

Marco Kirchmair, BSc

**Wie ist das saisonale Muster der Blockgletscherdynamik in
den Hohen Tauern? Eine geotechnologie-basierte Fallstudie
am Dösener Blockgletscher, Ankogelgruppe**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium

Geospatial Technologies

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Mag. Dr. Harald Zandler

Mitbetreuer

MMag. Dr. Andreas Kellerer-Pirklbauer-Eulenstein

Institut für Geographie und Raumforschung

Universität Graz

Graz, Februar 2026

Abstract

Active rock glaciers respond sensitively to thermal and hydrological changes in alpine permafrost and therefore represent important indicators of climate-related environmental change. While annual movement rates of active rock glaciers are now often recorded within standardized monitoring programmes, their seasonal and subannual dynamics have so far been insufficiently studied in particular in Austria. This is mainly due to methodological limitations related to temporal resolution, spatial coverage and reproducibility and measurement accuracy, as subannual displacement signals are often small and may approach the detection limit of remote sensing-based velocity estimates.

The aim of this thesis is to systematically investigate the feasibility of detecting monthly velocity changes of an active rock glacier using UAV-based photogrammetry and automated image correlation. To support this workflow, a GUI-based processing tool was developed to enable standardized, transparent and reproducible analysis. The Dösener Rock Glacier in the Hohe Tauern mountain range serves as the study area and represents one of the longest continuously monitored permafrost sites in Austria. Monthly UAV surveys were carried out between June 2025 and September 2025 and were complemented by geodetic GNSS measurements carried out on the same dates. High-resolution orthomosaics were generated using a standardized Structure-from-Motion workflow, from which surface displacement fields were derived using subpixel-based image correlation. Methodological quality assurance was achieved through the use of stable reference areas, ground control points, and comparison with DGNSS-based point displacements.

The results reveal pronounced seasonal movement patterns, with increasing surface velocities during late summer. The fastest monthly interval was observed between August and September 2025, reaching a mean surface velocity of 1.34 mm/day within the reference area around long-term geodetic survey points. A robust comparison based on two-month intervals confirms this seasonal acceleration, with mean velocities increasing by approximately 22% from 0.97 mm/day (June–August 2025) to 1.18 mm/day (July–September 2025). Compared to annual mean velocities of 0.89–0.92 mm/day (2023–2025), late-summer velocities are therefore clearly higher compared to the annual average. At the same time, clear spatial differences within the rock glacier body become evident, supporting the results from the annual monitoring. This indicates a heterogenous control of movement processes by different topoclimatical and hydrological control of movement processes.

Validation results confirm that monthly displacements in the centimetre range can be reliably detected under suitable acquisition conditions. Limitations mainly arise from

weather-related reductions in image quality and systematic artefacts associated with image correlation.

Beyond the site-specific analysis, this thesis provides a methodological contribution towards the standardisation of motion analyses and explores the limits of UAV-based velocity estimation at subannual time scales. The developed GUI-based processing tool enables transparent and reproducible data processing and supports the integration of subannual velocity data into existing monitoring frameworks. Overall, the study demonstrates that UAV-based image correlation is a suitable approach for extending rock glacier monitoring to subannual time scales and contributes to an improved understanding of seasonal permafrost dynamics.

Zusammenfassung

Aktive Blockgletscher reagieren sensibel auf thermische und hydrologische Veränderungen des alpinen Permafrosts und stellen daher wichtige Indikatoren klimabedingter Umweltveränderungen dar. Während jährliche Bewegungsraten aktiver Blockgletscher mittlerweile im Rahmen standardisierter Monitoringprogramme erfasst werden, sind deren saisonale und subannuelle Dynamiken bislang insbesondere in Österreich nur unzureichend untersucht. Ursache hierfür sind vor allem methodische Einschränkungen hinsichtlich zeitlicher Auflösung, Flächenabdeckung und Reproduzierbarkeit sowie der Messgenauigkeit. Subannuelle Geschwindigkeitssignale liegen oft nahe der Nachweisgrenze fernerkundungsbasierter Geschwindigkeitsableitungen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Erfassbarkeit monatlicher Geschwindigkeitsänderungen eines aktiven Blockgletschers mittels UAV-gestützter Photogrammetrie und automatisierter Bildkorrelation systematisch zu untersuchen. Zur Unterstützung dieses Ansatzes wurde ein GUI-basiertes Auswertetool entwickelt, das eine standardisierte, transparente und reproduzierbare Analyse ermöglicht. Als Untersuchungsgebiet dient der Dösener Blockgletscher in den Hohen Tauern, einer der am längsten kontinuierlich beobachteten Permafroststandorte Österreichs. Im Zeitraum von Juni 2025 bis September 2025 wurden monatliche UAV-Befliegungen durchgeführt und durch geodätische GNSS-Messungen an denselben Terminen ergänzt. Auf Basis eines standardisierten Structure-from-Motion-Workflows wurden hochauflösende Orthomosaik erzeugt, aus denen mittels subpixelbasierter Bildkorrelation Verschiebungsfelder abgeleitet wurden. Die methodische Qualitätssicherung erfolgte durch den Einsatz stabiler Referenzflächen, Ground Control Points sowie den Vergleich mit DGNSS-basierten Punktverschiebungen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich ausgeprägte saisonale Bewegungsmuster mit einer Zunahme der Oberflächengeschwindigkeiten im Spätsommer. Das schnellste

Monatsintervall wurde zwischen August und September 2025 beobachtet und erreichte innerhalb der Referenzfläche im Bereich langfristiger geodätischer Messpunkte eine mittlere Geschwindigkeit von 1,34 mm/Tag. Eine robuste Einordnung über längere Zeitfenster bestätigt diese saisonale Beschleunigung: Zwischen Juni–August 2025 (0,97 mm/Tag) und Juli–September 2025 (1,18 mm/Tag) ergibt sich eine Zunahme der mittleren Geschwindigkeit um rund 22%. Im Vergleich zu den annuellen Mittelwerten von 0,89–0,92 mm/Tag (2023–2025) liegen die Spätsommergeschwindigkeiten damit deutlich über dem Jahresdurchschnitt. Gleichzeitig werden ausgeprägte räumliche Unterschiede innerhalb des Blockgletscherkörpers sichtbar, die auf eine heterogene topoklimatische und hydrologische Steuerung der Bewegungsprozesse hinweisen.

Die Validierung bestätigt, dass monatliche Verschiebungen im Zentimeterbereich unter geeigneten Aufnahmebedingungen zuverlässig detektiert werden können. Einschränkungen ergeben sich insbesondere durch witterungsbedingte Bildqualitätsverluste und systematische Artefakte der Bildkorrelation.

Über die standortspezifische Analyse hinaus leistet diese Arbeit einen methodischen Beitrag zur Standardisierung von Bewegungsanalysen und untersucht die Grenzen UAV-basierter Geschwindigkeitsableitungen im subannuellen Maßstab. Die entwickelte, GUI-basierte Auswertesoftware ermöglicht eine nachvollziehbare, reproduzierbare Verarbeitung und unterstützt die Integration subannueller Geschwindigkeitsdaten in bestehende Monitoringkonzepte. Insgesamt zeigt die Arbeit, dass UAV-basierte Bildkorrelation ein geeignetes Instrument zur Erweiterung des Blockgletschermonitorings auf subannuelle Zeitskalen darstellt und damit einen wichtigen Beitrag zum Verständnis saisonaler Permafrostdynamiken liefert.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Harald Zandler bedanken, der für mich stets eine offene Tür für mich hatte und sich immer die Zeit nahm, meine Fragen zu beantworten. Ich danke ihm nicht nur für die intensive fachliche Betreuung, sondern auch für die Zeit, für die gemeinsamen Feldbegehungen, den unzähligen Höhenmetern bei glühender Hitze mit schwerem Gepäck sowie die angenehmen Stunden während und nach den Messungen auf der Hütte.

Ebenso danke ich Andreas Kellerer-Pirklbauer-Eulenstein für die wertvollen fachlichen Hinweise, kritische Rückmeldungen sowie die inhaltliche Begleitung dieser Arbeit.

Ein weiterer Dank gilt Viktor Kaufmann für die konstruktiven Diskussionen und seine fachliche Unterstützung bei der Ausarbeitung dieser Arbeit.

Zudem möchte ich mich bei Wolfgang Sulzer bedanken, der mir im Rahmen der jährlichen Messkampagnen einer Lehrveranstaltung im Sommersemester 2024 die Möglichkeit gab, aktiv an den Messarbeiten mitzuwirken. Durch diese Erfahrung wurde mein Interesse an dieser Thematik überhaupt erst geweckt und nachhaltig geprägt.

Ein großer Dank gilt dem Nationalpark Hohe Tauern, insbesondere der Forschungskordinatorin Angelika Riegler, die das Potenzial meiner Masterarbeit erkannt und mir in Form eines Forschungsstipendiums die organisatorische und finanzielle Umsetzung meiner Forschungsarbeiten ermöglicht haben.

Ein sehr großer Dank geht zudem an alle HelferInnen sowie an die TeilnehmerInnen der Lehrveranstaltung im Sommersemester 2025, die mich während der Feldarbeiten tatkräftig unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt außerdem Carina Schlammerberger und Dominik Herler, die mir für die Feldbegehungen im Juli und September ihr Auto zur Verfügung gestellt haben.

Von Herzen danken möchte ich meiner Partnerin Marie Treffer, die mir während dieser Zeit stets mit großem Verständnis den notwendigen Raum und die erforderliche Zeit gegeben hat.

Zu guter Letzt möchte ich meinen StudienkollegInnen danken, welche mich auf diesen langen Weg begleitet haben. Die gegenseitigen Ermutigungen während der oft nächtelangen Programmierarbeiten, sowie der Stress am Ende jedes Semesters haben uns zusammengeschweißt. Ein besondere Dank gilt dabei vor allem meine MitstreiterInnen seit der ersten Stunde – Karina Löffler, Theresia Moll und Michael Riedl.

Hinweis zur Verwendung digitaler Hilfsmittel:

Für sprachliche Überarbeitungen und Übersetzungen wurden unterstützend die KI-Anwendung ChatGPT (OpenAI, zum Zeitpunkt der Nutzung aktuelle Version) sowie das Tool DeepL Übersetzer (Version 2025) verwendet. Die Verantwortung für sämtliche inhaltlichen, methodischen und schöpferischen Leistungen dieser Arbeit liegt vollumfänglich bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	ii
Zusammenfassung	iii
Danksagung	v
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	x
Abkürzungsverzeichnis	xi
1. Einleitung	1
2. Theoretischer Hintergrund	3
2.1. Struktur und Materialaufbau von Blockgletschern	3
2.2. Bewegungsmechanismen und saisonale Kinematik	6
2.3. Blockgletscher als Klimaindikatoren	7
2.4. Fernerkundungsgestützte Ansätze zur Bewegungsanalyse	9
2.5. Überblick über methodische Verfahren zur Bewegungsbestimmung	10
3. Untersuchungsgebiet	12
3.1. Lokaler Kontext und Lage	12
3.2. Klimatische und geologische Rahmenbedingungen	14
3.3. Dösener Blockgletscher als Forschungsobjekt	15
4. Methodik	17
4.1. Forschungskonzept	17
4.2. Datenerhebung	19
4.2.1 UAV-gestützte Bildaufnahmen	20
4.2.2 Geodätische GNSS-Messungen	21
4.3. Datenverarbeitung	25
4.3.1 Postprocessing	25
4.3.2 Photogrammetrische Auswertung (SfM)	26
4.3.3 Bildkorrelation	28
4.4. Validierung	31
4.4.1 Stabile Referenzpunkte und Level of Detection (LoD)	32
4.4.2 Abgleich von GNSS-Messungen mit UAV-basierten Korrelationsergebnissen	33
4.4.3 Geometrische Qualitätsbewertung der Orthophotos mittels GCPs	34

5. Ergebnisse	35
5.1. Entwicklung eines standardisierten Verarbeitungswerkzeuges.....	35
5.1.1 Modul 1 - Preprocessing	37
5.1.2 Modul 2 - Processing.....	38
5.1.3 Modul 3 - Postprocessing.....	40
5.1.4 Modul 4 – Validierung.....	41
5.2. Bewegungsmuster am Dösener Blockgletscher	43
5.2.1 Jährliche Bewegungsmuster	43
5.2.2 Subannuelle Bewegungsmuster	44
5.2.3 Vergleich annueller und subannueller Geschwindigkeitsverteilung	48
5.3. Validierung und Qualität der Messergebnisse	50
5.3.1 Level of Detection (LoD) auf stabilen Referenzflächen.....	50
5.3.2 Abgleich von DGNSS-Messungen mit UAV-basierten Korrelationsergebnissen.....	51
5.3.3 Geometrische Qualität der Orthomosaike (GCP-Analyse)	52
6. Diskussion	54
6.1. Saisonale Muster und interannuelle Veränderungen der Bewegungsaktivität	54
6.2. Datenqualität und methodische Einschränkungen	56
6.2.1 Nachweisgrenze und methodische Präzision	56
6.2.3 Systematische Artefakte der Bildkorrelation	59
6.2.4 Validierung und Referenzdaten.....	60
6.3. Bedeutung für Monitoring und Standardisierung	62
6.3.1 Einordnung im Global Climate Observing System (GCOS)-Monitoringrahmen	62
6.3.2 Aussagekraft subannueller Kinematik	63
6.3.3 Beitrag zur methodischen Standardisierung	64
7. Fazit	65
8. Literaturverzeichnis	67
Appendix	74

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematisches Vertikalprofil eines Blockgletschers mit Darstellung seiner strukturellen, thermischen, materialbezogenen und kinematischen Merkmale (nach Cicoira et al. 2020)	4
Abbildung 2 Überblick Untersuchungsgebiet – (A) Lage des Dösener Tals im Nationalpark Hohe Tauern (B) Schrägaufnahme des Dösener Blockgletschers (Aufnahme: 30.06.2025) (C) Detailkarte des Untersuchungsgebietes (Höheninformation – KAGIS 2023, Topographie – OSM 2025, EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)	13
Abbildung 3 Zeitliche Einordnung aller UAV-Messkampagnen zwischen 2023 und 2025 als Grundlage der multitemporalen Bewegungsanalyse (Eigene Darstellung 2025)	17
Abbildung 4 Methodischer Workflow zur Ableitung subannueller Blockgletscherbewegungen aus UAV-Photogrammetrie und GNSS-Daten (Eigene Darstellung 2025)	18
Abbildung 5 Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes mit den beiden UAV-Flugmustern (blau = West, orange = Ost), der Position der RTK-Basisstation sowie den erhobenen GNSS-Messpunkten (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025).....	19
Abbildung 6 Prinzip der Echtzeit-RTK-Positionsbestimmung zwischen RS2-Basisstation und DJI M300 RTK (Darstellung durch Illustrae 2025, Eigene Fotos)	21
Abbildung 7 Beispiel eines im Gelände ausgelegten Targets (Messkampagne 01, Juni 2025) und dessen Einmessung (A u. B) sowie die angelegten farblich markierten GCPs (Messkampagne 02, Juli 2025) und dessen Identifikation im UAV-Orthofoto (C u. D) (Eigene Darstellung)	23
Abbildung 8 Lage und Anzahl der für die vier UAV-Messkampagnen eingesetzten Ground Control Points (GCPs) im Zeitraum Juni–September 2025 (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)	24
Abbildung 9 Darstellung der berechneten Kamerapositionen (grün) des Flugmusters (West) vom 30.07.2025 auf Basis der Rover-RINEX-Daten und der RS2-Referenzstation (Eigene Darstellung 2025) ...	25
Abbildung 10 Darstellung der in Metashape implementierten photogrammetrischen Prozessarchitektur (Javadnejad 2018)	27
Abbildung 11 Subpixel-basierte Verschiebungsfelder (Ost–West, Nord–Süd, SNR (Signal-to-Noise Ratio) zwischen 30.06. und 30.07.2025, berechnet aus UAV-basierten Orthomosaiken in 3cm-Rasterauflösung (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025).....	31
Abbildung 12 Verteilung der stabilen Referenzpunkten über das Untersuchungsgebiet (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025).....	33
Abbildung 13 Schematische Darstellung der automatisierten GUI – TerraShift (Eigene Darstellung 2025)	36
Abbildung 14 TerraShift - Modul 1A; Darstellung der automatisierten Qualitätsprüfung mit (A) vollständig erfüllten geometrischen Voraussetzungen, (B) erkannter Gitterfehlانpassung mit Warnhinweis sowie (C) detaillierter Auswertung der Rastergeometrie etc. im Log-Panel (Eigene Darstellung 2025)	38
Abbildung 15 TerraShift – Modul 1B; Preprocessing-Modul der GUI zur Rastervereinheitlichung und zum Resampling der Orthomosaike (Eigene Darstellung 2025).....	38
Abbildung 16 TerraShift - Modul 2; Eingabemaske für die Auswahl der geometrisch vorbereiteten Rasterdaten sowie der Definition der Korrelationsparameter (Eigene Darstellung 2025)	39
Abbildung 17 TerraShift – Modul 3; Benutzeroberfläche des Postprocessing-Moduls (Modul 3) mit Zeitintervallberechnung (A) und Konfiguration der Ausgabeeinheiten (B) (Eigene Darstellung 2025)	40

Abbildung 18 TerraShift – Modul 4; Benutzeroberfläche des Validierungsmoduls (Modul 4) zur Ergebnisüberprüfung mittels GNSS-Vergleich, GCP-Analyse und stabiler Referenzflächen (Eigene Darstellung 2025)	42
Abbildung 19 Korrelationsergebnis aus den annualen Messkampagnen (2023-2025). Level of Detection (LoD = $\pm 0,85$ mm/Tag. (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)	44
Abbildung 20 Subannuelle Geschwindigkeitskarten der Oberflächenbewegung des Dösener Blockgletschers für die monatlichen Intervalle Juni–September 2025. Level of Detection (LoD = $\pm 0,85$ mm/Tag. (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025).....	47
Abbildung 21 Subannuelle Geschwindigkeitskarten der Oberflächenbewegung des Dösener Blockgletschers für die Zweimonatsintervalle Juni–August und Juli–September 2025. Level of Detection (LoD = $\pm 0,85$ mm/Tag. (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025).....	48
Abbildung 22 Verteilung der rasterbasierten Oberflächengeschwindigkeiten (mm/Tag) für verschiedene Zeitintervalle (Eigene Darstellung 2025)	49
Abbildung 23 Vergleich zwischen GNSS-gemessenen Punktverschiebungen und rasterbasiert abgeleiteten Verschiebungen aus UAV-Orthomosaiken für unterschiedliche Zeitintervalle (Eigene Darstellung 2025) .	52
Abbildung 24 Darstellung des Messrauschens aufgrund eingeschränkter Bildqualität (Nebel) auf die Bildkorrelation. (A) Übersicht Korrelationsresultat August-September 2025 (B) Vergrößerter Ausschnitt – fragmentierte Verschiebungsfelder bedingt durch Messrauschen (C) Zugehöriges Orthomosaik – Darstellung der Umrisse des Messrauschens bedingt durch den lokal aufgetretenen Nebel (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025).....	58
Abbildung 25 Darstellung der streifenartigen Muster im abgeleiteten Verschiebungsfeld in Relation zu den Kamerapositionen während der UAV-Befliegung (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Parametrisierung der Bildkorrelation für unterschiedliche Zeitintervalle.....	30
Tabelle 2 Zusammenfassung der annualen Tagesgeschwindigkeiten des Dösener Blockgletschers für die Perioden 2023–2024 und 2024–2025 (Kennwerte beziehen sich auf Pixelwerte der Geschwindigkeitsraster innerhalb der Referenzfläche).....	43
Tabelle 3 Subannuelle Tagesgeschwindigkeiten Juni–September 2025 (Pixelwerte innerhalb der Referenzfläche)	45
Tabelle 4 Subannuelle Tagesgeschwindigkeiten Zweimonatsintervalle Sommer 2025 (Pixelwerte innerhalb der Referenzfläche).....	46
Tabelle 5 Ermittelte Level-of-Detection-Werte (LoD) für die subannualen Messkampagnen 2025	50
Tabelle 6 Vergleich zwischen GNSS-basierten Punktverschiebungen und UAV-basierten Korrelationsergebnissen für die untersuchten Messintervalle.....	51
Tabelle 7 Planimetrische Abweichungen zwischen GNSS-vermessen Ground Control Points (GCPs) und deren Positionen im Orthomosaik	53

Abkürzungsverzeichnis

ALS	Airborne Laser Scanning (flugzeuggestütztes Laserscanning)
ALT	Active Layer Thickness (Mächtigkeit der saisonalen Auftauschicht)
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DGPS	Differential Global Positioning System
D-InSAR	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
DOE-BG	Dösener Blockgletscher
DOM	Digitales Oberflächenmodell
ECV	Essential Climate Variable
EO/IO	Exterior / Interior Orientation (Äußere / Innere Orientierung)
GCOS	Global Climate Observing System
GCP	Ground Control Point (Passpunkt)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance (räumliche Bodenauflösung)
GTN-P	Global Terrestrial Network for Permafrost
ICP	Iterative Closest Point
IMCORR	Software zur bildbasierten Korrelation
IPA	International Permafrost Association
LoD	Level of Detection (Nachweisgrenze)
M3C2	Multiscale Model to Model Cloud Comparison
MAE	Mean Absolute Error
PPK	Post-Processing Kinematic
RAFT	Recurrent All-Pairs Field Transforms
RGIK	Rock Glacier Inventories and Kinematics (IPA Standing Committee)
RGV	Rock Glacier Velocity (Blockgletschergeschwindigkeit)
RMSE	Root Mean Square Error
RTK	Real-Time Kinematic
SfM	Structure-from-Motion
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SNL	Signal-to-Noise Ratio
SURF	Speeded-Up Robust Features
TLS	Terrestrisches Laser Scanning
UAV	Uncrewed Aerial Vehicle (Drohne)
WMO	World Meteorological Organization

1. Einleitung

Die Alpen gehören zu den Regionen, in denen sich die Folgen des Klimawandels besonders deutlich zeigen. Steigende Luft- und Bodentemperaturen führen zum Rückzug der Gletscher und zur Erwärmung des Gebirgspermafrosts, was weitreichende Auswirkungen auf geomorphologische Prozesse und Hangstabilität hat (Pellet et al. 2025). Diese Entwicklungen verändern die Dynamik alpiner Landschaften und beeinflussen sowohl natürliche Systeme als auch bestehende Infrastrukturen. Messungen aus europäischen Permafrostprogrammen zeigen seit etwa 2000 eine Erwärmung des alpinen Permafrosts um rund 0,4 bis 0,8°C pro Dekade (PERMOS 2025). Die fortschreitende Erwärmung reduziert die Eisviskosität in den Scherzonen, was sich in einer deutlichen Beschleunigung der Blockgletscherbewegungen äußert (Kääb et al. 2007; Cicoira et al. 2020; Pellet et al. 2025). Trotz regional unterschiedlicher Bedingungen lässt sich alpenweit ein synchrones interannuelles Bewegungsmuster erkennen, das den dominierenden Einfluss klimatischer Steuerungsgrößen unterstreicht (Kellerer-Pirklbauer et al. 2024; Hu et al. 2025).

Um diese Dynamik global vergleichbar zu erfassen, sind standardisierte Kenngrößen erforderlich, die sowohl physikalisch messbar als auch methodisch reproduzierbar sind. Im Rahmen des *Global Climate Observing System* (GCOS) wird Permafrost als eine der *Essential Climate Variables* (ECVs) geführt, da seine physikalischen Veränderungen den Zustand des globalen Klimasystems widerspiegeln (Irrgang et al. 2024). Zu den zentralen Kenngrößen dieser ECV zählen die Permafrosttemperatur, die Mächtigkeit der saisonalen Auftauschicht (Active Layer Thickness, ALT) sowie als kinematischer Indikator die Rock Glacier Velocity (RGV). In diesem Kontext wird die Rock Glacier Velocity (RGV) als räumlich gemittelte horizontale Geschwindigkeit über einen interannuellen Zeitraum definiert, bezogen auf eine Blockgletschereinheit oder einen Teilbereich davon (RGIK 2023a). Diese Standardisierung ermöglicht es, regionale Beobachtungen vergleichbar zu machen und klimatische Trends im globalen Kontext einzuordnen.

Da sich die Bewegungsprozesse aktiver Blockgletscher sowohl zeitlich als auch räumlich stark unterscheiden, erfordert ihre Erfassung Beobachtungsverfahren, die großflächig kontinuierlich und methodisch einheitlich sind. In diesem Kontext hat sich die Fernerkundung als zentrales Werkzeug der Blockgletscherforschung etabliert. Der Einsatz flächendeckender Fernerkundungsdaten wird ausdrücklich als Grundlage einer standardisierten Erfassung periglazialer Prozesse empfohlen (Kellerer-Pirklbauer et al. 2014). Jüngste Entwicklungen bestätigen diese Ausrichtung. Laut Hu (2025) basieren mittlerweile über 60% aller Erhebungen zur Blockgletschergeschwindigkeit auf fernerkundungsbasierten Verfahren, die sowohl satelliten-, flugzeug- als auch drohnengestützte Systeme einschließen.

Neben satellitengestützten Verfahren gewinnen dabei insbesondere drohnengestützte Systeme, auch uncrewed aerial vehicle (UAV) genannt zunehmend an Bedeutung. Mit der UAV-basierten Structure-from-Motion-Photogrammetrie (UAV-SfM) steht eine Methode zur Verfügung, die die Lücke zwischen terrestrischen Messverfahren und Satelliten- bzw. Luftbilddaten schließt (Śledź et al. 2021). Ihre potenziell hohe räumliche und zeitliche Auflösung bildet die Grundlage für neue Forschungsansätze zur subannuellen Bewegungsdynamik und erlaubt eine differenzierte Betrachtung kurzzeitiger, saisonal bedingter Deformationsprozesse.

Zur quantitativen Bestimmung dieser Bewegungsprozesse haben sich in den letzten Jahren bildkorrelative Verfahren als zentrale Analysemethoden etabliert. Sie beruhen auf der Erkennung und Verfolgung homogener Muster in sequenziellen Bilddatensätzen, wodurch Verschiebungen zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten präzise bestimmt werden können (Scambos et al. 1992; Cusicanqui et al. 2021). Darüber hinaus belegen weitere Studien die hohe Zuverlässigkeit und Robustheit dieser Ansätze unter unterschiedlichen Oberflächen- und Aufnahmebedingungen (Leprince et al. 2007; Aati et al. 2022; Aati 2024; Zandler et al. 2025b). Studien am aktiven Blockgletscher Lazaun in Italien zeigen, dass sich durch orthofotobasierte Subpixel-Korrelation horizontale Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreichen lassen (Fey and Krainer 2020).

Vorliegende Studien konzentrieren sich überwiegend auf jährliche oder mehrmonatige Zeitreihen, wodurch kurzfristige Geschwindigkeitsänderungen weitgehend unerfasst bleiben (Delaloye et al. 2010; Wirz et al. 2016; Fey and Krainer 2020; Hu et al. 2025). Zwar liegen für einzelne Blockgletscher subannuelle Bewegungsdaten auf Basis hochfrequenter in-situ Messungen vor, diese erfassen jedoch meist nur punktuelle Positionen und erlauben keine flächenhafte Analyse (Delaloye et al. 2010). Zudem fehlen in der Fernerkundung nahezu vollständig Arbeiten, die Bewegungsraten in monatlicher Auflösung erfassen, sodass subannuelle Variabilität bislang kaum flächendeckend untersucht wurde.

Der Dösener Blockgletscher gilt als einer der am besten untersuchten Permafroststandorte Österreichs und ist seit Mitte der 1990er Jahre fester Bestandteil des nationalen Monitorings (Kellerer-Pirklbauer et al. 2017). Klimatisch und geomorphologisch liegt er am unteren Rand des diskontinuierlichen Permafrostvorkommens der Hohen Tauern, wo geringe Einstrahlung und lokale Kältestau-Effekte zur thermischen Stabilisierung des Permafrostkörpers beitragen (Lieb 1996). Frühere DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System)-Messungen zeigen jedoch deutliche saisonale Geschwindigkeitsunterschiede (Kaufmann and Kellerer-Pirklbauer 2015; Pfeffer 2023), während jährliche UAV-basierte Analysen der Geschwindigkeit Genauigkeiten um 1 cm erreichen und damit ein hohes Potenzial für subannuelle Auswertungen bieten (unpublizierte Auswertungen am Dösener Blockgletscher). Subannuelle Bewegungen wurden bereits Ende der 1990er Jahre im

Rahmen früherer geodätischer Messkampagnen untersucht (Worsche 2000). Aktuelle hochfrequente DGNSS-Messungen im Rahmen einer Masterarbeit bestätigen diese Hinweise und liefern zusätzliche Detailinformationen zur saisonalen Dynamik (Pfeffer 2023). Allerdings bleibt bislang offen, ob sich mit UAV-basierter Bildkorrelation auch bei monatlichen Zeitintervallen robuste und reproduzierbare Geschwindigkeitsveränderungen im Zentimeterbereich zuverlässig erfassen lassen.

Ziel dieser Arbeit ist es, diese Forschungslücke zu schließen, indem die Erfassbarkeit monatlicher Geschwindigkeitsänderungen des Dösener Blockgletschers mittels automatisierter, UAV-basierter Bildkorrelation flächenhaft wird. Damit soll das bestehende Monitoringkonzept um eine subannuelle Komponente erweitert und eine methodisch standardisierte Grundlage für die hochfrequente Bewegungsanalyse alpiner Blockgletscher geschaffen werden.

Der wissenschaftliche Mehrwert dieser Arbeit liegt in der Verbindung von hochauflösender Fernerkundung und subannueller Prozessanalyse. Damit wird erstmals in monatlicher zeitlicher Auflösung eine flächenhafte Beobachtung der saisonalen Blockgletscherdynamik im österreichischen Hochgebirge ermöglicht. Zusätzlich soll im Zuge dieser Arbeit eine Auswertesoftware vorgestellt werden, welche auf den Algorithmus geoCosiCorr3D (Aati et al. 2022; Aati 2024) basiert. Jenes Werkzeug soll eine einheitliche und nachvollziehbare Verarbeitung der resultierenden Geschwindigkeitsfelder ermöglichen und zugleich die Analyse der RGV-Dynamik nachhaltig unterstützen.

Auf Grundlage bestehender Messnetze und früherer Messkampagnen lassen sich zudem weitere Annahmen zu möglichen Mustern im saisonalen Bewegungsverhalten ableiten. Lokale geodätische Messungen weisen auf vergleichsweise konstante und gut reproduzierbare Verschiebungsraten hin, wodurch sich Bildkorrelationsverfahren für die Analyse dieser Prozesse besonders gut eignen. Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass monatliche Auswertungen Veränderungen in der Bewegungsdynamik sichtbar machen und eine differenzierte Betrachtung subannueller Variationen erlauben.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1. Struktur und Materialaufbau von Blockgletschern

Blockgletscher sind eigenständige periglaziale Landformen aus eisgesättigtem Schutt, deren Bewegung auf ein viskoplastisches Kriechverhalten zurückzuführen ist, das sowohl interne Deformationen innerhalb des eisgesättigten Materials als auch Scherbewegungen entlang diskreter Scherzonen in der Tiefe umfasst (Haeberli 1985; Arenson et al. 2002; Cicoira et al. 2020; RGIK 2023a).

Sie gelten als charakteristische Erscheinungsformen des alpinen Permafrosts und als wichtige Indikatoren seiner thermischen und dynamischen Bedingungen (Haeberli 1985; Kellerer-Pirklbauer et al. 2022).

Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden Blockgletscher als eigenständige Erscheinung der Kryosphäre beschrieben. In Alaska beobachtete man viskos fließende, eisverfestigte Schuttmassen, deren Oberflächenformen an Lavaströme erinnerten (Capps 1910). Kurz darauf übertrug man das Konzept auf den Alpenraum und betonte insbesondere die plastische Verformung sowie die Abgrenzung zu Moränen und Muren (Chaix 1923). Mitte des Jahrhunderts führten systematische Kartierungen zu einer morphologischen Typisierung, die lobate, zungen- und spatelförmige Formen unterschied und damit ein erstes morphogenetisches Verständnis begründete (Wahrhaftig and Cox 1959).

Mit der zunehmenden Einbindung periglazialer Prozesse in die Hochgebirgsforschung rückten Blockgletscher als zentrale Elemente des alpinen Permafrosts in den Fokus. In den 1970er Jahren entstand auf Grundlage geomorphologischer und thermisch-mechanischer Untersuchungen ein dreischichtiges Strukturmodell, das den Aufbau aktiver Blockgletscher als klar gegliedertes System beschreibt. Es unterscheidet eine saisonal auftauende Aktivschicht, einen eisreichen Permafrostkern und einen tieferliegenden Scherhorizont, in dem die Hauptverformung stattfindet (Haeberli 1975, 1985). Abbildung 1 verdeutlicht diese vertikale Gliederung und zeigt die Kopplung zwischen Temperaturgradient, Eisgehalt und Verformungstiefe (Haeberli 1985; Cicoira et al. 2020).

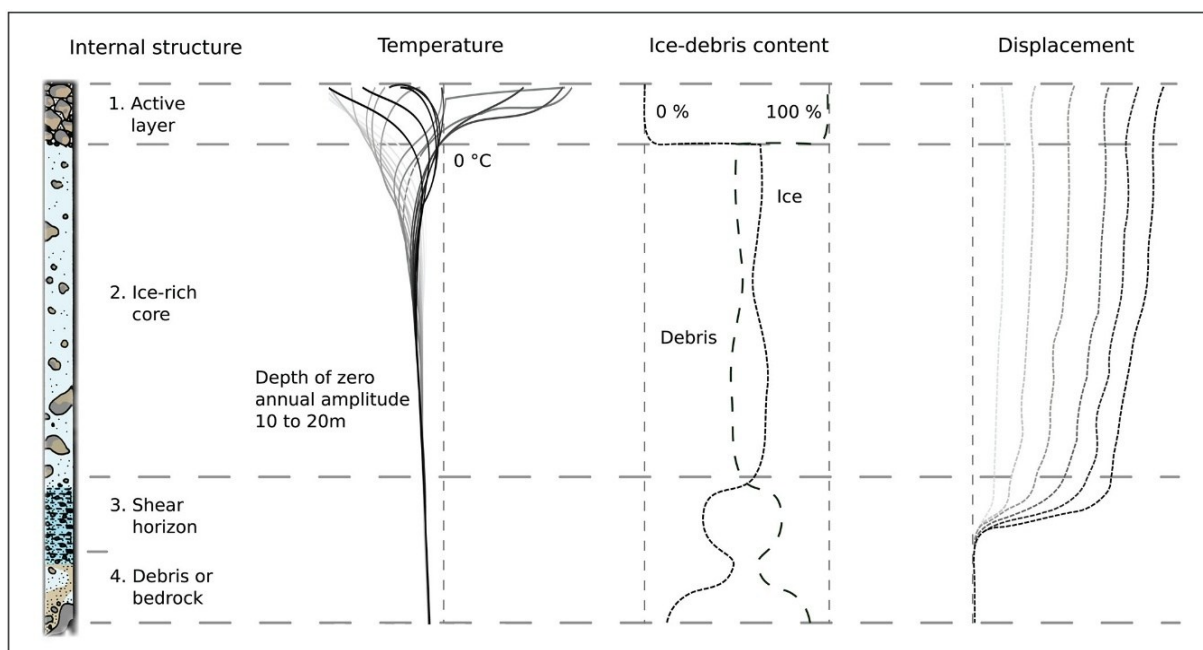


Abbildung 1 Schematisches Vertikalprofil eines Blockgletschers mit Darstellung seiner strukturellen, thermischen, materialbezogenen und kinematischen Merkmale (nach Cicoira et al. 2020)

Die oberste Aktivschicht ist nur wenige Meter mächtig und unterliegt saisonalen Gefrier- und Auftauprozessen. Sie bildet die Grenzzone zwischen Atmosphäre und Untergrund und reguliert den Energie- und Wasserhaushalt des Systems (Berger et al. 2004). In etwa 10-20 m Tiefe liegt die sogenannte Tiefe der Nullamplitude, unterhalb derer keine jährlichen Temperaturschwankungen mehr auftreten (Haeberli 1985).

Darunter folgt der eisreiche Kern, der Hauptkörper des Blockgletschers. Er besteht aus einer Mischung aus Gesteinsblöcken, Sand, Schluff und Eis mit typischen Eisgehalten von 30-40%. Diese Zusammensetzung verleiht dem Material eine viskoplastische Konsistenz und ermöglicht das langsame Kriechen (Barsch 1996). Geophysikalische Messungen belegen deutliche Dichte- und Leitfähigkeitskontraste zwischen den Schichten und bestätigen damit den modellhaften Aufbau (Meng et al. 2022). Die Bewegung konzentriert sich im Scherhorizont, einer wenige Meter mächtigen Übergangszone zwischen gefrorenem Körper und Untergrund, in der Eisgehalt, Wasserführung und Temperatur das mechanische Verhalten und somit die Fließgeschwindigkeit maßgeblich steuern (Cicoira et al. 2020). Unterhalb dieser Zone folgt das anstehende Gestein oder Lockermaterial, das als statische Basis fungiert.

Die im Inneren ablaufenden Deformationsprozesse prägen unmittelbar das Oberflächenrelief der Blockgletscher. Typische Merkmale aktiver Formen sind konvex aufgewölbte Stirnfronten, rippen- und furchenartige Strukturen sowie konkave Talfurchen, die auf unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten im Inneren hinweisen (Giardino et al. 2014). Diese morphologischen Muster entstehen aus einer Kombination viskoplastischer Deformation des Permafrostkörpers, Scherbewegungen entlang diskreter Scherhorizonte sowie periodischer Spannungsentlastung innerhalb des Materials. Die enge Kopplung zwischen innerer Dynamik und äußerer Gestalt erlaubt Rückschlüsse auf den Aktivitätszustand.

Die Aktivität eines Blockgletschers wird anhand morphologischer und kinematischer Kriterien unterschieden. Aktive Formen zeigen scharf begrenzte, meist vegetationsfreie Stirnfronten und messbare Bewegungen im Bereich mehrerer Dezimeter pro Jahr. Inaktive Blockgletscher besitzen flachere, teilweise bewachsene Stirnpartien, mit nur geringen Restbewegungen, während relikte Formen permafrostfrei, häufig kollabiert und geomorphologisch stark überprägt sind (Wahrhaftig and Cox 1959; Kellerer-Pirklbauer et al. 2012; Schoeneich et al. 2015; Brardinoni et al. 2026). Zudem existieren Übergangsformen, die morphologisch reliktsch erscheinen, jedoch noch Permafrostlinsen oder geringe Restaktivität aufweisen und daher als pseudoreliktsch klassifiziert werden (Kellerer-Pirklbauer 2019). Neue Arbeiten heben hervor, dass diese primär morphologische Teilung zu erweitern ist. Die tatsächliche Bewegungsgeschwindigkeit und ihre saisonale Variabilität stellen das zentrale Klassifikationskriterium dar (Brardinoni et al. 2026). Damit rückt die Prozessdynamik stärker in den Vordergrund, während morphologische Merkmale primär der visuellen

Diagnose dienen. Da die interne Struktur die Bewegungsmechanismen wesentlich beeinflusst, bildet sie die Grundlage für das Verständnis der saisonalen Kinematik.

2.2. Bewegungsmechanismen und saisonale Kinematik

Die Bewegung aktiver Blockgletscher resultiert aus kontinuierlichen Spannungsumverteilungen innerhalb des gefrorenen Materials. Unter dem Einfluss der Schwerkraft verformt sich der Permafrostkörper langsam, wobei sowohl viskoplastische Kriechdeformationen im eisgesättigten Material als auch lokalisierte Scherprozesse entlang diskreter Scherhorizonte wirksam werden. Die Verformung erfolgt somit als überwiegend fließender Prozess, reagiert jedoch sensibel auf thermische und hydrologische Impulse. Erwärmungsphasen oder erhöhter Wasserzutritt senken die Scherfestigkeit und beschleunigen den Bewegungsfluss, während Abkühlung zu einer temporären Stabilisierung führt (Haeberli 1985; Cicoira et al. 2020).

Bereits frühe Beobachtungen zeigten, dass intensive Niederschläge kurzfristige Beschleunigungen hervorrufen können (Chaix 1923), was einen frühen Hinweis auf die Bedeutung von infiltriertem Wasser für die innere Reibung und Scherfestigkeit des gefrorenen Schutts liefert. Heute gilt als gesichert, dass sowohl thermische als auch hydrologische Prozesse unmittelbar auf die Materialeigenschaften wirken. Ein Anstieg der Bodentemperatur oder des Porenwasserdrucks reduziert die Viskosität und führt zu einer Beschleunigung der Deformation (Haeberli 1975; Fey and Krainer 2020). Besonders stark reagieren Blockgletscher in Temperaturbereichen nahe dem Schmelzpunkt, wo selbst geringe Erwärmungen eine überproportionale Zunahme der Fließraten bewirken (Kääb et al. 2007; Cicoira et al. 2020; Hu et al. 2025). Schmelz- und Regenwasser verstärken diesen Effekt zusätzlich, indem sie im Scherhorizont die effektive Scherfestigkeit senken und kurzfristige Bewegungsbeschleunigungen auslösen (Wirz et al. 2016; Cicoira et al. 2020). Die räumliche Heterogenität des Materials führt dabei zu sektoralen Unterschieden in der Reaktion auf thermische und hydrologische Impulse, wodurch sich komplexe Spannungsfelder und lokal differenzierte Bewegungsmuster ausbilden (Giardino et al. 2014; Kenner et al. 2017).

Aus dieser Materialreaktion ergibt sich eine charakteristische, zyklisch verlaufende Dynamik. Während wärmerer Perioden werden gespeicherte Spannungen durch verstärktes Kriechen abgebaut. Im Winter erhöht die Gefrierverfestigung die innere Kohäsion und bewirkt eine deutliche Verlangsamung. Dieses Wechselspiel aus Entlastung und Erstarrung erklärt das periodische Bewegungsverhalten aktiver Blockgletscher und beschreibt deren typische saisonale Kinematik (Barsch 1996; Delaloye et al. 2010).

Der Begriff der Kinematik umfasst dabei das gesamte Bewegungsverhalten eines Blockgletschers in Raum und Zeit. Zur quantitativen Beschreibung wird die RGV als standardisierte Kenngröße verwendet. Sie beschreibt die mittlere

Oberflächengeschwindigkeit aktiver Blockgletscher und ermöglicht den Vergleich verschiedener Standorte sowie die Identifikation klimatischer Steuerungsmechanismen (RGIK 2023b; Kellerer-Pirklbauer et al. 2024; Hu et al. 2025).

Die saisonale Variabilität der Bewegung zeigt ein wiederkehrendes Muster. Während der Schneeschmelze dringt Schmelzwasser in den Untergrund ein, erhöht den Porenwasserdruck und reduziert die Scherfestigkeit der Scherzonen. In dieser Phase erreichen die Bewegungen ihre höchsten Geschwindigkeiten. Mit dem Einsetzen des Frosts nimmt der Wassergehalt ab, die Viskosität steigt und die Bewegung verlangsamt sich deutlich (Wirz et al. 2016). In alpinen Permafrostregionen treten die höchsten Fließraten typischerweise im Spätsommer und die niedrigsten im Spätwinter auf (Barsch and Hell 1976). Diese Reaktionsmuster hängen stark von der Tiefe des deformierenden Materials ab. Oberflächennahe Schichten reagieren innerhalb weniger Wochen, während tiefere Zonen aufgrund thermischer Trägheit mit zeitlicher Verzögerung reagieren. Die daraus resultierenden Phasenverschiebungen führen zu überlagerten Bewegungszyklen, die sowohl saisonale als auch interannuelle Komponenten aufweisen (Perruchoud and Delaloye 2007). Neuere UAV- und GNSS-Messungen bestätigen diese mehrskalige Dynamik und zeigen deutliche sektorale Unterschiede innerhalb einzelner Blockgletscher (Fey and Krainer 2020).

Die beobachteten saisonalen Schwankungen verdeutlichen die enge Kopplung zwischen thermischen Regimen und Bewegungsintensität. Änderungen der Oberflächentemperatur oder der Schneebedeckung wirken sich über die Energiebilanz direkt auf die Fließgeschwindigkeit aus (Kääb et al. 2007; Kellerer-Pirklbauer and Kaufmann 2012; Irrgang et al. 2024). Damit bildet die saisonale Kinematik einen sensiblen Indikator für den Wärme- und Wasserhaushalt des Gebirgspermafrosts. Die beschriebenen Bewegungsmechanismen und ihre zeitliche Modulation zeigen, dass Blockgletscher als thermisch-hydrologisch gesteuerte Systeme unmittelbar auf klimatische Impulse – zumeist jedoch mit einer gewissen Verzögerung – reagieren (Cicoira et al. 2019).

2.3. Blockgletscher als Klimaindikatoren

Langzeitbeobachtungen zeigen, dass aktive Blockgletscher im Alpenraum seit Mitte des 20. Jahrhunderts deutlich schneller geworden sind. In mehreren Regionen liegen die heutigen Bewegungsraten zwei- bis viermal über den Werten der 1950er und 1960er Jahre, mit einer erneuten, besonders markanten Zunahme seit Beginn der 2000er Jahre (Kellerer-Pirklbauer and Kaufmann 2012; Kääb et al. 2021). Solche zeitlich weitgehend synchronen Beschleunigungen an verschiedenen Standorten deuten auf überregionale klimatische Steuerungsfaktoren hin.

Seit den 1990er Jahren lässt sich im gesamten Alpenbogen ein anhaltender Trend steigender Bewegungsraten (RGV) beobachten. Dieser Zusammenhang wird vor allem

auf die Erwärmung des Permafrosts und veränderte hydrologische Bedingungen zurückgeführt (Kellerer-Pirklbauer et al. 2024). Die jährlichen Oberflächenbewegungen variieren je nach Standort zwischen 0.05 und 6 m im Jahr und unterliegen deutlichen interannuellen Schwankungen (Berger et al. 2004; Avian et al. 2005; Kääb et al. 2007, p. 200; Perruchoud and Delaloye 2007; Wirz et al. 2016; Cicoira et al. 2020; Pellet et al. 2024). Kontinentale Auswertungen bestätigen diese Entwicklung und weisen auf eine etwa zwei- bis zehnfache Zunahme der mittleren RGV-Werte seit den 1980er Jahren hin, mit Rekordgeschwindigkeiten in den letzten Jahren (Pellet et al. 2022, 2024). Kurzzeitige Rückgänge, etwa in den Jahren 2004–2006, 2016–2018 oder 2022–2023, stehen meist mit schneearmen Wintern in Verbindung, die eine stärkere Bodenkühlung begünstigten.

Die parallelen Trendverläufe an unterschiedlichen Messstandorten unterstreichen die enge Kopplung zwischen Permafrosttemperatur, Wassergehalt und Bewegungsdynamik alpiner Blockgletscher (Cusicanqui et al. 2021; Pellet et al. 2024). Auf Grundlage dieser Evidenz wurde die RGV 2021 als neues assoziiertes Produkt in das Global Climate Observing System (GCOS) aufgenommen (Streletskiy et al. 2021; Hu et al. 2025). ECVs umfassen dabei physikalische, chemische und biologische Kenngrößen, die für die Charakterisierung des Klimasystems zentral sind und eine systematische, standardisierte sowie global vergleichbare Beobachtung ermöglichen (Bojinski et al. 2014; Streletskiy et al. 2021). Durch die Einbeziehung der RGV in diesen konzeptionellen Rahmen wird die zuvor bestehende räumliche Lücke zwischen punktuellen Bohrlochmessungen (Permafrosttemperatur, Active Layer Thickness) und flächenhaften Fernerkundungsbeobachtungen geschlossen.

Die Erfassung von RGV-Daten strebt dabei nach den definierten Standards des Globalen Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). Die in den Richtlinien des GCOS und der World Meteorological Organization (WMO) verankerte Mindestbeobachtungsdauer von einem Monat sowie die zulässige relative Messunsicherheit von höchstens 10% gewährleisten eine methodisch reproduzierbare Quantifizierung und sichern die Vergleichbarkeit zwischen Regionen und Zeiträumen (RGIK 2023a; Irrgang et al. 2024). Diese Qualitätsanforderungen bilden den verbindlichen Bezugsrahmen für die Anwendung moderner Fernerkundungsmethoden.

Weltweit existieren bereits zahlreiche Blockgletscherinventare, die sich jedoch durch uneinheitliche Klassifikationen und Erfassungsmethoden unterscheiden (Delaloye et al. 2018). Um diese Defizite zu überwinden, koordiniert die International Permafrost Association (IPA) mit dem Action Standing Committee on Rock Glacier Inventories and Kinematics (RGIK) den Aufbau eines standardisierten, global zugänglichen Inventars. Ziel ist die Harmonisierung von Erfassungs- und Beobachtungsstandards sowie die Anerkennung der Blockgletscherkinematik als globalem Klimabeobachtungsparameter (Delaloye et al. 2018; Brardinoni et al. 2026).

2.4. Fernerkundungsgestützte Ansätze zur Bewegungsanalyse

Die Analyse der Blockgletscherbewegung nutzt sowohl klassische geodätische Messverfahren als auch fernerkundungsgestützte Ansätze, die bereits seit frühen Phasen des Monitorings parallel eingesetzt werden. Erste quantitative Nachweise der Bewegung wurden durch wiederholtes Einmessen markierter Blöcke erzielt, womit die Geschwindigkeitsverteilung aktiver Blockgletscher erstmals dokumentiert werden konnte (Chaix 1923; Wahrhaftig and Cox 1959).

Terrestrische Messungen mit DGNS oder Totalstationen stellen bis heute den Referenzstandard für Bewegungsanalysen aktiver Blockgletscher dar (Berthling et al. 2003; Lambiel and Delaloye 2004; Kellerer-Pirklbauer et al. 2024). Sie ermöglichen präzise Punktmessungen im Millimeter- bis Zentimeterbereich, sind jedoch hinsichtlich der räumlichen Abdeckung stark von Anzahl und Verteilung der Messpunkte abhängig und daher nur bedingt geeignet, komplexe Deformationsmuster flächenhaft zu erfassen (Kellerer-Pirklbauer et al. 2026). Untersuchungen belegen, dass RTK-GNSS eine schnelle und präzise Methode darstellt, mit der Rotationen einzelner Blöcke im Zentimeterbereich erfasst und fernerkundungsbasierte Verfahren validiert werden können (Lambiel and Delaloye 2004).

Einen methodischen Wendepunkt stellte die Einführung bildgebender Verfahren dar, die eine flächenhafte und berührungslose Erfassung von Oberflächenbewegungen ermöglichten. Die Stereophotogrammetrie erlaubte erstmals die Ableitung von Bewegungsfelder und die Quantifizierung von Fließraten über mehrjährige Zeiträume (Finsterwalder 1928; Haeberli et al. 1979; Haeberli 1985; Haeberli and Schmid 1988). Die Digitalisierung der Photogrammetrie und der Einsatz hochauflösender Sensoren führte zu flächendeckenden Analysen mit Genauigkeiten im Dezimeterbereich (Kääb 1999; Avian et al. 2005; Roer 2005).

In den letzten Jahren wurden unterschiedliche Sensorsysteme zu einem multiskalaren Monitoringansatz kombiniert (Bodin et al. 2018). UAV-Photogrammetrie liefert dabei digitale Oberflächenmodelle mit Bodenauflösungen unter 5 Zentimeter und erlaubt subpixelgenaue Bewegungsableitungen (Kaufmann et al. 2018; Śledź et al. 2021; Vivero et al. 2022). InSAR-Verfahren ergänzen UAV-Daten durch ihre großräumige Abdeckung und wurden bereits früh erfolgreich zur Erfassung von Blockgletscherbewegungen eingesetzt. So konnte am Dösener Blockgletscher mittels D-InSAR eine mittlere Oberflächendeformation von etwa 6 mm innerhalb von 35 Tagen nachgewiesen werden (Kenyi and Kaufmann 2003). In stark reliefiertem Gelände sind InSAR-Verfahren jedoch aufgrund von Layover- und Schatteneffekten nur eingeschränkt einsetzbar und liefern zudem in schneebedeckten Bereichen sowie auf grobblockigem Schuttmateriel häufig unzuverlässige Ergebnisse (Bertone et al. 2023).

Laserbasierte Systeme wie terrestrisches (TLS) und flugzeuggestütztes Laserscanning (ALS) bieten höchste Punktdichten und Präzision, erfordern jedoch aufwendige Mess- und Datenverarbeitungsprozesse (Avian et al. 2009; Bodin et al. 2018; Fleischer et al. 2021).

UAV-Photogrammetrie hat sich als eine der effizientesten Methoden für Bewegungsanalysen in hochalpinen Permafrostgebieten etabliert (Kaufmann et al. 2021; Kellerer-Pirklbauer et al. 2024). Mehrere Studien zeigen eine nahezu lineare Korrelation zwischen UAV- und GNSS -Messungen, mit Korrelationskoeffizienten nahe 1 ($R^2 \approx 0.98-0.99$) und mittlerer Abweichungen im Zentimeterbereich ($MAE \approx 1-2$ cm), womit die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit auf bestehenden Erkenntnissen basiert (Bodin et al. 2018; Vivero et al. 2022).

UAV-SfM-Analysen erreichen unter optimalen Bedingungen Genauigkeiten im Zentimeterbereich, typischerweise mit RMSE-Werten von etwa 0,01-0,03 m (Fey and Krainer 2020). Satellitenbasierte InSAR- und Offset-Tracking-Verfahren erreichen dagegen Genauigkeiten im Dezimeterbereich (Bodin et al. 2018; Käab et al. 2021; Kellerer-Pirklbauer et al. 2024). Die Validierung erfolgt in der Regel über differentielle GNSS-Messungen oder stabile Referenzpunkte außerhalb der Deformationszone. Eine systematische Fehlerabschätzung ist dabei Voraussetzung für die Integration in ECV-konforme Datensätze (Irrgang et al. 2024; Hu et al. 2025).

Die Kombination von UAV-Photogrammetrie mit geodätischen Kontrollmessungen stellt derzeit den methodisch robustesten Ansatz zur hochauflösenden Bewegungsanalyse aktiver Blockgletscher dar (Fey and Krainer 2020). Sie verbindet flächenhafte, automatisierte Fernerkundung mit punktueller Präzision und bildet die Grundlage für das in dieser Arbeit angewandte Messdesign am Dösener Blockgletscher.

2.5. Überblick über methodische Verfahren zur Bewegungsbestimmung

Die Ableitung von Oberflächenbewegungen aus UAV-basierten Bilddaten beruht auf einer begrenzten Zahl algorithmischer Verfahren, die sich im Kern in korrelationsbasierte, merkmalsbasierte und registrierungsbasierte Ansätze gliedern. Historisch dominieren korrelationsbasierte Methoden, da sie flächenhafte Verschiebungsfelder zuverlässig aus orthorektifizierten Bildpaaren gewinnen können (Scambos et al. 1992; Evans 2000). Einen frühen und in der glazialen sowie subglazialen Forschung etablierten Software Standard stellt dabei IMCORR dar, das die normierte Kreuzkorrelation in einem rasterbasierten Workflow für die Bewegungsbestimmung implementiert (Scambos et al. 1992; Bollmann et al. 2012; Fleischer et al. 2021; Kofler et al. 2022). Leprince et al. entwickelten diesen Ansatz weiter, indem sie Orthorektifizierung-, Coregistrierung und subpixel-basierte Peakinterpolation erstmals in einem konsistenten Workflow zusammenführten. Vergleichsstudien zeigen, das Korrelationsverfahren insbesondere auf grobblockigen und texturreichen Oberflächen stabile und reproduzierbare Ergebnisse liefern und im

glaziologischen Kontext häufig bessere Resultate erreichen als alternative Matching-Methoden (Debella-Gilo and Käab 2011; Heid and Käab 2012). Neue Implementierungen wie geoCosiCorr3D übertragen dieses Prinzip in eine geometrische erweiterte 2D/3D-Struktur und stellen damit eine methodisch konsistente Grundlage für präzise Bewegungsanalysen auf unterschiedlich räumlichen Maßstäben bereit (Aati et al. 2022; Aati 2024).

Merkmalsbasierte Verfahren wie SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) und SURF (Speeded-Up Robust Features) identifizieren markante Bildpunkte und ordnen diese zwischen zwei Aufnahmedaten einander zu (Lowe 2004; Bay et al. 2006). Ihre Leistungsfähigkeit hängt jedoch stark mit der Stabilität der lokalen Bildmerkmale ab. Vergleichsstudien, in denen Feature-Matching Verfahren gemeinsam mit Korrelationsmethoden getestet wurden, zeigen, dass merkmalsbasierte Ansätze in homogen texturierten und radiometrisch stabilen Szenen zuverlässige Ergebnisse liefern, auf stark heterogenen und grobblockigen Oberflächen jedoch deutlich an Robustheit verlieren (Debella-Gilo and Käab 2011; Heid and Käab 2012). Lernbasierte Weiterentwicklungen wie SuperPoint und SuperGlue verbessern die Merkmalsextraktion und -zuordnung aus Trainingsdaten abgeleiteter Merkmalsmodellierung (DeTone et al. 2018; Sarlin et al. 2020). Für UAV-Orthomosaik im alpinen Gelände existieren bislang jedoch nur wenige systematische Anwendungen, sodass die Leistungsfähigkeit dieser Modelle in Blockgletscherumgebung derzeit noch nicht abschließend bewertet werden kann.

Ergänzend existieren registrierungsbasierte 3D-Verfahren, die Punktwolken zweier Epochen direkt zueinander anpassen. Klassische ICP-Algorithmen ermöglichen eine iterative Minimierung der Punkt-zu-Punkt-Distanzen und bilden damit eine grundlegende Methode zur geometrischen Registrierung (Besl and McKay 1992). Weiterentwickelte Normaldistanzverfahren wie M3C2 erfassen Änderungen entlang lokaler Normalen und erlauben dadurch präzise Deformationsanalysen auch in komplexe strukturierten Oberflächen (Lague et al. 2013). Solche Verfahren setzen dichte und geometrisch stabile Punktwolken voraus und eignen sich insbesondere für volumetrische Veränderungen.

Lernbasierte und optische Flow-Modelle markieren die jüngste Entwicklungslinie der Bewegungsbestimmung. Netzarchitekturen wie FlowNet2 und RAFT (Recurrent All-Pairs Field Transforms) extrahieren dichte Bewegungsfelder direkt aus Bildpaaren und bilden die Grundlage aktueller deep-learning-basierter Verfahren (Ilg et al. 2017; Teed and Deng 2020). Aktuelle glaziologische Untersuchungen zeigen, dass lernbasierte optische-Flow-Modelle bei der Ableitung von Geschwindigkeitsfeldern aus hochaufgelösten optischen Bilddaten eine höhere Genauigkeit als klassische Korrelationsverfahren erreichen können, gleichzeitig jedoch mit erhöhtem rechnerischen Anforderungen und einem erheblichen Bedarf an Trainingsdaten verbunden sind (Zandler et al. 2025a). Damit ist ihr flächiger Einsatz im UAV-basierten Blockgletschermonitoring derzeit noch eingeschränkt.

3. Untersuchungsgebiet

3.1. Lokaler Kontext und Lage

Das Dösental bildet den räumlichen Rahmen dieser Arbeit. Es liegt im Gemeindegebiet von Mallnitz (Bezirk Spital an der Drau, Kärnten) im östlichen Teil des Nationalparks Hohe Tauern und gehört zur Ankogelgruppe. Das hochgelegene Trogtal erstreckt sich rund 8 km nordöstlich des Siedlungsraums von Mallnitz und wird im oberen Abschnitt von einem markanten Talschluss mit der Mallnitzer Scharte und den umgebenden Gipfeln begrenzt. Seit 1986 ist das Dösental Teil der Kernzone des Nationalparks Hohe Tauern, wodurch intensive Nutzungsformen weitgehend ausgeschlossen sind und ein weitgehend unveränderter Hochgebirgsraum erhalten geblieben ist (Lieb 1996; Lieb and Nutz 2009). Die Kombination aus vergleichsweise einfacher Erreichbarkeit, u.a. über das Arthur-von-Schmid-Haus als zentrale Stützpunktinfrastuktur und dem hohen Natürlichkeitsgrad, ist ein wesentliches Argument für die Auswahl des Gebietes als Untersuchungsraum.

Innerhalb des Tals konzentriert sich die vorliegende Untersuchung auf den inneren, hochgelegenen Abschnitt des Dösentals, in dem glaziale und periglaziale Formen dicht beieinander liegen. Spätglaziale Moränen, Blockschuttkörper und mehrere Blockgletscher dokumentieren die jüngere Reliefentwicklung und geben durch ihre räumliche Verbreitung Hinweise auf das Vorkommen von Gebirgspermafrost (Lieb 1996; Kellerer-Pirklbauer et al. 2012, 2017).

Die heutige Morphologie dieser Hochgebirgslandschaft geht maßgeblich auf die glaziale Überprägung während des Pleistozäns zurück. Sie zeigt sich in einem übertieften Trogtal mit steilen Hängen und markanten spätglazialen Moränenwällen (Lieb 1996). Zwei deutlich ausgeprägte Karstufen strukturieren den inneren Talraum.

Der Dösener Blockgletscher liegt im Talschluss auf einer Höhe von rund 2340-2620 m und stellt innerhalb des beschriebenen Formenspektrums das flächenmäßig bedeutendste periglaziale Reliefelement dar. Er bildet damit den zentralen Referenzkörper dieser Arbeit. Mit kontinuierlichen Messungen seit 1993 gehört der Dösener Blockgletscher zudem zu den Pionierstandorten des österreichischen Permafrostmonitorings und ist dadurch vergleichsweise gut dokumentiert (Kaufmann 1996; Lieb 1996; Kellerer-Pirklbauer et al. 2017).

Die topographische Einbettung des Blockgletschers ist durch eine relativ monomorphe Form und eine Lage in gewissem Abstand zu steilen Felsstufen und aktiven Schuttquellen gekennzeichnet. Großvolumige Schuttzufuhreignisse sind daher vergleichsweise selten, sodass die bestehenden Oberflächenmuster über kürzere bis mittlere Zeiträume tendenziell erhalten bleiben.

Dies führt zu einer hohen Wiedererkennbarkeit einzelner Blöcke und einer über die Zeit stabilen Oberflächentextur, was für die Ableitung von Oberflächenbewegungen mittels bildkorrelativer Verfahren von wesentlicher Bedeutung ist.

Die in Abbildung 2 dargestellte Übersichtskarte verortet den Dösener Blockgletscher im Talschluss des Dösentals und zeigt zentrale Orientierungspunkte wie das Arthur-von-Schmid-Haus, den Haupttalboden sowie den Blockgletscherkörper (DOE-BG).

Die klimatischen und geologischen Rahmenbedingungen bestimmen sowohl die Materialverfügbarkeit als auch das thermische Regime des Untergrunds und bilden somit die physikalische Grundlage für das Auftreten und die Aktivität des Dösener Blockgletschers.

Das Dösental liegt im Bereich des Tauernfensters und gehört zum Venediger-Deckensystem, das überwiegend aus harten kristallinen Gesteinen aufgebaut ist (Pestal 2005; Schuster and Stüwe 2022). Der Talschluss ist dem Hochalmkern zuzuordnen, in dem vor allem mittel- bis grobkörnige Gneise mit granitischer Zusammensetzung vorkommen (Holub and Marschallinger 1988; Höck 1993; Pestal 2005).

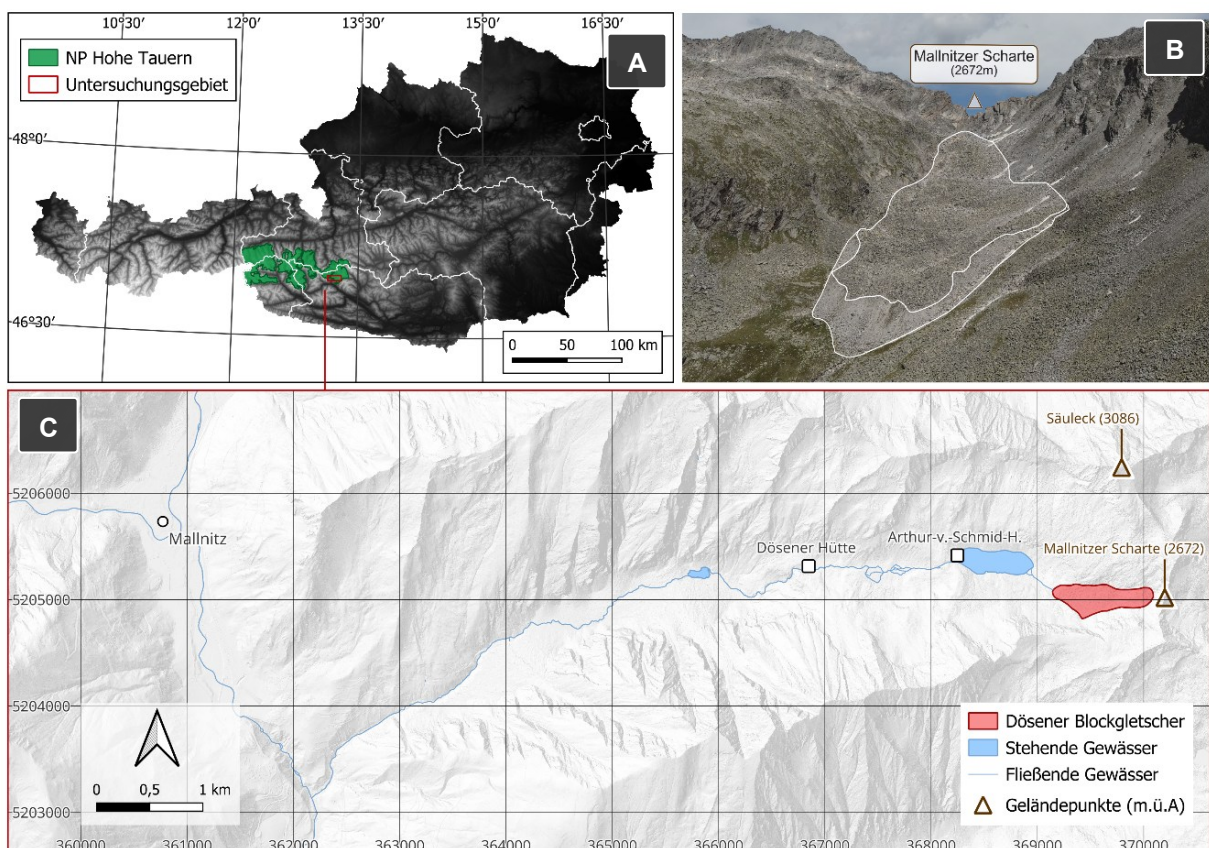


Abbildung 2 Überblick Untersuchungsgebiet – (A) Lage des Dösener Tals im Nationalpark Hohe Tauern (B) Schrägaufnahme des Dösener Blockgletschers (Aufnahme: 30.06.2025) (C) Detailkarte des Untersuchungsgebiets (Höheninformation – KAGIS 2023, Topographie – OSM 2025, EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)

3.2. Klimatische und geologische Rahmenbedingungen

Entlang des Talquerschnitts zeigt sich ein Übergang von überwiegend schiefrigen Gesteinen im äußeren Talbereich hin zu den harten kristallinen Gneisen des Hochalmkerns im Talschluss. Im unmittelbaren Bereich des Dösener Blockgletschers stehen diese Zentralgneise oberflächennah an und liefern durch wiederholte Frostwechsel das kantige Block- und Schuttmaterial, aus dem der Blockgletscher aufgebaut ist (Holub and Marschallinger 1988; Lieb 1996; Kellerer-Pirklbauer 2009; Kellerer-Pirklbauer et al. 2022). Im übergeordneten Rahmen zeigt sich, dass Blockgletscher bevorzugt dort auftreten, wo derartige harte, frostempfindliche Gesteine verwittern, während karbonatische Gesteine deutlich weniger geeignetes Schuttmaterial liefern (Höllermann 1983).

Klimatisch liegt das Dösental im Übergangsbereich zwischen dem maritim-atlantisch beeinflussten Nordalpenklima und dem stärker kontinental geprägten inneralpinen Raum. Die Lage des Tales im Staugebiet des Tauernhauptkammes bewirkt ganzjährig häufige und intensive Niederschlagsereignisse, insbesondere bei Nord- und Südtau (Lieb 1996).

Für den Talraum von Mallnitz (ca. 1200 m) ergeben sich aus den homogenisierten Jahreswerten (Station 18111) für den Zeitraum 2022-2025 (Zeitintervall zu Einordnung der Messkampagnen) mittlere Jahresniederschlagssummen von 1096 mm pro Jahr (GeoSphere Austria 2025). Die Analyse der Schneedeckenparameter desselben Datensatzes zeigt im Mittel etwa 80 Tage mit geschlossener Schneedecke pro Jahr, wobei in schneereichen Wintern deutlich höhere Werte erreicht werden. Mit zunehmender Seehöhe verschärfen sich die thermischen Bedingungen erheblich. In der Höhenlage des Dösener Blockgletschers wurde zwischen 2007-2017 an einer Wetterstation eine mittlere Jahrestemperatur von $-1,62^{\circ}\text{C}$ gemessen (Kellerer-Pirklbauer et al. 2022).

Österreichweite Modellanalysen der Schneeklimaentwicklung von 1961/62 bis 2020 zeigen einen deutlichen, höhenabhängigen Rückgang von Schneehöhe und Schneedeckendauer, der vor allem Lagen unterhalb von etwa 2000 m betrifft. Hochalpine Gebiete der Hohen Tauern bleiben hingegen Kernräume langer und mächtiger Schneedecken. Die dort gemessenen Abnahmen fallen im Vergleich zu tieferen Lagen deutlich geringer aus (Olefs et al. 2020).

Vor diesem Hintergrund ergibt sich für den Dösener Blockgletscher ein charakteristisches hochalpines Mikroklima. Die Kombination aus generell niedrigen Lufttemperaturen, hohen Winterniederschlägen, ausgeprägter Schneedeckendauer und der topographischen Beckenlage führt zu einer effektiven Kältekonservierung. Die Nord- bis Westexposition reduziert die kurzweilige Sonneneinstrahlung und limitiert die sommerliche Oberflächenerwärmung. Lieb (1996) beschreibt für den Talschluss ein deutlich ausgeprägtes Kältemikroklima („Kältekammerlage“) mit häufigen Kaltluftseen,

verstärkter nächtlicher Kaltluftproduktion und einer stark durchlüfteten, blockreichen Oberfläche, die Wärme rasch ableitet und so die Bodentemperatur zusätzlich absenkt.

Im regionalen Maßstab liegt das Untersuchungsgebiet innerhalb eines großflächigen Permafrostgürtels der Hohen Tauern, in dem rund 25% der Fläche potenziell permafrostführend sind (Schrott et al. 2012). Intakte Blockgletscher treten in den Hohen Tauern bevorzugt zwischen ca. 2 300 und 2 900 m auf (Kellerer-Pirklbauer et al. 2012), womit die Höhenlage des Dösener Blockgletschers eindeutig in diesem permafrostgünstigen Bereich liegt.

3.3. Dösener Blockgletscher als Forschungsobjekt

Der Dösener Blockgletscher zählt zu den am besten dokumentierten Blockgletschern der österreichischen Alpen und ist im zweiten österreichischen Blockgletscherinventar als intakter Blockgletscher mit dem Code mo238 erfasst (Kellerer-Pirklbauer et al. 2012; Wagner et al. 2020). Aufbauend auf dieser Einordnung wurde der Blockgletscher in mehreren Studien geodätisch, geophysikalisch und klimatologisch untersucht und entwickelte sich zu einem der bedeutendsten Langzeit-Monitoringstandort für den alpinen Permafrost in Österreich (Kellerer-Pirklbauer et al. 2017). Der zungenförmige Blockkörper erstreckt sich über eine Länge von rund 950 m und eine maximale Breite von etwa 300 m, umfasst eine Fläche von ca. 0.20 km² und weist eine Höhenerstreckung zwischen etwa 2340 m und 2620 m auf. Die Hauptfließrichtung erfolgt von Ost nach West (Kellerer-Pirklbauer et al. 2022). Die markante Oberflächenmorphologie mit konvex gewölbten Loben, Querrippen und einer steilen Stirnzone mit Neigungen von bis zu 40-50° verdeutlicht seine aktive Dynamik und fortlaufenden Kriechprozesse (Lieb 1996; Kellerer-Pirklbauer et al. 2022). Die ausgeprägte Frontkompression weist auf einen überwiegend eisgesättigten Untergrund hin (Schmöllner and Fruhwirth 1996).

Geophysikalische Untersuchungen im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts von 1993-1995 liefern erstmals detaillierte Informationen in den internen Aufbau. Seismische, elektromagnetische und Bodenradarmessungen zeigen eine charakteristische Dreischichtung aus einer 1-3,5 m mächtigen aktiven Schuttlage, einer 5-10m dicken eis- und wasserführenden Übergangszone sowie einem massiven Permafrostkern mit Mächtigkeiten von 30-40 m, der lokal bis 50-60 m reicht (Lieb 1996; Schmöllner and Fruhwirth 1996). Die eisführenden Bereiche und ausgeprägten internen Scherflächen belegen ein viskos-plastisches Deformationsverhalten, das die Kriechbewegungen steuert (Kaufmann 1996; Schmöllner and Fruhwirth 1996). Morphometrische Analysen ergänzen diese Befunde (Kaufmann and Heiland 1998). Jene erstellten auf Basis detaillierter photogrammetrischer Auswertungen ein hochauflösendes digitales Höhenmodell, das die ausgeprägten Lobenstrukturen, Querrippen und die asymmetrische Aktivitätsverteilung zwischen dem Zentral- und den Randbereichen des Blockgletschers präzise abbildet.

Die Forschungsgeschichte des Dösener Blockgletschers reicht bis in die 1950er Jahre zurück. Bereits 1954 wurden erste photogrammetrische Bewegungsmessungen durchgeführt, die den Beginn einer kontinuierlichen Dokumentationsreihe einleiteten. Zwischen 1975 und 1993 folgten weitere photogrammetrische Analysen, die erstmals längerfristige Fließgeschwindigkeiten rekonstruierten. Man verfolgte dabei im Rahmen einer detaillierten Deformationsanalyse 581 Oberflächenblöcke über mehrere Jahrzehnte (Kaufmann 1998). Für den zentralen Bereich wurden Geschwindigkeiten von 29,4 cm/a (1954-1974), 17,2 cm/a (1975-1993) und 29,6 cm/a (1995-1996) ermittelt, womit eine deutliche Verlangsamung über zwei Jahrzehnte sowie eine erneute Beschleunigung Mitte der 1990er Jahre dokumentiert werden konnte. Die Randbereiche zeigten dagegen nur geringe horizontale Bewegungen. Kaufmann und Heiland (1998) bestätigten jene Ergebnisse. Ab 1995 wurde ein geodätisches Dauerbeobachtungsprogramm eingerichtet, das zunächst 34 Objektpunkte und 75 Profilpunkte umfasste und jährlich im August mittels Totalstation vermessen wurde (Kaufmann et al. 2007).

Die mittlere horizontale Geschwindigkeit stieg in diesem Zeitraum von etwa 15 cm/a (1995-1997) auf rund 25 cm/a (2002-2005), was einer Beschleunigung um etwa +64% entspricht (Kaufmann et al. 2007). Seit 2014 erfolgt das geodätische Messverfahren mittels RTK-GNSS mit Zentimetergenauigkeit (Kaufmann 2016). Für den Zeitraum 1995-2015 wurden Bewegungsraten zwischen 11,0 und 51,6 cm/a bestimmt, während 2014-2015 Werte bis 65,9 cm/a erreicht wurden – die höchsten seit Beginn des Monitoringprogramms (Kaufmann 2016).

Neuere subannuelle GNSS-Messungen liefern eine Ergänzung zur bekannten Dynamik des Dösener Blockgletschers. Darin wird gezeigt, dass der Blockgletscher im Sommer 2022 bis zu 128% der Jahresgeschwindigkeit erreichte, mit Maxima zwischen Mitte August und Ende September. Die Analyse belegt zudem eine räumliche Differenz zwischen oberen und unteren Segmenten, was auf eine komplexe thermische und hydrologische Steuerung des saisonalen Bewegungsverhaltens hindeutet (Pfeffer 2023). Im großräumigen Kontext zeigen mehrere Studien, dass die Bewegungsentwicklung des Dösener Blockgletschers weitgehend synchron zu anderen aktiven Blockgletschern der Alpen verläuft (Delaloye et al. 2008; Buck and Kaufmann 2010; Kellerer-Pirklbauer et al. 2024).

4. Methodik

4.1. Forschungskonzept

Das Forschungsdesign dieser Arbeit basiert auf dem Versuch einen standardisierten und vollständig reproduzierbaren Workflow zur Ableitung subannueller Blockgletscherbewegungen zu entwickeln. Der Workflow ist so strukturiert, dass die monatlich aufgenommenen Datensätze zuverlässig miteinander verglichen werden können und die für die Analyse notwendige Genauigkeit erreicht wird.

Kern dieser Methodik ist die kombinierte Nutzung UAV-basierter Bilddaten und eines bestehenden geodätischen GNSS-Referenznetzes, wodurch flächenhafte Verschiebungsfelder und punktuelle Referenzbewegungen innerhalb eines konsistenten Workflows verknüpft werden. Dieser Ansatz stützt sich auf monatliche UAV-Erhebungen zwischen 30. Juni und 15. September 2025, ergänzt durch Daten der Messkampagnen 2023 und 2024, die zur kontextuellen Einordnung der subannuellen Dynamik herangezogen werden (siehe Abb.3).

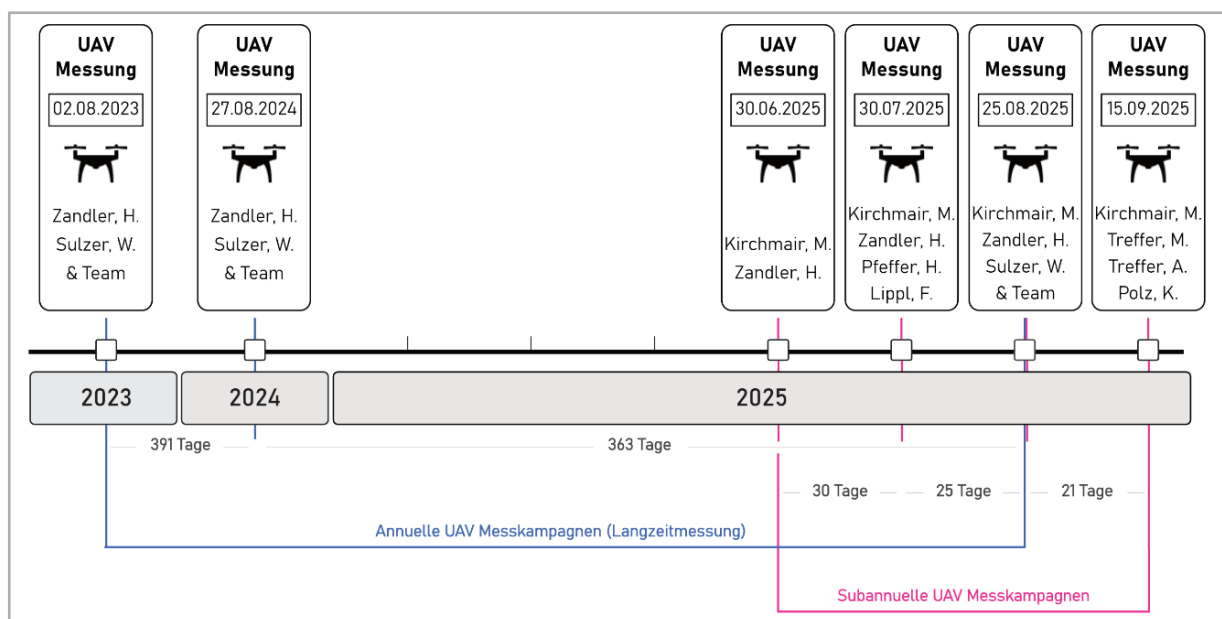


Abbildung 3 Zeitliche Einordnung aller UAV-Messkampagnen zwischen 2023 und 2025 als Grundlage der multitemporalen Bewegungsanalyse (Eigene Darstellung 2025)

Der Workflow (siehe Abb.4) gliedert sich in drei übergeordnete Komponenten, die jeweils in eigenen Unterkapiteln detailliert erörtert werden. Die Erhebung optischer und geodätischer Messdaten, die photogrammetrische Verarbeitung und Generierung geometrisch konsistenter Orthomosaik sowie die Validierung der Bewegungsfelder mittels Ground Control Points (GCPs) und stabilen Referenzpunkten außerhalb der aktiven Deformationszone des Blockgletschers.

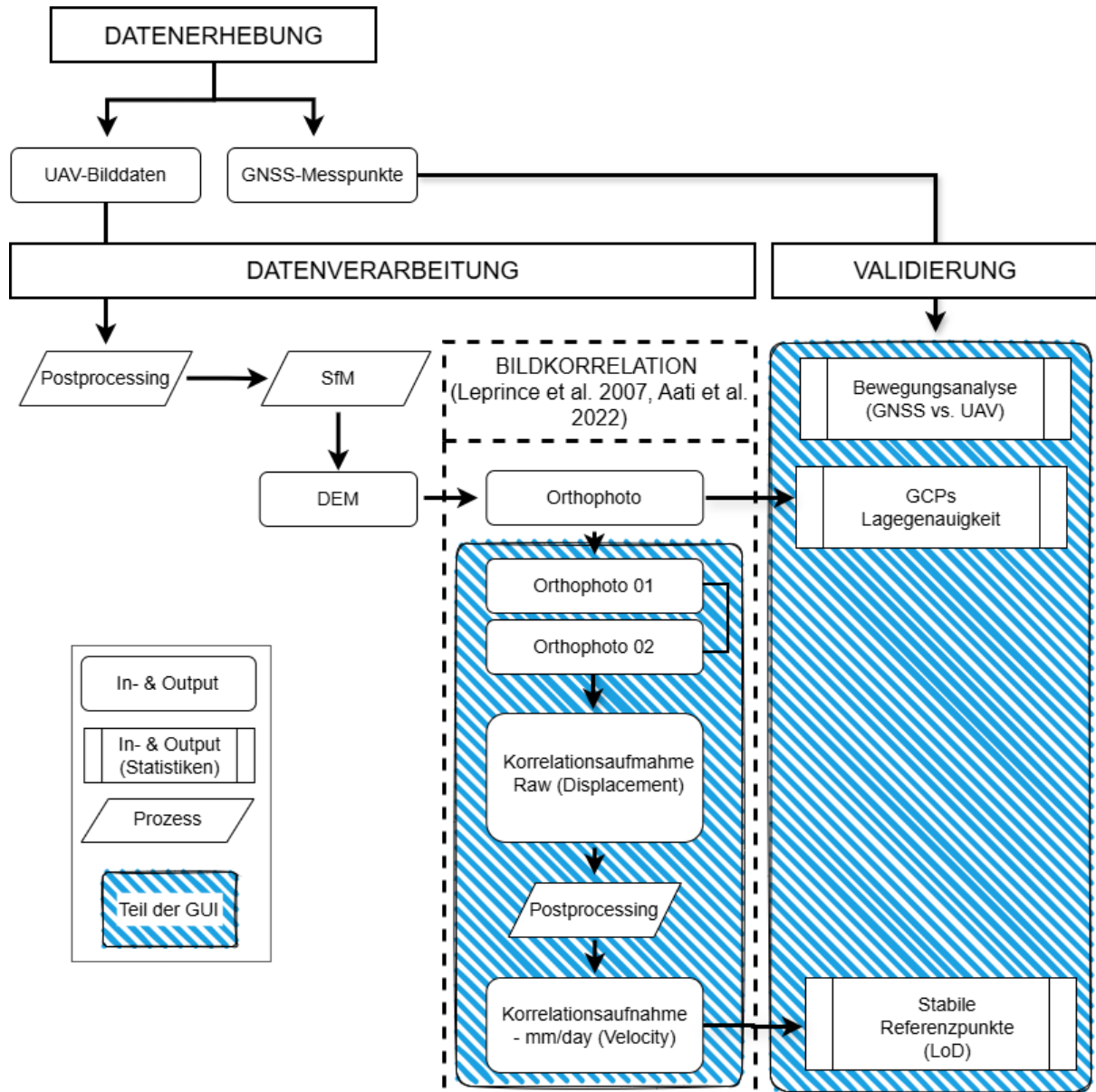


Abbildung 4 Methodischer Workflow zur Ableitung subannueller Blockgletscherbewegungen aus UAV-Photogrammetrie und GNSS-Daten (Eigene Darstellung 2025)

Auf Basis der erzeugten Orthomosaik erfolgt die Ableitung der Oberflächenverschiebungen mittels automatisierter Bildkorrelation. Hierfür wird in dieser Arbeit ein korrelationsbasierter Ansatz eingesetzt, da die grobblockige Oberfläche des Blockgletschers ein stabiles und gut wiedererkennbares Texturmuster liefert. Dadurch können Bewegungsfelder auch bei kurzen Zeitintervallen konsistent abgeleitet werden, was eine monatliche Auswertung der saisonalen Dynamik ermöglicht. Die Umsetzung erfolgt mit geoCosiCorr3D, wodurch eine geometrisch transparente und reproduzierbare Prozesskette gewährleistet wird und die Verarbeitung in die in dieser Arbeit entwickelte Auswertesoftware integriert werden kann.

Ein zusätzlicher methodischer Beitrag dieser Arbeit, besteht in der Entwicklung einer eigenen graphischen Benutzeroberfläche (GUI), die der Standardisierung und operativen Umsetzung des Workflows dient. Sie fungiert damit als verbindendes Element zwischen den Prozessmodulen und erhöht die Reproduzierbarkeit sowie die Nachvollziehbarkeit der gesamten Verfahrenskette.

4.2. Datenerhebung

Die Datenerhebung kombiniert UAV-gestützte Bildaufnahmen und geodätische GNSS-Messungen, die in einem wiederkehrenden Messprozess in jeder Messkampagne durchgeführt worden sind.

Da der Dösener Blockgletscher eine Ausdehnung von rund 800 m in Ost–West-Richtung besitzt, war es notwendig, jede Messkampagne mit zwei getrennten UAV-Flügen abzudecken. Die beiden Flugmuster erfassen jeweils den westlichen beziehungsweise den östlichen Teil des Blockgletschers und werden anschließend zu einem gemeinsamen Bildblock zusammengeführt, der die gesamte aktive Blockgletscherfläche umfasst (siehe Abb.5).

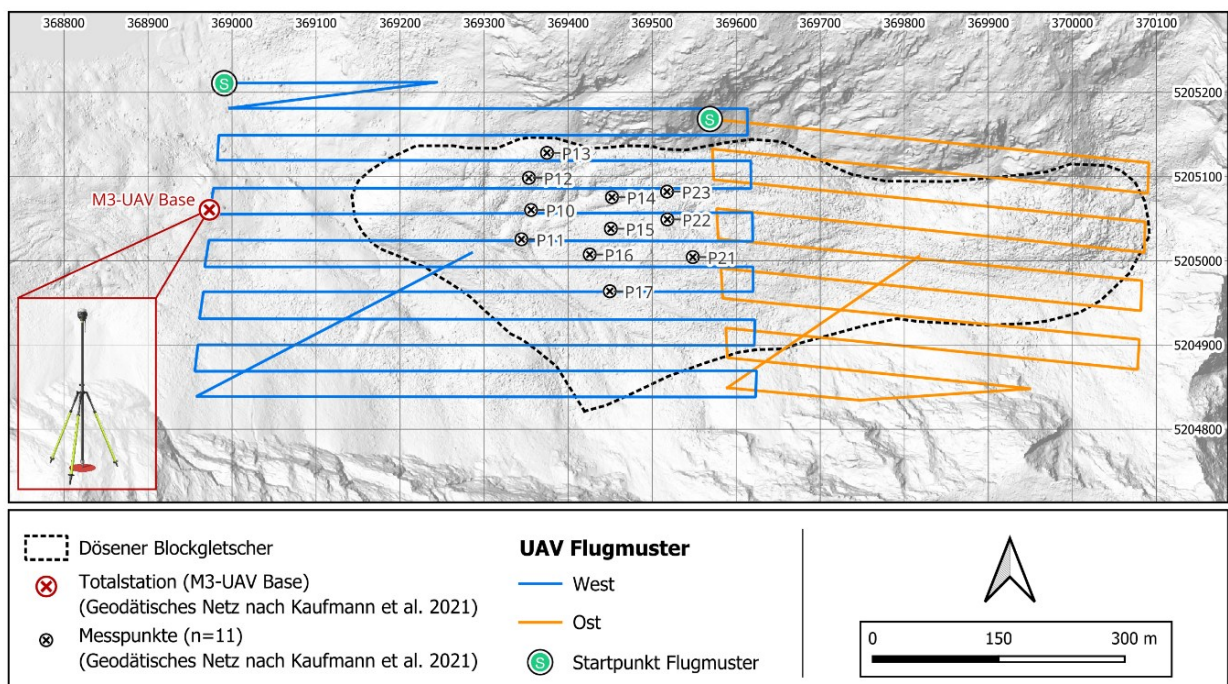


Abbildung 5 Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes mit den beiden UAV-Flugmustern (blau = West, orange = Ost), der Position der RTK-Basisstation sowie den erhobenen GNSS-Messpunkten (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)

4.2.1 UAV-gestützte Bildaufnahmen

Die UAV-Erfassung erfolgte in allen seit 2023 hier relevanten Kampagnen mit einer DJI M300 RTK in Kombination mit der Zenmuse-P1-Kamera. Der 45-MP-Vollformatsensor (36 mm Sensorbreite, 8192 px Bildbreite) (Formel 1) und der mechanische Verschluss reduzieren geometrische Verzerrungen und sind für photogrammetrische SfM-Verfahren optimiert (DJI 2021, 2023). Die Befliegungen erfolgten in einer Flughöhe von 100 m über Grund (Geländeabstand). Die Ground Sample Distance (GSD) ergibt sich aus der Sensorpixelgröße und der Aufnahmehöhe.

$$\text{Pixelgröße} = \frac{36 \text{ mm}}{8192 \text{ px}} = 0,00439 \text{ mm} \quad (1)$$

$$\text{GSD} = \frac{\text{Pixelgröße} \cdot \text{Flughöhe}}{\text{Brennweite}} = \frac{0,00439 \text{ mm} \cdot 100\,000 \text{ mm}}{35 \text{ mm}} \approx 1,25 \text{ cm/px} \quad (2)$$

Damit ergibt sich für alle Bildaufnahmen eine GSD von ca. 1,25 cm/Pixel (siehe Formel 2). Die Bildüberlappung wurde mit $\geq 80\%$ in Flugrichtung und $\geq 70\%$ quer festgelegt, entsprechend den empfohlenen Parametern für UAV-Photogrammetrie in komplexem Relief (Agisoft Metashape 2024). Für alle Messkampagnen wurden konsistent dieselben beiden Flugmuster (West, Ost) eingesetzt.

Die Real-Time Kinematic (RTK)-Funktion der Drohne war während aller Flüge aktiv. Die stationäre Emlid Reach RS2-Basisstation (M3-UAV Base) diente als lokaler RTK-Referenzpunkt und stellte der DJI M300 RTK kontinuierlich Korrekturdaten bereit. Die Basisstation wurde im Untersuchungsgebiet aufgebaut und auf bekannte Koordinaten referenziert, sodass die RTK-Korrekturen lokal berechnet und an die Drohne übertragen werden konnten. Dadurch wird eine stabile und zentimetergenaue Positionierung der Bildaufnahmen ermöglicht.

Die Drohne verarbeitet während der Befliegung die von der Basisstation bereitgestellten RTK-Korrekturparameter und wendet diese auf die eigenen GNSS-Messungen an, wodurch eine zentimetergenaue Positionierung der Kamerastandpunkte ermöglicht wird (siehe Abb. 6). Die korrigierten Positionsinformationen werden dabei direkt in den Bildmetadaten gespeichert und bilden die Grundlage für die präzise Georeferenzierung der Aufnahmen. Dadurch werden systematische Verzerrungen in der späteren Bündelblockausgleichung reduziert und die absolute Skalierung der SfM-Rekonstruktion verbessert (Emlid Tech Kf 2023; DJI 2023). Zusätzlich wurden die GNSS-Rohdaten im Nachgang mittels Post-Processed Kinematic (PPK) erneut korrigiert (siehe Kapitel 4.3.1) (Emlid Tech Kf 2023; DJI 2023).

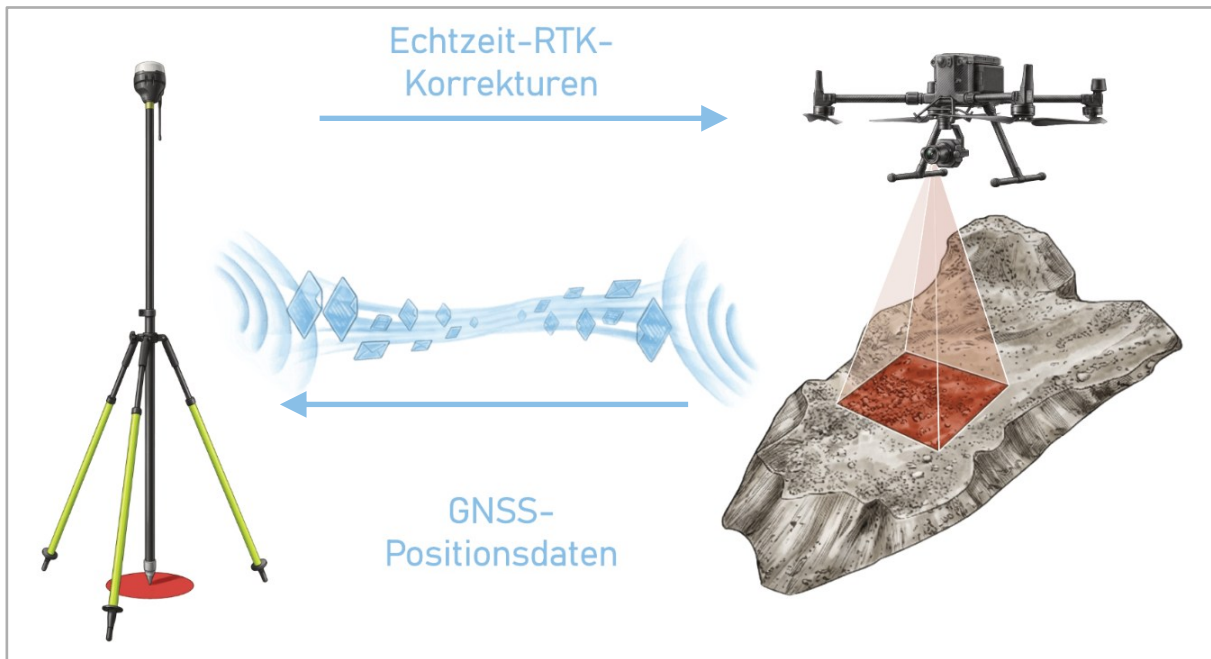


Abbildung 6 Prinzip der Echtzeit-RTK-Positionsbestimmung zwischen RS2-Basisstation und DJI M300 RTK (Darstellung durch Illustrae 2025, Eigene Fotos)

4.2.2 Geodätische GNSS-Messungen

Die geodätische Geländeaufnahme erfolgte mit einem zweistufigen GNSS-System, bestehend aus einer Emlid Reach RS2 als stationäre Referenzstation und einem Emlid Reach RS3 als Rover. Der RS3 wurde bewusst als mobile Station verwendet, da jener über eine integrierte Inertial Measurement Unit (IMU)-basierte Neigungskompensation verfügt, wodurch auch bei leicht geneigtem Messstab zentimetergenaue Punktbestimmungen möglich sind (Emlid Tech Kf 2024a).

Die Übertragung der RTK-Korrekturen von der RS2-Basisstation zum RS3-Rover erfolgte über einen LoRa-Funklink, der in beiden Geräten integriert ist. LoRa bietet eine hohe Reichweite bei niedriger Sendeleistung und ist speziell für GNSS-RTK Anwendungen in offenem Gelände optimiert (Emlid Tech Kf 2024a). Dadurch konnten die Rovermessungen auch in topographisch anspruchsvollen Bereichen zuverlässig durchgeführt werden, ohne dass eine Mobilfunkverbindung erforderlich war.

Die eigentliche Punktaufnahme erfolgte mit dem RS3 im Stop-and-Go-Prinzip. Jeder Messpunkt wurde mit einer Standzeit von zehn Sekunden erfasst, während der Empfänger kontinuierlich Fix-Lösungen sammelte. Zur Reduktion kurzzeitiger Signalstörungen wurden drei unabhängige Wiederholungsmessungen pro Punkt durchgeführt, welche in der späteren Prozessierung noch gemittelt wurden (Emlid Tech Kf 2024a). Die geodätischen GNSS-Messungen basieren auf zwei strukturell unterschiedlichen Punktgruppen, die im methodischen Aufnahmekonzept verschiedene Funktionen erfüllen.

(i) Messpunkte aus dem geodätischen Messpunktnetz

Das geodätische Monitoringnetz des Dösener Blockgletschers umfasst seit 1995 insgesamt 34 fest vermarkte Messstellen. Für diese Arbeit wurden 11 Messpunkte gezielt ausgewählt und in die Auswertung integriert. Die Auswahl erfolgte für den westlichen und unteren zentralen Blockgletschersektor, da dieser Abschnitt in früheren Untersuchungen als dynamisch aktivste Zone beschrieben wird und somit besonders geeignete Referenzdaten zur Validierung der UAV-basierten Verschiebungsfelder liefert (Kellerer-Pirklbauer et al. 2014; Kaufmann 2016). Zudem sind die Punkte in diesem Bereich im Rahmen der Messkampagnen 2023 und 2024 regelmäßig erhoben worden und dadurch mit den verfügbaren Zeitressourcen konsistent erfassbar. Aufgrund der Lage im unteren Sektor ist die Wiederholbarkeit der Messungen auch bei schwierigen Bedingungen, etwa partieller Schneebedeckung, vergleichsweise gut gewährleistet. Subannuelle Auswertungen bestätigen für denselben Bereich ausgeprägte saisonale Beschleunigungen und deutlich erhöhte Verschiebungsraten gegenüber den zentralen und östlichen Abschnitten, wodurch eine direkte Vergleichbarkeit mit bisherigen Arbeiten zur saisonalen Dynamik gegeben ist (Pfeffer 2023).

(ii) Ground Control Points (GCPs)

Die GCPs wurden primär zur unabhängigen Validierung der Blockgletscherdynamik und Qualitätskontrolle der photogrammetrischen Produkte eingesetzt. Eine Verwendung als georeferenzierte Stützpunkte war lediglich als Fallback-Szenario vorgesehen, falls die RTK-Positionierung der Drohnen unerwartet Qualitätsverluste aufgewiesen hätte.

Die topoklimatischen Bedingungen des Untersuchungsgebietes, insbesondere durch häufige Nebelbildung, rascher Wolkenaufzug und kurzen Phasen stabiler Sicht, erschwerten die großflächige Auslegung physischer Targets. Die GCP-Strategie wurde daher flexibel an die jeweiligen Flugbedingungen der einzelnen Messkampagnen angepasst. In den Kampagnen Juni (Messkampagne 01) und August 2025 (Messkampagne 03) herrschten ausreichend stabile Sichtverhältnisse, sodass physische Targets ausgelegt werden konnten (siehe Abb.7A-B). In den Kampagnen Juli (Messkampagne 02) und September (Messkampagne 04) war dies aufgrund sehr kurz nutzbarer Flugfenster nicht möglich. Stattdessen wurden markante farbliche Markierungen aus zuvor durchgeführten Messkampagnen als natürliche Passpunkte genutzt (siehe Abb.7C-D). Alle GCP-Positionen, welche „natürlich“ im Gelände erfasst worden sind, wurden zusätzlich fotografisch dokumentiert, um ihre eindeutige Lage und Identifikation in den Orthofotos zu gewährleisten (siehe Abb. 8).



Abbildung 7 Beispiel eines im Gelände ausgelegten Targets (Messkampagne 01, Juni 2025) und dessen Einmessung (A u. B) sowie die angelegten farblich markierten GCPs (Messkampagne 02, Juli 2025) und dessen Identifikation im UAV-Orthofoto (C u. D) (Eigene Darstellung)

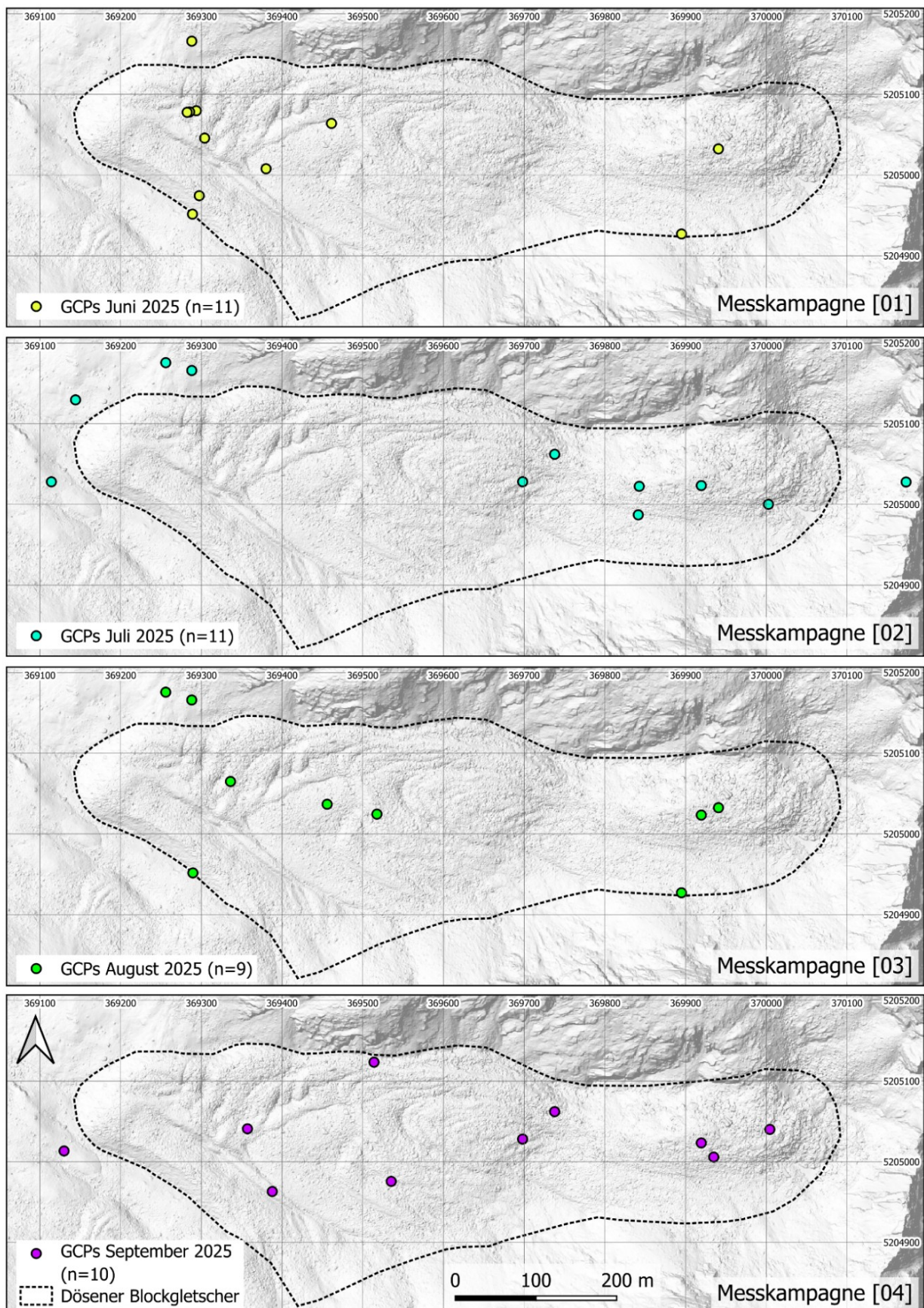


Abbildung 8 Lage und Anzahl der für die vier UAV-Messkampagnen eingesetzten Ground Control Points (GCPs) im Zeitraum Juni–September 2025 (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)

4.3. Datenverarbeitung

4.3.1 Postprocessing

Parallel zur Echtzeit-RTK-Positionierung zeichnen die M300 und die P1 zusätzlich GNSS-Rohdaten sowie präzise Kamera-Auslösezeitpunkte auf. Diese Informationen ermöglichen ein nachgelagertes Postprocessed Kinematic (PPK), dass die Flugtrajektorien verfeinert und kurzfristige RTK-Instabilitäten korrigiert (siehe Abb.9) (DJI 2021; DJI 2023).

Während der Flüge speicherte die stationäre Reach-RS2-Basis kontinuierlich RINEX-Beobachtungs- und Navigationsdaten. Zusammen mit den von der Drohne aufgezeichneten Rover-Rohdaten werden sie in Emlid Studio weiterverarbeitet. Der PPK-Ablauf umfasst das Zusammenführen der Basis- und Rover-RINEX-Dateien mit der Timemark-Datei, die die exakten Auslösezeitpunkte der Kamera enthält. Dabei verknüpft die Software die Zeitmarken automatisch mit den GNSS-Beobachtungen und berücksichtigt den in den Projektparametern definierten Abstand zwischen Antenne und Kamera (Emlid Tech Kf 2024b). Auf diese Weise lassen sich die Kamerapositionen für jede Epoche präzise rekonstruieren.

Das Ergebnis des Prozesses ist eine *_events.pos-Datei, die präzise Kamerakoordinaten für alle Bildaufnahmen enthält. Diese Positionen werden anschließend zum Geotagging verwendet und erhöhen die Lagegenauigkeit.

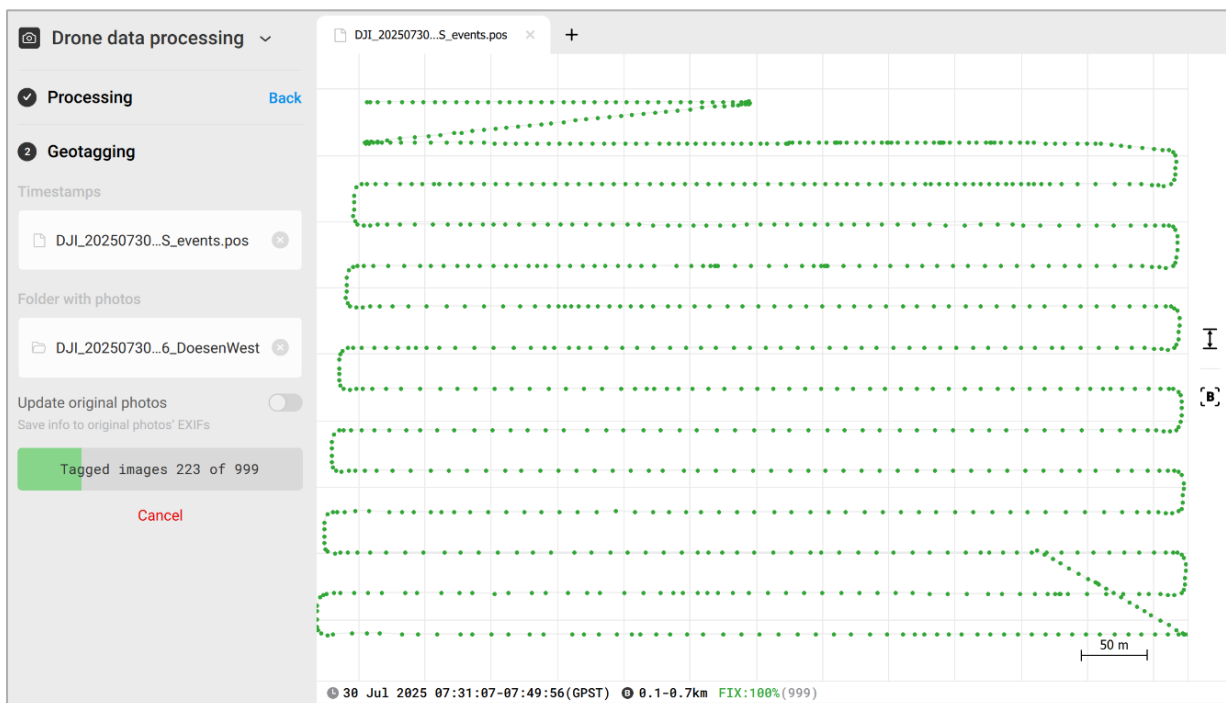


Abbildung 9 Darstellung der berechneten Kamerapositionen (grün) des Flugmusters (West) vom 30.07.2025 auf Basis der Rover-RINEX-Daten und der RS2-Referenzstation (Eigene Darstellung 2025)

4.3.2 Photogrammetrische Auswertung (SfM)

Die UAV-Bilddaten wurden in einem standardisierten Structure-from-Motion-/Multiple-View-Stereo(MVS)-Workflow, in Agisoft Metashape 2.2.0 verarbeitet. Die Prozessierung folgt etablierten Empfehlungen für geomorphologische Anwendungen und ist darauf ausgelegt, in einer stark strukturierten Hochgebirgsfläche geometrisch stabile und reproduzierbare Produkte zu erzeugen (Eltner et al. 2016; James et al. 2019; Eltner and Sofia 2020). Die Pipeline entspricht der in Metashape implementierten photogrammetrischen Prozessarchitektur (siehe Abb.10) (Agisoft Metashape 2024). Die Wahl eines SfM-basierten Ansatzes ist insbesondere für relief- und texturstarke alpine Umgebungen geeignet, in denen klassische terrestrische Messmethoden häufig durch eingeschränkte Sichtlinien limitiert sind (Westoby et al. 2012).

Beim Import der Aufnahmen wurden die RTK-Positionsdaten jedes einzelnen Bildes der Zenmuse P1 vollständig übernommen, wodurch eine initiale Außenorientierung im Zentimeterbereich bereitgestellt wird. Die Kombination aus GNSS-Trajektorie und IMU-Orientierungsdaten stellt eine vollständige direkte Georeferenzierung bereit und stabilisiert die nachfolgende Bündelblockausgleichung, da präzise Vororientierungen systematisch Verzerrungen reduzieren (Gerke and Przybilla 2016; Stöcker et al. 2017). Metashape übernimmt die in den EXIF-Daten hinterlegten RTK-Orientierungselemente als Startwerte für die Bündelblockausgleichung und verbessert damit die Konvergenz der Autokalibrierung (Agisoft Metashape 2024).

Die Qualität der direkten Georeferenzierung wurde für jede Messkampagne anhand der in Metashape exportierten Kamerapositionierungsfehler bewertet. Die horizontalen Lagefehler lagen dabei konsistent im Zentimeterbereich, mit mittleren Abweichungen von typischerweise < 1.5 cm. Die größten Abweichungen traten in der September-Kampagne auf, blieben jedoch ebenfalls innerhalb des für RTK-UAV-Systeme üblichen Genauigkeitsniveaus (STÖCKER et al. 2017; GERKE & PRZYBILLA 2016).

Damit erfüllt die direkte Georeferenzierung die Anforderungen eines stabilen SfM-Workflows, da die Positionsfehler der Kameralagen deutlich unterhalb des Bodenauflösungsniveaus ($GSD \approx 1.25$ cm) liegen. Die Genauigkeiten entsprechen dem in der Literatur dokumentierten Leistungsbereich moderner integrierter GNSS/IMU-Systeme und begründen den Verzicht auf zusätzliche Bodenpasspunkte (James et al. 2019).

Zudem stärken verschiedenste Studien das Argument, dass eine stabile direkte Georeferenzierung (kontinuierliche RTK-/PPK-Anbindung) die Funktion klassischer Kontrollpunkte weitgehend ersetzt und zusätzliche GCPs die absolute Genauigkeit nicht weiter verbessern (Gerke and Przybilla 2016; Stöcker et al. 2017; Śledź et al. 2021). Ground Control Points sind vor allem für nicht-direkt georeferenzierte Datensätze erforderlich, während RTK-gestützte Systeme eine hinreichend präzise absolute Orientierung bereitstellen (James et al. 2019).

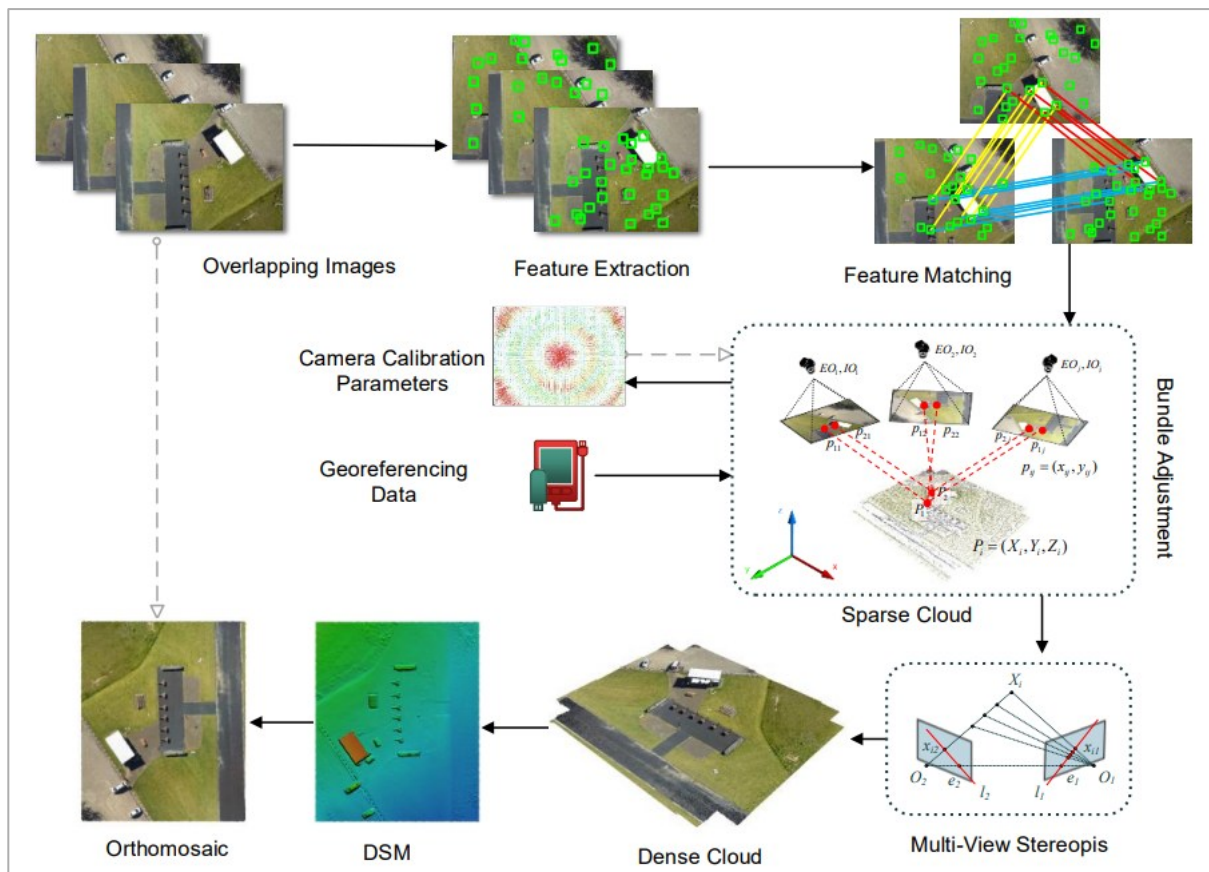


Abbildung 10 Darstellung der in Metashape implementierten photogrammetrischen Prozessarchitektur (Javadnejad 2018)

Die Bildorientierung erfolgte mit hoher Feature-Dichte (Key Point Limit 40.000; Tie Point Limit 10.000) und aktivierter generischer sowie referenzbasierter Vorselektion, um robuste Merkmalszuordnungen in einer Szene mit repetitiven Texturen und komplexem Relief sicherzustellen (Eltner et al. 2016). In blockreichen, hochstrukturierten Oberflächen ist eine hohe Anzahl stabiler Bildmerkmale entscheidend, um Fehlerausgleichungen und inhomogene Punktverteilungen zu vermeiden (Eltner et al. 2017). Die Qualität der Tie-Points steuert unmittelbar die Stabilität der Bündelblockausgleichung und die spätere Depth-Maps-Rekonstruktion (Agisoft Metashape 2024).

Die Kamerakalibrierung erfolgte auf Basis der Metashape-Standard Einstellungen. Optimierte wurden die Brennweite, die Hauptpunktlage sowie die radialen (k_1 – k_3) und tangentialen Verzerrungskoeffizienten (p_1 , p_2). Die zusätzlichen Parameter des affinen Modells (b_1 , b_2) sowie erweiterte Kalibrieroptionen blieben deaktiviert. Dieses Parametrisierungsschema entspricht der gängigen Praxis in der UAV-Photogrammetrie und gewährleistet eine hinreichend vollständige Modellierung der internen Orientierung. Die Optimierung der aktivierten Parameter ist notwendig, da bereits geringfügige Linsenabweichungen großräumige systematische Artefakte in der 3D-Rekonstruktion verursachen können (Eltner and Sofia 2020). Da zudem die nachfolgende Oberflächen- und Orthomosaik-Generierung auf konsistenten externen/ inneren

Orientierungselementen (EO/IO) basiert, führen unzureichend optimierte Orientierungselemente bereits im Bündelblockausgleich zu systematischen Verzerrungen, die sich später in Nahtproblemen und Projektionsfehlern manifestieren (Agisoft Metashape 2024).

Die dichte Punktwolke wurde in hoher Qualität mit moderatem Depth Filtering berechnet. Dieses Filterlevel stellt einen etablierten Kompromiss dar, da es Rauschartefakte reduziert, ohne kleinmaßstäbliche Strukturen, wie beispielsweise blockige Oberflächen übermäßig zu glätten (Fugazza et al. 2018; James et al. 2019). Reliefdominierte Hochgebirgsoberflächen weisen aufgrund ihrer ausgeprägten Textur- und Richtungsvariabilität besonders günstige Voraussetzungen für dichte MVS-Rekonstruktionen auf. Die Vielzahl markanter Oberflächenmerkmale erzeugt stabile Stereo-Korrespondenzen und unterstützt eine robuste Tiefenrekonstruktion (Javadnejad 2018). Zusätzlich zeigen andere Arbeiten dazu, dass texturreiche, vegetationsarme Geländeformen besonders präzise Punktwolken ermöglichen, während homogene oder vegetationsbedeckte Flächen signifikant höhere Rekonstruktionsunsicherheiten erzeugen (Westoby et al. 2012). Metashape weist zugleich darauf hin, dass zu aggressives Filtering feine Strukturen entfernt, während niedrige Filterstufen Rauschen verstärken, weshalb ein mittleres Niveau für heterogene Oberflächen empfohlen wird (Agisoft Metashape 2024).

Aus der rekonstruierten Szenengeometrie wurde ein digitales Oberflächenmodell (DOM) mit 3 cm und ein Orthophotomosaik mit 1,5 cm geometrischer Auflösung abgeleitet. Beide Auflösungen entsprechen den Empfehlungen, fotogrammetrische Endprodukte nicht unterhalb des GSD zu oversampeln, um Interpolationsartefakte zu vermeiden und konsistente metrische Qualität sicherzustellen (James et al. 2019).

4.3.3 Bildkorrelation

Die Bildkorrelation dient der quantitativen Bestimmung zweidimensionaler Verschiebungen aus zwei zeitlich getrennten Aufnahmen. Die Methode folgt der frequenzbasierten Korrelationslogik nach Leprince et al. (2007) und ihrer Weiterentwicklung in Form des Moduls von geoCosiCorr3D (Aati et al. 2022; Aati 2024). Grundlage ist die Annahme, dass lokale Bildausschnitte zwischen zwei Zeitepochen überwiegend als starre Translation auftreten. Damit lässt sich jeder Verschiebungsvektor innerhalb eines Fensters durch den Versatz zweier strukturell ähnlicher Oberflächenmuster beschreiben.

Die eigentliche Verschiebungsdetektion erfolgt im Frequenzraum. Wird ein Muster in einem Raumabschnitt lediglich verschoben, bleibt seine Amplitude weitgehend konstant, während sich die Phase systematisch verändert. Die Amplitude beschreibt die Stärke bzw. den Kontrast der enthaltenen Strukturen, während die Phase deren räumliche Lageinformation repräsentiert. Damit trägt die Amplitude radiometrische

Eigenschaften, während die Phase jene Bestandteile enthält, die für die geometrische Verschiebung relevant sind.

Die Grundlage der frequenzbasierten Bildkorrelation ist die Translationseigenschaft der zweidimensionalen diskreten Fourier-Transformierten (DFT). Eine Verschiebung eines Bildausschnitts um (x_0, y_0) führt im Frequenzraum zu einer reinen Phasenänderung, während die Amplitude unverändert bleibt. Für ein Bild der Größe $M \times N$ gilt (Gonzalez and Woods 2008).

$$f(x - x_0, y - y_0) \Leftrightarrow F(u, v) e^{-j2\pi (\frac{ux_0}{M} + \frac{vy_0}{N})} \quad (3)$$

In der Korrelationsanwendung werden zwei reale Fenster aus zwei Epochen miteinander verglichen. Bezeichnet man deren Spektren mit $G_a(u, v)$ und $G_b(u, v)$, ergibt sich daraus direkt:

$$G_b(u, v) = G_a(u, v) e^{-j2\pi (\frac{u\Delta x}{M} + \frac{v\Delta y}{N})} \quad (4)$$

Der Exponentialterm hat stets einen Betrag von 1 und beschreibt ausschließlich die Phasenveränderung. Die Verschiebung erscheint daher als linearer Phasenverlauf über alle Frequenzen. Aus der Neigung dieser Phasebene werden die subpixelgenauen Verschiebungskomponenten Δx und Δy geschätzt, die das Kernprinzip der FFT-basierten Subpixelkorrelation nach Leprince et al. (2007) und Aati et al. (2022,2024) bilden.

Vor der Korrelation müssen die beiden Orthofotos geometrisch vollständig konsistent vorliegen, d.h. mit identischem in Form identischer Raster, Transformation und Auflösung vorliegen. Bereits geringe Abweichungen erzeugen im Frequenzraum systematische Phasenfehler, die als falsche Verschiebungen erscheinen würden. Leprince et al. (2007) weisen besonders auf aliasbedingte Artefakte durch ungeeignetes Resampling hin.

Die Korrelation erfolgt mittels Fenster, welche den Bildausschnitt definieren, innerhalb dessen eine weitgehend uniforme Bewegung angenommen wird. Die Fenstergröße beeinflusst die Stabilität der Korrelationslösung, während die Schrittweite die räumliche Dichte des resultierenden Bewegungsfeldes bestimmt. Die Wahl dieser Parameter richtet sich einerseits nach der strukturellen Heterogenität der Oberfläche, andererseits nach der Größenordnung der zu erwartenden Verschiebungen, da der maximal eindeutig erfassbare Versatz durch die Fenstergröße begrenzt ist. Für die Frequency-Methode gilt, dass Verschiebungen nur dann eindeutig bestimmt werden können, wenn sie innerhalb des durch das Korrelationsfenster vorgegebenen Bereichs liegen ($\approx \pm N/2$ Pixel bei einer Fenstergröße von $N \times N$) (Leprince et al. 2007). Vor diesem Hintergrund wurde eine Fenstergröße von 64 Pixeln gewählt, da sie auf der blockreichen Oberfläche ausreichend Texturinformation für eine stabile Korrelation bereitstellt und gleichzeitig die im

Untersuchungszeitraum erwarteten Verschiebungen abdeckt. Eine Schrittweite von 6 Pixeln ermöglicht eine dichte räumliche Abtastung des Bewegungsfeldes.

Die für diese Arbeit gewählte Parametrisierung basiert auf den Bewegungsmessungen des Dösener Blockgletschers aus dem Jahr 2022 (Pfeffer 2023). Die GNSS-Daten dokumentieren Monatsbewegungen von 3-5 cm sowie Jahresbewegungen von 33-58 cm. Bei einer Bodenauflösung von 3 cm entsprechen diese Werte Pixelversätzen von 1 Pixel für Monatsintervalle und bis zu 19 Pixel über ein Jahr. Diese Größenordnung charakterisiert den Verschiebungsrahmen, innerhalb dessen die Korrelation arbeiten muss. Die verwendeten Parameter werden zusammenfassend in folgender Tabelle dargestellt (Tab.1).

Tabelle 1 Parametrisierung der Bildkorrelation für unterschiedliche Zeitintervalle

Parameter	Jahresintervall	Monatsintervall	2-Monatsintervall
<u>Window Size (px)</u>	64	64	64
<u>Step Size (px)</u>	6	6	6

Nach der Ermittlung des Suchraums erfolgt die eigentliche Phasenauswertung. Im Bildraum entsteht für jedes Fenster ein Korrelationspeak, der die ungefähre Lage der besten Übereinstimmung markiert. Dieser Wert wird nicht direkt als Ergebnis verwendet, sondern dient als Ausgangspunkt für die präzise Schätzung im Frequenzraum. Dort wird aus der Phase über alle Frequenzen eine Ebene abgeleitet, deren Neigung durch Regression bestimmt wird. Dieser Schritt reduziert tausende Phasenwerte auf zwei Parameter (Δx und Δy) und ermöglicht dadurch eine Subpixelgenauigkeit von etwa 1/20 Pixel (Leprince et al. 2007).

Für eine stabile Ebenenregression ist eine zuverlässige Auswahl relevanter Frequenzen notwendig. Frequenzen ohne strukturellen Beitrag erzeugen hohe Residuen und destabilisieren die oben genannte Schätzung. Leprince et al. (2007) führen hierfür eine adaptive Maskierung ein, die verrauschte oder schwache Frequenzen ausschließt. Aati et al. (2022, 2024) erweitert diesen Ansatz um ein iteratives Robustheitsverfahren, das problematische Frequenzanteile schrittweise abwertet und damit die Empfindlichkeit gegenüber Schattenbereiche, Texturverlust oder kleinen Oberflächenänderungen reduziert. Fenster mit instabiler Phase werden so früh erkannt und nicht in die Vektorbildung übernommen.

Nach Abschluss der Phasenregression liegt für jedes Fenster ein Subpixelverschiebungsvektor vor. Die von geoCosiCorr3D ausgegebenen ersten beiden Kanäle entsprechen dabei den vorhin erwähnten horizontalen und vertikalen Verschiebungskomponenten im Bildkoordinatensystem. Kanal 1 beschreibt die ost-

west-gerichtete Komponente (Δx) und Kanal 2 die nord-süd-gerichtete Komponente (Δy)(siehe Abb.11).

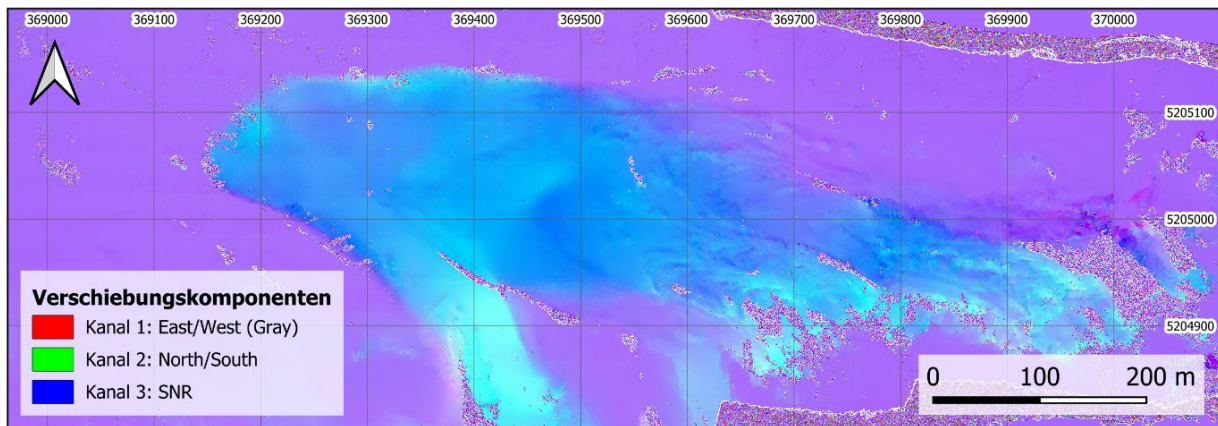


Abbildung 11 Subpixel-basierte Verschiebungsfelder (Ost–West, Nord–Süd, SNR (Signal-to-Noise Ratio) zwischen 30.06. und 30.07.2025, berechnet aus UAV-basierten Orthomosaiken in 3cm-Rasterauflösung (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)

Aus diesen beiden Komponenten ergibt sich der Betrag der horizontalen Gesamtverschiebung als euklidischer Abstand (siehe Formel 5).

$$d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (5)$$

4.4. Validierung

Die Validierung der abgeleiteten subannuellen Bewegungsfelder ist Voraussetzung für eine belastbare Interpretation der Ergebnisse. Die zu erwartenden Verschiebungen auf monatlichen Zeitskalen liegen teilweise in der Größenordnung photogrammetrischer und korrelationsbedingter Unsicherheiten. Aus diesem Grund erfolgt die Validierung mehrstufig und adressiert unterschiedliche Ebenen der Messkette.

Zur vergleichbaren Auswertung der mittleren annuellen und subannuellen Bewegungsgeschwindigkeit wird einheitlich über alle Karten eine Referenzfläche definiert. Innerhalb dieses Areals erfolgt die statistische Ermittlung der rasterbasierten Geschwindigkeiten. Die Referenzfläche wurde im westlichen und unteren zentralen Blockgletschersektor definiert und so abgegrenzt, dass sie die in dieser Arbeit verwendeten GNSS-Messpunkte ($n = 11$) vollständig einschließt. Dadurch ist eine direkte Vergleichbarkeit zwischen flächenhaften UAV-basierten Geschwindigkeitsfeldern und punktuellen GNSS-Referenzmessungen gegeben. Gleichzeitig ermöglicht die räumliche Übereinstimmung des untersuchten Areals eine Einordnung der Ergebnisse im Kontext hochfrequenter Messungen und Auswertungen aus früheren Arbeiten (Pfeffer 2023).

Im nächsten Schritt wird für jede Epoche die minimal detektierbare Bewegung als Level of Detection anhand stabiler Referenzbereiche bestimmt (Fey and Krainer 2020). Diese Nachweisgrenze dient der Trennung von realen Verschiebungen und Messrauschen. Die

Verschiebungskarten werden einheitlich dargestellt, während die epochenspezifischen LoD-Werte bei der Interpretation berücksichtigt werden. Anschließend werden die UAV-basierten Verschiebungsraten mit unabhängigen GNSS-Messungen verglichen und mittels lineare Regression ausgewertet, um die quantitative Übereinstimmung der abgeleiteten Bewegungsfelder mit externen Referenzwerten zu prüfen.

Aufgrund der bislang selten angewandten Methodik zur Erfassung subannueller Bewegungen in diesem Genauigkeitsbereich sind direkte quantitative Vergleiche mit bestehenden Studien nur eingeschränkt möglich. Ein belastbarer Vergleich kann im Wesentlichen für die ermittelten Level-of-Detection-Werte erfolgen, da diese in der Literatur dokumentiert sind. Andere Fehlerkennzahlen dienen in dieser Arbeit primär der internen Einordnung und werden nicht normativ bewertet. Abschließend wird die geometrische Qualität der Orthophotos anhand kampagnenspezifischer Ground Control Points überprüft, um mögliche systematische Lageverzerrungen der Eingangsprodukte zu identifizieren.

4.4.1 Stabile Referenzpunkte und Level of Detection (LoD)

Stabile Referenzpunkte dienen der quantitativen Bestimmung der minimal detektierbaren Bewegung (Level of Detection, LoD) der UAV-basierten Korrelationsfelder. Sie werden außerhalb der aktiven Deformationszone gesetzt und fungieren als geodätischer Nullrahmen (siehe Abb.12). Bei der Platzierung wurde darauf geachtet, vegetationsbedeckte Bereiche sowie einzelne Blöcke zu vermeiden, um zeitlich variable Texturen und potenzielle Fehlkorrelationen zu minimieren.

Der methodische Ansatz folgt einem etablierten Verfahren, bei dem stabile, möglichst ebene Referenzflächen außerhalb der Deformationszone zur Bewertung der relativen Genauigkeit UAV-basierter Deformationsfelder herangezogen werden. In diesen Bereichen ist keine reale Bewegung zu erwarten, sodass die gemessenen Verschiebungsvektoren ausschließlich Messrauschen, Residualfehler der Bildregistrierung sowie korrelationsbedingter Unsicherheiten widerspiegeln (Fey and Krainer 2020). Frühere Studien zeigen, dass die Genauigkeit UAV-basierter Oberflächenmodelle unter anderem von Bildgeometrie, Beleuchtungsbedingungen und Oberflächencharakteristika abhängt und dass unabhängige Referenzmessungen erforderlich sind, um diese Einflüsse zu quantifizieren (Gindraux et al. 2017).

Die Bestimmung der LoD erfolgt für jede Epoche separat und orientiert sich an der Methodik nach Fey und Krainer (2020) (siehe Formel 6). Diese Formulierung erlaubt eine getrennte Betrachtung systematischer Verschiebungstendenzen durch den Mittelwert (μ) und einer zufälligen Streuung, ausgedrückt durch die Standardabweichung (σ).

$$LoD = \mu + 2\sigma \tag{6}$$

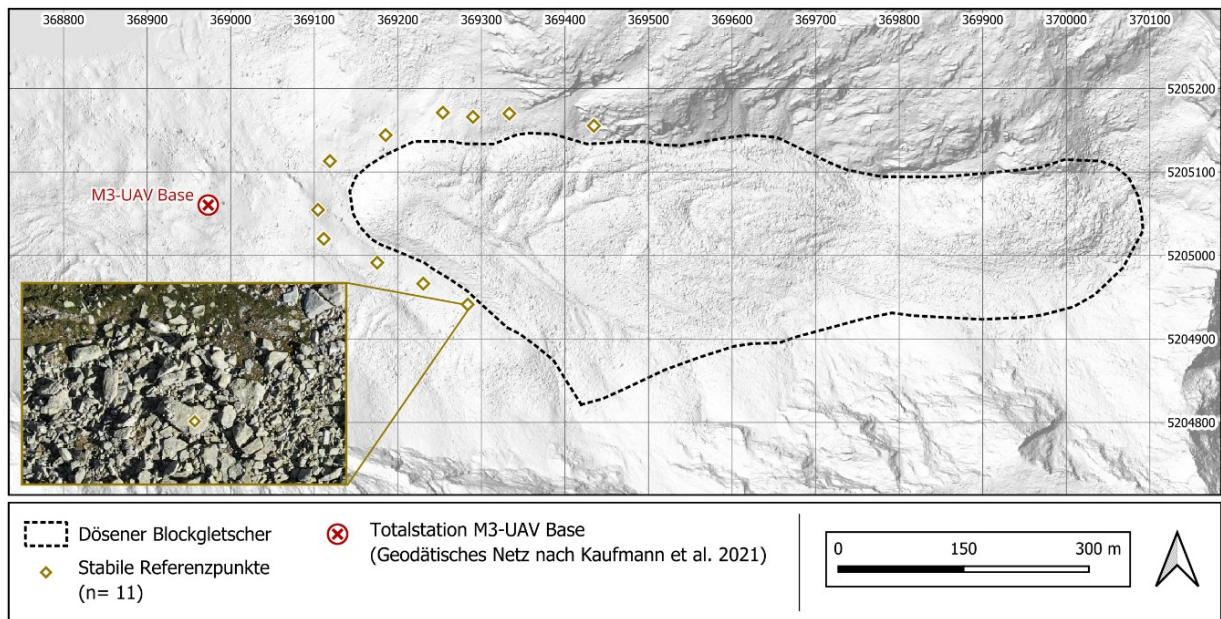


Abbildung 12 Verteilung der stabilen Referenzpunkte über das Untersuchungsgebiet (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)

4.4.2 Abgleich von GNSS-Messungen mit UAV-basierten Korrelationsergebnissen

Zur externen Validierung der UAV-basierten Bewegungsfelder werden die bildkorrelativ abgeleiteten Verschiebungsraten unabhängigen geodätischen GNSS-Messungen gegenübergestellt. Der Abgleich verfolgt das Ziel, zu prüfen, ob die aus den Verschiebungskarten abgeleiteten Bewegungsraten quantitativ mit externen Referenzwerten übereinstimmen. Er dient damit der Plausibilisierung der UAV-basierten Ergebnisse und nicht der Ableitung absoluter Referenzwerte.

Die GNSS-Messpunkte wurden in denselben Zeitintervallen erhoben wie die UAV-Flugkampagnen, wodurch eine direkte zeitliche Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Für jeden Messpunkt ergibt sich die horizontale Verschiebung zwischen zwei Messzeitpunkten aus der euklidischen Distanz (siehe Formel 7).

$$d_{xy} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (7)$$

In den Abgleich fließen ausschließlich Verschiebungen ein, die oberhalb der jeweiligen epochenspezifischen Level-of-Detection liegen. Dadurch bleibt der Vergleich auf Bewegungen beschränkt, die das Messrauschen der UAV-basierten Korrelation übersteigen.

Zur quantitativen Beschreibung der Abweichungen zwischen GNSS-basierten Referenzgeschwindigkeiten (O_i) und UAV-basierten Korrelationsergebnissen (P_i) kommen mehrere komplementäre Fehlerkennzahlen zum Einsatz. Der Mean Absolute Error (MAE) beschreibt die mittlere absolute Abweichung und liefert ein robustes Maß für den typischen Fehler, da alle Abweichungen linear gewichtet werden (siehe Formel 8).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (8)$$

Der Root Mean Square Error (RMSE) basiert auf der quadrierten Abweichung und reagiert empfindlicher auf größere Fehler, wodurch zusätzliche Information über die Streuung der Fehlerverteilung und das Auftreten lokaler Abweichungen bereitgestellt werden (siehe Formel 9).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (9)$$

Da absolute Fehlerkennzahlen stark von der Größenordnung der beobachteten Bewegungen abhängen, ergänzt ein relativer RMSE die Analyse. Dieser normiert den RMSE auf die mittlere GNSS-basierte Referenzgeschwindigkeit und ermöglicht eine dimensionslose Bewertung der Abweichungen (siehe Formel 10).

$$RMSE_{rel} = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (10)$$

Zur Identifikation systematischer Über- oder Unterschätzungen der UAV-basierten Geschwindigkeiten gegenüber den GNSS-Referenzwerten wird zusätzlich der mittlere Fehler (Bias) berechnet (siehe Formel 11).

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (11)$$

Die kombinierte Nutzung von MAE, RMSE und Bias entspricht etablierten Vorgehensweisen in der quantitativen Validierung geodätischer und modellbasierter Datensätze (Willmott and Matsuura 2005; Chai and Draxler 2014). Die daraus abgeleiteten Kennzahlen dienen in dieser Arbeit primär der internen Einordnung der Abweichungen zwischen UAV- und GNSS-basierten Bewegungsraten. Ein direkter Vergleich mit bestehenden Studien ist aufgrund der bislang selten angewandten Methodik sowie unterschiedlicher zeitlicher Auflösungen nur eingeschränkt möglich und erfolgt im Wesentlichen für die ermittelten LoD-Werte auf Basis von Fey und Krainer (2020).

4.4.3 Geometrische Qualitätsbewertung der Orthophotos mittels GCPs

Zur Bewertung der geometrischen Qualität der Orthophotos werden GNSS-aufgenommene Ground Control Points (GCPs) mit ihren im Orthophoto kartierten Positionen verglichen. Dieser Abgleich dient der quantitativen Abschätzung der absoluten Lagegenauigkeit der Orthophotos sowie der Identifikation möglicher systematischer Lageverzerrungen, die sich auf die Qualität der bildkorrelativ abgeleiteten Verschiebungsfelder auswirken können.

Die GCP-Analyse stellt dabei eine ergänzende Qualitätskontrolle der Eingangsprodukte dar und ist nicht primär auf die Validierung der berechneten Verschiebungsraten

ausgerichtet. Entsprechend sind größere absolute Abweichungen der GCPs nicht zwangsläufig als Einschränkung der Aussagekraft der Bewegungsfelder zu interpretieren.

5. Ergebnisse

5.1. Entwicklung eines standardisierten Verarbeitungswerkzeuges

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte grafische Benutzeroberfläche („TerraShift“) dient der standardisierten Auswertung UAV-basierter Orthomosaike zur Ableitung von Blockgletscherbewegungen.

Das Korrelationsmodul geoCosiCorr3D (Aati et al. 2022; Aati 2024) liegt als Command-Line Interface (CLI) vor und setzt in der Anwendung sowohl die manuelle Definition sämtlicher Parameterpfade als auch Kenntnisse in der Kommandozeilenbedienung voraus. Zur Reduktion dieser methodischen Hürde und zur Umsetzung eines standardisierten sowie benutzerfreundlichen Workflows wurde im Rahmen dieser Arbeit eine eigene grafische Benutzeroberfläche entwickelt. Der Workflow ist sequenziell aufgebaut und in vier Hauptmodule gegliedert, die Nutzer:innen schrittweise durch den gesamten Prozess führen (siehe Abb. 13).

TerraShift ist damit als methodische Schnittstelle zwischen Datenerhebung, Bildkorrelation und Validierung zu verstehen. Der Fokus liegt auf einer konsistenten Prozesskette, da insbesondere bei subannuellen Zeitintervallen die zu erwartenden Verschiebungen teilweise nahe an der Nachweisgrenze liegen und eine einheitliche Verarbeitung daher entscheidend ist. Durch die standardisierte Struktur werden sowohl die Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Epochen als auch die direkte Anbindung an die Validierungsschritte unterstützt. Dadurch lässt sich die spätere Interpretation der Bewegungsmuster (Kapitel 5.2) klarer von der Bewertung der Messqualität (Kapitel 5.3) trennen.

Ein zentrales Entwicklungsziel war die Minimierung operatorabhängiger Entscheidungen, da insbesondere bei kurzen Zeitintervallen bereits geringe Abweichungen in Parametrisierung, Dateistruktur oder Rastergeometrie zu systematischen Unterschieden in den resultierenden Verschiebungsfeldern führen können. TerraShift setzt daher auf eine konsistente Parameterführung (vordefinierte Eingabemasken, validierte Pfade und feste Verarbeitungsschritte) und unterstützt damit eine reproduzierbare Auswertung, bei der die Ergebnisse zwischen Epochen methodisch vergleichbar bleiben.

Neben der Vereinfachung der Bedienung adressiert die GUI insbesondere typische Fehlerquellen CLI-basierter Prozessketten, wie inkonsistente Rasterauflösungen, abweichende Projektionen oder unvollständige Parameterdefinitionen. Durch integrierte Plausibilitätsprüfungen und eine strukturierte Eingabelogik wird die Wahrscheinlichkeit von Verarbeitungsabbrüchen und schwer nachvollziehbaren Artefakten reduziert, was die methodische Robustheit der abgeleiteten Bewegungsfelder erhöht.

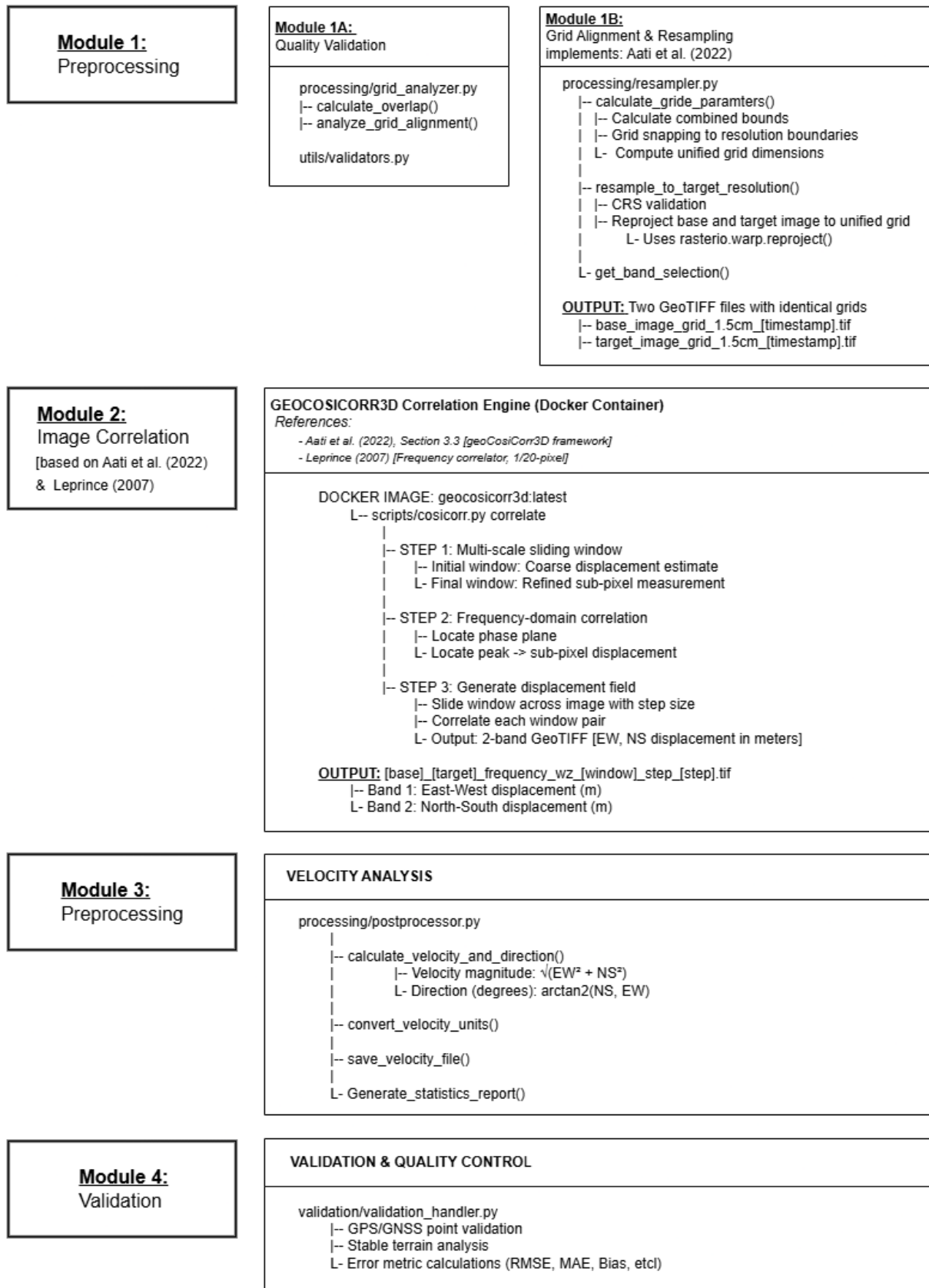


Abbildung 13 Schematische Darstellung der automatisierten GUI – TerraShift (Eigene Darstellung 2025)

5.1.1 Modul 1 - Preprocessing

Das Preprocessing bildet das erste Modul der GUI und stellt die notwendige Voraussetzung für alle nachfolgenden Verarbeitungsschritte dar. Ziel dieser Stufe ist die Sicherstellung der geometrischen Vergleichbarkeit der Eingangsdaten und damit die Schaffung der methodischen Grundlage für eine physikalisch interpretierbare Bildkorrelation. Die Relevanz einer solchen geometrischen Vorverarbeitung wird in der Literatur zu geoCosiCorr3D ausdrücklich hervorgehoben (Aati et al. 2022; Aati 2024).

Auch bei Orthomosaiken, die mit identischer Sensorik, vergleichbaren Flugparametern und demselben photogrammetrischen Workflow erzeugt wurden, treten in der Praxis häufig geringfügige Unterschiede in Rasterauflösung, Gitterursprung, räumlicher Ausdehnung oder Koordinatenreferenzsystem auf. Für subpixelbasierte Korrelationsverfahren sind solche Abweichungen kritisch, da sie systematische Offsets erzeugen können, die nicht von realen Oberflächenbewegungen unterscheidbar sind.

Das Preprocessing-Modul ist daher in zwei aufeinander aufbauende Teilschritte gegliedert. In einem ersten Schritt erfolgt eine formale Qualitätsprüfung der Eingangsdaten (Modul 1A; siehe Abb.14), gefolgt von der geometrischen Vereinheitlichung und dem Resampling der Orthomosaik (Modul 1B; siehe Abb.15).

Im ersten Teilschritt wird überprüft, ob die ausgewählten Orthomosaiken grundlegende geometrische Voraussetzungen für eine Bildkorrelation erfüllen. Diese sogenannte Pre-Correlation Quality Check umfasst die Kontrolle von Rasterauflösung, Gitterausrichtung, räumlicher Überlappung sowie des Koordinatenreferenzsystems. Die Ergebnisse der Überprüfung werden unmittelbar in der Benutzeroberfläche visualisiert (siehe Abb.14a). Abweichungen von den erforderlichen Kriterien werden durch entsprechende Warn- oder Fehlinweise kenntlich gemacht (siehe Abb. 14b). Ergänzend dazu steht ein detaillierter textbasierter Bericht zur geometrischen Konfiguration im Log-Panel zur Verfügung (siehe Abb. 14c).

Erst nach erfolgreichem Abschluss dieser Qualitätsprüfung erfolgt im zweiten Teilschritt das Resampling der Orthomosaik (Modul 1B). Hierbei werden ein Referenzbild (Base Image) und ein Vergleichsbild (Target Image) auf eine einheitliche räumliche Auflösung sowie eine konsistente Rastergeometrie gebracht. Die Zielauflösung kann manuell definiert oder über vordefinierte Einstellungen ausgewählt werden. Als Ergebnis entstehen zwei GeoTIFF-Dateien mit vollständig identischer Rastergeometrie, die anschließend als Eingabedaten für das Processing-Modul verwendet werden.

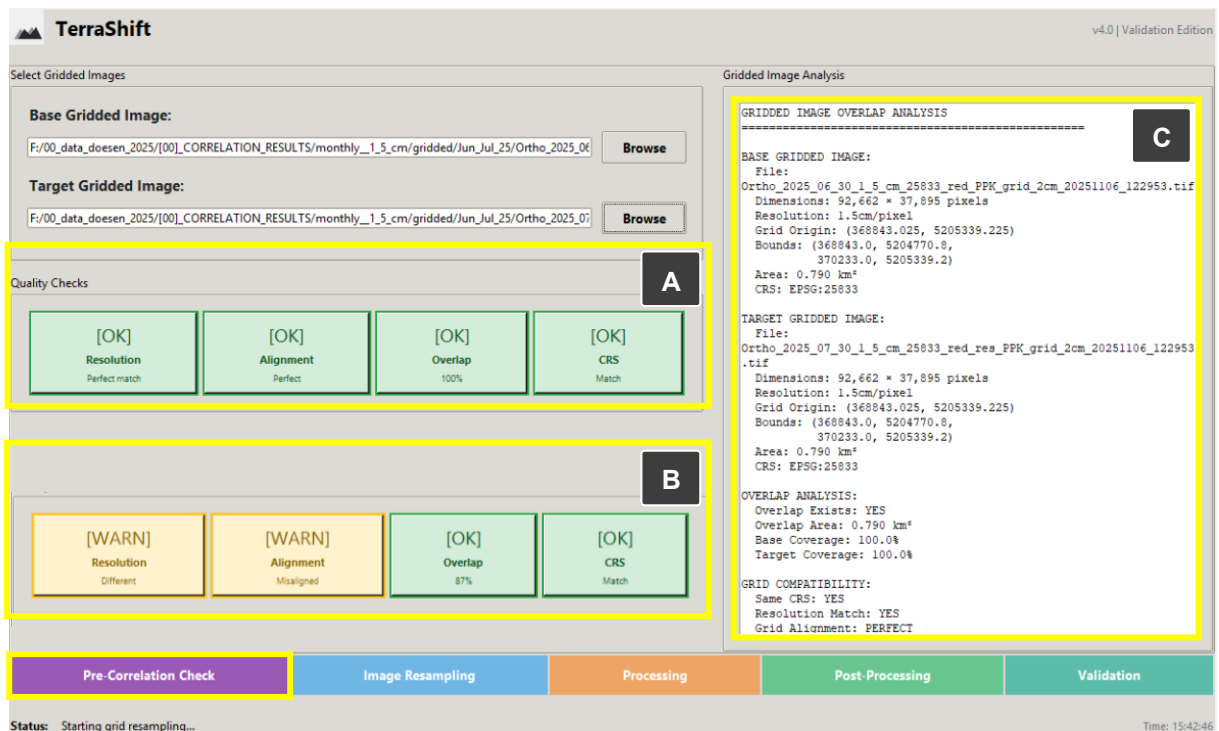


Abbildung 14 TerraShift - Modul 1A; Darstellung der automatisierten Qualitätsprüfung mit (A) vollständig erfüllten geometrischen Voraussetzungen, (B) erkannter Gitterfehlانpassung mit Warnhinweis sowie (C) detaillierter Auswertung der Rastergeometrie etc. im Log-Panel (Eigene Darstellung 2025)

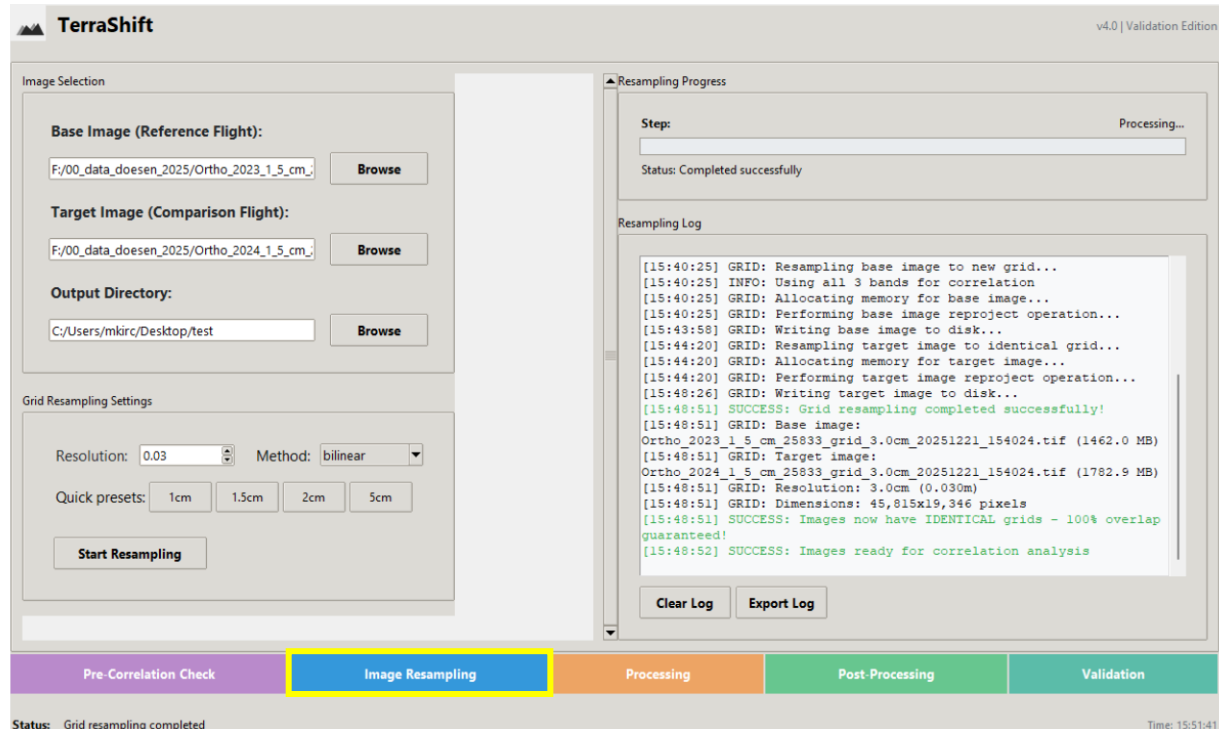


Abbildung 15 TerraShift – Modul 1B; Preprocessing-Modul der GUI zur Rastervereinheitlichung und zum Resampling der Orthomosaik (Eigene Darstellung 2025)

Das Processing-Modul stellt den methodischen Kern der GUI dar und dient der Ableitung horizontaler Oberflächenverschiebungen aus den geometrisch vorbereiteten

Orthomosaiken. In diesem Modul findet die subpixelgenaue Bildkorrelation statt, auf deren Ergebnissen alle weiteren Auswertungsschritte aufbauen. Die Implementierung basiert vollständig auf dem etablierten Korrelationsframework geoCosiCorr3D (Aati et al. 2022; Aati 2024), dessen Parametrisierung bereits in Kapitel 4.3.3 ausführlich behandelt wurde.

Innerhalb des Processing-Moduls übernimmt die GUI eine strukturierende und kontrollierende Funktion. Als Eingabedaten dienen die im Preprocessing aufeinander abgestimmten Rasteraufnahmen (Modul 1). Die für die Bildkorrelation notwendigen Verarbeitungsschritte sind innerhalb der Benutzeroberfläche logisch zusammengefasst (siehe Abb.16). Der Fortschritt der Prozessierung wird fortlaufend im Log-Panel dokumentiert. Als Ergebnis dieses Moduls entsteht ein Rasterdatensatz, der die berechneten Verschiebungsvektoren enthält (siehe Abb. 11).

TerraShift v4.0 | Validation Edition

Correlation Input Files

Base Gridded Image:

Target Gridded Image:

Output Directory:

Note: Must use C: drive on Windows (Docker mount limitations)

Correlation Method

- Frequency Domain

Band Selection

- All RGB Bands
- Red Band Only

Correlation Window Settings (pixels)

Initial Window Size: X: 64 px Y: 64 px

Final Window Size: X: 64 px Y: 64 px

Step Size (spacing): X: 6 px Y: 6 px

Search Radius Settings (meters)

Define the maximum displacement search range in meters:

Minimum Search Radius (vmin): -2.0 m

Maximum Search Radius (vmax): 2.0 m

Analysis Options

- ☒ Perform Principal Component Analysis
- ☒ Export results and reports

Processing Progress

Current Step: Correlation processing

Process Control:

Processing Log

```

//50 [08:14:51:29, 71.84s/it]
[16:05:27] INFO: DOCKER: Correlation per tile: 16% |
8/50 [09:36:52:01, 74.33s/it]
[16:07:06] INFO: DOCKER: Correlation per tile: 18% |
9/50 [11:10:54:53, 80.33s/it]
[16:08:49] INFO: DOCKER: Correlation per tile: 20% |
10/50 [12:49:57:33, 86.34s/it]
[16:10:39] INFO: DOCKER: Correlation per tile: 22% |
11/50 [14:32:59:25, 91.43s/it]
[16:12:32] INFO: DOCKER: Correlation per tile: 24% |
12/50 [16:22:1:01:26, 97.01s/it]
[16:14:37] INFO: DOCKER: Correlation per tile: 26% |
13/50 [18:15:1:02:44, 101.74s/it]
[16:17:01] INFO: DOCKER: Correlation per tile: 28% |
14/50 [20:20:1:05:22, 108.95s/it]
[16:19:39] INFO: DOCKER: Correlation per tile: 30% |
15/50 [22:43:1:09:33, 119.23s/it]
[16:22:28] INFO: DOCKER: Correlation per tile: 32% |
16/50 [25:22:1:14:18, 131.12s/it]
  
```

Processing Progress Bar: [Progress bar showing 32% completion]

Processing Steps:

- Pre-Correlation Check
- Image Resampling
- Processing**
- Post-Processing
- Validation

Status: Processing... Time: 16:22:44

Abbildung 16 TerraShift - Modul 2; Eingabemaske für die Auswahl der geometrisch vorbereiteten Rasterdaten sowie der Definition der Korrelationsparameter (Eigene Darstellung 2025)

5.1.3 Modul 3 - Postprocessing

Das Postprocessing-Modul (siehe Abb.17) überführt die im Processing-Modul berechneten Verschiebungsfelder in physikalisch interpretierbare Bewegungsgrößen. Als Eingabe wird das Korrelationsergebnis verwendet, welches die horizontalen Verschiebungen in Ost-West- (Δx) und Nord-Süd-Richtung (Δy) enthält.

Auf Basis dieser Komponenten kann zunächst der resultierende Verschiebungsbetrag (d) berechnet werden. Dieser entspricht der euklidischen Distanz und wird in Metern angegeben (siehe Formel 4 – Kapitel 4.3.3).

Darauf aufbauend erfolgt die Berechnung der Geschwindigkeit (v) (siehe Formel 12). Hierbei fließt der zeitliche Abstand (Δt) zwischen den beiden Bildaufnahmen ein, der innerhalb der GUI automatisch aus den angegebenen Aufnahmedaten bestimmt und in die Berechnung integriert wird.

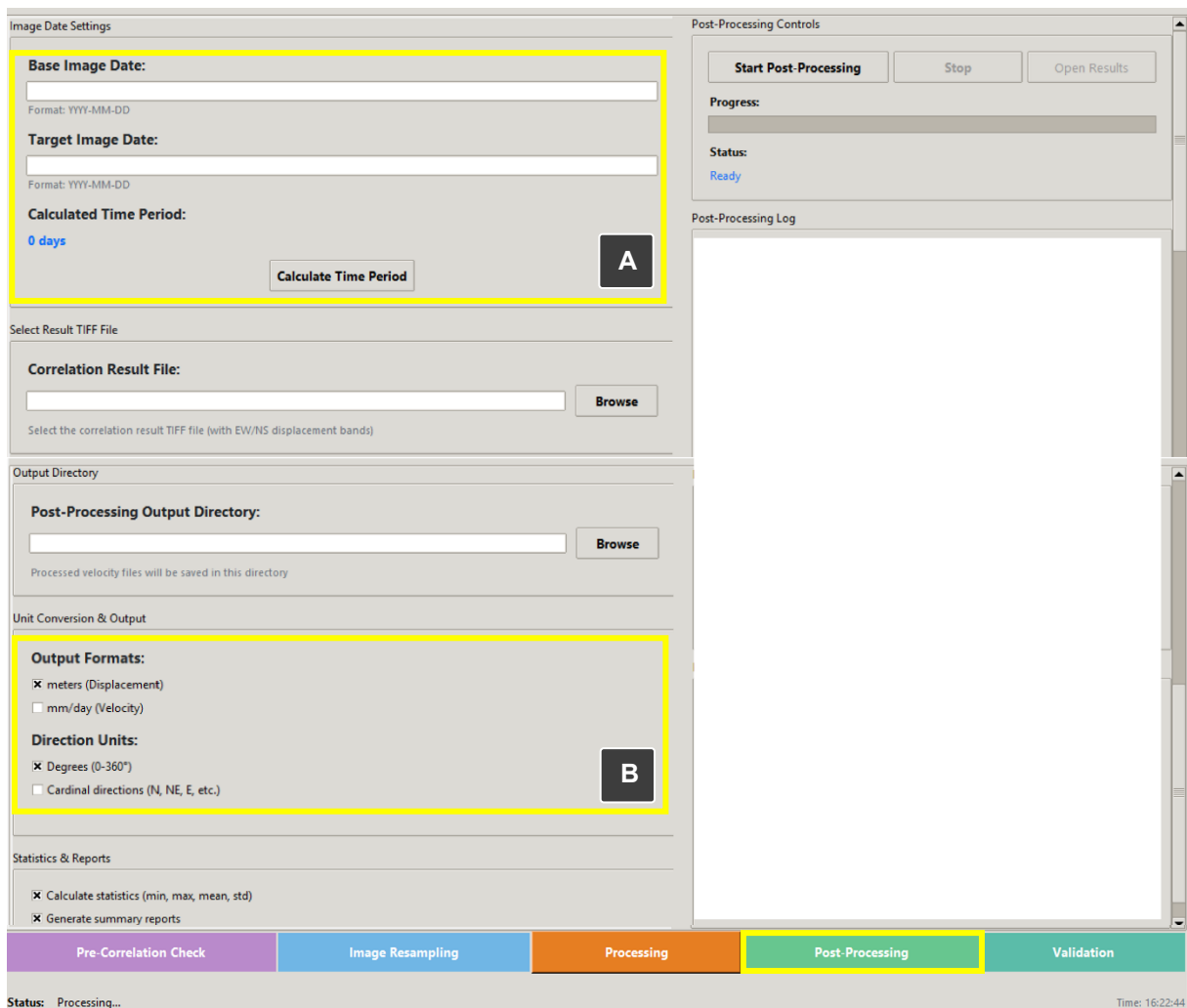


Abbildung 17 TerraShift – Modul 3; Benutzeroberfläche des Postprocessing-Moduls (Modul 3) mit Zeitintervallberechnung (A) und Konfiguration der Ausgabeeinheiten (B) (Eigene Darstellung 2025)

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad (12)$$

Abhängig von der gewünschten Ausgabeeinheit wird Δt entsprechend skaliert. Erfolgt die Zeitangabe in Tagen und soll die Geschwindigkeit in Metern pro Jahr angegeben werden, wird die Tagesgeschwindigkeit mit dem Faktor 365,25 multipliziert. Diese explizite Normierung ermöglicht eine klare Unterscheidung zwischen den Begriffen Verschiebung (displacement) und Geschwindigkeit (velocity). Während die Verschiebung die absolute Bewegung über den gesamten Beobachtungszeitraum beschreibt, stellt die Geschwindigkeit eine zeitlich normierte Vergleichsgröße dar.

Darüber hinaus ermöglicht die GUI die Berechnung und Visualisierung der Bewegungsrichtung aus den Verschiebungsvektoren, was insbesondere für eine qualitative Plausibilitätsprüfung hilfreich sein kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Richtungsinformation jedoch nicht weiter analysiert, da der Fokus auf der Quantifizierung der Verschiebungsbeträge lag.

5.1.4 Modul 4 – Validierung

Das Validierungsmodul bildet die abschließende Verarbeitungseinheit innerhalb des Tools. Ziel ist die konsistente Verarbeitung sämtlicher Ein- und Ausgabedatensätze innerhalb eines geschlossenen Arbeitsablaufs sowie die Durchführung der Validierung ohne zusätzlichen manuellen Rechenaufwand.

Die Validierung ist vollständig in die GUI integriert und lässt sich über klar strukturierte, selbsterklärende Eingabemasken durchführen, wobei alle erforderlichen Datensätze direkt über die Benutzeroberfläche eingebunden werden (siehe Abb. 18). Explizite Hinweise zu notwendigen Spaltenbezeichnungen, Datenformaten und Einheiten der CSV-Dateien unterstützen die Nutzenden bei der Datenaufbereitung und reduzieren potenzielle Fehlerquellen. Die Zuordnung zwischen Raster- und Punktdaten sowie die zeitliche Referenzierung erfolgen automatisiert innerhalb des Moduls.

Die Ergebnisse der Validierung erscheinen sowohl in übersichtlichen Popup-Fenstern als auch fortlaufend im Log-Panel der GUI. Zusätzlich lassen sich sämtliche Resultate in strukturierter Form exportieren und direkt für die weitere Auswertung verwenden.

v4.0 | Validation Edition

GPS Velocity Validation

Compare raster velocities with GPS

Velocity Raster

Velocity Raster File: Browse

Output from Post-Processing

Raster Units: mm/day

Select the units of your velocity raster (same as Post-Processing output)

GPS Campaign 1 (Earlier)

GPS CSV File: Browse

Required columns: Name, Easting, Northing, Elevation
Supported Name formats:
• 2025 07 NS 1 (YYYY MM PointID repetition)
• P07-020823-average (PointID-DDMMYY-suffix)
Decimal separator: comma (,) or period (.) auto-detected

Campaign Date (YYYY-MM-DD):

Measurement date for time interval calculation

GPS Campaign 2 (Later)

GPS CSV File: Browse

Same structure as Campaign 1

Campaign Date (YYYY-MM-DD):

Measurement date for time interval calculation

Validation Settings

- Only D-points will be used (GCP points excluded)
- Points must exist in both GPS campaigns
- Coordinate systems must match between GPS and raster
- Metrics: MAE, RMSE, Bias

Run Validation Export Results

Validation Results

Results will be displayed in the log panel after validation completes.

Validation Log

Pre-Correlation Check

Image Resampling

Processing

Post-Processing

Validation

GCP Geometric Validation

Orthophoto geometric accuracy

Field-Measured GCPs

Field GCP CSV File: Browse

CSV with columns: Name, Easting, Northing, Elevation (GPS survey)

Photo-Measured GCPs

Photo GCP CSV File: Browse

Same structure (clicked positions in orthophoto/GIS)

Matching Settings

Match points by:

- ☒ Distance (nearest neighbor)
- ☐ Name (must match exactly)

Run GCP Validation Export GCP Results

GCP Validation Results

GCP geometric accuracy results will be displayed in the log panel.

Stable Point Quality Assessment

Assess correlation quality using stable terrain

Stable Points (Unchanging Terrain)

Stable Points CSV File: Browse

Required columns: Name, Easting, Northing
Points on bedrock or stable slopes (no movement expected)

Correlation Result to Validate

Velocity/Displacement Raster: Browse

Output from Post-Processing (velocity or displacement raster)

Raster Units: meters

Units of the velocity/displacement raster

Run Quality Assessment Export LoD Results

Quality Assessment Results

Level of Detection (LoD) and quality metrics will be displayed in the log panel.

Abbildung 18 TerraShift – Modul 4; Benutzeroberfläche des Validierungsmoduls (Modul 4) zur Ergebnisüberprüfung mittels GNSS-Vergleich, GCP-Analyse und stabiler Referenzflächen (Eigene Darstellung 2025)

5.2. Bewegungsmuster am Dösener Blockgletscher

5.2.1 Jährliche Bewegungsmuster

Die annuellen Bewegungsmuster des Dösener Blockgletschers bilden die Referenzebene für die nachfolgenden Auswertungen mit höherer zeitlicher Auflösung. Die Jahresintervalle erfassen die übergeordneten Charakteristika der Oberflächenbewegung und erlauben eine robuste Einordnung der räumlichen Dynamik, unabhängig von kurzzeitigen Schwankungen.

Zwischen den beiden Jahresintervallen zeigt sich eine leichte Abnahme der Bewegungsaktivität (siehe Tab. 2). Der Mittelwert der rasterbasierten Tagesgeschwindigkeiten ist im Zeitraum 2024–2025 im Vergleich zu 2023–2024 geringfügig reduziert. Ein ähnlicher Rückgang ist auch beim Median erkennbar. Die Standardabweichung bleibt nahezu konstant, was auf eine ähnliche Streuung der Geschwindigkeiten innerhalb der Referenzfläche hinweist. Auf die Angabe von Minimal- und Maximalwerten wurde bewusst verzichtet, da diese bei rasterbasierten Korrelationsfeldern stark durch Einzelpixel, Messrauschen und Artefakte beeinflusst werden und somit keine repräsentative Aussage über die flächenhafte Bewegungsdynamik erlauben.

Tabelle 2 Zusammenfassung der annuellen Tagesgeschwindigkeiten des Dösener Blockgletschers für die Perioden 2023–2024 und 2024–2025 (Kennwerte beziehen sich auf Pixelwerte der Geschwindigkeitsraster innerhalb der Referenzfläche)

Periode	Beobachtungsdauer	Mittelwert *	Median *	SD *
02.08.2023- 27.08. 2024	391 Tage	0,92	1,20	0,58
27.08.2024 – 25.08.2025	363 Tage	0,89	1,16	0,56

** Angaben in mm/Tag*

SD ... Standardabweichung

Diese statistischen Ergebnisse spiegeln sich auch in den Korrelationskarten wider (siehe Abb.19). In beiden Zeiträumen konzentrieren sich erhöhte Geschwindigkeiten auf klar abgegrenzte zentrale Bereiche des Blockgletschers, während die Randzonen überwiegend geringe Bewegungsraten aufweisen. Die Lage dieser Aktivzonen bleibt zwischen den beiden Jahresintervallen weitgehend konstant. Unterschiede zeigen sich

primär in der Intensität und räumlichen Ausdehnung der höheren Geschwindigkeitsklassen, die im Zeitraum 2024–2025 deutlich reduziert sind.

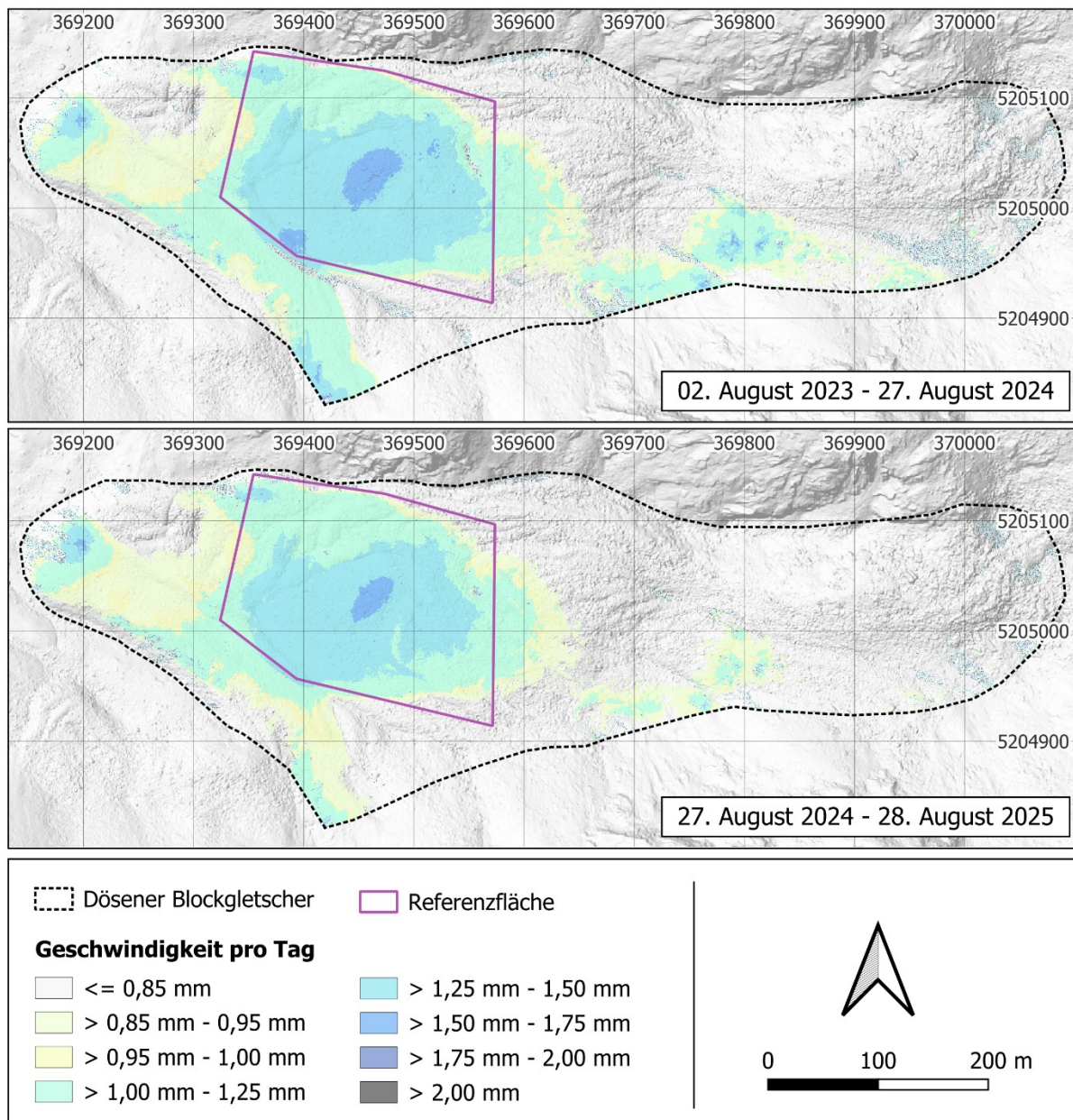


Abbildung 19 Korrelationsergebnis aus den annualen Messkampagnen (2023-2025). Level of Detection (LoD = $\pm 0,85$ mm/Tag. (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)

5.2.2 Subannuelle Bewegungsmuster

Die subannuellen Bewegungsmuster erlauben eine differenzierte Betrachtung der zeitlichen Variabilität innerhalb der sommerlichen Aktivitätsphase. Grundlage bilden dabei drei aufeinanderfolgende Zeitintervalle zwischen Ende Juni und Mitte September 2025 (siehe Tab.3). Zwischen den einzelnen Messintervallen zeigen sich deutliche Unterschiede sowohl im mittleren Geschwindigkeitsniveau als auch in der Streuung der Bewegungswerte, was auf eine variierende räumliche Ausprägung der Bewegungsaktivität innerhalb kurzer Zeiträume hinweist.

Tabelle 3 Subannuelle Tagesgeschwindigkeiten Juni–September 2025 (Pixelwerte innerhalb der Referenzfläche)

Periode	Beobachtungsdauer	Mittelwert *	Median *	SD *
30.06. – 30. 07. 2025	30 Tage	0,98	1,21	0,86
30.07. – 25.08.2025	25 Tage	1,19	1,39	1,34
25.08. – 15.09. 2025	21 Tage	1,34	0,94	2,77

** Angaben in mm/Tag*

SD ... Standardabweichung

Die Geschwindigkeitskarte für den Zeitraum 1 (30. Juni bis 30. Juli 2025; siehe Abbildung 20 [A]) zeigt ein räumlich kohärentes Bewegungsmuster über nahezu die gesamte Blockgletscherfläche. Die Bewegungen sind weitgehend homogen verteilt, die Übergänge zwischen Bereichen unterschiedlicher Geschwindigkeit verlaufen kontinuierlich. Isolierte Bereiche mit auffälligen Abweichungen treten kaum auf.

Im darauffolgenden Zeitraum 2 (30. Juli bis 28. August 2025; siehe Abbildung 20 [B]) ist eine deutliche Veränderung der räumlichen Verteilung erkennbar. Die Bewegung ist nicht mehr gleichmäßig über die gesamte Fläche verteilt, sondern konzentriert sich auf klar abgegrenzte Bereiche. Diese Zonen sind räumlich zusammenhängend und vor allem im oberen Teil des Blockgletschers ausgeprägt. Gleichzeitig zeigen andere Bereiche deutlich geringere Bewegungen. Das Geschwindigkeitsfeld weist insgesamt eine höhere räumliche Differenzierung auf als im vorhergehenden Intervall, wobei sich klar voneinander unterscheidbare Bewegungszonen abzeichnen.

Für den Zeitraum 3 (28. August bis 15. September 2025; siehe Abbildung 20 [C]) zeigt die Geschwindigkeitskarte das heterogenste Muster der untersuchten Monatsintervalle. Neben zusammenhängenden Bereichen erhöhter Bewegung treten zahlreiche kleinräumige, isolierte Pixel mit stark erhöhten Werten auf. Diese sind räumlich nicht organisiert und stehen teilweise in deutlichem Kontrast zu benachbarten Bereichen mit geringen Bewegungen. Das Bewegungsfeld ist dadurch fragmentierter als in den vorangegangenen Zeiträumen, was die eindeutige Abgrenzung zusammenhängender Bewegungszonen erschwert.

Zur Einordnung dieser Muster wurden zusätzlich Geschwindigkeitskarten aus längeren Beobachtungsintervallen herangezogen. Die Zweimonatskarten für Juni–August und Juli–September (siehe Abb. 21) zeigen im Vergleich zu den Monatskarten deutlich homogenere und räumlich kohärentere Bewegungsfelder. Kleinräumige, isolierte Anomalien treten deutlich seltener auf. Die räumliche Organisation der Bewegung ist klarer ausgeprägt, wobei erhöhte Bewegungen in denselben Bereichen wiederkehren, die bereits in den Monatskarten als aktiv erkennbar waren.

Zwischen den beiden Zweimonatsintervallen zeigen sich Unterschiede in der Bewegungsintensität (siehe Tab. 4). Der Mittelwert der rasterbasierten Tagesgeschwindigkeiten ist im Zeitraum Juli–September 2025 im Vergleich zu Juni–August 2025 erhöht. Der Median bleibt dabei nahezu konstant und ist im späteren Intervall nur geringfügig reduziert. Die maximalen Geschwindigkeiten liegen in beiden Zeiträumen auf einem vergleichbaren Niveau, wobei im Zeitraum Juli–September ein höheres Maximum erreicht wird. Gleichzeitig nimmt die Standardabweichung deutlich zu, was auf eine stärkere räumliche Streuung und heterogenere Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Referenzfläche im Intervall Juli–September hinweist.

Tabelle 4 Subannuelle Tagesgeschwindigkeiten Zweimonatsintervalle Sommer 2025 (Pixelwerte innerhalb der Referenzfläche)

Periode	Beobachtungsdauer	Mittelwert *	Median *	SD *
30.06. – 25.08. 2025	55 Tage	0,97	1,23	0,72
30.07. – 15.09.2025	46 Tage	1,18	1,20	1,34

** Angaben in mm/Tag*

SD ... Standardabweichung

In der Zusammenschau zeigt sich damit, dass die grundlegende räumliche Verteilung der Bewegung über den Sommer hinweg konsistent bleibt, während kurze Beobachtungsintervalle eine stärkere Fragmentierung und erhöhte kleinräumige Variabilität aufweisen. Die Auswertung längerer Zeiträume erlaubt eine stabilere Erfassung der dominanten Bewegungsmuster und bestätigt die räumliche Persistenz aktiver Zonen über unterschiedliche Zeitskalen hinweg. Vereinzelt treten lineare Streifenmuster auf, die als korrelationsbedingte Artefakte zu werten sind (siehe 6.2.3).

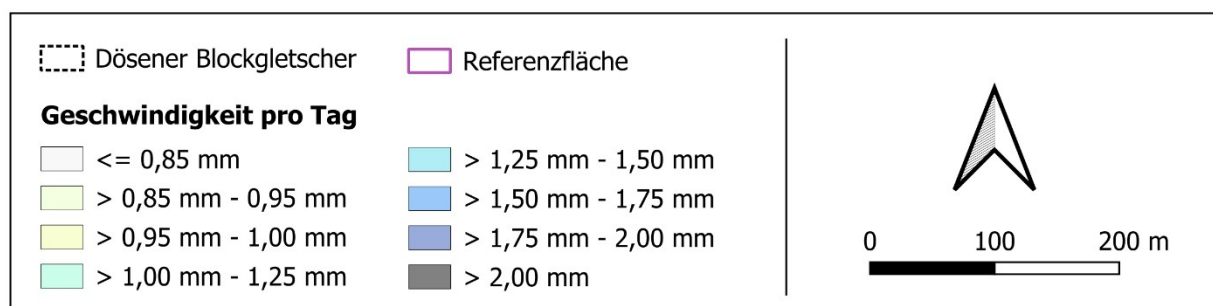
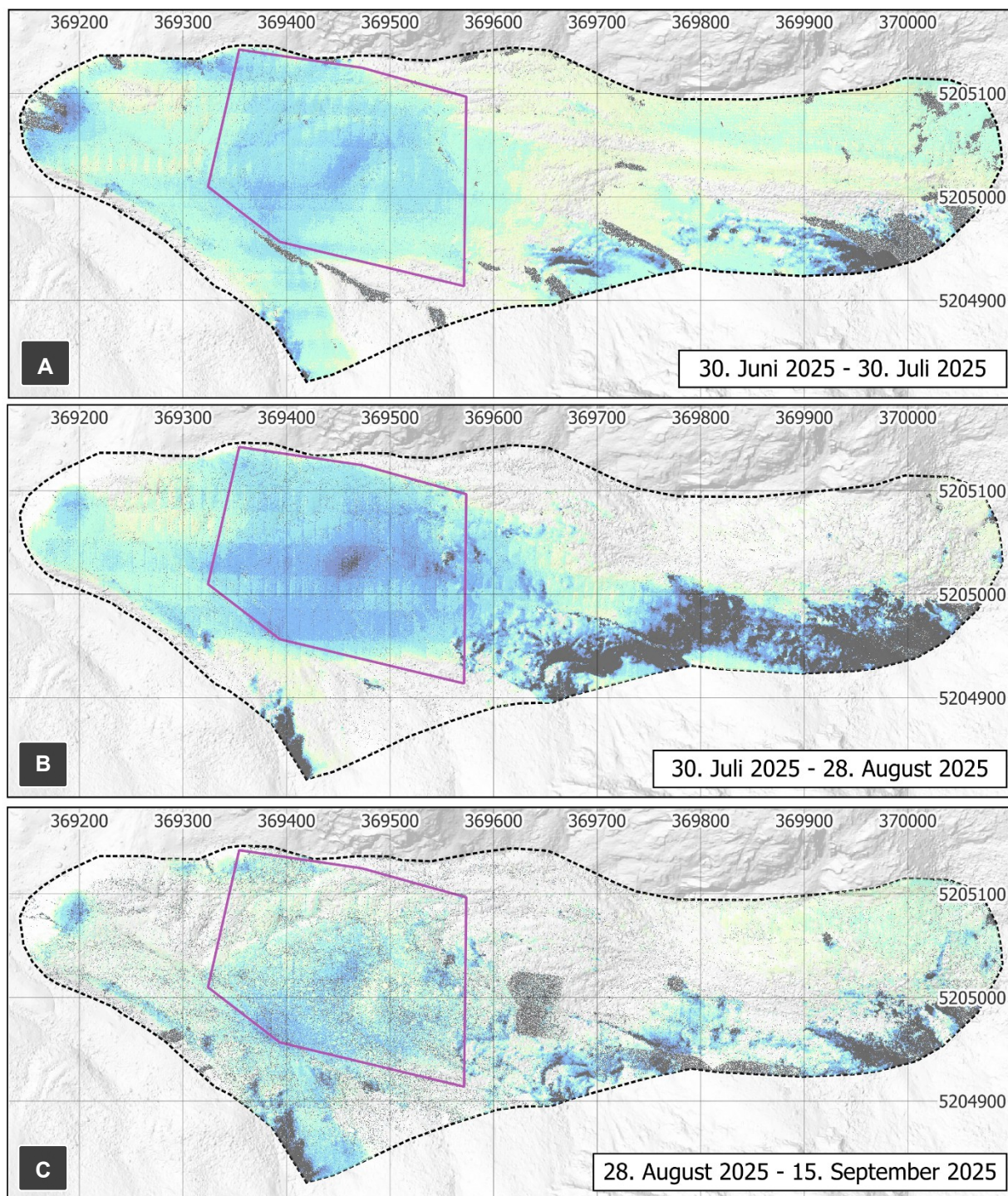


Abbildung 20 Subannuelle Geschwindigkeitskarten der Oberflächenbewegung des Döser Blockgletschers für die monatlichen Intervalle Juni–September 2025. Level of Detection ($LoD = \pm 0,85$ mm/Tag. (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)

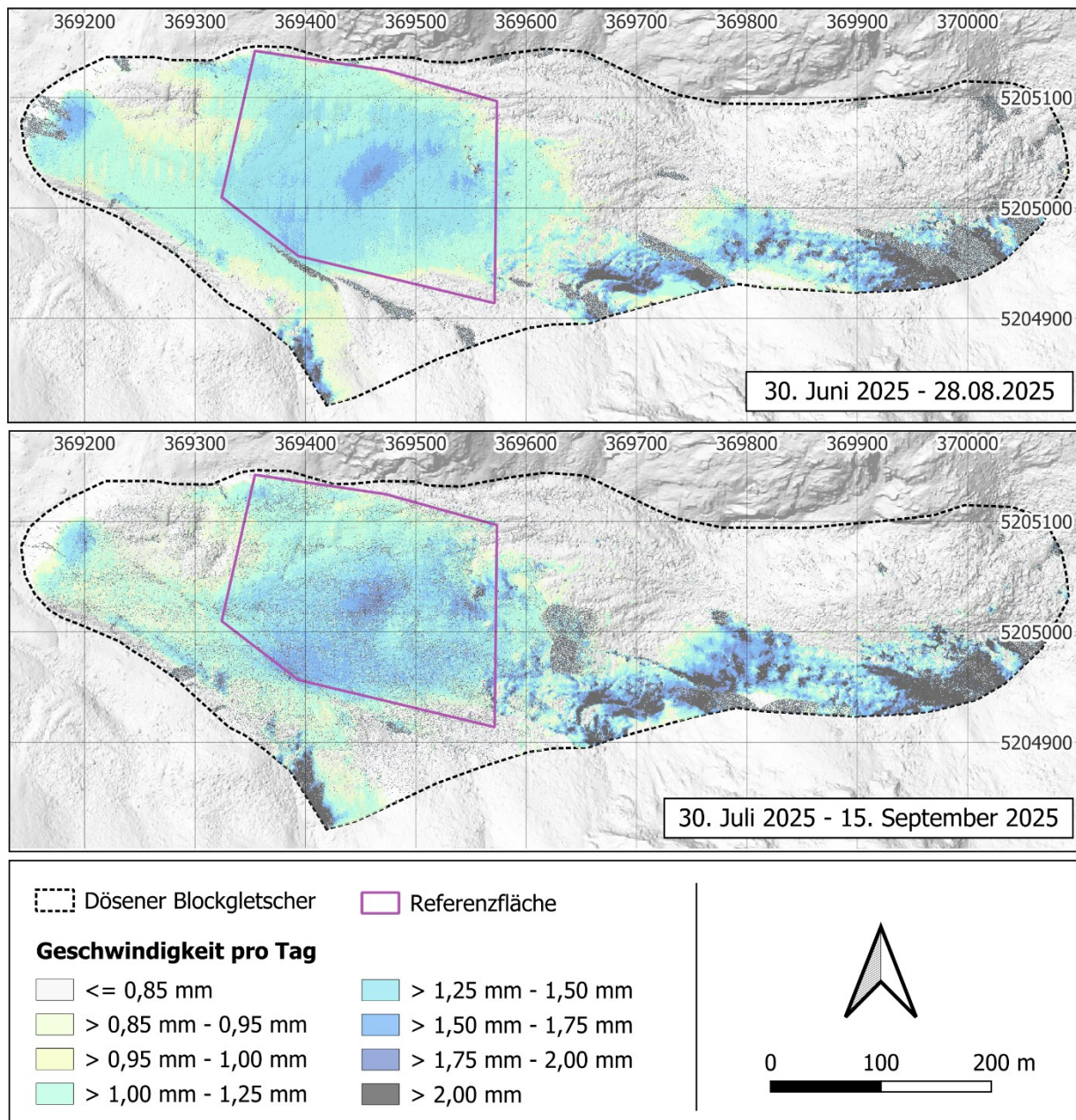


Abbildung 21 Subannuelle Geschwindigkeitskarten der Oberflächenbewegung des Dösender Blockgletschers für die Zweimonatsintervalle Juni–August und Juli–September 2025. Level of Detection (LoD = $\pm 0,85$ mm/Tag. (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)

5.2.3 Vergleich annueller und subannueller Geschwindigkeitsverteilung

Zur ergänzenden Einordnung der in den Geschwindigkeitskarten beschriebenen Bewegungsmuster wurde die Verteilung der rasterbasierten Oberflächengeschwindigkeiten für die annuellen sowie die subannuellen Intervalle als Dichteverteilungen dargestellt (siehe Abb. 22). Dadurch wird nicht nur das räumliche Muster, sondern auch die Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeiten innerhalb der untersuchten Fläche vergleichbar.

Die annuellen Intervalle (2023–2024 und 2024–2025) zeigen insgesamt eine relativ kompakte Geschwindigkeitsverteilung mit einem dominanten Bereich moderater Bewegungsraten. Zwischen den beiden Jahresintervallen ist eine Verschiebung der Verteilung zu geringeren Geschwindigkeiten erkennbar, was die in Kapitel 5.2.1 beschriebene Abnahme der Bewegungsaktivität bestätigt. Gleichzeitig bleiben auch im Jahresmaßstab höhere Geschwindigkeiten als Randanteil der Verteilung erhalten, was auf das Fortbestehen lokaler Aktivzonen hinweist.

Im Vergleich dazu weisen die subannuellen Intervalle eine deutlich stärkere Differenzierung der Verteilungen auf. Besonders in den Monatsintervallen zeigt sich eine breitere Streuung mit deutlich mehr hohen Geschwindigkeitswerten, was auf eine stärkere räumliche Heterogenität und eine höhere kleinräumige Variabilität der Bewegung innerhalb kurzer Beobachtungsfenster hindeutet. Die Zweimonatsintervalle zeigen demgegenüber homogenere Verteilungen, was mit der in den Karten beobachteten räumlichen Kohärenz der Bewegungsfelder übereinstimmt.

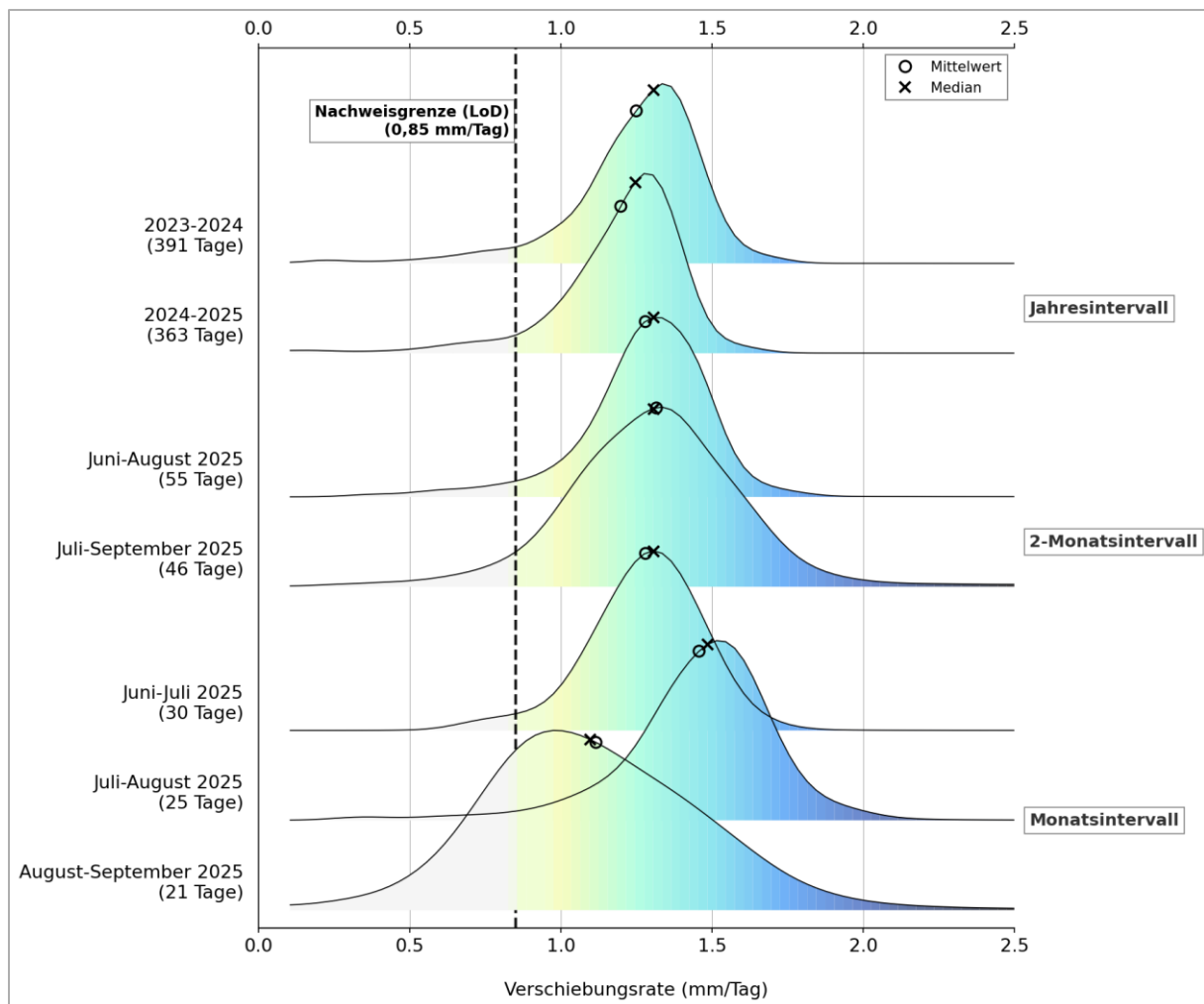


Abbildung 22 Verteilung der rasterbasierten Oberflächengeschwindigkeiten (mm/Tag) für verschiedene Zeitintervalle (Eigene Darstellung 2025)

5.3. Validierung und Qualität der Messergebnisse

Die Validierung der in Kapitel 5.2 dargestellten Bewegungsmuster erfolgt entlang der im Methodenteil (4.4) definierten drei Validierungsschritte. Ziel ist die quantitative und qualitative Absicherung der UAV-basierten Bildkorrelation im subannuellen Maßstab sowie die Bewertung der erzielbaren Messgenauigkeit unter realen hochalpinen Einsatzbedingungen. Der Fokus liegt dabei nicht auf einer detaillierten Prozessinterpretation, sondern auf der Funktionsfähigkeit und Robustheit des standardisierten Workflows.

5.3.1 Level of Detection (LoD) auf stabilen Referenzflächen

Zur Abschätzung der minimal detektierbaren Bewegung wurde für jedes monatliche Messintervall das Level of Detection (LoD) auf stabilen Referenzflächen außerhalb der aktiven Deformationszone des Blockgletschers bestimmt. Diese Flächen unterliegen keiner realen Bewegung und erlauben daher eine direkte Quantifizierung des Messrauschens der Bildkorrelation.

Die ermittelten LoD-Werte liegen je nach Messintervall zwischen 0,49 mm/Tag und 0,87 mm/Tag (siehe Tab. 5). Das niedrigste LoD wird im Zeitraum Juli–August 2025 erreicht, während die Intervalle Juni–Juli und August–September vergleichbare Werte im Bereich von rund 0,8–0,9 mm/Tag aufweisen. Um die Nachweisgrenze auch auf Intervallskala einzuordnen, wurde das LoD zusätzlich als minimale detektierbare Gesamtverschiebung angegeben. Diese beträgt je nach Beobachtungsdauer 12,74 mm bis 24,9 mm (siehe Tab.5). Unterschiede zwischen den Intervallen sind vor allem auf variierende Aufnahmebedingungen und die jeweilige Intervalllänge zurückzuführen.

Tabelle 5 Ermittelte Level-of-Detection-Werte (LoD) für die subannuellen Messkampagnen 2025

Messperiode	Tage	LoD (Rate)	LoD (Verschiebung)
Juni - Juli 2025	30	0,83 mm/Tag	24,90 mm
Juli - August 2025	26	0,49 mm/Tag	12,74 mm
August-September 2025	21	0,87 mm/Tag	18,27 mm

5.3.2 Abgleich von DGNSS-Messungen mit UAV-basierten Korrelationsergebnissen

Als zweiter Validierungsschritt erfolgte ein direkter Vergleich zwischen den UAV-basierten Verschiebungsergebnissen und unabhängigen GNSS-Messungen. Die aus der Bildkorrelation abgeleiteten Verschiebungen an den Positionen der GNSS-Messpunkte wurden extrahiert und den entsprechenden GNSS-basierten Verschiebungswerten gegenübergestellt (siehe Tab.6).

Tabelle 6 Vergleich zwischen GNSS-basierten Punktverschiebungen und UAV-basierten Korrelationsergebnissen für die untersuchten Messintervalle

Messperiode	n (Messpunkte)	Tage	MAE	RMSE	Bias	RMSE (rel.)
2024 - 2025	11	363	0,007	0,008	0,003	1,70%
Juni-Juli 2025	11	30	0,006	0,008	0,004	21,30%
Juli-August 2025	11	26	0,003	0,004	-0,002	9,90%
August- September 2025	11	21	0,012	0,014	0,011	49,40%

** Angaben in m*

Über das Jahresintervall 2024-2025 zeigt sich eine enge Übereinstimmung zwischen beiden Datensätzen, während auch die subannuellen Intervalle geringe absolute Abweichungen aufweisen. Unterschiede zwischen den Zeiträumen zeigen sich vor allem in den relativen Fehlerkennwerten, die unter anderem von der Länge des Beobachtungsintervalls beeinflusst werden. Der relative RMSE stellt dabei einen geeigneten Indikator zur Beurteilung der Ergebnisstabilität über unterschiedliche Zeitskalen dar, da er die Fehlergröße in Beziehung zur tatsächlich erfassten Bewegung setzt. Kurze Beobachtungsintervalle zeigen trotz geringer absoluter Abweichungen eine erhöhte relative Streuung, wohingegen sich für längere Zeiträume eine deutlich stabilere Übereinstimmung abzeichnet.

Diese zeitabhängige Ausprägung der Übereinstimmung lässt sich in der grafischen Gegenüberstellung der GNSS- und UAV-basierten Verschiebungen nachvollziehen (siehe Abb.22). Mit zunehmender Länge des betrachteten Zeitintervalls rücken die Werte systematisch näher an die ideale Übereinstimmung heran, während sich bei kurzen Intervallen eine breitere Streuung zeigt, ohne dass die lineare Beziehung zwischen beiden Datensätzen verloren geht.

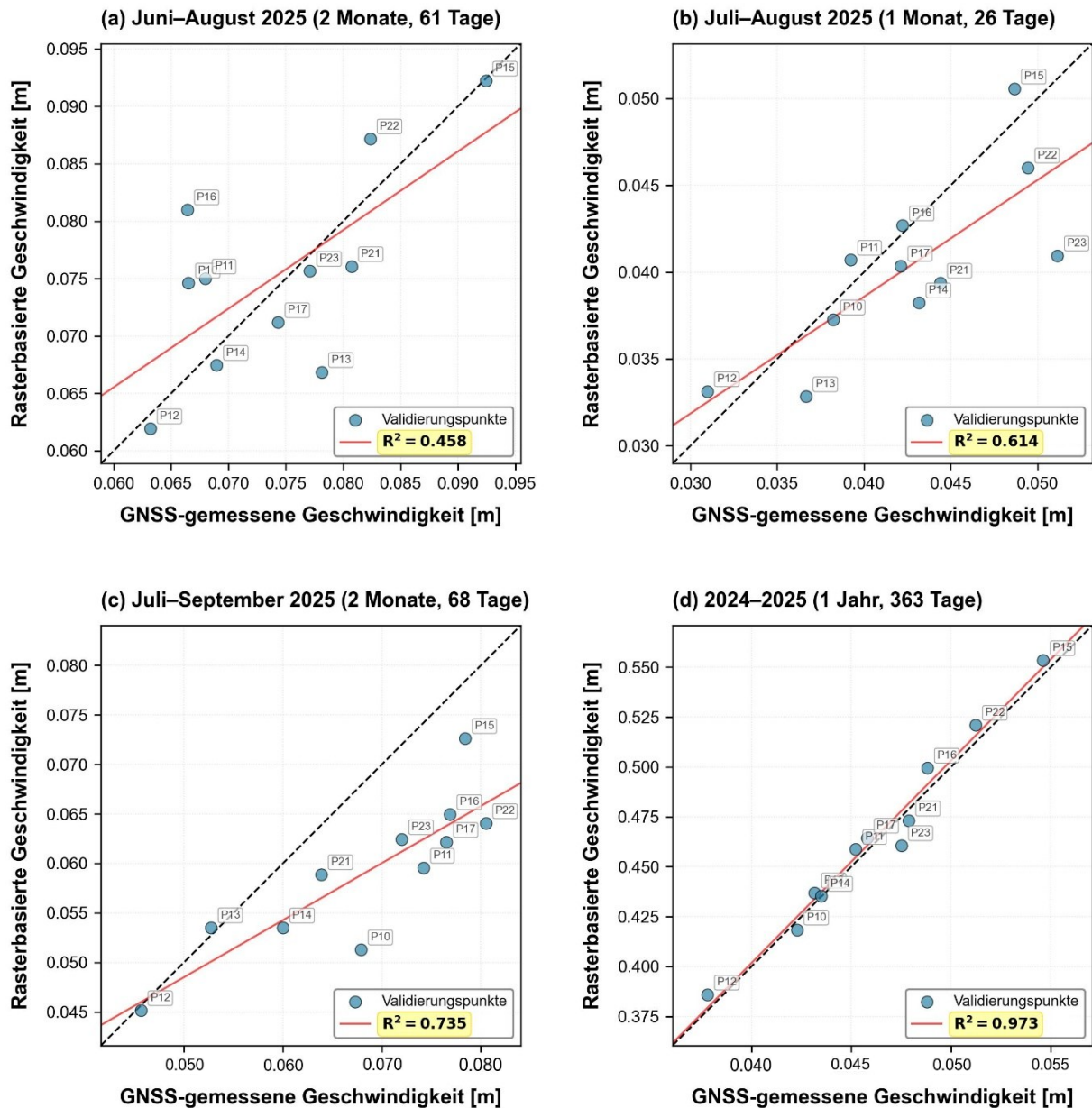


Abbildung 23 Vergleich zwischen GNSS-gemessenen Punktverschiebungen und rasterbasiert abgeleiteten Verschiebungen aus UAV-Orthomosaiken für unterschiedliche Zeitintervalle (Eigene Darstellung 2025)

5.3.3 Geometrische Qualität der Orthomosaike (GCP-Analyse)

Als dritter Validierungsschritt wurde die geometrische Qualität der erzeugten Orthomosaike anhand selbst vermessener, eindeutig identifizierbarer Ground Control Points (GCPs) überprüft. Die GCPs wurden im Gelände mittels GNSS eingemessen und anschließend direkt im Orthobild an den visuell eindeutig erkennbaren Passpunkten kartiert. Die Bewertung der geometrischen Genauigkeit erfolgte durch den Vergleich der absoluten planimetrischen Abstände zwischen den GNSS-gemessenen GCP-Positionen und den im Orthomosaik abgeleiteten Koordinaten.

Die Auswertung zeigt, dass die Abweichungen an den GCPs für alle untersuchten Messzeitpunkte im Zentimeterbereich liegen (siehe Tab.7). Die mittleren Abweichungen

in X- und Y-Richtung sind gering und weisen keine systematische Verschiebung in eine bevorzugte Richtung auf. Auch die resultierenden planaren Gesamtfehler (Total XY) bewegen sich über alle Kampagnen hinweg in einem vergleichbaren Bereich, was auf eine konsistente geometrische Qualität der Orthomosaik hinweist.

Auch wenn die absolute planimetrische Genauigkeit der Orthomosaik im Zentimeterbereich liegt, stellt dies keinen limitierenden Faktor für die subannuelle Bewegungsanalyse dar. Die Bildkorrelation erfasst relative Verschiebungen zwischen zeitlich aufeinanderfolgenden Datensätzen innerhalb eines konsistenten geometrischen Referenzrahmens. Entscheidend ist daher nicht die absolute Lagegenauigkeit der einzelnen Orthomosaik, sondern die Stabilität der relativen Geometrie zwischen den Messzeitpunkten. Gleichzeitig wird deutlich, dass dieser Ansatz nicht zur hochpräzisen Bestimmung absoluter Punktkoordinaten oder kleinräumiger Lageänderungen im Millimeterbereich geeignet ist.

Tabelle 7 Planimetrische Abweichungen zwischen GNSS-vermessen Ground Control Points (GCPs) und deren Positionen im Orthomosaik

Messzeitpunkt	n (GCPs)	X	Y	Total XY
30.06.2025	11	0,009	0,016	0,018
30.07.2025	11	0,018	0,009	0,020
25.08.2025	9	0,017	0,012	0,021
15.09.2025	11	0,012	0,019	0,023

** Angaben in m*

Die im Orthobild vorgenommene Kartierung der GCPs erfolgte nach dem im Methodenkapitel beschriebenen Best-Guess-Prinzip, bei dem der jeweils visuell eindeutigste Punkt innerhalb der GCP-Markierung gewählt wird. Trotz der eindeutigen Identifizierbarkeit der GCPs im Gelände und im Orthobild zeigt sich, dass dieser Ansatz mit einer gewissen subjektiven Unsicherheit verbunden ist. Kleine Unterschiede in der visuellen Interpretation, der Bildauflösung oder der Darstellung einzelner Strukturen können sich direkt auf die gemessenen Abstände auswirken.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die GCP-basierte Analyse eine verlässliche Abschätzung der geometrischen Qualität der Orthomosaik erlaubt, die jedoch stets auch die Unsicherheit der manuellen Punktidentifikation beinhaltet. Der beobachtete

Fehlerbereich ist daher nicht ausschließlich auf die photogrammetrische Georeferenzierung zurückzuführen, sondern umfasst auch den Einfluss der manuellen Kartierung im Orthobild. Für die Bewertung der geometrischen Eignung der Orthomosaik im Rahmen der Bildkorrelation ist dieser Ansatz dennoch geeignet, da die ermittelten Abweichungen deutlich unterhalb der für die Bewegungsanalyse relevanten Zeit- und Raumskala liegen.

6. Diskussion

6.1. Saisonale Muster und interannuelle Veränderungen der Bewegungsaktivität

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen ein klar ausgeprägtes saisonales und räumlich differenziertes Bewegungsmuster des Dösener Blockgletschers. Die abgeleiteten subannuellen Verschiebungsfelder belegen, dass sich die Oberflächenbewegung nicht gleichmäßig über das Jahr verteilt, sondern innerhalb der warmen Jahreszeit deutlich variiert. Damit zeigt die Arbeit, dass die Ableitung subannueller Bewegungsmuster mittels UAV-basierter Bildkorrelation und der angewandten Methodik robuste Ergebnisse liefert und neue Erkenntnisse zur räumlichen und saisonalen Dynamik des Dösener Blockgletschers ermöglicht. Dies bestätigt frühere Erkenntnisse, dass in den Alpen das Minimum üblicherweise mit Beginn der Schneeschmelze (April-Mai) und das Maximum im Spätherbst (Oktober-November) erreicht wird (Perruchoud and Delaloye 2007; Delaloye et al. 2010; Kaufmann 2016; Staub and Delaloye 2017; Hu et al. 2025).

Die in den monatlichen Verschiebungskarten dargestellten Ergebnisse (Abb.20) zeigen für die Intervalle der ersten beiden Messkampagnen (Juni-Juli, Juli-August) bereits eine erkennbare Bewegungsaktivität, während im Spätsommer (August-September) die höchsten Verschiebungsraten auftreten.

Räumlich zeigen die Ergebnisse eine stabile Differenzierung der Bewegungsraten innerhalb des Blockgletschers. Die höchsten horizontalen Verschiebungen treten über alle Subperioden hinweg in der zentralen Fließzone der Zunge auf, während randliche und höher gelegene Bereiche geringere Bewegungsraten aufweisen (Abb.20). Dieses Muster entspricht den langfristigen geodätischen Beobachtungen am Dösener Blockgletscher, bei denen sich die Hauptbewegung entlang einer zentralen Fließzone konzentriert (Kaufmann 2016). Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse Unterschiede im saisonalen Verlauf einzelner Teilbereiche, die sich in zeitlich versetzten Veränderungen der Verschiebungsraten äußern und auf eine asynchrone Reaktion innerhalb des Blockgletschers hinweisen. Vergleichbare räumlich differenzierte Muster wurden auch an anderen Blockgletschern dokumentiert und mit lokalen Unterschieden in Verbindung gebracht (Cicoira et al. 2020; Fey and Krainer 2020; Stammler et al. 2025).

Im direkten Vergleich mit der Masterarbeit von Pfeffer (2023) zeigen sich deutliche Übereinstimmungen sowohl im saisonalen Verlauf als auch in der räumlich asynchronen

Organisation der Bewegungsmuster. Pfeffer beschreibt für die Kernzone eine ausgeprägte saisonale Beschleunigung und weist auf zeitlich versetzte Reaktionen zwischen unterschiedlichen Blockgletscherbereichen hin, was mit den in dieser Arbeit beobachteten asynchronen Veränderungen übereinstimmt.

Ein besonders robuster Vergleich ergibt sich über die relative saisonale Änderung der Geschwindigkeiten: Pfeffer (2023) dokumentiert für die Kernzone eine Zunahme der mittleren Bewegungsrate zwischen dem mittleren Sommerintervall (07.07.–17.08.; 1,32 mm/Tag) und dem Spätsommerintervall (17.08.–28.09.; 1,59 mm/Tag), was einer relativen Steigerung von rund 20% entspricht. Ein vergleichbares Muster zeigt sich in den rasterbasierten Ergebnissen dieser Arbeit, wo zwischen Juni–August 2025 (0,97 mm/Tag) und Juli–September 2025 (1,18 mm/Tag) eine Zunahme um rund 22% ermittelt wird. Damit werden die von Pfeffer beschriebenen saisonalen Tendenzen durch die UAV-basierten Rasterdaten quantitativ bestätigt.

Ergänzend zeigt der direkte Vergleich der jährlichen GNSS-Mittelwerte eine Abschwächung der Bewegungsaktivität gegenüber Pfeffer (2023). Während Pfeffer für die Kernzone ($n = 11$) eine mittlere Jahresgeschwindigkeit von rund 1,40 mm/Tag berichtet, liegen die in dieser Arbeit abgeleiteten Jahreswerte bei 1,32 mm/Tag (2023–2024) und 1,07 mm/Tag (2024–2025). Damit ergibt sich gegenüber Pfeffer eine Reduktion um rund 6% bzw. 24%, was auf eine interannuelle Verlangsamung der Bewegung im Zeitraum 2023 bis 2025 hinweist.

Während Pfeffer diese Muster primär auf Basis punktbasierter GNSS-Messungen und längerer Zeitfenster analysiert, ermöglicht der flächenhafte UAV-basierte Ansatz der vorliegenden Untersuchung eine räumlich kontinuierliche Darstellung innerhalb einzelner Subperioden und damit eine detailliertere Abgrenzung aktiver Zonen.

Auch im Vergleich zu UAV-gestützten Untersuchungen an anderen alpinen Blockgletschern zeigen sich konsistente Muster. Fey und Krainer (2020) berichten ebenfalls von saisonalen Veränderungen der Bewegungsraten sowie einer räumlich kohärenten Ausbildung aktiver Fließzonen, was mit den hier beobachteten Strukturen übereinstimmt.

Im weiteren Kontext der Blockgletscherforschung sind die beobachteten saisonalen und räumlichen Muster mit etablierten konzeptionellen Modellen der Blockgletscherkinematik vereinbar. Diese Modelle beschreiben die Oberflächenbewegung aktiver Blockgletscher als Ergebnis temperaturabhängigen Kriechens eisreicher Sedimente, der Deformation entlang interner Scherhorizonte sowie hydrologisch beeinflusster Spannungsänderungen, die innerhalb eines Jahres zu systematischen Geschwindigkeitsvariationen führen können (Kääb et al. 2007; Cicoira et al. 2020; Hu et al. 2025). Hochfrequente Beobachtungen zeigen zudem, dass Bewegungsraten auch auf sehr kurzen Zeitskalen variieren können (Bertone et al. 2023)

was die grundsätzliche Plausibilität der in dieser Arbeit erfassten subannuellen Schwankungen zusätzlich stützt.

6.2. Datenqualität und methodische Einschränkungen

Nach der Interpretation der saisonalen und räumlichen Verschiebungsmuster erfolgt im Folgenden eine kritische Einordnung der Datenqualität und der methodischen Einschränkungen des verwendeten UAV-basierten Ansatzes.

6.2.1 Nachweisgrenze und methodische Präzision

Die UAV-basierte Bildkorrelation stellt eine robuste Methode zur flächenhaften Erfassung von Oberflächenverschiebungen dar, deren Aussagekraft wesentlich durch die erreichbare geometrische Genauigkeit und die jeweilige Nachweisgrenze (Level of Detection, LoD) bestimmt wird. Die methodische Präzision solcher Verfahren hängt dabei von mehreren Faktoren ab, darunter die Bodenauflösung der verwendeten Orthomosaik, die Bildqualität, die Oberflächentextur sowie die Länge des betrachteten Zeitintervalls. Grundsätzlich ist die Messgenauigkeit optischer Bildkorrelationsverfahren durch Bildrauschen, Ko-Registrierungsfehler und Subpixel-Unsicherheiten begrenzt, sodass sehr geringe Verschiebungen nur eingeschränkt interpretierbar sind (Leprince et al. 2007; Debella-Gilo and Käab 2011; Heid and Käab 2012).

Mehrere Studien zeigen, dass subpixelgenaue Bildkorrelationsverfahren unter günstigen Bedingungen eine Präzision im Zentimeterbereich erreichen können, diese Genauigkeit jedoch stark von der Oberflächenstruktur und dem SNR abhängt. Insbesondere in Bereichen mit geringer visueller Textur oder niedrigen Bewegungsraten steigt der relative Anteil von Messrauschen, wodurch die Trennung zwischen tatsächlicher Verschiebung und Unsicherheit erschwert wird (Debella-Gilo and Käab 2011; Heid and Käab 2012). Moderne Weiterentwicklungen in der Bildkorrelation betonen zudem, dass systematische geometrische Artefakte einen wesentlichen Anteil an der Gesamtunsicherheit haben können, wenn sie nicht explizit berücksichtigt oder gefiltert werden (Aati et al. 2022).

Vor diesem Hintergrund ist die Interpretation der in dieser Arbeit abgeleiteten subannuellen Verschiebungsfelder stets im Verhältnis zur jeweiligen Nachweisgrenze vorzunehmen. Die in dieser Arbeit ermittelten Nachweisgrenzen entsprechen je nach Messintervall einer minimal detektierbaren Gesamtverschiebung von 12,7 bis 24,9 mm pro Intervall (siehe Tab. 5). Damit können subannuelle Bewegungen am Dösener Blockgletscher grundsätzlich im Zentimeterbereich erfasst werden, sofern die Verschiebungen innerhalb der aktiven Zonen deutlich oberhalb dieser Nachweisgrenze liegen. Im Vergleich zu UAV-basierten Untersuchungen mit ähnlichem methodischem Ansatz (Fey and Krainer 2020) liegen die hier bestimmten Nachweisgrenzen insgesamt im gleichen Größenbereich bzw. teilweise darunter. Ein direkter numerischer Vergleich bleibt jedoch nur eingeschränkt möglich, da die Nachweisgrenze stark von der Definition

und Textur der verwendeten stabilen Referenzflächen, der Bildqualität sowie den Aufnahmebedingungen abhängt.

In den zentralen Fließzonen des Dösener Blockgletschers liegen die gemessenen subannuellen Verschiebungsraten deutlich oberhalb der Nachweisgrenze, sodass die dort beobachteten Muster als robust einzustufen sind. In randlichen oder höher gelegenen Bereichen mit geringen Bewegungsraten bewegen sich die gemessenen Verschiebungen hingegen teilweise im Bereich der Nachweisgrenze. Dies limitiert die Interpretation kleinräumiger Signale, relativiert jedoch nicht die großräumigen saisonalen Bewegungsmuster.

6.2.2 Einfluss der Bildqualität und atmosphärische Bedingungen

Aufbauend auf den grundsätzlichen methodischen Nachweisgrenzen stellt die Bildqualität einen weiteren zentralen Einflussfaktor auf die Durchführbarkeit und Aussagekraft bildbasierter Korrelationsverfahren dar. Die Leistungsfähigkeit der Bildkorrelation hängt wesentlich von ausreichendem Kontrast, Bildschärfe und radiometrischer Konsistenz der verwendeten Aufnahmen ab, da diese Voraussetzungen für ein stabiles Feature-Matching und eine zuverlässige Subpixel-Interpolation erforderlich sind (Leprince et al. 2007; Debella-Gilo and Kääb 2011). Werden diese Bedingungen nicht erfüllt, kann eine Korrelation lokal eingeschränkt oder nicht möglich sein, was sich in fehlenden oder stark verrauschten Verschiebungsinformationen äußert. Insbesondere atmosphärische Störeinflüsse wie Dunst oder Nebel sind dafür bekannt, den Bildkontrast zu reduzieren und damit die Zuverlässigkeit photogrammetrischer Auswertungen deutlich zu beeinträchtigen (Westoby et al. 2012).

In dieser Arbeit ist insbesondere die letzte subannuelle Messkampagne (15.09.2025) von eingeschränkten Aufnahmebedingungen betroffen. Während des Flugprozesses trat in den letzten Flugminuten lokal Nebel auf, wodurch Kontrast und Bildschärfe einzelner Orthobilder deutlich reduziert wurden. Unter diesen Bedingungen war eine zuverlässige Bildkorrelation in den betroffenen Bereichen nur eingeschränkt bzw. nicht möglich (siehe Abb.23). Entsprechend zeigen die Verschiebungsfelder dieses Messintervalls lokal erhöhte Unsicherheiten oder fehlende Korrelationsresultate. Die großräumigen saisonalen Muster der Oberflächenbewegung bleiben jedoch in den Bereichen mit ausreichender Bildqualität weiterhin konsistent erkennbar (siehe Abb.23 B).

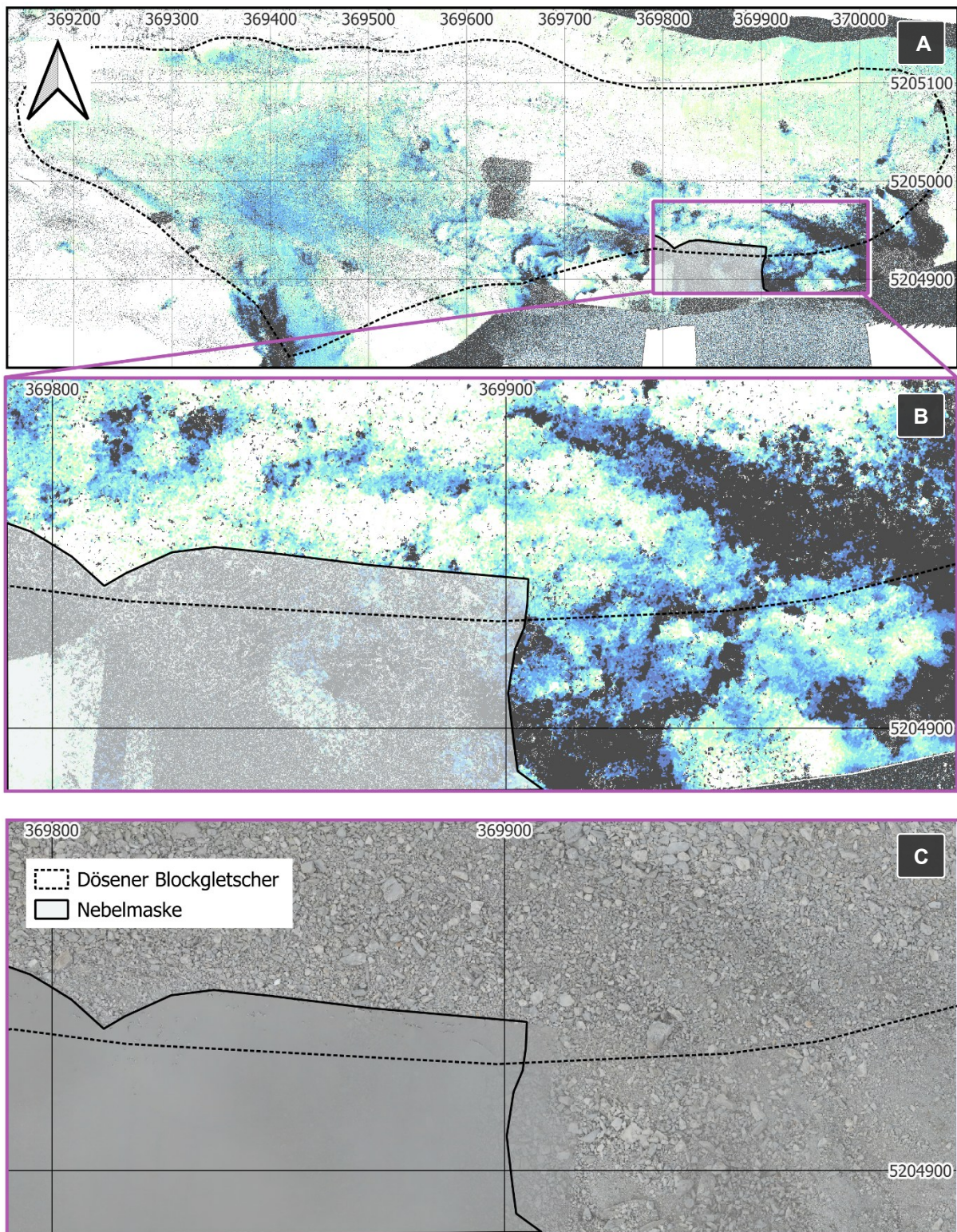


Abbildung 24 Darstellung des Messrauschens aufgrund eingeschränkter Bildqualität (Nebel) auf die Bildkorrelation. (A) Übersicht Korrelationsresultat August-September 2025 (B) Vergrößerter Ausschnitt – fragmentierte Verschiebungsfelder bedingt durch Messrauschen (C) Zugehöriges Orthomosaik – Darstellung der Umrisse des Messrauschens bedingt durch den lokal aufgetretenen Nebel (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)

6.2.3 Systematische Artefakte der Bildkorrelation

Neben lokal eingeschränkter Bildkorrelation infolge reduzierter Bildqualität zeigen die abgeleiteten Verschiebungsfelder stellenweise lineare, streifenartige Strukturen, die nicht mit der geomorphologischen Struktur des Blockgletschers übereinstimmen. Diese sogenannten Striping-Artefakte äußern sich als parallel verlaufende Zonen mit ähnlicher Verschiebungsrichtung oder -amplitude.

Eine Gegenüberstellung der Streifenmuster mit den Kamerapositionen der UAV-Befliegung (siehe Abb.24) zeigt, dass diese Strukturen entlang der Flugbahnen auftreten und auch außerhalb der eigentlichen Bildüberlappungsbereiche vorhanden sind. Damit lassen sich die beobachteten Streifen nicht auf Überlappungseffekte einzelner Bildstreifen zurückführen, sondern stehen in Zusammenhang mit der Fluggeometrie und der gerichteten Kamerabewegung während der Datenerfassung.

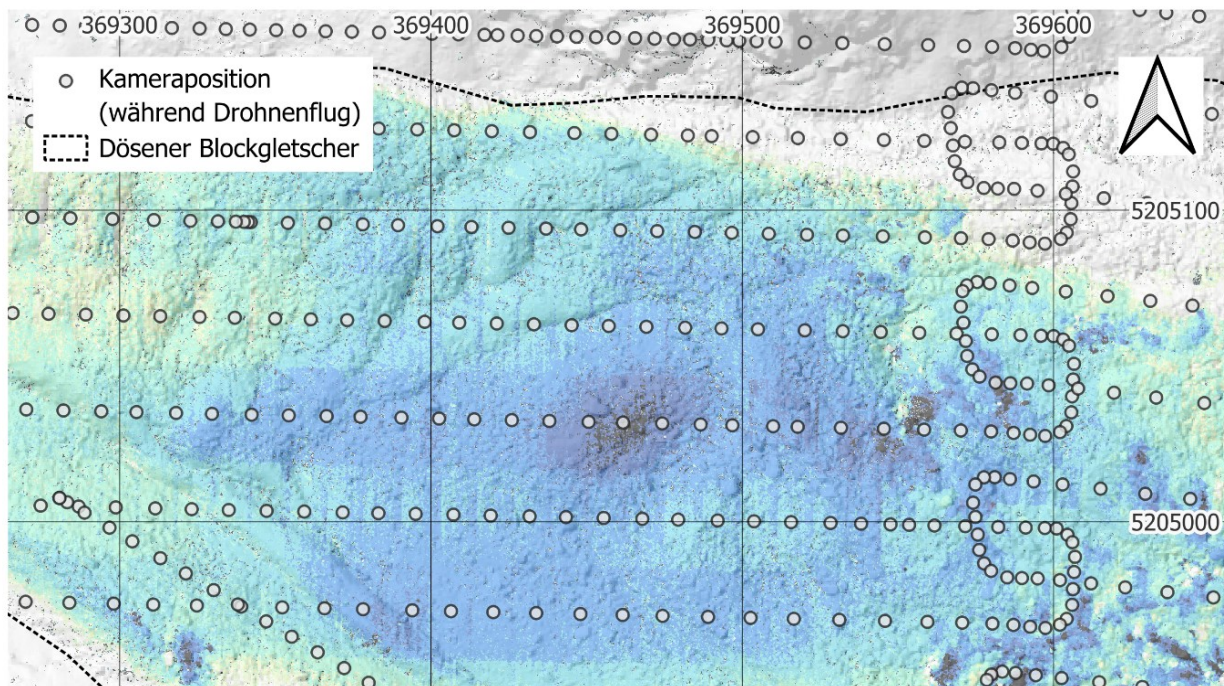


Abbildung 25 Darstellung der streifenartigen Muster im abgeleiteten Verschiebungsfeld in Relation zu den Kamerapositionen während der UAV-Befliegung (EPSG 25833) (Eigene Darstellung 2025)

Solche Muster sind aus der Literatur zu bildbasierten Korrelationsverfahren bekannt und werden mit systematischen Effekten der Bildgeometrie und Ko-Registrierung in Verbindung gebracht. Mehrere Studien zeigen, dass verbleibende, räumlich kohärente Verzerrungen infolge Kamerabewegung, Orthorektifizierung oder Resampling nicht zufällig verteilt sind, sondern sich entlang einer dominanten Richtungsstruktur organisieren können (Leprince et al. 2007; Debella-Gilo and Kääb 2011; Heid and Kääb 2012). Diese Effekte können reale Deformationsmuster überlagern und lokal modulieren, ohne diese vollständig zu erzeugen oder zu ersetzen.

In der vorliegenden Untersuchung treten die streifenartigen Strukturen auch innerhalb der bewegungsaktiven Bereiche des Blockgletschers auf und sind teilweise in ähnlicher Orientierung wie die Hauptbewegungsrichtung ausgeprägt. Dies spricht gegen eine Interpretation als eigenständiges geophysikalisches Muster, weist jedoch auf eine systematische Überprägung der Verschiebungsamplituden hin. Entscheidend ist dabei, dass die Streifen eine gleichförmige Breite und Ausrichtung aufweisen und sich nicht an erwarteten mechanischen Gradienten wie Zungenrändern, Scherlinien oder lateralen Geschwindigkeitskontrasten orientieren. In Bereichen mit großflächig homogenen Bewegungsraten tritt diese streifenförmige Modulation visuell besonders deutlich hervor, obwohl Bewegungsrichtung und Größenordnung der Verschiebungen konsistent bleiben. Damit sind die beobachteten Strukturen als methodische Modulation eines realen Bewegungsfeldes zu interpretieren und nicht als Ausdruck zusätzlicher Bewegungsprozesse (Aati et al. 2022).

Die Aussagekraft der abgeleiteten saisonalen Bewegungsmuster ergibt sich dabei nicht aus der lokalen Homogenität einzelner Pixelwerte, sondern aus der flächenhaften Kohärenz, der zeitlichen Konsistenz über Subperioden hinweg und der Übereinstimmung mit unabhängigen Referenzdaten.

6.2.4 Validierung und Referenzdaten

Der Vergleich der UAV-basierten Verschiebungsfelder mit punktbasierter GNSS-Messungen erfordert eine differenzierte Betrachtung der jeweiligen Messprinzipien und der damit verbundenen Unsicherheiten. GNSS-Messungen erreichen unter günstigen Bedingungen eine Genauigkeit im Zentimeterbereich, sind jedoch empfindlich gegenüber Abschattung, Mehrwegeeffekten, der Wahl der Referenzstation sowie der Messdauer, wodurch Abweichungen entstehen können (Hofmann-Wellenhof et al. 2008). Diese Effekte sind besonders in hochalpinem Gelände mit komplexer Topographie relevant und beeinflussen die Vergleichbarkeit punktbasierter Messungen mit flächenhaften Fernerkundungsdaten. Darüber hinaus erfassen GNSS-Messungen lokale Verschiebungen einzelner Punkte, während UAV-basierte Bildkorrelationsverfahren flächenhafte Mittelwerte über viele Pixel liefern. Abweichungen zwischen beiden Datensätzen spiegeln daher häufig unterschiedliche räumliche Skalen und methodische Sensitivitäten wider (Cicoira et al. 2020).

Auf dieser Grundlage lassen sich die in der vorliegenden Arbeit erzielten Validierungsergebnisse einordnen. Der quantitative Vergleich zwischen UAV-basierten Verschiebungen und GNSS-Messungen zeigt über alle betrachteten Zeitintervalle hinweg eine konsistente Übereinstimmung in der Größenordnung der erfassten Bewegungen. Die berechneten Abweichungen liegen überwiegend im Millimeter- bis unteren Zentimeterbereich und damit im bzw. unter den Genauigkeitsrahmen welcher in der Literatur vorgegeben wird (Fey and Krainer 2020). Gleichzeitig übersteigen die in den bewegungsaktiven Bereichen des Blockgletschers beobachteten saisonalen

Verschiebungsraten diese Unsicherheiten deutlich, sodass ein klarer Abstand zwischen Signal und Messrauschen gegeben ist.

Mit zunehmender Länge des betrachteten Zeitintervalls zeigt sich eine höhere Übereinstimmung zwischen UAV- und GNSS-basierten Verschiebungen. Dieses Verhalten ist konsistent mit der in der Literatur beschriebenen Abhängigkeit der relativen Unsicherheit von der Beobachtungsdauer, wonach subannuelle Analysen aufgrund geringerer Verschiebungsbeträge eine höhere Streuung aufweisen als interannuelle Auswertungen (Perruchoud and Delaloye 2007; Cicoira et al. 2020). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ordnen sich in dieses bekannte Muster ein und zeigen, dass die UAV-basierten Verschiebungsfelder auch auf subannueller Zeitskala eine konsistente Abbildung der saisonalen Bewegungsdynamik ermöglichen.

Im Rahmen der Validierung ist zudem die Rolle einzelner Referenz- und Basispunkte differenziert zu betrachten. Der Basispunkt M3 dient primär der geodätischen Einbindung des Messnetzes und der Stabilisierung des Referenzrahmens über längere Zeiträume hinweg. Seine Funktion ist damit insbesondere für interannuelle und multijährige Auswertungen von Bedeutung, bei denen sich systematische Effekte einzelner Referenzpunkte über mehrere Messzyklen akkumulieren können.

Für den Basispunkt M3 ist zu berücksichtigen, dass die Koordinatenbestimmung der initialen Nullmessung mit einer erhöhten Unsicherheit behaftet war (persönliche Mitteilung Kaufmann 2025). Diese Unsicherheit kann bei Vergleichen mit externen Datensätzen zu scheinbaren Abweichungen führen, die nicht eindeutig auf reale Bewegungsprozesse zurückzuführen sind, sondern aus dem Referenzrahmen resultieren. Innerhalb dieser Arbeit ist der Einfluss jedoch gering, da sämtliche GNSS-Auswertungen konsistent auf denselben Basispunkt bezogen und damit relativ zueinander vergleichbar sind.

Für die in dieser Arbeit untersuchte saisonale und subannuelle Bewegungsdynamik ist dieser Aspekt jedoch von nachgeordneter Bedeutung. Die Interpretation stützt sich primär auf die räumliche und zeitliche Kohärenz der Verschiebungsfelder sowie deren Übereinstimmung mit unabhängigen GNSS-Messungen in bewegungsaktiven Bereichen und ist damit weniger sensitiv gegenüber Unsicherheiten einzelner Referenzpunkte.

Zur weiteren Einordnung referenzrahmenbedingter Effekte wäre eine vergleichende Kontrolle zusätzliche Basispunkte, wie etwa M1 und M2, die westlich des Dösener Sees im Nahbereich des Arthur-von-Schmid-Hauses liegen, grundsätzlich geeignet. Eine solche Mehrpunktbetrachtung dient insbesondere der Absicherung langfristiger Referenzstabilität und der Bewertung möglicher systematischer Verschiebungen innerhalb des Messnetzes. Für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit ist eine derartige Erweiterung jedoch nicht zwingend erforderlich, da die abgeleiteten saisonalen Verschiebungsmuster klar oberhalb der kombinierten Messunsicherheiten liegen.

6.3. Bedeutung für Monitoring und Standardisierung

6.3.1 Einordnung im Global Climate Observing System (GCOS)-Monitoringrahmen

Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen, dass subannuelle Oberflächenbewegungen des Dösener Blockgletschers mit monatlicher zeitlicher Auflösung zuverlässig erfasst werden können. Die abgeleiteten Geschwindigkeiten liegen konsistent oberhalb der jeweiligen Nachweisgrenzen, zeigen räumlich stabile Muster und stimmen in ihrer Größenordnung mit unabhängigen GNSS-Messungen überein. Damit wird gezeigt, dass UAV-basierte Bildkorrelationsverfahren grundsätzlich geeignet sind, intraannuelle Variabilität der Blockgletscherbewegung quantitativ abzubilden.

Diese Ergebnisse sind vor dem Hintergrund bestehender Monitoringkonzepte zu interpretieren, die im Rahmen des GCOS auf standardisierte und langfristig vergleichbare Produkte der Essential Climate Variables ausgerichtet sind. Für die Produkte formuliert GCOS übergeordnete Qualitätsanforderungen, insbesondere in Bezug auf Genauigkeit, zeitliche Stabilität und Reproduzierbarkeit, die sich auf die Eignung der Daten für klimaorientierte Anwendungen beziehen (Bojinski et al. 2014).

Im alpinen Permafrostmonitoring wird diese Produktlogik durch die Rock Glacier Velocity (RGV) umgesetzt, die als annualisiertes und räumlich aggregiertes Maß die Grundlage für standardisierte Zeitreihen bildet (RGIK 2023a; Hu et al. 2025). Die in den RGIK-Richtlinien definierten Qualitätsstufen beziehen sich dabei ausdrücklich auf annualisierte RGV-Werte und nicht auf subannuelle Geschwindigkeitsinformation (RGIK 2023b). In diesem Zusammenhang ist relevant, dass die in dieser Arbeit abgeleiteten Geschwindigkeitswerte Unsicherheiten von unter 10 % aufweisen. Dies gilt für die annualen Auswertungen und wird im subannuellen Intervall Juli–August ebenfalls erreicht. Diese Größenordnung liegt innerhalb der in den RGIK-Konzeptdokumenten beschriebenen Genauigkeitsrahmen für konsistente RGV-Zeitreihen (RGIK 2023b, a).

Die in dieser Arbeit abgeleiteten subannuellen Geschwindigkeiten sind daher unterhalb der GCOS-konformen Produktebene einzuordnen. Sie stellen kein eigenständiges standardisiertes Monitoringprodukt dar und verändern weder die Definition noch die Funktion der RGV als zentrale Kenngröße des klimaorientierten Langzeitmonitorings. Entsprechend erfolgt ihre Bewertung nicht anhand produktbezogener Genauigkeitsschwellen, sondern anhand der internen Konsistenz der Ergebnisse, der Nachweisbarkeit oberhalb der jeweiligen Nachweisgrenzen sowie der Übereinstimmung mit unabhängigen Referenzmessungen.

Unter diesen Gesichtspunkten zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit eine robuste Erfassung intraannualer Bewegungsmuster. Die subannuellen UAV-basierten Geschwindigkeitsdaten sind somit als ergänzende Informationsquelle zu verstehen, die bestehende Monitoringkonzepte inhaltlich erweitert, ohne deren Standardisierung oder Vergleichbarkeit zu beeinträchtigen.

6.3.2 Aussagekraft subannueller Kinematik

Die Aussagekraft subannueller Geschwindigkeitsinformationen ergibt sich vor allem daraus, dass annualisierte RGV-Werte die zeitliche Struktur der Blockgletscherbewegung innerhalb eines Jahres zwangsläufig glätten. Während annualisierte Werte für standardisiertes Langzeitmonitoring geeignet sind, lassen sie keine Aussagen darüber zu, in welchen Phasen des Jahres die Bewegung dominiert bzw. wann sich Bewegungsraten und räumliche Muster verändern. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass ein erheblicher Teil der jährlichen Gesamtverschiebung des Dösener Blockgletschers in klar abgegrenzten Zeitfenstern während der Sommermonate erfolgt und dass sich sowohl das Geschwindigkeitsniveau als auch das räumliche Muster der Bewegung im saisonalen Verlauf deutlich verändern.

Diese subannuelle Variabilität ist grundsätzlich bekannt und wurde an einzelnen Blockgletscherstandorten bereits durch temporal hochauflösende GNSS- oder tachymetrische Messungen erfasst (Delaloye et al. 2008; Wirz et al. 2016). Solche Messungen zeigen ausgeprägte saisonale Beschleunigungs- und Verlangsamungsphase, die häufig einen wesentlichen Anteil der jährlichen Gesamtbewegung ausmachen. Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen diese Beobachtungen am Dösener Blockgletscher erstmals flächig, ergänzend zu den bisherigen punktuellen Erkenntnissen (Worsche 2000; Pfeffer 2023).

Der Mehrwert subannueller Geschwindigkeitsinformationen von Blockgletschern liegt insbesondere in der verbesserten Interpretation annualisierter RGV-Zeitreihen. Durch die Kenntnis der intraannuellen Bewegungsstruktur können interannuelle Schwankungen der Jahreswerte zeitlich eingeordnet werden, etwa indem hohe Jahresgeschwindigkeiten mit ausgeprägten sommerlichen Beschleunigungsphasen in Zusammenhang gebracht werden. Umgekehrt können Jahre mit moderaten Jahreswerten dennoch durch kurze, aber intensive Bewegungsphasen geprägt sein, die in der annualisierten Betrachtung nicht gesondert sichtbar werden.

Gleichzeitig ist die Aussagekraft subannueller Blockgletscherbewegung im Kontext großräumiger Monitoringprogramme klar begrenzt. Die erhöhte zeitliche Auflösung geht mit einem deutlich höheren Aufwand in Datenerfassung und Verarbeitung einher, was ihre systematische Anwendung auf eine große Anzahl von Standorten eingeschränkt.

Vor diesem Hintergrund sind subannuelle UAV-basierte Geschwindigkeitsinformationen vor allem für vertiefende Untersuchungen an ausgewählten Standorten von hoher Aussagekraft. Sie ermöglichen eine detailliertere Analyse der zeitlichen Dynamik der Blockgletscherbewegung und tragen dazu bei, annualisierte Geschwindigkeitswerte prozessual besser zu interpretieren.

6.3.3 Beitrag zur methodischen Standardisierung

Die Ergebnisse dieser Arbeit haben insbesondere im Hinblick auf die methodische Harmonisierung bildkorrelationsbasierter Geschwindigkeitsanalysen Relevanz. Während annualisierte RGV-Produkte im Rahmen von GCOS und den Richtlinien der IPA Action Standing Comitee Rock Glacier Inventories and Kinematics (RGIK) klar definiert sind, besteht für die Verarbeitung und Auswertung hochaufgelöster Bilddaten bislang eine ausgeprägte methodische Heterogenität. Dies betrifft nicht nur subannuelle Analysen, sondern die Methoden der Bildkorrelation sowie den Umgang mit Unsicherheiten, was die Vergleichbarkeit entsprechender Ergebnisse zwischen Studien und Standorten einschränkt.

Ein zentraler Beitrag dieser Arbeit liegt in der Entwicklung und Anwendung eines strukturierten, weitgehend standardisierten Workflows zur Ableitung von Oberflächengeschwindigkeiten aus Bilddaten. Der vorgestellte Ansatz ist dabei nicht auf ein bestimmtes zeitliches Intervall festgelegt, sondern grundsätzlich auf unterschiedliche zeitliche Abstände zwischen den Bildaufnahmen anwendbar. Damit folgt die Methodik dem in den RGIK-Dokumenten verankerten Gedanken, dass Standardisierung primär über konsistente Verarbeitungskonzepte und transparente Qualitätskriterien erreicht wird und nicht über die Festlegung einzelner Messmethoden oder Zeitaufösungen. Der Fokus liegt dabei nicht auf der inhaltlichen Interpretation der abgeleiteten Geschwindigkeiten, sondern auf der Vereinheitlichung der methodischen Schritte, die ihrer Ableitung zugrunde liegen.

Die implementierte grafische Benutzeroberfläche (GUI) unterstützt diesen Standardisierungsgedanken, indem sie die einzelnen Verarbeitungsschritte der Bildkorrelation in einer festen Abfolge zusammenführt und den Einfluss nutzerabhängiger Entscheidungen reduziert. Durch vordefinierte Parameterbereiche, eine einheitliche Behandlung zentraler Verarbeitungsschritte sowie integrierte Qualitätsprüfungen wird eine konsistente Anwendung der Methode auch bei wiederholter Nutzung oder durch unterschiedliche Anwender ermöglicht. Damit wird ein wesentlicher Aspekt methodischer Harmonisierung adressiert, wie er auch in den RGIK-Richtlinien für standardisierte Produkte gefordert wird. Gleichzeitig wird die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erhöht, da identische Eingangsdaten bei vergleichbarer Parametrisierung zu konsistenten Auswertungsergebnissen führen. Dies stellt eine zentrale Voraussetzung für die vergleichende Nutzung bildkorrelationsbasierter Analysen über unterschiedliche Studien und Standorte hinweg dar.

7. Fazit

Ziel dieser Arbeit war es, die saisonale bzw. subannuelle Dynamik der Oberflächenbewegung des Dösener Blockgletschers mittels UAV-basierter, fernerkundungsgestützter Bildkorrelation zu erfassen und deren methodische Umsetzbarkeit sowie Aussagekraft im Rahmen eines standardisierten Monitorings zu bewerten. Im Zentrum stand dabei die Frage, ob monatliche Geschwindigkeitsänderungen unter realistischen Aufnahmebedingungen zuverlässig quantifiziert werden können und welchen Mehrwert diese hohe zeitliche Auflösung für das Verständnis blockgletscherdynamischer Prozesse bietet.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Oberflächenbewegung des Dösener Blockgletschers im Untersuchungszeitraum Juni bis September 2025 deutlich saisonal differenziert. Die abgeleiteten subannuellen Geschwindigkeitsfelder weisen konsistente und räumlich kohärente Muster auf, die mit bekannten Aktivitätszonen des Blockgletschers übereinstimmen. Insbesondere im zentralen und westlichen Bereich konnten erhöhte Bewegungsraten nachgewiesen werden, während Randbereiche deutlich geringere Verschiebungen zeigten. Die monatlichen Auswertungen belegen eine ausgeprägte Beschleunigungsphase im Hoch- bis Spätsommer. Damit kann die zentrale Forschungsfrage dahingehend beantwortet werden, dass monatliche Geschwindigkeitsänderungen grundsätzlich zuverlässig erfassbar sind, sofern die geometrische Konsistenz der Datensätze, eine ausreichende Bildqualität sowie eine systematische Fehlerabschätzung gewährleistet sind. Die Ergebnisse bestätigen frühere punktuelle GNSS-Beobachtungen und erweitern diese erstmals um eine flächenhafte, hochaufgelöste Darstellung der saisonalen Kinematik.

Methodisch konnte gezeigt werden, dass UAV-basierte Orthomosaik in Kombination mit subpixelgenauer Bildkorrelation als fernerkundungsgestützte Methode geeignet sind, Bewegungen im Zentimeterbereich auch auf monatlicher Zeitskala zu erfassen. Der Abgleich mit geodätischen GNSS-Messungen sowie die Analyse stabiler Referenzflächen belegen eine hohe Übereinstimmung zwischen punktuellen und flächenhaften Messungen. Gleichzeitig wird deutlich, dass sich die erzielbare Genauigkeit im realistischen Bereich weniger Zentimeter bewegt und dass diese Größenordnung bei der Interpretation subannueller Bewegungsmuster konsequent berücksichtigt werden muss. Die ermittelten Level-of-Detection-Werte verdeutlichen, dass bei kurzen Zeitintervallen die Nachweisgrenze einen maßgeblichen Einfluss auf die Interpretierbarkeit der Ergebnisse hat und atmosphärische Störungen, Beleuchtungsunterschiede sowie systematische Artefakte der Bildkorrelation die Ergebnisse lokal beeinflussen können.

Ein wesentlicher Beitrag dieser Arbeit liegt in der Entwicklung und Anwendung eines standardisierten, weitgehend automatisierten Verarbeitungsworkflows, der im Rahmen dieser Arbeit als GUI-basiertes Tool „TerraShift“ neu entwickelt wurde und die vollständige Prozesskette von der geometrischen Vorverarbeitung der UAV-Daten über

die Bildkorrelation bis hin zur Validierung integriert. Als explizit fernerkundungsgestützter Ansatz ist dieser Workflow grundsätzlich skalierbar und auf größere Untersuchungsgebiete sowie auf die Analyse großräumiger Oberflächenveränderungen in hochalpinen, geomorphologisch aktiven Systemen übertragbar, sofern vergleichbare Aufnahme- und Qualitätsstandards eingehalten werden. Die entwickelte grafische Benutzeroberfläche ermöglicht eine transparente und reproduzierbare Analyse und stellt damit eine wichtige Voraussetzung für den operativen Einsatz im Monitoringkontext dar.

Die Untersuchung verdeutlicht, dass subannuelle Analysen einen erheblichen Erkenntnisgewinn gegenüber rein jährlichen Betrachtungen bieten. Kurzzeitige Beschleunigungs- und Verlangsamungsphasen werden sichtbar und erlauben eine differenziertere Interpretation potenzieller thermisch-hydrologischer Steuerungsmechanismen. Gerade im Kontext großräumiger, fernerkundungsgestützter Anwendungen zeigt sich jedoch, dass der erhöhte zeitliche Detailgrad untrennbar mit steigenden Anforderungen an Datenqualität, Aufnahmebedingungen und eine realistische Einschätzung der Messgenauigkeit verbunden ist.

Zusammenfassend belegt diese Arbeit, dass UAV-basierte Bildkorrelation ein leistungsfähiges fernerkundungsgestütztes Instrument zur Analyse der saisonalen Blockgletscherdynamik darstellt und das bestehende Monitoring des Dösener Blockgletschers sinnvoll ergänzt. Die Ergebnisse zeigen zugleich, dass sich subannuelle Bewegungsmuster mit hoher räumlicher Detailtiefe, jedoch innerhalb klar definierter Genauigkeitsgrenzen, erfassen lassen. Damit stellt diese Arbeit eine belastbare methodische und inhaltliche Grundlage für die zukünftige Integration subannueller UAV-basierter Bewegungsanalysen in ein standardisiertes, großräumig anwendbares alpines Permafrostmonitoring dar.

8. Literaturverzeichnis

- Aati S (2024) Geospatial-COSICorr3D. In: GitHub. <https://github.com/SaifAati/Geospatial-COSICorr3D>. Accessed 3 Nov 2025
- Aati S, Milliner C, Avouac J-P (2022) A new approach for 2-D and 3-D precise measurements of ground deformation from optimized registration and correlation of optical images and ICA-based filtering of image geometry artifacts. *Remote Sensing of Environment* 277:113038. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113038>
- Agisoft Metashape (2024) Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 2.1
- Arenson L, Hoelzle M, Springman S (2002) Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes* 13:117–135. <https://doi.org/10.1002/ppp.414>
- Avian M, Kaufmann V, Lieb GK (2005) Recent and Holocene dynamics of a rock glacier system: The example of Langtarkar (Central Alps, Austria). *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography* 59:149–156. <https://doi.org/10.1080/00291950510020637>
- Avian M, Kellerer-Pirklbauer A, Bauer A (2009) LiDAR for monitoring mass movements in permafrost environments at the cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9:1087–1094. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1087-2009>
- Barsch D (1996) *Rockglaciers*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Barsch D, Hell G (1976) Photogrammetrische Bewegungsmessungen am Blockgletscher Murtèl I, Oberengadin, Schweizer Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 11:S.111-142
- Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L (2006) SURF: Speeded Up Robust Features. In: Leonardis A, Bischof H, Pinz A (eds) *Computer Vision – ECCV 2006*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 404–417
- Berger J, Krainer K, Mostler W (2004) Dynamics of an active rock glacier (Ötztal Alps, Austria). *Quaternary* 62:233–242. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.07.002>
- Berthling I, Etzelmüller B, Eiken T, Sollid J (2003) The rock glaciers on Prins Karls Forland: Corrections of surface displacement rates. *Permafrost and Periglacial Processes* 14:291–293. <https://doi.org/10.1002/ppp.454>
- Bertone A, Seppi R, Callegari M, et al (2023) Unprecedented Observation of Hourly Rock Glacier Velocity With Ground-Based SAR. *Geophysical Research Letters* 50:e2023GL102796. <https://doi.org/10.1029/2023GL102796>
- Besl P, McKay HD (1992) A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 14:239–256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>
- Bodin X, Thibert E, Sanchez O, et al (2018) Multi-Annual Kinematics of an Active Rock Glacier Quantified from Very High-Resolution DEMs: An Application-Case in the French Alps. *Remote Sensing* 10
- Bojinski S, Verstraete M, Peterson TC, et al (2014) The Concept of Essential Climate Variables in Support of Climate Research, Applications, and Policy. *Bulletin of the American Meteorological Society* 95:1431–1443. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00047.1>
- Bollmann E, Klug C, Sailer R, et al (2012) Quantifying Rock Glacier Creep Using Airborne Laser Scanning: A Case Study from Two Rock Glaciers in the Austrian Alps. In: *Tenth International Conference on Permafrost: Volume 1: International Contributions*. p S.49-54

- Brardinoni F, Vivero S, Barboux C, et al (2026) RGIK guidelines for compiling consistent rock glacier inventories. *Geomorphology* 492:110050. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.110050>
- Buck S, Kaufmann V (2010) The Influence of Air Temperature on the Creep Behaviour of Three Rockglaciers in the Hohe Tauern. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung* 45:S.159-170
- Capps SR (1910) Rock Glaciers in Alaska. *The Journal of Geology* 18:359–375. <https://doi.org/10.1086/621746>
- Chai T, Draxler RR (2014) Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?– Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development* 7:1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chaix A (1923) Les coulées de blocs du Parc national suisse d'Engadine (Note préliminaire). *Le Globe Revue genevoise de géographie*, 62:1–35. <https://doi.org/10.3406/globe.1923.5609>
- Cicoira A, Beutel J, Faillettaz J, Vieli A (2019) Water controls the seasonal rhythm of rock glacier flow. *Earth and Planetary Science Letters* 528:115844. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115844>
- Cicoira A, Marcer M, Gärtner-Roer I, et al (2020) A general theory of rock glacier creep based on in-situ and remote sensing observations. *Permafrost and Periglacial Processes* 32:139–153. <https://doi.org/10.1002/ppp.2090>
- Cusicanqui D, Rabatel A, Vincent C, et al (2021) Interpretation of Volume and Flux Changes of the Laurichard Rock Glacier Between 1952 and 2019, French Alps. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 126:e2021JF006161. <https://doi.org/10.1029/2021JF006161>
- Debella-Gilo M, Käab A (2011) Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation. *Remote Sensing of Environment* 115:130–142. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.012>
- Delaloye R, Barboux C, Bodin X, et al (2018) Rock glacier inventories and kinematics: a new IPA Action Group. *Proceedings of the 5th European Conference on Permafrost, Chamonix-Mont Blanc, France* 23:S.392-393
- Delaloye R, Lambiel C, Gärtner-Roer I (2010) Overview of rock glacier kinematics research in the Swiss Alps. *Geogr Helv* 65:135–145. <https://doi.org/10.5194/gh-65-135-2010>
- Delaloye R, Perruchoud E, Avian M, et al (2008) Recent interannual variations of rock glacier creep in the European Alps. *s.n.*, p S.343-348.
- DeTone D, Malisiewicz T, Rabinovich A (2018) SuperPoint: Self-Supervised Interest Point Detection and Description. In: 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). pp 337–33712
- DJI (2023) Matrice 300 RTK - Handbuch v4.0 - DJI Pilot 2
- DJI (2021) Zenmuse P1 - Handbuch v1.2
- Eltner A, Kaiser A, Abellan A, Schindewolf M (2017) Time lapse structure-from-motion photogrammetry for continuous geomorphic monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms* 42:2240–2253. <https://doi.org/10.1002/esp.4178>
- Eltner A, Kaiser A, Castillo C, et al (2016) Image-based surface reconstruction in geomorphometry - merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics* 4:359–389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Eltner A, Sofia G (2020) Structure from motion photogrammetric technique. In: *Developments in Earth Surface Processes*. pp 1–24

- Emlid Tech Kf (2023) REACH RS2/RS2+ User Documentation (Firmware version 30)
- Emlid Tech Kf (2024a) REACH RS3 User Documentation (Firmware version 31.8)
- Emlid Tech Kf (2024b) Emlid Studio - User Documentation
- Evans AN (2000) Glacier surface motion computation from digital image sequences. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 38:1064–1072. <https://doi.org/10.1109/36.841985>
- Fey C, Krainer K (2020) Analyses of UAV and GNSS based flow velocity variations of the rock glacier Lazaun (Ötztal Alps, South Tyrol, Italy). *Geomorphology* 365:107261. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107261>
- Finsterwalder S (1928) Begleitworte zur Karte des Gepatschferners. *Zeitschrift für Gletscherkunde* 16:20–41
- Fleischer F, Haas F, Piermattei L, et al (2021) Multi-decadal (1953–2017) rock glacier kinematics analysed by high-resolution topographic data in the upper Kaunertal, Austria. *The Cryosphere* 15:5345–5369. <https://doi.org/10.5194/tc-15-5345-2021>
- Fugazza D, Scaioni M, Corti M, et al (2018) Combination of UAV and terrestrial photogrammetry to assess rapid glacier evolution and map glacier hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18:1055–1071. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1055-2018>
- GeoSphere Austria (2025) GeoSphere Austria - Messtationen Jahresdaten (Dataset API Frontend). <https://dataset.api.hub.geosphere.at/app/frontend/station/historical/klima-v2-1y>. Accessed 23 Nov 2025
- Gerke M, Przybilla H-J (2016) Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* 2016:17–30. <https://doi.org/10.1127/pfg/2016/0284>
- Giardino JR, Regmi NR, Vitek JD (2014) Rock Glaciers. In: Singh VP, Singh P, Haritashya UK (eds) *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 943–948
- Gindraux S, Boesch R, Farinotti D (2017) Accuracy Assessment of Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles' Imagery on Glaciers. *Remote Sensing* 9:186. <https://doi.org/10.3390/rs9020186>
- Gonzalez RC, Woods RE (2008) *Digital Image Processing*, 3.Auflage. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey
- Haeberli W (1985) Creep of Mountain Permafrost: Internal Structure and Flow of Alpine Rock Glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (Zürich)* 77:
- Haeberli W (1975) Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie* 17:
- Haeberli W, King L, Flotron A (1979) Surface Movement and Lichen-Cover Studies at the Active Rock Glacier near the Grubengletscher, Wallis, Swiss Alps. *Arctic and Alpine Research* 11:421–441. <https://doi.org/10.1080/00040851.1979.12004150>
- Haeberli W, Schmid W (1988) Aerophotogrammetrical Monitoring Of Rock Glaciers. In: Norwegian Committee on Permafrost (ed) *Permafrost: fifth International Conference, Trondheim, August 2 - 5, 1988 ; proceedings*. TAPIR Publ, Trondheim, pp 764–769
- Heid T, Käab A (2012) Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 118:339–355. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.024>

- Höck V (1993) The Habach-Formation and the Zentralgneis — A Key in Understanding the Palaeozoic Evolution of the Tauern Window (Eastern Alps). In: von Raumer JF, Neubauer F (eds) Pre-Mesozoic Geology in the Alps. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 361–374
- Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E (eds) (2008) Satellite signals. In: GNSS — Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more, 1.Auflage. Springer, Vienna, pp 55–104
- Höllermann P (1983) Blockgletscher als Mesoformen der Periglazialstufe. Dümmler, Bonn
- Holub VB, Marschallinger R (1988) Die Zentralgneise im Hochalm-Ankogel-Massiv (östliches Tauernfenster). Teil I: petrographische Gliederung und Intrusionsfolge. *Austrian Journal of Earth Sciences* 81:5–31
- Hu Y, Arenson LU, Barboux C, et al (2025) Rock Glacier Velocity: An Essential Climate Variable Quantity for Permafrost. *Reviews of Geophysics* 63:e2024RG000847. <https://doi.org/10.1029/2024RG000847>
- Ilg E, Mayer N, Saikia T, et al (2017) FlowNet 2.0: Evolution of Optical Flow Estimation with Deep Networks. In: 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, Honolulu, HI, pp 1647–1655
- Illustrae (2025) Illustrae - Professional Scientific Illustration Platform. <https://illustrae.co/>. Accessed 29 Nov 2025
- Irrgang A, Isaksen K, Noetzli J, et al (2024) Measurement of Permafrost. In: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. World Meteorological Organization, Geneva, p S.99-148
- James MR, Chandler JH, Eltner A, et al (2019) Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. *Earth Surface Processes and Landforms* 44:2081–2084. <https://doi.org/10.1002/esp.4637>
- Javadnejad F (2018) Small Unmanned Aircraft Systems (UAS) for Engineering Inspections and Geospatial Mapping. Oregon State University
- Kääb A (1999) Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: New techniques and applications. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 25:765–770. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00099-X](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00099-X)
- Kääb A, Frauenfelder R, Roer I (2007) On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change* 56:172–187. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.005>
- Kääb A, Strozzi T, Bolch T, et al (2021) Inventory and changes of rock glacier creep speeds in Ile Alatau and Kungöy Ala-Too, northern Tien Shan, since the 1950s. *The Cryosphere* 15:927–949. <https://doi.org/10.5194/tc-15-927-2021>
- Kaufmann V (1996) Der Dösener Blockgletscher - Studienkarten und Bewegungsmessungen. *Beiträge zur Permafrostforschung in Österreich* 33:S.141-162
- Kaufmann V (1998) Deformation analysis of the Doesen rock glacier (Austrian Alps, Europe). In: Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost. Collection Nordicana, Yellowknife, NWT, Canada, p S. 551-556
- Kaufmann V (2016) 20 Years of Geodetic Monitoring of Dösen Rock Glacier (Ankogel Group, Austria): A Short Review. *Joannea - Geologie und Paläontologie* 37–44
- Kaufmann V, Heiland R (1998) Zur Morphometrie des Dösener Blockgletschers (Nationalpark Hohe Tauern, Österreich). *Hochgebirgskartographie - Silvretta '98 - High Mountain Cartography, Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie* 11:S.102-114

- Kaufmann V, Kellerer-Pirklbauer A (2015) Active Rock Glaciers in a Changing Environment Geomorphometric Quantification and Cartographic Presentation of Rock Glacier Surface Change with Examples from the Hohe Tauern Range, Austria. *Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie* 21:179–190
- Kaufmann V, Kellerer-Pirklbauer A, Seier G (2021) Conventional and UAV-Based Aerial Surveys for Long-Term Monitoring (1954–2020) of a Highly Active Rock Glacier in Austria. *Front Remote Sens* 2:732744. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.732744>
- Kaufmann V, Ladstädter R, Kienast G (2007) 10 years of monitoring of the Doesen rock glacier (Ankogel group, Austria) - A review of the research activities for the time period 1995 - 2005: ICA Mountain Cartography Workshop. *Proceedings of 5th Mountain Cartography Workshop* 129–144
- Kaufmann V, Seier G, Sulzer W, et al (2018) Rock Glacier Monitoring Using Aerial Photographs: Conventional Vs. UAV-Based Mapping - A Comparative Study. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci XLII-1*:239–246. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-239-2018>
- Kellerer-Pirklbauer A (2019) Long-term monitoring of sporadic permafrost at the eastern margin of the European Alps (Hochreichart, Seckauer Tauern range, Austria). *Permafrost and Periglacial Processes* 30:260–277. <https://doi.org/10.1002/ppp.2021>
- Kellerer-Pirklbauer A (2009) Wie alt sind Blockgletscher in den Österreichischen Alpen? Das Beispiel der Blockgletscher im Dösener Tal, Ankogelgruppe, datiert mit Hilfe der Schmidt-Hammer Methode. Roland Schmidt (Ed): *Klimawandel in Österreich Die letzten 20000 Jahre ... und ein Blick voraus* 6:S.65-76
- Kellerer-Pirklbauer A, Avian M, Kaufmann V, et al (2014) Climate-induced spatio-temporal change of kinematics and ground temperature of rock glaciers and permafrost in the Hohe Tauern Range, Austria. In: *Austrian Permafrost Research Initiative. Final Report. Institute for Interdisciplinary Mountain Research, ÖAW. ., Wien*, pp 17–39
- Kellerer-Pirklbauer A, Bodin X, Delaloye R, et al (2024) Acceleration and interannual variability of creep rates in mountain permafrost landforms (rock glacier velocities) in the European Alps in 1995–2022. *Environ Res Lett* 19:034022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad25a4>
- Kellerer-Pirklbauer A, Bodin X, Delaloye R, et al (2026) Rock glacier velocity monitored by annual in-situ geodetic surveys: Long-term challenges, solutions and suggestions. *Geomorphology* 495:110117. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.110117>
- Kellerer-Pirklbauer A, Kaufmann V (2012) About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105:94–112
- Kellerer-Pirklbauer A, Lieb G, Kaufmann V (2017) The Dösen Rock Glacier in Central Austria: A key site for multidisciplinary long-term rock glacier monitoring in the Eastern Alps. *Austrian Journal of Earth Sciences* 110:. <https://doi.org/10.17738/ajes.2017.0013>
- Kellerer-Pirklbauer A, Lieb G, Kleinfierchner H (2012) A new rock glacier inventory in the eastern European Alps. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105:78–93
- Kellerer-Pirklbauer A, Lieb GK, Kaufmann V (2022) Rock Glaciers in the Austrian Alps: A General Overview with a Special Focus on Dösen Rock Glacier, Hohe Tauern Range. In: Embleton-Hamann C (ed) *Landscapes and Landforms of Austria*. Springer International Publishing, pp 393–406
- Kenner R, Phillips M, Beutel J, et al (2017) Factors Controlling Velocity Variations at Short-Term, Seasonal and Multiyear Time Scales, Ritigraben Rock Glacier, Western Swiss Alps. *Permafrost & Periglacial* 28:675–684. <https://doi.org/10.1002/ppp.1953>
- Kenyi LW, Kaufmann V (2003) Estimation of rock glacier surface deformation using sar interferometry data. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 41:1512–1515. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.811996>

- Kofler C, Mair V, Comiti F, et al (2022) Towards a sediment transfer capacity index of rock glaciers: Examples from two catchments in South Tyrol, (Eastern Italian Alps). CATENA 216:106329. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106329>
- Lague D, Brodu N, Leroux J (2013) Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82:10–26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Lambiel C, Delaloye R (2004) Contribution of real-time kinematic GPS in the study of creeping mountain permafrost: examples from the Western Swiss Alps. Permafrost and Periglacial Processes 15:229–241. <https://doi.org/10.1002/ppp.496>
- Land Kärnten (2023) KAGIS - Höheninformation. In: KAGIS-Geoinformation. <https://gis.ktn.gv.at/webgisviewer/atlas-mobile/map/Basiskarten/H%C3%B6heninformation>. Accessed 21 Nov 2025
- Leprince S, Barbot S, Ayoub F, Avouac J-P (2007) Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 45:1529–1558. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.888937>
- Lieb G, Nutz M (2009) Naturkundlicher Führer Blockgletscherweg Dösental. Ankogelgruppe. Naturkundlicher Führer zum Nationalpark Hohe Tauern. 21. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck
- Lieb GK (1996) Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen. Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung
- Lowe DG (2004) Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision 60:91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Meng TM, Petersen EI, Holt JW (2022) Rock glacier composition and structure from radio wave speed analysis with dipping reflector correction. Journal of Glaciology 69:639–657. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.90>
- Olefs M, Koch R, Schöner W, Marke T (2020) Changes in Snow Depth, Snow Cover Duration, and Potential Snowmaking Conditions in Austria, 1961–2020—A Model Based Approach. Atmosphere 11:1330. <https://doi.org/10.3390/atmos11121330>
- Open Street Map (2025) Overpass Turbo. <https://overpass-turbo.eu/>. Accessed 18 Dec 2025
- Pellet C, Bodin X, Cusicanqui D, et al (2025) State of the Climate in 2024. Bulletin of the American Meteorological Society 106:S.48-49. <https://doi.org/10.1175/2025BAMSStateoftheClimate.1>
- Pellet C, Bodin X, Cusicanqui D, et al (2024) State of the Climate in 2023 Global Climate. Bulletin of the American Meteorological Society 105:S.44-46. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-24-0116.1>
- Pellet C, Bodin X, Cusicanqui D, et al (2022) State of the Climate in 2021 Global Climate. Bulletin of the American Meteorological Society 103:S.43-45. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-24-0116.1>
- PERMOS SPMN (2025) Swiss Permafrost Bulletin 2024
- Perruchoud E, Delaloye R (2007) Short-Term Changes in Surface Velocities on the Becs-de-Bosson Rock Glacier (Western Swiss Alps). Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung 43:S.131-136
- Pestal G (2005) Geologischer Bau des Tauernfensters – Erläuterungen zu Blatt 182 Spittal a.d. Drau. Arbeitstagungen der geologischen Bundesanstalt, Gmünd
- Pfeffer H (2023) Movement pattern analysis of the Dösen Rock Glacier, Hohe Tauern Range, Austria, using a multi-method approach. Masterarbeit, Karl-Franzens-Universität

- RGIK IAGRGI and K (2023a) Guidelines for inventorying rock glaciers: Baseline and practical concepts (version 1.0, 28. December 2023). IPA Action Group Rock glacier inventories and kinematics
- RGIK IAGRGI and K (2023b) Rock Glacier Velocity as an associated parameter of ECV Permafrost: Baseline concepts (version 3.2, 22. May 2023). IPA Action Group Rock glacier inventories and kinematics
- Roer I (2005) Rockglacier Kinematics In A High Mountain Geosystem. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
- Sarlin P-E, DeTone D, Malisiewicz T, Rabinovich A (2020) SuperGlue: Learning Feature Matching with Graph Neural Networks
- Scambos TA, Dutkiewicz MJ, Wilson JC, Bindshadler RA (1992) Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data. *Remote Sensing of Environment* 42:177–186. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90101-O](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90101-O)
- Schmölter R, Fruhwirth RK (1996) Komplexgeophysikalische Untersuchung auf dem Döener Blockgletscher (Hohe Tauern, Österreich). *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung* 165–190
- Schoeneich P, Bodin X, Echelard T, et al (2015) Velocity Changes of Rock Glaciers and Induced Hazards. In: Lollino G, Manconi A, Clague J, et al. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 1*. Springer International Publishing, Cham, pp 223–227
- Schrott L, Otto J-C, Keller F (2012) Modelling alpine permafrost distribution in the Hohe Tauern region, Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105:196–183
- Schuster R, Stüwe K (2022) Geological and Tectonic Setting of Austria. In: Embleton-Hamann C (ed) *Landscapes and Landforms of Austria*. Springer International Publishing, Cham, pp 3–26
- Śledź S, Ewertowski MW, Piekarczyk J (2021) Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and Structure from Motion photogrammetry in glacial and periglacial geomorphology. *Geomorphology* 378:107620. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107620>
- Stammler M, Blöthe J, Flöck F, et al (2025) Dos Lenguas rock glacier kinematics stable despite warming trend (2016–2024): Surface changes and the role of topography and climate in the Dry Andes of Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms* 50:e70151. <https://doi.org/10.1002/esp.70151>
- Staub B, Delaloye R (2017) Using Near-Surface Ground Temperature Data to Derive Snow Insulation and Melt Indices for Mountain Permafrost Applications. *Permafrost and Periglacial Processes* 28:237–248. <https://doi.org/10.1002/ppp.1890>
- Stöcker C, Nex F, Koeva M, Gerke M (2017) Quality Assessment of Combined Imu/Gnss Data for Direct Georeferencing in the Context of Uav-Based Mapping. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci XLII-2/W6*:355–361. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-355-2017>
- Streletskiy D, Noetzli J, Smith SL, et al (2021) Strategy and Implementation Plan for the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) 2021-2024
- Teed Z, Deng J (2020) RAFT: Recurrent All-Pairs Field Transforms for Optical Flow. *12347:402–419*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58536-5_24
- Vivero S, Hendrickx H, Frankl A, et al (2022) Kinematics and geomorphological changes of a destabilising rock glacier captured from close-range sensing techniques (Tsarmin rock glacier, Western Swiss Alps). *Front Earth Sci* 10:1017949. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1017949>
- Wagner T, Pleschberger R, Kainz S, et al (2020) The first consistent inventory of rock glaciers and their hydrological catchments of the Austrian Alps. *AJES* 113:1–23. <https://doi.org/10.17738/ajes.2020.0001>

- Wahrhaftig C, Cox A (1959) Rock Glaciers in the Alaskan Range. *Geol Soc America Bull* 70:383. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1959\)70%255B383:RGITAR%255D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70%255B383:RGITAR%255D2.0.CO;2)
- Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, et al (2012) 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179:300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Willmott CJ, Matsuura K (2005) Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research* 30:79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Wirz V, Gruber S, Purves RS, et al (2016) Short-term velocity variations at three rock glaciers and their relationship with meteorological conditions. *Earth Surface Dynamics* 4:103–123. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-103-2016>
- Worsche D (2000) Bewegungsmessungen am Dösener Blockgletscher 1999. Dissertation, Technische Universität
- Zandler H, Abermann J, Robson BA, et al (2025a) Deep learning outperforms existing algorithms in glacier surface velocity estimation with high-resolution data – the example of Austerdalsbreen, Norway. *Front Remote Sens* 6:. <https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1586933>
- Zandler H, Sulzer W, Kaufmann V (2025b) Delineation of debris-covered glaciers with multi-temporal UAV images (Gössnitzkees, Schober Group/Austria). *Advances in Geodesy and Geoinformation* 66–66. <https://doi.org/10.24425/agg.2025.154150>

Appendix

Softwareverfügbarkeit

Die zur Erstellung der in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse verwendete Software ist öffentlich über GitHub verfügbar: <https://github.com/mkirchmair/TerraShift>

Eine versionierte Veröffentlichung wurde auf Zenodo archiviert: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18523402>