



Auswirkung des Klimawandels auf Ereignis-auslösende Niederschläge von Wildbach-Katastrophen

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

 Bundesministerium
Bildung, Wissenschaft
und Forschung



LAND
OBERÖSTERREICH



umweltbundesamt^U



Leiter:

Assoc. Prof. Roland Kaitna (roland.kaitna@boku.ac.at)

Mitarbeiter:

Dr. Matthias Schlögl (matthias.schloegl@boku.ac.at)

Manuel Leitner (manuel.leitner@students.boku.ac.at)

DI Tobias Schöffl (tobias.schoeffl@boku.ac.at)

Institut für Alpine Naturgefahren, BOKU Wien

Kooperationspartner:

Prof. Harald Rieder

Mag. Dr. Monika Mayer

Institut für Meteorologie und Klimatologie, BOKU Wien



IAN 

Institute of
Mountain Risk
Engineering



MET 

Institut für
Meteorologie und
Klimatologie

Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Kaitna, R.; Schlögl, M.; Leitner; Schöffl, T.; Mayer, M.; Rieder, H. (2023): Endbericht von StartClim2022.F in StartClim2022: Auswirkung des Klimawandels auf Ereignis-auslösende Niederschläge von Wildbach-Katastrophen, Auftraggeber: BMK, BMWFW, Klima- und Energiefonds, Land Oberösterreich.

Wien, im September 2023

StartClim2022.F

Teilprojekt von StartClim2022

Projektleitung von StartClim:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt

Institut für Meteorologie und Klimatologie, Gregor-Mendel-Straße 33, 1190 Wien

www.startclim.at

StartClim2022 wurde aus Mitteln des BMK, BMWFW, Klima- und Energiefonds und dem Land Oberösterreich gefördert.

StartClim2022.F

Inhaltsverzeichnis

F-1	Kurzfassung.....	6
F-2	Abstract.....	7
F-3	Problemstellung.....	8
F-4	Ziele und Arbeitspakete.....	10
F-5	Datenbanken - Beschreibung & Struktur.....	11
F-5.1	Wildbachkataster WLK.....	11
F-5.2	Ereignisdokumentationen (ERDOKs)	12
F-5.3	INCA Daten.....	14
F-6	Methodische Aufarbeitung & Verknüpfung der Daten	15
F-6.1	Verknüpfung der Ereignisse mit den Einzugsgebieten aus dem WLK.....	15
F-6.2	Auswertung der Ereignisdokumentationen (ERDOKs) des IAN.....	15
F-6.3	Harmonisierung der INCA Datenbank & Verknüpfung mit den Ereignissen/Einzugsgebieten.....	15
F-6.4	Bestimmung Ereignis-auslösende Niederschläge.....	16
F-6.5	Analyse der klimabedingten Änderungen Ereignis-auslösender Niederschläge	17
F-7	Resultate und Diskussion.....	18
F-7.1	Analyse der EROKs.....	18
F-7.2	Niederschlagsgrenzwerte basierend auf INCA Daten.....	19
F-7.3	Klimabedingte Änderungen der Ereignis-auslösenden Niederschläge	21
F-8	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	25
F-9	Literaturverzeichnis	26
F-10	Anhang (nur wenn nötig)	28

Abbildungsverzeichnis

Abb. F-1: Strukturierung und Vorgehensweise für die Ereignisdokumentation.....	12
Abb. F-2: Messstationen der ZAMG und HD (Haiden et al. 2011)	14
Abb. F-3: Beispiel für die manuelle Bestimmung des Ereignis-auslösenden Niederschlags.....	16
Abb. F-4: Räumliche Verteilung der Hochwasser (HW) & Murgangereignisse (M) bezogen aus den ERDOKs. Grün dargestellt sind alle Wildbacheinzugsgebiete Österreichs.....	18
Abb. F-5: Intensität-Dauer Grenzwerte basierend auf den ERDOK-Daten, denen keine homogene Datenquellen zugrunde liegt.	19
Abb. F-6: Anteil der Großwetterlagen (lt. ZAMG) in Zusammenhang mit den Wildbach-Ereignissen basierend auf den ERDOK-Daten.....	19
Abb. F-7: Normalisierter kumulativer Niederschlag für alle ausgewerteten Ereignisse des Prozesstyps "Mure" und "murartiger Feststofftransport".....	20
Abb. F-8: Intensität-Dauer Beziehung und Grenzwertkurven inklusive Konfidenzintervall basierend auf INCA 1h Stunden Daten für die Prozesstypen Hochwasser (a), fluvialer Feststofftransport (b), murartiger Feststofftransport (c) und Murgang (d).....	20
Abb. F-9: Auftretenshäufigkeit von Ereignis-auslösenden Niederschlägen, ausgedrückt in Jährlichkeiten, für vier Wildbach-Prozesstypen in Österreich. Die Werte stellen jeweils den Mittelwert der Periode 1991-2020 dar. Punkte, an denen keine solchen Niederschlagsereignisse auftreten, sind grau gekennzeichnet. Alle Jährlichkeiten ≥ 20 sind in einer Klasse zusammengefasst. Die Daten entstammen dem SPARTACUS-Datensatz (v2.1) der GeoSphere Austria. Datenquelle: GSA (Hiebl & Frei, 2016)	22
Abb. F-10: Auftretenshäufigkeit von Ereignis-auslösenden Niederschlägen, ausgedrückt in Jährlichkeiten, für fluvialen Feststofftransport in Österreich. Die vier Karten zeigen die Jährlichkeiten jeweils für den Mittelwert der Referenzperiode und der Periode 2068-2097 für drei RCPs. Dargestellt ist der Ensemble Median. Punkte, an denen keine solchen Niederschlagsereignisse auftreten, sind grau gekennzeichnet. Alle Jährlichkeiten ≥ 20 sind in einer Klasse zusammengefasst. Die Daten für beide Perioden entstammen dem ÖKS15-Ensemble, weshalb bei der Referenzperiode Unterschiede zu den in Abb. F-9 dargestellten Beobachtungsdaten auftreten. Datenquelle: ÖKS15 (Switanek et al., 2017)	23
Abb. F-11: Änderung der Flächenanteile in Österreich von Ereignis-auslösenden Niederschlägen für fluvialen Feststofftransport. Die Flächenanteile werden aus dem Anteil jener Regionen, an denen zumindest ein auslösendes Niederschlagsereignis pro Jahr vorkommt, an der Gesamtfläche Österreichs berechnet. Die Punkte zeigen dekadische Mittelwerte für den Ensemble Median des jeweiligen RCPs. Datenquelle: ÖKS15 (Switanek et al., 2017)	24

Tabellenverzeichnis

Tab. F-1: Eigenschaften von Wildbachprozessen nach ONR 24800	11
Tab. F-2: Liste der aufgearbeiteten Ereignisdokumentationen für StartClim.....	13
Tab. F-3: Anzahl der auslösenden Niederschläge nach Prozesstypen und jeweilige Intensität-Dauer Beziehung.	21
Tab. F-4: Grenzwerte für verschiedene Tagessummen auslösender Niederschlagsereignisse, berechnet aus den Intensitäts-Dauer-Beziehungen der vier Prozesstypen	21

F-1 Kurzfassung

Wildbachprozesse (Hochwasser, Geschiebetransport und Muren) stellen eine erhebliche Gefahr im Alpenraum dar. Für eine verlässliche Vorhersage von Wildbachprozessen und eine mögliche Veränderung im Zuge des Klimawandels ist die Kenntnis der Ereignis-auslösenden Niederschläge nötig. Ziel des Projekts ist es, kritische Niederschläge zu identifizieren, die Veränderung deren Eintrittswahrscheinlichkeit abzuschätzen und die Notwendigkeit von Anpassungsstrategien zu evaluieren. Dafür wurden vorhandene Daten zu Ereignis-auslösenden Niederschlägen aus detaillierten Ereignisdokumentationen zusammengeführt, um diese anschließend statistisch auszuwerten. Außerdem wurden für den Zeitraum 2003 - 2022 alle dokumentierten Wildbach-Ereignisse mit den Einzugsgebiet-gemittelten INCA-Stundenniederschlägen verschnitten und die auslösenden Niederschläge bestimmt. Aus diesen rund 3800 Niederschlägen wurden kritische Grenzbedingungen (Intensität-Dauer Beziehung) für die vier Prozesstypen Hochwasser, fluvialer Feststofftransport, murartiger Feststofftransport und Mure abgeleitet. Für alle vier Prozesstypen zeigt sich, dass sowohl die Auftretenswahrscheinlichkeit als auch die betroffenen Flächen von auslösenden Niederschlagsereignissen in Zukunft deutlich zunehmen, wobei es klare Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien (RCPs) gibt. Die Resultate des Projektes sollen eine Grundlage für eine verbesserte Ereignisprognose in einem sich ändernden Klima bilden. In einem nächsten Schritt müssen daher neben den auslösenden Niederschlägen auch andere Faktoren für Wildbach-Katastrophen wie Geländeform, Geologie und betroffene Infrastruktur berücksichtigt werden.

F-2 Abstract

Torrential processes (floods, bedload transport and debris flows) represent a severe hazard in the Alpine region. For a reliable prediction of torrential processes and a potential change in the course of climate change, the knowledge of event-triggering rainfall is necessary. The aim of the project is to identify critical rainfall events, to estimate the change in their probability of occurrence and to evaluate the need for adaptation strategies. For this purpose, existing data on event-triggering rainfall from detailed event documentation were compiled for subsequent statistical evaluation. In addition, for the period 2003 - 2022, all documented torrential events were intersected with catchment-averaged INCA hourly precipitation and triggering precipitation was determined. From these approximately 3800 precipitation events, critical boundary conditions (intensity-duration relationship) were derived for the four process types: flood, fluvial sediment transport, debris flood, and debris flow. For all four process types, it is shown that both the probability of occurrence and the areas affected by triggering precipitation events increase significantly in the future, with clear differences between the emission scenarios (RCPs). The results of the project should provide a basis for improved event forecasting in a changing climate. In a next step, therefore, other factors for torrential disasters such as terrain, geology and affected infrastructure have to be considered in addition to triggering precipitation.

F-3 Problemstellung

Muren, Hochwasser und Geschiebetransport sind meteorologisch ausgelöste, natürliche Abtragungsprozesse in alpinen Wildbacheinzugsgebieten. Für besiedelten Raum, stellen solche Prozesse eine erhebliche Naturgefahr dar. Der Umgang mit alpinen Naturgefahren hat daher im österreichischen Alpenraum eine lange Tradition und es steht eine breite Palette an Schutzmaßnahmen zur Verfügung. Im Fall von extremen Niederschlagsereignissen können sich Muren und intensiver Geschiebetransport zu Naturkatastrophen entwickeln, die zu einem hohen Schaden und auch Verlust an menschlichem Leben führen kann und bei der die lokalen Bewältigungsmöglichkeiten nicht ausreichen.

Die Auslöser dieser Wildbachprozesse sind vor allem intensive Gewitterregen von kurzer Dauer, in geringerem Ausmaß langanhaltende Tiefdruck-Niederschläge (Prenner et al., 2019). In manchen Fällen spielt auch Schneeschmelze eine zusätzliche Rolle (Mostbauer et al., 2018). Eine quantitative Information von Wildbachprozess-auslösenden Niederschlägen für Österreich ist für viele Ereignisse auf einer groben zeitlichen und räumlichen Skala verfügbar und für wenige extreme Einzelereignisse auf einer höher-aufgelösten Skala verfügbar (Ereignisdokumentationen des Instituts für Alpine Naturgefahren).

Im Zuge des Klimawandels es zu erwarten, dass es in Österreich zu räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Temperaturen und der Verteilung des Niederschlags kommen (APCC, 2014; Gobiet et al., 2014). Abgesehen von den geomorphologischen Auswirkungen (z.B. Veränderung der Sedimentverfügbarkeit), ist anzunehmen, dass die Häufigkeit von Niederschlägen, die Wildbachgefahrenprozesse auslösen, sich verändert. Es ist bisher unbekannt, wie sich die Frequenz von Ereignis-auslösenden Niederschläge in Österreich in einem wärmeren Klima verändern könnte (Schlögl et al., 2021). Diese Information, wenn auch Szenarien abhängig, wäre ein wichtiger Beitrag für die Ausarbeitung von Anpassungsstrategien.

Wildbäche sind durch ihr steiles Längsgefälle und eine starke Variation der Abflusswerte charakterisiert. Kommt es zu einem kurzzeitigen anschwellen des Baches, so kann es zur Erosion und einer Mobilisierung von Feststoffen im Wildbacheinzugsgebiet kommen. (ONR-24800, 2009) Hierbei wird aufgrund der Feststoffkonzentration zwischen verschiedenen Wildbachprozessen, Hochwasser, (intensiver) fluviatiler Feststofftransport, murartiger Feststofftransport sowie Murgang unterschieden. Die mitgeführten Feststoffe werden bei der Verflachung des Längsgefälles im Unterlauf am sogenannten Schwemmkegel abgelagert. Da der Ablagerungsbereich zumeist durch Siedlungen oder Infrastruktur besetzt ist, kann es im Ereignisfall zu großen Schäden kommen. Für ein funktionierendes Schutzkonzept ist es wichtig zu wissen welche Verlagerungsprozesse im Einzugsgebiet auftreten können. Infolge dessen können effektive Maßnahmen zum Schutz von Siedlungsräumen sowie Infrastruktur getroffen werden (Bergmeister, 2009)

In den Arbeiten von Prenner et al. (2018, 2019) wurde untersucht, wie welche hydro-meteorologischen Auslösebedingungen zur Wildbachereignissen führen. Dabei werden die Auslösebedingungen in „langanhaltenden Niederschlag“ (LLR), „kurz andauernde Stürme“ (SDS) sowie „Schneeschmelze“ (SM) kategorisiert. Kaitna et al. (2023) analysierte, wie diese hydro-meteorologische Auslösebedingungen sich für Murgänge durch den Klimawandel ändern. Es zeigt sich, dass sich die Anzahl der Murgangereignisse auf Jahres-Basis etwa gleichbleiben wird, die Wahrscheinlichkeiten allerdings saisonal und regional sich verändern.

In den letzten 20+ Jahren wurden in vielen Regionen Europas Grenzwert-Kurven zu Rutschungs- und Muren-auslösenden Niederschlägen ausgewertet (Guzzetti et al., 2007; 2008). Für Österreich hat es solche Auswertungen im Bereich Wildbachgefahren erst vereinzelt bei Ereignisdokumentation gegeben (z.B. Moser und Hohensinn, 1983), bzw. systematisch nur auf Tagesbasis (Braun & Kaitna, 2016). Eine Abschätzung der Veränderungen der Auftretenswahrscheinlichkeiten von Ereignis-auslösenden Niederschlägen ist dadurch bisher nicht möglich gewesen.

Aufgrund der hohen Anzahl von fluviatilen und murartigen Ereignissen im österreichischen Alpenraum, sowie einer guten Datenlage an Niederschlagsinformationen, im Besonderen der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung, erscheint es interessant eine Charakterisierung der vorherrschenden Verlagerungsprozessarten hinsichtlich ihrer Auslöseniederschläge vorzunehmen.

F-4 Ziele und Arbeitspakete

Das Ziel des Projekts ist es, Niederschläge, die Wildbachprozesse und im Besonderen Katastrophenereignisse in der Vergangenheit ausgelöst haben, zu quantifizieren und unter Beachtung der zukünftigen klimatischen Entwicklung eine Aussage zu treffen, inwieweit sich die Frequenz verändern könnte und welche Anpassung anzustreben wären. Die spezifischen Ziele lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Z1) Quantifizierung von der Intensität und Dauer von Niederschlägen, die Wildbachprozesse in Österreich ausgelöst haben, auf Tagesbasis und, soweit vorhanden, auf Sub-Tagesbasis.

Z2) Identifikation der Wetterlagen und Niederschlags-Bedingungen bei Katastrophen-Ereignissen der Vergangenheit

Z3) Abschätzung der Veränderung der Frequenz von Ereignis-auslösenden Niederschlägen auf Tagesbasis mit besonderem Fokus auf langanhaltende Niederschläge und Katastrophen-Ereignissen.

Z4) Aussage über Notwendigkeit von Anpassungsstrategien

Das Projekt gliedert sich in vier Arbeitspakete, wobei die AP1-3 sich mit Datenanalyse beschäftigen und AP4 das Projektmanagement:

AP1: Sammlung und statistische Auswertung von kritischen Niederschlägen: Die Hauptdatenquellen dafür sind die Ergebnisse des Projekts Deucalion II (ACRP, no. B464795; 2014-2017). Dieser Datensatz auf Tagesbasis umfasst 5785 Wildbach-Prozesse in ganz Österreich (Hochwasser, Geschiebetransport und Mure im Zeitraum 1901 bis 2015). Weiters dienen die Ereignisdokumentationen von Wildbach-Katastrophen (hoher Schaden und/oder gehäufte Ereignisse), die am IAN seit dem Jahr 2000 als Auftragsforschung durchgeführt wurden, sowie Masterarbeiten und Informationen aus dem Ereigniskataster des Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung.

AP2: Regionalisierung, Auslösetypen und Ereignisgröße: Um eine Aussage der Veränderungen von Wildbach-Prozessen im Zuge des Klimawandels zu machen, werden in diesem AP die Ergebnisse aus AP1 in Regionen, Auslösetyp (Gewitter, langanhaltender NS, Einfluss von Schneeschmelze) und Ereignisgröße klassifiziert.

AP3: Klimawandel und Anpassung: Hier werden die Wahrscheinlichkeiten der in AP1 und AP2 definierten Grenzniederschläge in der Vergangenheit mit denen der regionalisierten Klimaszenarien (ÖKS-15) für die Zeithorizonte 2050 und 2100 verglichen. Spezieller Fokus wird auf die Niederschläge und Wetterlagen bei Katastrophen-Ereignissen gelegt und beurteilt, ob und welche Anpassungsstrategien anzustreben sind.

AP4: Projektmanagement, Reporting

Im Zuge des Projekts und nach Rücksprache mit dem StartClim-Team wurde das Arbeitspaket AP1 erweitert. In dem laufenden Projekt wurden nun unter Mithilfe des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der BOKU Wien für alle Wildbach-Ereignisse der letzten ~20 Jahre (2003-2022) die INCA Niederschlagszeitreihen speziell für jedes Einzugsgebiet ausgewertet. Der Hintergrund dafür ist, dass Wildbach-Ereignisse zum größten Teil durch Niederschläge < 1 Tag ausgelöst werden und eine systematische Analyse dieser Zeitreihen vielversprechendere Ergebnisse liefern sollten als die Aufarbeitung der vorhandenen Stationsdaten, die zumeist auf Tagesbasis sind und bei denen die Messstation oftmals einige Kilometer von den jeweiligen Einzugsgebieten entfernt sind. Die Aufarbeitung der Ereignisdokumentationen zu Wildbachkatastrophen wurden wie geplant durchgeführt.

F-5 Datenbanken - Beschreibung & Struktur

Dieses Kapitel spezifiziert die Datenbanken, welche im Zuge des Projekts verwendet werden. Die Datenbank für Wildbachereignisse wurde neben dem Wildbach- und Lawinenkataster (WLK) der Wildbach- und Lawinenverbauung mit den Ereignissen aus den Ereignisdokumentationen (ERDOKs) des IAN erweitert. Die meteorologischen Daten (INCA) der Geosphere Austria wurden über das Institut für Meteorologie und Klimatologie der BOKU Wien zur Verfügung gestellt.

F-5.1 Wildbachkataster WLK

Der Wildbach und Lawinenkataster (WLK) des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung bildet die Basis der systematischen Dokumentation von Ereignissen im österreichischen alpinen Raum. Dabei werden Ereignisse festgehalten, welche zu Schäden geführt haben und kann weitgehend als korrekt und vollständig betrachtet werden.

Die WLK (Ereignisse) Datenbank unterscheidet zwischen folgenden Prozessen:

- Wasser
- Schnee
- Sturzprozesse
- Rutschprozesse

Im Projekt StartClim wurden daraus die Informationen der Kategorie "Wasser" verwendet. Die sogenannten Wildbachprozesse können anhand der ONR 24800 (Tab. F-1) klassifiziert und unterschieden werden.

Tab. F-1: Eigenschaften von Wildbachprozessen nach ONR 24800

Verlagerungstyp	Hochwasser	Hochwasser	Mure	Mure
Verlagerungsart	Fluviatil	Fluviatil	Murartig	Murartig
Verlagerungsprozess	Hochwasser	Fluviatiler Feststofftransport	Murartiger Feststofftransport	Murgang
Prozesstyp	Reinwasserabfluss	Schwacher Feststofftransport	Starker Feststofftransport	Murgang
Fließverhalten	Newtonisch	Newtonisch	Annähernd newtonisch	Nicht newtonisch
Vol. Feststoffkonzentration (Bereich)	Promillebereich	0 % bis 20 %	20 % bis 40 %	> 40 %
Größtkorn	mm bis cm	bis dm	bis m	bis m
Dichte (Bereich)	1000 kg/m ³	< 1.300 kg/m ³	1.300 kg/m ³ bis 1700 kg/m ³	< 1700 kg/m ³

F-5.2 Ereignisdokumentationen (ERDOKs)

Das Institut für Alpine Naturgefahren (IAN) erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft regelmäßig Ereignisdokumentationen (ERDOKs) zu den großen Schadereignissen im alpinen Raum. Ziel dieser Ereignisdokumentationen sind die Kartierung der Anschlaglinien und Überflutungsflächen, die Darstellung der maßgeblichen Transportprozesse, die Erfassung der hydraulisch relevanten Parameter, die Bereitstellung von Niederschlagsdaten und die Einholung von Informationen zur zeitlichen Abfolge des Wildbachprozesses. Die Grundlagen bilden die Erhebungen vor Ort, die unmittelbar nach dem Ereignis am durchgeführt werden. Zur Dokumentation des Abflusses und zur Identifikation der Prozesse werden im Regelfall sämtliche Gerinne im Einzugsgebiet begangen, Abflussquerschnitte mit einfachen Hilfsmitteln erfasst und die Prozessformen an den betroffenen Gerinneabschnitten kartiert. Im Siedlungsgebiet werden unmittelbar nach dem Ereignis die Anschlaglinien und die Überflutungstiefen kartiert. Auf Basis dieser Kartierung werden Standorte für die Befragung der Bevölkerung zum zeitlichen Verlauf des Hochwassers ausgewählt. Auf Basis dieser Begutachtung und (wenn verfügbar) zusätzlichen räumlichen und meteorologischen Daten, Fotos und Plänen wird dann die ERDOK verschriftlicht in einem Bericht erstellt. Zusammenfassend basieren die ERDOKs auf folgenden Kriterien:

- 3W Standard (Was, Wo, Wann)
- Klassifizierung der Wildbachprozesse nach ONR 24800
- Erhebung der Prozessintensität

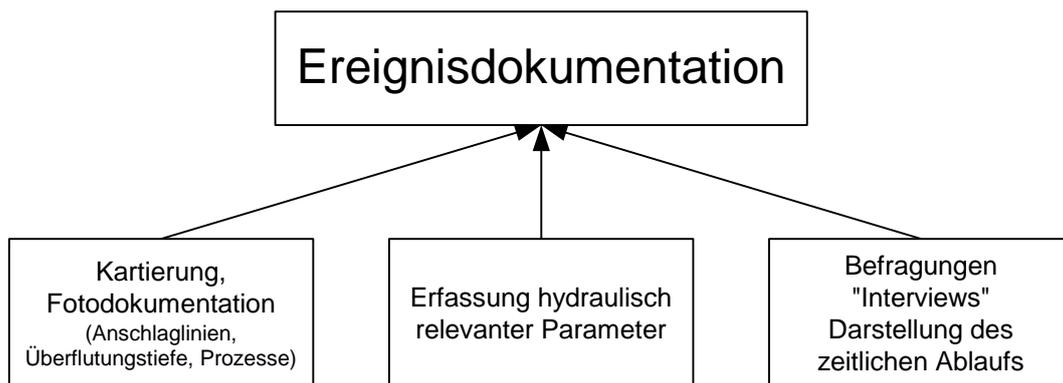


Abb. F-1: Strukturierung und Vorgehensweise für die Ereignisdokumentation

Für StartClim wurden aus 29 ERDOKs von 1987 bis 2022 insgesamt 196 relevante Ereignisse zur näheren Analyse herangezogen (Tab F-5.2).

Tab. F-2: Liste der aufgearbeiteten Ereignisdokumentationen für StartClim.

Report Nr.	Titel
1	Das Hochwasserereignis 1987 im Tuxertal - Eine hydrologische-hydraulische Simulation als Element des Katastrophenschutzes
31	Untersuchung über die Ursachen der Überschwemmung des Siedlungsgebietes Eichbergstraße/Dr. Adolf-Lenz-Weg in ENNS durch den Bleicherbach am 9. Juni 1996
52	Dokumentation Wartschenbach
54	Grundlage zum Risikomanagement bei Hochwasserereignissen im Talraum Haßbach, Band 1: Dokumentation und Analyse des Hochwasserereignisses vom 7. August 1999
87	Dokumentation und Analyse des Ereignisses vom 17. Juli 2002 am Fischbach Band 1: Dokumentation und Analyse des Ereignisses vom 17. Juli 2002 am Fischbach
92	Dokumentation und Grundlagenerhebung zur Aufarbeitung der Hochwasserereignisse vom August 2002 im Bereich der WLV- Gebietsbauleitung Salzkammergut Band 1: Endbericht
96	Dokumentation der Unwetterereignisse in den Gemeinden St. Stefan/Vorderberg und Feistritz an der Gail, Kärnten vom 29. August 2003
99	Dokumentation der Unwetterereignisse in den Gemeinden St. Stefan/Vorderberg und Feistritz an der Gail, Kärnten vom 29. August 2003
109	Dokumentation der Wildbachereignisse vom 22./23. August 2005 in Tirol Band 2: Detaillierte Aufnahme
114	Dokumentation und Analyse des Ereignisses vom 19. Juni 2006 am Angerbach/Bad Hofgastein
133	Die Wildbachereignisse im Sommer 2009 Ereignisdokumentation (ERDOK09)
139	Ereignisdokumentation Mai 2010 (ERDOK 10-1)
141	Die Wildbachereignisse im Sommer 2010 Ereignisdokumentation (ERDOK 10-2)
143	Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Wölzerbach; Band 1: Ereignisdokumentation
150	Ereignisdokumentation 2012 Band 1: Lorenzerbach
155	Ereignisdokumentation 2013 Ereignisse Juni 2013
167	Ereignisdokumentation 2014
175	Band 1: Ereignisdokumentation 2015
184	Ereignisdokumentation Mostviertel-NÖ, 2016
185	Ereignisdokumentation 2016
192	Ereignisdokumentation 2017 Detailberichte Salzburg und Steiermark
202	Ereignisdokumentation 2018

209	Ereignisdokumentation 2019
217	Ereignisdokumentation 2020
ERDOK 2021	Ereignisdokumentation 2021 (Skolaut et al., 2021)
220	Band 1: Ereignisdokumentation Juli 2021 Gemeinde Aggsbach
220	Band 2: Ereignisdokumentation August 2021 Wald im Pinzgau - Krimml
223	Dokumentation der Wildbachereignisse am 29. Juni 2022 in den Gemeinden Treffen am Ossiacher See und Arriach
224	Ereignisdokumentation 2022 vom Grubingerbach und Einödberggraben, Pinzgau, Salzburg

F-5.3 INCA Daten

Das Produkt "INCA" steht für "Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis" und liefert hochaufgelöste (1x1 km) meteorologische Daten durch die Kombination aus Stations- und Radardaten. Dabei reicht die gesammelte Datenreihe bis ins Jahr 2003 zurück. Die meteorologischen Daten wurden für jedes Einzugsgebiet in dem ein Wildbach-Ereignis registriert wurde von unseren Kooperationspartner übermittelt. Enthalten sind Informationen zu Temperatur und Niederschlag in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde seit 2003 und im 15 Minuten Takt seit 2013. Um die Homogenität der Datenstruktur zu bewahren wurden für die weitere Bearbeitung jeweils die Stundendatensätze herangezogen.

Für jedes der Einzugsgebiete liefert der INCA-Datensatz Stundenwerte mit (max, min & mean Niederschlag in mm/h und Temperatur in °C), wobei die Spalte für die Temperatur mit T2M und die Spalte für den Niederschlag mit RR angegeben wird. Für die anschließenden Analysen wurden die "mean" Werte verwendet.

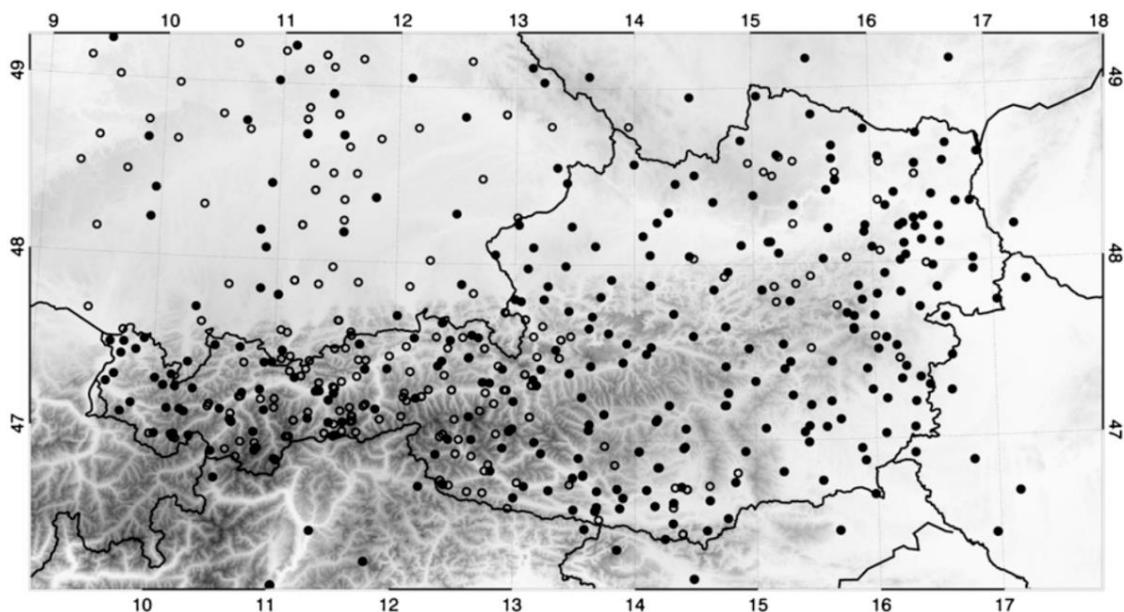


Abb. F-2: Messstationen der ZAMG und HD (Haiden et al. 2011)

F-6 Methodische Aufarbeitung & Verknüpfung der Daten

Dieses Kapitel beschreibt den Synergie- und Harmonisierungsprozess der zu Grunde liegenden Datenbanken sowie die Aufbereitung der resultierenden Niederschlags-Dauer-Beziehungen für die Analyse der Auswirkungen des Klimawandels.

F-6.1 Verknüpfung der Ereignisse mit den Einzugsgebieten aus dem WLK

Im Zuge von StartClim wurde die gesamte Chronik des WLK von der Wildbach- und Lawinenverbauung zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden als "Geopackage" übermittelt und können daher mit GIS basierter Software bearbeitet werden. Die Einzugsgebiete werden dabei als "shp.-files" dargestellt. Um die Ereignisse den zugehörigen Einzugsgebieten zuzuordnen wurden zwei Datensätze aus dem WLK verwendet:

- WLK_Ereignisse &
- WLK_Einzugsgebiete

Um die relevanten Informationen für unser Projekt aus der Ereignisdatenbank zu erhalten, wurde nach verschiedenen Kriterien gefiltert. Neben dem Ausscheiden von Ereignissen ohne zugehörige IDs wurden auch nur Ereignisse ab dem Jahr 2003 herausgeschrieben. Insgesamt enthält die Ereignisdatenbank über 70 Attribute, die in Spalten angegeben sind. Für das Projekt waren nur die vier Attribute ("Ereignis_ID", "EZG_ID", "Prozessart" und "Datum") für die weitere Verwendung von Bedeutung. Anschließend wurde über das Attribut "EZG_ID" mittels "join" Funktion in GIS ein Datensatz erstellt, welcher Ereignisse mit zugehörigen EZG_IDs, Datum und Prozessart enthält. Die zugehörigen shp. Files wurden unseren Kooperationspartner am Institut für Meteorologie und Klimatologie übermittelt, um für diese räumlichen Einzugsgebietsdaten spezifische meteorologische Zeitreihen zu erhalten.

F-6.2 Auswertung der Ereignisdokumentationen (ERDOKs) des IAN

Aus den analysierten ERDOKs wurden unter anderem folgende Parameter erhoben: Ereignis-ID, Name des Einzugsgebietes, Ereignisdatum, Ereignisuhrzeit, Niederschlagssumme, Niederschlagsdauer und -intensität (jeweils mit Angabe von Quelle), Intensität und evtl. Schaden.

F-6.3 Harmonisierung der INCA Datenbank & Verknüpfung mit den Ereignissen/Einzugsgebieten

Zuerst wurde ein Basis-Check durchgeführt. Dieser ergab, manchmal doppelte oder fehlende Werte aufzufinden waren, die leicht bereinigt werden konnten. In weiterer Folge wurde eine Verknüpfung mit den Ereignisdaten durchgeführt. Das Ergebnis war eine Tabelle (primär für den INCA Stunden-Niederschlag), wo (1) die Woche vor dem Ereigniseintritt und (2) das Monat nach dem Ereigniseintritt verknüpft wurde für jedes EZG zu erstellen.

Zunächst wurde ein CSV-File mit allen Daten in einem großen Dataframe generiert, jedoch noch ohne Link zu den Ereignissen und einem Anspruch an 35 GB im RAM. Der nächste Schritt war die Verknüpfung mit den Ereignissen über die Zeitstempel und die EZG-ID durchzuführen. Hier konnten aus WLK+ERDOK 2445 eindeutige EZGs festgestellt werden, im INCA-Datensatz jedoch nur 2226 und übereinstimmende (in beiden Datensätzen vorhandene) genau 2206, was einem Verlust von 239 EZGs (knapp 10%) entspricht. Das finale Skript zur Erstellung der Zeitreihen besteht nun aus rund 2200 EZGs und wurde als gezipptes CSV-File abgespeichert.

Für diese Einzugsgebiete waren nun Niederschlags- und Temperaturdaten von 4016 Wildbach-Ereignissen vorhanden, die sich in die vier Prozesstypen "Hochwasser", "Fluviatiler Feststofftransport", "murartiger Feststofftransport" und "Mure" einteilen lassen. Das finale File enthält die wichtigsten Metadaten zu den Ereignissen, in den Spalten sind die die Stundenwerte. pre_* sind die Stunden vorm Ereignis (für 28 Tage; $28 \cdot 24 = 672$), t_000 ist 00:00 am Ereignistag, und danach mit post_* für die 7 Tage nach dem Ereigniseintritt. Dieses File war die Grundlage für die Bestimmung der Ereignis-auslösenden Niederschläge.

F-6.4 Bestimmung Ereignis-auslösende Niederschläge

Für die Bestimmung der Ereignis-auslösenden Niederschläge wurden sequenziell für jedes Ereignis die kumulativen Niederschläge 6 Tage vor dem Ereignistag, am Ereignistag und 1 Tag nach dem Ereignis analysiert. Dafür wurde der kumulative Niederschlag geplottet und für jedes der 4016 Ereignisse manuell der Niederschlagsanfang und das Niederschlagende bestimmt. Da es zu den meisten Ereignissen keine Information des genauen Zeitpunkts des Beginnes des Ereignisses gab, wurde für die weiteren Auswertungen der Gesamtniederschlag herangezogen. Niederschlagspausen von 6 Stunden wurden als Grenzwert für den Beginn eines neuen Niederschlags definiert.

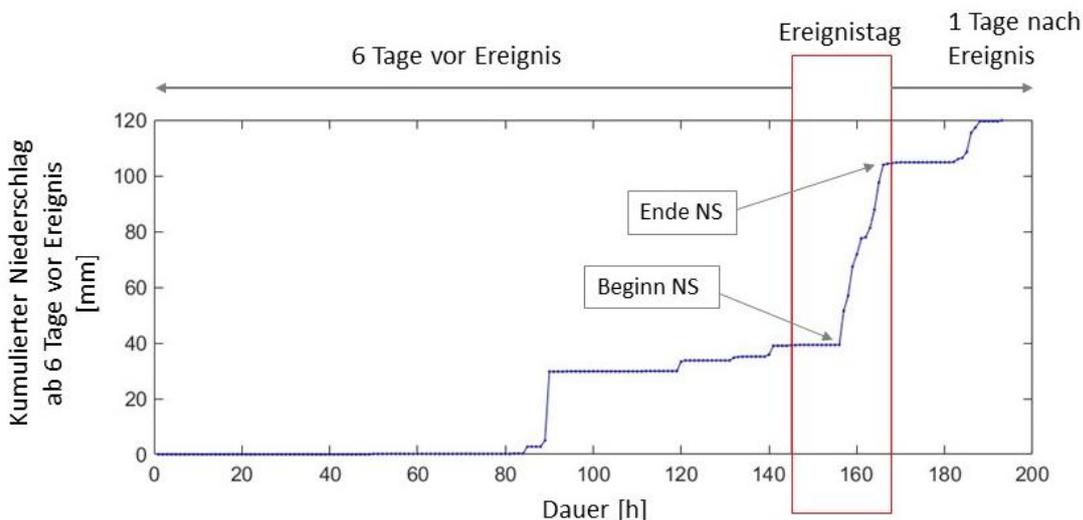


Abb. F-3: Beispiel für die manuelle Bestimmung des Ereignis-auslösenden Niederschlags.

Für jeden auslösenden Niederschlag wurde folgende Daten für die weitere statistische Auswertung gespeichert:

- Event ID
- Prozesstyp (1 = Hochwasser, 2 = Fluviatiler Feststofftransport, 3 = murartiger Feststofftransport und 4 = Mure)
- Einzugsgebiet-ID
- Quelle (1 = WLK, 2 = ERDOK)
- Kumulierter Ereignisniederschlag [mm]
- Dauer [h]
- Intensität [mm/h]
- maximale Stundenintensität [mm/h]

- Summe Niederschlag vor Beginn der auslösenden Niederschlagsereignis ("Vorregen") - 1 Tag, Vorregen 3 Tage, Vorregen 7 Tage, Vorregen 28 Tage,
- Datum und Uhrzeit des Beginns des auslösenden Niederschlagsereignisses.

F-6.5 Analyse der klimabedingten Änderungen Ereignis-auslösender Niederschläge

Um die klimabedingten Änderungen von auslösenden Niederschlagsereignissen aller vier Prozesstypen analysieren zu können, wurden aus den zuvor empirisch ermittelten Intensitäts-Dauer-Beziehungen Grenzwerte für verschiedene Tagessummen berechnet. Grund dafür ist, dass die Modelldaten der österreichischen Klimaszenarien (ÖKS15) zwar räumlich die gleiche Auflösung wie die INCA Daten aufweisen (1km x 1km)¹, zeitlich allerdings nur auf Tagebasis vorliegen. Die Grenzwerte wurden für ein- bis fünftägige Niederschlagssummen berechnet und sind in Tab. F-4: aufgelistet. Für jeden Prozesstyp wurde die jährliche Überschreitung der jeweiligen Grenzwerte in den Niederschlagsdaten des ÖKS15-Ensembles gezählt. Dabei wurde auf zwei Fehlerquellen geachtet: erstens kann jede Grenzwertüberschreitung nur einmal gezählt werden, auch wenn mehrere an einem Tag auftreten (z.B. ein, zwei, und dreitägige Summen). Zweitens wird ein Niederschlagsereignis, das einen Grenzwert überschreitet, nicht mehr für die Berechnung weiterer Summen berücksichtigt, da es ansonsten für mehrere Tage gezählt werden könnte. Diese Einordnung ist wichtig für die Interpretation der Ergebnisse der Klima-Analyse. Die Zahlen beziehen sich auf die Anzahl der Tage im Jahr, an denen einer der Grenzwerte überschritten wird, wobei einzelne Niederschlagsereignisse nicht mehrfach gezählt werden.

Da einige der Ereignisse seltener als jährlich auftreten, wurde eine Umrechnung der Werte in Jährlichkeiten gewählt:

$$A(e_p) = \frac{1}{\bar{e}_p}$$

Wobei

$A(e_p)$ = Jährlichkeit des Ereignisses in der Periode p

\bar{e}_p = Mittelwert der jährlichen Anzahl des Ereignisses in der Periode p

Dabei kommen alle Werte zwischen > 0 und ≤ 1 einmal pro Jahr oder häufiger vor (0,2 = 5x pro Jahr, 0,5 = 2x pro Jahr usw.), alle Werte über 1 kommen statistisch alle x Jahre vor. Alle Ereignisse, die eine Jährlichkeit von 20 oder seltener aufweisen, wurden in eine Klasse zusammengefasst, da sie mit nur 30 Jahren an Daten nicht statistisch korrekt erfasst werden können. Punkte, an denen im Analysezeitraum gar kein Ereignis auftritt, wurden hervorgehoben.

Um die zeitliche Entwicklung der Ereignis-auslösenden Niederschläge in den Klimaszenarien detaillierter darzustellen, wurde der Anteil jener Fläche, auf der jährlich zumindest ein Ereignis auftritt, an der Gesamtfläche Österreichs berechnet. In dieser Darstellung ist nicht die Änderung der Häufigkeit der Ereignisse ersichtlich, sondern die Änderung der Gebietsausdehnung der Regionen, in denen sie auftreten.

Sowohl die Jährlichkeiten als auch die Flächenanteile wurden separat für den Ensemble Median der drei Emissionsszenarien RCP 2.6, RCP4.5 und RCP8.5 berechnet.

¹ Die effektive räumliche Auflösung der Klimamodelldaten ist weitaus gröber. Für ÖKS15 wurden europäische Regionalmodelle (EURO-CORDEX) anhand statistischer Methoden mit hochaufgelösten Beobachtungs-Gitterdaten Bias-korrigiert und auf 1 km räumliche Auflösung skaliert. Dabei können natürlich nur die statistischen Verteilungen (und Fehler) berücksichtigt werden, die im Beobachtungszeitraum liegen. Für Details siehe Switanek et al. (2017)

F-7 Resultate und Diskussion

F-7.1 Analyse der EROKs

Die Analyse der Ereignisdokumentationen ergab eine Datenbasis von 196 Wildbach Ereignissen, die in einer Excel-Liste zusammengeführt wurden und deren räumliche Verteilung in Abb. F-4: dargestellt ist. Interessant war, dass einige dieser Ereignisse nicht in dem Wildbachkataster enthalten waren, was darauf hindeutet, dass die Datenbank als nicht komplett betrachtet werden muss. Für die Darstellung und Ableitung der Grenzwertkurve, wurden die Prozesstypen Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport sowie murartiger Feststofftransport und Mure jeweils zu Hochwasser und Murgang zusammengefasst. Da die Datenquellen für die auslösenden Niederschläge in den ERDOKs nicht immer gleich waren (Messstationsnetz mit Tagesdaten bzw. 10 min Daten, sowie INCA Daten), ist bei der Interpretation der abgeleiteten Niederschlagsgrenzwerte aus den ERDOKs (Abb. F-5:) diese Einschränkung zu beachten.

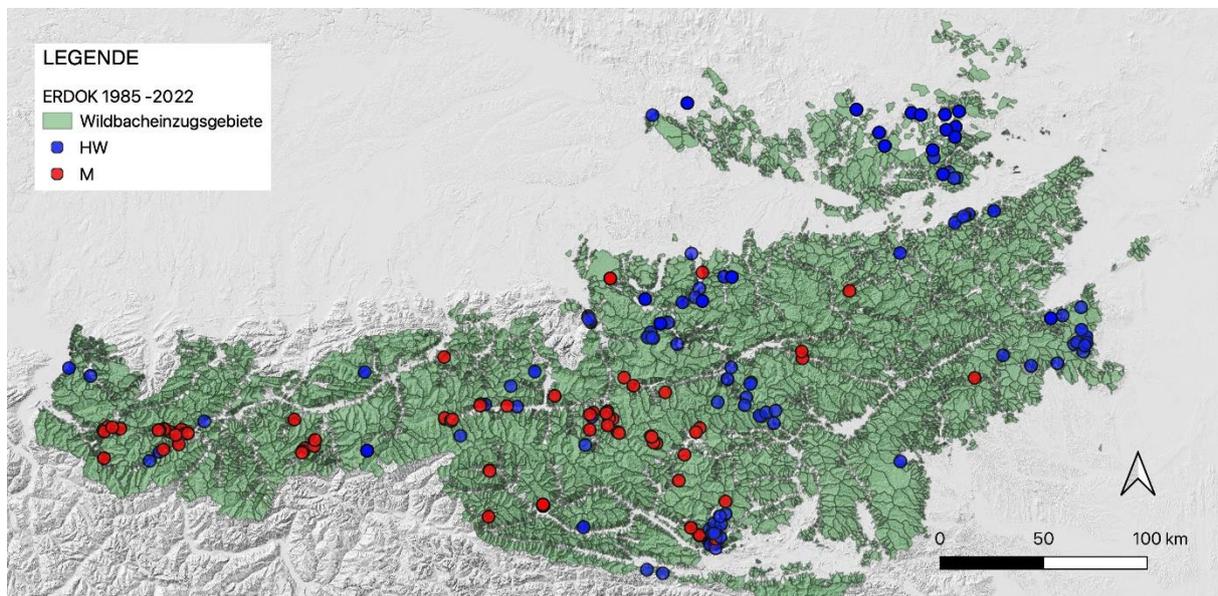


Abb. F-4: Räumliche Verteilung der Hochwasser (HW) & Murgangereignisse (M) bezogen aus den ERDOKs. Grün dargestellt sind alle Wildbacheinzugsgebiete Österreichs.

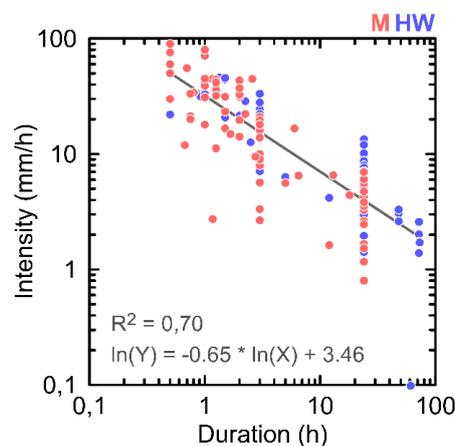


Abb. F-5: Intensität-Dauer Grenzwerte basierend auf den ERDOK-Daten, denen keine homogene Datenquellen zugrunde liegt.

Bei der Zusammenstellung der Großwetterlagen in Zusammenhang mit den Wildbach-Ereignissen, die infolge der EROKs dokumentiert wurden, zeigt sich, dass rund 34 % der Ereignisse im Zuge eines Tiefdruckkomplexes (20% Kontinentales Tief, 8 % Tief südlich der Alpen, 4% Tief bei den Britischen Inseln, Tief Adria-Polen), 30 % bei einer Hochdruckwetterlage und ca. 36 % bei einer West, Nordwest, Südwest oder gradientschwachen Lage ausgelöst wurden (Abb. F-6:). Es ist zu beachten, dass diese Aufteilung auf selektierten Daten ("nur" ERDOKs) beruhen.

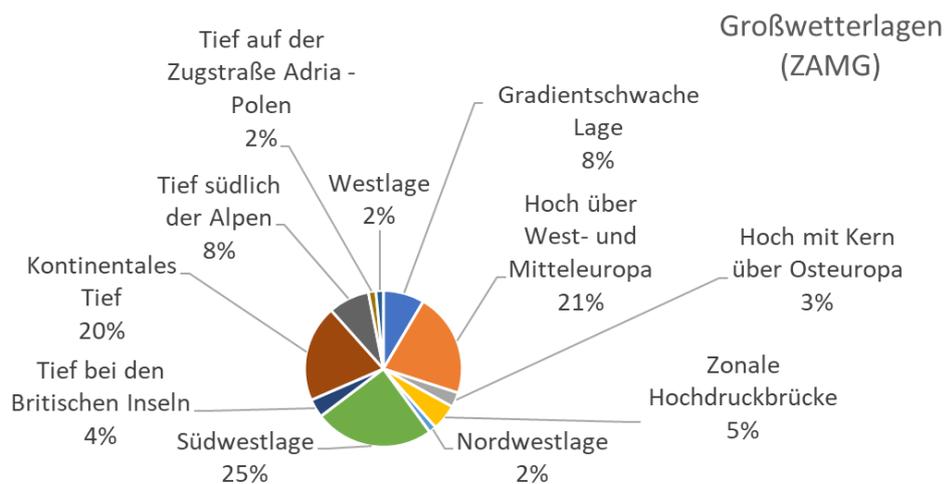


Abb. F-6: Anteil der Großwetterlagen (lt. ZAMG) in Zusammenhang mit den Wildbach-Ereignissen basierend auf den ERDOK-Daten.

F-7.2 Niederschlagsgrenzwerte basierend auf INCA Daten

Von den 4016 analysierten Ereignissen konnten für 3789 Ereignis-auslösende Niederschläge bestimmt werden. Die Auswertung ergab somit Informationen zu 642 Hochwasser-Ereignissen, 2125 Ereignissen von fluvialen Feststofftransport, 651 murartigen Feststofftransport und 651 Murgänge (Tab. F-3:). Bei der Auswertung wurden immer wiederkehrende Niederschlags-Muster erkannt, die sich in einem Plot des normalisierten kumulativen Niederschlags am Beispiel der Prozesse "Mure" und "murartiger Feststofftransport" (Abb. F-7:) zeigt. Diese Muster sollten in einem Folgeprojekt einer tiefergehenden statistischen Analyse unterzogen werden.

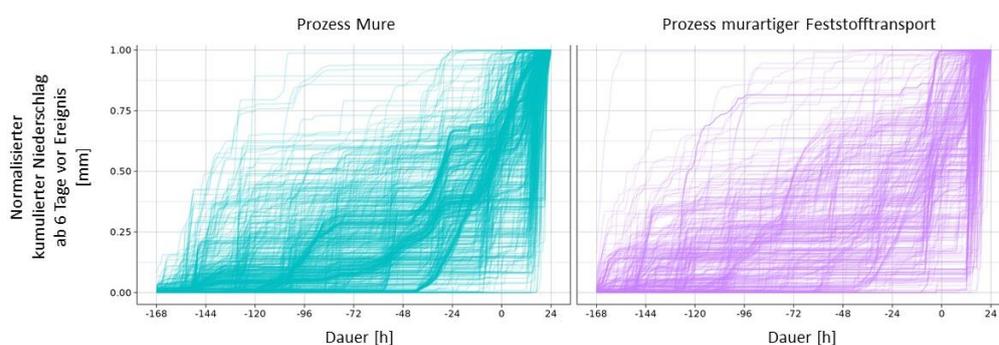


Abb. F-7: Normalisierter kumulativer Niederschlag für alle ausgewerteten Ereignisse des Prozesstyps "Mure" und "murartiger Feststofftransport".

Die Ergebnisse der Intensität-Dauer Beziehung für die einzelnen Prozesstypen sind in Abb. F-8: dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine erhebliche Anzahl der Ereignisse durch Niederschläge < 24h ausgelöst wurden. Dieses Ergebnis unterstützt die Wahl von INCA Daten für die Analyse der auslösenden Niederschläge.

Für alle vier Prozesstypen erkennen wir wie erwartet eine erhebliche Streuung der Niederschläge (Abb. F-8:). Es zeigt sich jedoch auch, dass die Grenzwertkurven der unterschiedlichen Prozesstypen deutlich unterscheiden. Aufgrund der homogenen Datengrundlage, kann davon ausgegangen werden, dass neben der Sedimentverfügbarkeit auch der Niederschlag einen nachweislichen Einfluss auf das Prozessgeschehen in einem Wildbacheinzugsgebiet hat.

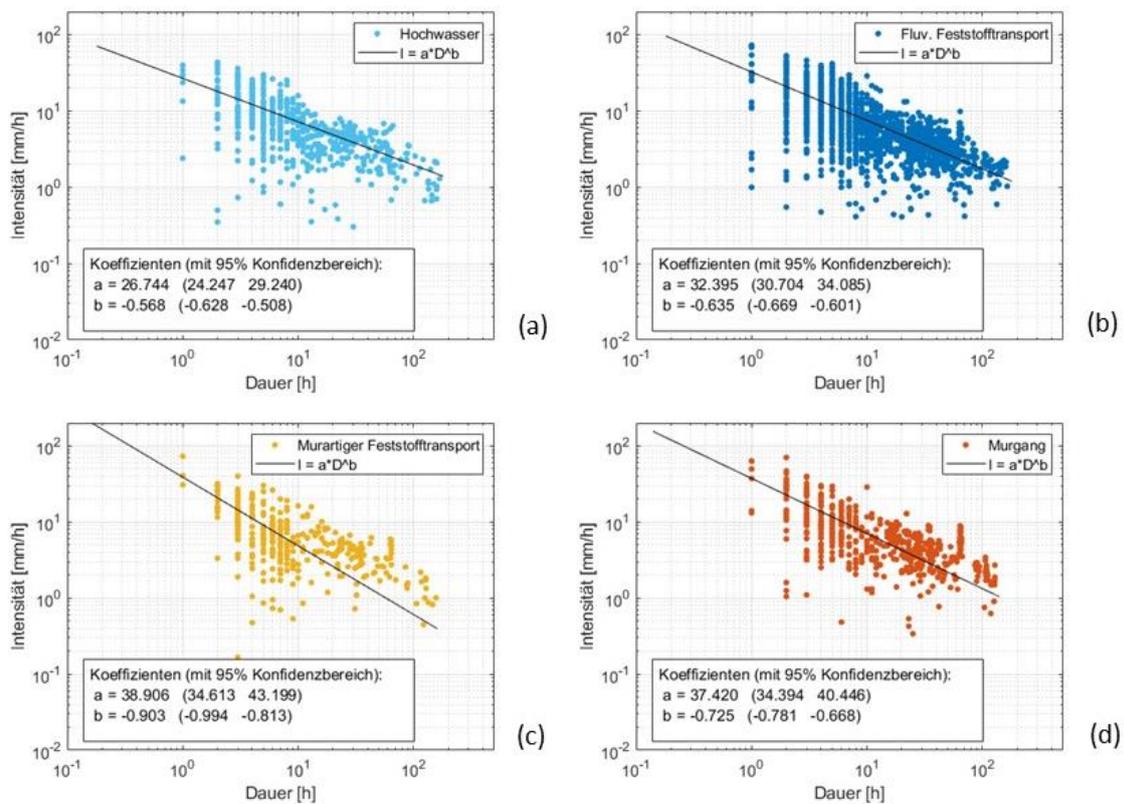


Abb. F-8: Intensität-Dauer Beziehung und Grenzwertkurven inklusive Konfidenzintervall basierend auf INCA 1h Stunden Daten für die Prozesstypen Hochwasser (a), fluviatiler Feststofftransport (b), murartiger Feststofftransport (c) und Murgang (d).

Die Parameter für die abgeleiteten Grenzniederschläge für alle Prozesstypen sind in Tab. F-3: zusammengefasst.

Tab. F-3: Anzahl der auslösenden Niederschläge nach Prozesstypen und jeweilige Intensität-Dauer Beziehung.

Prozesstyp	Anzahl	I-D Beziehung
Hochwasser	642	$I = 26,7 * D^{-0,56}$
Fluvialer Feststofftransport	2125	$I = 32,4 * D^{-0,64}$
Murartiger Feststofftransport	371	$I = 38,9 * D^{-0,9}$
Murgang	651	$I = 37,4 * D^{-0,73}$
Alle	3789	$I = 32,2 * D^{-0,65}$

Die Daten werden als csv-File digital zur Verfügung gestellt.

F-7.3 Klimabedingte Änderungen der Ereignis-auslösenden Niederschläge

Die Tagessummen für Ereignis-auslösende Niederschläge sind in Tab. F-4: aufgelistet und nach Prozesstyp aufgeschlüsselt. Aus den Grenzwerten ist ersichtlich, dass die Häufigkeit der auslösenden Niederschläge von murartigem Feststofftransport über Murgang, fluvialen Feststofftransport und Hochwasser abnimmt.

Tab. F-4: Grenzwerte für verschiedene Tagessummen auslösender Niederschlagsereignisse, berechnet aus den Intensitäts-Dauer-Beziehungen der vier Prozesstypen

Prozesstyp → Grenzwert ↓	Hochwasser	Fluvialer Feststofftransport	Murartiger Feststofftransport	Murgang
1-tägig	108,1	101,7	53,5	88,2
2-tägig	146,6	130,6	57,3	106,4
3-tägig	175,3	151,1	59,7	118,7
4-tägig	198,9	167,6	61,4	128,3
5-tägig	219,5	181,6	62,8	136,2

Die anhand der Grenzwerte berechneten Jährlichkeiten Ereignis-auslösender Niederschläge (wie in F-6.5 beschrieben) ist in Abb. F-9: für alle vier Prozesstypen in der Periode 1991-2020 (aktuelles Klima) dargestellt.

Jährlichkeiten von Ereignis-auslösenden Niederschlägen in Österreich im Zeitraum 1991-2020

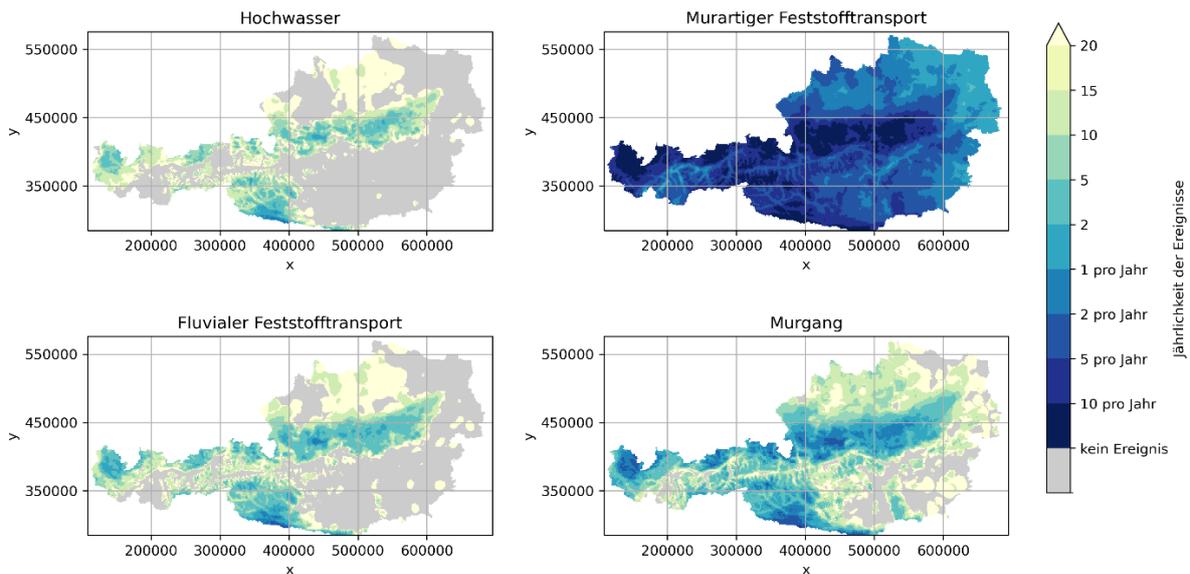


Abb. F-9: Auftretenshäufigkeit von Ereignis-auslösenden Niederschlägen, ausgedrückt in Jährlichkeiten, für vier Wildbach-Prozesstypen in Österreich. Die Werte stellen jeweils den Mittelwert der Periode 1991-2020 dar. Punkte, an denen keine solchen Niederschlagsereignisse auftreten, sind grau gekennzeichnet. Alle Jährlichkeiten ≥ 20 sind in einer Klasse zusammengefasst. Die Daten entstammen dem SPARTACUS-Datensatz (v2.1) der GeoSphere Austria. Datenquelle: GSA (Hiebl & Frei, 2016)

Die allgemeine Häufigkeit der Ereignisse zwischen den Prozesstypen ist gleich der oben beschriebenen Abfolge. Bei allen vier Prozesstypen zeigt sich, dass auslösende Niederschläge im Norden und Osten Österreichs sowie in den Alpentälern seltener und in den nördlichen und südlichen Stauregionen der Alpen häufiger vorkommen. Diese räumlichen Muster sind aufgrund der Niederschlagsverteilung in Österreich zu erwarten. Dabei ist wichtig zu beachten, dass für das tatsächliche Auftreten einer Wildbachkatastrophe weitere Faktoren wie Hangneigung und -ausrichtung, Geologie des Untergrundes, Bodenbedingungen etc. relevant sind, und es sich hierbei rein um die meteorologischen Voraussetzungen handelt.

Für die Analyse der klimabedingten Änderungen auslösender Niederschläge wurde beispielhaft der Prozesstyp "Fluvialer Feststofftransport" ausgewählt, weil dieser mit Abstand am häufigsten in den ERDOK Daten vertreten ist. Abb. F-10: zeigt die Änderung der Jährlichkeiten Ereignis-auslösender Niederschläge gegen Ende der 21. Jahrhunderts für drei verschiedene RCPs. Die Werte der Referenzperiode wurde hier nicht aus Beobachtungs-, sondern aus Modelldaten berechnet. Eine Analyse der klimabedingten Änderungen ist nur anhand des Vergleichs von Modelldaten miteinander und nicht zwischen Modell- und Beobachtungsdaten sinnvoll, da es im Bereich sehr hoher Niederschlagsereignisse keine Bias-Korrektur der ÖKS15-Daten gibt.

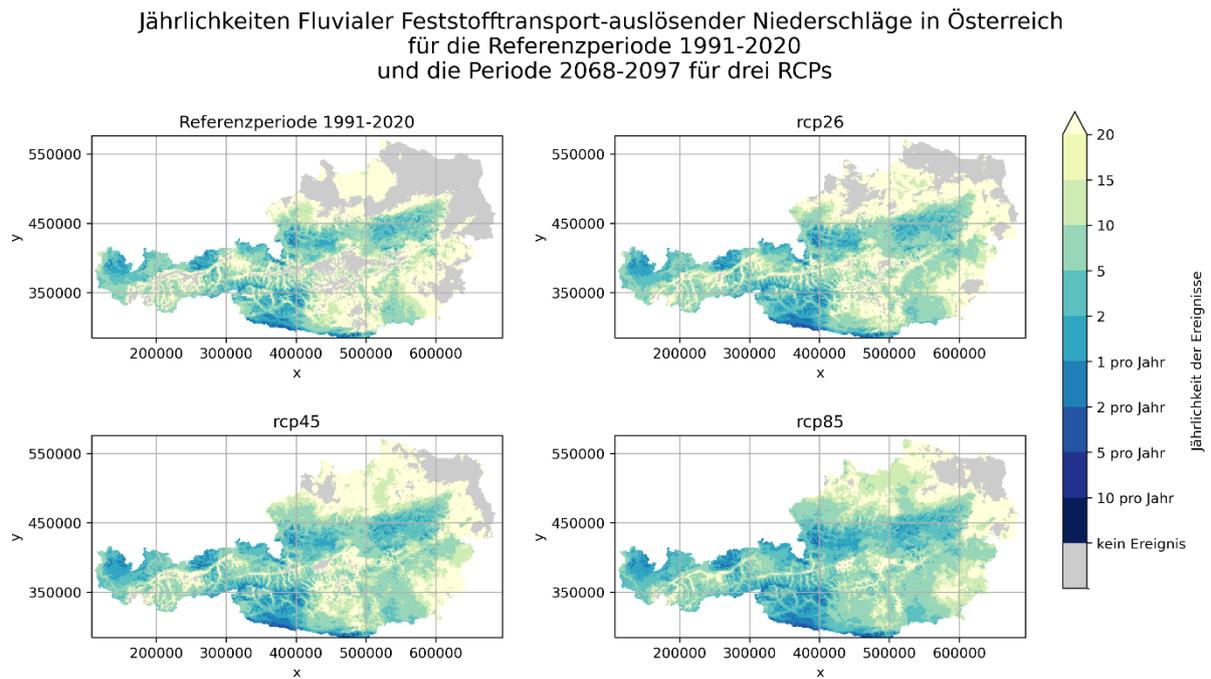


Abb. F-10: Auftretenshäufigkeit von Ereignis-auslösenden Niederschlägen, ausgedrückt in Jährlichkeiten, für fluvialen Feststofftransport in Österreich. Die vier Karten zeigen die Jährlichkeiten jeweils für den Mittelwert der Referenzperiode und der Periode 2068-2097 für drei RCPs. Dargestellt ist der Ensemble Median. Punkte, an denen keine solchen Niederschlagsereignisse auftreten, sind grau gekennzeichnet. Alle Jährlichkeiten ≥ 20 sind in einer Klasse zusammengefasst. Die Daten für beide Perioden entstammen dem ÖKS15-Ensemble, weshalb bei der Referenzperiode Unterschiede zu den in Abb. F-9: dargestellten Beobachtungsdaten auftreten. Datenquelle: ÖKS15 (Switaneck et al., 2017)

Während sich die räumliche Verteilung der Häufigkeiten gegenüber der Referenzperiode nur geringfügig ändert, fällt die Ausdehnung der betroffenen Regionen in zuvor nicht betroffene Gebiete auf. Diese unterscheidet sich nach RCP deutlich, und ist vor allem im Flachland im Nordosten Österreichs ersichtlich. Der detailliertere zeitliche Verlauf dieser Flächenänderung betroffener Gebiete ist in Abb. F-11: dargestellt.

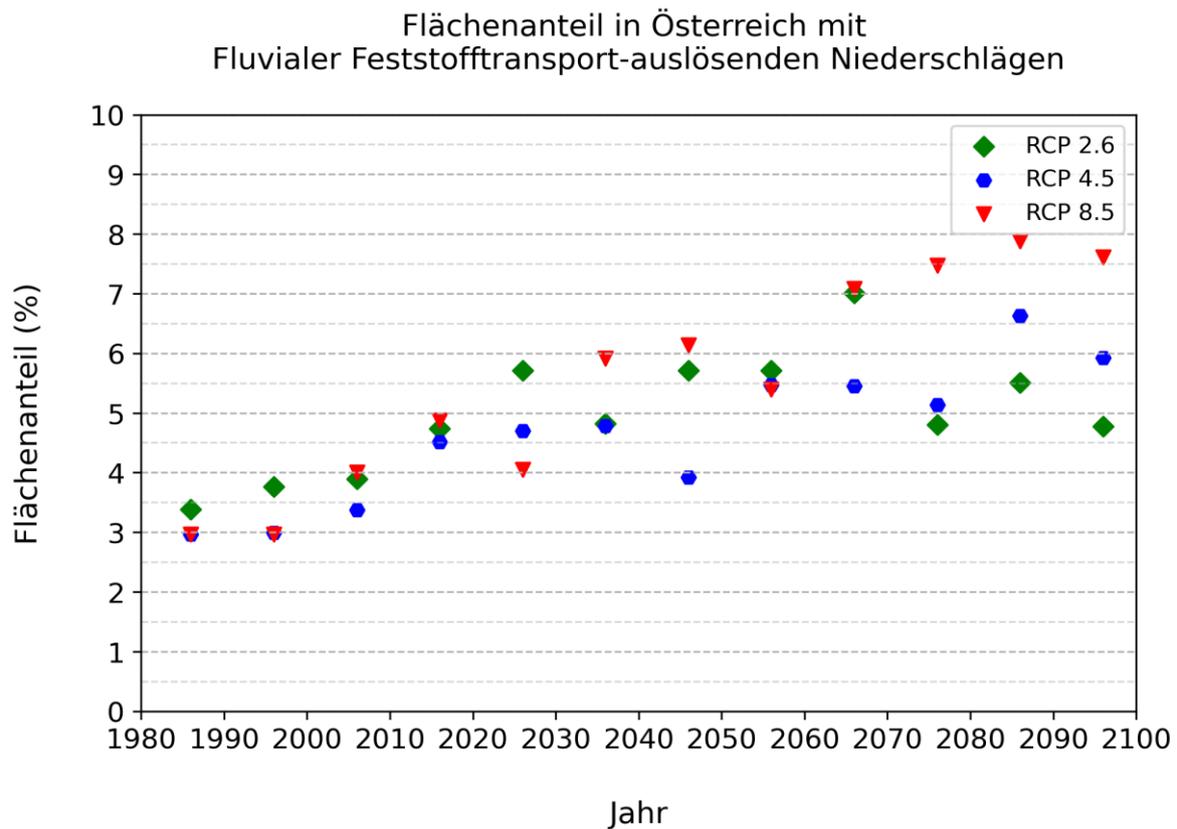


Abb. F-11: Änderung der Flächenanteile in Österreich von Ereignis-auslösenden Niederschlägen für fluvialen Feststofftransport. Die Flächenanteile werden aus dem Anteil jener Regionen, an denen zumindest ein auslösendes Niederschlagsereignis pro Jahr vorkommt, an der Gesamtfläche Österreichs berechnet. Die Punkte zeigen dekadische Mittelwerte für den Ensemble Median des jeweiligen RCPs. Datenquelle: ÖKS15 (Switanek et al., 2017)

Die in Abb. F-10: und Abb. F-11: dargestellten Flächen, an denen Ereignis-auslösende Niederschläge auftreten, sind nur bedingt miteinander vergleichbar. Während ein grauer Punkt in Abb. F-10: bedeutet, dass in der gesamten Periode kein einziges Niederschlagsereignis auftritt, beziehen sich die Flächenanteile in Abb. F-11: auf Einzeljahre. Für den Prozesstyp "fluvialer Feststofftransport" zeigt sich, dass die betroffene Fläche von ca. 3 % pro Jahr in den 1980er-Jahren auf 5 % (RCP 2.6), 6 % (Verdopplung, RCP4.5) resp. 7,5% (RCP 8.5) in den 2090er-Jahren ansteigen.

F-8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

In der vorliegenden Studie wurden Ereignisdokumentationen, d.h. detaillierte Aufarbeitungen von vergangenen Wildbachkatastrophen zwischen 1987 und 2022, aufgearbeitet und die meteorologischen Auslösebedingungen analysiert. Weiters wurde der Gebietsniederschlag für > 3800 dokumentierte Wildbachereignisse im Zeitraum 2003 bis 2022 auf Basis von 1-Stunden INCA Daten bestimmt. Die abgeleiteten Intensität-Dauer Grenzwertkurven für die Prozesse Hochwasser, fluviatiler Feststofftransport, murartiger Feststofftransport und Murgang stehen für die Entwicklung eines operativen Warnsystems zur Verfügung. Es wird empfohlen, die auslösenden Niederschläge auf wiederkehrende Muster und deren räumliche Verteilung zu untersuchen, um durch eine differenzierte Analyse eine höhere Vorhersagegenauigkeit zu erreichen. Es ist in jedem Fall jedoch mit Unsicherheiten aufgrund sich zeitlich und räumlich verändernder geomorphologischer Disposition von Wildbacheinzugsgebieten (z.B. Sedimentverfügbarkeit, Landnutzungsänderungen...) zu rechnen.

In einem weiteren Schritt wurden die klimawandelbedingten Änderungen auslösender Niederschlagsereignisse auf Tagesbasis bestimmt. Es zeigte sich, dass sowohl die Auftretenswahrscheinlichkeit als auch die betroffene Fläche für alle Prozesstypen abhängig von den angenommenen Emissionsszenarien (RCPs) zunimmt, wobei hier Faktoren wie Geländeform, Geologie des Untergrundes nicht berücksichtigt wurden. Aufgrund der hier vorliegenden Studie, sowie der Erwartung, dass in einem wärmeren Klima die Intensität von zukünftigen konvektiven Niederschlägen zunimmt (Giorgi et al., 2016), ist mit einer Zunahme und saisonalen Verschiebung (Kaitna et al., 2023) von Wildbachereignissen zu rechnen. Gleichzeitig ist mit vermehrter Bereitstellung von Sediment für Verlagerungsprozesse in hochalpinen Bereichen (glazial und peri-glazial, siehe Überblick in Kaitna, 2022) zu rechnen, wodurch die Notwendigkeit der Entwicklung von Anpassungsstrategien sinnvoll erscheint.

F-9 Literaturverzeichnis

- APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten. ISBN 978-3-7001-7699-2
- Bergmeister, K. (2009). *Schutzbauwerke gegen wildbachgefahren: Grundlagen, entwurf und bemessung, beispiele*. John Wiley & Sons.
- Braun, M. and Kaitna, R. (2016): Analysis of meteorological trigger conditions for debris flows on a daily time scale. In: Makarov, SA; Atutova, JV; Shekhovtsov, AI (Eds.), *Debris flows: risks, forecast, protection: Materials of IV International Conference (Russia, Irkutsk – Arshan village (The Republic of Buriatia), Irkutsk: Publishing House of Sochava Institute of Geography SB RAS*, pp. 255-257, ISBN: 978-5-94797-273-3
- Decaulne, A., Saemundsson, P., & Petursson, O. (2005). Debris flow triggered by rapid snowmelt: a case study in the glei. arhjalli area, northwestern iceland. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 87(4), 487–500. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2005.00273.x>
- Giorgi, F., Torma, C., Coppola, E., Ban, N., Schär, C., & Somot, S. (2016). Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming. *Nature Geoscience*, 9(8), 584–589. <https://doi.org/10.1038/ngeo2761>
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps - a review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3–4), 239–267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5(1), 3–17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- Haiden, T., A. Kann, C. Wittmann, G. Pistotnik, B. Bica, und C. Gruber (2010): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. *Weather and Forecasting* 26 (2): S. 166-183
- Hiebl, J., & Frei, C. (2016). Daily temperature grids for Austria since 1961—concept, creation and applicability. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1), 161–178. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1411-4>
- 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
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162227>
- Moser, M., & Hohensinn, F. (1983). Geotechnical aspects of soil slips in Alpine regions. *Engineering Geology*, 19(3), 185–211.
- ONR 24800 (2009): *Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung*. Austrian Standards.

Prenner, D., Hrachowitz, M., & Kaitna, R. (2019). Trigger characteristics of torrential flows from high to low alpine regions in Austria. *Science of The Total Environment*, 658, 958–972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.206>

Prenner, D., Kaitna, R., Mostbauer, K., & Hrachowitz, M. (2018). The Value of Using Multiple Hydrometeorological Variables to Predict Temporal Debris Flow Susceptibility in an Alpine Environment. *Water Resources Research*, 54(9), 6822–6843. <https://doi.org/10.1029/2018WR022985>

Schlögl, M., Fuchs, S., Scheidl, C., & Heiser, M. (2021). Trends in torrential flooding in the Austrian Alps: A combination of climate change, exposure dynamics, and mitigation measures. *Climate Risk Management*, 32, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100294>

Skolaut, C., Mitterlehner St., et al. (2021). Ereignisdokumentation 2021 für den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus Stubenring 1, 1010 Wien

Switanek, M. B., Troch, P. A., Castro, C. L., Leuprecht, A., Chang, H.-I., Mukherjee, R., & Demaria, E. M. C. (2017). Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 2649–2666. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017>

F-10 Anhang (nur wenn nötig)