

# Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

## A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
<b>Kurztitel:</b>	Deucalion III
<b>Langtitel:</b>	Determination of sediment dynamics in torrential watersheds at different spatial and temporal scales under changing climatic conditions
<b>Zitiervorschlag:</b>	Kaitna, R., Aigner, P., Pilkington, B., Hackhofer, E., Wagner, P., Bernardi, T., Kuschel, E., Mariacher, F., Chen, T.Z., Sklar, L., Hrachowitz, M. (2024): Publizierbarer Endbericht ACRP11-Projekt Deucalion III.
<b>Programm inkl. Jahr:</b>	ACRP 11th call, 2018
<b>Dauer:</b>	01.12.2019 bis 30.11.2023
<b>KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:</b>	Universität für Bodenkultur Wien
<b>Kontaktperson Name:</b>	Roland Kaitna
<b>Kontaktperson Adresse:</b>	Peter Jordan Strasse 82, 1190 Wien
<b>Kontaktperson Telefon:</b>	+43 1 47654 87113
<b>Kontaktperson E-Mail:</b>	roland.kaitna@boku.ac.at
<b>Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):</b>	Concordia University Montreal, Canada Delft University of Technology, The Netherlands
<b>Schlagwörter:</b>	Muren, Sedimentdynamik, kritischer Abfluss
<b>Projektgesamtkosten:</b>	257,782 €
<b>Fördersumme:</b>	249,902 €
<b>Klimafonds-Nr:</b>	B960253
<b>Erstellt am:</b>	26.02.2024

## B) Projektübersicht

### 1 Kurzfassung

(max. 2 Seiten, Sprache Deutsch)

Kurze Darstellung des Projekts, Zusammenfassung der wesentlichen Projektergebnisse qualitativ und quantitativ (bei Szenarien, Kostenanalysen, volkswirtschaftlichen Studien, Potenzialstudien sind ausgewählte numerischen Werte festzuhalten – in % sowie die Werte selbst).

Murgänge stellen in Gebirgsregionen eine große Gefahr dar. Obwohl erhebliche Anstrengungen unternommen wurden, um solche Ereignisse zu prognostizieren, gibt es zwei wesentliche Mängel bei den derzeitigen Ansätzen, die eine zuverlässigere Bewertung der klimatischen und topographischen Einflüsse auf Wildbacheignisse in Österreich einschränken: (1) die Faktoren, die die Sedimentverfügbarkeit beeinflussen, sind nur unzureichend bekannt, und (2) die meisten Ansätze vernachlässigen den eigentlichen Auslösemechanismus und dessen Zusammenhang mit den hydro-meteorologischen Auslösebedingungen.

Ziel des Projektes war es, die Bedeutung geomorphologischer Randbedingungen für die Murgangauslösung zu untersuchen, einschließlich der Sedimentdynamik in Wildbacheinzugsgebieten und kritischer Abflussbedingungen.

Das Projekt war in fünf kooperative Arbeitspakete (WPs) unterteilt:

WP 1: Lokale Sedimentdynamik: Zur Überwachung der Sedimentdynamik in Wildbacheinzugsgebieten führten wir an mehreren Untersuchungsstandorten regelmäßige topografische Erhebungen der im Gerinne gelagerten Sedimente sowie des Sedimenteintrags von den angrenzenden Hängen in das Gerinne durch. Wir setzten eine Kombination von Fernerkundungstechnologien und -daten ein, einschließlich Dronen, eines terrestrischen Laserscanners, stationärer automatischer Kameras und öffentlich zugänglicher Luftbilder.

AP 2: Kritischer Kanalabfluss: Auf der Grundlage von 20-jährigen Aufzeichnungen hydro-meteorologischer Daten und Abflussmessungen während des Projektzeitraums entwickelten wir ein prozessbasiertes hydrologisches Modell mit einer stündlichen Auflösung und quantifizierten kritische Abflussbedingungen.

WP 3: Regionale Sedimentverfügbarkeit: Die regionale geomorphologische Anfälligkeit, die Oberflächenrauigkeit und die Konnektivität für Murgänge wurden anhand der Analyse von hochauflösenden digitalen LiDAR-Höhenmodellen (DEMs), Luftbildern und geologischen Karten unter Verwendung statistischer Methoden und fortschrittlicher KI-Techniken bewertet.

WP 4: Anfälligkeitsmodell: Wir entwickelten ein geomorphologisches Anfälligkeitsmodell für die Bewertung von Murganggefahren, das für alle Einzugsgebiete in Österreich anwendbar ist. Das Modell ist Python-basiert und kann leicht für zusätzliche Einzugsgebietsparameter erweitert werden.

## WP 5: Projektmanagement, Öffentlichkeitsarbeit und Verbreitung der Projektergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erstellung einer Datenbasis zur Veränderung der Gerinnetopographie vor und nach Murgangereignissen für drei unterschiedliche Wildbacheinzugsgebiete (Hopfgartnergraben, Loechertroggraben und Lattenbach), sowie Gerinnetopographie und Abflussüberwachung für vier Wildbacheinzugsgebiete, in denen während der Projektlaufzeit kein Murgangereignis stattfand.
- Die Häufigkeit und das Volumen von Murgängen stehen in engem Zusammenhang mit den Bewegungsgeschwindigkeiten der in den Einzugsgebieten vorhandenen Rutschungen (Loechertroggraben und Lattenbach). In Gerinneabschnitten, die von hohen Bewegungsgeschwindigkeiten betroffen sind, erfolgt die Wiederauffüllung des Gerinnes größtenteils innerhalb von Minuten und Stunden. In Abwesenheit von aktiven Rutschungen wird die Murgangaktivität durch regenbedingte Böschungsbrüche entlang des Gerinnes und den kontinuierlichen Transfer von Hangsediment in das Gerinne in den Zeiträumen zwischen den Murgangereignissen begrenzt.
- Entwicklung und Kalibrierung eines hydrologischen Modells für drei Wildbacheinzugsgebiete, in denen während des Projektzeitraums Murenabgänge stattfanden. Quantifizierung des kritischen Abflusses in drei Einzugsgebieten mit unterschiedlichen geomorphologischen Randbedingungen.
- Neue Methode zur Korrelation von topographischer Rauigkeit und Bodenbedeckungstyp. Wir stellen fest, dass die Häufigkeit von Murgängen mit der Verfügbarkeit von Sedimenten in Verbindung mit der Anbindung von Quellgebieten an den Schwemmkegel des Einzugsgebiets korreliert ist. Einzugsgebiete mit einem hohen Grad an Konnektivität zwischen Sedimentquellen und dem Einzugsgebietsfächer neigen dazu, ausschließlich Murgänge zu produzieren.
- Geomorphologisches Anfälligkeitsmodell für Wildbacheinzugsgebiete in Österreich zeigt plausible Ergebnisse für die regionale Bewertung. Der Zusammenhang mit hydro-meteorologischen Einflüssen liefert keine eindeutigen Ergebnisse und unterstreicht die Bedeutung der lokalen Sedimentverfügbarkeit.

## 2 Executive Summary

(max. 2 Seiten, Sprache Englisch)

Siehe oben.

Debris flows represent a severe hazard in mountain regions. Though significant effort was made to forecast such events, there are two major shortcomings of current approaches that limit a more reliable assessment of climatic and topographic controls on torrential events in Austria: (1) the factors influencing

sediment availability are poorly understood, and (2) most approaches neglect the actual initiation mechanism and its connection to hydro-meteorological trigger conditions.

The project aimed to investigate the importance of geomorphological boundary conditions for debris-flow initiation, including sediment dynamics within torrent watersheds and critical runoff conditions.

The work load was structured in five collaborative work-packages (WPs):

*WP 1: Local sediment dynamics:* For monitoring the sediment dynamics in torrent catchments, we carried out periodic topographic surveys of sediment stored in the channel as well as the delivery of sediment into the channel from adjacent hillslopes for several study sites. We employed a combination of remote sensing technologies and data, including unmanned aerial vehicle (UAV) based structure-from-motion, a terrestrial laser scanner, fixed automatic cameras at key locations, and publicly available aerial pictures.

*WP 2: Critical channel runoff:* Based on 20-year records of hydro-climatic data and discharge assessment over the project period, we developed a semi-distributed, process-based hydrological model at an hourly time scale and quantified critical runoff conditions.

*WP 3: Regional sediment availability:* Regional geomorphological susceptibility, surface roughness and connectivity for debris-flow activity were assessed from analysis of airborne LiDAR-derived high-resolution digital elevation models (DEMs), aerial photos and geologic maps using statistical methods and advanced AI techniques.

*WP 4: Susceptibility model:* we developed a geomorphological susceptibility model for debris-hazard assessment, applicable to all catchments in Austria. The model is Python-based and can be easily extended for additional catchment parameters.

*WP 5: Project management, outreach and dissemination of project results*

The main results can be summarized as follows:

- Database of changes of channel topography before and after debris-flow events for three contrasting torrent catchments (Hopfgartnergraben, Loechertroggraben and Lattenbach), including mechanism and time-scale of channel refill. Channel topography and runoff monitoring for four torrent catchments where no debris-flow event occurred during the project period.
- Debris-flows frequency and volumes are strongly related to movement rates of landslides present in the watersheds (Loechertroggraben and Lattenbach). In channel reaches that are affected by high movement rates, most of the channel refill occurs within the time scale of minutes and hours. In the absence of active landslides, debris-flow activity is limited by rainfall-

triggered embankment failures along the channel and continuous transfer of hillslope sediment into the channel in time periods between debris-flow events.

- Development and calibration of a semi-distributed hydrological model for three torrent catchments where debris-flow events occurred during the project period. Quantification of critical runoff in three catchments with contrasting geomorphological boundary conditions.
- New method to correlate topographic roughness and ground cover type. We find that debris flow frequency is correlated with sediment availability, combined with connectivity of source areas to the catchment fan. Catchments with high degree of connectivity between sediment source areas and the catchment fan tend to produce debris flows exclusively.
- Geomorphological susceptibility model for torrent catchments in Austria shows plausible results for regional assessment. The connection with hydro-meteorological forcing did not yield clear results and highlights the importance of local sediment availability.

### 3 Hintergrund und Zielsetzung

(max. 2 Seiten) Beschreibung von Ausgangslage, Aufgabenstellung und Zielsetzung.

Wildbachprozesse, wie Hochwasser mit intensivem Sedimenttransport sowie Murgänge, treten typischerweise in kleinen Bergeinzugsgebieten < 20 km<sup>2</sup> auf. Insbesondere Murgänge zählen zu den gefährlichsten Prozessen in Gebirgsregionen (z.B. Fuchs et al., 2013; Dowling und Santi, 2014), da die Abflussspitzen jene von fluvialen Hochwasserereignissen um mehr als eine Größenordnung übersteigen können (Rickenmann, 1999). Für die ingenieurtechnische Gefährdungsbeurteilung ist es daher von grosser Bedeutung, die Faktoren besser zu verstehen, welche die Art, den Zeitpunkt und das Ausmass von Sintflutprozessen bestimmen (z.B. Hürlimann et al., 2008; Rickenmann, 2014). Dies gilt umso mehr, als erwartet wird, dass der Klimawandel die Häufigkeit und das Ausmass der hydro-meteorologischen Auslösebedingungen (z.B. Gobiet et al., 2014) sowie die geomorphologische Anfälligkeit für solche Prozesse erhöht, indem z. B. Sedimente aus glazialen und periglazialen Regionen bereitgestellt werden, die in der Vergangenheit nicht verfügbar waren (z. B. Stoffel et al., 2014).

Die Bewertung der Häufigkeit und des Ausmaßes fluvialer Prozesse stützt sich auf eine umfangreiche hydrologische Literatur, stellt aber für kleine Einzugsgebiete immer noch eine große Herausforderung dar, da Abflussdaten meist fehlen und Niederschläge, die auf der kleinen Skala relevant sind, von Niederschlagsstationen nur unzureichend erfasst werden. Mit zunehmendem Abfluss wird Sediment im Gerinne - sofern vorhanden - durch Erosion

transportiert und kann sich, wenn es steil genug ist, in einen Murgang verwandeln.

Die Entstehung von Murgängen ist daher das Ergebnis einer kritischen Kombination aus Wasser, ausreichend mobilisierbarem Sediment und topografischer Neigung (Rickenmann, 2016). Ansätze zur regionalen Murgangvorhersage basieren entweder auf kritischen Intensitäts-Dauerstufen (siehe Übersicht von Guzzetti et al., 2007), probabilistischen Niederschlagsanalysen (z. B. Berti et al., 2012) oder auf Bestimmung von hydrologischen Vorbedingungen (z. B. Glade et al., 2000, Prenner et al., 2018; 2019). Ein quantitatives Verständnis der geomorphologischen Randbedingungen, einschließlich der Sedimentdynamik und der kritischen Abflussbedingungen in Wildbacheinzugsgebieten in Österreich war bisher nur wenig untersucht.

Das übergeordnete Ziel des Projekts war es, die geomorphologischen Aspekte im Zusammenhang mit der Murgangaktivität in Wildbacheinzugsgebieten zu untersuchen. Die spezifischen Forschungsfragen waren:

1. Wie beeinflussen Sedimentquellen und Wiederauffüllungsraten des Gerinnesediments die Art, das Ausmaß und die Häufigkeit von Wildbachprozessen? (WP1 - Lokale Sedimentdynamik)
2. Wie sind die Abflussbedingungen im Gerinne am Übergang vom Geschiebetransport zur Murgangbildung? (WP2 - Kritischer Gerinneabfluss)
3. Können Einzugsgebiete mit unbegrenzter, begrenzter und unzureichender Sedimentverfügbarkeit auf regionaler Ebene anhand topographischer, lithologischer und klimatischer Merkmale identifiziert werden? (WP3 - Regionale Sedimentverfügbarkeit)
4. Welche geomorphologischen Variablen müssen einbezogen werden, um ein hydro-meteorologisches Suszeptibilitätsmodell zu verbessern? (WP4 - Suszeptibilität)

## 4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

(max. 20 Seiten)

Darstellung des Projektes, der Ziele und der im Rahmen des Projektes durchgeführten Aktivitäten. Darstellung der wesentlichen Arbeitspakete und Aktivitäten. Präsentation der Projektergebnisse.

### **WP1**

Während der Projektlaufzeit zeigten drei Einzugsgebiete Murgangaktivität: Hopfgartnergraben, Loechertroggraben und Lattenbach. Für diese Einzugsgebiete wurden detaillierte Informationen über die Standorte und Abschätzungen der Quellvolumina für Murgänge sowie für die Gerinneverfüllung abgeleitet.

Im Hopfgartnergraben verändern sich die Quellgebiete für Sedimenttransportprozesse über lange Zeiträume, wobei die meisten dieser Gebiete heute nicht mehr aktiv sind. Die aktuellen Quellgebiete befinden sich im Mittellauf des Hauptgerinne, in dem auch die UAV-Untersuchungen durchgeführt wurden. Die Analyse aller sechs verfügbaren DoDs während des Projektzeitraums lässt den Schluss zu, dass das Sediment für die Murganginitiation in erheblichem Maße aus dem Gerinnebett erodiert wird. Zwischen den Murgängen wird das Sediment dem Gerinne durch Erosion der Böschung und der kanalnahen Hänge zugeführt. Es hat sich gezeigt, dass sich Niederschlagsereignisse, die Murgänge ausgelöst haben, statistisch nicht von Niederschlagsereignissen unterscheiden, die keine Murgänge ausgelöst haben. Zusammen mit den Ergebnissen des Sedimentmonitorings kommen wir zum Schluss, dass der Hopfgartnergraben ein Beispiel für ein sedimentlimitiertes Einzugsgebiet ist.

Der Löchertroggraben ist ein Einzugsgebiet an der Stirnseite des Haupttals. Die Drohnen-, ALS- und TLS-Daten deuten darauf hin, dass die wichtigsten Sedimentquellen für Murgänge ein Erdrutschkomplex im oberen Teil des Löchertroggraben-Einzugsgebiets ist. In Abbildung 1 ist exemplarisch ein Langzeitvergleich zwischen 2009 und 2021 zu sehen. Die roten Bereiche stellen erodiertes Material dar, während die blauen Bereiche akkumuliertes Material darstellen. Interessanterweise folgt die Abgrenzung der Erosion im oberen Teil des Beckens in jedem Vergleichszeitraum durchgängig demselben Muster. Dies ermöglicht die Abgrenzung des Bereichs, der ständiger Bewegung ausgesetzt ist, von dem stabilen Bereich. Vergleicht man den Zeitraum von 2009 bis 2015 mit dem von 2015 bis 2021, so ist nach 2015 eine stärkere Aktivität zu erkennen. Betrachtet man den Vergleich über den kurzfristigen Zeitraum, so wird deutlich, dass die Aktivität zwischen 2021.06 und 2021.07 höher ist als zwischen 2021.07 und 2021.10. Dies könnte mit der Schneeschmelze und den Niederschlagsereignissen in den frühen Sommermonaten zusammenhängen.

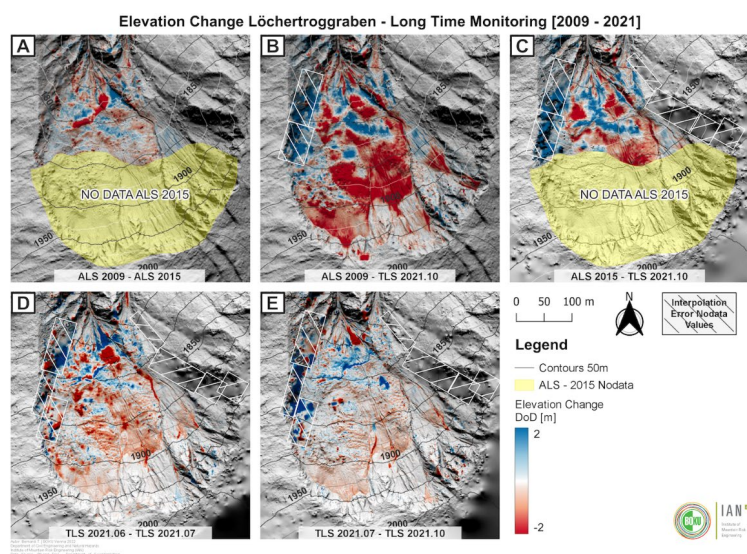


Abbildung 1: Höhenänderung im oberen Einzugsgebiet des Löchertroggrabens für verschiedene Zeiträume zwischen 2009 - 2021.10 (ALS Datenquelle: Land Tirol, Abteilung Geoinformation)

Der obere Teil des Einzugsgebietes ist derzeit relativ stabil, mit minimalen Verschiebungen in der Größenordnung von 0,25 - 0,5 m, während sich der mittlere Teil während des kurzfristigen Überwachungszeitraums zwischen Juni und Juli 2021 mit 3 - 3,5 m zunehmend hangabwärts bewegt. Eine detaillierte Untersuchung von sechs Kontrollpunkten zeigt, dass die mittlere Rutschgeschwindigkeit zwischen 2009 und 2015 bei 1,29 m/y lag, während sie sich in den nachfolgenden Perioden auf Geschwindigkeiten von bis zu 19 m/y beschleunigte, wie sie 2021 gemessen wurden. Die Messungen zeigen die Kopplung von Hang- und Gerinneprozessen und die Bedeutung dieser Kopplung für das häufige Entstehen von Murgängen. Der Loechertroggraben scheint ein Sediment-unlimitiertes Einzugsgebiet darzustellen, d.h. ein Einzugsgebiet mit hoher Sedimentverfügbarkeit, in dem der Niederschlag und Schneeschmelze eine direkte Kontrolle für die Wildbachaktivität darstellt.

Für das Einzugsgebiet des Lattenbachs finden wir insgesamt vier große aktive Rutschungskörper im Hauptstamm des Baches sowie einen am Zusammenfluss mit dem Radunbach (Abbildung 2). Rutschung 1, die größte der Massenbewegungen, hatte eine variable Tiefe von 35 m bis 50 m, die kleineren Rutschungen 2-5 Tiefen zwischen 10 m und 25 m. Die durchschnittlichen Bewegungsraten zeigen eine ziemlich konstante Bewegung für Rutschung 1 und 2, während die kleineren 3-5 sich variabler verhielten. Die jährlich in das Gerinne eingebrachten Sedimentmengen schwankten zwischen 1.230 m<sup>3</sup> für Rutschung 4 und 18.834 m<sup>3</sup> für Rutschung 1. Insgesamt errechneten wir einen jährlichen Sedimenteintrag von 18.122 m<sup>3</sup> zwischen 2006 und 2016. Nach einer Beschleunigung der Rutschungen 3 bis 5 stieg der Sedimenteintrag zwischen 2016 und 2019 auf 29.022 m<sup>3</sup> pro Jahr. Ab 2019 beschleunigte sich der Rutschkörper 1 und trug allein 18.834 m<sup>3</sup> bei, Rutschung 3 verlangsamte sich leicht und lieferte 4.788 m<sup>3</sup>.

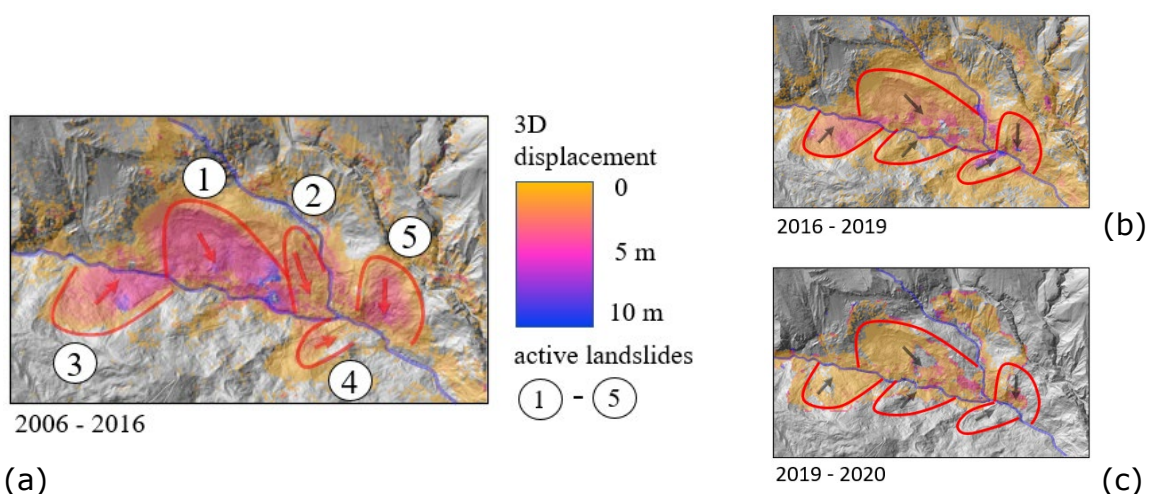


Abbildung 2: Überblick der Rutschungen im Lattenbach Einzugsgebiet in den Zeiträumen 2006 und 2016 (a), 2016 und 2019 (b), sowie 2019 und 2021 (c).

Zwischen 2005 und 2020 registrierte die vom Institut für Alpine Naturgefahren (BOKU Universität) betriebene Messstation 16 Murgänge, d.h. durchschnittlich ein Ereignis pro Jahr. Zwischen 2011 und 2014 wurden keine Murgänge



registriert. Das größte Ereignis ereignete sich im Jahr 2016 mit einem Gesamtvolumen von 46.080 m<sup>3</sup>. Über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg schätzen wir das Gesamtvolumen der Murgänge auf 225.683 m<sup>3</sup>, mit einem Durchschnitt von 15.712 m<sup>3</sup> pro Jahr. Aus dem Vergleich mit unseren Fernerkundungsergebnissen schließen wir, dass die in das Gerinne eingebrachten Sedimentmengen in der gleichen Größenordnung liegen wie das Volumen der jährlichen Murgänge. Wir müssen jedoch berücksichtigen, dass wir die Menge an Schwebstoffen und Geschiebe, die aus dem Einzugsgebiet exportiert wird, wenn keine Murgänge auftreten, nicht bewertet haben. Darüber hinaus gibt es erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der tatsächlichen Tiefe der tiefsitzenden Rutschungen.

Die detaillierte Analyse der Erosions- und Ablagerungsmuster anhand der UAV-Daten zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein von tiefsitzenden Rutschungen und einer verstärkten Materialverlagerung (beispielhaft für 2021 in Abbildung 3). Insbesondere in den Abschnitten des Gerinnes entlang der Rutschungen 1 und 2 wurde eine erhebliche Erosion beobachtet. In Zeiten, in denen keine Ereignisse auftreten, wird das Gerinne durch Erosion der Böschung (d. h. des Fußes der tiefsitzenden Rutschungen) wieder aufgefüllt. Aufgrund der Bewegungsgeschwindigkeit der tiefsitzenden Rutschungen bewegt sich die Böschung ständig in Richtung des Gerinnes.

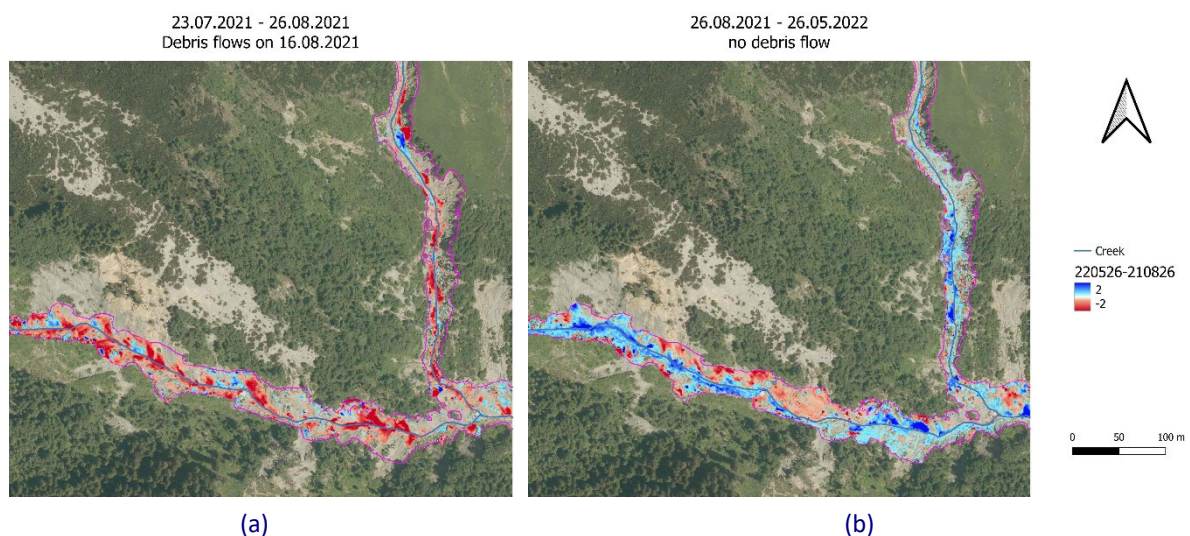


Abbildung 3: (a) Beispiel für die beobachtete Sedimenterosion im Zuge eines Murenabgangs am 16. August 2021 und (b) die Gerinneauffüllung im Zeitraum August 2021 bis Mai 2022 am Lattenbach, Österreich.

Während des gesamten Projektzeitraums haben wir keine eindeutige einzelne Sedimentquelle gefunden, die für das Auftreten der Murgänge verantwortlich sein könnte. Dies führt uns zu der Schlussfolgerung, dass der Mechanismus für die Auslösung von Murgängen eher eine kontinuierliche Erosion entlang des Gerinnes ist. Eine detaillierte Analyse der hydro-meteorologischen Auslösebedingungen wird in WP2 gegeben.

## WP2

Für jedes der drei Untersuchungseinzugsgebiete stimmten die hydrologischen Modelle weitgehend mit den verfügbaren Beobachtungsdaten überein. Wir zeigen hier exemplarisch die Ergebnisse für den Loechertroggraben in Abbildung 4. Während die beobachteten Abflüsse an den Einzugsgebietsausläufen mit Nash-Sutcliffe-Effizienzen von  $E_{NS} \sim 0,77 - 0,88$  reproduziert wurden, konnten die Abflüsse mit  $R^2 \sim 0,50 - 0,75$  und Varianz-Effizienzen  $E_{var} \sim 0,84 - 0,93$  nachgebildet werden. In allen Einzugsgebieten erfassten die Modelle die Dynamik der Schneeakkumulation und -schmelze sehr gut, mit Effizienzen zur Reproduktion der Dynamik der Schneefallgrenze  $E_{LSE} \sim 0,89 - 0,94$  (ein Wert von 1 bedeutet eine perfekte Anpassung).

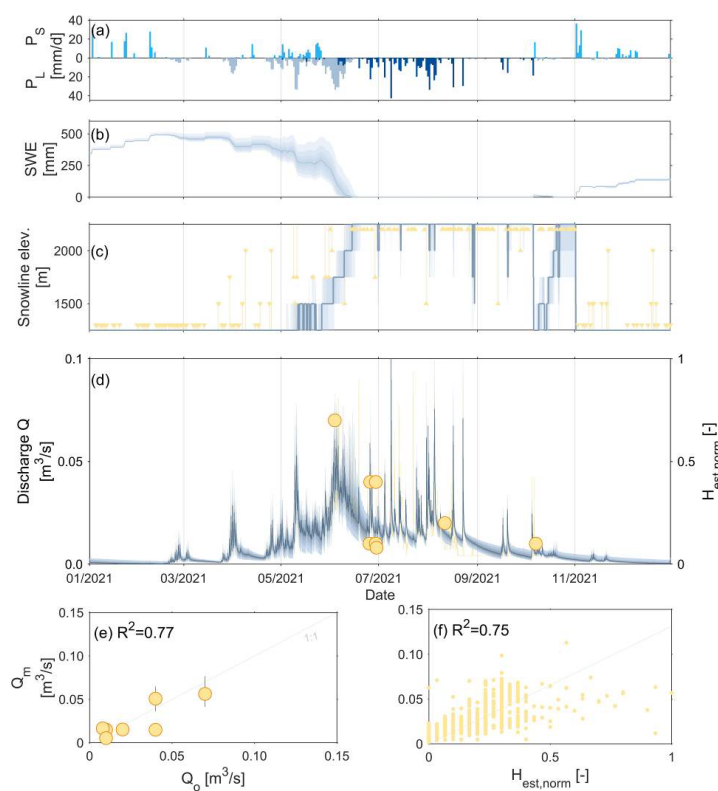


Abbildung 4: Modellkalibrierung am Ausgang des Einzugsgebiets des Loechertroggrabens. (a) Modellierter Schneefall  $P_S$  und Flüssigwassereintrag  $P_L = P_R + P_M$ , (b) modelliertes aggregiertes Schneewasseräquivalent (SWE) im Einzugsgebiet, (c) modellierte Höhe der Schneefallgrenze (blau) und Höhe der Schneefallgrenze aus der MODIS-Schneedecke (gelb), wobei die Fehlerbalken die niedrigsten und höchsten nicht wolkenbedeckten Höhen angeben, was darauf hinweist, dass die Schneelinienhöhe dazwischen liegen muss, (d) modellierter stündlicher Abfluss  $Q$  (blau), in-situ gemessener  $Q_o$  (gelbe Kreise), kameragestützte Abflussschätzungen (gelbe Linie), (e) beobachteter Abfluss  $Q_o$  vs. modellierter Abfluss  $Q_m$ , (f) beobachtete Wasserstandsschätzungen  $H_{est}$  vs. modellierter Abfluss  $Q_m$ . Die blauen Linien zeigen die wahrscheinlichste Modellausgabe an, die blau schraffierten Bereiche zeigen das 5/95ste Modellintervall an.

Es ist zu beobachten, dass die Schneeschmelze in den drei Einzugsgebieten im Zeitraum Mai bis Juni anhaltend hohe Abflüsse verursacht. Später im Jahr

auftretende Sommerregenereignisse verursachen jedoch die höchsten jährlichen Abflussspitzen. Letztere übersteigen die Spitzen der Schneeschmelze systematisch um einen Faktor  $>2$ . Es ist festzustellen, dass Regen-auf-Schnee-Ereignisse selten sind und keine große Rolle bei der hydrologischen Reaktion spielen. Die aus der obigen Kalibrierung gewonnenen Modellparameter wurden anschließend verwendet, um das Modell für den Zeitraum 2005-2022 für jedes Einzugsgebiet laufen zu lassen. Die modellierte hydrologische Reaktion ermöglichte dann die Abschätzung des kritischen Abflusses  $Q_{crit}$ , der einen Murgang auslöst, an oder in der Nähe der aktivsten Quellgebiete. Wir zeigen hier beispielhaft die Ergebnisse für den Hopfgartnergraben (Abbildung 5).

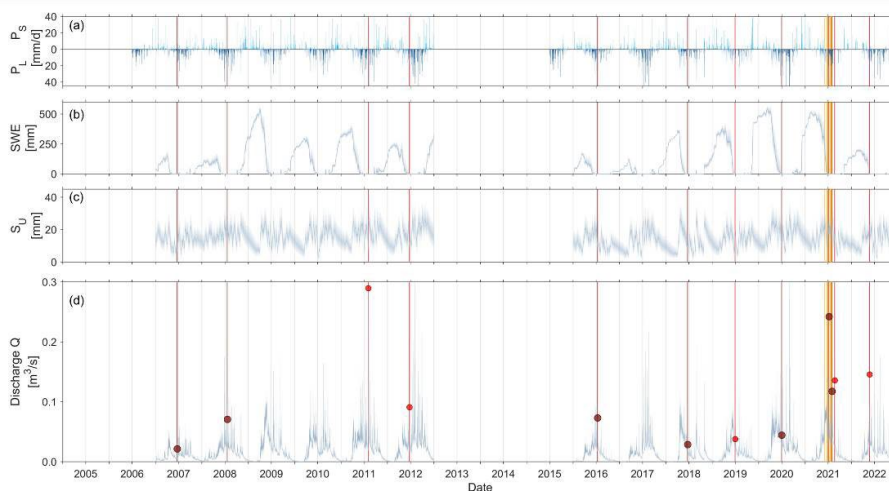


Abbildung 5: Modellierte Zeitreihen für den Zeitraum 2007 - 2022 mit verfügbaren Murgangdaten für den Abfluss im Einzugsgebiet des Hopfbachgrabens. (a) Modellierter Schneefall  $P_S$  und Flüssigwassereintrag  $P_L = P_R + P_M$ , (b) modelliertes aggregiertes Schneewasseräquivalent (SWE) des Einzugsgebietes, (c) modellierter Wassergehalt in der ungesättigten Wurzelzone, (d) modellierter stündlicher Abfluss  $Q$ . Blaue Linien zeigen den wahrscheinlichsten Modelloutput, die blau schattierten Bereiche zeigen das 5/95. Die Kreissymbole geben den auslösenden Abfluss  $Q_{crit}$  für die beobachteten Murgänge an. Die roten Linien markieren die Tage des Auftretens von Murgängen. Die helleren Rottöne entsprechen kleineren Murgängen, die dunkleren Rottöne größeren Murgängen, wobei es sich um eine rein indikative Unterscheidung handelt, die auf den verfügbaren Informationen beruht. Die gelben Linien zeigen das Auftreten von erhöhtem Sedimenttransport an, der sich nicht zu Murgängen entwickelte (nur im Jahr 2021 verfügbar und nicht für weitere quantitative Analysen verwendet).

Insgesamt wurde festgestellt, dass Murgänge tatsächlich zeitlich mit erhöhtem Abfluss- $Q$  zusammenfallen und dass ihr Auftreten mit sehr wenigen Ausnahmen auf den Zeitraum von Juni bis September beschränkt ist (Abbildung 6), also lang nach dem Ende der Schneeschmelze für den gesamten Untersuchungszeitraum und alle Einzugsgebiete, wie die detaillierten Ergebnisse für 2021 zeigen.

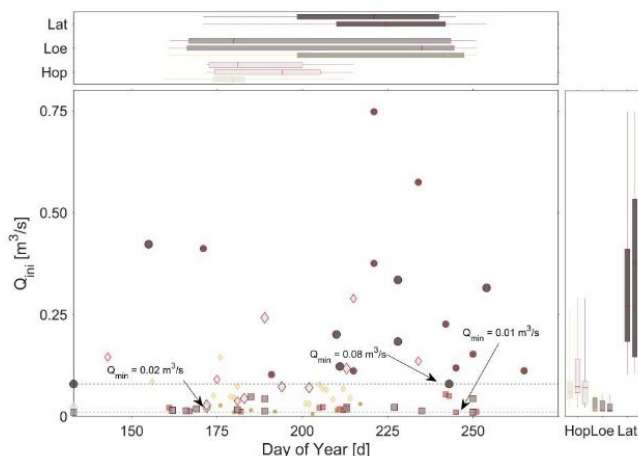


Abbildung 6: Tag des Jahres des Auftretens von Muren im Vergleich zum modellierten auslösenden Fluss  $Q_{crit}$  für die Einzugsgebiete Hopfbachgraben (hellgraue Rautensymbole), Loechertroggraben (graue quadratische Symbole) und Lattenbach (dunkelgraue Kreissymbole). Die Umrissfarben der Symbole stehen für die geschätzte Größe der Murgangereignisse, wobei hellrot für kleine und dunkelrot für größere Ereignisse steht. Gelb steht für erhöhten Sedimenttransport, aber kein Murgangereignis. Die grauen gestrichelten Linien zeigen den minimalen Murgang auslösenden  $Q_{crit}$  in jedem Einzugsgebiet. Die vertikalen Boxplots auf der rechten Seite zeigen die Verteilungen von  $Q_{crit}$  für die drei Einzugsgebiete, aufgeteilt in die indikativen Größenklassen von erhöhtem Sedimenttransport (gelbe Umrandung), kleinen Murgängen (rote Umrandung) und großen Murgängen (dunkelrote Umrandung)

Weiter wurde festgestellt, dass Murgänge in den untersuchten Einzugsgebieten durch relativ klar definierte kritische Abflüsse  $Q_{crit}$  ausgelöst wurden. Im Einzugsgebiet des Hopfgartnergrabens wurden keine Murgänge unterhalb von  $Q_{crit} = 0,02 \text{ m}^3/\text{s}$  beobachtet, was dem 70. Perzentil der Abflüsse entspricht, und die Mehrheit der 6 Murgänge wurde durch  $Q_{crit} > \sim 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$  (99. Perzentil) ausgelöst. Ähnliche Größenordnungen für auslösende Flüsse wurden im Einzugsgebiet des Loechertroggrabens beobachtet, wo kein Murgang unter  $Q_{crit} = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  (90. Perzentil) auftrat und 10 von 24 Murgängen durch  $Q_{crit} > 0,02 \text{ m}^3/\text{s}$  (99. Perzentil) ausgelöst wurden. Im Gegensatz dazu wurden die 17 Murgänge im Einzugsgebiet des Lattenbachs durch deutlich höhere Abflussgrößen ausgelöst, die jedoch ähnlichen auslösenden Abflussperzentilen entsprechen wie in den beiden anderen Einzugsgebieten. Die niedrigsten Abflüsse, die Murgänge auslösten, wurden auf  $Q_{crit} = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$  (90. Perzentil) geschätzt, während die Mehrzahl der 11 Murgänge bei Abflüssen oberhalb des 99. Perzentils mit  $Q_{crit} > 0,15 \text{ m}^3/\text{s}$  auftraten.

### WP3

Die Ergebnisse der Kalibrierung des Rauigkeitsmodells zur Vorhersage der Sedimentbedeckung zeigen, dass das einfachste Modell, das nur die mittlere Rauigkeit verwendet, am besten abschneidet und im Kalibrierungseinzugsgebiet des Kitzlesbachs mit einer Genauigkeit von 88,6 % nackte Felsoberflächen von sedimentbedeckten Oberflächen unterscheidet (Abbildung 7). Auch bei der Verifizierung schnitt das Modell gut ab, z.B. mit einer Genauigkeit von 82,6 % im

Einzugsgebiet des Lussbachs. Um die Leistung des Modells auf breiterer Basis zu bewerten, haben wir es anhand von Felddaten in einer Reihe von Einzugsgebieten im nördlichen Pitztal getestet und dabei eine höhere Fehlerquote bei der Vorhersage der Sedimentbedeckung als bei der Vorhersage des Untergrunds festgestellt. Dies könnte auf die Unterpopulation der als Festgestein kartierten Flächen zurückzuführen sein, die eine dünne Bodenbedeckung aufweisen, die die topografische Rauheit verringert. Die meisten Gebiete, an denen das Modell ungenaue Vorhersagen macht, entsprechen den Grenzen zwischen kartierten Einheiten, wo das Fenster zur Berechnung der Rauheit (Breite  $W = 31$  m) Teile von zwei oder mehr Einheiten einschließt.

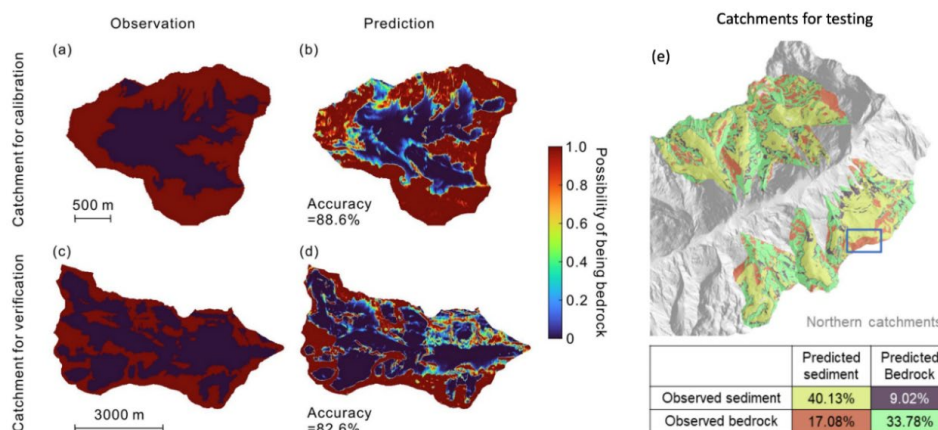


Abbildung 7: Ergebnisse des logistischen Regressionsmodells unter Verwendung der Oberflächenrauigkeit zur Unterscheidung zwischen Grundgestein und Sedimentboden. (a, b) Kitzelesbach: Einzugsgebiet für die Kalibrierung, (c, d) Lussbach: Beispiel für ein Verifikationseinzugsgebiet. (a, c) kartierte Bodenbedeckung, (b, d) vom Modell vorhergesagte Bodenbedeckung. (e) Die zum Testen verwendeten Einzugsgebiete des nördlichen Pitztals zeigen eine Gesamtmodellgenauigkeit von 74 %.

Die Ergebnisse unserer Einzugsgebietsanalyse zeigen, dass die Häufigkeit von Murgängen mit der Verfügbarkeit von Sedimenten in Verbindung mit der Anbindung der Quellgebiete an den Einzugsgebietsfächer korreliert ist. Im Pitztal wurden zwischen 1950 und 2020 107 schadensträchtige Wildbachereignisse registriert, von denen neun fluviale Hochwasser waren, der Rest waren Murgänge (Abbildung 8a). In zwanzig Einzugsgebieten kam es ausschließlich zu Murgängen, in neun Einzugsgebieten gab es mindestens ein schadhaftes Hochwasserereignis, und in elf Einzugsgebieten gab es in den 70 Jahren keinerlei schadhafte Ereignisse. Um die Möglichkeit zu berücksichtigen, dass größere Einzugsgebiete mit einem größeren Quellgebiet häufigere Ereignisse hervorrufen können, haben wir die Ereignishäufigkeit als die Anzahl der dokumentierten Ereignisse pro Einzugsgebietseinheit (Ereignisse/km<sup>2</sup>) beschrieben. Wir haben die Häufigkeit von Ereignissen mit dem Grad der Konnektivität des Einzugsgebiets verglichen, der durch das begrenzte mittlere Gefälle quantifiziert wird, das einer Konnektivität von 50 % zwischen den mit Sedimenten bedeckten Quellgebieten und dem Einzugsgebietsfächer entspricht. Dieser Grenzwert für das mittlere Gefälle schwankt in den 40 untersuchten Einzugsgebieten zwischen weniger als 12 Grad und 40 Grad und ist ein zuverlässiger Prädiktor für die Häufigkeit von

Ereignissen, der fast drei Größenordnungen der Ereignishäufigkeit abdeckt (Abbildung 8c).

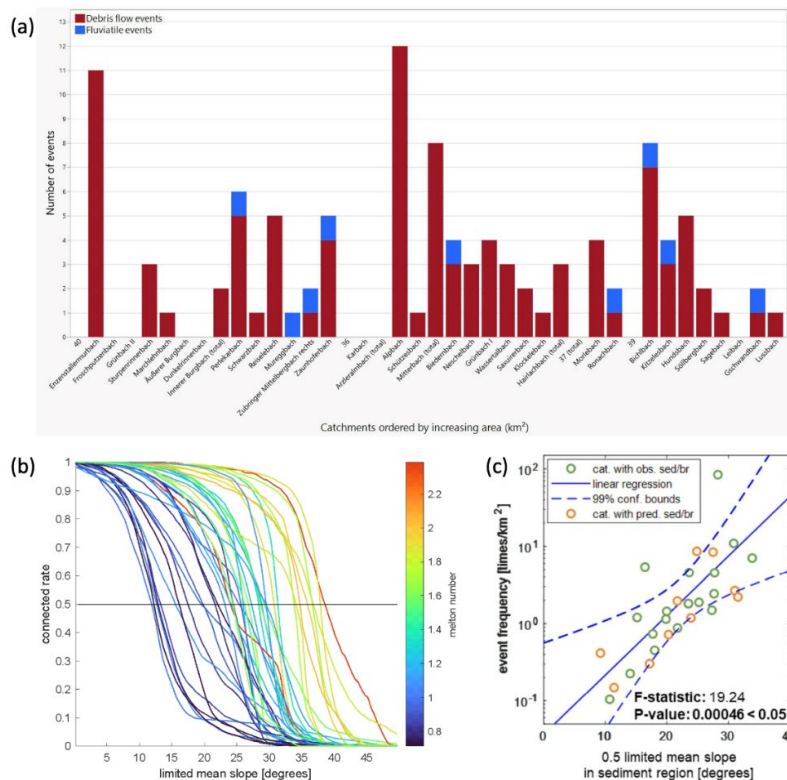


Abbildung 8: (a) Wildbachereignisse zwischen 1950 und 2020 für 40 Einzugsgebiete im Pitztal; (b) Konnektivität der untersuchten Einzugsgebiete, quantifiziert durch das begrenzende mittlere Gefälle, das zu einer 50%igen Konnektivität der mit Sediment bedeckten Quellgebiete führt. Die Farbschattierung zeigt die Meltonzahl des Einzugsgebiets an (das Verhältnis des Einzugsgebietsreliefs zur Quadratwurzel des Einzugsgebiets), ein Maß für die Steilheit des Einzugsgebiets, das nachweislich mit der Anfälligkeit für Murgänge korreliert. (c) Die Häufigkeit von Murgängen pro Flächeneinheit (Ereignisse/km<sup>2</sup>) korreliert stark mit dem Grad der Vernetzung der Sedimentgebiete.

Die Analyse der Konnektivität von Einzugsgebieten hilft auch bei der Erklärung des Auftretens von Einzugsgebieten, die sowohl Murgänge als auch schädliche Hochwasserereignisse verursachen. Einzugsgebiete mit einem hohen Grad an Konnektivität zwischen den Sedimentquellgebieten und dem Schwemmkegel neigen dazu, ausschließlich Murgänge zu produzieren. Das Auftreten von fluvialem Hochwasser wird durch geringere Vernetzungsgrade begünstigt, was darauf hindeutet, dass Murgänge bei diesen Ereignissen zwar ausgelöst werden, aber in Ablagerungsgebieten mit niedrigem Gefälle abgelagert. Ein Schlüsselfaktor, der die Konnektivität der Einzugsgebiete erklärt, sind Hinweise auf eine axiale Talvergletscherung in den Einzugsgebieten der Nebenflüsse während des Pleistozäns. Durch die glaziale Auskolkung von Seitentälern wird ein Raum geschaffen, der sich während der langfristigen, vorübergehenden Reaktion auf die Vergletscherung allmählich mit Ablagerungen von Murgängen füllt. Beweise für die Vergletscherung axialer Seitentäler werden nur in

Einzugsgebieten mit großen Einzugsgebieten beobachtet. Dies hilft, die weit verbreitete Korrelation zwischen dem Auftreten von Murgängen und der Meltonzahl in de-glazialen alpinen Landschaften zu erklären, wo das Relief des Einzugsgebiets (der Zähler der Meltonzahl) viel weniger variiert als die Quadratwurzel der Einzugsgebietsfläche (der Nenner). Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass die Quantifizierung der Konnektivität von Einzugsgebieten und des Ausmaßes der Sedimentbedeckung eine präzisere Charakterisierung der Murgang-Suszeptibilität ermöglichen kann, insbesondere auf der subregionalen Ebene von Haupttälern wie dem Pitztal.

#### **WP4**

Auf der Grundlage der Resultate von WP2 haben wir geprüft, ob die Topographie, Bodenbedeckung oder andere geomorphologische Faktoren eine Rolle spielen. Es zeigt sich, dass, obwohl  $Q_{crit}$  in jedem Untersuchungseinzugsgebiet ziemlich eng auf die höchsten Perzentile des Abflusses begrenzt ist, es deutliche Unterschiede zwischen den drei Einzugsgebieten bei den auslösenden Abflussgrößen gibt. Insbesondere werden Murgänge durch Abflüsse ausgelöst, die mit einem mittleren  $Q_{crit} = 0,02$  und  $0,08$  m<sup>3</sup>/s im Hopfgartnergraben und im Loechertroggraben um Faktoren zwischen 2,5 und 10 niedriger sind als im Einzugsgebiet des Lattenbachs (mittlerer  $Q_{crit} = 0,20$  m<sup>3</sup>/s). Die Ergebnisse deuten außerdem auf einen möglichen Zusammenhang zwischen  $Q_{crit}$  und der mittleren Höhe des Sedimentquellgebietes hin, wobei hier angenommen wird, dass sich dieser auf die vegetationslosen Bereiche des Einzugsgebietes beschränkt. Obwohl die Muster weniger stark ausgeprägt sind, zeigen die Ergebnisse auch, dass das mittlere Gefälle im Erosionsbereich des Lattenbachs mit  $I = 0,69$  deutlich geringer ist als in den beiden anderen Einzugsgebieten ( $I = 0,84$  und  $1,07$ ). Das geringere Gefälle im Lattenbach ist eine plausible mechanistische Erklärung dafür, warum in diesem Einzugsgebiet höhere  $Q_{crit}$  erforderlich sind, um Murgänge auszulösen. Das geringere Gefälle führt wahrscheinlich zu niedrigeren Fließgeschwindigkeiten und damit zu einer geringeren Remobilisierung und Transportkapazität. Es sind jedoch weitere Daten erforderlich, um diese Hypothese zu untermauern.

Aus diesem Grund haben wir uns auf das Potenzial des kritischen Abflusses als Prädiktor für die Auslösung von Murgängen konzentriert. Es zeigt sich, dass die Quantifizierung des auslösenden Abflusses  $Q_{crit}$  eine wertvolle Ergänzung zur Erweiterung der üblicherweise verwendeten kritischen Niederschläge für Murgangvorhersagen darstellt. Während ausschließlich niederschlagsbasierte Schwellenwerte definiert werden können, sind diese typischerweise durch eine ziemlich hohe Falsch-Positiv-Rate von  $FPR \sim 10 - 20\%$  gekennzeichnet (Abbildung 9 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für den Hopfgartnergraben). Mit anderen Worten: Diese Schwellenwerte führen zu vielen Fehlalarmen bei Murgängen. Alternativ dazu hat sich die Verwendung des Abfluss- $Q_{crit}$  für die

Definition von Schwellenwerten als sehr wertvoll erwiesen, um diese false-positives auf  $\sim 1 - 10 \%$  bei gleicher true-positives Rate zu reduzieren.

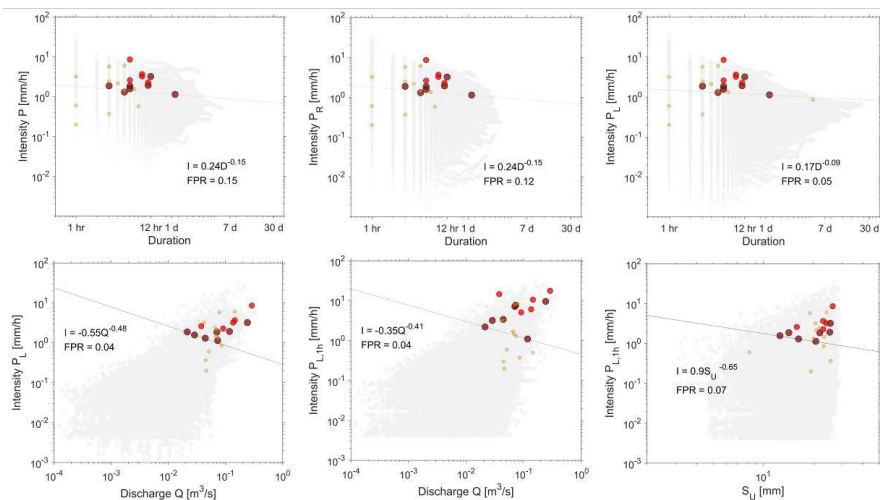


Abbildung 9: Intensitäts-Dauer-Kurven (obere Reihe) und Intensitäts-Abfluss- und Wurzelzonenfeuchte-Kurven (untere Reihe) für das Einzugsgebiet des Hopfgartnergrabens. Die roten Kreise stellen Murgänge dar, indikativ kategorisiert nach Größenordnung (hellrot: klein, dunkelrot: groß), die gelben Kreise zeigen zur Veranschaulichung erhöhten Sedimenttransport, die hellgrauen Punkte stellen alle Tage im Zeitraum 2007-2022 mit verfügbaren Murgangdaten dar. Die grauen Linien geben den Schwellenwert für die beste Anpassung an, der die Fläche unter der Kurve (AUC) maximiert, wenn die Falsch-Positiv-Raten (FPR) gegen die Wahr-Positiv-Raten (TPR) aufgetragen werden.

Die geomorphologische Suszeptibilitätskarte für alle österreichischen Wildbacheinzugsgebiete, die auf einer ersten Auswahl von vier Einzugsgebietsmetriken (maximale Höhe, mittleres Gefälle, Melton-Verhältnis und dem Höhenunterschied) basiert, ist in Abbildung 10 dargestellt. Es ist ein deutliches Ost-West-Gefälle in Bezug auf die Anfälligkeitsklasse zu erkennen. Der Trend, dass Murenabgänge im steileren zentralen Teil der Alpen wahrscheinlicher sind als im Osten Österreichs, gibt Vertrauen in das abgeleitete Modell.

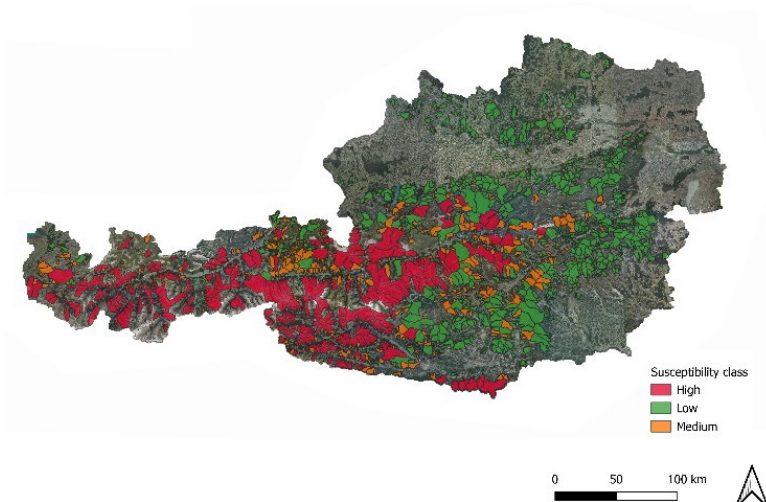


Abbildung 10: Karte der Einzugsgebiete mit den Anfälligkeitsklassen niedrig, mittel und hoch sind in grün, orange bzw. rot dargestellt. Für jedes Einzugsgebiet wurde die Anfälligkeitsklasse mit dem höchsten Zugehörigkeitsgrad angegeben.



Ein Vergleich der auslösenden Niederschläge für Murgangereignisse in den verschiedenen Einzugsgebietstypen zeigt keinen statistisch signifikanten Unterschied für Einzugsgebiete mit geringer, mittlerer oder hoher geomorphologischer Anfälligkeit auf nationaler Ebene. Wir führen dies auf die Bedeutung der Sedimentverfügbarkeit und der Sedimentproduktion zurück, die in WP1 identifiziert wurden und die für jedes Einzugsgebiet sehr spezifisch sein können. In Verbindung mit der im Projekt Deucalion 2 durchgeführten regionalen Analyse der hydro-meteorologischen Auslösebedingungen lassen sich jedoch die wahrscheinlichsten Einzugsgebiete für die Auslösung von Murgängen identifizieren. Aufgrund des modularen Aufbaus des Modells können weitere Änderungen leicht vorgenommen werden.

## 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

(max. 5 Seiten)

Beschreibung der wesentlichen Projektergebnisse. Welche Schlussfolgerungen können daraus abgeleitet werden, welche Empfehlungen können gegeben werden?

### **Sedimentdynamik in Wildbacheinzugsgebieten**

Das Projekt hat gezeigt, dass alle in den überwachten Einzugsgebieten auftretenden Murgänge durch fortschreitende Gerinneerosion und nicht durch einzelne Rutschungen ausgelöst wurden, was die Bedeutung des Auslösemechanismus "Erosion", aber auch die Bedeutung der Gerinne-Auffüllung unterstreicht. Es scheint, dass die Häufigkeit von Murgängen in einem bestimmten Einzugsgebiet stark von geomorphologischen Prozessen gesteuert wird, die Material für die Auslösung von Murgängen liefern. Die Untersuchungsgebiete Loechertroggraben und Lattenbach sind Einzugsgebiete, in denen aktive Rutschungen und reichlich Sediment für die Auslösung von Murgängen sorgen, wobei der Loechertroggraben ein extremes Beispiel ist, in dem Murgänge schon bei geringen Niederschlagsmengen auftreten. Im Hopfgartnergraben hingegen gibt es keine Hangrutschungen, und die Wiederauffüllung des Gerinnes wird hauptsächlich durch Erosion der Gerinneböschung und wahrscheinlich durch physikalische Verwitterung gesteuert. Der Zeitraum für die Wiederauffüllung ist länger als im Lattenbach und im Loechertroggraben, daher kann nicht jedes intensive Regenereignis einen Murgang auslösen. Für alle untersuchten Standorte finden wir keine Hinweise auf eine einzelne, eindeutige Rutschungsauslösung, die das Material dann als Murgang durch das Gerinnesystem transportiert. Im Gegenteil, für alle Bäche finden wir Hinweise auf die Erosion im Gerinne als Hauptauslösemechanismus. Die Erosion und Auffüllung des Gerinnes, die auslösenden Regenfälle und die Ereignisaktivität unterscheiden sich jedoch in den einzelnen Bächen erheblich, so dass sich ein Bild von sedimentbegrenzten und sedimentunbegrenzten Bedingungen ergibt.

## **Kritischer Abfluss**

Wir haben festgestellt, dass jedes der drei untersuchten Einzugsgebiete relativ klar definierte kritische Abflüsse, bei denen Murgänge auftreten, aufweist. Abflussspitzen, die durch kurzzeitige, intensive Niederschlagsereignisse verursacht werden, dominieren die Auslösedynamik von Murgängen an den Untersuchungsstandorten. Darüber hinaus wurden mehrere Fälle beobachtet, in denen Murgänge durch Abflussspitzen ähnlicher Größenordnung ausgelöst wurden, die jedoch durch intensive Schneeschmelze in Kombination mit Schneeregen erzeugt wurden, was die Bedeutung der Quantifizierung der Dynamik des Wassereintrags als Systeminput, der ursächlich zum Auftreten von Murgängen führt, unterstreicht. Es zeigte sich, dass die modellierten Abflussgrößen im Gerinne gute Prädiktoren für Murgänge sind.

Wir kommen zu dem Schluss, dass Murgänge im Wesentlichen Gerinne-basierte Prozesse sind und der Niederschlag als indirekter Prädiktor verstanden werden muss. Daher ist es nicht überraschend, dass der Niederschlag allein keine eindeutige Vorhersagekraft hat. Die Sedimentzufuhr und die Größe des Abflusses im Gerinne als die wichtigsten direkten Einflussfaktoren für das Auftreten von Murgängen. Da beide nur schwer zu beobachten sind, wurden sie bisher nicht systematisch und vollständig ausgewertet und quantitativ beschrieben, um ihre Rolle als Auslöser von Murgängen zu ermitteln.

## **Morphologie des Einzugsgebiets**

Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Quantifizierung der Konnektivität von Einzugsgebieten und des Ausmaßes der Sedimentbedeckung eine genauere Charakterisierung der Murgang-Suszeptibilität ermöglichen kann, insbesondere auf der subregionalen Ebene von Haupttälern wie dem Pitztal. Es wird erwartet, dass die Analyse von Rauheits-Metriken ein leistungsfähiges Instrument für die regionale Gefahrenabschätzung sein wird, da hochauflösende topografische Daten immer mehr verfügbar werden und die Rechenleistung kein allzu großer limitierender Faktor mehr ist.

## **Geomorphologische Anfälligkeit für Murgänge**

Es gibt keinen offensichtlichen Zusammenhang zwischen den durchschnittlichen kritischen Abflussgrößen und dem Gerinnegefälle im Erosionsbereich, Vegetationsbedeckung, Bodentyp oder Geologie an unseren Untersuchungsstandorten. Das entwickelte Suszeptibilitätsmodell für Wildbacheinzugsgebiete zeigt eine hohe Erfolgsquote auf der Grundlage von nur vier statischen Einzugsgebietsmorphometrien. Wir finden kein klares Signal für unterschiedliche kritische Niederschläge für die aktuelle Klassifizierung der Einzugsgebietsanfälligkeit. Der modulare Aufbau des Python-basierten Modells ermöglicht jedoch eine einfache Änderung der Klassifizierungsparameter, was für zukünftige Verbesserungen des Modells vielversprechend ist.

Künftige Studien sollten weiter detailliertes Monitoring der Sedimentdynamik in Wildbacheinzugsgebieten umfassen. Von besonderem Interesse sind dabei

Langzeitdaten über die Wechselwirkung zwischen Hang und Gerinne sowie über die Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit tiefliegender Rutschungen von meteorologischen Einflüssen. Parallel dazu sollten unsere neuen Methoden zur Klassifizierung der Oberflächenrauigkeit und der Massenflusskonnektivität weiterentwickelt werden, um im Idealfall eine Reihe von einfachen Metriken abzuleiten, die die Sedimentverfügbarkeit und das Potenzial der Sedimentproduktion in Wildbacheinzugsgebieten beschreiben. Mit Hilfe solcher Metriken soll ein geomorphologisches Anfälligkeitsmodell, wie es in diesem Projekt für österreichische Einzugsgebiete entwickelt wurde, klarere Ergebnisse liefern. In WP2 haben wir dies auf lokaler Ebene für drei verschiedene Einzugsgebiete ausprobiert. Wir identifizierten den Gerinneabfluss als den eigentlichen Auslösemechanismus für Murgänge und quantifizierten die Größenordnung. In einem nächsten Schritt sollten unsere Erkenntnisse über den Bereich des kritischen Abflusses für Wildbacheinzugsgebiete auf die regionale Skala übertragen und mit den Ergebnissen für die fortgeschrittene geomorphologische Bewertung der Sedimentdynamik gepaart werden.

## C) Projektdetails

### 6 Methodik

(max. 10 Seiten)

Begründung und Darstellung des gewählten Forschungsansatzes.

Die Bewertung der zeitlichen Variation der Sedimentspeicherung im Gerinne (WP1) sowie die Bewertung der kritischen Abflussbedingungen (WP2) wurden auf lokaler Ebene durchgeführt. Für WP3 und WP4 haben wir Untersuchungen auf der regionalen Skala durchgeführt. Wir konzentrierten uns auf die untersuchten Regionen des DEUCALION II Projekts (ACRP 7. Ausschreibung). Zusätzlich nutzten wir die bestehende Infrastruktur des Instituts für Alpine Naturgefahren an der Universität für Bodenkultur Wien (IAN-BOKU) im Einzugsgebiet des Lattenbachs.

#### WP1

In einem ersten Schritt wurden die vielversprechendsten Wildbacheinzugsgebiete in den Regionen Pitztal, Montafon und Defereggental identifiziert, die während der Projektlaufzeit überwacht werden sollen. Erste Erhebungen wurden am Perlekarbach (Pitztal), an der Reisselehnerinne (Pitztal), am Wassertalbach (Pitztal), an den Gargellen (Montafon), im Vensertobel (Montafon), am Mellitzbach (Defereggental), am Loechertroggraben (Defereggental), am Hopfgartnergraben (Defereggental), am Gadriabach (Vinschgau) sowie am Glatzbach (Kals) und Lattenbach (Landeck/Pians) durchgeführt.

Nach dem ersten Projektjahr zeigten die periodischen Feldbegehungen, dass die meisten Aktivitäten und sogar Murenabgänge in den Einzugsgebieten Hopfgartnergraben, Loechertroggraben und Lattenbach auftraten, auf die sich das Projekt in der Folge konzentrierte. Die Einzugsgebiete des Perlekarbachs, des Wassertalbachs, des Glatzbachs und des Mellitzbachs wurden zeitweise in die Feldarbeit einbezogen, wobei jedoch keine für das Projekt relevanten Aktivitäten festgestellt wurden.

Einzugsgebiet	# UAV Flüge / TLS	# Muren
Hopfgartnergraben (Defereggental)	7	4
Loechertroggraben (Defereggental)	4 / 3	13
Mellitzbach (Defereggental)	3	0
Lattenbach (Landeck)	10 / 2	5
Perlekarbach, Wassertalbach, Reisselehnerinne, unnamed gullies (Pitztal)	$\sum$ 10	0
Gargellen, Vensertobel (Montafon)	$\sum$ 2	0

Für die lokale Fernerkundung wurden eine DJI MAVIC 2 PRO Drohne und eine DJI PHANTOM 4 RTK-Drohne eingesetzt. Die Luftbilder wurden mit dem Softwaretool AgiSoft verarbeitet, um digitale Höhenmodelle (DEM) mit der Structure-from-Motion-Technik abzuleiten. Zur Optimierung der Datenverarbeitung wurde ein Arbeitsablauf entwickelt. Statistisch signifikante Änderungen wurden mit dem M3C2-Algorithmus der Software CloudCompare ermittelt. Da die RTK-Korrektur der Koordinaten von Drohnenbildern die Genauigkeit der Photogrammetri-ergebnisse erheblich verbessert und die Nachbearbeitung beschleunigt, verwendeten wir vorzugsweise das DJI PHANTOM 4 RTK und verarbeiteten RTK- und Nicht-RTK-Flüge gleichzeitig. Der Level of Detection (LoD) wurde durch den Vergleich von Bereichen der zu verschiedenen Zeitschritten abgeleiteten DEMs ermittelt, die mit Sicherheit nicht von Veränderungen betroffen waren. Ein LoD zwischen 4 cm (RTK-Daten) und 50 cm (nicht-RTK-Daten) wurde für die Standorte abgeleitet, die einen beträchtlichen Anteil an stabilen Flächen für den DEM-Abgleich aufwiesen (z. B. Hopfgartnergraben) und/oder bei denen Flüge mit der RTK-Drohne durchgeführt wurden.

Zusätzlich wurde der Einsatz eines terrestrischen Laserscanners (TLS, RIEGL VZ-4000) zur Überwachung der Rutschungsdynamik im Loechertroggraben und Lattenbach getestet. Ermöglicht wurde dies durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Geologie (BOKU). Die Genauigkeit der abgeleiteten Punktwolken ermöglichte die Ableitung von hochauflösenden 0,5 x 0,5 m Raster-DEMs für verschiedene Zeitpunkte. Die LoD war während des gesamten Beobachtungszeitraums ziemlich konstant und lag zwischen 2 und 7 cm für die TLS-Messungen und 4 und 10 cm für die ALS-Messungen.

## WP2

Für die Beurteilung der kritischen Abflussbedingungen zum Zeitpunkt der Entstehung von Muren wurde ein prozessbasiertes hydrologisches Modell für die Einzugsgebiete Hopfgartnergraben (Hop), Loechertroggraben (Loe) und Lattenbach (Lat) entwickelt (Abbildung 11). Das Modell stellt die 4 großen Landschaftsklassen als parallele Einheiten dar, die jeweils 4 oder 5 Speicherkomponenten enthalten, die den Schnee ( $S_{\text{snow}}$ ), die Interzeption durch das Kronendach ( $S_I$ ), die ungesättigte Wurzelzone ( $S_U$ ), das oberflächennahe Bodenwasser ( $S_F$ ) und das Grundwasser ( $S_S$ ) repräsentieren und mit Flüssen verbunden sind. Die Abflüsse aus jeder Landschaftsklasse werden entsprechend den Flächenanteilen dieser Landschaftsklasse in jedem Höhenband gewichtet und dann zum Gesamtabfluss  $Q_{\text{TOT}}$  aggregiert. Niederschlag ( $P$ ) gelangt je nach Schwellentemperatur ( $T_T$ ) entweder als Schnee  $P_S$  in  $S_{\text{snow}}$  oder als Regen  $P_R$  in  $S_I$  in das System. Die Schneeschmelze  $PM$  wird entsprechend einem Schmelzfaktor ( $F_M$ ) von  $S_{\text{snow}}$  abgegeben. Wasser, das die Interzeptionskapazität  $I_{\text{max}}$  in  $S_I$  überschreitet, gelangt als effektiver Niederschlag  $PE$  in den Boden. Der gesamte flüssige Wassereintrag  $PL = PE + PM$

gelangt dann in den Boden. Abhängig von der Speicherkapazität in der Wurzelzone ( $S_{u,max}$ ) und dem nichtlinearen Parameter  $\gamma$  wird PL dann entweder in SU gespeichert oder direkt zur Anreicherung des Grundwassers SS als RS oder in den direkt abfließenden Boden als RF abgegeben. Das Wasser wird dann in Form von QS und QF aus den jeweiligen Speichern abgegeben, entsprechend den Rückflusskoeffizienten  $k_S$  und  $k_F$ . Die Verdunstung EI erfolgt mit potenziellen Raten aus SI und die Transpiration ET aus SU, je nach dem Wasserstresskoeffizienten  $L_p$  der Vegetation. Die Flüsse sind in  $[mm\ h^{-1}]$  angegeben, die Wasserspeicherung in  $[mm]$ . Die Symbole in roter Schrift stehen für die Parameter der Modellkalibrierung. Diese Modellstruktur wurde weiter in 250-m-Höhenbänder diskretisiert und mit dieser Auflösung ausgeführt.

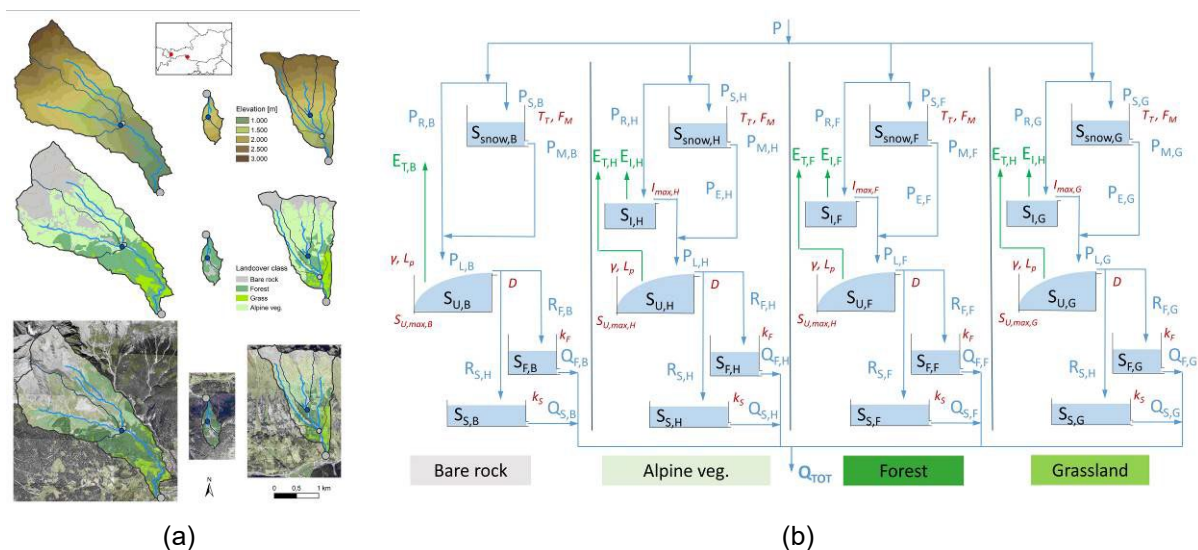


Abbildung 11: (a) Höhenlage (obere Reihe), Bodenbedeckung (mittlere Reihe) und Orthofotos (untere Reihe) der drei Untersuchungseinzugsgebiete Hopfbachgraben (linke Spalte), Loechertroggraben (mittlere Spalte) und Lattenbach (rechte Spalte). Der große graue Kreis kennzeichnet den Auslass jedes Untersuchungseinzugsgebiets, an dem Abflüsse und Wasserstände beobachtet wurden und für den das Modell kalibriert wurde. Die blauen Kreise zeigen die Position unmittelbar flussabwärts der häufigsten Murgangauslöser an, die dunkelblaue Linie stellt das dem Auslöser entsprechende Beitragsgebiet dar. Dieses Gebiet wird zur Berechnung des Murgang auslösenden Abflusses  $Q_{crit}$  verwendet. (b) Die Struktur des halbverteilten, prozessbasierten hydrologischen Modells (detaillierte Erklärung siehe Text).

Das Modell wurde auf einer stündlichen Zeitskala mit Niederschlags- und Temperaturdaten ausgeführt, die für das Einzugsgebiet aus INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) abgeleitet wurden. Die Kalibrierung des Modells erfolgte auf der Grundlage einer multikriteriellen Kalibrierungsstrategie unter Verwendung von stündlichen Wasserstands- und Abflussschätzungen an den Ausläufen des Einzugsgebiets, die während des Projektzeitraums abgeleitet wurden, sowie von täglichen Schneedeckendaten aus dem 500m x 500m MODIS Terra Snow Cover Satellitenprodukt (MOD10A1). Für die Abflussschätzungen wurden automatische Kameras an verschiedenen Stellen der Bäche angebracht. Während der Feldarbeit wurden die

Querschnittsgeometrie und die Fließgeschwindigkeit manuell mit einem Durchflussmesser und einem Handradar gemessen.

Das hydrologische Modell wurde anschließend verwendet, um (1) die kritischen Abflussgrößen im Gerinne zu quantifizieren, die Murgänge ausgelöst haben, und um (2) die relative Bedeutung der Schneeschmelze im Vergleich zu den Niederschlägen für die Entstehung von Murgängen zu ermitteln.

### WP3

Um die Sedimentverfügbarkeit für Muren zu bestimmen, quantifizierten wir das Ausmaß der Sedimentbedeckung durch die Digitalisierung geologischer Karten und entwickelten eine neue Methode, die auf der Korrelation zwischen der topografischen Rauheit und der Art der Bodenbedeckung beruht (Abbildung 12). Wir konzentrierten uns auf 23 Einzugsgebiete im Pitztal. Die Feldbegehungen dienten zur Überprüfung der kartierten Einheiten und der Korngrößenverteilung an der Oberfläche sowie für Drohnenflüge zur Entwicklung hochauflösender topografischer Daten. Durch GIS-Analysen wurden Schwemmkegel im Untersuchungsgebiet abgegrenzt und die topographischen Kenngrößen ermittelt. Wir klassifizierten die Gesteinsarten auf der Grundlage mineralogischer Faktoren, die die Bildung von Tonmineralien bei der Verwitterung begünstigen oder hemmen.

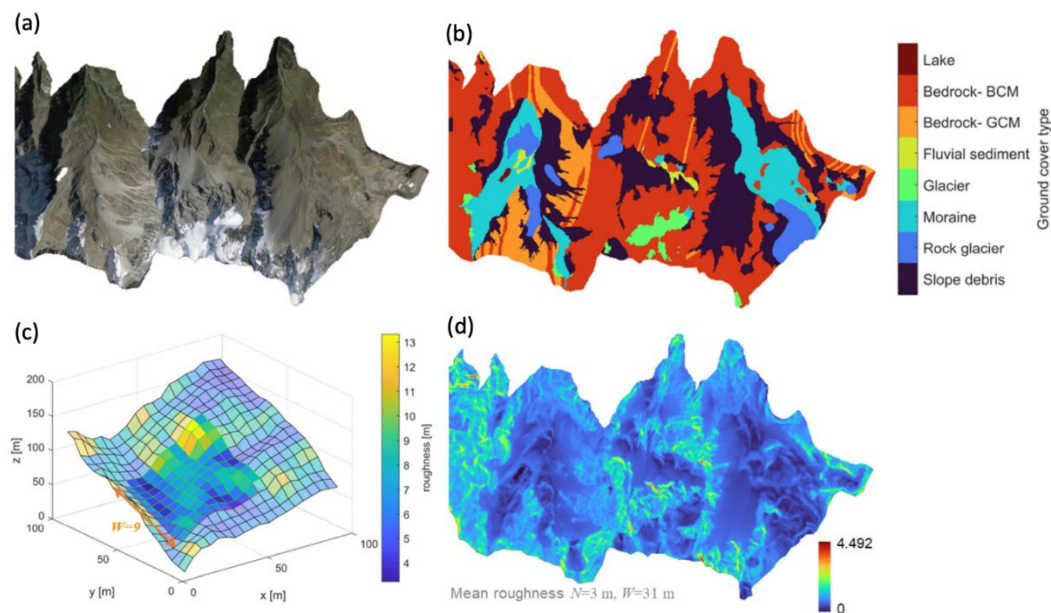


Abbildung 12: (a) Satellitenbild untersuchter Einzugsgebiete; (b) kartierte Bodenbedeckungstypen; (c) lokale Rauigkeit wird aus der Standardabweichung der Höhe innerhalb eines lokalen Fensters der Größe  $N$  berechnet; die mittlere Rauigkeit wird durch Mittelung der lokalen Rauigkeit über ein bewegliches Fenster der Größe  $W$  berechnet. (d) Mittlere Rauigkeit der Bodenoberfläche, berechnet aus einem von einem 1-m-Lidar abgeleiteten digitalen Höhenmodell.

Das Modell für die Oberflächenrauigkeit basiert auf einer logistischen Regression. Wir testeten die Leistung des Modells unter Verwendung der mittleren Rauheit zusammen mit erweiterten Rauheitsmetriken, wobei wir uns zunächst auf die Unterscheidung zwischen Sedimentbedeckung jeglicher Art und Grundgestein jeglicher Zusammensetzung konzentrierten. Zu den weiteren Rauheitsmetriken gehörten die Entropie, die die Zufälligkeit der Rauheitsverteilung quantifiziert, und die Korrelation, die lineare Gradienten in der Rauheit identifiziert. Wir verwendeten auch Modelle des maschinellen Lernens und convolutional neural networks, um die Rauheitsanalyse zu erweitern und zwischen verschiedenen Arten der Sedimentbodenbedeckung und der Zusammensetzung des Felsens zu unterscheiden. Für diese Analyse wurde ein größerer Satz von erklärenden Variablen verwendet, darunter Spektraldaten aus Satellitenbildern und zusätzliche topografische Metriken wie Neigung, lokales Relief und Krümmung. In der Untersuchungsregion wurden mit Hilfe eines geschichteten Zufallsalgorithmus drei Datensätze erzeugt, die für das Training, die Validierung bzw. den Test des Modells verwendet wurden.

Neben der Quantifizierung der Sedimentverfügbarkeit wurde auch der Grad der Konnektivität potenzieller Murgangquellen mit dem Einzugsgebiet bewertet. Die Konnektivität wurde auf der Grundlage der Annahme quantifiziert, dass Murgänge an Stellen zur Ruhe kommen, an denen die mittlere Steigung entlang des Fließweges zurück zum Quellort kleiner ist als der innere Reibungswinkel (Abbildung 13). Wenn auf dem Fließweg von einem bestimmten Quellort zum Einzugsgebläse keine solchen Stellen angetroffen werden, wird die Quelle als mit dem Schwemmkegel verbunden betrachtet. Anstatt einen festen Wert für den inneren Reibungswinkel anzunehmen, berechneten das mittlere Grenzgefälle, das eine Ablagerung Bach-aufwärts des Schwemmkegels verursachen würde. Für den Vergleich von Einzugsgebieten haben wir das mittlere Grenzgefälle verwendet, das einem Anschlussgrad von 50 % für das gesamte Einzugsgebiet und für die mit Sediment und Festgestein bedeckten Teile separat entspricht.



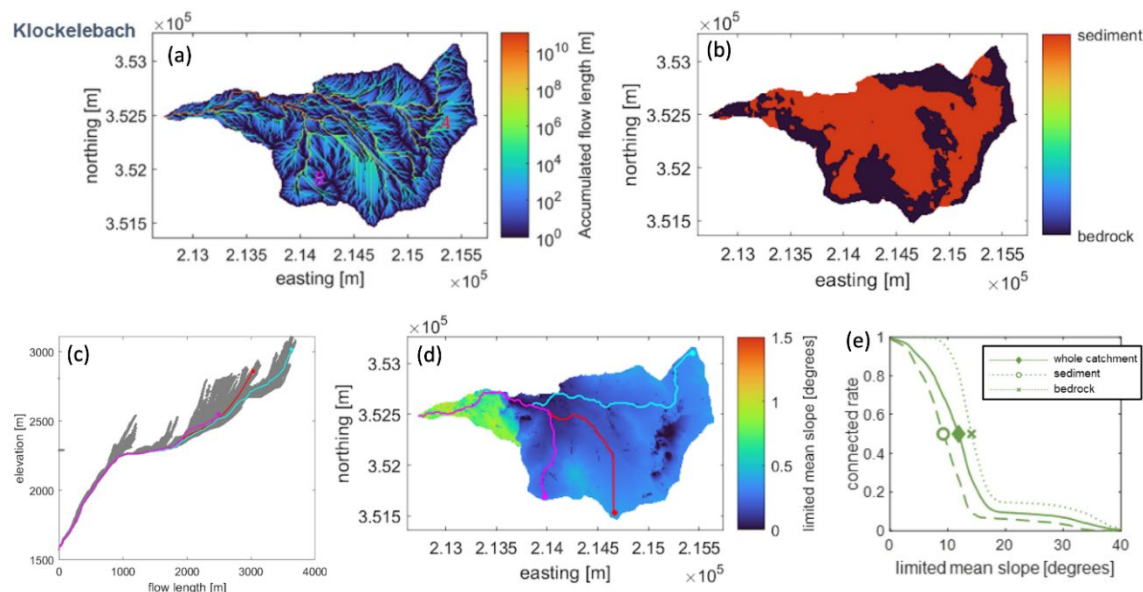


Abbildung 13: Analyse der Konnektivität im Einzugsgebiet des Klockelebachs. (a) Fließwege von allen potenziellen Quellgebieten, berechnet entlang der Linien des steilsten Gefälles (b) Bodenbedeckung, unterteilt in zwei Klassen: Sedimentablagerungen (hauptsächlich Moränen und Hangschutt) und blanker Fels. (c) Fließwegprofile von jedem Quellgebiet zum Schwemmkegel, drei Beispielprofile hervorgehoben. (d) Karte des mittleren Grenzneigungswinkels ( $\times 10$ ) für jedes potenzielle Quellgebiet, wobei drei Beispielprofile hervorgehoben sind. (e) Kumulative Verteilungsfunktion der Konnektivität als Funktion des mittleren Grenzgefälles. Die Kurven zeigen, dass mit Sediment bedeckte Quellgebiete bei einem gegebenen inneren Reibungswinkel eher vom Fächer getrennt werden als Quellgebiete aus Felsgestein.

## WP4

Das in WP2 entwickelte hydrologische Modell wurde anschließend verwendet, um (1) festzustellen, ob charakteristische Größen als Funktion von Landschaftseigenschaften wie Topographie, Landbedeckung und anderen zugrundeliegenden Faktoren gefunden werden können, und um (2) zu testen, ob der modellierte kritische Gerinneabfluss eine höhere Vorhersagekraft für Murgänge hat als einfache Grenzniederschläge.

Zusätzlich wurde ein geomorphologisches Suszeptibilitätsmodell zur Bestimmung der Murganggefährdung von Wildbacheinzugsgebieten in den österreichischen Alpen entwickelt. Das Modell stellt eine Weiterentwicklung eines von Berenguer et al. (2015) entwickelten Ansatzes dar. Es wurde in Python kodiert und kann aufgrund des modularen Aufbaus leicht für jeden zusätzlichen Parametersatz modifiziert werden. Als Grundlage wurden einfache morphometrische Einzugsgebietsparameter aus topographischen Daten abgeleitet, getrennt für Einzugsgebiete, in denen Murgangprozesse in der Vergangenheit dokumentiert wurden, und für Einzugsgebiete, in denen nur fluviale Aktivitäten stattfanden. Dabei wurde auf die große Ereignisdatenbank der österreichischen Behörden zurückgegriffen. Für jeden der Parameter wurden Dichtefunktionen berechnet

und daraus lineare Zugehörigkeitsfunktionen ermittelt, die eine Einteilung in "niedrig", "mittel" und "hoch" für jedes Wildbacheinzugsgebiet ermöglichen. Für die Modellkalibrierung werden 20 % (618 Wildbacheinzugsgebiete) der aus der Ereignisdatenbank extrahierten Daten verwendet, während die restlichen 80 % (2468 Wildbacheinzugsgebiete) für die Bewertung der Genauigkeit der Klassifizierung reserviert sind.

## 7 Arbeits- und Zeitplan

(max. 1 Seite)

Kurze Übersichtsdarstellung des Arbeits- und Zeitplans (keine Details).

Die Projektlaufzeit waren 36 (+12) Monate (01.12.2019 – 30.11.2023).

In der ersten Phase des Projekts war der Fokus auf Feldarbeiten gerichtet, um die nötigen Daten zu sammeln. Die Arbeiten während der zweiten Phase des Projektes inkludierten neben der Weiterführung der Feldarbeiten die Entwicklung des hydrologischen und geomorphologischen Modells, sowie der Methodikentwicklung für die Rauigkeits- und Konnektivitätsanalysen. Die kostenneutrale Verlängerung des Projekts wurde mit Verzögerungen aufgrund der COVID-19 Pandemie begründet.

## 8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Tabellarische Angabe von wissenschaftlichen Publikationen, die aus dem Projekt entstanden sind, sowie sonstiger relevanter Disseminierungsaktivitäten.

### Peer-reviewed Artikel (\*\*SCI-Journal)

Mariacher, F., Klisch, A., Kaitna, R. (accepted): Hazard susceptibility assessment of debris-flow processes for Alpine catchments in Austria. Proceedings of the Interpraevent 2024 Conference, Vienna, Austria.

Kaitna, R., Prenner, D., Switanek, M., Stoffel, M., Maraun, D., Hrachowitz, M. (2023): Impact of climate change on hydro-meteorological trigger conditions for debris flows in Austria. In M. Pirulli, A. Leonardi, F. Vagnon (eds.): Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Monitoring, Modeling, and Assessment. Proceedings of the eighth international conference on debris-flow hazards mitigation, Torino, Italy, June 26-29, 2023.

Aigner, P., Kuschel, E., Sklar, L., Zangerl, Ch., Hrachowitz, M., de Haas, T., Hübl, J., Kaitna, R. (2023): Debris-flow activity and sediment dynamics in the landslide-influenced Lattenbach catchment, Austria. In M. Pirulli, A. Leonardi, F. Vagnon (eds.): Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Monitoring, Modeling, and Assessment. Proceedings of the Eighth International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, Torino, Italy, June 26-29, 2023.

- \*\*Kaitna, R., Prenner, D., Switanek, M., Maraun, D., Stoffel, M., Hrachowitz, M. (2023): Changes of hydro-meteorological trigger conditions for debris flows in a future Alpine climate. *Science of the Total Environment*, 872, 162227, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162227.
- \*\*Hanus, S., Hrachowitz, M., Zekollari, H., Schoups, G., Vizcaino, M., and Kaitna, R. (2021): Timing and magnitude of future annual runoff extremes in contrasting Alpine catchments in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences* 24/6, 3429-3453, doi: 10.5194/hess-25-3429-2021.
- Kaitna, R. (2022): Einfluss des Klimawandels auf Wildbacheinzugsgebiete mit speziellem Fokus auf Muren. *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz [Journal for Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall]* 86/190, pp. 50-56.
- \*\*Hübl, J. and Kaitna, R. (2021): Monitoring of debris flow surges and triggering rainfall at the Lattenbach creek, Austria. *Environmental and Engineering Geoscience* 27/2, 213-220, doi: 10.2113/EEG-D-20-00010.
- Aigner, P. and Kaitna, R. (2020): Klimafonds Projekt Deucalion III. *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz [Journal for Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall]* 84/186, pp. 218-219.
- Kaitna, R., Prenner, D., and Hübl, J. (2020): Muren. In: Glade, T., Mergili, M., Sattler, K. (eds.), *ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*, pp. 489-510; Vienna University Press; Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Wien; Göttingen; ISBN 978-3-7370-1092-4.
- Kaitna, R., Prenner, D., Braun, M., and Hrachowitz, M. (2019): Hydro-meteorological trigger conditions of debris flows in Austria. In J.W. Kean, J.A. Coe, P.M. Santi, B.K. Guillen (eds.): *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Monitoring, Modeling, and Assessment. Proceedings of the seventh international conference on debris-flow hazards mitigation, Golden, Colorado, USA, June 10-13, 2019*, pp. 732-740.

### Konferenzbeiträge

- Chen, T.Z., Kaitna, R., Sklar, L. (accepted): Assessing Debris Flow Susceptibility in Deglaciated Alpine Catchments: A Novel Approach Integrating Flow-path Connectivity and Sediment Availability. *EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14-19 Apr 2024, EGU24-6819*
- Ponds M., Kaitna, R., Hrachowitz, M. (accepted): The effects of future climate-induced adaptation of the root-zone storage capacity on modeled streamflow dynamics, *EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14-19 Apr 2024, EGU24-528*
- Hrachowitz, M., Sklar, L., Kaitna, R. (accepted): Critical channel flow as direct trigger of debris flows in mountainous terrain. *EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14-19 Apr 2024, EGU24-7378*
- Chen, T.Y., Sklar, L., Kaitna, R., Pilkington, B. (2023): Automatic Identification of Sediment from Bedrock for Debris Flow Hazard Assessments using Terrain Surface Roughness Textures. *AGU Fall Meeting, EP51D-1645*.
- Kaitna, R., Aigner, P., Bernardi, T., Wagner, P., Kuschel, E., Zangerl, C., Hrachowitz, M., Sklar, L. (2023): Sediment dynamics related to the triggering of debris flows in different alpine watersheds. *EGU General Assembly 2023*,

- Vienna, Austria, 23–28 Apr 2023, EGU23-8751, doi: 10.5194/egusphere-egu23-8751.
- Kaitna, R. (2022): Sediment dynamics in alpine watersheds: from initiation to mitigation. 4th Japan-Austria Sediment Disaster Risk Management Technical Conference, 28.06.2022, online.
- Aigner, P., Kuschel, E., Zangerl, C., Hübl, J., Hrachowitz, M., Sklar, L., and Kaitna, R. (2021): Multi-sensor approach towards understanding debris-flow activity in the Lattenbach catchment, Austria, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15399, doi: 10.5194/egusphere-egu21-15399.
- Hanus, S., Zekollari, H., Schoups, G., Kaitna, R., and Hrachowitz, M. (2021): Timing and magnitude of runoff in Austrian mountain catchments in a warming climate, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-2714, doi: 10.5194/egusphere-egu21-2714.
- Aigner, P., Sklar, L., Hrachowitz, M., and Kaitna, R. (2020): The importance of geomorphology for debris-flow activity in alpine catchments. AGU Fall Meeting, NH001-0011 (vPICO).
- Aigner, P., Sklar, L., Hrachowitz, M., and Kaitna, R. (2020): Why are some alpine catchments debris-flow active and others not? - the influence of geomorphology on debris-flow initiation. In: EGU General Assembly 2020 (Eds.), EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7805, doi: 10.5194/egusphere-egu2020-7805.
- Kaitna, R., Prenner, D., and Hrachowitz, M. (2019): Assessment of torrential flows in the Austrian Alps. International Mountain Conference, Innsbruck, Austria, Sept 8-12, 2019 (talk)
- Kaitna, R., Prenner, D., Switanek, M., Maraun, D., and Hrachowitz, M. (2019): Critical hydro-meteorological trigger conditions for debris flows in a changing climate. In: EGU General Assembly 2019 (Eds.), Geophysical Research Abstracts Vol. 21, EGU2019-15452 (poster).

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.