	36,2
07.05.2025	24,3	02.06.2025	33,2

gemittelte Niederschlagsintensitäten abbildet, während Stationsmessungen potenziell besser geeignet sind, um punktuelle Intensitätsspitzen zu erfassen.

Ungeachtet dieser Unterschiede wird das markante Starkregenereignis vom 28.08.2025 in beiden Datensätzen eindeutig und konsistent identifiziert; Gleches gilt für die hohen Tagessummen am 22.05.2025 und am 02.06.2025 (farblich hervorgehoben in Tabelle 7 und Tabelle 8). Dies unterstreicht die grundsätzliche Vergleichbarkeit der Datensätze und bestätigt, dass großräumig wirksame Extremereignisse sowohl im Modellprodukt als auch in den Stationsmessungen zuverlässig erfasst werden.

1.7.2 Abfluss

Im Rahmen der Abflussanalyse werden Messdaten der Pegel Kees (2 040 m) und Sulzau (882 m) herangezogen (siehe Kapitel 1.4). Die sommerlichen Tagesmittelwerte des Abflusses im

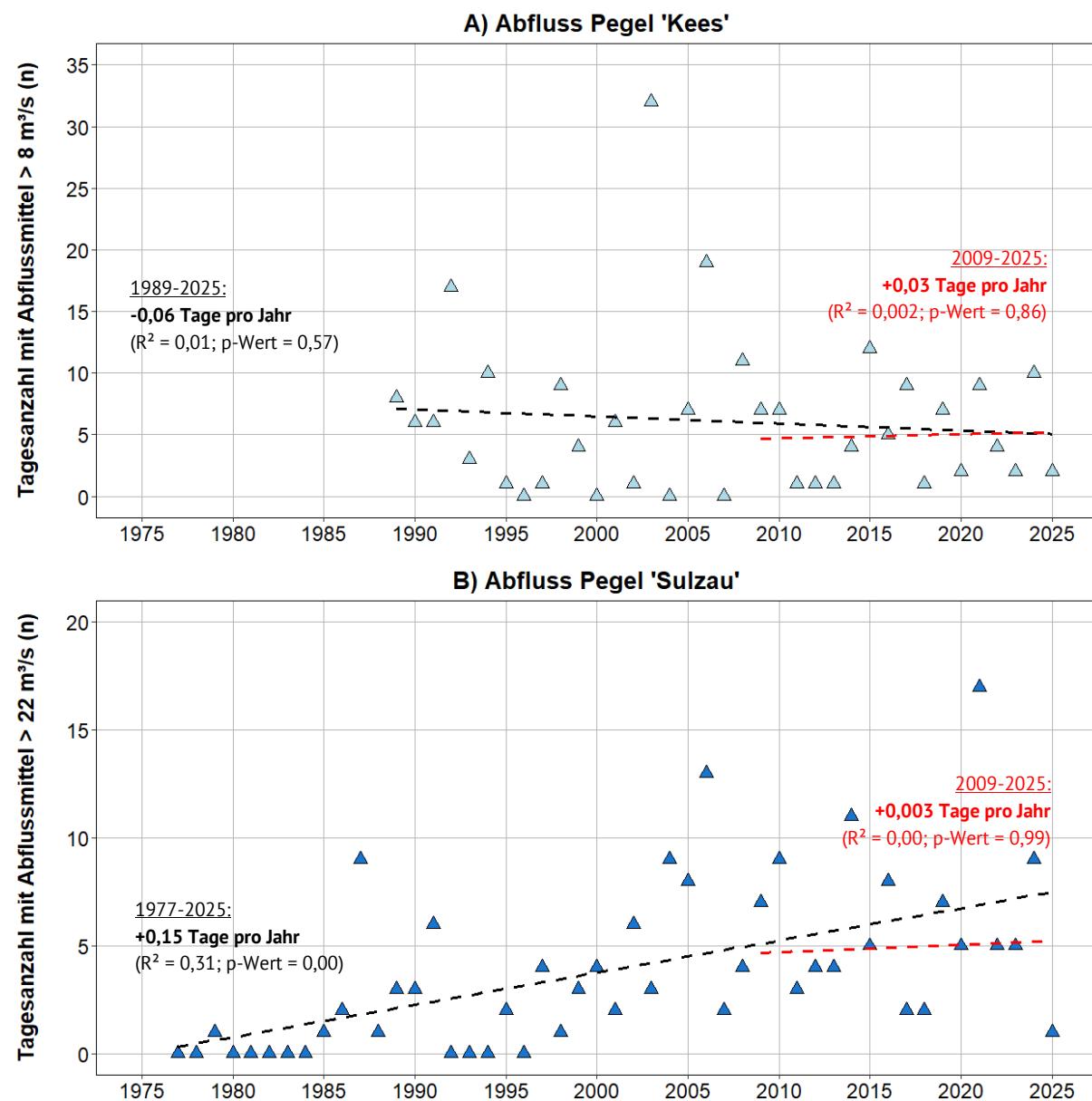


Abbildung 13: Tagesanzahl mit Spitzenabflüssen für (A) Pegel Kees ($> 8 \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 225$) und (B) Pegel Sulzau ($> 22 \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 191$) für die Gesamtzeitreihe (schwarz) und für den Vergleichszeitraum der Niederschlagsmessung an der Kürsinger Hütte (rot).

Vergleichszeitraum 2009-2025 liegen am Pegel *Kees* bei etwa $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Schwankungsbreite: $0\text{-}18 \text{ m}^3/\text{s}$) und am Pegel *Sulzau* bei rund $10,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (Schwankungsbreite: $1\text{-}80 \text{ m}^3/\text{s}$).

Der Niederschlagsanalyse folgend wurde auch im Rahmen der Abflussdatenauswertung eine Trendanalyse (lineare Regressionsanalyse) durchgeführt. Analysiert wurde einerseits die gesamte verfügbare Zeitreihe (*Kees*: 1989-2025, *Sulzau*: 1977-2025) und andererseits der Vergleichszeitraum der Niederschlagsmessung an der Kürsinger Hütte (2009-2024).

Am Pegel *Kees* wurde die Anzahl der Tage mit Abflussmittelwerten $> 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgewertet. Dies entspricht einer Stichprobe von rund 200 Ereignissen seit Messbeginn im Jahr 1989 und bildet damit eine belastbare Grundlage für die statistische Analyse (Abbildung 13). Sowohl über den Gesamtzeitraum 1989-2025 ($-0,06$ Tage pro Jahr) als auch über den Vergleichszeitraum der Niederschlagsmessungen an der Kürsinger Hütte (2009-2025; $+0,03$ Tage pro Jahr) ist keine signifikante Veränderung der Häufigkeit von Spitzenabflüssen erkennbar. Der für das Sattelkar beobachtete Trend einer Zunahme von Starkniederschlagsereignissen (vgl. Abbildung 12) spiegelt sich somit nicht in einer entsprechend eindeutigen Zunahme von Spitzenabflüssen am Pegel *Kees* wider.

Am Pegel *Sulzau* wurde die Anzahl der Tage mit Abflussmittelwerten $> 22 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgewertet. Dies entspricht ebenfalls einer Stichprobengröße von rund 200 Ereignissen und erlaubt eine weiterführende statistische Analyse. Für den Gesamtzeitraum 1977-2025 ergibt sich ein geringer, jedoch statistisch signifikanter Anstieg der Häufigkeit von Extremabflüssen ($+0,15$ Tage pro Jahr). Im Vergleichszeitraum der Niederschlagsmessungen an der Kürsinger Hütte (2009-2025) ist hingegen kein Trend erkennbar ($+0,00$ Tage pro Jahr) (Abbildung 13).

Tabelle 9 zeigt die zehn höchsten Tagesmittelabflüsse seit dem Jahr 2009. Der höchste Tagesabfluss wurde am 31.07.2014 mit $80,1 \text{ m}^3/\text{s}$ registriert. An diesem Tag kam es infolge intensiven Geschiebetransports und ausgeprägter Muraktivität zu erheblichen Infrastrukturschäden im Obersulzbachtal. Die während des folgenschweren Unwetters Ende

Tabelle 9: Die zehn höchsten Abfluss-Tagesmittelwerte für (a) Pegelmessstelle *Kees* und (b) Pegelmessstelle *Sulzau* in der Beobachtungsperiode 2009-2025 (absteigend gereiht). Die Höchstwerte 2025 werden in der jeweils letzten Zeile ergänzt.

Top 10 Tagesmittelwerte (2009-2025)

(a) Pegel <i>Kees</i>			(b) Pegel <i>Sulzau</i>		
Rang	Datum	Tagesmittel [m^3/s]	Rang	Datum	Tagesmittel [m^3/s]
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
...			...		
59	27.07.2025	8,6	35	03.06.2025	29,1

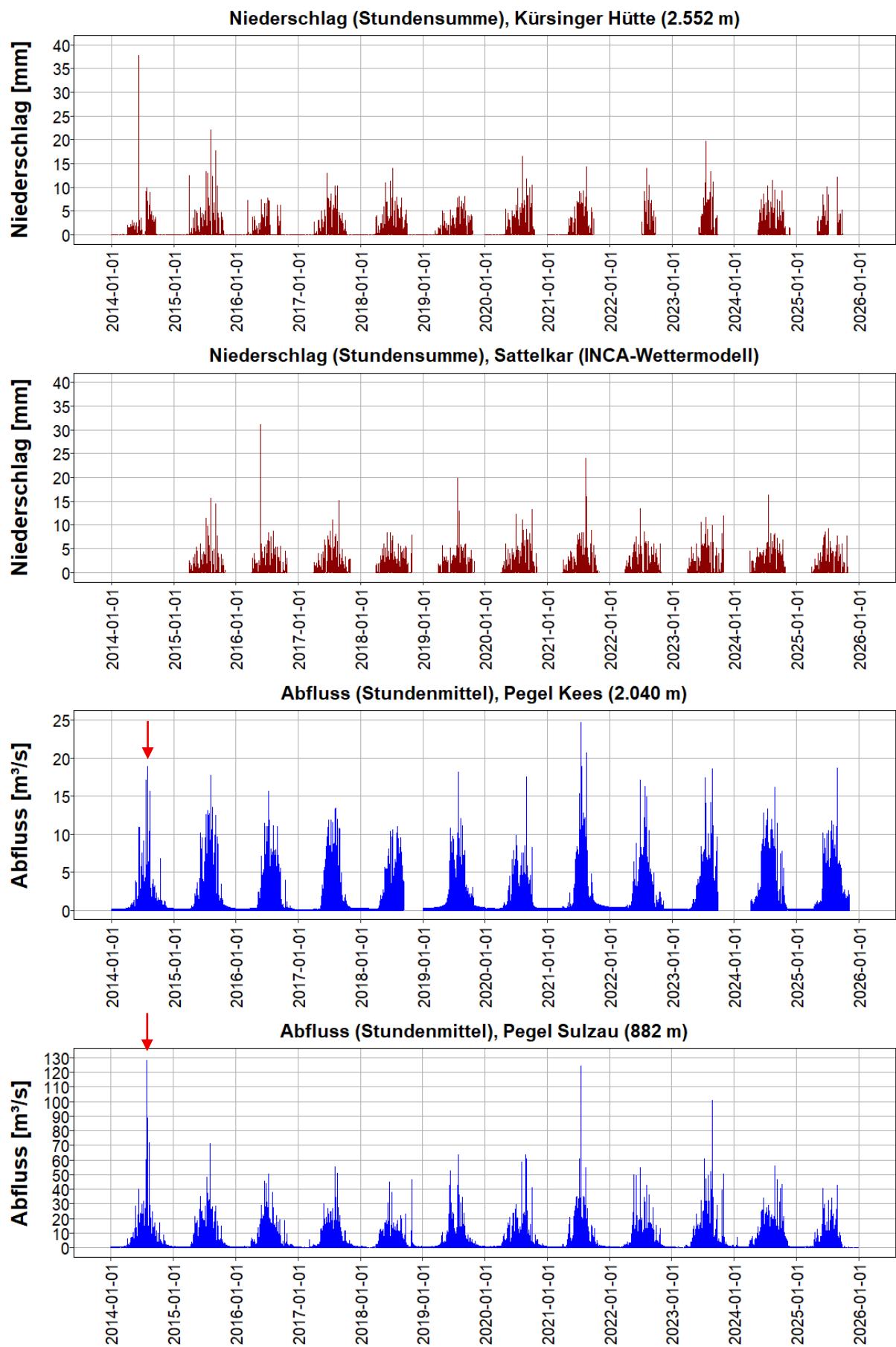


Abbildung 14: Saisonaler Niederschlags- und Abflussgang seit 01.01.2014. Rote Pfeile markieren den Zeitpunkt des bis dato letzten großen Murereignisses am 30./31.07.2014.

Juli 2014 gemessenen Spitzenabflüsse (Stundenmittel) erreichten $128 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel *Sulzau* (Abbildung 14) sowie $19 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel *Kees*.

Vergleichbar hohe Abflusswerte wurden am Pegel *Sulzau* auch am 18.07.2021 ($125 \text{ m}^3/\text{s}$ im Stundenmittel, $69 \text{ m}^3/\text{s}$ im Tagesmittel) sowie am 28.08.2023 ($101 \text{ m}^3/\text{s}$ im Stundenmittel, $60 \text{ m}^3/\text{s}$ im Tagesmittel) registriert. In beiden Fällen sind jedoch keine schwerwiegenden Murschäden dokumentiert. Diese Beobachtungen verdeutlichen, dass die Intensität von Mur- und Sedimentverlagerungsprozessen im Obersulzbachtal nicht allein durch die Abflussmenge erklärt werden kann. Für ein vertieftes Prozessverständnis ist daher eine integrale Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Wasser- und Sedimentverfügbarkeit innerhalb des Einzugsgebiets erforderlich. Diese lässt sich in der Regel – wie im Sattelkar – nur durch ein standortbezogenes Monitoring bzw. durch eine flächige Modellierung der beteiligten Prozesse angemessen erfassen.

Der höchste Tagesabfluss des aktuellen Berichtsjahres wurde am 03.06.2025 am Pegel *Sulzau* gemessen. Der mittlere Abfluss belief sich an diesem Tag auf $29,1 \text{ m}^3/\text{s}$, was Rang 35 innerhalb der seit 2009 verfügbaren Zeitreihe entspricht (Tabelle 9). Eine ausgeprägte, kurzzeitige Abflussspitze wurde zudem in den Abendstunden des 28.08.2025 am Pegel *Kees* beobachtet. Das Stundenmittel des Abflusses erreichte um 20:00 Uhr knapp $19 \text{ m}^3/\text{s}$; im Vergleichszeitraum 2009-2025 wurden lediglich an fünf Tagen höhere Stundenmittelwerte gemessen.

1.7.3 Lufttemperatur

Die bisherige Lufttemperatur-Zeitreihe bestätigt einen anhaltenden Erwärmungstrend im Untersuchungsgebiet, der mit dem alpenweiten dokumentierten Temperaturanstieg konsistent ist. Die INCA-basierten Jahresmitteltemperaturen für das Sattelkar weisen im Zeitraum 2012-2025 einen mittleren Temperaturanstieg von $0,10 \text{ }^\circ\text{C}$ pro Jahr auf (Abbildung 16). Für die Wetterstation an der Kürsinger Hütte konnten aufgrund erheblicher Datenlücken in den Wintermonaten keine Ganzjahresanalysen durchgeführt werden.

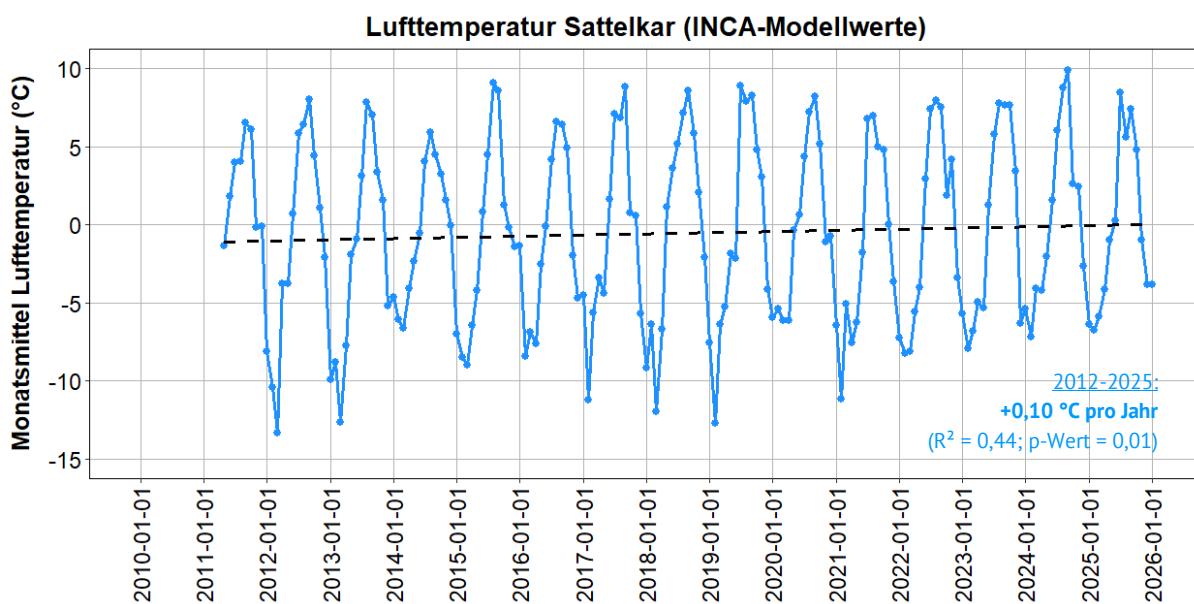


Abbildung 15: INCA-Monatsmittel der Lufttemperatur für das Sattelkar. Trendberechnung erfolgte auf Basis der Jahresmitteltemperatur.

In den für permafrost- und massenbewegungsrelevante Prozesse besonders bedeutsamen Sommermonaten zeigt sich ein sehr ähnliches Bild. Die INCA-Modellwerte des Sattelkars ergeben für den Sommerzeitraum ebenfalls einen Temperaturanstieg von rund $0,10\text{ °C}$ pro Jahr, während die Messdaten der Kürsinger Hütte eine sommerliche Erwärmung von $0,11\text{ °C}$ pro Jahr anzeigen (Abbildung 16).

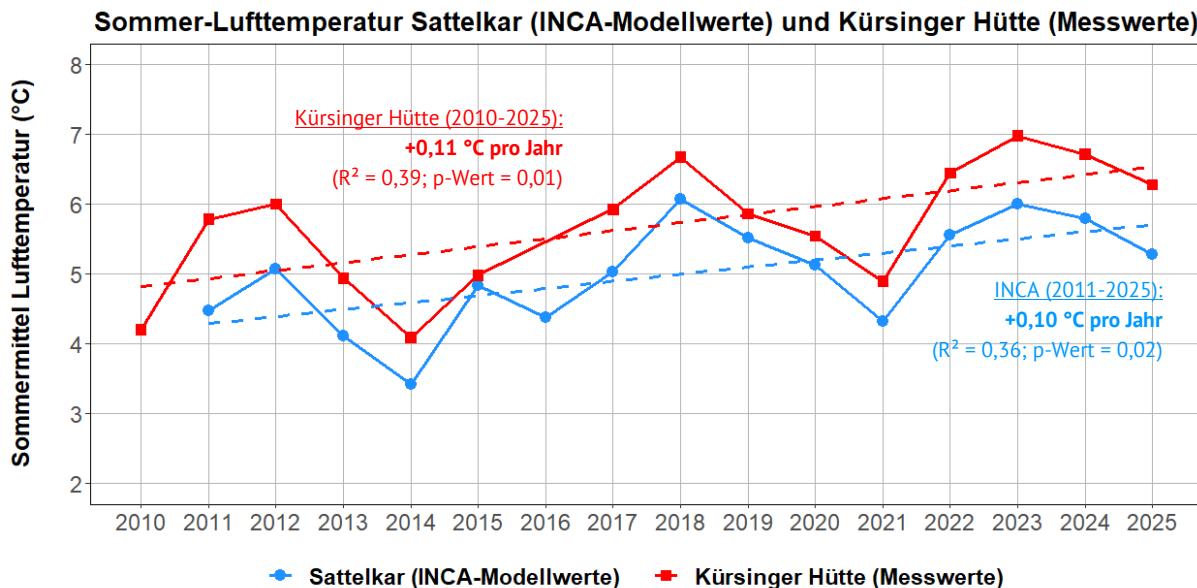


Abbildung 16: Mittlere Sommer-Lufttemperatur (Mai-September) für Sattelkar (INCA) und Kürsinger Hütte (Messwerte). Für die Kürsinger Hütte wurden auf Grund von Datenlücken keine Mittelwerte für die Jahre 2009 und 2016 berechnet.

1.8 Oberflächenveränderungen

Im Rahmen der Analyse der Oberflächenänderungen wird zunächst die historische Entwicklung zusammengefasst. Anschließend werden die Flächenentwicklung (Kapitel 1.8.1) und die Bewegungsraten (Kapitel 1.8.2) beschrieben. Darauf aufbauend werden die auf ALS- und UAV-basierten Differenzanalysen beruhenden Volumenänderungen (Kapitel 1.8.3) diskutiert sowie die Ergebnisse des Kamera-Monitorings ausgewertet (Kapitel 1.8.4).

Bis zur Initiierung der Rutschung im Jahr 2005 war das Sattelkar im oberen Drittel durch eine blockgletscherähnliche Landform geprägt. Der darunter anschließende Hangabschnitt, bestehend aus Hangschutt- und Moränenmaterial, war nahezu durchgehend vegetationsbedeckt und lediglich von einzelnen größeren Blöcken durchsetzt (Abbildung 17, Abbildung 18).

Starkniederschläge im Frühjahr 2005 führten oberhalb der eiszeitlich geformten Trogshulter zur Reaktivierung einer alten Anrisslinie (Braunstingl 2006). In der Folge setzte eine intensive lokale Erosion des Hangschutt- und Moränenmaterials sowie eine fortschreitende Degradation der Vegetationsdecke ein (Abbildung 17). Diese Prozesse entwickelten sich in den darauffolgenden Jahren zu einer tiefgreifenden, rücksschreitenden Massenbewegung, die schließlich die gesamte Sedimentfüllung des Sattelkars erfasste und maßgeblich zur Disintegration der blockgletscherähnlichen Struktur beitrug (Abbildung 18).



Abbildung 17: Infolge von Starkniederschlägen kam es im Jahr 2005 oberhalb der Trogshulter zur Reaktivierung einer alten Anrisslinie (rote Markierung). In den darauffolgenden Jahren entwickelte sich daraus eine tiefgreifende, rücksschreitende Massenbewegung, die schließlich auch den Blockgletscher im oberen Karbereich vollständig erfasste (schwarze Markierung) (Foto: Landesgeologie Salzburg, 03.07.2006).

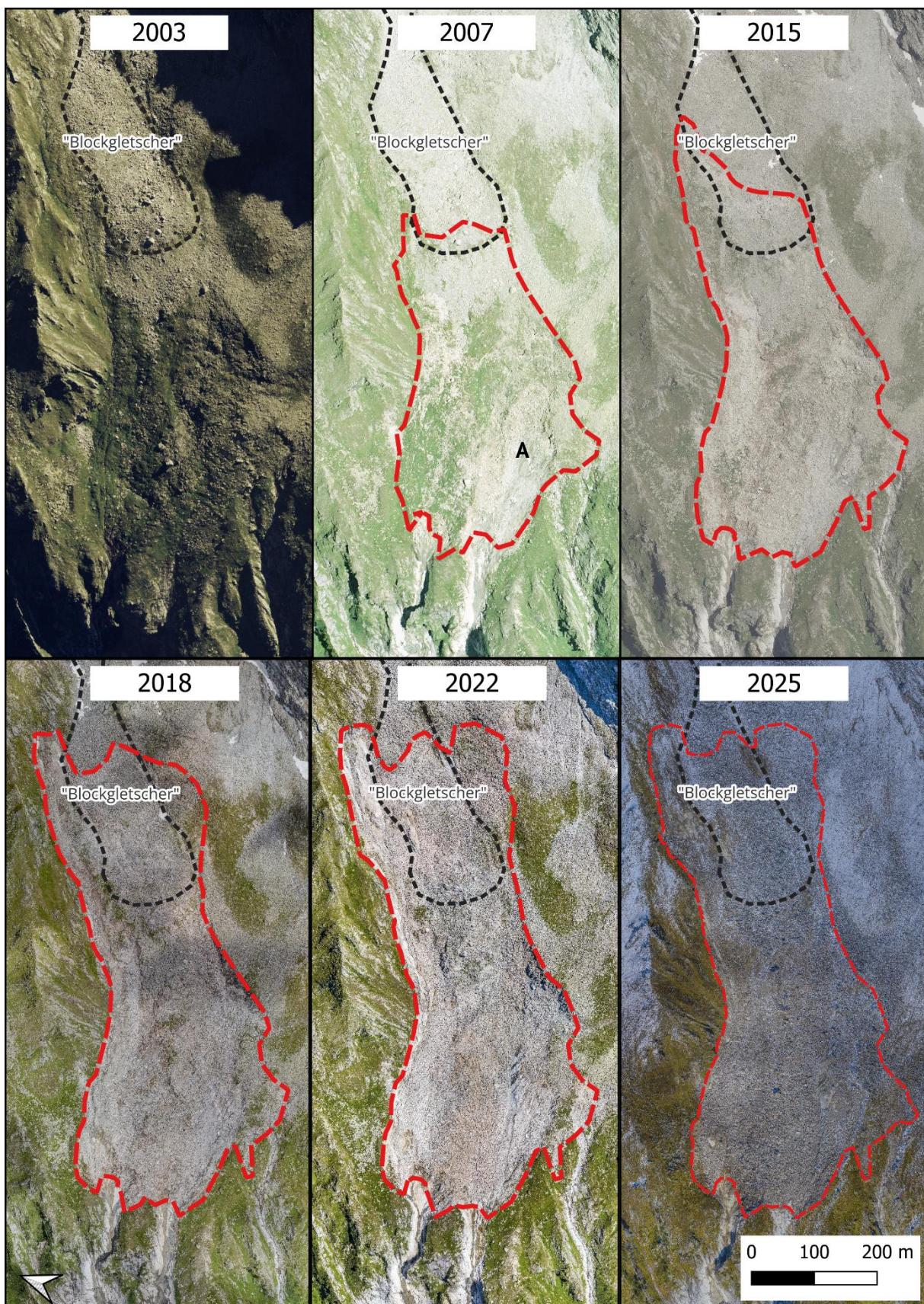


Abbildung 18: Orthofotovergleich 2003-2025 (Quelle: SAGIS sowie UAV-Befliegungen GEORESEARCH). Das Orthofoto des Jahres 2003 zeigt das Sattelkar vor Initiierung der Massenbewegung. Im Jahr 2007 ist im unteren Abschnitt des Kares, der durch Starkniederschläge des Jahres 2005 initiierte Anrißbereich bereits klar ersichtlich (siehe „A“). Auf den Orthofotos der Folgejahre (2012-2025) ist die rapide, rückwärtsgerichtete Vergrößerung der Sattelkar-Rutschung deutlich zu erkennen.

1.8.1 Flächenentwicklung

Im Jahr der Bewegungsinitierung (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 (03.10.2025) beträgt 18,8 ha und zeigt gegenüber dem Vorjahr keinen Zuwachs mehr (Abbildung 19 und Abbildung 18).

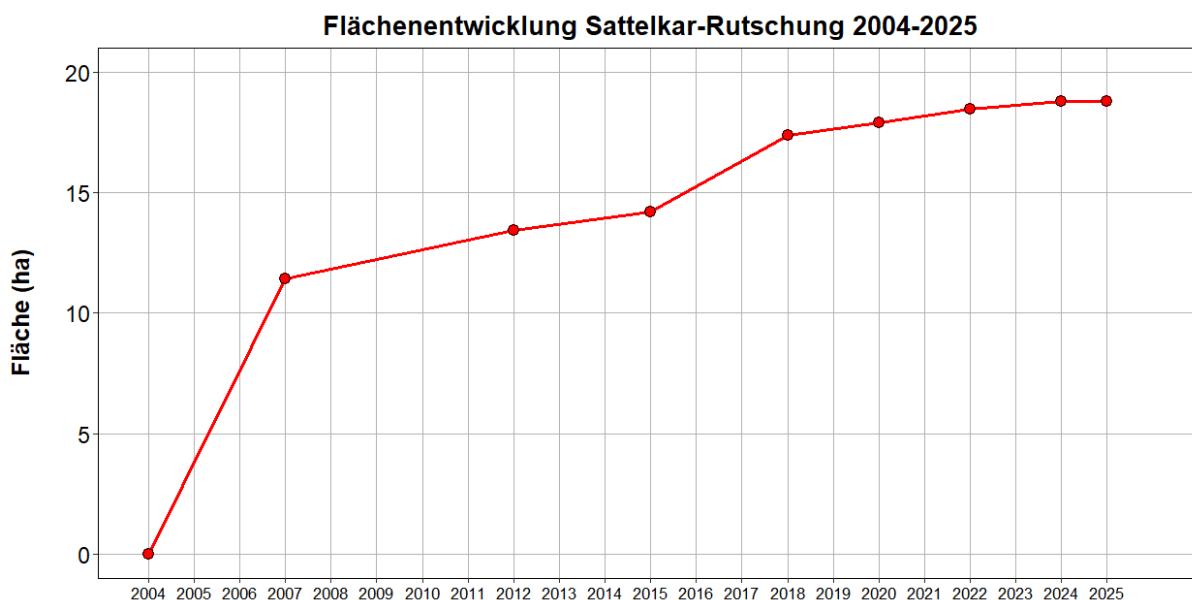


Abbildung 19: Flächenentwicklung der Sattelkar-Rutschung im Zeitraum 2004-2025.

1.8.2 Bewegungsraten

Zur Bestimmung der Bewegungsraten der Sattelkar-Rutschmasse wurden in den vorliegenden Orthofotos die Transportdistanzen markanter Einzelblöcke vermessen (optisches Feature Tracking). Die Nutzung von Bestandsdaten aus den frühen 2000er-Jahren ermöglicht dabei eine näherungsweise Rekonstruktion der Bewegungsentwicklung seit der Initiierung im Jahr 2005. Diese zeigt eine kontinuierliche Beschleunigung der Bewegung bis zum Sommer 2021, gefolgt von einer deutlichen Trendumkehr. Seit dem Herbst 2021 ist eine Verlangsamung der Massenbewegung zu beobachten, die sich auch im Jahr 2025 fortsetzte.

Ob die in den letzten Jahren beobachtete Abnahme der Bewegungsraten auf Materialerschöpfungseffekte (abnehmender Materialnachschub), eine limitierte Transportkapazität infolge reduzierter Wasserverfügbarkeit oder andere morphologische bzw. rheologische Faktoren zurückzuführen ist, stellt eine der zentralen Fragestellungen des fortgesetzten Monitorings der Massenbewegung dar.

Die Analyse der räumlichen Verteilung der Bewegungsgeschwindigkeiten zeigt eine ausgeprägte Zweiteilung der Rutschmasse: In der unteren Hälfte des Sattelkars treten deutlich höhere Bewegungsraten auf als in der oberen Hälfte, ein Muster, das über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg stabil ist. Im langjährigen Mittel liegen die Bewegungsraten in der unteren Hälfte mit 22,4 Meter pro Jahr um den Faktor 3,3 über jenen

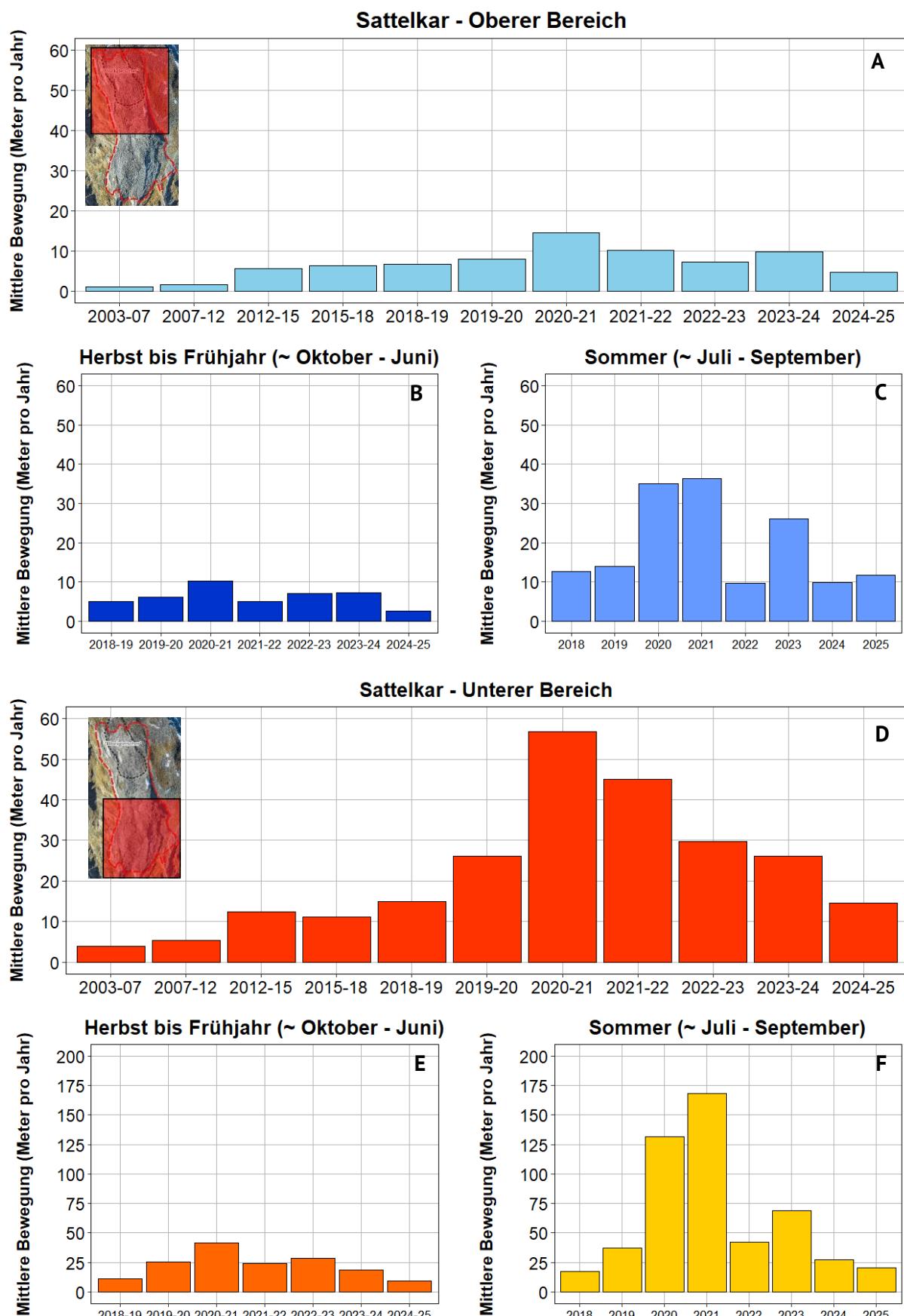


Abbildung 20: Bewegungsraten der Sattelkar-Rutschung (2003-2025), bestimmt mittels Feature Tracking einzelner Blöcke. Von der Initiierung im Jahr 2005 bis zum Sommer 2021 zeigen die Bewegungsraten eine kontinuierliche Zunahme, gefolgt von einer Verlangsamung in den Jahren 2022-2024. Die sommerlichen Bewegungsraten sind etwa dreimal höher als jene im übrigen Jahresverlauf.

der oberen Hälfte (6,9 Meter pro Jahr). Das zeitliche Bewegungsmuster – Anstieg der Raten von 2005-2021 sowie Abnahme in den Jahren 2022-2025 – ist in beiden Bereichen nahezu identisch ausgeprägt (vgl. Abbildung 20A und D).

Zur jahreszeitlichen Differenzierung des Massenbewegungsverhaltens wurde die Sommerperiode – definiert als Zeitraum zwischen der Frühsommer-Befliegung (\approx Juli) und der Spätsommer-Befliegung (\approx September) – mit der Restjahresperiode (\approx Oktober bis Juni) verglichen (Abbildung 20B-C und E-F). Dabei zeigt sich ein ausgeprägter Kontrast zwischen hohen Bewegungsraten während der Sommermonate und deutlich geringeren Raten im Zeitraum Herbst bis Frühjahr. Im Zeitraum 2018-2025 waren die sommerlichen Bewegungsraten drei Mal so hoch wie während der Restjahresperiode. Dieser ausgeprägte saisonale Unterschied weist darauf hin, dass die Verfügbarkeit von flüssigem Wasser einen zentralen Steuerungsfaktor der Massenbewegung im Sattelkar darstellt. Die höchsten Bewegungsraten fallen in jene Jahreszeit, in der infolge von Niederschlag und Schmelzwasserzufuhr die Wasserverfügbarkeit im System am größten ist, was auf eine hydraulisch kontrollierte Dynamik der Rutschung hindeutet.

Erneut zeigt sich ein erheblicher Bewegungsunterschied zwischen dem unteren und dem oberen Bereich der Rutschung. Im unteren Bereich des Sattelkars erreichen die (normalisierten) sommerlichen Spitzenraten Werte von über 150 Metern pro Jahr, während die entsprechenden Raten im oberen Bereich durchgehend unter 40 Metern pro Jahr bleiben. Die mittleren normalisierten Bewegungsraten der Sommersaison (2018-2025) betragen in der unteren Karhälfte 64 Meter pro Jahr und in der oberen Karhälfte 19 Meter pro Jahr.

In der Restjahresperiode (Oktober bis Juni) weisen die Bewegungsraten eine vergleichsweise geringe interannuelle Variabilität auf. Im unteren Karbereich liegen sie typischerweise zwischen 10 und 30 Metern pro Jahr (Mittelwert: 23 Meter pro Jahr), im oberen Bereich zwischen 5 und 10 Meter pro Jahr (Mittelwert: 6 Meter pro Jahr).

1.8.3 Volumenänderungen

Stichprobenartig durchgeführte Georadar-Messungen aus dem Jahr 2022 lassen auf eine mittlere Mächtigkeit von zumindest 10 m schließen, woraus sich als grober Schätzwert ein Gesamtvolume der Rutschmasse von zumindest 1,7 Mio. m³ ergibt. Die multitemporale Analyse der aus den UAV-Befliegungen abgeleiteten digitalen Oberflächenmodelle ermöglicht eine quantitative Erfassung der Volumenänderungen der Rutschmasse im Sattelkar. Für das aktuelle Berichtsjahr zeigt der Vergleich der Herbst-Befliegungen 2024 und 2025 (vgl. Abbildung 21) einen Netto-Volumenverlust von rund 65 000 m³ im Bereich der Sattelkar-Rutschung, der als Materialaustrag interpretiert wird.

Im Talbereich (Schuttkegel und Bachbett) ergibt sich für denselben Zeitraum hingegen eine Volumenzunahme von rund 98.000 m³. Die Differenz zwischen Abtrags- und Akkumulationsvolumen lässt sich einerseits durch eine geringere Lagerungsdichte des Materials im Ablagerungsbereich erklären und andererseits durch zusätzliche Sedimentzufuhr aus bachaufwärts gelegenen Quellen, die nicht direkt mit der Sattelkar-Rutschung in Verbindung stehen.

Noch im Vorjahresvergleich (2023 versus 2024) zeigte sich sowohl im Bereich der Rutschung (-10.000 m³) als auch im Talbereich (-25.000 m³) eine negative Volumenbilanz. Dies zeigt,

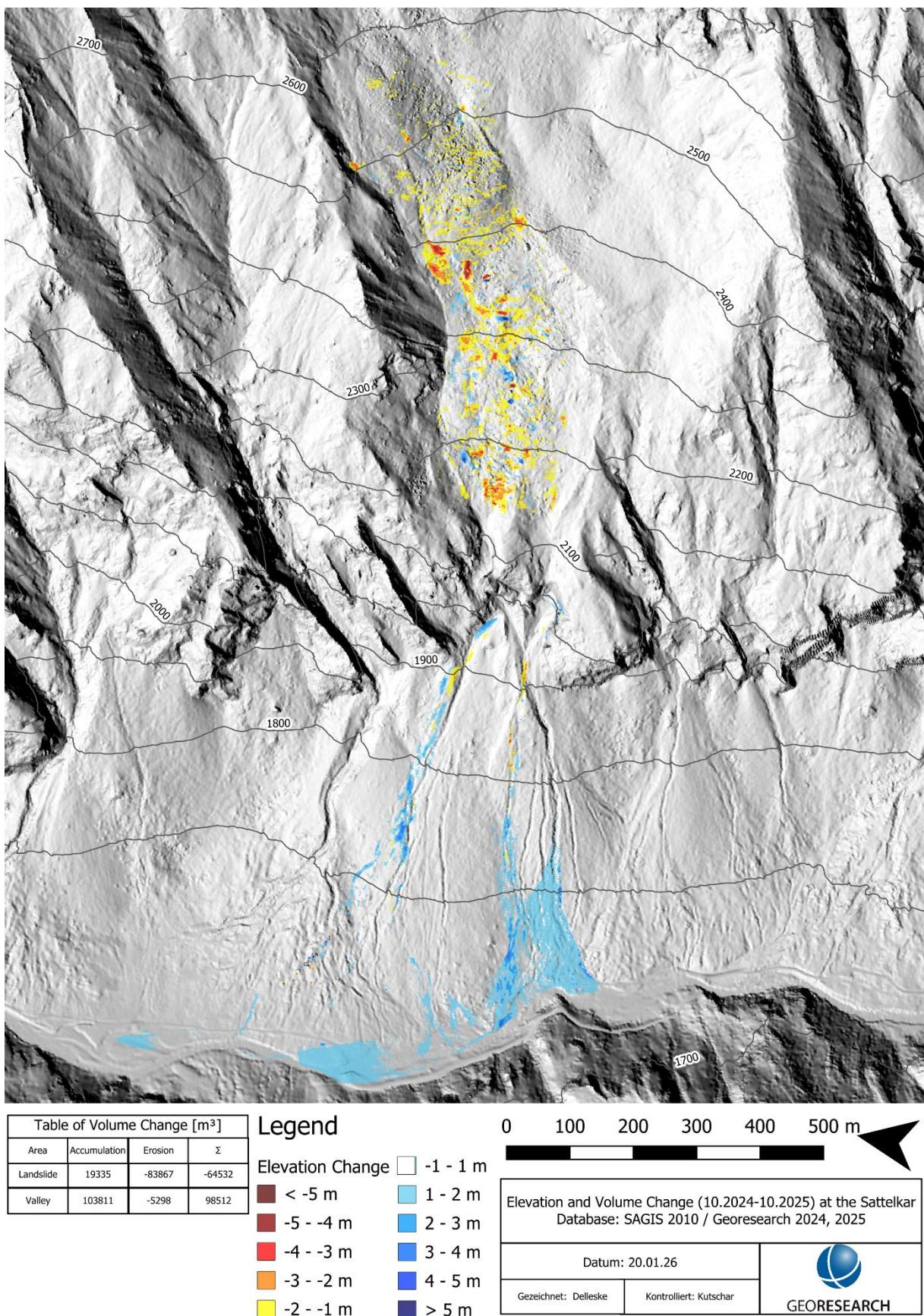


Abbildung 21: Höhen- und Volumenveränderung im Erosions- und Akkumulationsbereich der Sattelkar-Rutschung im aktuellen Jahr (Sommer 2024 bis Sommer 2025).

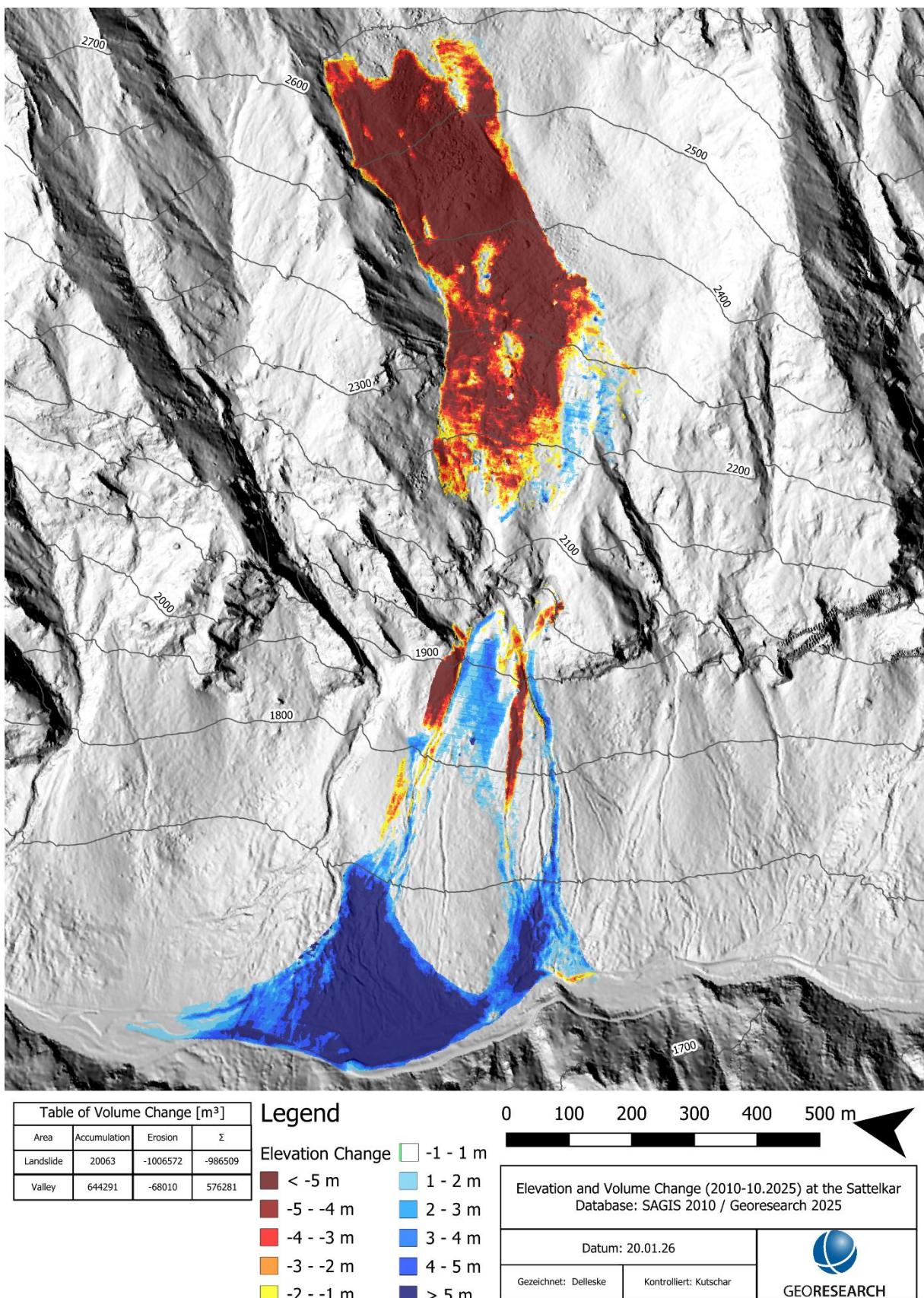


Abbildung 22: Höhen- und Volumenveränderung im Erosions- und Akkumulationsbereich der Sattelkar-Rutschung im Gesamtbeobachtungszeitraum rekonstruiert durch Datenvergleich zwischen Airborne-Laserscanning-Daten des Landes Salzburg 2010 und der aktuellsten GEORESEARCH-Befliegung am 03.10.2025).

dass der lokale Sedimenthaushalt äußerst sensibel auf geringfügige Änderungen der naturräumlichen Rahmenbedingungen reagiert und unterstreicht die starke Variabilität der untersuchten Massenverlagerungsprozesse.

Über den gesamten Beobachtungszeitraum – basierend auf dem Vergleich von ALS-Daten des Jahres 2010 mit der aktuellsten UAV-Photogrammetrie-Befliegung vom 03.10.2025 (vgl. Abbildung 31) – wurden insgesamt 990.000 m³ Sediment aus dem Kar ausgetragen. Der Sedimenttransport erfolgte dabei primär durch Murgänge, Steinschläge sowie als Suspensionsfracht. Im talseitigen Bereich wurden im selben Zeitraum 580.000 m³ Sediment im Bereich des Schuttkegels und des Bachbetts akkumuliert. Die verbleibende Differenz von rund 400.000 m³ wurde überwiegend über den Obersulzbach aus dem System ausgetragen und zu einem geringeren Anteil im Zuge baulicher Maßnahmen am Murkegel entfernt.

Ergänzend zu den UAV-basierten Detailanalysen werden in diesem Bericht erstmals flächendeckende multitemporale ALS-Daten ausgewertet, um die lokalen Prozesse im Sattelkar in einen übergeordneten geomorphologischen und räumlichen Kontext einzuordnen und Veränderungen in den benachbarten Karen (Ofenkar, Mitterkar, Steinkar) systematisch zu erfassen.

Zur Beurteilung großräumiger Oberflächenveränderungen wurden die Datensätze der amtlichen Laserscan-Befliegungen des Land Salzburg aus August 2012 und September 2023 vergleichend ausgewertet (Abbildung 23). Aufgrund der Erfassungszeitpunkte im Spätsommer bzw. Frühherbst ist das Vorhandensein von Altschnee weitgehend auszuschließen, wodurch eine gute Vergleichbarkeit der Datensätze gewährleistet ist. Vereinzelt enthalten die analysierten Daten zwar lokale Messunsicherheiten, insgesamt sind sie jedoch für einen quantitativen Oberflächenvergleich gut geeignet.

In den benachbarten Karen lassen sich keine tiefgreifenden geomorphologischen Veränderungen erkennen. Trotz vergleichbarer topo-klimatischer Bedingungen und großer verfügbarer Sedimentmengen ist weder im Ofenkar, Mitterkar noch im Steinkar die Initiierung einer großskaligen Hangbewegung feststellbar. Insgesamt zeigen sich stabile Oberflächenverhältnisse ohne Hinweise auf ausgeprägte Massenverlagerungsprozesse.

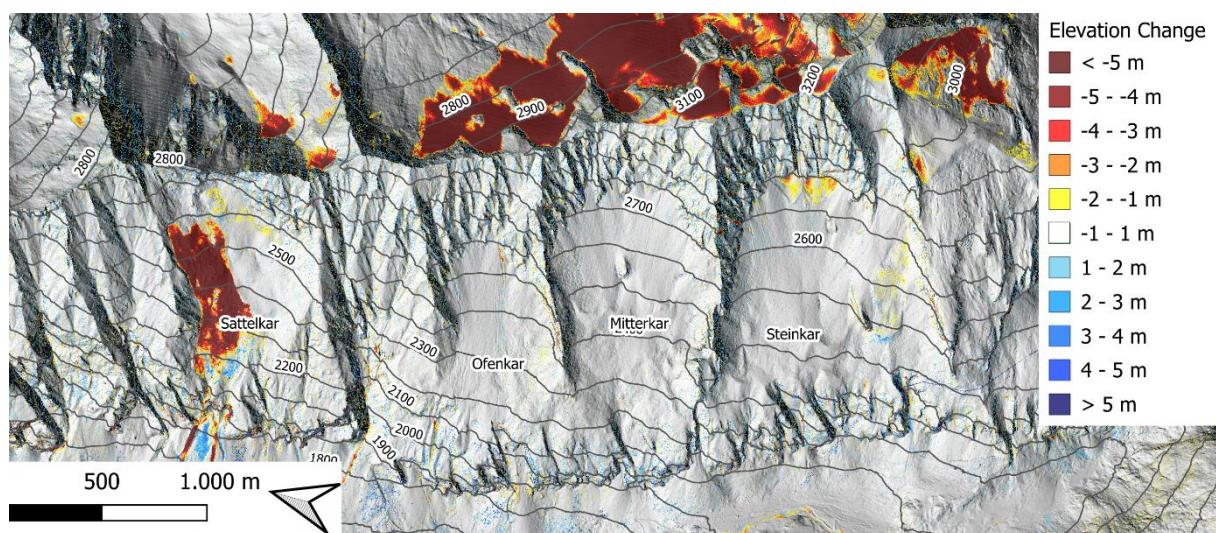


Abbildung 23: Differenzmodell der Geländeoberfläche auf Basis eines ALS-Datenvergleichs der Jahre 2012 und 2023. Sichtbar sind überwiegend stabile Verhältnisse in den Nachbarkaren, lokale Erosion in Schutthalden unter den Karrückwänden, Erosionsstrukturen entlang von Abflussrinnen, sowie ein leichtes Vorstoßen des Blockgletschers im Steinkar.

Im Sattelkar treten außerhalb des eigentlichen Rutschungsbereichs insbesondere in den Schutthalden unterhalb der Rückwände geringfügige Volumenverluste auf. Etwas stärker ausgeprägte Volumenverluste sind zudem in den Schutthalden unterhalb der Rückwände des Steinkars feststellbar. Die Erosion am Wandfuß der Rückwände ist vermutlich primär auf stark kanalisierten Oberflächenabfluss nach Starkniederschlagsereignissen („Fire-Hose Effect“) zurückzuführen; nachrangig könnte auch das Abtauen von internem Eis in schattigen Wandfußbereichen eine Rolle spielen.

Im Ofenkar beschränkt sich das Erosions- und Akkumulationsgeschehen auf eine kleine, aktive Abflussrinne, in der es infolge von Stark- bzw. Dauerniederschlägen zu geringfügigen Sedimentverlagerungen kommt. Im Steinkar lassen sich darüber hinaus leichte Oberflächenbewegungen im Bereich eines Blockgletschers erkennen, die auf eine weiterhin bestehende, wenn auch schwache, Vorstoßbewegung hindeuten. Nördlich des Grates im Untersulzbachtal treten schließlich deutliche Massenverluste der Gletscherflächen auf, die sich im Differenzmodell klar abzeichnen.

1.8.4 Ereignisdokumentation von Massenbewegungen

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. Das letzte Firmware-Update wurden am 01.10.2025 durchgeführt.



Abbildung 24: Spätsommeraufnahme (20.09.2025) und Winteraufnahme (10.12.2025) des automatischen Kamerasytems.

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

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

Das automatische Kamerasystem liefert kontinuierlich hochwertige Aufnahmen des Sattelkars und seiner Umgebung (Abbildung 24). Der multitemporale Vergleich dieser Bilddaten ermöglicht eine qualitative Abschätzung der Massenbewegungsaktivität im Sattelkar sowie auf dem talwärts anschließenden Schuttkegel. Auf dieser Grundlage wurde systematisch geprüft, ob dokumentierte Starkniederschlagsereignisse mit sichtbaren Oberflächenveränderungen im Sattelkar einhergehen.

Für die vorliegende Berichtsperiode wurden die Top-5-Niederschlagsspitzen (jeweils Stunden- und Tagessummen) der INCA-Daten und der Wetterstationswerte der Kürsinger Hütte (Tabelle 7 und Tabelle 8) analysiert. In vier Fällen konnten im zeitlichen Zusammenhang eindeutige geomorphologische Veränderungen identifiziert werden, was die hohe Eignung des Kamerasystems für die ereignisbezogene Prozessbeobachtung unterstreicht.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Bildvergleiche für die dokumentierten Niederschlagsspitzen des Jahres 2025 dargestellt (Abbildung 29 - Abbildung 25). Ergänzend ist eine Übersichtsdarstellung der Situation vor und nach der sommerlichen Niederschlagsperiode angeführt (Abbildung 29).



Abbildung 25: Vergleich der Webcam-Bilder vor und nach dem Starkregenereignis am 02./03.06.2025 (Kürsinger Hütte: 39,1 mm bzw. 26,1 mm Tagesniederschlag). Linkes Bild: 01.06.2025, rechtes Bild: 05.06.2025. Im rechten Bildausschnitt ist eine deutliche, talwärtige Verlagerung der Blöcke sichtbar.



Abbildung 26: Vergleich der Webcam-Bilder vor und nach dem Starkregenereignis am 14./15.06.2025 (INCA-Stundenspitzen von 8,0 mm bzw. 8,6 mm). Linkes Bild 13.06.2025, rechtes Bild 18.06.2025. Im Bereich der Markierung im rechten Bild ist ein Block erkennbar, der vor dem Starkregenereignis noch nicht sichtbar war.



Abbildung 27: Vergleich der Webcam-Bilder vor und nach dem Starkregenereignis am 05.07.2025 (Kürsinger Hütte: Stundenspitze 8,5 mm). Linkes Bild: 04.07.2025, rechtes Bild: 06.07.2025. Im rechten Bild ist zentral im markierten Bereich ein Block sichtbar, der vor dem Ereignis noch nicht an dieser Stelle war.



Abbildung 28: Vergleich der Webcam-Bilder vor und nach den starken Niederschlägen am 28./29.08.2025 (Tagesniederschlag Kürsinger Hütte: 56,2 mm, INCA 38,2 mm). Linkes Bild: 27.08.2025, rechtes Bild 31.08.2025. Im linken Bild sind Blöcke sichtbar, die während der Niederschläge bewegt/ausgetragen wurden und daher im rechten Bild nicht mehr sichtbar sind.



Abbildung 29: Webcam-Vergleich vor und nach der sommerlichen Niederschlagsperiode: linkes Bild 01.07.2025, rechtes Bild: 20.09.2025. In den drei markierten Bereichen sind grobblockige Ablagerungen erkennbar, die zu Beginn der Niederschlagsperiode noch nicht vorhanden waren.

1.9 Thermische Untergrundbedingungen

1.9.1 Untergrundtemperaturen

Die Untergrundtemperatur im Sattelkar wird mit energieeffizienten, hochpräzisen Miniaturloggern 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 30 zeigt die Lage der Temperaturlogger im Sattelkar. Die Logger-Standorte #4 und #15 wurden noch im Laufe des ersten Messjahres (2016) durch die rückschreitende Erosion der Karsedimente erodiert (Loggerverlust) und konnten nie ausgelesen werden. Die Logger-Standorte #5, #8, #11 und #12 wurden im Jahr 2020 zum letzten Mal ausgelesen und anschließend auf Grund ungünstiger Standortbedingungen (hohe Erosion) aufgegeben. Die Logger-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 10).

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse aller Untergrundtemperatur-Logger im Sattelkar im gesamten Beobachtungszeitraum (22.10.2015 bis 23.10.2025). Nachdem im Jahr 2024 aus Sicherheitsgründen (Steinschlag) keine Auslesung erfolgte, wurden im Jahr 2025 alle Temperaturlogger wieder wie gewohnt ausgelesen. Lediglich Logger #1 konnte nicht mehr aufgefunden werden, an seiner Stelle wurde ein neuer Logger ausgelegt (siehe Kapitel 1.6).

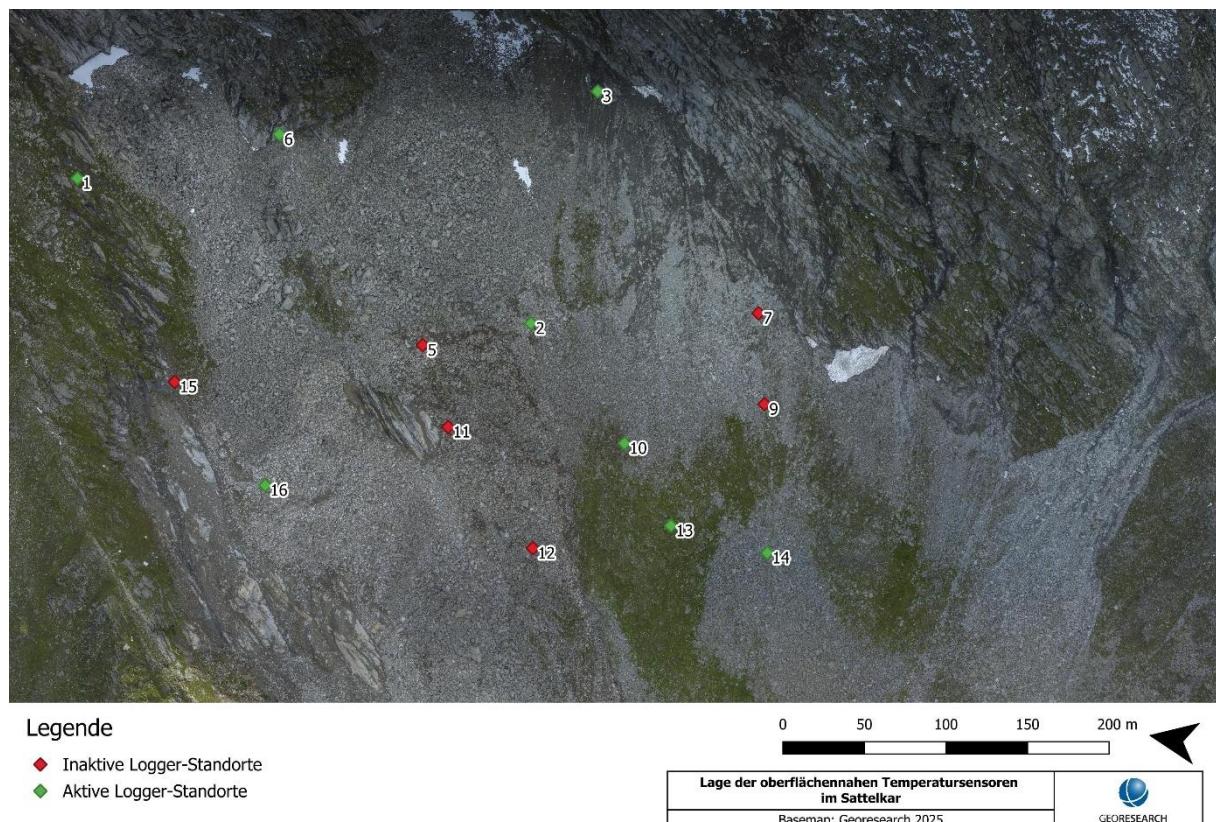


Abbildung 30: Lage der Temperaturlogger im Sattelkar (Temperaturmessung in 10 cm Tiefe).

Die Jahresmitteltemperaturen der Logger #1–16 (Logger #4 und #15 lieferten keine verwertbaren Daten) zeigen aufgrund unterschiedlicher Höhenlage, Hangneigung, Vegetationsbedeckung und Korngrößenverteilung eine ausgeprägte räumliche Variabilität. Das Jahresmittel des kältesten Messstandortes ($1,47^{\circ}\text{C}$; Logger #10) unterscheidet sich vom wärmsten Standort ($3,57^{\circ}\text{C}$; Logger #13) um $2,1^{\circ}\text{C}$. Für die Berechnung der Jahresmitteltemperaturen wurden ausschließlich vollständige Jahresdatensätze berücksichtigt (Abbildung 31, Tabelle 10).

Da sich die verfügbaren Zeiträume der Logger unterscheiden, ist die direkte Vergleichbarkeit der Jahresmittelwerte mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren. Dennoch unterstreichen die Ergebnisse die Bedeutung räumlich verteilter Messungen an unterschiedlichen Standorten innerhalb des Kares, um ein repräsentatives Gesamtbild der thermischen Untergrundbedingungen zu erhalten. Über alle Logger-Standorte gemittelt lag die Jahresmitteltemperatur im Beobachtungszeitraum von 2015 bis 2025 bei $2,45^{\circ}\text{C}$.

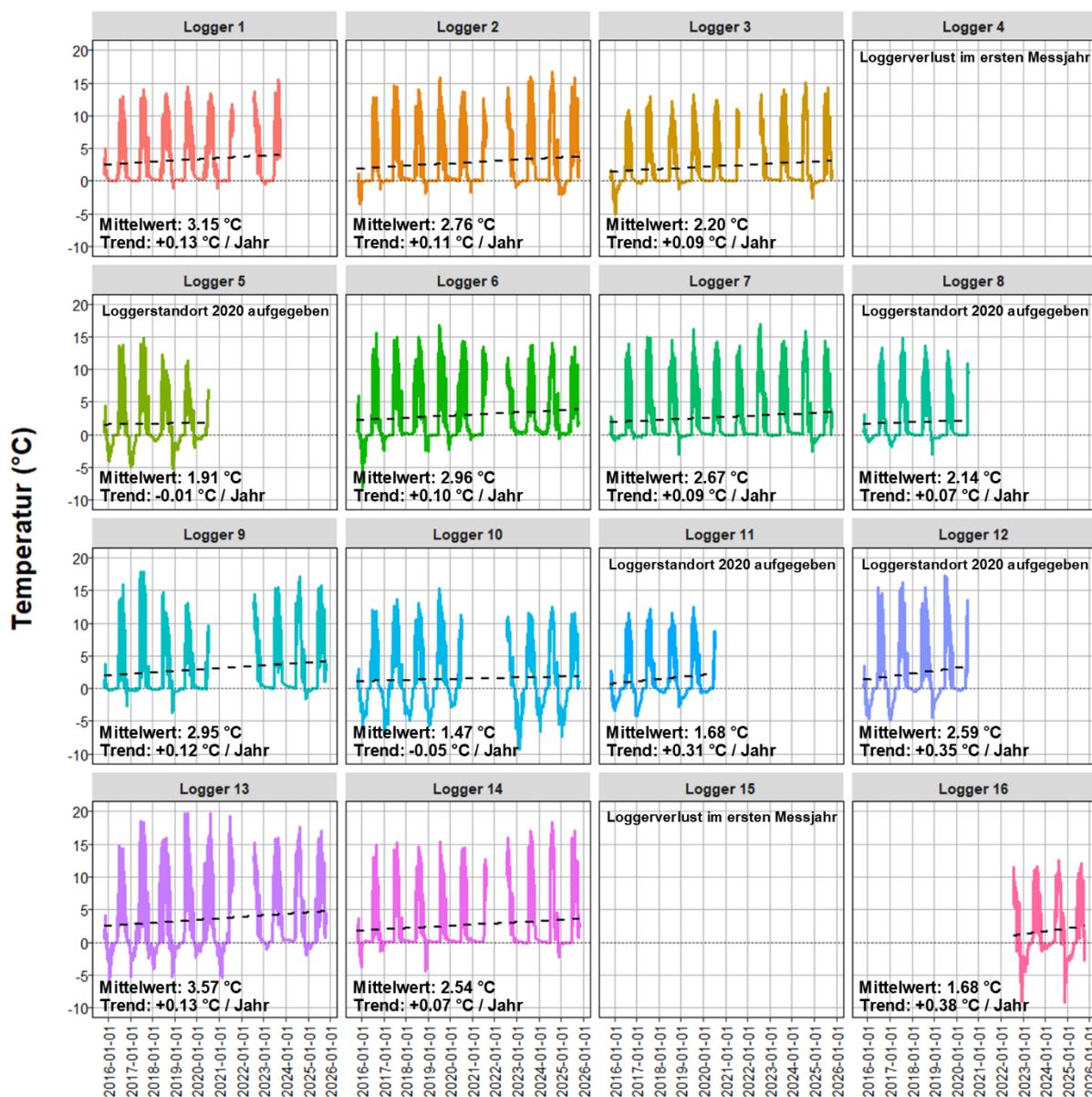


Abbildung 31: Untergrundtemperaturen im Sattelkar im gesamten Beobachtungszeitraum (22.10.2015 bis 23.10.2025). Unvollständige Jahresdatensätze wurden nicht in die Mittelwert- und Trendberechnungen miteinbezogen.

Trendanalysen auf Basis linearer Regressionsmodelle belegen einen deutlichen Anstieg der Untergrundtemperaturen im Beobachtungszeitraum. Der mittlere Erwärmungstrend beträgt +0,09 °C pro Jahr und steht damit in guter Übereinstimmung mit dem Anstieg der mittleren Lufttemperatur gemäß Wetterstationsdaten bzw. INCA-Daten (vgl. Abbildung 16). In die Trendberechnung wurden ausschließlich Logger-Standorte mit einer Mindestaufzeichnungslänge von sieben Jahren einbezogen. Die Ergebnisse zeigen somit, dass die Erwärmung des oberflächennahen Untergrundes im Sattelkar konsistent mit der beobachteten atmosphärischen Erwärmung ist.

Die teils signifikanten Unterschiede zu den höheren Trendwerten des Vorjahresberichts ergeben sich durch: (i) die nun deutlich längere und damit aussagekräftigere Zeitreihe – bedingt durch die erfolgreiche Logger-Auslesung im Jahr 2025, nachdem im Jahr 2024 keine Datenerhebung erfolgen konnte – sowie (ii) die ausschließliche Verwendung vollständiger Jahresdatensätze in der aktuellen Auswertung. Damit unterstreichen die Analysen einmal mehr die Bedeutung langfristiger Monitoringansätze für eine belastbare und valide Quantifizierung klimawandelbedingter Änderungsraten.

Die teils deutlichen Unterschiede der Trends zwischen den einzelnen Standorten (siehe Abbildung 31) sind einerseits auf die unterschiedlichen zugrunde liegenden Beobachtungszeiträume zurückzuführen und resultieren andererseits aus standortspezifischen Faktoren wie Schneedeckung, Exposition und dem Eintrag von Niederschlagswasser.

Trotz der teilweise deutlich über 0 °C liegenden Jahresmitteltemperaturen, der nur knapp unter 0 °C liegenden Wintertemperaturen (siehe Tabelle 10) sowie der ausgeprägten Temperaturzunahme kann für das Sattelkar daraus nicht automatisch auf eine Abwesenheit von Permafrost geschlossen werden. Bereits eine einfache Rückrechnung der Temperaturtrends zeigt, dass in Teilen des Karls noch vor wenigen Jahrzehnten Bedingungen geherrscht haben könnten, die die Permafrostbildung begünstigen. Das anschließende, klimawandelbedingte Abtauen des Permafrosts ist dabei als langfristiger Prozess zu verstehen, der sich über viele Jahrzehnte erstreckt. Bohrlochtemperaturmessungen aus den Alpen belegen in diesem Zusammenhang mehrfach, dass Untergrundtemperaturen über lange Zeiträume nicht im Gleichgewicht mit der atmosphärischen Temperatur stehen, sondern der atmosphärischen Entwicklung deutlich hinterherhinken.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die an den Logger-Standorten gemessenen Temperaturen – überwiegend in feinkörnigem Substrat – nicht vollständig repräsentativ für die thermischen Verhältnisse im grobblockigen Terrain sind. In Blockhalden (ähnlich der aktiven Sattelkarrutschung) dringt die durch direkte Sonneneinstrahlung angetriebene sommerliche Erwärmung nur stark gedämpft in den Untergrund ein, da die Luft in den großen Hohlräumen zwischen den Blöcken eine effektive thermische Isolation bewirkt. Im Winter hingegen kann es durch Kaltluftventilation in diesen Hohlräumen zu einer ausgeprägten Abkühlung des Untergrundes kommen, was eine effiziente Herabsetzung der Temperaturen begünstigt (schwere, kalte Luft dringt in die Zwischenräume des Untergrunds ein). Aufgrund dieser thermischen Filterwirkung werden lokale Permafrostvorkommen trotz positiver Lufttemperaturen oftmals über lange Zeiträume konserviert. Vor diesem Hintergrund ist auch

Tabelle 10: Durchschnittstemperatur (MW), Minimumtemperatur (MIN), Maximumtemperatur (MAX), Wintertemperatur (WIN) für das Sattelkar für den Zeitraum 01.01.2016 bis 31.12.2024. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.).

2016				2017				2018				2019				
MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°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
# 16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
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				2023				
MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	
# 1	3,2	-1,5	17,6	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0
# 2	2,7	-2,4	17,9	0,2	-	-	-	-	-	-	-	3,2	-0,6	21,5	-0,2	
# 3	2,3	0,0	16,5	0,1	-	-	-	-	-	-	-	2,6	0,1	23,4	0,2	
# 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 6	3,2	-0,9	20,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	3,1	0,0	16,9	0,4	
# 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	3,0	-0,1	18,3	-0,1
# 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,5	0,0	20,3	0,2	
# 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9	-9,3	14,3	-5,3	
# 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 13	3,7	-4,6	^a 38,1	-0,6	-	-	-	-	-	-	-	3,9	-1,2	22,1	-0,4	
# 14	2,7	0,0	21,8	0,2	-	-	-	-	-	-	-	2,9	0,0	25,5	0,1	
# 16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5	-4,6	12,8	-2,5	
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	2,8	-1,6	19,2	-0,8
2024																
MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	MW (°C)	MIN (°C)	MAX (°C)	WIN (°C)	
# 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 2	3,2	-2,3	23,0	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 3	2,4	-2,9	22,7	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 6	3,2	-0,7	17,3	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 7	2,8	-2,9	20,0	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 9	3,5	-2,0	21,9	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 10	1,3	-6,7	15,4	-2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 13	3,9	-2,6	24,2	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 14	2,7	-3,4	27,1	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
# 16	1,9	-9,6	13,5	-0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MW^b	2,8	-3,7	20,6	-0,1												

^a Standort mit starker direkter Strahlungseinflussung.

^b Berechnung des Mittelwerts aller Logger (unterste Zeile) erfolgte ohne Miteinbeziehung stark strahlungseinflusster Werte.

Datenaufzeichnung: Logger 4 und 15 fielen im ersten Messjahr aus und werden daher nicht gelistet. Logger 5, 8, 9, 10, 11 und 12 fielen im Jahr 2020 aus, Logger 1, 2, 3, 6 und 13 fielen im Jahr 2021 aus (Lebenszeit Batterie). An den Standorten von Logger 1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 13, 14 und 16 wurden im Sommer 2022 neue Temperaturlogger ausgelegt.

im Sattelkar – insbesondere in den grobblockigen Bereichen – weiterhin mit dem Vorhandensein isolierter, „reliktischer“ Permafrostvorkommen zu rechnen.

Tabelle 11 zeigt die oberflächennahen Untergrundtemperaturen aus dem Ofen- Mitter- und Steinkar für 2019 und 2020. Auch in diesen Karen ist in grobblockigen Bereichen mit letzten lokalen Permafrostvorkommen zu rechnen. Die Wintermitteltemperaturen liegen für alle Kare im negativen Bereich; das Mitterkar weist das höchste Wintermittel auf.

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

	2019				2020			
	Mittel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Winter (°C)	Mittel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Winter (°C)
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

1.9.2 Isotopenchemie

Nachdem im Sattelkar im Jahr 2024 auf Grund von Steinschlaggefahr keine Isotopenproben genommen werden konnten, wurden im Jahr 2025 am 16. Oktober acht weitere Proben genommen (Abbildung 32, Tabelle 12). Im Gesamtbeobachtungszeitraum (2019-2023) wurden somit im Sattelkar insgesamt 84 Wasserproben entnommen und ausgewertet.

Die Wassertemperatur bei der Probennahme lag im Mittel aller Proben bei 8,0 °C (die Messung der Wassertemperatur entfiel im Jahr 2025 auf Grund eines Sondendefekts). Delta-O-18 ($\delta^{18}\text{O}$, Maß für das Verhältnis der stabilen Sauerstoff-Isotope ^{18}O und ^{16}O) lag im Mittel bei -12,6 ‰. Delta-Deuterium (δD , Verhältnis der stabilen Wasserstoff-Isotope ^{2}H und ^{1}H) betrug im Mittel -88,1 ‰. Die Promille-Angaben beziehen sich auf das VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) und zeigen demnach eine sogenannte „Abreicherung“ an schweren Isotopen in den analysierten Wasserproben an. Es gilt: Je niedriger (negativer) der Promille-Wert, desto weniger schwere Isotope sind im Wasser enthalten und desto „leichter“ ist das Wasser.

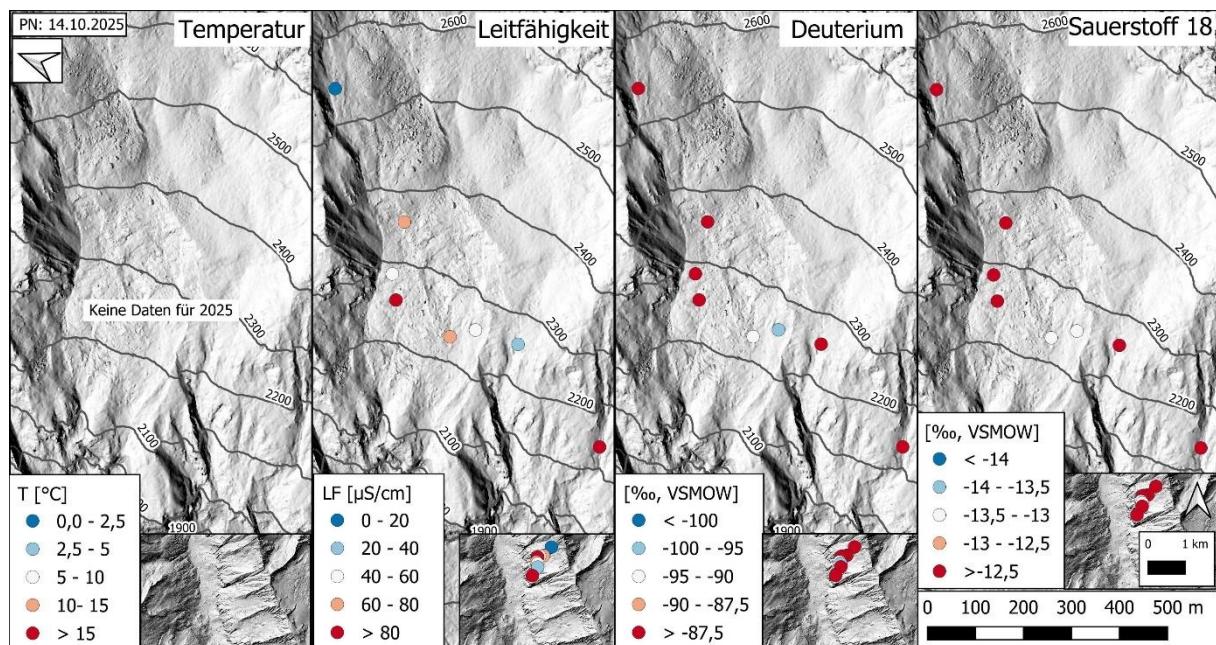


Abbildung 32: Ergebnisse der Wasserprobenahme im Sattelkar am 16.10.2025.

Die in den Wasserproben des Sattelkars gemessenen stabilen Isotopenverhältnisse ($\delta^{18}\text{O}$, δD) sind konsistent mit regionalen Vergleichsstudien vom Kitzsteinhorn (Lechner 2015) und liegen in guter Übereinstimmung mit der globalen meteorischen Wasserlinie (GMWL) nach Craig (Abbildung 33). In der Detailbetrachtung zeigt sich eine leichte Aufwärtsverschiebung der Werte gegenüber der GMWL. Diese auf einen erhöhten Deuteriumüberschuss hinweisende Verteilung ist typisch für alpine Niederschläge und bestätigt die grundsätzliche Plausibilität der Analyseergebnisse.

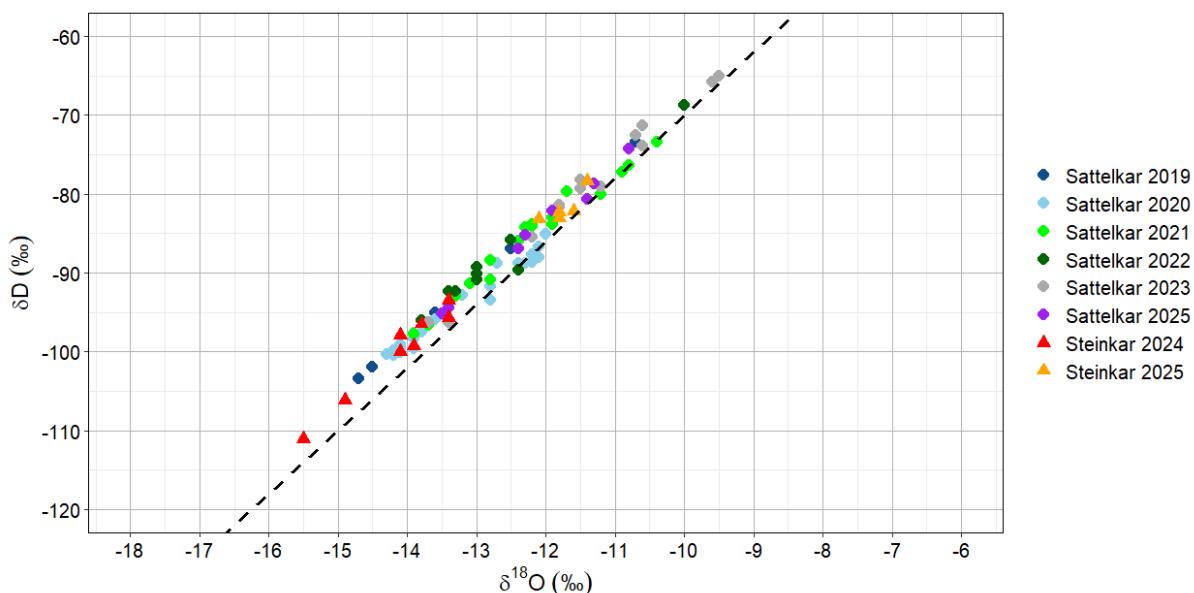


Abbildung 33: $\delta^{18}\text{O}$ - δD -Diagramm der Wasserproben aus dem Sattelkar (Punkte) und dem Steinkar (Dreiecke) für den Gesamtbeobachtungszeitraum (2019-2025). Ausgewählte Sattelkar-Proben der Jahre 2019 (dunkelblaue Punkte) und 2020 (hellblaue Punkte), sowie einige der „Blockgletscher-Proben“ aus dem Steinkar aus dem Jahr 2024 (rote Dreiecke) zeigen eine stärkere Abreicherung („leichte Wässer“), die auf Schmelzwasser aus (altem) Permafrost hinweisen.

Auf Grund der auf den Sommer und Herbst beschränkten Datenerfassung – die Probenahme im Sattelkar erfolgte ausschließlich im Juli, September und Oktober – zeigen die Isotopenwerte erwartungsgemäß eine recht geringe Variabilität. Proben aus der

Winterperiode 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 kleiner als -14 ‰ und gleichzeitig δD -Werte kleiner als -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 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: $\delta^{18}\text{O} = -14.72\text{ ‰}$, $\delta\text{D} =$

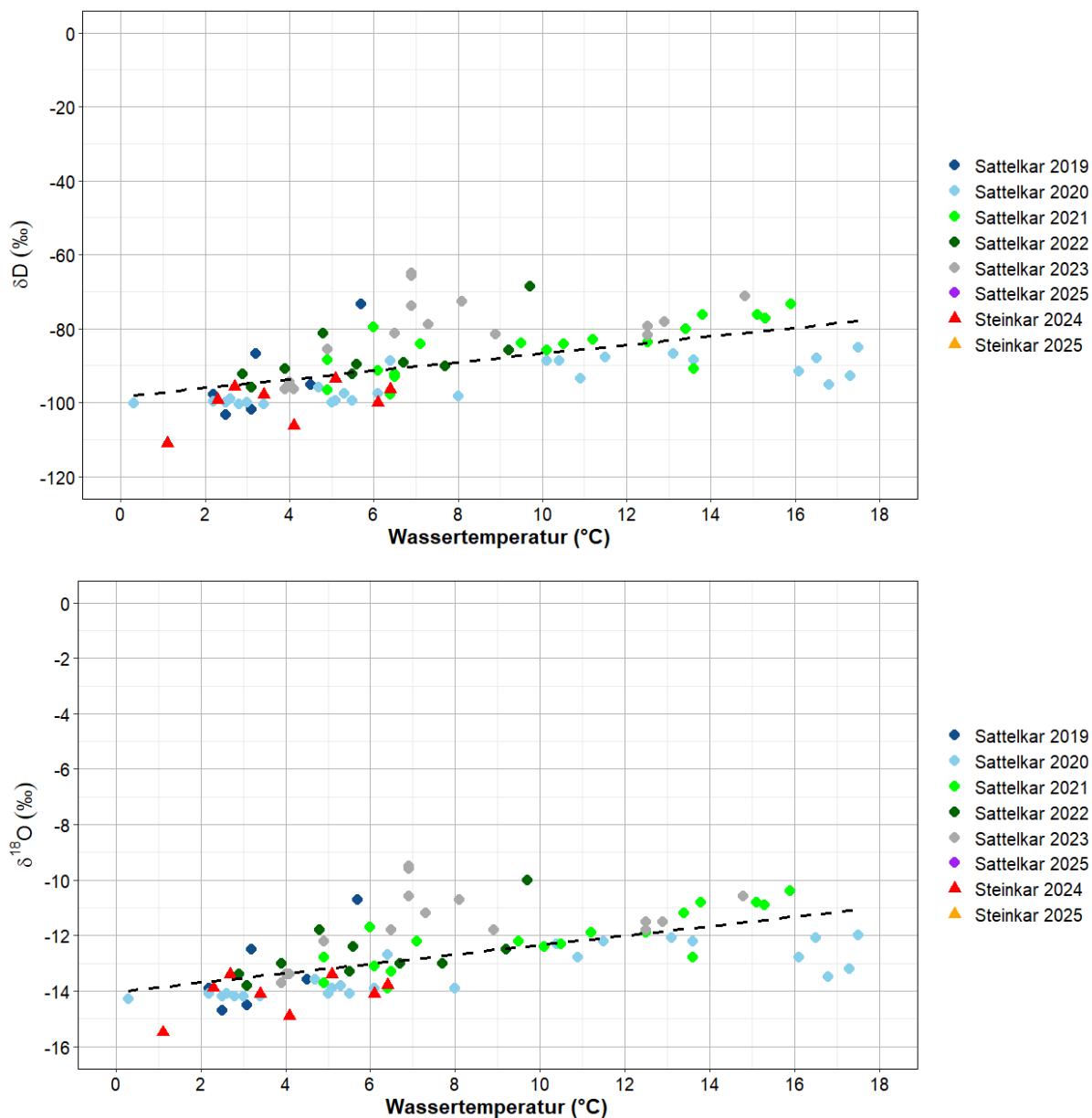


Abbildung 34: Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur zum Zeitpunkt der Probenahme und δD -Gehalt (oben) bzw. $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalt (unten). Um den Einfluss von Wässern aus der Schneeschmelze auszuschließen, wurden nur die im Monat September (04.09.2019, 08.09.2021, 27.09.2023) genommenen 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 abtäuender Permafrostlinsen zurückzuführen sein könnte.

-103.40 ‰, T = 2.5 °C; Probe 190903/0003, 04.09.2019: $\delta^{18}\text{O} = -14.47 \text{ ‰}$, $\delta\text{D} = -101.86 \text{ ‰}$, T = 3.1 °C) keine zutreffende Begründung zu sein.

Viel eher könnten die niedrigen Isotopenwerte der genannten Proben hingegen mit dem Abtauen von (alten) Permafrost-Vorkommen 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 Promillewerte) zu erwarten, genau wie in den hier beschriebenen Proben des Sattelkars.

Die vereinzelt auftretenden Wässer mit stark abgereichertem Isotopengehalt (wenig Deuterium, wenig ^{18}O) könnten somit auf das Vorliegen vereinzelter Permafrostlinsen innerhalb der Sattelkar-Rutschung schließen lassen. Ein großflächiges Permafrostvorkommen kann auf Grund des fehlenden flächendeckenden Isotopensignals ausgeschlossen werden. 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 34). 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 33, Abbildung 34, Abbildung 35). Während die im September 2019 und im Juli 2020 genommenen Proben noch zahlreiche Wässer mit niedrigen Deuterium- und ^{18}O -Werten bzw. niedrigen Temperaturen enthalten, fehlen diese in den Folgejahren (2021-2025). Die im Jahr 2025 neu entnommenen Sattelkar-Wasserproben fügen sich nahtlos in das beschriebene Gesamtbild ein. Der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert lag im Mittel bei -12,1 ‰, der δD -Wert lag bei -84,7 ‰ (Temperaturwerte konnten auf Grund eines Sondendefekts im Jahr 2025 nicht entnommen werden). Auch im Jahr 2025 wurden somit vergleichsweise schwere Wässer entnommen, die keinen Hinweis auf eine Permafrost-Herkunft enthalten.

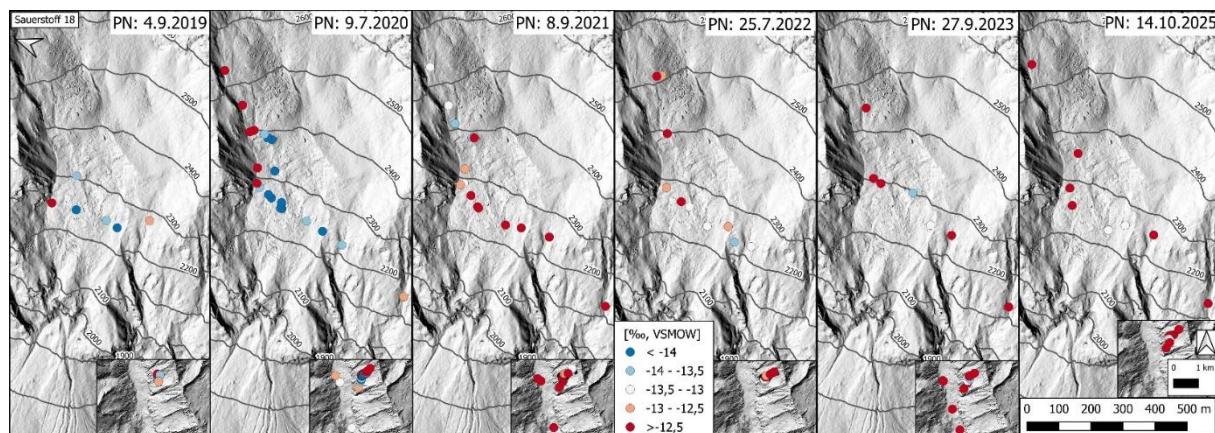


Abbildung 35: Abreicherung von ^{18}O (Sauerstoff-18) gegenüber VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) in den Wasserproben des Sattelkars (2019-2025). Je geringer der Wert, desto weniger schwerer Sauerstoff (^{18}O) ist in der Probe enthalten und desto „leichter“ ist das Wasser.

Möglicherweise ist die Permafrostdegradation im Sattelkar also schon so weit fortgeschritten, dass ein hydrochemischer Nachweis mittels stabiler Wasserisotope nicht bzw. nur mehr unter sehr selten auftretenden Rahmenbedingungen (z.B. langanhaltende Hitzewelle ohne Niederschlag) möglich ist. Weitere Isotopenbeprobungen des Sattelkars in den kommenden Projektjahren könnten hier wertvolle Aufschlüsse liefern und den fortschreitenden Übergang von einem permafrostbeeinflussten zu einem rein niederschlags- und schneeschmelzdominierten System weiter zu dokumentieren.

Im Jahr 2024 wurde erstmals eine Isotopenbeprobung des Steinkars durchgeführt, wobei insgesamt acht Proben genommen wurden (Abbildung 35, Tabelle 12). 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 gegenwärtige oder vergangene Permafrostbedingungen darstellt. Blockgletscher entstehen durch die langfristige Kriechbewegung eines eisreichen Schuttkörpers und setzen das Vorhandensein von Permafrost voraus. Die Auswertung der vorliegenden digitalen Geländemodelle zeigt für den Zeitraum 2012–2023 eine leichte, aber konsistente Vorstoßbewegung des Steinkar-Blockgletschers (Abbildung 23) und bestätigt damit einen ausreichenden Eisgehalt für das Aufrechterhalten einer Kriechbewegung, womit der Blockgletscher als aktiv einzustufen ist.

Die Wassertemperatur am Quellaustritt unmittelbar unterhalb der Blockgletscherstirn betrug 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 zwingendermaßen zu einer Erhöhung der Wassertemperatur beigetragen hätten. Auf Grund der schneefreien Bedingungen zum Zeitpunkt der Probenahme am 25.10.2024 kann Schneeschmelze als Herkunftsart ausgeschlossen werden, wodurch die Schmelze von Untergrundeis aus dem Permafrostkörper des Blockgletschers als einzige plausible Erklärung verbleibt.

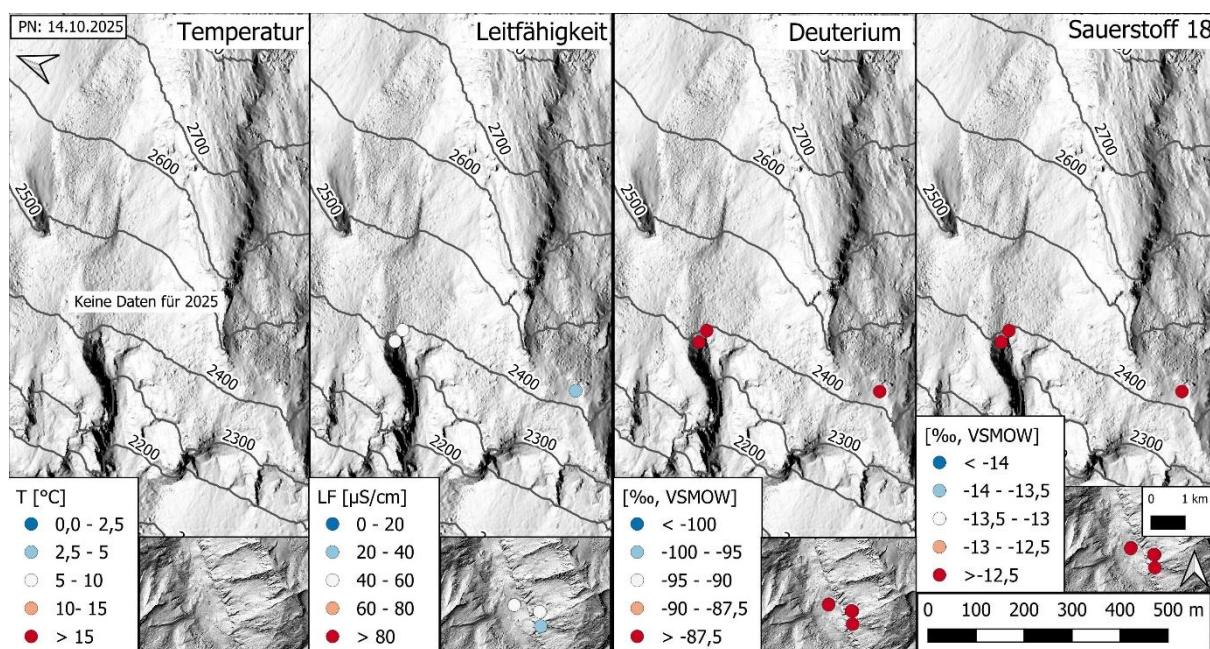


Abbildung 36: Ergebnisse der Wasserprobenahme im Steinkar am 15.10.2025.

Die an der Blockgletscherstirn genommenen Wasserprobe weist einen Deuterium-Wert von -111.1 ‰ und einen $\delta^{18}\text{O}$ -Wert von -15.51 ‰ auf. Es sind dies die mit Abstand niedrigsten („leichtesten“) Isotopenwerte unter allen im Sattel- und Steinkar genommenen Wasserproben. Die Steinkar-Proben aus dem Jahr 2024 liefern somit ein weiteres Indiz für die formulierte „Permafrost-Theorie“ und legen 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.

Im Jahr 2025 konnten auf Grund der vorherrschenden trockenen Bedingungen keine weiteren Proben an der Stirn des Steinkar-Blockgletschers entnommen werden. Die im Vorjahr schüttende Quelle war zum Zeitpunkt der Begehung am 16.10.2025 nicht aktiv. In niedrigeren Lagen entnommene Proben an der Trogschulter sowie am Talboden des Obersulzbachtals zeigen für das aus dem Steinkar abfließende Wasser keine relevante Isotopen-Abreicherung (= keine „leichten“ Wässer), sondern ein vergleichsweise schweres isotopisches Signal. Entsprechend ergaben sich aus den Steinkar-Proben des Jahres 2025 keine zusätzlichen Hinweise auf einen signifikanten Beitrag von schmelzendem Permafroststeis. Auch in unmittelbarer Nähe des Blockgletschers ist der hydrochemische Einfluss von Permafrost-Schmelzwasser somit stark von den jeweiligen hydrologischen Randbedingungen abhängig und zeitlich hochvariabel.

Tabelle 12: Ergebnisse der Isotopenbeprobung des Steinkars (15.10.2025) und Sattelkars (16.10.2025). Für die Isotopenbeprobung 2025 liegen aufgrund eines technischen Defekt der Sonde keine Temperaturmessungen vor.

Probenummer	Datum	Temperatur (°C)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
1	15.10.2025	n. a.	-12,1	-83,2
2	15.10.2025	n. a.	-11,8	-82,3
3	15.10.2025	n. a.	-11,4	-78,4
4	15.10.2025	n. a.	-11,6	-82,2
5	15.10.2025	n. a.	-11,8	-83,1
6	16.10.2025	n. a.	-11,4	-80,6
7	16.10.2025	n. a.	-12,3	-85,2
8	16.10.2025	n. a.	-13,5	-95,2
9	16.10.2025	n. a.	-13,4	-94,4
10	16.10.2025	n. a.	-12,4	-86,9
11	16.10.2025	n. a.	-11,3	-78,7
12	16.10.2025	n. a.	-11,9	-82,1
13	16.10.2025	n. a.	-10,8	-74,3

Schlussfolgerungen

Im Sommer 2005 führten Starkniederschläge im unteren Drittel des Sattelkars zur intensiven Erosion von Hangschutt- und Moränenmaterial. 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 2 Mio. m³. Allein seit dem Jahr 2010 (Datum der ersten 3D-Geländeerfassung) wurden knapp 1 Mio. m³ Sediment aus dem Sattelkar ausgetragen. Davon wurden rund 600.000 m³ am Talboden (Schuttkegel) abgelagert, während etwa 400.000 m³ vom Obersulzbach aus dem System ausgetragen wurden.

Die Bewegungsraten der Rutschmasse zeigten von 2005 bis zum Sommer 2021 eine deutliche Beschleunigung. Seit dem Herbst 2021 ist hingegen eine Verlangsamung der Massenbewegung zu beobachten, die sich auch im Jahr 2025 fortsetzte. Mögliche Ursachen dieser Abnahme sind ein abnehmender Materialnachschub sowie eine reduzierte Wasserverfügbarkeit. Die jährlichen Bewegungsraten sind in der unteren Hälfte des Sattelkars mit im Mittel rund 22 m pro Jahr etwa drei- bis viermal höher als im oberen Karbereich (im Mittel rund 7 m pro Jahr). Darüber hinaus zeigt sich eine ausgeprägte saisonale Differenzierung: Die sommerlichen Bewegungsraten (~ Juli bis September) liegen im Mittel etwa drei Mal höher als jene in der Periode Herbst bis Frühjahr (~ Oktober bis Juni). Dieser ausgeprägte saisonale Kontrast deutet darauf hin, dass die Verfügbarkeit von flüssigem Wasser einen zentralen Steuerungsfaktor der Massenbewegung im Sattelkar darstellt. Die höchsten Bewegungsraten treten in jener Jahreszeit auf, in der infolge von Niederschlag und Schmelzwasserzufuhr die Wasserverfügbarkeit im System am größten ist, was auf eine hydraulisch kontrollierte Dynamik der Rutschung hindeutet.

Die statistische Analyse der meteorologischen und hydrologischen Rahmenbedingungen der letzten Jahrzehnte zeigt eine langfristige Zunahme von Starkniederschlagsereignissen und Abflussspitzen sowie einen stark ausgeprägten Lufttemperaturanstieg. Diese Trends (erhöhte Wasserverfügbarkeit, zunehmende Temperaturen) begünstigen die Mobilisierung von Sediment in hochalpinen Karen und tragen daher zu einer erhöhten Eintretenswahrscheinlichkeit großer Erosionsereignisse bei.

Ein direkter kausaler Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Dauer- und Starkniederschlagsereignissen und erhöhte Bewegungsaktivität ist plausibel und wird durch die vorliegenden Messdaten gestützt. Eine detaillierte Quantifizierung dieses Zusammenhangs würde jedoch ein zeitlich hochauflöstes Bewegungsmonitoring in Kombination mit lokalen Niederschlags- und Bodenfeuchtemessungen erfordern.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass monokausale Erklärungsansätze („Je stärker der Niederschlag, desto schneller die Rutschung“) dem komplexen Bewegungsregime der Sattelkar-Rutschung nicht gerecht werden. Interne Faktoren wie unterirdische Wasserwegigkeit, Korngrößenzusammensetzung, temporäre Wassersättigung, Materialerschöpfungseffekte sowie Kohäsionsunterschiede infolge vorhandener Permafrostlinsen spielen für das Bewegungsverhalten eine wesentliche Rolle und müssen bei

Prognoseabschätzungen berücksichtigt werden. Die kinematische Dynamik der Rutschung lässt sich daher nicht allein durch Niederschlagsdaten 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 zwischenzeitliche, starke Beschleunigung der Rutschmasse (Höhepunkt im Sommer 2021) 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) um rund +0.1 °C pro Jahr erhöht. Diese trendhafte Erwärmung ist konsistent Erwärmungsraten vergleichbarer hochalpiner Wetterstationen. Trotz stark steigender Temperaturmittelwerte deuten die teils niedrigen Wintertemperaturen sowie vereinzelte Ergebnisse von Isotopenbeprobungen („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 unkonsolidierte Schuttoberfläche ist stark erosionsanfällig und reagiert sensibel auf intensiven Wassereintrag (Starkniederschläge, Schneeschmelze) – die Folge: hohe (sommerliche) Bewegungsraten, die sich jedoch nicht in einer Zunahme großer Einzelereignisse manifestieren, sondern durch kontinuierlichen Massenaustrag.

Die Nachbarkare Ofen- Mitter- und Steinkar zeigen momentan keine mit dem Sattelkar vergleichbaren Destabilisierungstendenzen, wie der Vergleich digitaler Geländemodelle der Jahre 2012 und 2023 eindeutig belegt. Die Morphometrien der Kare weisen jedoch große Ähnlichkeiten mit dem Sattelkar auf – sollte es in den Nachbarkaren zu ähnlichen spontanen, lokalen Niederschlags-/Erosionsprozessen wie im Jahr 2005 im Sattelkar kommen, könnten diese aufgrund der sehr ähnlichen topo-klimatischen Rahmenbedingungen auch in den Nachbarkaren zu einer signifikanten, großflächigen Destabilisierung beitragen.

Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit

In der aktuellen Projektphase (2024-2027) wurden zahlreiche Tätigkeiten im Bereich der Publikations- und Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt; diese umfassen 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.
- Keuschnig, M.: „Auswirkungen des Klimawandels im Hochgebirge Grundlagen für eine erfolgreiche Klimawandelanpassung im hochalpinen Raum“, Vortrag im Rahmen der Protect-Our-Winters (POW) Guides Alliance, Bruck an der Glocknerstraße, 21.02.2025.
- Keuschnig, M.: „Klimasensitive, hochalpine Kare. Das Sattelkar.“ Vortrag im Rahmen des Nationalparktags, Mittersill, 18.09.2025.
- Keuschnig, M.: „Auswirkungen des Klimawandels im Hochgebirge Grundlagen für eine erfolgreiche Klimawandelanpassung im hochalpinen Raum“, Vortrag im Rahmen der Veranstaltung „Berge im Umbruch – Wie der Klimawandel unsere Alpen verändert“, Klimamodellregionen Pinzgau, Lofer, 27.11.2025.

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.
- Braunstingl, Rainer (2006): Permafrostprobleme am Großvenediger – Beispiel Obersulzbachtal. Geoforum Umhausen, 19.-20. Oktober 2006.
- 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

Abbildung 1: Untersuchungsgebiet. Das Sattelkar ist geprägt von mächtigen Sedimentablagerungen aus den rundum aufragenden Granitgneiswänden und wurde intensiv glazial und periglazial geformt.	8
Abbildung 2: Mächtige Sedimentablagerungen und steil aufragende Granitgneiswände prägen das Sattelkar (09.07.2020).	8
Abbildung 3: Umriss der Blockgletscher-ähnlichen Landform im Sattelkar (16.07.2018).	9
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).	9
Abbildung 5: Stromartiges Abrutschen von Hangschutt und Felssturzablagerungen, Sattelkar (12.07.2018).	10
Abbildung 6: UAS-Aufnahme des Sattelkars (31.10.2024).	10
Abbildung 7: Datengrundlage (1 km²-Rasterzelle) der INCA-Analyse für das Sattelkar (Quelle: https://data.hub.geosphere.at/).	14
Abbildung 8: Frische Sedimentablagerungen in Folge starker Muraktivität im Pilatuskar (Foto: Robert Delleske, GEORESEARCH, 03.09.2024).	15
Abbildung 9: Installation von Boden-Kontrollpunkten (12.07.2018).	16
Abbildung 10: Kamerasytem zur Überwachung des Sattelkars (06.10.2022).	18
Abbildung 11: Auslesen der Untergrundtemperaturen und Wasserprobennahme im Sattelkar (16.10.2025).	19
Abbildung 12: Tage pro Jahr mit Niederschlagssummen größer als 20 mm (blau) bzw. 30 mm (rot) für (A) Wetterstation Kürsinger Hütte, (B) Sattelkar (INCA), (C) Pilatuskar/Rauriser Tal (INCA) und (D) Tischlerkar/Kötschachtal (INCA). An der Kürsinger Hütte wurden die Jahre 2022 und 2025 auf Grund von Datenlücken aus der Trendanalyse ausgeschlossen.	24
Abbildung 13: Tagesanzahl mit Spitznenabflüssen für (A) Pegel Kees (> 8m³/s, n = 225) und (B) Pegel Sulzau (> 22 m³/s, n = 191) für die Gesamtzeitreihe (schwarz) und für den Vergleichszeitraum der Niederschlagsmessung an der Kürsinger Hütte (rot).	27
Abbildung 14: Saisonaler Niederschlags- und Abflussgang seit 01.01.2014. Rote Pfeile markieren den Zeitpunkt des bis dato letzten großen Murereignisses am 30./31.07.2014.	29
Abbildung 15: INCA-Monatsmittel der Lufttemperatur für das Sattelkar. Trendberechnung erfolgte auf Basis der Jahresmitteltemperatur.	30
Abbildung 16: Mittlere Sommer-Lufttemperatur (Mai-September) für Sattelkar (INCA) und Kürsinger Hütte (Messwerte). Für die Kürsinger Hütte wurden auf Grund von Datenlücken keine Mittelwerte für die Jahre 2009 und 2016 berechnet.	31
Abbildung 17: Infolge von Starkniederschlägen kam es im Jahr 2005 oberhalb der Trogshulter zur Reaktivierung einer alten Anrißlinie (rote Markierung). In den darauffolgenden Jahren entwickelte sich daraus eine tiefgreifende, rückschreitende Massenbewegung, die schließlich auch den Blockgletscher im oberen Karbereich vollständig erfasste (schwarze Markierung) (Foto: Landesgeologie Salzburg, 03.07.2006).	32
Abbildung 18: Orthofotovergleich 2003-2025 (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 bereits klar ersichtlich (siehe „A“). Auf den Orthofotos der Folgejahre (2012-2025) ist die rapide, rückschreitende Vergrößerung der Sattelkar-Rutschung deutlich zu erkennen.	33
Abbildung 19: Flächenentwicklung der Sattelkar-Rutschung im Zeitraum 2003-2025.	34
Abbildung 20: Bewegungsraten der Sattelkar-Rutschung (2003-2025), bestimmt mittels Feature Tracking einzelner Blöcke. Von der Initiierung im Jahr 2005 bis zum Sommer 2021 zeigen die Bewegungsraten eine kontinuierliche Zunahme, gefolgt von einer Verlangsamung in den Jahren 2022-2024. Die sommerlichen Bewegungsraten sind etwa dreimal höher als jene im übrigen Jahresverlauf.	35
Abbildung 21: Höhen- und Volumenveränderung im Erosions- und Akkumulationsbereich der Sattelkar-Rutschung im aktuellen Jahr (Sommer 2024 bis Sommer 2025).	37
Abbildung 22: 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 03.10.2025).	38

<i>Abbildung 23: Differenzmodell der Geländeoberfläche auf Basis eines ALS-Datenvergleichs der Jahre 2012 und 2023. Sichtbar sind überwiegend stabile Verhältnisse in den Nachbarkaren, lokale Erosion in Schutthalden unter den Karrück-wänden, Erosionsstrukturen entlang von Abflussrinnen, sowie ein leichtes Vorstoßen des Blockgletschers im Steinkar.</i>	39
<i>Abbildung 24: Spätsommeraufnahme (20.09.2025) und Winteraufnahme (10.12.2025) des automatischen Kamerasytems.</i>	40
<i>Abbildung 25: Vergleich der Webcam-Bilder vor und nach dem Starkregenereignis am 02./03.06.2025 (Kürsinger Hütte: 39,1 mm bzw. 26,1 mm Tagesniederschlag). Linkes Bild: 01.06.2025, rechtes Bild: 05.06.2025. Im rechten Bildausschnitt ist eine deutliche, talwärtige Verlagerung der Blöcke sichtbar.</i>	41
<i>Abbildung 26: Vergleich der Webcam-Bilder vor und nach dem Starkregenereignis am 14./15.06.2025 (INCA-Stundenspitzen von 8,0 mm bzw. 8,6 mm). Linkes Bild 13.06.2025, rechtes Bild 18.06.2025. Im Bereich der Markierung im rechten Bild ist ein Block erkennbar, der vor dem Starkregenereignis noch nicht sichtbar war.</i>	42
<i>Abbildung 27: Vergleich der Webcam-Bilder vor und nach dem Starkregenereignis am 05.07.2025 (Kürsinger Hütte: Stundenspitze 8,5 mm). Linkes Bild: 04.07.2025, rechtes Bild: 06.07.2025. Im rechten Bild ist zentral im markierten Bereich ein Block sichtbar, der vor dem Ereignis noch nicht an dieser Stelle war.</i>	42
<i>Abbildung 28: Vergleich der Webcam-Bilder vor und nach den starken Niederschlägen am 28./29.08.2025 (Tagesniederschlag Kürsinger Hütte: 56,2 mm, INCA 38,2 mm). Linkes Bild: 27.08.2025, rechtes Bild 31.08.2025. Im linken Bild sind Blöcke sichtbar, die während der Niederschläge bewegt/ausgetragen wurden und daher im rechten Bild nicht mehr sichtbar sind.</i>	43
<i>Abbildung 29: Webcam-Vergleich vor und nach der sommerlichen Niederschlagsperiode: linkes Bild 01.07.2025, rechtes Bild: 20.09.2025. In den drei markierten Bereichen sind grobblockige Ablagerungen erkennbar, die zu Beginn der Niederschlagsperiode noch nicht vorhanden waren.</i>	43
<i>Abbildung 30: Lage der Temperaturlogger im Sattelkar (Temperaturmessung in 10 cm Tiefe).</i>	44
<i>Abbildung 31: Untergrundtemperaturen im Sattelkar im gesamten Beobachtungszeitraum (22.10.2015 bis 23.10.2025). Unvollständige Jahresdatensätze wurden nicht in die Mittelwert- und Trendberechnungen miteinbezogen.</i>	45
<i>Abbildung 32: Ergebnisse der Wasserprobenahme im Sattelkar am 16.10.2025.</i>	49
<i>Abbildung 33: $\delta^{18}\text{O}$-δD-Diagramm der Wasserproben aus dem Sattelkar (Punkte) und dem Steinkar (Dreiecke) für den Gesamtbeobachtungszeitraum (2019-2025). Ausgewählte Sattelkar-Proben der Jahre 2019 (dunkelblaue Punkte) und 2020 (hellblaue Punkte), sowie einige der „Blockgletscher-Proben“ aus dem Steinkar aus dem Jahr 2024 (rote Dreiecke) zeigen eine stärkere Abreicherung („leichte Wässer“), die auf Schmelzwasser aus (altem) Permafrost hinweisen.</i>	49
<i>Abbildung 34: Zusammenhang zwischen der 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 abtauender Permafrostlinsen zurückzuführen sein könnte.</i>	50
<i>Abbildung 35: Abreicherung von ^{18}O (Sauerstoff-18) gegenüber VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) in den Wasserproben des Sattelkars (2019-2025). Je geringer der Wert, desto weniger schwerer Sauerstoff (^{18}O) ist in der Probe enthalten und desto „leichter“ ist das Wasser.</i>	51
<i>Abbildung 36: Ergebnisse der Wasserprobenahme im Steinkar am 15.10.2025.</i>	52

Tabellen

<i>Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Befliegungen im gesamten Untersuchungszeitraum 2018-2025. An den mit * markierten Daten konnten die Befliegungen aufgrund schlechter Witterungsverhältnisse nicht an einem Tag durchgeführt werden.</i>	17
<i>Tabelle 2: Übersicht der im Sattelkar ausgelegten Temperaturlogger.</i>	20
<i>Tabelle 3: Übersicht der entnommenen Wasserproben zur Bestimmung der Temperatur, Leitfähigkeit und Isotopenverhältnisse der Parameter Deuterium, Sauerstoff-18 und Sauerstoff-17.</i>	21
<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 Niederschlagsmessung an der Kürsinger Hütte war im Jahr 2025 nur 94 Tage in Betrieb (01.05.-27.09.2025; Datenlücke von 05.07.-27.08.2025). In den Vorjahren war die Station typischerweise 150-200 Tage in Betrieb.</i>	23
<i>Tabelle 5: Die zehn höchsten Niederschlags-Tagessummen für (a) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009-2025) (linke Tabellenhälfte) und (b) Sattelkar auf Basis des INCA-Modells (2015-2025) (rechte Tabellenhälfte). Korrespondierende Wertepaare sind farblich hervorgehoben. Die Höchstwerte 2025 werden ggf. in der jeweils letzten Zeile ergänzt.</i>	25
<i>Tabelle 6: Die zehn höchsten Niederschlags-Stundensummen für (a) Wetterstation Kürsinger Hütte (2009-2025) (linke Tabellenhälfte) und (b) Sattelkar auf Basis des INCA-Modells (2015-2025) (rechte Tabellenhälfte). Korrespondierende Wertepaare sind farblich hervorgehoben. Die Höchstwerte 2025 werden in der jeweils letzten Zeile ergänzt.</i>	25
<i>Tabelle 7: Die fünf höchsten Niederschlags-Stundensummen des Jahres 2025 im Vergleich INCA-Daten (linke Tabellenhälfte) und Wetterstation Kürsingerhütte (rechte Tabellenhälfte) (absteigend gereiht). Korrespondierende Ereignisse sind farblich hervorgehoben.</i>	26
<i>Tabelle 8: Die fünf höchsten Niederschlags-Tagessummen des Jahres 2025 im Vergleich INCA-Daten (linke Tabellenhälfte) und Wetterstation Kürsingerhütte (rechte Tabellenhälfte) (absteigend gereiht). Korrespondierende Ereignisse sind farblich hervorgehoben.</i>	26
<i>Tabelle 9: Die zehn höchsten Abfluss-Tagesmittelwerte für (a) Pegelmessstelle Kees und (b) Pegelmessstelle Sulzau in der Beobachtungsperiode 2009-2025 (absteigend gereiht). Die Höchstwerte 2025 werden in der jeweils letzten Zeile ergänzt.</i>	28
<i>Tabelle 10: Durchschnittstemperatur (MW), Minimumtemperatur (MIN), Maximumtemperatur (MAX), Wintertemperatur (WIN) für das Sattelkar für den Zeitraum 01.01.2016 bis 31.12.2024. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.).</i>	47
<i>Tabelle 11: Temperaturdaten (Durchschnitt, Minimum, Maximum, Winter) aus dem Ofenkar, Mitterkar und Steinkar für den Zeitraum 01.01.2019 bis 31.12.2020. Wintertemperatur = Mitteltemperatur der Monate Februar und März (01.02. bis 31.03.).</i>	48
<i>Tabelle 12: Ergebnisse der Isotopenbeprobung des Steinkars (15.10.2025) und Sattelkars (16.10.2025). Für die Isotopenbeprobung 2025 liegen aufgrund eines technischen Defekt der Sonde keine Temperaturnessungen vor.</i>	53