



universität  
wien

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Modellierung von Extremereignissen mit komplexen Kaskadeneffekten im Hochgebirge  
am Fallbeispiel des Schwarzenseebachtals (Österreich, Weststeiermark) mit r.avaflow  
und Konnektivitätsanalysen

verfasst von / submitted by

Jonas Machold, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree  
of

Master of Science (MSc)

Wien, 2023 / Vienna 2023

Studienkennzahl lt. Studienblatt /  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

UA 066 855

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Masterstudium Geographie UG2002

Betreut von / Supervisor:

Mag. Dr. Ronald Pöppl, BA



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mit bei Allen bedanken, welche mich in den letzten Monaten und Jahre begleitet und unterstützt haben. Bei all denjenigen die mir während meiner Masterarbeit Mut zugesprochen haben und mich mit vielen kleinen Gesten unterstützt haben.

Mein besonderer Dank geht an Mag. Dr. Ronald Pöppl BA für die Betreuung dieser Masterarbeit, der fachlichen Unterstützung und der Initialisierung der Masterarbeit. Die Gespräche und die fortwährende Unterstützung durch das Aufzeigen von Möglichkeiten, hat maßgeblich zur Fertigstellung dieser Masterarbeit beigetragen. Vielen Dank auch für Deine Flexibilität – dies weiß ich sehr zu schätzen. Ein weiterer besonderer Dank geht an Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Martin Mergili, der mir bei der Modellierung mit r.avaflow steht mit Rat und Tat zur Seite stand, wenn es technische Probleme gab oder ich mit r.avaflow nicht weiter wusste. Ebenfalls mit r.avaflow geholfen hat mir Yenny Alejandra Jimenez Donato, M.Sc. – vielen Dank für Deine Zeit.

Bei meinem nahen persönlichen Umfeld, meinen Geschwistern, meinen Freunden und natürlich bei Chiara bedanke ich mich für die Geduld, welche Ihr, insbesondere in den letzten Wochen vor der Fertigstellung der Masterarbeit, aufbringen musstet. Ihr wart mein Motor, weshalb ich die Masterarbeit fertigstellen habe können.

Danke Euch!



# Inhaltsverzeichnis

<i>Danksagung</i> .....	<i>i</i>
<i>Inhaltsverzeichnis</i> .....	<i>iii</i>
<i>Abbildungsverzeichnis</i> .....	<i>v</i>
<i>Tabellenverzeichnis</i> .....	<i>x</i>
<i>Abkürzungsverzeichnis</i> .....	<i>xi</i>
<i>Kurzfassung</i> .....	<i>xiii</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>xv</i>
1. <i>Einleitung</i> .....	<i>1</i>
1.1. <i>Hintergrund und Problemstellung</i> .....	<i>1</i>
1.2. <i>Stand der Forschung</i> .....	<i>3</i>
1.3 <i>Forschungsfragen und Zielsetzung</i> .....	<i>5</i>
1.4 <i>Vorgehensweise</i> .....	<i>6</i>
2. <i>Das Untersuchungsgebiet</i> .....	<i>7</i>
2.1. <i>Einführung in das Untersuchungsgebiet Schwarzenseebachtal</i> .....	<i>7</i>
2.2. <i>Die Geologie und Geomorphologie</i> .....	<i>8</i>
2.3. <i>Das Klima</i> .....	<i>12</i>
2.4. <i>Die Landnutzung und Vegetation</i> .....	<i>13</i>
2.5. <i>Das Extremereignis im Schwarzenseebachtal am 17.07.2010</i> .....	<i>14</i>
3. <i>Theoretischer Hintergrund</i> .....	<i>19</i>
3.1. <i>Das Phänomen Mure</i> .....	<i>20</i>
3.1.1 <i>Die Modellierbarkeit von Murgängen</i> .....	<i>23</i>
3.2. <i>Extremereignisse mit Kaskadeneffekte im Hochgebirge</i> .....	<i>26</i>
3.2.1. <i>Modellierung von Extremereignissen mit Kaskadeneffekten im Hochgebirge</i> ..	<i>29</i>
3.3. <i>r.avaflow und seine Funktionsweise</i> .....	<i>31</i>
3.4. <i>(Sediment-)Konnektivität</i> .....	<i>33</i>
3.4.1. <i>Dimensionen der Konnektivität</i> .....	<i>35</i>
3.4.2. <i>Puffer, Barrieren und Decken (Buffers, Barriers and Blankets)</i> .....	<i>37</i>
3.4.3. <i>Der Effective Catchment Area-Ansatz (ECA)</i> .....	<i>40</i>
3.4.4. <i>Der Index of Connectivity (IC)</i> .....	<i>41</i>
4. <i>Methodisches Vorgehen</i> .....	<i>43</i>

4.1. <i>Datengrundlage und Datenaufbereitung</i> .....	44
4.2. <i>Modellierung des Indexes IC und des ECA-Ansatzes</i> .....	45
4.2.1. <i>Modellierung der ECAs</i> .....	46
4.2.2. <i>Modellierung der ICs</i> .....	49
4.3. <i>Modellierung mit r.avaflow</i> .....	51
4.3.1. <i>Modellierung eines potenziellen Extremereignisses, welches dem Extremereignis vom 17.07.2010 gleicht</i> .....	53
4.3.1.1. <i>Die stauenden Murabgänge</i> .....	53
4.3.1.2. <i>Die Durchbrüche der Stauungen</i> .....	61
4.3.2. <i>Modellierung einer Auswahl möglicher Szenarien von Extremereignisse</i> .....	64
4.3.2.1. <i>Szenarienauswahl für die Modellierung</i> .....	65
4.3.2.2. <i>Modellierung des Extremeszenarios A</i> .....	67
4.3.2.3. <i>Modellierung des Extremeszenarios B</i> .....	67
5. <i>Ergebnisse und Auswertung</i> .....	69
5.1. <i>Ergebnisse der Modellierung des Indexes IC und des ECA-Ansatzes</i> .....	69
5.1.1. <i>Ergebnisse der ECAs</i> .....	69
5.1.2. <i>Ergebnisse der ICs vor und nach den Modellierungen der Murabgänge</i> .....	72
5.2. <i>Ergebnisse der Modellierung mit r.avaflow</i> .....	78
5.2.1. <i>Das modellierte Extremereignis wie vom 17.07.2010</i> .....	78
5.2.1.1. <i>Die stauenden Murabgänge</i> .....	78
5.2.1.2. <i>Die Durchbrüche nach den Aufstauungen</i> .....	82
5.2.2. <i>Die Modellierung der Extremeszenarien</i> .....	84
5.2.2.1. <i>Extremeszenario A</i> .....	85
5.2.2.2. <i>Extremeszenario B</i> .....	90
6. <i>Diskussion</i> .....	96
6.1. <i>Diskussion der Analyseergebnisse</i> .....	96
6.2. <i>Einschränkungen der Arbeit und Ausblick</i> .....	105
7. <i>Zusammenfassung</i> .....	111
8. <i>Literaturverzeichnis</i> .....	CXIII
9. <i>Anhang</i> .....	CXXVI

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes Schwarzenseebachtal mit einer geographischen Einordnung in Österreich (Quelle: Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023; Darstellung: eigene Darstellung).....	8
Abbildung 2: Geologischer Überblick des Untersuchungsgebietes (Quelle: SCHUSTER et al. 2013; eigene Bearbeitung) .....	9
Abbildung 3: Detaillierte Geologische Karte des Schwarzenseebachtals (Quelle: Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023; Darstellung: eigene Darstellung) .....	10
Abbildung 4: Potenzielles Bergsturzgebiet orographisch nach dem Schwarzensee mit den eingezeichneten erkennbaren morphologischen Merkmalen eines Bergsturzes in diesem Bereich (Quelle: Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023; Darstellung: eigene Datstellung) .....	11
Abbildung 5: Typisches Landschaftsbild des Schwarzenseebachtals vom Parkplatz der Breitlahnhütte in nördliche Richtung (Quelle: eigene Aufnahme, Juni 2023).....	11
Abbildung 6: Klimadiagramm nach Walter/Lieth der Station Kleinsölk auf 1005 m.ü.A. Dargestellt sind die monatlichen Mitteltemperatur sowie die monatlichen mittleren Niederschlagssummen der Jahre 1971 bis 2000 (Quelle: Datengrundlage: ZAMG 2002; Darstellung: eigene Darstellung).....	12
Abbildung 7: Höhenstufen der Vegetation vom Tiefland bis ins Hochgebirge. Die Ausprägung der Vegetation variiert zwar regional, die Abfolge der Lebensformen gilt aber global, wobei die Grenzen in trockenen, kontinentalen Klima höher liegen als in feuchten Klima (KADEREIT et al. 2014: 841) .....	13
Abbildung 8: INCA-Analyseergebnisse der ZAMG vom Niederschlagsereignis im Schwarzenseebachtal am 17.07.2010. INCA-Analysen basieren auf einer Kombination aus Radar- und Stationsdaten (Quelle: ZAMG, übermittelt durch die Autoren PÖPPL und SASS 2020; verändert) .....	15
Abbildung 9: Bilder vom Kleinsölktaal unterhalb des UGs Schwarzenseebachtal nach dem fluviatilen Sedimenttransport im Kleinsölktaal nach den Durchbrüchen im Schwarzenseebachtal (Quelle: übermittelt durch PÖPPL und SASS 2020; Copyright: MAYERL 2010) .....	16
Abbildung 10: Bilder der Vermurungen im UG nach dem Extremereignis vom 17.07.2010. In Bild (1) und (2) ist der Blick von der oberen Einstauung Richtung Talausgang gerichtet, in Bild (3) und (4) ist die Breitlahnhütte zu erkennen, in Bild (5) ist der Blick taleinwärts gerichtet, auf Bild (6) ist der Blick auf den Murkegel des Stummerbaches gerichtet, in Bild (7) sieht man, auf den Bereich der mittleren Einstauung und in Bild (8) ist der Auslass des Schwarzenseebachtals und die massive Materialablagerung zu erkennen (Quelle: übermittelt durch PÖPPL und SASS 2020; Copyright: MAYERL 2010) .....	17
Abbildung 11: Ausschnitt des Schwarzenseebachtals mit den Stauungsbereichen (türkis) sowie den kartierten Schadensflächen (in transparent gelb) im Bereich zwischen Mündungsbereich Lassachbach (unten links) und Auslass (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023 und PÖPPL und SASS 2020, IfGR).....	18
Abbildung 12: Typisierung gravitativer Massenbewegungen nach CARSON und KIRKBY (2009). Durch die drei Ecken werden die grundlegenden Bewegungsarten dargestellt, auch wenn es in der Natur meistens zu Kombinationen dieser Bewegungsarten kommt. Des Weiteren wird nach Materialfeuchte und nach Geschwindigkeit unterschieden (Quelle: ZEPP 2023) .....	20
Abbildung 13: Klassifizierung von gravitativen Massenbewegungen nach VARENS (1978) (Quelle: VARENS 1978).....	21
Abbildung 14: Eigenschaften von Murgängen im Vergleich zu hyperkonzentrierten Abflüssen und Wasserabflüssen nach SELBY 1993 (Quelle: DIKAU et al. 2019).....	22
Abbildung 15: Vereinfachte meteorologische Auslösetypen für Muren in verschiedenen Regionen Österreichs. LLR=langanhaltender Niederschlag, SDS=Gewitter, SM = Schneeschmelze (Quelle: KAITNA et al. 2020; Daten basieren auf einer Studie von PRENNER et al. 2019) .....	23
Abbildung 16: Beziehung zwischen der Schub- bzw. Scherspannung (Quelle: DIKAU et al. 2019) .....	24
Abbildung 17: Rheologische Klassifikation von Wasser-Sediment-Gemischen unterschiedlicher Zusammensetzung auf Basis der Beziehung zwischen Sedimentkonzentration und Fließgeschwindigkeit nach PIERSON und COSTA (1987) (Quelle: DIKAU et al. 2019) .....	24
Abbildung 18: Extremereignisse im Gebirge und ihre Wechselbeziehungen. Oben sind die auslösenden Faktoren (Erdbeben, meteorologische Extreme) und die Einflussfaktoren angegeben. Die roten Pfeile zeigen die unmittelbar ausgelösten Naturgefahren an (gekoppelte Gefahren). Die schwarzen Pfeile zeigen Prozessketten an, d.h. eine Gefahr verursacht im Laufe der Zeit eine andere Gefahr. (A) Schneekakkumulationen, die Schneelawinen auslösen, (B) Erdbeben, die gleichzeitig Erdrutsche und Schneelawinen auslösen, (C) extreme Niederschläge, die Erdrutsche, Murgänge, Überschwemmungen und Bodenerosion verursachen, (D) Trockenheit und/oder Blitzschlag, die Waldbrände verursachen, (E) Erdbeben, die technologische Gefahren verursachen, (F) Erdrutsche und Murgänge, die Flüsse aufstauen und Dammbruchüberschwemmungen verursachen, (G) große, schnelle Erdrutsche oder Felsstürze in Stauseen, die Wasserüberschwemmungen verursachen, (H) Murgänge, die in der flussabwärts gelegenen Wildbachstrecke zu	

Überschwemmungen führen; (I) Schneelawinen oder Waldbrände, die zu Bodenerosion führen, (J) Waldbrände, die zu oberflächlichen Erdrutschen, Murgängen und Sturzfluten führen, (K) Erdrutsche, Murgänge oder Überschwemmungen, die zu technischen Gefahren führen (Quelle: VAN WESTEN et al. 2014).....	27
Abbildung 19: Arten der Erfassung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Naturgefahrenprozessen: Identifizierung von Gefahreninteraktionen (a). Die Abbildung zeigt eine 21 x 21 Interaktionsmatrix mit primären Gefahren auf der vertikalen Achse und sekundären Gefahren auf der horizontalen Achse. Die Matrix zeigt Fälle, in denen eine Primärgefahr eine Sekundärgefahr auslösen könnte (oben links schattiert) und Fälle, in denen eine Primärgefahr die Wahrscheinlichkeit für eine Sekundärgefahr erhöhen könnte (unten rechts schattiertes Dreieck). Dunkelgrau schattiert sind die Wirkungszusammenhänge, bei denen eine Primärgefahr ein mehrfaches Auftreten der Sekundärgefahr auslösen oder begünstigen kann. Es werden sechs Gefahrengruppen unterschieden: geophysikalische (grün), hydrologische (blau), flache Oberflächenprozesse (orange), atmosphärische (rot), biophysikalische (violett) und extraterrestrische (grau) (Quellen: GILL und MALAMUD 2014; PÖPPL und SASS 2020).....	29
Abbildung 20: Vergleichstest bei der Entwicklung des Mehrphasenmodells. So stellt (b)-(i) die Fließhöhen zu verschiedenen Zeitpunkten dar, und (j) die maximale Fließhöhe während der gesamten Simulation. Hier sind sowohl die einzelnen rheologischen Eigenschaften zu erkennen, als auch die unterschiedlichen Interaktionen zwischen den Phasen (Quelle: PUDASAINI und MERGILI 2019).....	30
Abbildung 21: Logischer Aufbau von r.avaflow. Jedes Skript ist hierbei farblich kenntlich gemacht (Quelle: MERGILI et al. 2017).....	32
Abbildung 22: Schematische Darstellung der (Dis-) Konnektivität der Sedimentflüsse im Gelände mit einer hohen Reliefenergie im Vergleich zu einem Gelände mit einer niedrigen Reliefenergie. (a) Einzugsgebiete mit hoher Reliefenergie weisen in der Regel eine hohe Abflussdichte auf. Diese Einzugsgebiete werden von steilen Sediment-Quellgebieten und effiziente Transferzonen dominiert. (b) Innerhalb der Quellgebiete werden erhebliche Mengen an Sedimentmaterial aus Hangrinnenkomplexen und Erdrutschen zugeführt. Das Sediment wird entlang der Gerinne effektiv weitergeleitet. Gelegentliche Blockaden in Form von Schwemmfächern behindern den Transport von Sedimenten flussabwärts. Insgesamt ist die Konnektivität hoch. (c) Im Gegensatz dazu weisen Einzugsgebiete mit geringer Reliefenergie in der Regel eine niedrige Abflussdichte auf. Steile Gebiete sind in der Regel relativ klein und flache Schwemmlandebenen ausgedehnt. (d) Dabei gibt es große Sedimentsenken, die den Sedimenttransport durch das System puffern und unterbrechen. Der größte Teil des Sediments, das dem Entwässerungssystem zugeführt wird, stammt von der Talsohle. Insgesamt besteht eine niedrige Konnektivität (Quelle: FRYIRS et al. 2007a).....	34
Abbildung 23: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren auf die Sediment- und Fluvial-Konnektivität nach KREESSTRA et al. (2018) (Quelle: KREESSTRA et al. 2018).....	34
Abbildung 24: Die vier Dimensionen der Konnektivität nach WARD 1989 (Quelle: WARD 1989, verändert) .....	36
Abbildung 25: Schematische Darstellung der effektiven Zeitskala. Die effektive Zeitskala (temporale Konnektivität) wird entweder durch die Größe des erforderlichen Ereignisses ausgedrückt, welches Puffer, Barrieren oder Decken durchbrechen kann oder durch die Verweilzeit von Sedimentspeichern und Senken. Sie spiegelt den Zeitrahmen wider, in der sich die Konnektivität verändert (Quelle: FRYIRS et al. 2007a).....	37
Abbildung 26: Mögliche Beziehungen von Nebenfluss/Hang und Hauptgerinne nach FRYIRS et al. (2007b) (Quelle: SCHOPPER et al. 2019).....	38
Abbildung 27: Beispiele für Puffer (a)-(d), Barrieren (e)-(h) und Decken (i) und (j) (Quelle: FRYIRS et al. 2007a).....	39
Abbildung 28: Schematische Darstellung, wie die Hangaufwärts- und Hangabwärtskomponenten definiert werden (Quelle: BORSELLI et al. 2008).....	42
Abbildung 29: Schematische Darstellung der Funktion „Fill“ (Quelle: ARCGIS PRO 2023).....	45
Abbildung 30: Schematische Darstellung der Funktionen „Flow Direction“ (links) und „Watershed“ (Quelle: ARCGIS PRO 2023).....	47
Abbildung 31: A: Erkennbare Sedimentablagerungen bis zum Schwarzenbach, weshalb das dazugehörige Einzugsgebiet verbunden ist; B: Verbunden, da das Material trotz einen möglichen Buffer durch alluviale Ablagerung bis zum Schwarzenbach transportiert wird; C: Durch Untertunnelung unter der Zufahrtsstraße (Standort der Kamera) eindeutig verbunden; D: Materialablagerungen auf der Vegetation bis zum Schwarzenbach ist erkennbar, weshalb auch hier ein lateraler Sedimenteintrag erkennbar ist; E: Ein nicht verbundenes Einzugssystem, da der Sedimenttransport vorher durch einen Buffer (Überschwemmungsgebiet/Schuttkegel) stoppt; F: Durch Straße (Buffer) geblocktes Einzugsgebiet (bei größeren Ereignissen dürfte die Straße allerdings überspült werden) (Quelle: eigene Aufnahmen 29.07.2023).....	48
Abbildung 32: Ein neu definiertes ECA (türkis umrandet) aufgrund der Zufahrtsstraße als blockendes Element (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).....	49
Abbildung 33: Um den Schwarzenbach ist deutlich der Punktlayer zu erkennen, welcher den Böschungsbereich und jeden möglichen Auslasspunkt von ECAs darstellt. Neuberechnung eines ECAs, welches verbunden ist, aber nicht als	

einzelnes ECA ausgegeben wurde, da, aufgrund der Straße, der Auslass falsch berechnet wurde (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023) .....	49
Abbildung 34: Die Benutzeroberfläche der SedInConnect 2.3 Anwendung, mit den verfügbaren Eingabemöglichkeiten (Quelle: eigener Screenshot; 03.10.2023) .....	50
Abbildung 35: Wichtige Eingabe- und Ausgabeparameter von r.avaflow nach MERGILI et al. (2017a) – s: fest; f: flüssig; tinsgesamt. Anmerkungen (Remarks): 1: obligatorisch; 2: entweder A, B oder C+D obligatorisch, wobei C+D auch zusätzlich zu A oder B angegeben werden kann; $nd \geq nc$ , wenn $nd > nc$ die verbliebenen Eingabedatensätze von D Ausgabe Hydrographen sind; 3: A oder B kann angegeben werden, wenn Loslösen und Mitnahme (Entrainment) aktiviert ist, andernfalls sind alle Werte von $H_{E\max} = \infty$ ; C ist obligatorisch wenn Entrainment aktiviert ist; 4: zumindest ein Datensatz von A, B und C ist für die Validierung obligatorisch. Einige Funktionen und mögliche Eingabeparameter wurden seit der Veröffentlichung 2017 noch hinzugefügt, wobei die grundlegenden Eingabeparameter die gleichen sind (Quelle: MERGILI et al. 2017a).....	52
Abbildung 36: Die Versuchsmure beim Stiegelbach mit den flächigen Anrissbereichen und den linienhaften Anrissbereichen. Des Weiteren ist eine Ablagerung einer Modellierung zu erkennen. Auch die Schadenflächen, Aufstauungen des Schwarzenseebaches und die Einzugsgebiete der Gerinnemuren sind zu erkennen (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023 und PÖPPL und SASS 2020, IfGR).....	58
Abbildung 37: Ausschnitte von Orthofotos von 2006 (Oben) und nach dem Extremereignis 2010 (Mitte) sowie mit den flächigen und linienhaften Anrissbereichen (Unten), wobei je roter die Farbe, desto mächtiger die Anrisstiefe (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).....	59
Abbildung 38: Ausschnitt aus dem Orthofoto von 2010 nach dem Extremereignis mit Anrisen von Hangmuren und einer kleineren Gerinnemure (Oben) und ohne die digitalisierten Anrisse (Unten). Auf beiden Ausschnitten sieht man die Stauung beim Stiegelbach (türkis) und die digitalisierten Schadensflächen (gelb) (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).....	60
Abbildung 39: Die Murablagerungen der Modellierung der stauenden Murabgänge mit dem zusätzlichen Material (siehe rote Kreise), um die nötige Dammhöhen zu erreichen in Metern (Quelle: eigene Darstellung).....	63
Abbildung 40: Fluvialer Feststofftransport während des Extremereignisses am 17.07.2010 bei der Breitlahnhütte (Quelle: Infotafel bei der Breitlahnhütte; Copyright: ZEHETNER).....	64
Abbildung 41: Mündungsbereich des Lassachbaches als Hillshade (links) und als Orthofoto von 2010 (rechts). Die gelben Bereiche sind die ermittelten ECAs, wobei links in den Ausschnitten die Mündung des Lassachbaches ist. Auf dem Orthofoto ist zu sehen, wie sich das Material aus dem Lassachbach vom Extremereignis 2010 abgelagert hat und auf dem Hillshade erkennt man die Struktur des Ablagerungsbereiches. Gegenüber des Mündungsbereiches des Lassachbaches ist keine ermitteltes ECA zu erkennen (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).....	66
Abbildung 42: Mündungsbereich der Bärenrinne vom Orthofoto 2012 mit den erkennbar aufgeschütteten Dämmen (Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).....	66
Abbildung 43: Die modellierten und im Feld validierten ECAs des Schwartenseebaches. Es wurden jene Einzugsgebiete als ECA ausgewiesen, die im Feld als gekoppelt identifiziert werden konnten. Falls Einzugsgebiete durch antropogenen Einfluss eine andere Ausdehnung aufwiesen als durch die Modellierung ausgewiesen, wurden diese vorher angepasst (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).....	70
Abbildung 44: Standort der Kamera ist am Rand der Straße (ca. 40 m nördlich von ECA-Nr. 17), während sich der Schwarzenseebach hinter der Kamera befindet. Rechts unten im Bildrand ist ein Rohr für die Untertunnelung zu erkennen, während in der Bildmitte bis zum Rohr eine Sedimentensenke (Puffer) zu erkennen ist, da das Rohrende in der Luft endet und keinen Kontakt zum Boden hat (Quelle: eigene Aufnahme 29.06.2023).....	71
Abbildung 45: Wehranlage kurz vor dem Auslass des Schwarzenseebachtals (nähe ECA-Nr. 3). Die Begradiung des Flusslaufes ist an beiden Seiten des Flusslaufes zu erkennen (Quelle: eigene Aufnahme 29.06.2023).....	72
Abbildung 46: Links: Mündungsbereich des Lassachbaches (ECA-Nr. 19). Rechts: Mündungsbereich des Stummerbaches (ECA-Nr. 11) (Quelle: eigene Aufnahme 29.06.2023).....	72
Abbildung 47: Der IC mit dem Schwarzenseebach als Zieleingabe auf dem DEM von 2012 vor den modellierten Murablagerungen. Durch die Zieleingabe wird dabei der Grad der lateralen Konnektivität zum Schwarzenseebach ausgedrückt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Einzugsgebiet des Schwarzensees in Bezug auf den Schwarzenseebach eine geringe Konnektivität aufweist, während es insbesondere auf der orographisch linken Seite einige Hänge gibt, welche eine hohe Konnektivität aufweisen. Auch auf der orographisch rechten Seite gibt es einige Hänge welche einen hohen IC-Wert aufweisen, allerdings sind auf einem hohen Niveau der Konnektivität weniger Bereiche vorhanden, die die höchsten IC-Werte aufweisen, wie auf der orographisch linken Seite.....	73
Abbildung 48: Der IC auf Grundlage des DEMs von 2012 ohne Zieleingabe, was bedeutet, dass die Konnektivität in Bezug auf den Auslass abgebildet wird. Somit kann die laterale aber auch die longitudinale Konnektivität berücksichtigt werden. Allerdings ist ebenfalls zu erkennen, dass die Konnektivität stärker wird, je näher am Auslass der IC untersucht wird. Die	

- beiden Bereiche mit den hohen IC-Werten in der Nähe des Auslasses (die roten Bereiche), sind allerdings nicht in Bezug auf den Auslass berechnet worden, sondern zum Rand des Ausschnittes, weshalb diese Bereiche in die Betrachtung des Schwarzenbachtales nicht zu beachten sind ..... 74
- Abbildung 49: Die ICs nach den modellierten Murabgängen des Extremereignisses 2010 (Oben), des Extremeszenarios A (Mitte) und des Extremeszenarios B (Unten). Auf der linken Seite sind die jeweiligen ICs bei denen sich die Konnektivität auf den Auslass bezieht und auf der rechten Seite sind die ICs, bei denen als Ziel der Schwarzenbach eingegeben wurde, auf das sich die Konnektivität bezieht. Somit werden auf der linken Seite die laterale und die longitudinale Konnektivität gleichzeitig dargestellt, während auf der rechten Seite die laterale Konnektivität im Kontext des Schwarzenbachs dargestellt wird..... 75
- Abbildung 50: Die drei ICoDs der ICs der DEMs nach den Murablagerungen der Modellierungen der Murabgänge, von denen der IC auf Grundlage des DEMs von 2012 subtrahiert wurde. Bei diesen ICoDs wurden die ICs ohne den Schwarzenbach als Zieleingabe verwendet. Insbesondere die drei Stauungsbereiche weisen nach den modellierten Muren eine geringere Konnektivität nach dem IC auf. Insbesondere beim Vergleich der ICs nach den Muren der Extremeszenarien mit dem DEM von 2012 ist die verringerte Konnektivität zu erkennen, wenngleich diese auch bei dem Vergleich des ICs nach den modellierten Murabgängen des Extremereignisses mit dem IC von vor dem modellierten Extremereignis zu erkennen ist. .... 76
- Abbildung 51: Die drei ICoDs der ICs der DEMs nach den Murablagerungen der Modellierungen der Murabgänge, von denen der IC auf Grundlage des DEMs von 2012 subtrahiert wurde. Bei diesen ICoDs wurden die ICs mit dem Schwarzenbach als Zieleingabe verwendet. Einige lateralen Gebiete weisen nach den Murablagerungen eine geringere Konnektivität nach dem IC auf. Insbesondere beim Vergleich der ICs nach den Muren der Extremeszenarien mit dem DEM von 2012 ist die verringerte Konnektivität zu erkennen, wenngleich sich die Gebiete je ICoD, die eine geringere Konnektivität aufweisen, teilweise unterscheiden. .... 77
- Abbildung 52: r.avaflow-Ausgabe-Plots der Modellierung der Murabgänge von ausgewählten Zeitpunkten nach 400, 800, 1000, 1100 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 1200 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die einzelnen Murabgänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Modellierung gestartet haben und wie sich das Material der modellierten Muren während der Modellierung bewegt. Auf dem Ausgabe-Plot nach 1200 Sekunden sind im Talsohlebereich des Schwarzenbachs die Ablagerungen der Muren zu erkennen. .... 80
- Abbildung 53: Vergleich zwischen den Modellierten Ablagerungen sowie dem Orthofoto vom September 2010 eines Ausschnittes von der Breitlahnhütte bis zum Stauungsbereich des Stiegelbaches. So ist der Stauungsbereich des Stummerbaches gut zu sehen (Quelle: eigene Modellierung des Ablagerungsbereiche; Datengrundlage Orthofo: LAND STEIERMARK 2023). .... 81
- Abbildung 54: r.avaflow-Ausgabe-Plots der Modellierung der Durchbruchsflut von ausgewählten Zeitpunkten nach 0, 1000, 10000 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 20000 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die Stauungsbereiche mit der r.lakefill Erweiterung von r.avaflow aufgefüllt wurden und in weiter Folge das Material Talauswärts fließt. Der Eingabe-Hydrgraph simuliert den Abfluss oberhalb der Stauungsbereiche, welcher bei einer Fließhöhe zwischen 0,1 m und ca. 1 m zurückstaut. Nach 20000 Sekunden (ca. 5 ½ Stunden) bewegt sich die die Durchbruchsflut Richtung Mündungsbereich des Kleinsölkbaches. .... 83
- Abbildung 55: Links ist ein vertikales Höhenprofil nach 20000 Sekunden zu sehen, welches die Fließgeschwindigkeit je Profilschnitt anzeigt. Das Höhenprofil entspricht der gelben Linie in Abbildung 54. Rechts ist der Ausgabe-Hydrograph zu erkennen, welcher sowohl für die flüssige als auch für die feste Phase die Fließhöhe (in m) und den Abfluss (in m³/s) am Auslass des Schwarzenbachtales anzeigt..... 84
- Abbildung 56: Die Unterschiede der modellierten Ablagerungen zwischen dem modellierten Extremereignis 2010 und dem Extremeszenario A angegeben in Metern. Die modellierten Ablagerungen des Extremereignisses wie von 2010 wurde von den modellierten Ablagerungen des Extremeszenarios A subtrahiert, um insbesondere die Mehrablagerungen des Extremeszenarios A deutlich zu machen (grün, gelb und rot). Dabei wurden alle Unterschiede die größer 0,3 oder kleiner - 0,3 Metern waren angezeigt. Der rote Kreis zeigt den Bereich der Breitlahnhütte an. .... 87
- Abbildung 57: r.avaflow-Ausgabe-Plots der Modellierung der Murabgänge des Extremeszenarios A von ausgewählten Zeitpunkten nach 400, 800, 1000, 1100 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 1300 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die einzelnen Murabgänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Modellierung gestartet haben und wie sich das Murmaterial während der Modellierung bewegt. Auf dem Ausgabe-Plot nach 1300 Sekunden sind im Talsohlebereich des Schwarzenbachs die Ablagerungen der Muren zu erkennen. (Warum die Schadensflächen des Extremereignisses von 2010 bei dieser Abbildung integriert wurde, konnte nicht geklärt werden). .... 88
- Abbildung 58: r.avaflow-Ausgabe-Plots der Modellierung der Durchbruchsflut von ausgewählten Zeitpunkten nach 0, 1000, 10000 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 20000 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die Stauungsbereiche mit der r.lakefill Erweiterung von r.avaflow aufgefüllt wurden und in weiter Folge das Material Talauswärts fließt. Der Eingabe-Hydrgraph simuliert den Abfluss oberhalb der Stauungsbereiche, welcher bei einer

Fließhöhe zwischen 0,1 m und ca. 1 m zurückstaut. Nach 20000 Sekunden (ca. 5 ½ Stunden) bewegt sich die die Durchbruchsflut Richtung Mündungsbereich des Kleinsölkbaches, wobei die Front der Flut eine längere Strecke zurückgelegt hat als bei der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010..... 89  
 Abbildung 59: Links ist ein vertikales Höhenprofil nach 20000 Sekunden zu sehen, welches die Fließgeschwindigkeit je Profilabschnitt anzeigt. Das Höhenprofil entspricht der gelben Linie in Abbildung 58. Rechts ist der Ausgabe-Hydrograph zu erkennen, welcher sowohl für die flüssige als auch für die feste Phase die Fließhöhe (in m) und den Abfluss (in m³/s) am Auslass des Schwarzenseebachtals anzeigt..... 90  
 Abbildung 60: Die Unterschiede der modellierten Ablagerungen zwischen dem modellierten Extremereignis 2010 und dem Extremzenario B angegeben in Metern. Die modellierten Ablagerungen des Extremereignisses wie von 2010 wurde von den modellierten Ablagerungen des Extremzenarios B subtrahiert, um insbesondere die Mehrablagerungen des Extremzenarios B deutlich zu machen (grün, gelb und rot). Dabei wurden alle Unterschiede die größer 0,3 oder kleiner -0,3 m sind angezeigt. Der rote Kreis zeigt den Bereich der Breitlahnhütte an. Am meisten fällt beim Vergleich mit der Abbildung 56 die größeren Mächtigkeiten und eine größere Fläche von longitudinalen Murablagerungen der stauenden Murabänge und im Stummerbachtal (ECA-Nr.: 11) auf..... 92  
 Abbildung 61: r.avaflow-Ausgabe-Plots der Modellierung der Murabänge des Extremzenarios B von ausgewählten Zeitpunkte nach 400, 800, 1000, 1100 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 1300 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die einzelnen Murabänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Modellierung gestartet haben und wie sich das Murmaterial im Laufe der Modellierung bewegt. Auf dem Ausgabe-Plot nach 1300 Sekunden sind im Talsohlebereich des Schwarzenseebaches die Ablagerungen der Muren zu erkennen. .... 93  
 Abbildung 62: r.avaflow-Ausgabe-Plots der Modellierung der Durchbruchsflut von ausgewählten Zeitpunkte nach 0, 1000, 10000 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 20000 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die Stauungsbereiche mit der r.lakefill Erweiterung von r.avaflow aufgefüllt wurden und in weiter Folge das Material Talauswärts fließt. Der Eingabe-Hydrpgraph simuliert den Abfluss oberhalb der Stauungsbereiche, welcher bei einer Fließhöhe zwischen 0,1 m und ca. 1 m zurückstaut. Nach 20000 Sekunden (ca. 5 ½ Stunden) bewegt sich die die Durchbruchsflut Richtung Mündungsbereich des Kleinsölkbaches, wobei die Front der Flut eine längere Strecke zurückgelegt hat als bei den Modellierungen des Extremereignisses wie von 2010 und Extremzenario A. .... 94  
 Abbildung 63: Links ist ein vertikales Höhenprofil nach 20000 Sekunden zu sehen, welches die Fließgeschwindigkeit je Profilabschnitt anzeigt. Das Höhenprofil entspricht der gelben Linie Abbildung 62. Rechts ist der Ausgabe-Hydrograph zu erkennen, welcher sowohl für die flüssige als auch für die feste Phase die Fließhöhe (in m) und den Abfluss (in m³/s) am Auslass des Schwarzenseebachtals anzeigt. .... 95  
 Abbildung 64: Ausschnitt aus der Abbildung 56, welcher die mögliche Sackung mit Talzuschub auf der orographisch rechten Seite zeigt. Die hinzugefügten roten Kreise markieren die Murdämme der Stauungen beim Stiegelbach und bei der Haselrinne. Die hinzugefügten blauen Pfeile symbolisieren den hydrologischen Abfluss in den höheren Bereichen der Einzugsgebiete und der rote Pfeil die mögliche Bewegung der Sackung. .... 103  
 Abbildung 65: In dem errechneten IC mit dem Schwarzenseebach als Zieleingabe auf Grundlage des DEMs von 2012 wurden die Ergebnisse der ECA-Analyse integriert. So lässt sich die laterale Konnektivität beider Ansätze gleichzeitig betrachten. Die beiden Ansätze können sich auf diese Weise gut ergänzen, da der IC Unterschiede innerhalb der ECAs anzeigen kann und somit die ECAs ausdifferenziert werden können, und die ECAs zeigen gleichzeitig an, welche Einzugsgebiete tatsächlich „effektive“ Einzugsgebiete sind. So wird z.B. die Unterschätzung des ICs der Seitentäler entlang des Stummerbaches und des Lassachbaches deutlich sowie die ECAs können weiter unterteilt werden, welche Gebiete innerhalb der ECAs einen besonders großen Einfluss auf den Sedimentaustrag haben. Mit diesen Ergebnissen können zwei der drei Stauungen (rote Kreise) gut erklärt werden, da beim Stummerbach zwei ECA gegenüber liegen und beim Stiegelbach ein ECA und auf der orographisch rechten Seite hohen IC-Werte vorhanden sind. .... 104

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die morphologischen Hauptparameter des UGs (Quelle: eigene Darstellung; Daten: eigene Berechnung auf Grundlage der Daten von LAND STEIERMARK 2023).....	7
Tabelle 2: Qualität, Quellen und Jahr der verwendeten Daten (Quelle: eigene Darstellung) .....	45
Tabelle 3: Kennwerte der drei Stauungen durch die Murabgänge: Höhe der Stauung, Höhe vom "Auslass" der Stauung und die daraus resultierende Dammhöhe sowie das Volumen der Stauung (Quelle: eigene Berechnung auf Datengrundlage von: LAND STEIERMARK 2023 sowie PÖPPL und SASS 2020, IfGR) .....	54
Tabelle 4: Der Wertebereich des Datensatzes „Flow Accumulation“ .....	57
Tabelle 5: Kennwerte der ECAs im Schwarzenbachtal .....	71
Tabelle 6: Die ermittelten Eingabeparameter der Modellierung der stauenden Murabgänge.....	78
Tabelle 7: Die ermittelten Eingabeparameter der Modellierung der Durchbrüche nach den Aufstauungen. s=solid (fest) f=fluid (flüssig).....	82

## Abkürzungsverzeichnis

bzw. = beziehungsweise

DEM = Digital Elevation Model (Digitales Höhenmodell = DHM)

d.h. = das heißt

DoD = DEM of Difference

ECA = Effective Catchment Area (Effektive Einzugsgebiete)

engl. = englisch

GIS = Geoinformationssystem

IC = Index of Connectivity (Index der Konnektivität)

ICoD = Indices of Connectivity of Difference

IfGR = Institut für Geographie und Regionalforschung

NOC = Non-Oscillatory Central Differencing

TIN = Triangulated Irregular Network

TVD = Total Variation Diminishing

VS-Modell = Voellmy-Salm-Modell

UG = Untersuchungsgebiet

usw. = und so weiter

z.B. = zum Beispiel

z.T. = zum Teil



## Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit Extremereignissen mit Kaskadeneffekten und deren Modellierbarkeit sowie der (Sediment-)Konnektivität von Hochgebirgsregionen und deren Anwendbarkeit bei der Modellierung von Extremereignissen anhand des Untersuchungsgebietes Schwarzenseebachtal in der Weststeiermark, Österreich. Da es in Hochgebirgsregionen immer wieder zu komplexen schadensbringenden Extremereignissen kommt, braucht es ein vertieftes Prozessverständnis. Dabei sind sowohl physikalische Modelle als auch Konnektivitätsanalysen Methoden, um besser zu verstehen, wie die Prozesse von kaskadenhaften Extremereignissen ablaufen und welche Rückschlüsse für zukünftige kaskadenhafte Extremereignisse herleitbar sind. In dieser Arbeit wird dies anhand des Extremereignisses im Schwarzenseebachtal vom 17.07.2010 untersucht. So werden, durch die Modellierung eines Extremereignisses wie vom 17.07.2010, Muren modelliert, welche kaskadenhaft zu Aufstauungen des Schwarzenseebaches führen und die Murdämme daraufhin nachgeben und eine Durchbruchsflut aus dem UG modelliert wird. Auf diese Weise können die physikalischen Eigenschaften dieser Prozesse besser verstanden werden. Mit diesem besseren Verständnis, anhand der kalibrierten physikalischen und quasi-physikalischen Eingabeparametern, können in Kombinationen mit den Ergebnissen der Konnektivitätsanalysen mögliche Extremeszenarien ausgewählt und modelliert werden. Die Konnektivitätsanalysen zeigen, welche Gebiete funktional gekoppelt und welche entkoppelt sind bzw. wie sich die Konnektivität über das Untersuchungsgebiet verteilt. Diese Erkenntnisse fließen zusammen mit möglichen Umweltveränderungen, wie stärkerer Borkenkäferbefall und intensiverer Oberflächenabfluss, in die Modellierung der Extremeszenarien mit ein, da sie deutlich machen, welche Bereiche eine besonders hohe Wahrscheinlichkeit aufweisen, von gravitativen Massenbewegungen betroffen zu sein. Auf diese Weise können Rückschlüsse auf mögliche Auswirkungen von potenziellen Extremereignissen mit Kaskadeneffekten herleitbar werden und damit Grundlage für mögliche Präventionsmaßnahmen und Anpassungsstrategien sein. So wird deutlich, dass zusätzliche Stauungsbereiche im Vergleich zum Extremereignis 2010 unwahrscheinlich sind, allerdings an den Stauungsbereichen des Extremereignisses vom 17.07.2010 wieder Stauungen mit größeren Volumina und noch stärkere Vermurungen auftreten können. Des Weiteren werden Veränderungen der (Sediment-)Konnektivität während der modellierten Extremereignisse untersucht. Es fällt auf, dass sich die Konnektivität nach den modellierten Muren lateral an einigen Hangabschnitten und longitudinal bei den Stauungsbereichen verringert. Die Konnektivitätsanalysen zeigen, dass das Untersuchungsgebiet eine hohe Konnektivität aufweist und über 55% der Hänge entlang des Schwarzenseebaches gekoppelt sind.



## Abstract

This thesis deals with extreme events with cascading effects and their modelling capability as well as the (sediment-)connectivity of high mountain regions and its applicability in modelling extreme events using the study area Schwarzenseebachtal in Western Styria, Austria. An in-depth understanding of the processes involved is necessary, as such complex and damaging extreme events occur repeatedly in high mountain regions. Both physical modelling and connectivity analysis are methods to better understand the process of cascading extreme events and what conclusions can be drawn for future cascading extreme events. In the present work, this is investigated on the basis of the extreme event in the valley of Schwarzensee on 17 July 2010. By modelling an extreme event such as that of 17.07.2010, debris flows are modelled that lead to cascading damming of the Schwarzenseebach, the debris dams then give way and a breakthrough flood from the UG is modelled. In this way, the physical properties of these processes can be better understood. With this better understanding, possible extreme scenarios can be selected using the calibrated physical and quasi-physical input parameters and modelled in combination with the results of the connectivity analyses. The connectivity analyses show which areas are functionally coupled and which are decoupled, or how connectivity is distributed across the study area. These results, together with potential environmental changes such as increased bark beetle infestation and more intensive surface runoff, are incorporated into the extreme scenario modelling as they indicate which areas are most likely to be vulnerable to gravitational mass movements. In this way, conclusions can be drawn about the possible impacts of potential extreme events with cascading effects, providing a basis for possible preventive measures and adaptation strategies. It becomes clear that additional damming areas are unlikely compared to the 2010 extreme event, but the damming areas of the 17.07.2010 extreme event could experience damming with larger volumes and debris flows could occur to an even greater extent. The change in (sediment) connectivity during the modelled extreme events is also examined, with a decrease in connectivity laterally on some slope sections and longitudinally at the damming areas after the modelled debris flows. The connectivity analyses show that the study area has a high connectivity and more than 55% of the slopes along the Schwarzensee are coupled.



# 1. Einleitung

Gravitative Massenbewegungen, wie Murgänge, murähnliche Prozesse oder flachgründige Rutschungen, sind in alpinen Gebirgen weit verbreitete Phänomene (AHNERT 2015; GROTZINGER und JORDAN 2017; HECKMANN und MORCHE 2019; SCHOPPER et al. 2019). Diese werden häufig durch Starkniederschlagsereignisse ausgelöst und stellen eine Belastung und ein Risiko für die Bewohner:innen und die Infrastruktur dar (ebd.). Diese Ereignisse können auch zu weiteren kaskadenhaften Folgeereignissen führen, wie beispielsweise im Schwarzenseebachtal, am Nachmittag und Abend des 17.07.2010. Dieses Extremereignis im Schwarzenseebachtal stellt die Untersuchungsgrundlage dieser Arbeit dar und das Schwarzenseebachtal ist dementsprechend das Untersuchungsgebiet (UG) der Masterarbeit. Bei diesem Extremereignis wurde der Schwarzenbach auf Grund eines lokalen Starkniederschlagsereignisses durch Murgänge und murartigen Massenbewegungen an mindestens drei Stellen gestaut. Der Pegel des Schwarzenbaches stieg auf Grund des Niederschlagsereignisses stark an und der Wildbach führte, hierdurch und in Folge von erhöhten Sedimenteinträgen von den Hängen in den Schwarzenbach, eine große Menge Sedimentfracht. Dies führte zu Durchbrüchen der drei Stauungen mit anschließender Flutwelle, die sich mit hohem Sedimentgehalt und Geröll- und Holzfracht im Kleinsölktaal bis zur Enns bewegte (BOHNER et al. 2013; KRAML 2016; PÖPPL und SASS 2020). Solche Ereignisse stellen auf Grund der sich gegenseitig verstärkenden (kaskadenartigen) Prozesse mögliche Naturgefahren mit hohem Schadenspotenzial dar (PÖPPL und SASS 2020). Die Modellierung und Vorhersage solcher Extremereignisse stellen in der Forschung auf Grund der hohen Komplexität der Massenbewegungen und der Interaktionen der einzelnen Prozesse eine große Herausforderung dar (MERGILI et al. 2018a; MERGILI et al. 2017a; PUDASAINI und MERGILI 2019; TRUJILLO-VELA et al. 2022).

## 1.1. Hintergrund und Problemstellung

Im Hochgebirge kommt es immer wieder zu sogenannten komplexen Kaskadeneffekten, unter anderem auf Grund der hohen Reliefenergie (AHNERT 2015; BURT und ALLISON 2010; DIKAU et al. 2019) sowie des vorhandenen Materials, welches potenziell mobilisierbar ist (AHNERT 2015; GROTZINGER und JORDAN 2017). Dies erhöht die Naturgefahr und kann häufig, auf Grund der großen Reichweite und der hohen kinetischen Energie solcher kaskadenartigen Ereignisse, zum Naturrisiko werden. Trigger solcher Extremereignisse sind häufig Starkniederschlagsereignisse (VAN WESTEN et al. 2014), welche infolge der Klimaveränderungen voraussichtlich häufiger auftreten werden (z.B. BERG et al. 2013; GOBIET et al. 2014). Somit wird sich die Wahrscheinlichkeit solcher kaskadenartigen Naturgefahren und somit auch das Risiko voraussichtlich erhöhen – auch wenn hierfür bisher keine klare Evidenz vorhanden ist (GLADE et al. 2014).

Vorhersagen solcher kaskadenartigen Ereignisse sind bis heute auf Grund der Komplexität solcher Ereignisse schwierig (CHEN et al. 2016). Modellierungsansätze, welche solche

komplexen gravitativen Massenbewegungen erfassen können, spielen somit eine wichtige Rolle. Gleichzeitig ist die Qualität der Daten solcher Extremereignisse sehr unterschiedlich und auf unterschiedliche Art und Weise limitierend. *r.avaflow* ist eine GIS-basierte Open-Source Modellierungsssoftware, welche sich bei kaskadenartigen Ereignissen schon bewiesen hat. Bisher wurde *r.avaflow* allerdings vor allem in Kontexten eingesetzt, bei denen die einzelnen Kaskadenabschnitte zeitlich direkt aufeinander folgten und gleichzeitig passierten, also miteinander als ein Prozess mit verschiedenen Phasen und deren Wechselwirkungen interagiert haben (Prozesskombinationen) (MERGILI et al. 2020a; MERGILI et al. 2018b; MERGILI et al. 2017a), wobei das Extremereignis im Schwarzenseebachtal (siehe unten) eher eine Prozesskette darstellt (PÖPPL und SASS 2020). Bisher liegt der Fokus von Modellierungen auf einzelnen Prozessen, wie Muren oder Lawinen, welche durch Softwaretools, wie z.B. RAMMS, Kanako 2D oder DFS 2D (ABRAHAM et al. 2022; CHRISTEN et al. 2010; MIKOŠ und BEZAK 2021; YANAGISAKI et al. 2016), modelliert werden. Diese Softwaretools wurden explizit für die jeweiligen gravitativen Massenbewegungen entwickelt. Hier eröffnet *r.avaflow* die Möglichkeit, verschiedene Abschnitte einer Prozesskette zu modellieren, welche unterschiedliche physikalische Bewegungstypen darstellen und aufeinander aufbauen – auch wenn der Fokus bei Modellierungen mit *r.avaflow* bisher auf Prozesskombinationen lag (BAGGIO et al. 2021; MERGILI et al. 2018b; MERGILI et al. 2018a; SHUGAR et al. 2021; VILCA et al. 2021).

Im Schwarzenseebachtal in der Weststeiermark kam es am 17.07.2010 nach einem lokalen Starkniederschlagsereignis zu Gerinnemuren und Hangmuren im gesamten Einzugsgebiet (BOHNER et al. 2013; KRAML 2016). An mindestens drei Abschnitten des Schwarzenseebachtals kam es in Folge zu Stauungen des Schwarzenseebaches durch murartige Abgänge. Da diese Dämme dem Wasser nicht standhalten konnten, kam es zum Durchbruch, was eine Flutwelle zur Folge hatte, welche zahlreiche Schäden verursacht hatte. Bei diesem Ereignis gab es somit eine zeitlich klar getrennte Abfolge von Einzelereignissen, welche allerdings dennoch kaskadenartig einander bedingt und somit verstärkt haben (PÖPPL und SASS 2020). Nach PÖPPL und SASS (2020) ist dieses Ereignis nach der Interaktions-Matrize von GILL und MALAMUD (2014) zur Bestimmung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Naturgefahrenprozessen bei Kaskadeneffekten somit als Typ 1b und Typ 2 einzuordnen. Der Typ 1b bezeichnet eine Massenbewegung, welche zum Aufstau von Fließgewässern und nachfolgend zum Ausbruch der Stauung führt, während der Typ 2 Starkregenereignisse bzw. langanhaltende Niederschläge bezeichnet, was zu gleichzeitiger Fluss- bzw. Wildbach-Überschwemmung und gehäuftem Auftreten von Hangbewegungen führt, weshalb es zu einer Verstärkung von Flutschäden durch erhöhte Sedimentfracht kommt.

Hochgebirgsregionen zeichnen sich durch Landschaften aus, welche durch ein hohes Reliefgefälle einen hohen Grad an Konnektivität aufweisen, wenn die einzelnen Flächen miteinander für den Sedimenttransfer verbunden (connected) sind. Einzelne Gebiete oder ganze Abschnitte in einem Einzugsgebiet können aber auch nicht miteinander verbunden sein (disconnected), was bedeutet, dass diese potenziellen Sedimentquellen, nicht als

Sedimentquellen in dem Einzugsgebiet fungieren. Somit stellen diese entkoppelten Flächen für komplexe Kaskadeneffekte keine Sedimentquellen dar, es sei denn, diese Flächen werden durch ein Ereignis mit dem restlichen Gebiet gekoppelt (BRACKEN et al. 2015; FRYIRS 2013; FRYIRS et al. 2007a). Solche Veränderungen der Konnektivität treten im Hochgebirge durch die Sensitivität des Hochgebirges für Veränderungen, insbesondere bei Extremereignissen, häufig auf. Systemtheoretisch betrachtet können Hochgebirgsregionen auf Grund ihrer Eigenschaften nur kurzzeitig im Gleichgewichtsstadium sein, da durch Triggerereignisse ständig neue zwischenzeitliche Gleichgewichtsstadien (metastabiles Gleichgewichtsstadium) erreicht werden. Das Streben jedes natürlichen Systems nach dem Gleichgewicht (Equilibrium) führt zu ständigen Veränderungen des Hochgebirges (hohe Sensitivität) (AHNERT 2015; DIKAU et al. 2019; HECKMANN und MORCHE 2019; ZEPP et al. 2023). Die Veränderung der Konnektivität ist ein ständig laufender Prozess, welcher in dieser Arbeit auf Grund der besonderen Bedeutung von Extremereignissen auf diese Veränderungen, anhand des Fallbeispiels untersucht werden soll. Im Konzept der Konnektivität wird diese Komponente der Veränderung der Konnektivität über die Zeit durch das Konzept der „Effektiven Zeitskalen“ (effective timescales) von HARVEY (2002) berücksichtigt und als „vierte“ Dimension der Konnektivität bezeichnet (WARD 1989), wobei Extremereignisse eine Schlüsselrolle bei dieser Veränderung der Konnektivität einnehmen. Des Weiteren stellt sich die Frage bei der aktuellen Forschungslage, inwiefern der Konnektivität-Ansatz bezüglich der Modellierung von Extremereignissen hilfreich sein kann und sinnvolle Rückschlüsse für die Modellierungen möglich sind.

## 1.2. Stand der Forschung

Extremereignisse mit Kaskadeneffekten sind noch nicht hinreichend verstanden worden und Vorhersagen sind kaum möglich (CHEN et al. 2016; VAN WESTEN et al. 2014). Modellierungen solcher potenziellen Ereignisse sind auch erst seit kurzem in der Forschung möglich und werden laufend verbessert (MERGILI et al. 2018b; MERGILI et al. 2018a; PÖPPL und SASS 2020; PUDASAINI und MERGILI 2019; WORNI et al. 2014), damit sind zumindest mögliche Folgen solcher Extremereignisse abschätzbar – auch wenn konkrete Vorhersagen solcher Ereignisse weiterhin kaum möglich sind und es weitere Forschung benötigt (CHEN et al. 2016).

Der Konnektivitätsansatz beschreibt, ob ein Einzugsgebiet, die Subeinzugsgebiete und die einzelnen Flächen des Einzugsgebietes miteinander verbunden (connected bzw. coupled) oder nicht verbunden (disconnected bzw. decoupled) sind und damit ob Material und Energie von der Materialquelle zur Materialsenke transportiert werden (BORSELLI et al. 2008; BRACKEN und CROKE 2007; FRYIRS 2013). Dabei wird zwischen verschiedenen Dimensionen der Konnektivität unterschieden. So beschreibt die laterale Konnektivität die Koppelung zwischen Hang bzw. Seitenbereiche des Gerinnes und dem Gerinne, während die longitudinale Konnektivität die Koppelung entlang des Fließgewässers beschreibt und somit, wie gut die einzelnen Abschnitte des Gerinnes miteinander gekoppelt sind (FRYIRS et al. 2007a). Die vertikale Konnektivität beschreibt die Austauschmöglichkeit zwischen der

Oberfläche und dem Untergrund (ebd.). Darüber hinaus wird bei der Konnektivität häufig zwischen struktureller und funktioneller Konnektivität unterschieden, wobei die strukturelle Konnektivität die räumlichen Muster der Landschaft beschreibt und die funktionelle Konnektivität sich auf die Interaktion zwischen diesen Mustern und den Prozessen im Einzugsgebiet bezieht (BRACKEN und CROKE 2007). Für das Thema der Masterarbeit ist die laterale und longitudinale Konnektivität entscheidend. Um diese zu beschreiben, gibt es verschiedene Ansätze, wobei der IC (Index of Connectivity) und der ECA (Effective Catchment Area) Ansätze sind, die schon länger erprobt und häufig angewendet werden (BORSELLI et al. 2008; CAVALLI et al. 2013; FRYIRS et al. 2007b; NICOLL und BRIERLEY 2017; SCHOPPER et al. 2019; SOUZA et al. 2016; WOHL et al. 2019). Der Fokus der Ansätze liegt auf der lateralen Konnektivität (SCHOPPER et al. 2019). Insbesondere im Hochgebirge, welches, auf Grund der hohen morphologischen Aktivität, eine besondere Umgebung bezüglich der Konnektivität darstellt, sind die Unterschiede zwischen verbunden (connected) und nicht verbunden (disconnected) von einzelnen Flächen besonders ausgeprägt (CAVALLI et al. 2013). Neuste Forschung beschäftigt sich mit der Frage inwiefern diese Indizes auch im Kontext von großen Naturereignissen oder Naturgefahren, wie Murgängen, angewendet werden können (SCHOPPER et al. 2019).

r.avaflow ist ein innovatives quelloffenes computergestütztes Werkzeug, um gravitative Massenbewegungen und Prozessketten von einem definierten Freisetzungsbereich über eine beliebige Topographie zu einem Ablagerungsbereich zu simulieren und modellieren. r.avaflow verwendet hierbei ein vielphasiges, interagierendes Modell für Feststoff- und Flüssigkeitsgemische und eignet sich somit für komplexe Prozessketten und deren Interaktionen (MERGILI et al. 2017a). Für komplexe kaskadenartige Extremereignisse eignen sich insbesondere numerische Modelle, wie beispielsweise r.avaflow (MERGILI et al. 2017a; WORNI et al. 2014). r.avaflow wird seit der ersten Veröffentlichung 2017 in zahlreichen Forschungsarbeiten verwendet, um komplexe Massenbewegungen mit Kaskadeneffekten zu modellieren (z.B. BAGGIO et al. 2021; MERGILI et al. 2020a; SHUGAR et al. 2021; VILCA et al. 2021). In dieser Masterarbeit wird versucht, eine Prozesskette wie bei dem Extremereignis im Schwarzenseebachtal mit r.avaflow zu modellieren und aus den kalibrierten Parametern weitere Szenarien zu modellieren, da hiermit ein Wissensbeitrag zum aktuellen Forschungsstand geleistet werden kann. Die Ergebnisse der Modellierung mit r.avaflow, sowohl vom ersten Abschnitt der Modellierung der Prozesskette, als auch der zweite Teil der Modellierung der Prozesskette, werden hinsichtlich der Konnektivität untersucht. Dies stellt einen neuen innovativen Forschungsansatz dar, der die Veränderung der Konnektivität während der Modellierung einer Prozesskette mit Kaskadeneffekten untersuchen soll und leistet somit ebenfalls einen Beitrag zur Wissensgenerierung innerhalb des aktuellen Forschungsstandes.

### 1.3 Forschungsfragen und Zielsetzung

Aus den vorherigen Kapiteln wird deutlich, dass es weitere Forschung des vorgestellten Themas benötigt. Modellierungen mit r.avaflow von komplexen gravitativen Massenbewegungen haben sich schon bewährt, allerdings waren dies meistens Prozesskombinationen und seltener Prozessketten, die zeitlich getrennt nacheinander ablaufen, obwohl diese häufig im Alpenraum auftreten. Die Konnektivität wird häufig mit Hilfe des ECA-Ansatzes und des ICs ermittelt, um zu beschreiben, inwiefern potenzielle Sedimentquellen mit dem fluvialen Entwässerungssystem eines Einzugsgebietes verbunden ist. Welches Potenzial dieser Ansatz bezüglich Extremereignisse hat, ist allerdings bisher noch nicht hinreichend untersucht worden.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Wissensgenerierung des Themas leisten, weshalb folgende Forschungsfragen formuliert wurden:

- **Inwiefern lässt sich ein potenzielles Extremereignis, welches dem Extremereignis vom 17.07.2010 im Schwarzenseebachtal gleicht, mit r.avaflow modellieren?**
  - Auf welche Weise sind mit einer Voellmy-Rheologie in r.avaflow murartige Abgänge modellierbar, die auf die gleiche Weise wie am 17.07.2010 zu Stauungen des Schwarzenseebaches führen?
  - Inwiefern sind Durchbrüche wie am 17.07.2010 des Schwarzenseebaches, nach dessen Stauungen durch die modellierten murartigen Abgänge mit dem Mehrphasenmodell in r.avaflow, modellierbar?
  - Welche Rückschlüsse lassen sich anhand der kalibrierten Eingabeparameter auf das modellierte Extremereignis ziehen?
- **Welche zwei weiteren Extremeszenarien mit komplexen Sedimentkaskadeneffekten sind auf welche Weise mit r.avaflow modellierbar und welche Schlussfolgerungen lassen sich anhand des ICs und des ECA-Ansatzes für die Szenarienauswahl ableiten?**
  - Welche Interpretationen und Folgenabschätzungen lassen sich anhand der Modellierungsergebnisse der Extremeszenarien und der Konnektivitätsanalysen herleiten?
- **Welche räumliche Verteilung weist die (laterale) Konnektivität im Untersuchungsgebiet jeweils vor den modellierten kaskadenhaften Prozessabschnitten des Extremereignissen auf?**
  - Welche Rückschlüsse lassen sich hieraus bezüglich potenzieller Extremereignisse mit Kaskadeneffekten herleiten?
  - Welche Interpretationen und Schlussfolgerungen lassen sich aus den Vergleichen der verschiedenen ICs herleiten?

Die erste Forschungsfrage und die Unterfragen beschäftigt sich mit der Modellierung eines potenziellen Extremereignisses, welches möglichst wie das Extremereignis am 17.07.2010 sein soll und wie diese Modellierung und die Kalibrierung des Modells gelingen kann. Die zweite Forschungsfrage und die dazugehörige Unterfrage, beschäftigen sich mit der Frage, ob Szenarien mit anderen zukünftige Extremereignisse in diesem Untersuchungsgebiet modelliert werden können und ob hierfür die Konnektivitätsanalysen nützliche Schlussfolgerungen ermöglichen. Die dritte und letzte Forschungsfrage und deren Unterfragen versucht zu beantworten, welche Konnektivität das Untersuchungsgebiet aufweist und inwiefern sich die Konnektivität in dem Schwarzenseebachtal durch die modellierten Extremereignisse verändert und welche Schlussfolgerungen für Extremereignisse hieraus gezogen werden können.

### 1.4 Vorgehensweise

Die Forschungsfragen werden mit Hilfe der Konnektivitätsindizes *Index of Connectivity* (IC) sowie *Effective Catchment Area* (ECA) (BORSELLI et al. 2008; CAVALLI et al. 2013; FRYIRS et al. 2007b) und dem Tool r.avaflow (MERGILI 2023) bearbeitet. Hierbei liegt der Fokus auf der Modellierbarkeit solcher Extremereignisse (siehe Kap. 2.5 und Kap. 4.3.2) und welche Schlussfolgerungen und Interpretationen hierbei die Konnektivitätsanalysen bei der Modellierung zulassen.

Um die formulierten Forschungsfragen zu beantworten, ist der Aufbau dieser Arbeit wie folgt konzipiert:

Zuerst blickt diese Arbeit auf das Untersuchungsgebiet (Kap. 2) und die einzelnen Charakteristika und Kennzahlen dieses Gebietes. So werden die Geologie und Geomorphologie, das Klima, die Vegetation sowie die geographische Lage erläutert, um die örtlichen Bedingungen zu verstehen. Nachdem die örtlichen Bedingungen beschrieben wurden, wird das Referenz-Extremereignis vom 17.07.2010 dargelegt und erläutert.

Um in die Forschungsarbeit und das Thema einzuführen, werden im nächsten Kapitel (Kap. 3) die komplexen theoretischen Thematiken umfangreich erläutert. Dabei liegt der Fokus im Besonderen auf Murgänge, Extremereignisse, der Sedimentkonnektivität und den verwendeten Indizes, auf Modellierung von Extremereignissen und auf dem Modellierungstool r.avaflow (MERGILI 2023)

Nachdem die theoretischen Hintergründe beschrieben und erläutert wurden und somit eine Kontextualisierung möglich wird, werden darauf aufbauend im Kapitel 4 die angewandten Methoden zur Beantwortung der Forschungsfragen vorgestellt. Auf diese Weise können die durchgeführten Arbeitsschritte und Analysen nachvollzogen werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen dargelegt und erläutert (Kap. 5) und in weiterer Folge im Hinblick auf die Forschungsfragen diskutiert und eingeordnet. Dabei werden auch die Grenzen der Arbeit und die Folgerungen aus den Grenzen der Arbeit diskutiert (Kap. 6). Abschließend werden die Arbeit und Erkenntnisse zusammengefasst (Kap. 7).

## 2. Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet (UG), das Schwarzenseebachtal, befindet sich im oberen Kleinsölktaal und stellt ein Untereinzugsgebiet des Kleinsölkbaches dar. Das Kleinsölktaal liegt in den österreichischen Alpen in der Weststeiermark in der Gemeinde Sölk im Bezirk Liezen und ist Teil des Natura 2000-Gebietes „Hohe Tauern“. Es befindet sich damit in den Schladminger Tauern. Das UG ist nach dem Schwarzensee, welcher in diesem Tal liegt, benannt. So entspringt auch der Schwarzenseebach aus diesem See, welcher über den Kleinsölkbach in die Enns fließt.

In den folgenden Kapiteln wird es eine kurze Einführung in das UG geben und in weiterer Folge die Geologie, Geomorphologie sowie das Klima und auch die landwirtschaftlichen Tätigkeiten mit der Vegetation des UGs erläutert werden.

### 2.1. Einführung in das Untersuchungsgebiet

#### Schwarzenseebachtal

Das Untersuchungsgebiet (siehe Abbildung 1; für ein detailliertes DEM siehe Abbildung 43) erstreckt sich im Naturpark Sölktaler über eine Fläche von etwa 57 km<sup>2</sup>. Der Schwarzenseebach stellt den Hauptquellarm des Kleinsölkbaches dar, welcher in der Enns mündet. Am Auslass des UGs vereint sich der Schwarzenseebach mit dem Tuchmoarbach zum erwähnten Kleinsölkbach. Da das Untersuchungsgebiet glazial überprägt wurde, handelt es sich bei diesem Tal morphologisch um ein alpines Trogthal in ungefährer Nord-Süd-Richtung mit übersteilten Talhängen (BOHNER et al. 2013). Das kristallin geprägte Tal wird in Kessel-, Hangfuß- und Tallagen von mächtigen, teilweise mobilisierbaren, quartären Sediment- und Schuttdecken überlagert (PÖPPL und SASS 2020). Diese weisen sowohl alluviale, als auch glaziale Genesen auf (BOHNER et al. 2013).

Das Untersuchungsgebiet weist, typisch für kristalline Trogäler, viele kleinere Gräben auf, die dieses Gebiet entwässern. Das Relief reicht von 988 m. ü. NN (Auslass) bis 2.684 m. ü. NN (Deichselspitze) und weist eine mittlere Hangneigung von ca. 37° auf (eigene Berechnungen siehe Tabelle 1; PÖPPL und SASS 2020). Damit weist das Untersuchungsgebiet eine hohe Reliefenergie auf und hat, auf Grund ihrer topographischen Bedingungen, gute Voraussetzungen für das Auftreten und die Entwicklung von Muren oder murähnlichen Prozessen (BOHNER et al. 2013). So gibt es aus dieser Region (Region Sölktaler) einige Berichte über frühere Großereignisse bzw. Extremereignisse (z.B. HERMANN 1996; HERMANN und BECKER 1998). Abbildung 5 zeigt die typischen Landschaftsmerkmale des kristallinen Trogtales in den Alpen in der montanen

*Tabelle 1: Die morphologischen Hauptparameter des UGs (Quelle: eigene Darstellung; Daten: eigene Berechnung auf Grundlage der Daten von LAND STEIERMARK 2023).*

Parameter	Kennzahl
Größe des Einzugsgebietes (km <sup>2</sup> )	57
Niedrigster Punkt (m. ü. NN)	988
Mittlere Höhe (m. ü. NN)	1771
Höchster Punkt (m. ü. NN)	2.684
Mittlere Hangneigung (°)	37

Vegetationsstufe auf (siehe Kapitel *Die Geologie und Geomorphologie* und *Das Klima* sowie *Die Landnutzung und Vegetation*). Aus wirtschaftlicher Perspektive wird dieses Tal in erster Linie sowohl touristisch als auch alm- und forstwirtschaftlich genutzt (KRAML 2016; PÖPPL und SASS 2020).



Abbildung 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes Schwarzenseebachtal mit einer geographischen Einordnung in Österreich (Quelle: Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023; Darstellung: eigene Darstellung).

## 2.2. Die Geologie und Geomorphologie

Ein Blick in die geologische Übersichtskarte aus SCHUSTER et al. (2013) zeigt, dass sich das UG im kristallin befindet und die großen geologischen Formationen somit aus metamorphen Gesteinen bestehen. So ist in Abbildung 2 deutlich zu sehen, dass sich das UG im Ostalpin befindet und hier Orthogneise (vorwiegend Karbon) sowie Paragneise aber auch Glimmerschiefer (Neoproterozoikum) vorherrschen. Somit sind überwiegend silikatische Gesteine der Schladminger Tauern anzutreffen. Dabei weist das UG lithologisch spezifischer betrachtet verschiedene Gneise, Glimmerschiefer und Amphibolite auf (siehe Abbildung 3). So finden sich beispielsweise Hornblendgneise, Granitgneise, magmatische Paragneise, Feinkorngneise aber auch Bänderamphibolite, massive Amphibolite, Glimmerschiefer oder Biotitquarzit der Hornblendekarzitschiefer-Serie, wie in Abbildung 3 ersichtlich wird (LAND STEIERMARK 2023; BECKER 1989). In den höheren Lagen des UGs finden wir Grund-, Seiten- und Endmoränenmaterial. Dieser lithologische Untergrund wird, wie erwähnt, von mächtigen quartären Schuttdecken, Schwemmfächern und Kolluvien in Hangfußlagen, Tallagen und

Kessellagen überlagert, wodurch viel leicht zu mobilisierendes Material vorhanden ist (HERMANN 1996; PÖPPL und SASS 2020).

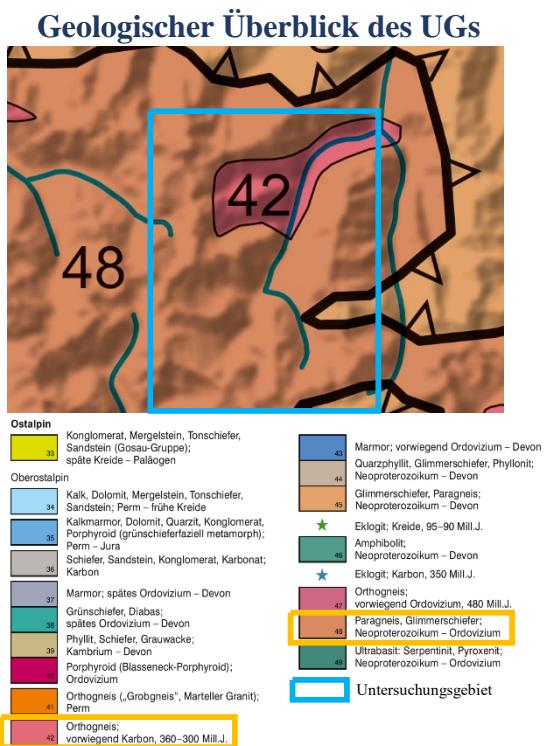


Abbildung 2: Geologischer Überblick des Untersuchungsgebietes (Quelle: SCHUSTER et al. 2013; eigene Bearbeitung).

Stummer Alm bis zum Schwarzenseebach (siehe Abbildung 43 ECA-Nr. 11), als auch entlang des Lassachbaches vom Lassachkar über die Lassachalm bis zum Schwarzenseebach (siehe Abbildung 43 ECA-Nr. 19), sind bei genauerer Betrachtung zwei eigenständige geomorphologische Einzugsgebiete, welche allerdings sehr ähnliche Charakteristika wie das Schwarzenseebachtal aufweisen. Somit sind die Hänge übersteil, viel leicht mobilisierbares Material vorhanden und die Reliefenergie hoch, wodurch ein hohes Aufkommen an gravitativen Massenbewegungen erklärbar ist. Der Schwarzenseebach weist einige Umlagerungsstrecken auf und mäandriert meistens entlang der breiten Talsohle. In den Seitentälern und Karen des Schwarzenseebaches finden sich, wie schon erwähnt, vermehrt End- und Seitenmoränen des Pleistozäns, während im Schwarzenseebachtal vor allem Grundmoränenmaterial aus dem Pleistozän vorzufinden ist (BECKER 1989; LAND STEIERMARK 2023).

Talzuschübe und Sackungen sind auf Grund der Geologie und der Lithologie in dem UG ebenfalls zu erwarten (LAATSCH und GROTTENTHALER 1972; ZISCHINSKY 1969). Die Ursache für das Auftreten dieser Prozesse, ist in unter Anderem der Rückzug der Gletscher nach der letzten Vereisung (Pleistozän). So fehlt den übersteinen Hängen nach dem Rückzug der Eismassen der stabilisierende Faktor des Eises im Tal (ebd.). Diese Prozesse sind allerdings andere Prozesstypen als die schnell ablaufenden Murgänge oder andere Formen der gravitativen Sedimentverlagerung an den Hang- und Tallagen. Sackungen und

Das gesamte UG war während des Pleistozäns vergletschert (BOHNER et al. 2013; DRESCHER 2002; KRAML 2016; SCHUSTER et al. 2013), was nicht nur die heutige Form des Schwarzenseebachtals prägt, sondern damit auch die geomorphologischen Prozesse in diesem Gebiet. Das Landschaftsbild ist aufgrund der glazialen Überprägung durch seine übersteinen Hänge und einer verhältnismäßig breiten Talsohle geprägt. Die Seitentäler – die größten Untereinzugsgebiete des Schwarzenseebachtals – sind Hängetäler, da die glaziale Eintiefung der Haupttäler durch Gletscher stärker ausgeprägt war sowie temporal länger andauerte als die Eintiefung durch tributären Gletscher der Seitentäler (AHNERT 2015; VAN HUSEN 1987; PFIFFNER 2015; ZEPP et al. 2023).

Die erwähnten Seitentäler, sowohl entlang des Stummerbaches vom Stummerkessel über die

Talzuschübe verändern das Relief, auf dem die Murgänge, Rutschung oder auch Einstauungen der Fließgewässer auftreten, und haben somit einen Einfluss auf diese Prozesse. So fällt auf, dass an jenen Orten Stauungen während des Extremereignisses vom 17.07.2010 (Kap. 2.5) auftraten, an denen auf beiden Seiten größere Einzugsgebiete mit murfähigem Material vorhanden sind – die Haselrinne und Bärenrinne bzw. der Stummerbach und die Senftenrinne – und der Schwarzenseebach jeweils von zwei Seiten vermutet wurde. Die mittlere Stauung beim Stiegelbach hingegen wies auf der orographisch linken Seite ein großes Einzugsgebiet und der orographisch rechten Seite nur kleineren Hangmuren auf. Auffallend ist hierbei, dass auf der orographisch rechten Seite des Schwarzenseebaches ein steiler Hangabschnitt nahe am Schwarzenseebach ist. Dieser steile Hangabschnitt, kann die Folge eines Talzuschubs sein, da auf dem DEM gestaffelte Bruchlinien zu erkennen sind, die als eine Sackung und Talzuschub interpretiert werden können (siehe Abbildung 64). Somit hat das Sedimentmaterial der Muren keine Möglichkeit sich über die Talsohle lateral weiträumiger zu verteilen und das Wasser des Schwarzenseebaches hat eine verringerte Ausweichmöglichkeit.

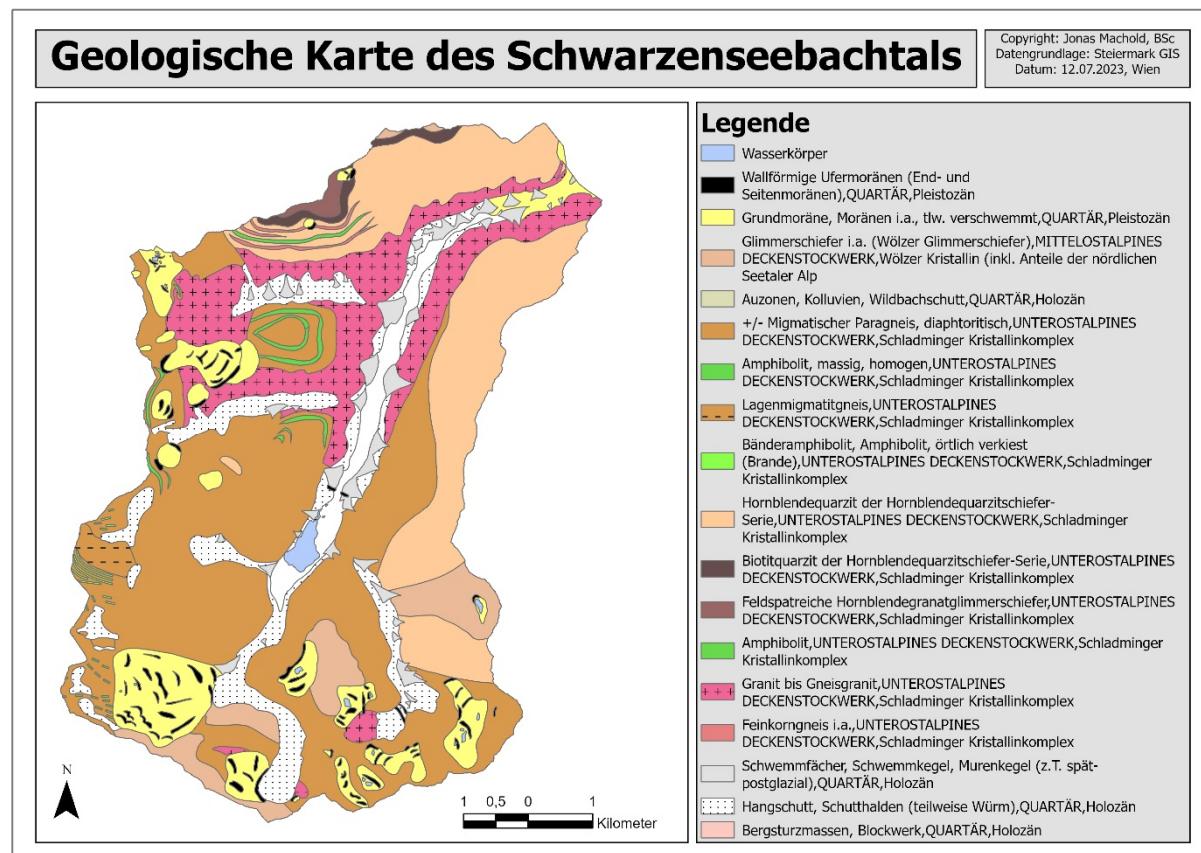


Abbildung 3: Detaillierte Geologische Karte des Schwarzenseebachtals (Quelle: Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023; Darstellung: eigene Darstellung).

Nach genauer Betrachtung des DEMs im Bereich des Schwarzensees, kann die Genese des Sees durch einen Bergsturz interpretiert werden (siehe Abbildung 4). Diese Interpretation der Genese fußt auf der mündlichen Interpretation des DEMs und Feldbegehung vom Geologen Mag. Dr. Johannes T. Weidinger (WEIDINGER 28.07.2023) sowie auf eine kurze Erwähnung und ungefährer Kartierung eines Bergsturzes unterhalb des Schwarzensees von DRESCHER (2002:419f). Es gibt in DRESCHER (2002) weder einen Hinweis auf die Genese



Abbildung 5: Typisches Landschaftsbild des Schwarzenseebachtals vom Parkplatz der Breitlahnhütte in nördliche Richtung (Quelle: eigene Aufnahme, Juni 2023).

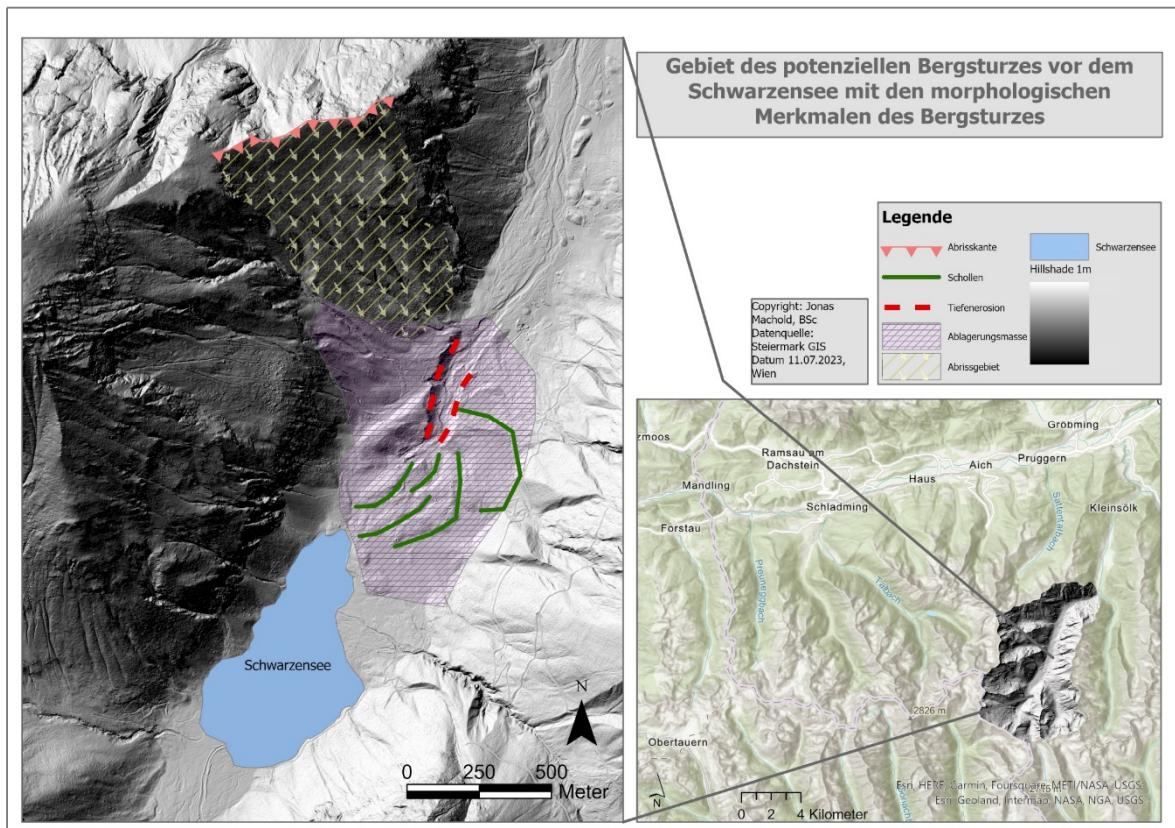


Abbildung 4: Potenzielles Bergsturzgebiet orographisch nach dem Schwarzensee mit den eingezeichneten erkennbaren morphologischen Merkmalen eines Bergsturzes in diesem Bereich (Quelle: Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023; Darstellung: eigene Datstellung).

noch eine Beschreibung des Bergsturzes. Es sind unterhalb des Schwarzensees Erhebungen und schollenartige Strukturen zu erkennen, welche als eine abgelagerte Bergsturzmasse im Tal interpretierbar ist. Eine Abrisskante und potenzielle Gleitfläche an dem Hang der orographisch linken Bachseite ist ebenfalls gut zu erkennen. Auch die Eintiefung durch Tiefenerosion durch den Schwarzenseebach nach der Bergsturzmasse deutet auf eine

Stauung durch abgelagertes Material hin. Auf Grund der Grundform und der Verteilung des Materials im Tal, ist dies bei der Betrachtung des DEMs nicht als (End-)Moränenmaterial interpretierbar. Die These von der Aufstauung des Schwarzenzensees durch einen Bergsturz muss weiter untersucht und datiert werden, um diese These zu bestätigen. Dies würde jedoch am Thema dieser Arbeit vorbeiführen. Die These des Bergsturzes würde allerdings sehr gut erklären, warum der Schwarzenzensee an dieser Stelle im Tal vorhanden ist und hierdurch das gesamte Einzugsgebiet oberhalb des Schwarzenzensees durch diese lokale Erosionsbasis nicht verbunden ist (decoupled).

### 2.3. Das Klima

Die mittlere jährliche Temperatur bei der am nächsten liegenden Station Kleinsölk (ZAMG 2002) beträgt 5,8°C und variiert von im Januar durchschnittlich -2,6°C bis im Juli durchschnittlich 14,6°C. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge beträgt 1162 mm (ZAMG 2002). Große Niederschlagsereignisse (Zahl der Tage mit Niederschlagssumme  $\geq$  10 mm) treten vor allem in den Monaten Mai bis September auf (ZAMG 2002). Die Vegetationsperiode ist mit durchschnittlich 106 Tagen im Jahr, relativ kurz. Das Klima kann damit als subozeanisch eingestuft werden (BOHNER et al. 2013). Von dem Walter/Lieth Klimadiagramm (siehe Abbildung 6) kann man gut ablesen, dass jeder Monat als „humid“ eingestuft wird, da die Kurve der mittleren Niederschlagssumme in jedem Monat über der Kurve der Mitteltemperatur liegt. Dabei ist das Verhältnis bei Walter/Lieth Klimadiagrammen der Y-Achsen klassischerweise 1:2 (mittlere Tagestemperatur : mittlere Niederschlagssumme) (HANTEL 1997).

Für die  
Beschreibung  
und  
Erläuterungen  
des  
Niederschlags-  
ereignisses am  
17.07.2010 mit  
seinen  
Phänomenen,  
siehe Kapitel  
2.5.

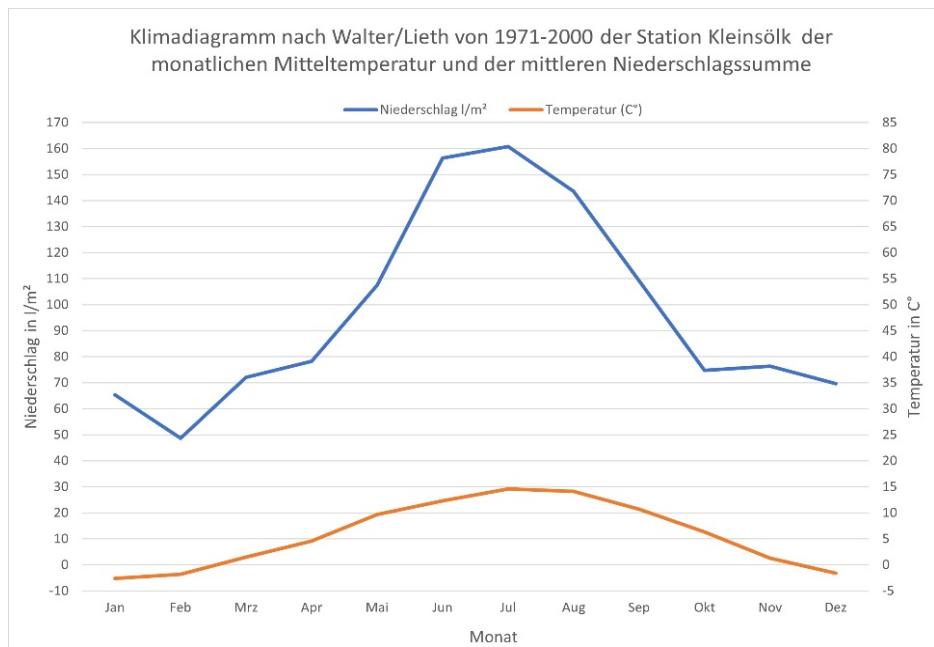


Abbildung 6: Klimadiagramm nach Walter/Lieth der Station Kleinsölk auf 1005 m.ü.A. Dargestellt sind die monatlichen Mitteltemperaturen sowie die monatlichen mittleren Niederschlagssummen der Jahre 1971 bis 2000 (Quelle: Datengrundlage: ZAMG 2002; Darstellung: eigene Darstellung)

## 2.4. Die Landnutzung und Vegetation

Die Vegetation des UGs zeichnet sich durch die montane Höhenstufe (siehe Abbildung 7) aus (BOHNER et al. 2013). Auf dem sauren Untergrund steht auf den Hängen größtenteils bodensaurer Fichtenwald (*Picea abies*), welcher forstwirtschaftlich genutzt wird (PÖPPL und SASS 2020). Durch die menschliche Nutzung des Fichtenwaldes finden sich häufig

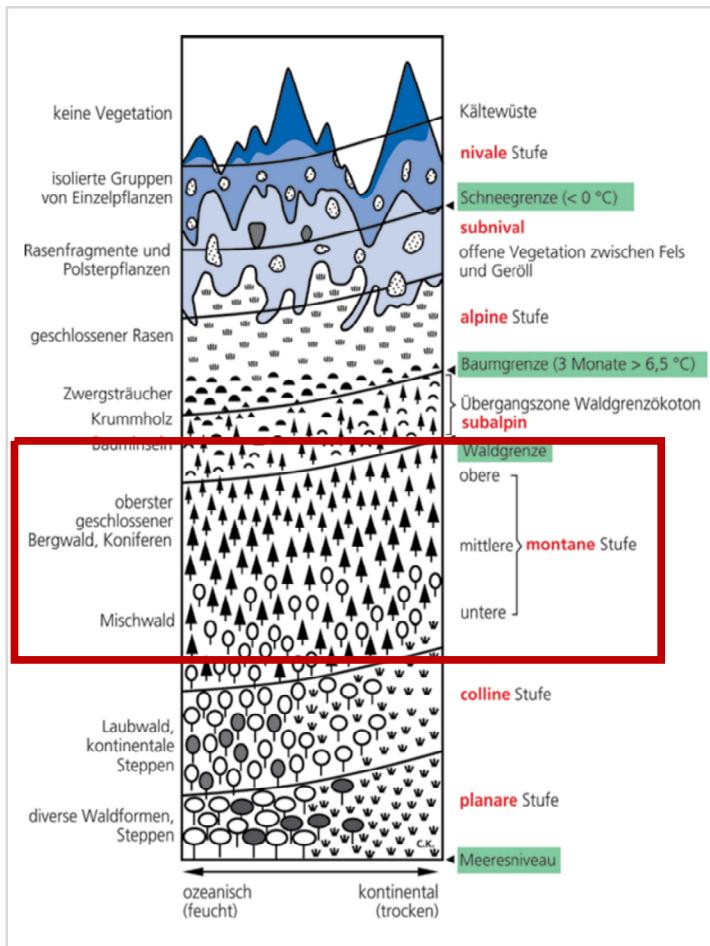


Abbildung 7: Höhenstufen der Vegetation vom Tiefland bis ins Hochgebirge. Die Ausprägung der Vegetation variiert zwar regional, die Abfolge der Lebensformen gilt aber global, wobei die Grenzen in trockenen, kontinentalen Klima höher liegen als in feuchten Klima (KADEREIT et al. 2014: 841).

Altersklassenbestände von Fichten mit einer sehr schwach bis kaum ausgeprägten Strauchschicht. Selten finden sich auch Lärchen (*Larix decidua*) und randlich Berg-Ahorn (*Acer pseudoplatanus*) (MAYRHOFER et al. 1989). Die Krautschicht besteht aus den typischen Pflanzenarten für die Höhenstufe und dem vorherrschenden sauren Untergrund, wie beispielsweise Gewöhnlicher Tüpfelfarn (*Polypodium vulgare*), Drahtschmiele (*Avenella flexuosa*), Wald-Sauerklee (*Oxalis acetosella*), Preiselbeere (*Vaccinium vitis-idaea*), Sprossender Bärlapp (*Lycopodium annotinum*), Schwarzbeere (*Vaccinium myrtillus*) sowie Rippenfarn (*Blechnum spicant*), und Alpen Brandlattich (*Homogyne alpina*) (MAYRHOFER et al. 1989).

Die Talbodenbereiche werden im Gegensatz zu den Hängen vorwiegend almwirtschaftlich genutzt (PÖPPL und SASS 2020). Wie bei der Lithologie des UGs zu erwarten, sind die verbreitetsten Bodentypen im Schwarzenseebachtal karbonatfreie, saure, nährstoffarme Leptosole (Ranker) und Cambisole mit lehmiger Sandtextur (KRAML 2016). Das Grünland wird im Sommer hauptsächlich als Weide genutzt. Die durch Murabgänge geschädigten Weiden werden von Rindern beweidet. Die wenigen Wiesen in der Talsohle werden einmal im Jahr gemäht und gelegentlich mit Stallmist gedüngt (BOHNER et al. 2013). Die Almen werden auf Grund der Bewirtschaftung offen gehalten, da diese Flächen ansonsten mit der Zeit bewaldet würden (MAYRHOFER et al. 1989). Auf diesen Almen finden sich in dem UG

in erster Linie Rinder, aber insbesondere auf Hochalmen auch Schafe und Ziegen (MAYRHOFER et al. 1989). Diese mageren Weideflächen zeichnen sich typischerweise durch Gräser und Kräuter, wie beispielsweise Bürstling (*Nardus stricta*), Rotes Straußgras (*Agrostis capillaris*), Perücken-Flockenblume (*Centaurea pseudophrygia*) oder Gold-Pippau (*Crepis aurea*), Feld-Hainsimse (*Luzula campestris*), Stängelloser Enzian (*Gentiana acaulis*), Arnika (*Arnica montana*) und Zweiblättriger Waldhyazinthe (*Platanthera bifolia*) und viele weitere Gräser- und Kräuter-Arten aus. Des Weiteren gibt es flächenmäßig kleinere aber typische Biotope der Kategorien Lägerfluren, gestreckter Gebirgsbach sowie Orte mit Feuchtezeigern oder z.B. nährstoffarme, basenarme Kleinseggenriede. Nach dem Ablauf des Schwarzensees findet sich der Typ Rasiges Großseggenried, während der See selbst zum Typ Oligotrophe Seen der tieferen Lagen gehört. All diese Biotoptypen zeichnen sich durch die typische Pflanzenarten der jeweiligen Biotope aus (MAYRHOFER et al. 1989; UMWELTBUNDESAMT GMBH et al. 2008).

In dieser beschriebenen Vegetation lebt eine für diese Berglebensräume typische artenreiche Fauna. So leben beispielsweise auf den Weideflächen bunte Grashüpfer (*Omocestus viridulus*), kurzflügelige Beißschrecke (*Metrioptera brachyptera*) oder gemeine Grashüpfer (*Chorthippus parallelus*). In den Nassstandorten oder Mooren finden sich hingegen spezialisierte Arten wie die Sumpfschrecke (*Stethophyma grossum*). In der Nähe von stehendem oder stauenden Wasser finden sich Grasfrösche (*Rana temporaria*). Auch Alpensalamander (*Salamandra atra*) sind hier heimisch. An den Bächen und Seen fühlen sich nicht nur die Bach- (*Motacilla alba*) und Gebirgsstelzen (*Motacilla cinerea*) wohl, sondern auch Bachforellen (*Salmo trutta fario*), Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*), Seesaiblinge (*Salvelinus alpinus*) und Seeforellen (*Salmo trutta forma lacustris*). Im UG finden sich beispielsweise aber auch Birkhühner (*Lyrurus tetrix*), Schneehühner (*Lagopus*) oder Grauspechte (*Picus canus*) und Schwarzspechte (*Dryocopus martius*) (HOHENSINNER et al. 2008; HÖLLRIEGL und MAYRHOFER 1989; JUNGWIRTH et al. 1996; PACHINGER und KROPP 2015; RESSEL und WIRTITSCH 2007).

## 2.5. Das Extremereignis im Schwarzenseebachtal am 17.07.2010

Am 17.07.2010 kam es im Schwarzenseebachtal zu einem lokalen Niederschlagsereignis bei dem eine Gewitterzelle mit ca. 120-130 mm in 3 Stunden abregnete (KRAML 2016; PÖPPL und SASS 2020; siehe Abbildung 8), was durch eine Verkettung von hydrogeomorphologischer Prozesse zu einem Extremereignis führte, welches zahlreiche Schäden zur Folge hatte (BOHNER et al. 2013; KRAML 2016; PÖPPL und SASS 2020; siehe Abbildung 9, Abbildung 11 und Abbildung 10).

Das im Talkessel stationäre lokale Niederschlagsereignis begann gegen 16:30 Ortszeit und endete um ca. 18:30 Ortszeit (siehe Abbildung 8). Dieses Ereignis hatte zur Folge, dass das gesamte Schwarzenseebachtal durch Hang- und Gerinnemuren sowie durch flachgründige Rutschungen vermurte (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11). Dabei wurde der

Schwarzenseebach an mindestens drei Stellen durch Murgangsmaterial temporär eingestaut. Die Gerinne- und Hangmuren hatten dabei viel Totholz und ca. 400.000 m<sup>3</sup> Sedimentmaterial und Geröll ins Tal geschwemmt. Dabei zerstörten die gravitativen Massenwegebungen ca. 40.000 m<sup>2</sup> Waldfläche (KRAML 2016; PÖPPL und SASS 2020). Durch einen Borkenkäferbefall der forstwirtschaftlich genutzten Flächen, war an den Hängen zum Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses viel Totholz vorhanden, weshalb bei diesem Ereignis viel Totholz ins Tal transportiert wurde (PÖPPL und SASS 2020). Des Weiteren konnte auf Grund des Borkenkäferbefalls (Scolytidae) das Niederschlagswasser entlang der Wurzelkanäle rasch in den Untergrund infiltrieren und somit den Untergrund mobilisieren (GHESTEM et al. 2011).

Nach eigenen Berechnungen (siehe Kap. 4.3.1) wurden bei der unteren Einstauung durch die Haselrinne und Bärenrinne ca. 203.000 m<sup>3</sup>, bei der mittleren Stauung durch den Stiegelbach ca. 437.000 m<sup>3</sup> und bei der obersten Stauung durch den Stummerbach und die Senftenrinne ungefähr 55.500 m<sup>3</sup> Wasser, Totholz und Sediment eingestaut. Dies würde bedeuten, dass insgesamt ca. 695.500 m<sup>3</sup> Wasser, Totholz und Sediment eingestaut wurden. Dabei erreichten die natürlichen Murdämme bei der unteren Stauung eine Höhe von ca. 8 bis 9 m bei der mittleren Stauung von ca. 7 m und bei der oberen Stauung ungefähr eine Höhe 4 bis 5 m. Nach Schätzungen der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV, Sektion Liezen) (PÖPPL und SASS 2020) wurde mit insgesamt 880.000 m<sup>3</sup> ein etwas höheres Volumen eingestaut. Dabei teilt sich die Menge auf die drei Einstauungen wie folgt auf: Die untere Einstauung umfasste ca. 210.000 m<sup>3</sup>, die mittlere Einstauung ca. 586.000 m<sup>3</sup> und die obere Einstauung ca. 80.000 m<sup>3</sup>. Da es sich bei beiden Angaben um Schätzungen handelt, sollten die Zahlen auch als solche betrachtet werden. Die Murdämme konnten jedoch den insgesamt ca. 695.000 bis 880.000 m<sup>3</sup> Wassermassen mit Sediment- und Totholzanteilen nicht standhalten und brachen gegen 21:30 Ortszeit. Dies hatte eine Flutwelle zur Folge, die sich mit viel Sediment und Totholz talabwärts bewegte. Dabei erreichte die Durchflussrate nach Schätzung der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV, Sektion Liezen) mit 104 m<sup>3</sup> /s am Auslass des Schwarzenseetals ungefähr das 60fache der normalen Durchflussrate des Schwarzenseebaches (PÖPPL und SASS 2020). Oberhalb der Einstauungen wurde eine während des Extremereignisses eine maximale Durchflussrate von ca. 47 m<sup>3</sup>/s geschätzt (ebd.). Entlang des Sölkbaches führte die Flutwelle mit fluviatilem

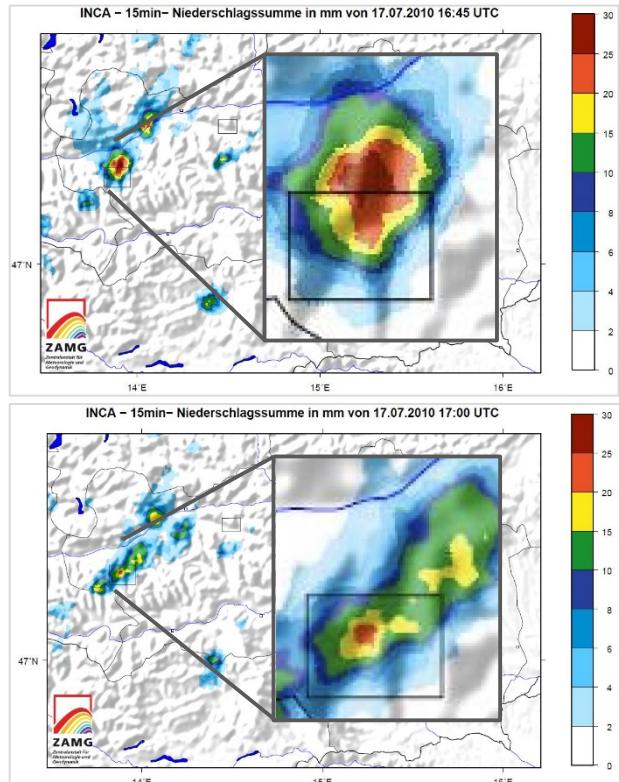


Abbildung 8: INCA-Analyseergebnisse der ZAMG vom Niederschlagsereignis im Schwarzenseebachtal am 17.07.2010. INCA-Analysen basieren auf einer Kombination aus Radar- und Stationsdaten (Quelle: ZAMG, übermittelt durch die Autoren PÖPPL und SASS 2020; verändert).

Feststofftransport zu einer Überschwemmung (siehe Abbildung 9), sodass in Stein an der Enns, dort wo der Sölkbach in die Enns mündet, vier Ortsteile einen halben Meter unter Wasser stand (ebd.).

Dabei wurden insgesamt 60 Menschen im Schwarzenseebachtal eingeschlossen, welche mit Bundesheerhelikoptern ausgeflogen werden mussten. Außerdem brachte das Bundesheer auf diesem Weg Lebensmittel für Menschen und Heu für Vieh und Wild in das Tal. Etwa 236 Personen des österreichischen Bundesheeres bauten die zerstörten Brücken und Straßen wieder auf, um die betroffenen Gebiete auf dem Landweg zu erreichen. Durch die Vermurungen im Schwarzenseebachtal wurden des Weiteren einige Hütten vernichtet oder vermurkt und weitere Forststraßen beschädigt und vernichtet. Insgesamt beläuft sich der Schaden auf ungefähr 15 Millionen Euro (KRAML 2016; PÖPPL und SASS 2020). Im Schwarzenseebachtal hat die Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV, Sektion Liezen) in den bewirtschafteten Talbodenbereichen 173 Schadensflächen (Flächen mit Vermurungen, sonstigen Sedimentablagerungen und/oder sonstigen Schäden) mit einer Gesamtfläche von ca. 151 ha verzeichnet (PÖPPL und SASS 2020). BOHNER et al. (2013) erwähnt hingegen, dass im Schwarzenseebachtal insgesamt sogar 220 ha des Graslands mit Murmaterial oder anderen Sedimentablagerungen nach dem Extremereignis bedeckt war.

Es gibt keine genauen Angaben über den genauen zeitlichen Ablauf des Extremereignis. Es können somit keine Aussagen getroffen werden, ob alle Einstauungen zeitgleich eingestaut wurden oder ob es hier kleine zeitlichen Abfolgen gab. Daher kann auch keine klare zeitliche Abfolge der Murabgänge angenommen werden. Eindeutig hingegen ist, wie oben beschrieben, dass die Murgänge und die Einstauungen zwischen 16:30 und 18:30 aufgetreten sind und die Durchbrüche gegen 21:30 stattfanden. Die Ausbrüche der Einstauungen werden als ein einziges Hochwasserereignis betrachtet, weshalb es wahrscheinlich ist, dass die obere Einstauungen durch den Stummerbach und der Senftenrinne als erste Stauung durch das stauende Murgangsmaterial durchgebrochen ist und damit die anderen Durchbrüche getriggert hat. Eine andere mögliche Annahme wäre ein gleichzeitiger Durchbruch der beiden oberen Einstauungen, wobei dieses Szenario als unwahrscheinlicher angesehen werden kann.

Nach PÖPPL und SASS (2020) auf Grundlage der Interaktions-Matrize von GILL und MALAMUD (2014) ist dieses Ereignis somit als Typ 1b und Typ 2 einzuordnen (siehe Kap. 3.2), da es sich um Massenbewegungen handelt, die den Schwarzenseebach stauen und in weiterer Folge diese Einstauungen ausbrechen (Typ 1b). Des Weiteren handelt es sich um ein Starkniederschlagsereignis, das zu Überschwemmungen des Schwarzenseebaches und gehäuftem Auftreten von Hangbewegungen in den



Abbildung 9: Bilder vom Kleinsölktaal unterhalb des UG Schwarzenseebachtal nach dem fluviatilen Sedimenttransport im Kleinsölktaal nach den Durchbrüchen im Schwarzenseebachtal (Quelle: übermittelt durch PÖPPL und SASS 2020; Copyright: MAYERL 2010).

Schwarzenseebach führt, weshalb die Flutschäden aufgrund der hohen Sedimentfracht verstärkt werden (Typ 2). Diese sich verstärkende Interaktionen der Prozesstypen dieser Prozesskette stellt den Kaskadeneffekt dar. Aufgrund der Dimension und den Auswirkungen für die Menschen im Schwarzenseebachtal könnte man bei diesem Ereignis auch bei den Vermurungen als singuläres Ereignis von einem Extremereignis sprechen, wobei es durch die kaskadenhafte Verstärkung (Kaskadeneffekt) der verschiedenen Prozesstypen eindeutig zu einem Extremereignis wird (siehe Kap. 3).



Abbildung 10: Bilder der Vermurungen im UG nach dem Extremereignis vom 17.07.2010. In Bild (1) und (2) ist der Blick von der oberen Einstauung Richtung Talausgang gerichtet, in Bild (3) und (4) ist die Breitlahnhütte zu erkennen, in Bild (5) ist der Blick taleinwärts gerichtet, auf Bild (6) ist der Blick auf den Murkegel des Stummerbaches gerichtet, in Bild (7) sieht man, auf den Bereich der mittleren Einstauung und in Bild (8) ist der Auslass des Schwarzenseebachtals und die massive Materialablagerung zu erkennen (Quelle: übermittelt durch PÖPPL und SASS 2020; Copyright: MAYERL 2010).

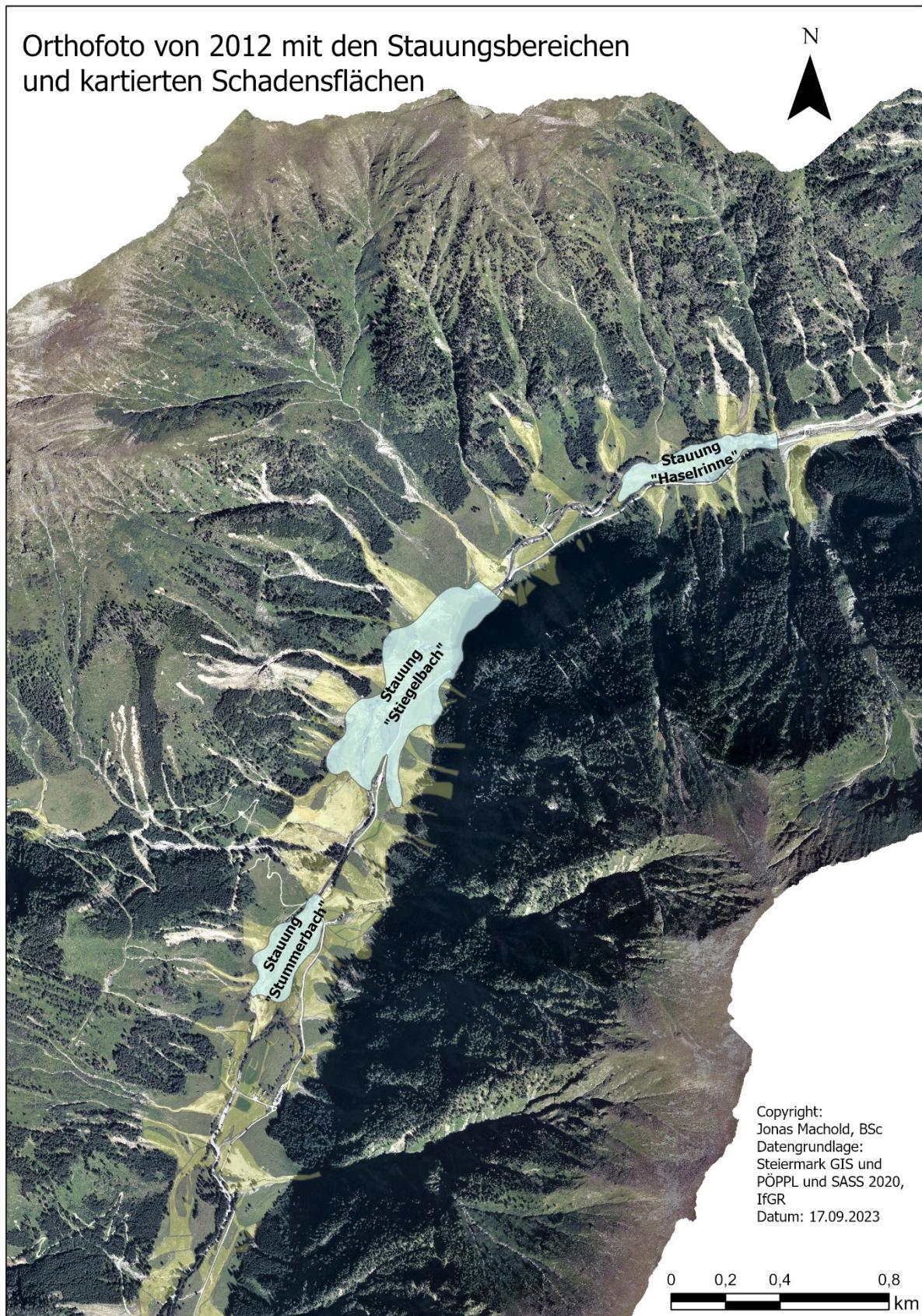


Abbildung 11: Ausschnitt des Schwarzenseebachtals mit den Stauungsbereichen (türkis) sowie den kartierten Schadensflächen (in transparent gelb) im Bereich zwischen Mündungsbereich Lassachbach (unten links) und Auslass (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023 und PÖPPL und SASS 2020, IfGR)

### 3. Theoretischer Hintergrund

Um die Forschungsfragen zu beantworten und das Thema dieser Arbeit zu behandeln, wird diese Arbeit im folgenden Kapitel auf den theoretischen Hintergrund und die theoretischen Grundlagen eingehen. Auf diese Weise können das Thema und die Beantwortung der Forschungsfragen besser kontextualisiert werden.

Bei dem Begriff *Extremereignis* stellt sich die Frage, was als Extremereignis definiert wird, weshalb an dieser Stelle kurz auf das Phänomen Extremereignis eingegangen wird. Hierfür werden weitere Begriffe definiert, um sich dem Begriff Extremereignis anzunähern, da es keine eindeutige Definition gibt (GLADE et al. 2020; VAN WESTEN et al. 2014):

*Naturereignisse* sind alle auftretenden natürlichen Prozesse, welche unsere Landschaft formen. Demgegenüber beschreiben *Naturgefahren* das Auftreten von potenziell schadenbringenden natürlichen Prozessen mit einer bestimmten Magnitude und Frequenz in einem bestimmten Gebiet und in einem bestimmten Raum. Des Weiteren beschreiben *Naturrisiken* die quantifizierten Konsequenzen, welche sich aus Risikoelementen und deren Vulnerabilität gegenüber einer bestimmten Naturgefahr zusammensetzt (CROZIER und GLADE 2005; EUROPEAN COMMISSION. DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH 2009; GLADE et al. 2020; UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION 2023; VAN WESTEN et al. 2014). *Risikoelemente* beschreiben hierbei Häuser, (kritische) Infrastrukturen, Nutztiere, Weideflächen, aber auch Menschenleben und vieles mehr. Ein *Extremereignis* beinhaltet in unserem Kontext das Auftreten der Elemente Naturereignis als Naturgefahr und dem daraus resultierenden Naturrisiko auf multipler Ebene. Dies bedeutet, dass verschiedene Naturereignisse, Naturgefahren (engl.: multi hazard) und Naturrisiken gleichzeitig und/oder nacheinander, sich gegenseitig verstärkend, Auftreten müssen (HE und WENG 2021; OWOLABI und SAJJAD 2023; PÖPPL und SASS 2020; SKILODIMOU et al. 2019; VAN WESTEN et al. 2014). Hierbei können entweder der Prozess oder die Auswirkungen für uns Menschen extrem, d.h. überdurchschnittlich, sein. Überdurchschnittlich bedeutet hierbei sinngemäß, dass diese Ereignisse oder die Magnitude dieser Ereignisse bzw. das Ausmaß der Auswirkungen des Ereignisses relativ selten auftreten. Die multiple (d.h. sich verstärkende, kaskadenhafte oder vielschichtige) Form muss dabei nicht immer bei allen drei Elementen Naturereignis, Naturgefahr und Naturrisiko vorhanden sein, jedoch zumindest bei einem Element.

In den folgenden Abschnitten werden, nachdem das Phänomen Mure und die Modellierbarkeit der Mure näher erläutert wurden, die erwähnten Extremereignisse mit Kaskadeneffekten im Hochgebirge und wie diese modelliert werden können, behandelt. In weiterer Folge wird in den theoretische Hintergrund von r.avaflow (MERGILI 2023) eingeführt, um dann das Konzept der (Sediment-)Konnektivität vorzustellen sowie auf welche Weise der IC und der ECA-Ansatz die (Sediment-)Konnektivität darstellen.

### 3.1. Das Phänomen Mure

Da der Ausgangspunkt des Extremereignisses im Schwarzenseebachtal infolge eines Starkniederschlagsereignisses verschiedene Hang- und Gerinnemuren waren (siehe Kap. 2.5), wird in diesem Kapitel das Naturereignis Mure eingeordnet, erläutert und die Eigenschaften von Muren beschrieben.

*Gravitative Massenbewegungen*, zu denen Muren (Murgänge) zählen, sind Verlagerungen von Material, die hangabwärts der Schwerkraft folgen. Im Gegensatz zu fluvialen, äolischen oder glazialen Prozessen, benötigen die gravitativen Massenbewegungen kein unmittelbares Transportmedium. Bei gravitativen Massenbewegungen wirkt hingegen die Schwerkraft unmittelbar (DIKAU et al. 2019; ZEPP et al. 2023). Bisher hat sich keine einheitliche Klassifizierung der gravitativen Massenbewegungen durchgesetzt. So können gravitative Massenbewegungen wie in Abbildung 12 durch grundlegende Bewegungsarten, der Geschwindigkeit und der Materialfeuchte klassifiziert werden. Muren können in dieser Klassifizierung nach (CARSON und KIRKBY 2009; ZEPP et al. 2023) zu den sehr schnellen, sehr nassen gravitativen Massenbewegungen eingeordnet werden, deren Bewegungsart ein Fließen darstellt.

Eine weitere weitverbreitete Klassifizierung unterscheidet gravitative Massenbewegungen auf Grundlage der Parameter Materialart und Bewegungsart (CRUDEN und VARNES 1996; VARNES 1978; siehe Abbildung 13). Von dieser Klassifizierung gibt es verschiedene Varianten und Erweiterungen (z.B. DIKAU und EUROPEAN COMMISSION 1996; GLADE und CROZIER 2005a). Nach der Art der Bewegung wird die Kinematik der Massenbewegung in Fallen, Kippen, Rutschen/Gleiten (rotationsförmig/translationsförmig), Driften, Fließen, sowie kombinierte bzw. komplexe Prozesse unterteilt. Muren werden auch bei dieser Klassifizierung bei der Bewegungsart als fließend und ergänzend bei der Materialart als Schutt/Geröll bzw. „überwiegend grob“ eingestuft.

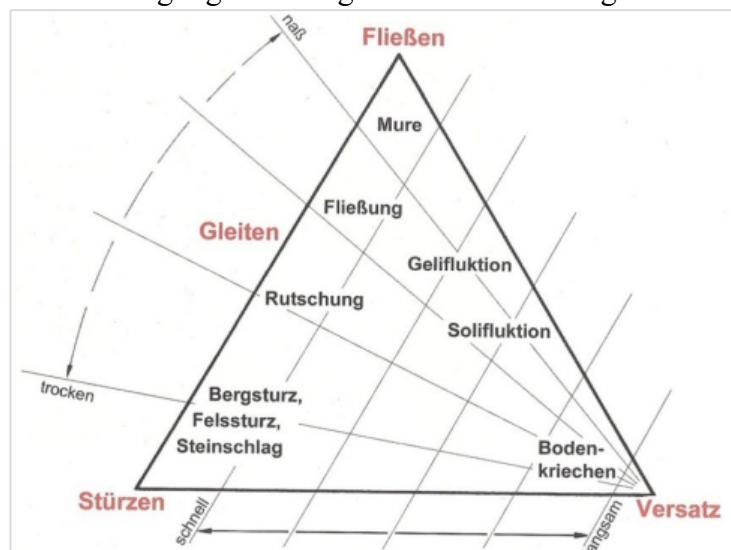


Abbildung 12: Typisierung gravitativer Massenbewegungen nach CARSON und KIRKBY (2009). Durch die drei Ecken werden die grundlegenden Bewegungsarten dargestellt, auch wenn es in der Natur meistens zu Kombinationen dieser Bewegungsarten kommt. Des Weiteren wird nach Materialfeuchte und nach Geschwindigkeit unterschieden (Quelle: ZEPP 2023).

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
			Predominantly coarse	Predominantly fine
FALLS		Rock fall	Debris fall	Earth fall
TOPPLES		Rock topple	Debris topple	Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	Rock slide	Debris slide	Earth slide
	TRANSLATIONAL			
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread	Earth spread
FLOWS		Rock flow (deep creep)	Debris flow (soil creep)	Earth flow
COMPLEX		Combination of two or more principal types of movement		

Abbildung 13: Klassifizierung von gravitativen Massenbewegungen nach VARENS (1978) (Quelle: VARENS 1978).

Anhand dieser beiden Klassifizierungen wird deutlich, dass Murgänge schnellablaufende, wassergesättigte, fließende gravitative Massenbewegungen aus überwiegend grobem Material sind. An diesen Merkmalen kann man erkennen, dass Muren typische gravitative Massenbewegungen für alpine Regionen sind, da es für das Auftreten dieser Parameter eine hohe Reliefenergie und grobes Material benötigt. Die Abgrenzung zu anderen gravitativen Massenbewegungen im Hochgebirge ist hingegen nicht immer trivial, da es sich überschneidende Formen und Übergänge von Muren zu anderen gravitativen Massenbewegungen, wie beispielsweise flachgründige Rutschungen oder fluviatile Feststofftransporte, gibt.

Bei genauerer Betrachtung von Muren wird deutlich, dass Muren sehr unterschiedlich sind und weiter ausdifferenziert werden müssen, da sie auf Grund ihrer physischen Zusammensetzung und den Wechselwirkungen der verschiedenen Materialien komplexe gravitative Massenbewegungen darstellen (GLADE und CROZIER 2005b; IVERSON 1997; LORENZINI und MAZZA 2004; TAKAHASHI 2014) – auch wenn die grundlegenden Aussagen aus den vorgestellten Klassifikationen beibehalten werden können. So besteht das Material von Muren nicht nur aus Geröll und Schutt, sondern aus Sedimenten unterschiedlicher Größe (von Ton bis Geröll), Wasser, Luft und eventuell auch Totholz mit unterschiedlichen Zusammensetzunganteilen dieser Materialien (DIKAU et al. 2019; HUTTER et al. 1994; LORENZINI und MAZZA 2004; PUDASAINI und MERGILI 2019). Muren *benötigen* sogar Feinmaterial zwischen dem Schutt und Geröll, da beim Triggerereignis ein positiver Porenwasserdruck nötig ist und dieser auch die fließende Bewegungsart beeinflusst (AHNERT 2015; IVERSON 1997; SELBY 1993). Nach der Definition in Abbildung 14, zeichnen sich Muren durch eine Sedimentkonzentration von 70-90 Gewichtsprozent aus (siehe auch SELBY 1993). Mit Sedimenten sind hierbei jegliche Korngrößen bis zu einem Durchmesser von mehreren Metern gemeint. Dementsprechend ist auch die Dichte mit 1,8 bis 2,6 Mg/m<sup>3</sup> hoch für den fließenden Bewegungstypus. Auch die Scherfestigkeit ist mit über 20 N/m<sup>2</sup> vergleichsweise hoch (ebd.). Diese Grenzwerte sind in der Literatur allerdings nicht einheitlich. So werden z.B. auch Dichtebereiche von 1,6 bis 2,3 Mg/m<sup>3</sup> und volumetrische Feststoffanteile von ca. 30 bis 70 % angegeben (WENDELER 2008). Nach BERGMEISTER et

Prozesstyp	Sedimentkonzentration (Gew.-%)	Dichte (Mg m <sup>-3</sup> )	Scherfestigkeit (N m <sup>-2</sup> )	Fluidtyp	Sedimenteigenschaft
Murgang	70–90	1,8–2,6	>20	Nichtnewton, viskos-plastisch	Hochgradig unsortiert, Sehr feste Einbettung von Steinen und Blöcken im Feinsediment
Hyperkonzentrierter Abfluss	40–70	1,3–1,8	10–20	Nichtnewton	Schwach sortiert, Schwache stratigraphische Struktur
Wasserabfluss	1–40	1,01–1,3	<10	Newton	Sortiert, sehr gute stratigraphische Struktur

Abbildung 14: Eigenschaften von Murgängen im Vergleich zu hyperkonzentrierten Abflüssen und Wasserabflüssen nach SELBY 1993 (Quelle: DIKAU et al. 2019)

al. (2009) und GEMS et al. (2020) fängt der Dichtebereich von Muren schon bei über 1,3 Mg/m<sup>3</sup> an und die volumetrische Sedimentkonzentration bei über 20%. Nach der österreichischen Normungsregel 24800 (ONR 24800 2009) weisen Muren eine volumetrische Feststoffkonzentration von 40 bis 70% sowie eine Dichte von 1,7 bis 2,4 Mg/m<sup>3</sup> auf, wie z.B. auch GLADE et al. (2014) oder KAITNA et al. (2020) festhalten. Da diese Abgrenzung in Österreich am gebräuchlichsten ist, wird in dieser Arbeit die Normungsregel 24800 als Definitionsgrundlage verwendet. Der Fluidtyp wird bei Muren jedenfalls als viskos-plastisch (z.B. Bingham-Fluid) bezeichnet (siehe Kap. 3.1.1). Typische Geschwindigkeiten von Muren liegen hierbei ungefähr zwischen 0,5 bis 20 m/s, können bei sehr großen Ereignissen allerdings auch bis zu 80 m/s schnell werden (LORENZINI und MAZZA 2004; MERGILI et al. 2018b; TAKAHASHI 2014; TURNBULL et al. 2015).

Grundsätzlich weisen Gerinnemuren die Merkmale Anrissgebiete, Murgerinne, Murkopf und Murkegel auf. Im Anrissgebiet wird das initiale Lockergestein bereitgestellt und fließt in weiterer Folge durch das Murgerinne. Diese Murgerinne werden auf beiden Seiten durch Sedimentwälle (Levées) gesäumt. Diese Levées entstehen durch den hohen Geschwindigkeitsgradienten am Rand der Mure, weshalb Material am Rand auf Grund des lateralen Wasserentzuges und in der Folge größeren Reibung, d.h. niedrigeren Geschwindigkeit, abgelagert wird. Der vordere Ablagerungsbereich der Muren wird als Murkegel bezeichnet. Hier kann sich der Prozess lateral ausbreiten und durch Wasserverlust und geringerer Hangneigung zum Stillstand kommen, wobei das Material unsortiert mit sehr fester Einbettung von großem Geröll in feinem Material abgelagert wird. Dabei bilden sich lobenartige Ablagerungsformen (Murlöben) mit ausgeprägten steilen Stirnbereichen (Murköpfen). Wenn die Mure bis zu einem fluvialen System reicht, wird das Murmaterial durch dieses fluviale System weitertransportiert (AHNERT 2015; DIKAU et al. 2019; LORENZINI und MAZZA 2004).

Als Auslöser (Trigger) fungieren im Alpenraum vor allem Starkniederschlagsereignisse, langanhaltender Niederschläge oder Schneeschmelzen (siehe Abbildung 15). Dies bedeutet, dass es ein hohes Wasserangebot sowie einer starken Durchfeuchtung des Materials benötigt, um einen positiven Porenwasserdruck zu erzeugen. Weitere Voraussetzungen sind das Vorhandensein von murfähigem Material sowie einem großen Gefälle von mindestens 27° bei Hangmuren oder von mindestens 15° bei Gerinnemuren. Das Gefälle kann bei

Gerinnemuren von  $40^\circ$  im Anrißbereich bis  $3^\circ$  im Ablagerungsbereich reichen (DIKAU et al. 2019; LORENZINI und MAZZA 2004).

Die Ursache für Hangmuren kann beispielsweise ein Gleitprozess am Hang im Lockermaterial sein, welcher durch Aufnahme von Wasser seine Bewegungsform in das sogenannte Bingham-fließen (siehe 3.1.1) transformiert. Auch Gerinnemuren können sich im Gerinnebett vom Newton-fließen in das Bingham-fließen transformieren. Dies geschieht durch die Aufnahme von Material. Grundsätzlich weisen Muren eine hohe erosive Kraft auf, weshalb das initiale Material durchaus eine geringe Menge vom letztendlichen Volumen ausmachen kann (z.B.

DIKAU et al. 2019; LORENZINI und MAZZA 2004; TRUJILLO-VELA et al. 2022). Diese Eigenschaft hat häufig zur Folge, dass bei Gerinnemuren an der Front großes Geröll und Felsblöcke transportiert werden können, da diese auf Grund der hohen Dichte und der hohen kinetischen Energie mittransportiert werden, wenn die Mure auf diese großen Felsblöcke trifft. Im Gegensatz dazu, transportiert der hintere Bereich der Mure häufiger mehr feineres Material (IVERSON 1997; TRUJILLO-VELA et al. 2022; TURNBULL et al. 2015).

### 3.1.1 Die Modellierbarkeit von Murgängen

Für die Modellierung von Muren gibt es verschiedene Ansätze, welche unterschiedlich komplex sind und dabei verschiedene Datenqualitäten und unterschiedliche Eingabeparameter sowie Daten benötigen. Die Vielzahl an Ansätzen zeigt auf, wie komplex sich die Modellierung dieser gravitativen Massenbewegung, aufgrund der hohen physikalischen Komplexität von Muren, gestaltet. Je nach Fragestellung und Untersuchungsgegenstand eignen sich verschiedene Ansätze (vgl. TRUJILLO-VELA et al. 2022). So werden in diesem Kapitel die Aspekte herausgegriffen, die für diese Arbeit von Bedeutung sind.

Nummerische Modelle können annäherungsweise durch die Implementierung von komplexen Rheologien (Fließkunde), die Muren beschreiben können, in das Modell das Fließverhalten nachstellen, um auf diese Weise die Abgänge zu modellieren. Je nach numerischer Modellierung werden verschiedene Rheologie-Ansätze verwendet, welche auf verschiedene Annahmen beruhen (z.B. ABE und KONAGAI 2016; ABRAHAM et al. 2022; HUTTER et al. 1994; RICKENMANN et al. 2006; TANG et al. 2023; TRUJILLO-VELA et al. 2022; VOELLMY 1955).

Die Rheologie von Muren wird im Allgemeinen als viskos-plastisch beschrieben, was beispielsweise auch als das Bingham-Fließen bezeichnet werden kann. Wie gesagt, es gibt

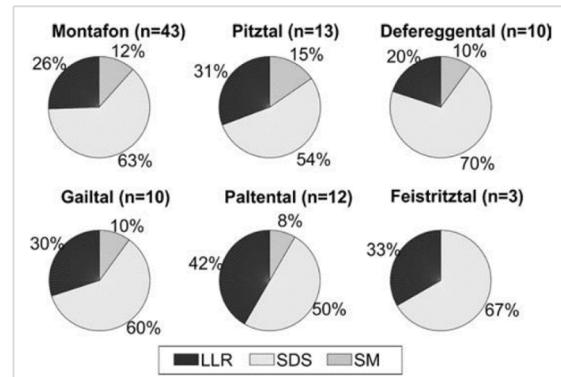


Abbildung 15: Vereinfachte meteorologische Auslösetypen für Muren in verschiedenen Regionen Österreichs. LLR=langanhaltender Niederschlag, SDS=Gewitter, SM = Schneeschmelze (Quelle: KAITNA et al. 2020; Daten basieren auf einer Studie von PRENNER et al. 2019).

in diesem Zusammenhang verschiedene rheologische Annährungsmodelle, wie z.B. auch das Herschel-Bulkley-Fließen (TAKAHASHI 2014). Im Gegensatz zum Herschel-Bulkley-Fließen verläuft das Bingham Fluid linear bei der Beziehung zwischen Scherspannung bzw. Schubspannung und der Scherrate bzw. Schergeschwindigkeit (siehe Abbildung 16), was bedeutet, dass nach der Überwindung des Punktes des initialen Scherwiderstandes  $\tau_0$  (Auslösung der Mure) das Fließverhalten dem Fließverhalten des Newton-Fluids gleicht. Wie in Abbildung 17 zu erkennen ist, wird die viskos-plastische Fließeigenschaft mit zunehmender Sedimentkonzentration des Wasser-Sediment-Gemisches erreicht. Dabei gibt es eine scharfe Grenze vom Newton-Fluid zum Prozesstyp des Murgangs (Wertebereich B bis C), dem Bingham-Fluids (DIKAU et al. 2019; TAKAHASHI 2014).

Bei der Implementierung von Rheologien, die das Fließverhalten von Muren darstellen können, wird angenommen, dass die Masse der Mure als ein Kontinuum (einphasige oder gemischte Modelle; wobei gemischte Modelle zu einem gewissen Grad die feste und flüssige Phase zumindest theoretisch Berücksichtigen) beschrieben werden kann. Im Gegensatz dazu beschreiben die sogenannten Mehrphasenmodelle, Muren durch diese einzelnen Phasen sowie der Interaktionen zwischen den Phasen. Die Phasen beschreiben dabei die verschiedenen physikalischen Phasen (fest, feinkörnig, flüssig) durch jeweilige Rheologien dieser Phasen. Allerdings ist dieser Ansatz relativ neu (PUDASAINI und MERGILI 2019) und auf Grund der höheren Komplexität der Modellierung werden bei Muren häufig die gemischten

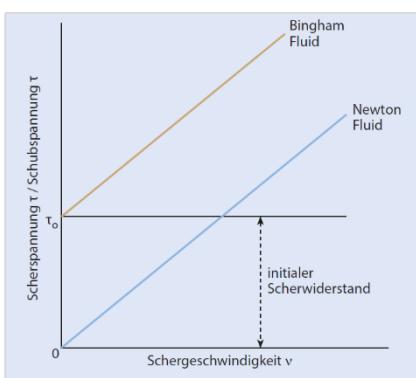


Abbildung 16: Beziehung zwischen der Schub- bzw. Scherspannung (Quelle: DIKAU et al. 2019).

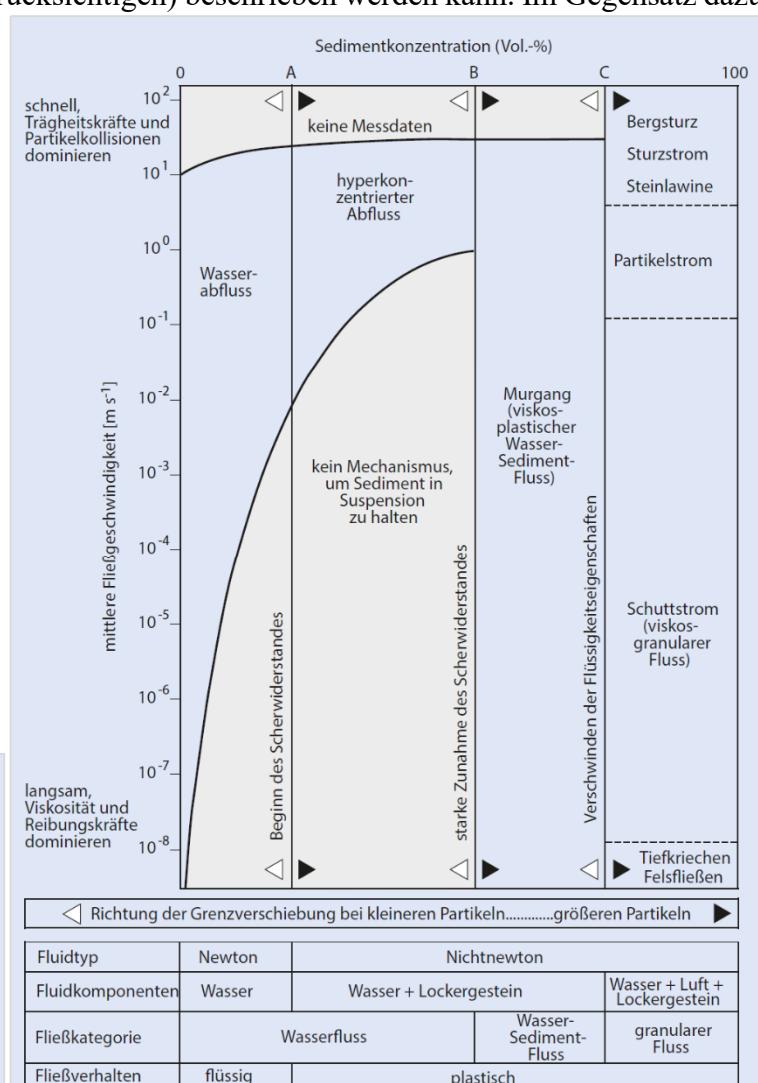


Abbildung 17: Rheologische Klassifikation von Wasser-Sediment-Gemischen unterschiedlicher Zusammensetzung auf Basis der Beziehung zwischen Sedimentkonzentration und Fließgeschwindigkeit nach PIERSON und COSTA (1987) (Quelle: DIKAU et al. 2019).

Modelle verwendet, (z.B. ABRAHAM et al. 2022; CHRISTEN et al. 2010; MIKOŠ und BEZAK 2021; TANG et al. 2023), auch wenn damit physikalische Aussagen, zu den Interaktionen der einzelnen Phasen sowie der Parameter als feste physikalische Größen nicht möglich sind (ABE und KONAGAI 2016). Dies erscheint, je nach Fragestellung, trotzdem sinnvoll zu sein, da somit das Modell so einfach wie möglich und damit die Eingabeparameter so gering wie möglich gehalten werden können (MERGILI und PUDASAINI 2021).

Auch das Voellmy-Modell (VOELLMY 1955) ist ein häufig verwendeter Ansatz, dessen Rheologie z.B. in der häufig angewandter Modellierungssoftware RAMMS für Lawinen und Muren (CHRISTEN et al. 2010) oder auch in der Modellierungssoftware r.avaflow (MERGILI 2023) implementiert ist. Hierbei wurde die Rheologie im Laufe der Zeit auf verschiedene Weisen erweitert und ergänzt (MERGILI und PUDASAINI 2021). Veollmy hat als erster die Dynamiken von fließenden gravitativen Massenbewegungen in Form von Massen- und Impulsbilanzen aus der Kontinuumsmechanik erklärt und diese mit einer rheologischen Beziehung dargestellt (MERGILI et al. 2017a; MERGILI und PUDASAINI 2021; VOELLMY 1955). Dieses Voellmy-Salm-Modell (VS-Modell), die von SALM (1993) erweitert wurde, unterteilt den Reibungswiderstand in zwei Teile: in eine trockene Coulomb-Reibung (Koeffizient  $\mu$ ), die mit der Normalspannung skaliert, und in eine mit der Geschwindigkeit quadrierte Widerstandsreibung bzw. viskos-turbulente Reibung (Koeffizient  $\xi$ ). Der Reibungswiderstand  $S$  (Pa) kann dann wie folgt beschrieben werden,

$$S = \mu N + \frac{\rho g u^2}{\xi} \quad \text{mit} \quad N = \rho h g \cos(\varphi) \quad (1)$$

wobei  $\rho$  die Dichte,  $g$  die Gravitationsbeschleunigung,  $\varphi$  der Hangneigungswinkel,  $h$  die Fließhöhe und  $u$  der Vektor  $u = (u_x, u_y)^T$ , bestehend aus der Fließgeschwindigkeit in x- und y- Richtung, ist. Die Normalspannung auf der Gleitfläche,  $\rho h g \cos(\varphi)$ , lässt sich in einem einzigen Parameter  $N$  zusammenfassen (kann auch als basaler Reibungswinkel  $\delta$  ausgedrückt werden). Das VS-Modell berücksichtigt zum Teil den Widerstand der festen Phase mit  $\mu$ , welche auch als Tangens des inneren Reibungswinkels ( $\tan\varphi$ ) ausgedrückt werden kann, und eine viskose oder turbulente Fluidphase mit  $\xi$  (BEGUERIA et al. 2009; FISCHER et al. 2012; MEYRAT et al. 2023; SALM 1993). Die Reibungskoeffizienten sind für das Verhalten des Fließvorgangs verantwortlich.  $\mu$  (bzw.  $\tan\varphi$ ) dominiert, wenn die Strömung kurz vor dem Stillstand steht,  $\xi$  überwiegt, wenn die Strömung schnell fließt (CHRISTEN et al. 2010; SALM 1993). Das VS-Modell stellt mehr eine technische Berechnungsformel als eine physikalische Beschreibung des Prozesses dar. Die Reibungsparameter kann man also auch als Anpassungsparameter bezeichnen, die, auf Grund der rheologischen Vereinfachung der Massenbewegung, mit den tatsächlichen physikalischen Parametern kaum übereinstimmen. Ebenso verändern sich die physikalischen Parameter in der Realität während des Prozesses und stellen, anders als bei dieser rheologischen Annahme, keine Konstanten dar (WENDELER 2008).

### 3.2. Extremereignisse mit Kaskadeneffekte im Hochgebirge

In Hochgebirgsregionen kommt es unter anderem aufgrund des Temperaturanstiegs in der Atmosphäre häufig zu ausgeprägten Umweltveränderungen wie dem Auftauen des Permafrosts und dem Rückzug der Gletscher. Dies kann in diesen vulnerablen Regionen zu einem vermehrten Auftreten von Extremereignissen führen. Extremereignisse im Hochgebirge treten allerdings im Allgemeinen schon überdurchschnittlich häufig auf (GRUBER und MERGILI 2013; HUGGEL et al. 2005; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 2023; MERGILI et al. 2018b). Weltweit sind Gebirgsregionen die tödlichsten Regionen: Über 70 % der mehr als 700.000 katastrophenbedingten Todesfälle zwischen 2005 und 2014 ereigneten sich in Bergregionen (KLEIN et al. 2019). Dabei kommt es auch immer wieder zu Prozessketten, welche einen Kaskadeneffekt (sich verstärkend) zur Folge haben. Die hohe Reliefenergie der Hochgebirge mit ihrem metastabiles Gleichgewichtsstadium (siehe Kap. 1.1) und der damit auftretenden hohen Konnektivität (siehe Kap. 3.4), weisen eine Vielzahl an möglichen Extremereignissen und Kombinationen von verschiedenen Naturereignissen auf. Bisher beschränken sich die Betrachtungen solcher komplexen Wechselwirkungen von Kaskadeneffekten häufig auf Einzelfallbetrachtungen (PÖPPL und SASS 2020; RUSK et al. 2022). Die Kombinationen verschiedener Naturereignisse und den damit verbundenen Interaktionen der einzelnen Ereignisse können überdurchschnittlich häufig katastrophale Folgen haben, weshalb es wichtig ist, diese zu Konzeptualisieren – auch wenn die meisten kaskadenhaften Extremereignisse in ihrer Ausprägung und Auftreten einzigartig sind oder selten auftreten. Nichtsdestotrotz gibt es sich wiederholende Formen der Interaktionen. Dabei weisen auch gleiche Interaktionsform meistens, je nach Ereignis, singuläre Ausprägungen auf (VAN WESTEN und GREIVING 2017). Eine Konzeptualisierung ermöglicht dennoch eine systematische Untersuchung einzelner Interaktionen, weshalb in weiterer Folge auch Schlussfolgerungen gezogen werden können (PÖPPL und SASS 2020).

Um diese Interaktionen einzuordnen, gibt es keine einheitliche Methode, allerdings verschiedene Ansätze, wenngleich VAN WESTEN et al. (2014) darauf verweist, dass es immer noch sehr wenige Ansätze zur gleichzeitigen Analyse von mehreren Prozesstypen in einer Region gibt. Die Ursache dessen kann mit der schlechten Datenlage von vergangenen Ereignissen, der schlechten Vergleichbarkeit solch komplexer Interaktionen, der unterschiedlichen Prozesseigenschaften und der fehlenden Standardisierung zur Erfassung von Wechselwirkungen erklärt werden. Insbesondere bei Kaskadeneffekten führt die ungenügende Datenbasis zu hohen Unsicherheiten (CHEN et al. 2016). Dies kann auch eine Folge davon sein, dass eine systematische und modellierende Analyse von Extremereignissen mit Kaskadeneffekten erst seit ein bis zwei Jahrzehnten stattfindet (KAPPES et al. 2012; PÖPPL und SASS 2020). VAN WESTEN et al. (2014) und VAN WESTEN und GREIVING (2017) versuchen hinsichtlich des Risikomanagement von extremen Naturgefahren die komplexen Wechselbeziehungen zwischen verschiedenen Naturereignissen, welche durch eine Prozessverkettung oder Wechselwirkungen von

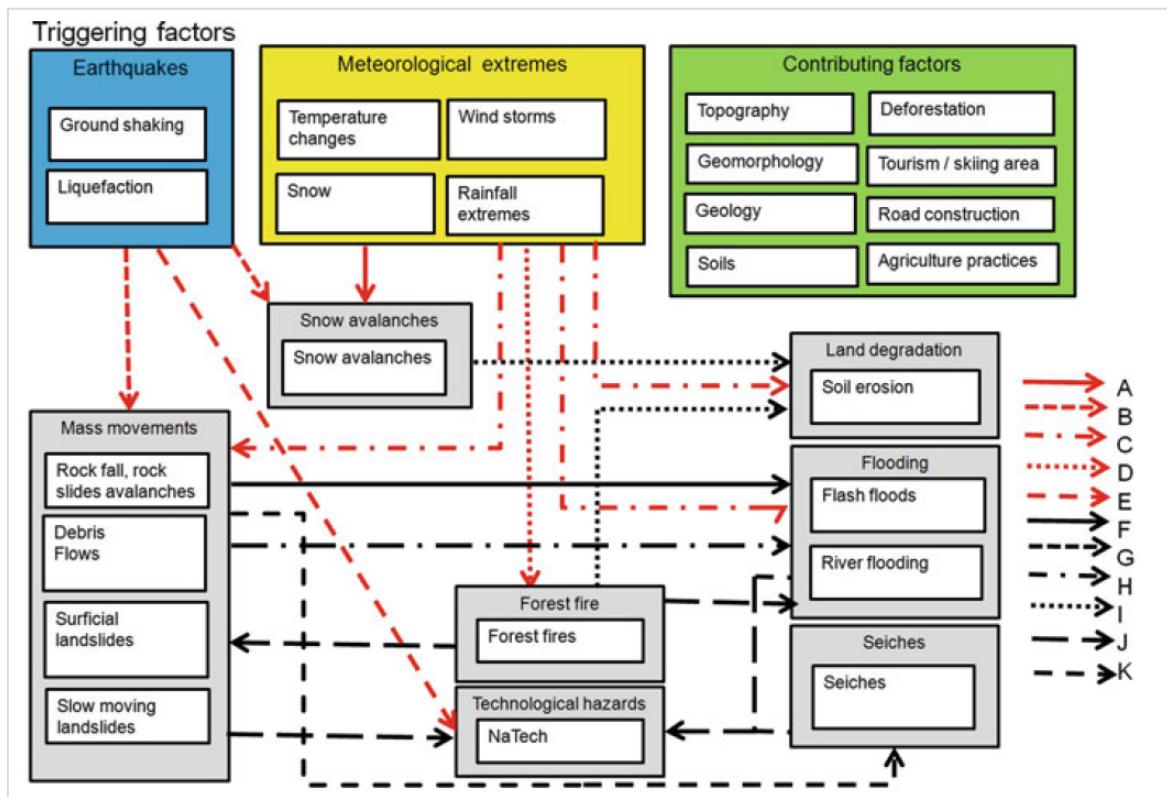


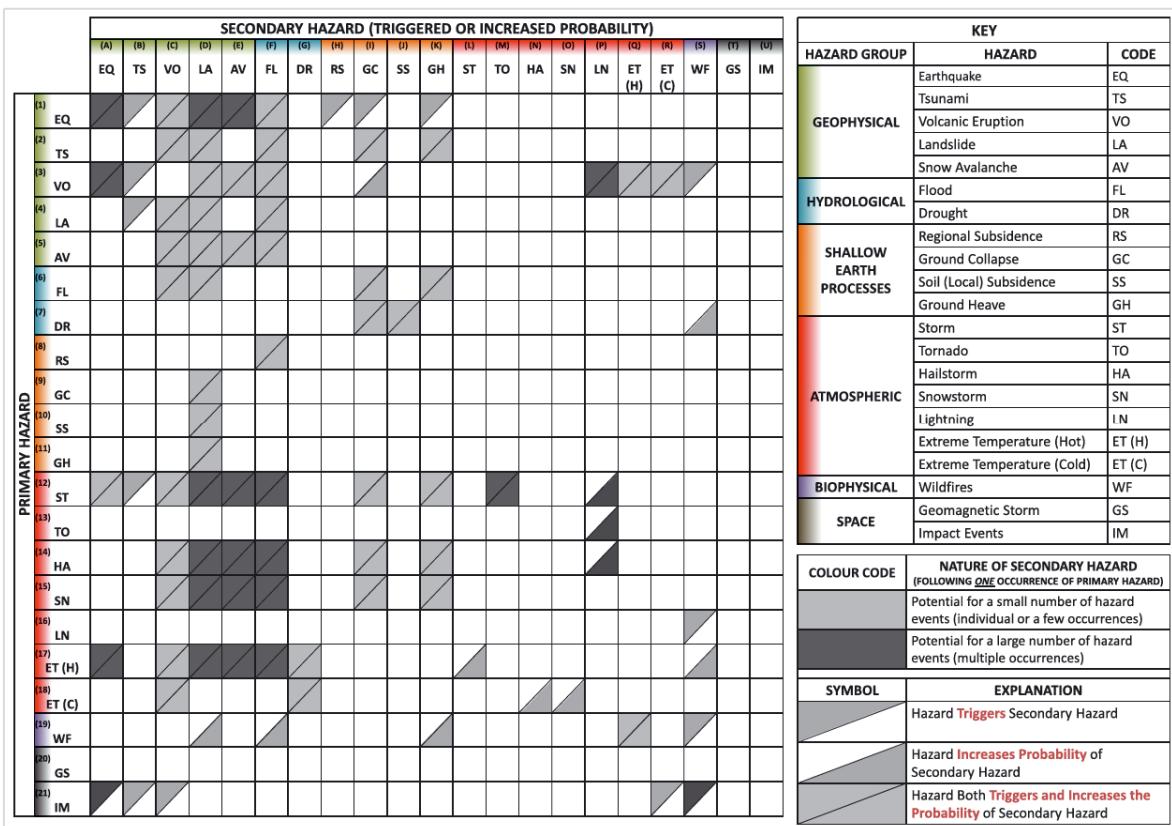
Abbildung 18: Extremereignisse im Gebirge und ihre Wechselbeziehungen. Oben sind die auslösenden Faktoren (Erdbeben, meteorologische Extreme) und die Einflussfaktoren angegeben. Die roten Pfeile zeigen die unmittelbar ausgelösten Naturgefahren an (gekoppelte Gefahren). Die schwarzen Pfeile zeigen Prozessketten an, d.h. eine Gefahr verursacht im Laufe der Zeit eine andere Gefahr. (A) Schneekumulationen, die Schneelawinen auslösen, (B) Erdbeben, die gleichzeitig Erdrutsche und Schneelawinen auslösen, (C) extreme Niederschläge, die Erdrutsche, Murgänge, Überschwemmungen und Bodenerosion verursachen, (D) Trockenheit und/oder Blitzschlag, die Waldbrände verursachen, (E) Erdbeben, die technologische Gefahren verursachen, (F) Erdrutsche und Murgänge, die Flüsse aufstauen und Dammbruchüberschwemmungen verursachen, (G) große, schnelle Erdrutsche oder Felsstürze in Stauseen, die Wasserüberschwemmungen verursachen, (H) Murgänge, die in der flussabwärts gelegenen Wildbachstrecke zu Überschwemmungen führen; (I) Schneelawinen oder Waldbrände, die zu Bodenerosion führen, (J) Waldbrände, die zu oberflächlichen Erdrutschen, Murgängen und Sturzfluten führen, (K) Erdrutsche, Murgänge oder Überschwemmungen, die zu technischen Gefahren führen (Quelle: VAN WESTEN et al. 2014)

Prozessen zu Extremereignissen werden und dabei potenziell die gleichen Hochgebirgsregionen betreffen, einzuordnen (siehe Abbildung 18). Dabei wird bei diesem Ansatz zwischen Naturgefahren, die durch das gleiche Auslöseereignis (Trigger) ausgelöst werden (gekoppelte Ereignisse) (EUROPEAN COMMISSION. DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH 2009) und Naturgefahren, die im Laufe der Zeit zu weiteren Naturgefahren führen (Prozesskombinationen), unterschieden. Des Weiteren wird noch der Interaktionstyp definiert, der die Prädisposition einer Naturgefahr durch eine andere Naturgefahr verändert, diese aber nicht auslöst (Prozessketten). Prozesskombinationen werden bei VAN WESTEN et al. (2014) als eine Abfolge von einzelnen sich bedingende (und verstärkende) Prozesstypen verstanden (Kaskadeneffekt). In diese Kategorie kann das Extremereignis vom 17.07.2010 im Schwarzenseebachtal (siehe 2.5) auch eingeordnet werden. Prozesskombinationen, welche durch mehrere Prozesstypen, zumindest teilweise, simultan interagieren und sich dabei trotzdem gegenseitig auslösen, werden bei diesem Ansatz nicht explizit ausdifferenziert, wie sie mit r.avaflow schon erfolgreich simuliert wurden (BAGGIO et al. 2021; MERGILI et al. 2018b; MERGILI et al. 2018a; SHUGAR et al. 2021; VILCA et al. 2021). Somit ist das Extremereignis vom 17.07.2010 im Schwarzenseebachtal nach diesem Ansatz

auch eine Prozesskombinationen, da es sich um ein zusammenhängendes Ereignis handelt, welches zeitlich nacheinander abläuft. Um eine Grenze zwischen den Modellierungen von mehreren Prozesstypen, die simultan interagieren und auftreten und sich dabei gegenseitig auslösen, wie beispielsweise den gravitativen Massenbewegungen 1962 und 1970 in Huascarán (Peru) (EVANS et al. 2009; MERGILI et al. 2018b), wird in dieser Arbeit allerdings das Extremereignis als Prozesskette verstanden, da die Prozesstypen sich zwar gegenseitig auslösen und kaskadenhaft verstärken, allerdings zeitlich klar getrennt ablaufen und somit auch als eigenständige Prozesse im jeweiligen Prozessabschnitt verstanden werden können.

Eine weitere mögliche Einordnung und Kategorisierung von Extremereignissen ist nach dem Ansatz von GILL und MALAMUD (2014) mit Interaktions-Matrizen möglich (siehe Abbildung 19), in welches PÖPPL und SASS (2020) das Extremereignis vom 17.07.2010 im Schwarzenseebachtal auch einordnen und kategorisieren (siehe Kap. 1.1 und Kap. 2.5). Dieser Ansatz ist analytischer und durch eine Interaktions-Matrise bei einer Vielzahl an Interaktionen und Interaktionskombinationen einsetzbar. Ein Vorteil solch einer Matrize ist, dass sie sehr vielseitig eingesetzt werden kann und somit verschiedene Trigger und beliebige Prozesskombinationen mit verschiedenen zeitlichen Abfolgen berücksichtigen kann. Somit können für Extremereignisse mit Kaskadeneffekten ein Netzwerk an Prozessen, die sowohl gleichzeitig als auch nacheinander ablaufen können, in der Matrize erstellt werden (GILL und MALAMUD 2014). PÖPPL und SASS (2020) extrahieren anhand dieser Interaktions-Matrise von GILL und MALAMUD (2014), durch Streichung der übrigen Naturgefahren, welche Prozesskombinationen für den Alpenraum in der Praxis bedeutsam sind und typisieren diese wie folgt:

- Massenbewegungen (Stürze, Rutschungen) führen zu Flutereignisse durch Verdrängung in Seen (Typ 1a) oder zu Aufstau von Fließgewässern und nachfolgendem Ausbruch (Typ 1b)
- Starkregenereignisse bzw. langanhaltende Niederschläge bzw. Kombination von Niederschlägen und Schneeschmelze im Frühjahr führen zu gleichzeitiger Fluss-/Wildbach-Überschwemmung und gehäuftem Auftreten von Hangbewegungen, was wiederum zur Verstärkung von Flutschäden durch erhöhte Sedimentfracht führt (Typ 2)
- Gletscherschmelze oder auftauender Permafrost führt zu Ausbruchsfluten (z.B. Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs), Typ 3a) oder verstärkte Bereitstellung von leicht erodierbarem Lockermaterial (Typ 3b)
- Winterliche Schneefall- und/oder Sturmereignisse führt zu gehäuftem Auftreten von Schadlawinen (Typ 4)
- Und als letzte Typisierung: Dürren führen zu größerer Häufigkeit und Intensität von Waldbränden (Typ5)



#### Fußnoten

[1A,D,E; 3A,P; 12D-F,M,P; 13P; 14D-F,P; 15D-F; 17A,D-F; 21A] Die sekundären Gefahren in diesen Fällen treten mit hoher Wahrscheinlichkeit als eine Vielzahl an Ereignissen auf und werden deshalb auf diese Art analysiert.

[1C] In der Literatur herrscht Uneinigkeit über den Charakter dieser Beziehung.

[2,6,12,14,15C] Wasserzufluss dient als Auslöser oder erhöht die Auftretswahrscheinlichkeit einer phreatischen/phreatomagnetischen Eruption.

[3I] Vulkanismus erhöht den Säuregehalt des Regens, wodurch die Lösung von karbonatischem Material vorangetrieben wird.

[12A] Es wurde aufgezeigt, dass Niedrigdrucksysteme langsame Erdbeben an Störungen, welche bereits knapp vor dem Versagen stehen auslösen bzw. ihre Auftretswahrscheinlichkeit erhöhen können (LIU et al. 2009)

[17A,C-F] Sekundäre Gefahren, welche durch Schnee- und Gletscherschmelze ausgelöst werden oder deshalb eine höhere Auftretswahrscheinlichkeit aufweisen, tun dies über eine Spannweite an Zeitskalen.

[18C] Eine langfristige Reduktion der Temperatur kann die Vergletscherung vorantreiben und aufgrund dessen Meeresspiegel senken. Dieses Absenken des Meeresspiegels kann den einschränkenden Druck verringern und Vulkanausbrüche herbeiführen.

*Abbildung 19: Arten der Erfassung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Naturgefahrenprozessen: Identifizierung von Gefahreninteraktionen (a). Die Abbildung zeigt eine 21 x 21 Interaktionsmatrix mit primären Gefahren auf der vertikalen Achse und sekundären Gefahren auf der horizontalen Achse. Die Matrix zeigt Fälle, in denen eine Primärgefahren eine Sekundärgefahren auslösen könnte (oben links schattiert) und Fälle, in denen eine Primärgefahren die Wahrscheinlichkeit für eine Sekundärgefahren erhöhen könnte (unten rechts schattiertes Dreieck). Dunkelgrau schattiert sind die Wirkungszusammenhänge, bei denen eine Primärgefahren ein mehrfaches Auftreten der Sekundärgefahren auslösen oder begünstigen kann. Es werden sechs Gefahrengruppen unterschieden: geophysikalische (grün), hydrologische (blau), flache Oberflächenprozesse (orange), atmosphärische (rot), biophysikalische (violett) und extraterrestrische (grau) (Quellen: GILL und MALAMUD 2014; PÖPPL und SASS 2020).*

### 3.2.1. Modellierung von Extremereignissen mit Kaskadeneffekten im Hochgebirge

Wie bei der Beschreibung und Einordnung mit Kontextualisierung von Extremereignissen im Hochgebirge mit Kaskadeneffekten (siehe Kap. 3.2) deutlich wird, sind die Prozesse solcher Ereignisse sehr komplex und schwierig zu parametrisieren. Dementsprechend müssen Modellierungen solch komplex interagierender Prozesse die physikalischen Aspekte

bei der Modellierung als Parameter abbilden, da die Extremereignisse bezüglich der Materialzusammensetzung und der Entwicklung in zeitlicher und räumlicher Hinsicht komplex sind, sich mit diesem physikalischen Ansatz aber beschreiben lassen (PUDASAINI und MERGILI 2019). Quasi-empirische Modelle, wie dies teilweise bei der Modellierung von Muren noch möglich ist (siehe Kap. 3.1.1), kommen hierbei an ihre Grenzen (MERGILI et al. 2018b; PUDASAINI und MERGILI 2019; WORNI et al. 2014). Solche Modellierungen mit Kaskadeneffekten erfordern entweder Modellketten, bei denen jede Modellkomponente bzw. jedes Softwarepaket genau auf den jeweiligen Einsatzzweck zugeschnitten ist (SCHNEIDER et al. 2014; SOMOS-VALENZUELA et al. 2016), oder Zwei- oder Mehrphasenmodelle beschreiben die jeweiligen physikalischen Phasen (MERGILI und PUDASAINI 2021). Nachdem WORNI et al. (2014) auf die Notwendigkeit solcher Mehrphasenmodelle hingewiesen hat, da Modellketten mit unterschiedlichen Softwarepaketen an ihre Grenzen kommen, sind einige Fortschritte erzielt worden (MERGILI et al. 2018b; MERGILI und PUDASAINI 2021). So wurde von PUDASAINI (2012) das Zweiphasenmodell entwickelt, ehe 2019 von (PUDASAINI und MERGILI 2019) das Mehrphasenmodell entwickelt wurde, welches in der Lage ist, jede Phase (fest, feinkörnig, flüssig) getrennt zu betrachten und gleichzeitig die Interaktionen zwischen den Phasen abzubilden (siehe Abbildung 20). Hierfür müssen drei verschiedene Rheologien implementiert werden, welche, je nach Interaktionen und Materialzusammensetzung unterschiedliche

physikalische bzw. rheologische Eigenschaften aufweisen. Hiermit war es nun theoretisch möglich jedes Extremereignis auf Grundlage von physikalischen Annahmen zu modellieren (z.B. MERGILI et al. 2020a; MERGILI et al. 2020b; MERGILI et al. 2018b).

Trotz dieser Fortschritte verbleiben einige große Herausforderungen bei der Modellierung von komplexen Extremereignissen mit kaskadenhaften Interaktionen. Diese

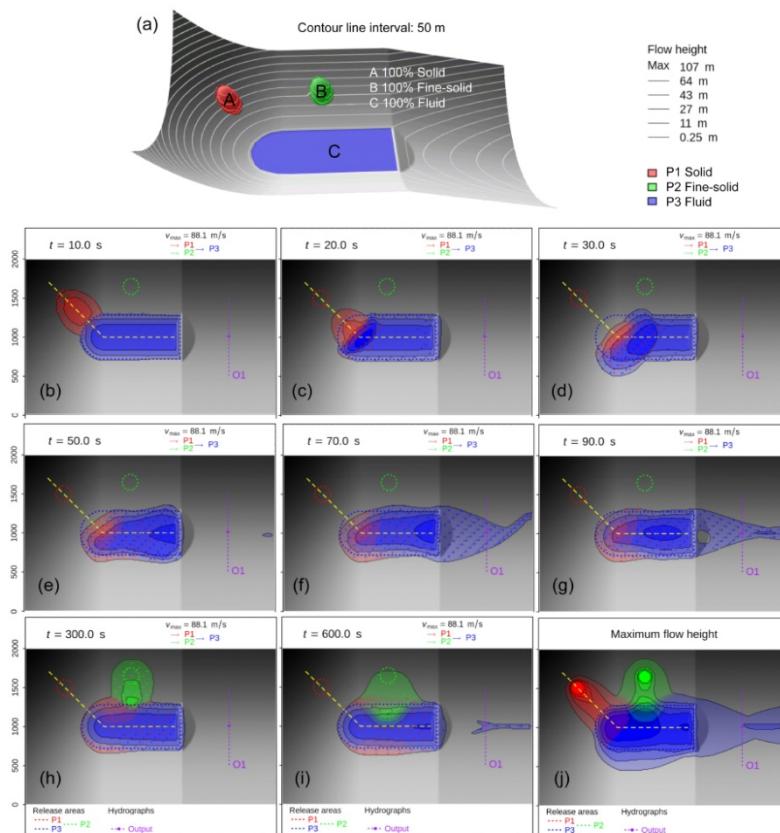


Abbildung 20: Vergleichstest bei der Entwicklung des Mehrphasenmodells. So stellt (b)-(i) die Fließhöhen zu verschiedenen Zeitpunkten dar, und (j) die maximale Fließhöhe während der gesamten Simulation. Hier sind sowohl die einzelnen rheologischen Eigenschaften zu erkennen, als auch die unterschiedlichen Interaktionen zwischen den Phasen (Quelle: PUDASAINI und MERGILI 2019).

Herausforderungen lassen sich – mit einem besonderen Fokus auf r.avaflow – aus MERGILI und PUDASAINI (2021) wie folgt zusammenfassen: Mit dem Mehrphasenmodell können erfolgreich historische sehr komplexe kaskadenhafte Extremereignisse nachmodelliert werden. Allerdings benötigt es bisher für jedes einzelne Ereignis eine fallspezifische Kalibrierung der Parameter, was bedeutet, dass diese Parameter nicht universell einsetzbar sind und es bei jedem komplexen kaskadenhaften Extremereignis eine erneute Kalibrierung benötigt. Dies macht eine Vorhersage von Extremereignissen mit Kaskadeneffekten ohne Vergleichsereignisse schwierig bzw. unpräzise. Zusammengefasst kann die Ursache dieser Herausforderung auf drei Faktoren beschränkt werden: (1) Mangelndes physikalisches Verständnis der Prozesse, was bei zufälliger oder schrittweiser Optimierung der Parameter zu Kombinationen von Parametern führen kann, die empirisch zufällig adäquate Ergebnisse liefern, aber nicht unbedingt physikalisch korrekt sind. (2) Numerische Implementierungen des physikalischen Modells in die Software führen zu Einschränkungen durch das numerische Schema. (3) Fein skalierte Muster der Oberflächen- und Sedimenteigenschaften führen zu einer räumlichen Variation der wichtigsten Modellparameter, die sich in einem Modell nur schwer darstellen lassen.

Obwohl diese Herausforderungen dazu führen, dass die Parameter bei jeder Modellierung von Extremereignissen mit Kaskadeneffekten kalibriert werden müssen, können mit dem Mehrphasenmodell komplex interagierende kaskadenhafte Extremereignisse modelliert werden.

### 3.3. r.avaflow und seine Funktionsweise

r.avaflow ist ein Open-Source-Tool zur Simulation der Dynamiken rutschender, fließender und komplexer gravitativer Massenströme über eine Oberfläche eines DEMs in Gebirgsregionen. Dieses Tool hat sowohl ein Mehrphasenmodell (siehe Kap. 3.2.1), als auch ein einphasiges Modell mit Voellmy-Rheologie (siehe Kap. 3.1.1) implementiert und unterscheidet sich damit von den meisten anderen Simulationsprogrammen zur Modellierung von rutschenden und fließenden Massenbewegungen, welche meistens ausschließlich auf einphasig-gemischte Modelle aufbauen. r.avaflow berücksichtigt bei dem Mehrphasenmodell die einzelnen Phasen und die Wechselwirkungen zwischen den Phasen sowie die Erosion und das Mitreißen von Material von der basalen Gleitfläche (Entrainment), mit einem empirisch ermittelten Koeffizienten. Dieser empirische Koeffizient wird mit der kinetischen Energie multipliziert. Des Weiteren zählen zu den ergänzenden Funktionen von r.avaflow Disposition und Dispersion von Material sowie Phasenumwandlungen. Jede denkbare Zusammenstellung von verschiedenen Phasen ist somit modellierbar. Daher eignet es sich auch für die Modellierung komplexer, kaskadenartiger Strömungsprozesse (MERGILI et al. 2020a; MERGILI et al. 2020b; MERGILI et al. 2018b; MERGILI et al. 2017a; MERGILI et al. 2017b; MERGILI und PUDASAINI 2021; PUDASAINI und MERGILI 2019; TRUJILLO-VELA et al. 2022).

Die Simulationsergebnisse werden durch Rasterkarten und Diagramme visualisiert und durch Textdateien festgehalten. Dabei werden die Ergebnisse für jeden Zeitabschnitt und der jeweiligen Maximalwerte von der Fließhöhe, der Geschwindigkeit, des Drucks, der kinetischen Energie und der Höhe der Mitnahme von Material dargestellt (MERGILI et al. 2018b; MERGILI et al. 2017a). r.avaflow 3G läuft dabei in einer Linux-Umgebung, wie z.B. Ubuntu 20.04 LTS oder höher, und verwendet die Programmiersprachen Python für das Datenmanagement, die Vorbearbeitung und Nachbearbeitung (r.avaflow.py). Des Weiteren verwendet r.avaflow die Programmiersprache C für das Verfahren zur Modellierung der Massenbewegungen (r.avaflow.main.c). Für die statistische Validierung und zur Erstellung von Graphiken und weiteren Visualisierungen verwendet r.avaflow die Statistiksoftware R (R CORE TEAM 2022) zusammen mit Python (r.avaflow.py+R) (MERGILI 2023; MERGILI et al. 2017a; siehe Abbildung 21). Dabei ist r.avaflow als Rastermodul der GRASS GIS Software (LANDA et al. 2022; NETELER und MITASOVA 2008) frei verfügbar (MERGILI et al. 2017a). Für die Modellierungen verwendet r.avaflow (r.avaflow.main.c) das hochauflösende numerische Schema NOC-TVD (Non-Oscillatory Central Differencing – Total Variation Diminishing) (NESSYAHU und TADMOR 1990; WANG et al. 2004) in Verbindung mit einem Modell vom Voellmy-Typ sowie in Verbindung mit einer verbesserten Version des Mehrphasenmodells von PUDASAINI und MERGILI (2019) und darüber hinaus auch in Verbindung mit einem Equilibrium-Bewegungsmodell für langsame Strömungen (MERGILI et al. 2017a; PUDASAINI und MERGILI 2019). Dabei können verschiedene TVD Flussbegrenzer (flux limiters) angewendet werden, wie beispielsweise der sogenannte Minmod limiter oder van Leer limiter, die bei numerischen Modellen auf unterschiedliche Weise realistische räumliche Werte und Dimensionen ableiten. Insbesondere die erwähnten limiter Minmod und van Leer ergaben bei WANG et al. (2004) in Verbindung mit der rheologischen Savage-Hutter Gleichung von granularem Fließen (SAVAGE und HUTTER 1989) sehr gute Ergebnisse für die Anwendung von rutschenden und fließenden Massenbewegungen über ein DEM.

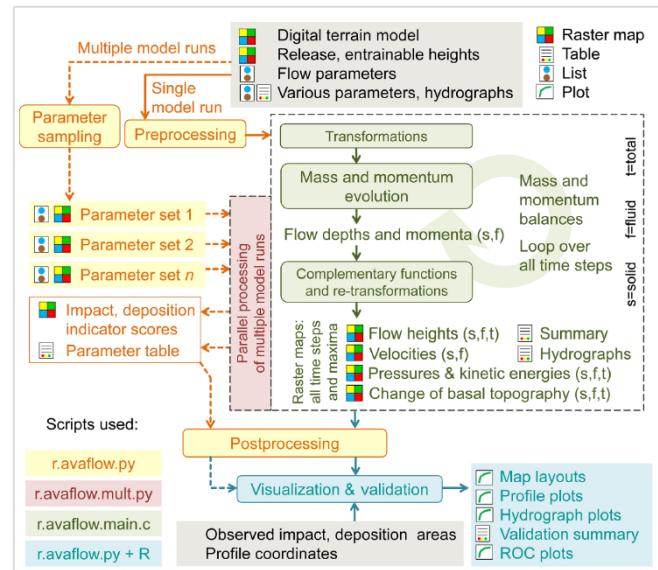


Abbildung 21: Logischer Aufbau von r.avaflow. Jedes Skript ist hierbei farblich kenntlich gemacht (Quelle: MERGILI et al. 2017)

Die rheologischen Grundlagen in r.avaflow bilden tiefengemittelten Gleichungen zur Massen- und Impulserhaltung für jede Phase (Kontinuumsmechanik). Die Festkörperspannung wird hierbei auf Grundlage des Mohr-Coulomb Bruchkriteriums berechnet, während die Flüssigkeit, verstärkt durch den Volumenanteil des Festkörpers, als eine nicht-newtonsche viskose Masse betrachtet wird. Die Impulsübertragung zwischen den Phasen findet mit einer virtuellen Masse, aufgrund der relativen Bewegung und

Beschleunigung der Phasen zueinander, statt. Dabei kann auch der Auftrieb sowie die Verformung, Trennung und Vermischung der Phasen berücksichtigt werden (MERGILI et al. 2018a; PUDASAINI und MERGILI 2019).

r.avaflow ist, wie anhand der vorgestellten Rheologien deutlich wird, auf schnelle strömungsähnliche Prozesse beschränkt und kann somit fallende, kippende und teilweise auch gleitende Phänomene nicht angemessen simulieren (MERGILI und PUDASAINI 2021).

In dem Kapitel 4.3 *Modellierung mit r.avaflow* wird kurz erläutert, wie Modellierungen mit r.avaflow in der konkreten Anwendung funktionieren.

### 3.4. (Sediment-)Konnektivität

Konnektivität ist in der Geomorphologie ein weit verbreitetes Konzept, welches in verschiedenen Forschungsbereichen angewendet wird (z.B. BRIERLEY et al. 2006). So findet das Konzept Anwendung in der fluvialen Geomorphologie (z.B. DRAGO et al. 2008; RICE 2017), der Bodenerosionsforschung (z.B. SANDERCOCK und HOOKE 2011), der Verbreitung von Nährstoffen und Schadstoffen (z.B. CHARTIN et al. 2013), der Ökologie (z.B. ZEUG et al. 2005), der Messung von Naturschutzmaßnahmen (z.B. MARÇAL et al. 2017; WOHL et al. 2015) oder z.B. als Ansatz von Mensch-Umwelt-Interaktionen, um geomorphologische Veränderungen von anthropogen beeinflussten fluvialen Systemen besser zu verstehen (POEPPL et al. 2017).

Obwohl das Konzept der Konnektivität in der Geomorphologie weit verbreitet ist, gibt es keine einheitliche Definition des Begriffes Konnektivität in der Geomorphologie (BRACKEN et al. 2015; CREMA und CAVALLI 2018; TURNBULL et al. 2018; WOHL et al. 2019). So kann der Konnektivitätsansatz im geomorphologischen Kontext als Transfer von Energie und Material, wie Sedimente, Nährstoffe oder Wasser, zwischen Landschaftselementen oder innerhalb eines Gesamtsystems beschrieben werden (FRYIRS et al. 2007b). BRACKEN et al. (2015) definiert die Sedimentkonnektivität, als den zusammenhängenden Transfer von Sedimenten von einer Quelle zu einer Senke durch Sedimentablösung und Sedimenttransport in einem System, indem die Sedimentbewegung durch alle geomorphologischen Einheiten einer Landschaft beeinflusst wird. Hierbei liegt der Fokus mehr auf den beeinflussenden Faktoren der Sedimentkonnektivität. KEESTRA et al. (2018) beschreibt die Konnektivität in der Geomorphologie hingegen als das Ausmaß, der Wasser- und Sedimentflüsse auf den Skalenebenen Aggregat, Pedon, Hang oder Wassereinzugsgebiet. Dabei bestimmen verschiedene Einflussfaktoren die Ausprägung der Sedimentkonnektivität, welche in der Abbildung 23 zusammengefasst sind. FRYIRS et al. (2007a) fasst Landschaftselemente mit einem stärkeren Fokus auf die konkreten Funktionen der Entkopplung (nicht verbunden) und Kopplung (verbunden) auf die Dimensionen der Konnektivität (siehe Kapitel 3.4.1) mit den drei Elementen Puffer, Barrieren, Decken (buffers, barriers, blankets) zusammen (siehe Kap. 3.4.2).

Sedimentkonnektivität ist in dieser Arbeit ein Konzept, welches sich mit dem Grad der Verbindung von Sedimentquellen zu Sedimentsenken sowie der Kopplung und Entkopplung von Sedimentein zugsgebieten auseinandersetzt (CAVALLI et al. 2013; FRYIRS 2013; FRYIRS et al. 2007a; FRYIRS et al. 2007b). Konnektivität als funktionales Element in der Landschaft ist ein wichtiger

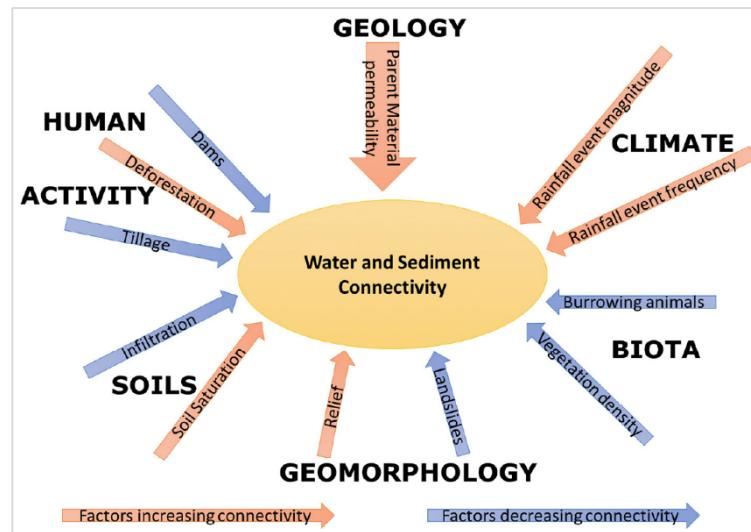


Abbildung 23: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren auf die Sediment- und Fluvial-Konnektivität nach KREESSTRA et al. (2018) (Quelle: KREESSTRA et al. 2018).

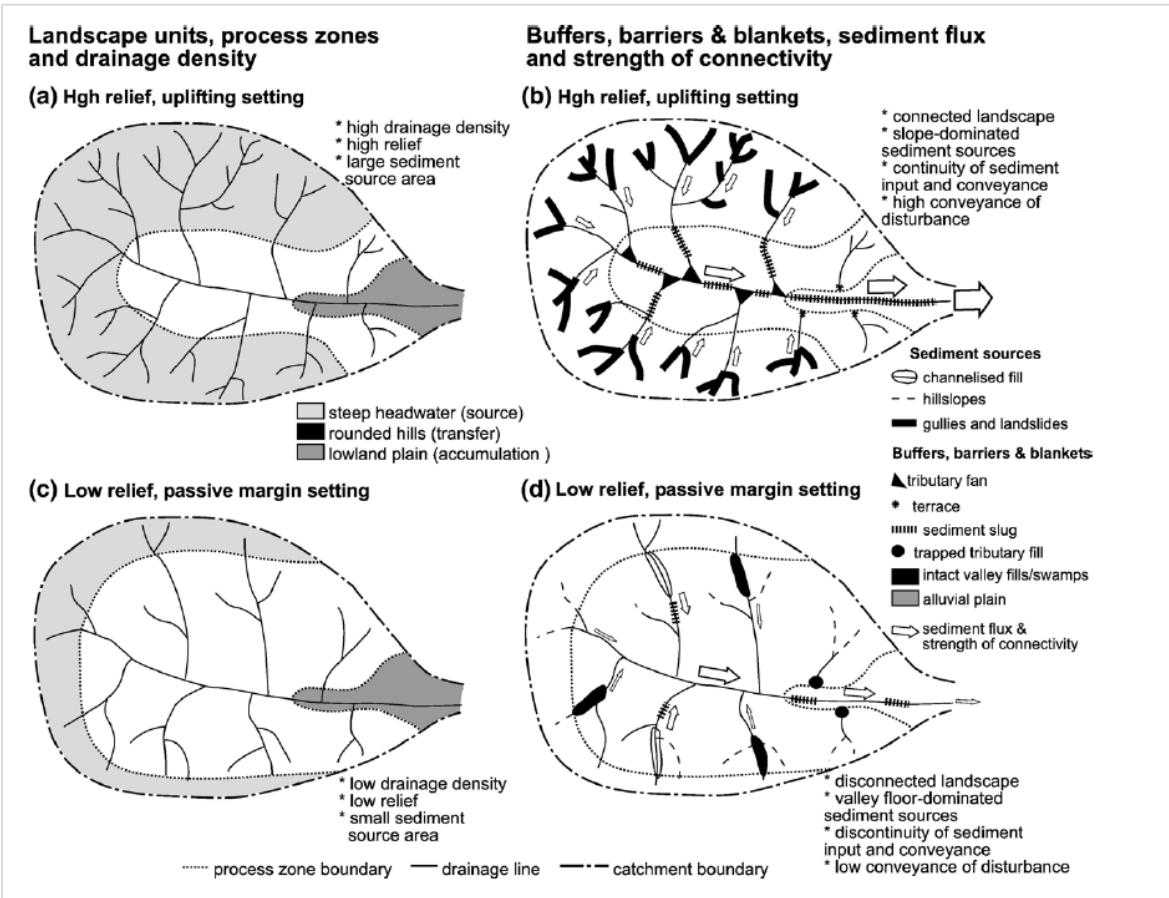


Abbildung 22: Schematische Darstellung der (Dis-)Konnektivität der Sedimentflüsse im Gelände mit einer hohen Reliefenergie im Vergleich zu einem Gelände mit einer niedrigen Reliefenergie. (a) Einzugsgebiete mit hoher Reliefenergie weisen in der Regel eine hohe Abflussdichte auf. Diese Einzugsgebiete werden von steilen Sediment-Quellgebieten und effiziente Transferzonen dominiert. (b) Innerhalb der Quellgebiete werden erhebliche Mengen an Sedimentmaterial aus Hangrinnenkomplexen und Erdrutschten zugeführt. Das Sediment wird entlang der Gerinne effektiv weitergeleitet. Gelegentliche Blockaden in Form von Schwemmfächern behindern den Transport von Sedimenten flussabwärts. Insgesamt ist die Konnektivität hoch. (c) Im Gegensatz dazu weisen Einzugsgebiete mit geringer Reliefenergie in der Regel eine niedrige Abflussdichte auf. Steile Gebiete sind in der Regel relativ klein und flache Schwemmlandebenen ausgedehnt. (d) Dabei gibt es große Sedimentseenken, die den Sedimenttransport durch das System puffern und unterbrechen. Der größte Teil des Sediments, das dem Entwässerungssystem zugeführt wird, stammt von der Talsohle. Insgesamt besteht eine niedrige Konnektivität (Quelle: FRYIRS et al. 2007a).

Bestandteil der Sensibilität der Landschaft, welches die Ausbreitung geomorphologischer Veränderungen innerhalb eines Einzugsgebiets sowohl flussaufwärts als auch flussabwärts kontrolliert (HECKMANN et al. 2018). Auch im Hochgebirge wird das Konzept der Konnektivität angewendet und seit zwei Dekaden intensiv weiterentwickelt (CAVALLI et al. 2013; HECKMANN und SCHWANGHART 2013; LANE et al. 2017; SCHOPPER et al. 2019; TIRANTI et al. 2018; TIRANTI et al. 2016), da Hochgebirge ein Relief mit hoher Reliefenergie und hoher Sensibilität aufweisen (z.B. AHNERT 2015; DIKAU et al. 2019; HECKMANN und MORCHE 2019; Abbildung 22). In diesen sensiblen Hochgebirgslandschaften ist der Einfluss von Landschaftselementen, welche zu einer Entkopplung oder Kopplung von Teilgebieten führen, auf die Sedimentkonnektivität besonders groß, insbesondere da die Unterschiede und die Auswirkungen zwischen verbunden und nicht verbunden besonders groß sind (FRYIRS et al. 2007a; HECKMANN et al. 2018; siehe Abbildung 22).

### 3.4.1. Dimensionen der Konnektivität

Beim dem Konzept Konnektivität in der Hydro-Geomorphologie kann der Ansatz von WARD (1989) und HARVEY (2002) angewendet werden, welcher zwischen den longitudinalen, lateralen sowie vertikalen Dimensionen der Konnektivität unterscheidet und um die temporale „vierte“ Dimension erweitert wird (siehe Abbildung 24). Während WARD (1989) das Konzept für die Betrachtung von lotischen Ökosystemen entwickelt hat, verwendet HARVEY (2002) dieses Prinzip für eine fluvial-geomorphologische Betrachtung. Die longitudinale, laterale und vertikale Konnektivität spiegeln die Funktionen verschiedener Prozesse und Landschaftselemente an verschiedenen Stellen in einem Einzugsgebiet wider (BRIERLEY et al. 2006; WARD 1989). Dies wird in der Arbeit von BRIERLEY et al. (2006) für verschiedene Skalenebenen, wie Untereinzugsgebiet, Einzugsgebiet, zwischen verschiedenen Landschaftselementen oder innerhalb von einzelnen Landschaftselementen, und den einzelnen Dimensionen der Konnektivität im Einzelnen aufgelistet.

Die *longitudinale Konnektivität* beschreibt, den Grad der Kopplung entlang von fluvialen Gerinnen. Dabei kann es sich je nach Untersuchungsgegenstand auf Sediment, Wasser, Fische, Benthos oder Nährstoffe beziehen. Die longitudinale Sedimentkonnektivität beschreibt den Grad des Sedimenttransports entlang von Gerinnen, Gerinnesystemen oder zwischen verschiedenen Abschnitten eines Gerinnes. Damit wird der Grad des Sedimenttransfers (Kopplung) zwischen z.B. Ober- und Unterlauf oder zwischen Neben- und Hauptgerinne beschrieben. Dabei kann das Sediment, je nach Grad der Kopplung, im Gerinne sowohl als Sedimentsenke und Sedimentquelle vorhanden sein und dabei flussabwärts transportiert werden (BRIERLEY et al. 2006; FRYIRS et al. 2007a; HARVEY 2002; LANE und RICHARDS 1997; WARD 1989).

Die *laterale Konnektivität* beschreibt den Grad der Kopplung zwischen fluvialem Gerinne und der umgebenden Landschaft, wie beispielsweise die umliegenden Hänge, die

Gewässerrandstreifen oder Auen. So tragen beispielsweise Ufererosion, gravitative Massenbewegungen, wie Muren, Rutschungen oder Steinschläge, zum Eintrag von Energie, Sediment, Nährstoffen und Organismen in die Gerinne zur lateralen Kopplung bei. In Auenlandschaften oder bei Hochwasser auf anderen Überschwemmungsflächen können auch Ablagerungen des Materials und von Energie stattfinden. Somit kann bei der lateralen Sedimentkonnektivität das Sediment, je nach Grad der Kopplung, als Sedimentenke und Sedimentquelle vorhanden sein und sowohl vom Gerinne in die umgebende Landschaft als auch von der umgebenden Landschaft in das Gerinne transportiert werden (BRIERLEY et al. 2006; FRYIRS et al. 2007a; HARVEY 2002; WARD 1989). Der Transport bei der lateralen Sedimentkonnektivität ist somit in beide Richtungen möglich, im Gegensatz zu longitudinalen Sedimentkonnektivität.

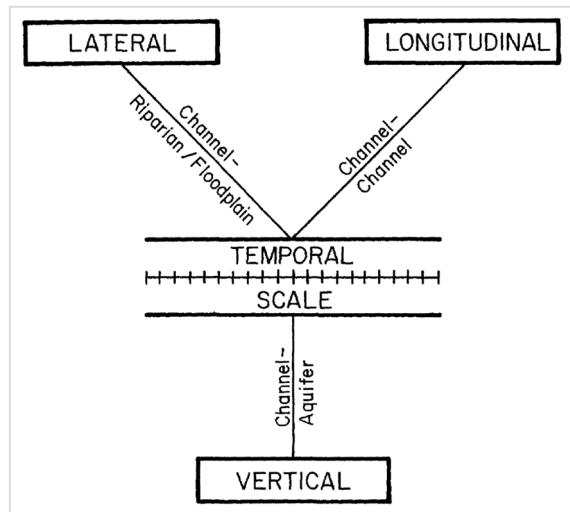


Abbildung 24: Die vier Dimensionen der Konnektivität nach WARD 1989 (Quelle: WARD 1989, verändert)

*Vertikale Konnektivität* bezieht sich auf die Wechselwirkungen und Austauschmöglichkeit zwischen Wasser, Energie, Sediment, Organismen und Nährstoffen zwischen der Oberfläche und dem Untergrund. Hierbei finden insbesondere Austauschprozesse statt, welche auf Grund von Ausgleichsbewegungen zwischen gesättigten und ungesättigten Bereichen stattfinden. Diese hängen unter Anderem von der Bodentextur, Verdichtung, Lithologie, Tektonik, dem Grundwasser und der Hydrologie sowie weiteren Faktoren, die den Austausch auf chemisch-physikalische Weise beeinflussen, ab. Der Grad der vertikale Sedimentkonnektivität ist dabei insbesondere von der Bodentextur und dem Wasseraustausch zwischen Oberflächen- und Unterflächenwasser abhängig. Bei erweiterter Betrachtung der vertikalen Konnektivität, kann auch die Atmosphäre und die Interaktion zwischen Atmosphäre und Gewässer in dieses Konzept integriert werden (BRIERLEY et al. 2006; FRYIRS et al. 2007a; HARVEY 2002; WARD 1989).

Die „vierte“ Dimension, die *temporale Konnektivität* (auch effektive Zeitskala), bringt die Funktionen der Landschaftselemente (longitudinale, laterale und vertikale Konnektivität) in einen zeitlichen Kontext und beschreibt die Veränderung dieser Funktionen über verschiedene Zeitspannen (siehe Abbildung 25). Dabei können an jeder beliebigen Stelle in der Landschaft die Funktionen der Landschaftselemente auf die Sedimentkonnektivität über verschiedene Zeitskalen Gebiete verbinden (koppeln) oder trennen (entkoppeln). Somit kann diese Dimension die Häufigkeit und Magnitude des Sedimenttransports sowie Veränderungen in Vegetation, Landnutzung und Management miteinbeziehen (BRIERLEY et al. 2006; FRYIRS et al. 2007a; HARVEY 2002; POEPL et al. 2012; WARD 1989). Verschiedene Puffer, Barrieren und Decken können hierbei die longitudinale, laterale und vertikale Konnektivität unterbrechen (siehe nächstes Kap.).

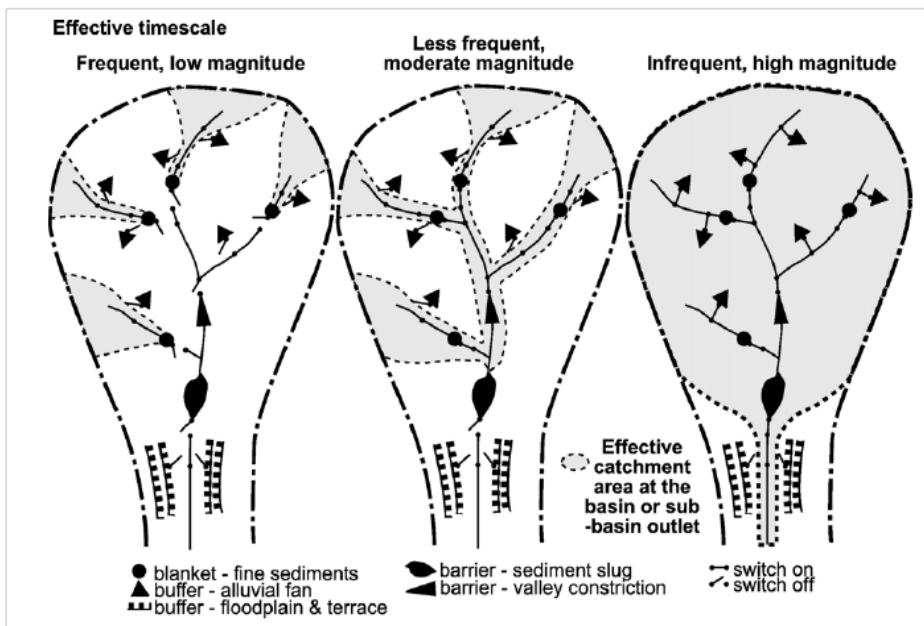


Abbildung 25: Schematische Darstellung der effektiven Zeitskala. Die effektive Zeitskala (temporale Konnektivität) wird entweder durch die Größe des erforderlichen Ereignisses ausgedrückt, welches Puffer, Barrieren oder Decken durchbrechen kann oder durch die Verweilzeit von Sedimentspeichern und Senken. Sie spiegelt den Zeitrahmen wider, in der sich die Konnektivität verändert (Quelle: FRYIRS et al. 2007a).

### 3.4.2. Puffer, Barrieren und Decken (Buffers, Barriers and Blankets)

Für diese Arbeit werden jene Einflussfaktoren auf den Grad der Kopplung der Sedimentkonnektivität näher betrachtet, welche durch die Arbeit von FRYIRS et al. (2007a) definiert werden, da sich diese für die Analyse von schnell ablaufenden gravitativen Massenbewegungen im Hochgebirge, wie Murenabgänge, gut eignen. Insbesondere, da sie die funktionalen Kopplungs- und Entkopplungseffekte der (lateralen) Konnektivität zwischen Gerinne und Sedimenteinzugsgebieten (Nebenfluss oder Hang) gut beschreiben können (FRYIRS et al. 2007a; FRYIRS et al. 2007b; siehe Abbildung 26). Aus diesem Grund wendet beispielsweise SCHOPPER et al. (2019) die Methode aus FRYIRS et al. (2007b) an, die auf diesen Einflussfaktoren fußt.

Jeder Einflussfaktor bezieht sich auf eine der drei Dimensionen der lateralen, longitudinalen und vertikalen Konnektivität. So sind *Puffer* Landschaftselemente, die den Sedimenteintrag in die Gerinne verhindern und somit die laterale Konnektivität entkoppeln bzw. blocken. Dies können z.B. Landschaftselemente wie Sümpfe, alluviale Schwemmfächer, Schuttflächen, intakte Talhänge, verfüllte Nebenflüsse und Überschwemmungsgebiete oder Sedimentterrassen, die den Sedimenttransfer in die Gerinne behindern, sein (BRIERLEY et al. 2006; FRYIRS et al. 2007a; SCHOPPER et al. 2019; Beispiele siehe Abbildung 27 (a)-(d)). Auch menschliche Bauwerke und Infrastrukturen können in die Definition der Puffer integriert werden, da z.B. auch Straßen den Sedimenttransport in die Gerinne verhindern können.

Sobald sich das Sediment im Gerinne befindet, können Landschaftselemente, die *Barrieren* darstellen, den Sedimenttransport entlang von Gerinnen unterbrechen. Somit können Barrieren die longitudinale Konnektivität entkoppeln bzw. blocken. Dies können beispielsweise Felsstufen, Geröll, Verklausungen, Talverengungen, die eine Rückverfüllung von Tälern zur Folge haben, oder Dämme sein (BRIERLEY et al. 2006; FRYIRS et al. 2007a; Beispiele siehe Abbildung 27 (e)-(h)). Durch menschliche Eingriffe in Flüsse, können erhebliche Barrieren für die longitudinale Konnektivität entstehen. So können beispielsweise Staudämme Nährstoffe, Lebewesen und, abgesehen von Schwebstoffen, Sedimente davon abgehalten werden, sich durch das Entwässerungssystem zu bewegen. Natürliche Barrieren sind hingegen in der Regel relativ lokal begrenzt und werden häufig revidiert oder durchbrochen (FRYIRS et al. 2007a).

*Decken* sind hingegen Landschaftselemente, die andere Landschaftselemente überlagern und dabei den Sedimentaustausch zwischen Untergrund und Gewässer verhindert bzw. blockt. Somit blocken bzw. entkoppeln Decken die vertikale Konnektivität. Dabei kann es sich beispielsweise um Sedimentschichten, Auenablagerungen oder Feinmaterial in den Zwischenräumen von Schotter handeln (siehe Abbildung 27 (i) und (j)), die nicht nur den Transfer von Sediment verhindern können, sondern auch von Nährstoffen oder Wasser. Decken treten häufig in alluvialen Flüssen auf, in denen Sedimentablagerungen im Flussbett sowie Sedimentsenken in Auen üblich sind (BRIERLEY et al. 2006; FRYIRS et al. 2007a).

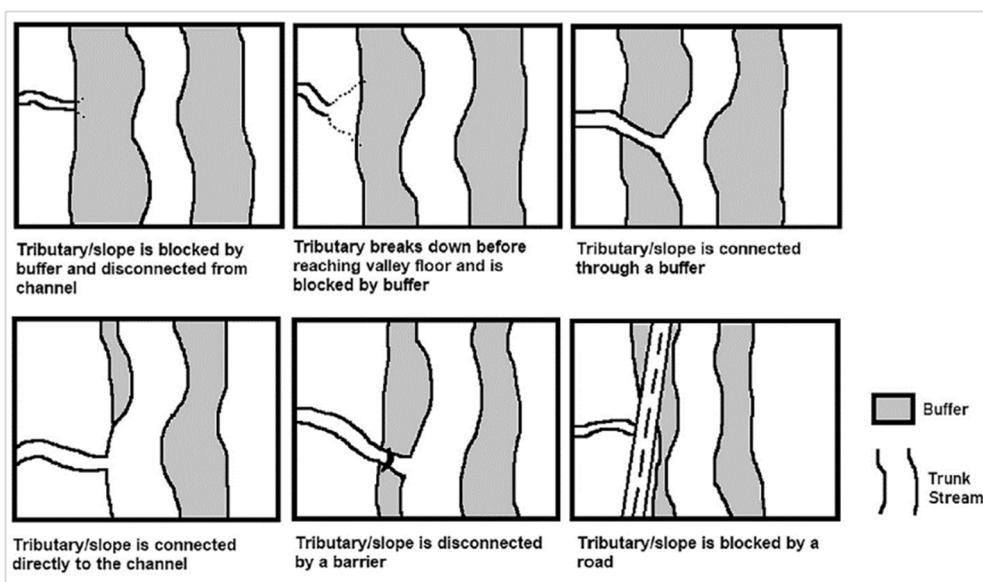


Abbildung 26: Mögliche Beziehungen von Nebenfluss/Hang und Hauptgerinne nach FRYIRS et al. (2007b) (Quelle: SCHOPPER et al. 2019).

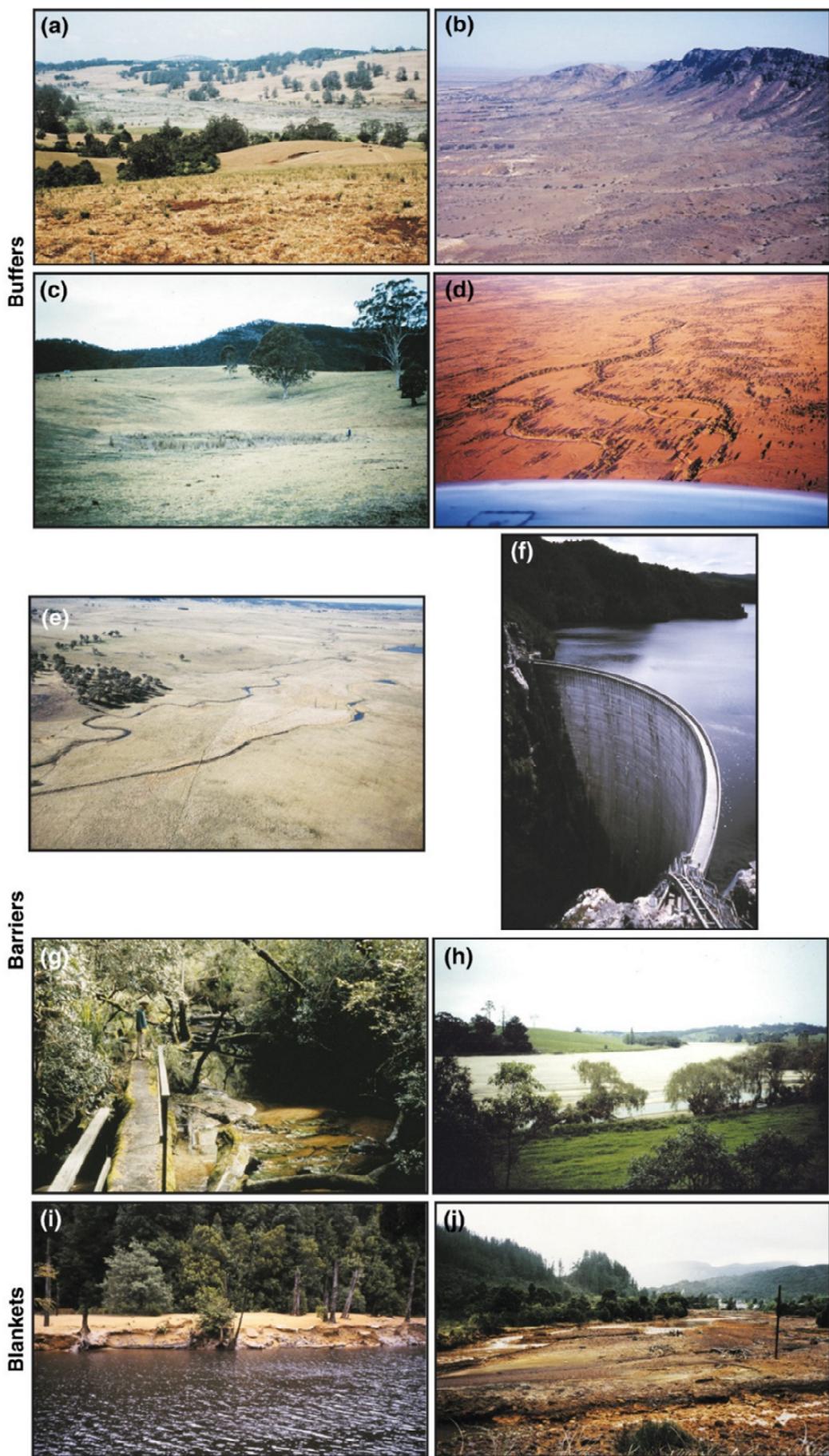


Abbildung 27: Beispiele für Puffer (a)-(d), Barrieren (e)-(h) und Decken (i) und (j) (Quelle: FRYIRS et al. 2007a).

### 3.4.3. Der Effective Catchment Area-Ansatz (ECA)

Im Gegensatz zum IC (siehe Kap. 3.4.4) ist der ECA-Ansatz kein rasterbasierter Index, sondern implementiert ein Konnektivität-Konzept, (HECKMANN et al. 2018), welches auf den Grundlagen der Kapitel 3.4.1 und 3.4.2 basiert. Allerdings ist der Ansatz nach FRYIRS et al. (2007b) vergleichbar mit der Hangaufwärtskomponente des ICs. Dabei implementiert der ECA-Ansatz jedoch ein anderes Konzept und basiert sowohl auf den hydrologischen Einzugsgebieten entlang des Hauptentwässerungsgerinnes sowie auf Feldbeobachtungen (HECKMANN et al. 2018). Dieser Index berücksichtigt stärker, dass nicht alle Einzugsgebiete des Hauptentwässerungsgerinnes, welche hydrologischen Abfluss produzieren und somit eine fluviale Kopplung aufweisen, auch tatsächlich hinsichtlich der Sedimentkonnektivität mit dem Hauptentwässerungsgerinne verbunden bzw. gekoppelt sind (ebd.). Die Basis dieses Ansatzes ist die funktionale Betrachtung der Puffer, die, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, die laterale Konnektivität eines Einzugsgebietes beeinflussen und somit das entscheidende Element zwischen Kopplung und Entkopplung eines Einzugsgebietes des Hauptentwässerungsgerinnes sind. Dieser Ansatz berücksichtigt ausschließlich die laterale Konnektivität, da der ECA-Ansatz allein die Hang-Gerinne Verbindung beschreibt. Der ECA-Ansatz nach FRYIRS et al. (2007b) verwendet ein DEM, um sowohl alle möglichen effektiven Einzugsgebiete (ECAs) entlang des Hauptgerinnes zu berechnen, als auch mittels Hangneigungsschellenwerten aus den möglichen ECAs, die tatsächlichen „effektiven“ Einzugsgebiete zu ermitteln. FRYIRS et al. (2007b) ermittelte durch die heuristische Methode „Trail-and-Error“ ein Schwellenwert von  $2^\circ$ . „Effektive“ Einzugsgebiete bedeuten, dass diese Einzugsgebiete tatsächlich Sedimentfracht von den Hängen bzw. der Umgebung in das Hauptgerinne transportieren und somit Puffer den Sedimenteintrag nicht verhindern (FRYIRS et al. 2007a; FRYIRS et al. 2007b; HECKMANN et al. 2018). Somit basiert dieser Ansatz auf der Annahme, dass die Hangneigung die Sedimentbereitstellung kontrolliert. Je nach Untersuchungsgegenstand und Forschungsarbeit unterscheiden sich die Hangneigungsschwellenwerte und die Anwendungen dieser Schwellenwerte, wie beispielsweise flexible Schwellenwerte (vgl. KUMAR et al. 2014; NICOLL und BRIERLEY 2017; SOUZA et al. 2016). So müssen die Schwellenwerte je nach UG angepasst und adaptiert werden (HECKMANN et al. 2018). Als weitere Komponente dieses Ansatzes ist die obligatorische Überprüfung durch Feldbegehungen bzw. wenn dies nicht möglich ist, durch genaues Überprüfen von hochauflösenden Orthofotos und DEMs, um die Berechnungen abzulegen und anzupassen (FRYIRS et al. 2007b; SCHOPPER et al. 2019).

Das Ergebnis des ECA-Ansatzes ist die Lage und Ausdehnung von effektiven Einzugsgebieten. Diese Gebiete ergeben sich zwar direkt aus dem Konzept der Konnektivität, welches in den Algorithmen und Karten implementiert ist, ist aber kein spezifisches Maß oder Index für Konnektivität im Sinne des Grades der Konnektivität. Dies heißt, dass der ECA-Ansatz nicht die Ausprägung der Konnektivität innerhalb der ECAs oder des UGs beschreibt. Es ist jedoch möglich, die ECAs mit der Größe des gesamten (hydrologischen) Untersuchungsgebietes zu vergleichen und somit festzustellen, welche Fläche effektiv mit dem Hauptgerinne verbunden ist bzw. wieviel nicht verbunden ist

(FRYIRS et al. 2007b; HECKMANN et al. 2018; NICOLL und BRIERLEY 2017; SCHOPPER et al. 2019).

### 3.4.4. Der Index of Connectivity (IC)

Der Index of Connectivity (IC) wurde ursprünglich von BORSELLI et al. (2008) für die Anwendung auf landwirtschaftlichen Einzugsgebieten entwickelt. CAVALLI et al. (2013) nahmen an diesem Ansatz wichtige Änderungen vor, um die Vorteile hochauflösender digitaler Geländefolde (DEM) zu nutzen und den IC für die Anwendung in Gebirgsregionen anzupassen. Der IC ist ein morphometrischer Index, der sich mit dem Einfluss der Topografie auf die Sedimentkonnektivität konzentriert und dabei den Grad der Konnektivität zwischen verschiedenen Bereichen des Einzugsgebietes auf ein ausgewähltes Ziel (z. B. der Schwarzenbach) oder auf den Auslass darstellt. Somit kann dieser Index die vertikale Konnektivität sehr gut darstellen. Bei der Berechnung mit dem Auslass als Ziel, wird die longitudinale Konnektivität zumindest mitberücksichtigt – auch wenn die longitudinale Konnektivität als eigenständige Dimension nicht darstellbar ist (HECKMANN et al. 2018).

Mathematisch gesehen wird der IC durch das Verhältnis zwischen der logarithmischen Hangaufwärts- und der Hangabwärtskomponente ausgedrückt (BORSELLI et al. 2008):

$$IC = \log_{10} \left( \frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) \quad (2)$$

Hierbei stellt  $D_{up}$  die Hangaufwärtskomponente und  $D_{dn}$  die Hangabwärtskomponente der Konnektivität dar. Die Spannweite des ICs liegt zwischen  $[-\infty, +\infty]$ , wobei je höher der Wert ist, desto höher ist auch die Konnektivität.

Dieser Index gibt das Potenzial für die abwärts gerichtete Weiterleitung von hangaufwärts produzierten Sedimenten und die (gewichtete) hydrologische Weglänge zum nächstgelegenen Ziel oder zur nächsten Senke für jede Zelle des DEMs an (siehe Abbildung 28).

$D_{up}$  wird dabei als

$$D_{up} = \bar{W} \bar{S} \sqrt{A} \quad (3)$$

Definiert, wobei  $\bar{W}$  den durchschnittlichen Gewichtungsfaktor (siehe unten),  $\bar{S}$  den durchschnittlichen Steigungsgradienten (m/m) und  $\sqrt{A}$  das Einzugsgebiet ( $m^2$ ) der jeweiligen Hangaufwärtskomponente darstellt.  $D_{dn}$  hingegen wird durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{W_i S_i} \quad (4)$$

Dabei drückt  $d_i$  die Länge des hydrologischen Weges auf dem DEM der  $i$ -ten Zelle in Metern bis zum Ziel aus.  $W_i$  und  $S_i$  sind der Gewichtungsfaktor und der Steigungsgradienten der  $i$ -ten Zelle.

Um den Widerstand des Abflusses und der Sedimentflüsse zu modellieren, wird – wie oben erwähnt – ein Gewichtungsfaktor ( $W$ ) in beide Komponenten des IC einbezogen. In Gebirgszugsgebieten können hochauflösende DEMs einen wichtigen Input für die Ableitung der Oberflächenrauigkeit darstellen, um ein objektives Maß für den physikalischen Widerstand beim Fließprozess in die Bewertung der Konnektivität einzubeziehen (CAVALLI et al. 2013). Der Rauheitsindex wurde zur Berechnung des Gewichtungsfaktors anhand der folgenden Gleichung verwendet:

$$W = 1 - \left( \frac{RI}{RI_{MAX}} \right) \quad (5)$$

Dabei ist  $RI$  der Rauheitsindexwert und  $RI_{MAX}$  der maximale Wert von  $RI$  im UG. Der Rauheitsindexwert wird wiederum nach (CAVALLI et al. 2008) mit folgender Gleichung berechnet und stellt dabei die Standardabweichung der Residuen der Topographie dar:

$$RI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (x_i - x_m)^2}{25}} \quad (6)$$

Die 25 stellt beispielhaft die Anzahl der Zellen ( $5 \times 5$ ) eines beweglichen Fensters dar, welches zur Berechnung des Rauheitsindexes der jeweiligen Zelle angewendet wird.  $x_i$  drückt hierbei den Wert einer bestimmten Zelle innerhalb des beweglichen Fensters aus, während  $x_m$  den Durchschnittswert der 25 Zellen des beweglichen Fensters ausdrückt.

Für die Berechnung dieses Indexes steht die Stand-alone Anwendung SedInConnect zur Verfügung (CREMA et al. 2015; CREMA und CAVALLI 2018), welches unter dem Kapitel *Methodisches Vorgehen* kurz erläutert wird.

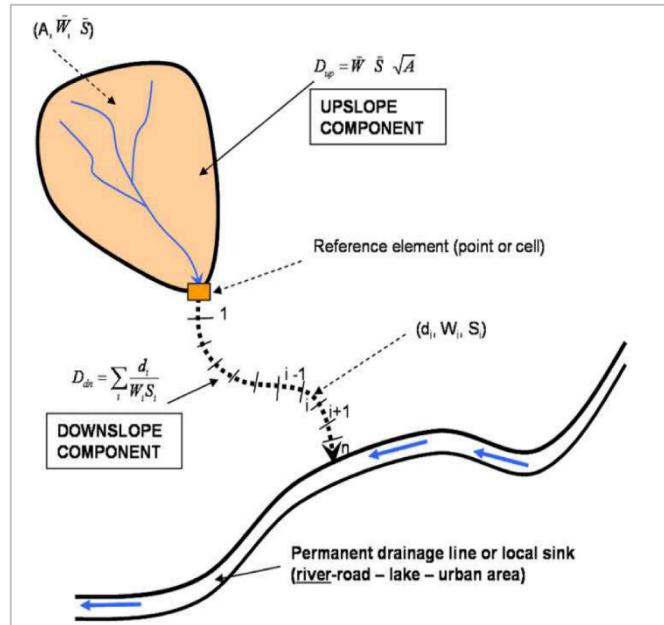


Abbildung 28: Schematische Darstellung, wie die Hangaufwärts- und Hangabwärtskomponenten definiert werden (Quelle: BORSELLI et al. 2008)

## 4. Methodisches Vorgehen

Nachdem die wichtigsten theoretischen Grundlagen für die Beantwortung der Forschungsfragen umfangreich dargelegt wurden, werden in diesem Kapitel die angewendeten Methodiken, mit deren Hilfe die Forschungsfragen beantwortet werden, erläutert und erklärt. Nachdem die verwendeten Daten und die Datenaufbereitung beschrieben werden, werden die verwendeten Modellierungsansätze, also sowohl die Konnektivitätsanalysen, als auch die Modellierung der Extremereignisse mit r.avaflow, beschrieben und erläutert. Hierbei wird eine Kombination an Methodiken angewendet, welche in dieser Kombination bisher noch nicht angewendet wurden. So werden die Konnektivitätsanalysen durch die Berechnungen des IC und des ECA-Ansatzes sowie die Simulationen von Extremereignissen, in diesem Fall mit r.avaflow, miteinander verknüpft. Dies ist in dieser Form noch nicht versucht worden und stellt einen innovativen Ansatz dar, da durch die Verschneidung der Aussagen der einzelnen Untersuchungsansätze neue Aussagen getroffen werden können. Diese Kombination an Methodiken kann methodisch betrachtet, als eine Fortsetzung der Arbeit von SCHOPPER et al. (2019) verstanden werden. Diese Arbeit hat ebenfalls Konnektivitätsanalysen mit dem IC und ECA-Ansatz im Kontext von schnell ablaufenden gravitativen Massenbewegungen, in diesem Fall Muren, durchgeführt. Allerdings wurde hierbei das Auftreten von Muren anhand von einer Datenbank über vergangenen Murabgänge in den Kontext der Konnektivitätsanalysen gestellt und der Zusammenhang zwischen Konnektivität und dem Auftreten von Murgängen untersucht. Bei der vorliegenden Forschungsarbeit soll ein konkretes komplexes kaskadenhaftes Extremereignis simuliert werden und der Einfluss dieses Ereignisses auf die Konnektivität untersucht werden. Darüber hinaus sollen mit den kalibrierten Parametern weitere mögliche Szenarien modelliert werden und ebenfalls der Einfluss auf die Konnektivität untersucht werden. Des Weiteren stellt sich die Frage, ob mit den Konnektivitätsanalysen Rückschlüsse auf mögliche Szenarien möglich sind. Die „vierte“ Dimension der Sedimentkonnektivität (siehe Kap. 3.4.1), die effektive Zeitskala (HARVEY 2002; WARD 1989), beschreibt die Veränderung der Sedimentkonnektivität über die Zeit und beschreibt damit auch den Einfluss von Magnitude und Frequenz von Extremereignissen auf die Sedimentkonnektivität. Somit kann aufgrund der Verknüpfung der Methoden ein Beitrag zur Untersuchung der „vierten“ Dimension der Sedimentkonnektivität beigetragen werden sowie die Frage behandelt werden, inwiefern Konnektivitätsanalysen für die Modellierung von Extremeszenarien hilfreich sein können. Darüber hinaus ist das Analysetool r.avaflow bisher vor allem für komplexe Prozesskombinationen angewendet worden (z.B. MERGILI et al. 2020a; MERGILI et al. 2020b; MERGILI et al. 2018b), wobei die Modellierungen dieser Arbeit jeweils zwei Prozessabschnitte darstellen.

Diese Analysen sind mit dem r.avaflow 3G Erweiterungstool für GRASS GIS (siehe Kap. 3.3), mit ArcGIS Pro 3.0 bzw. 3.1 und insbesondere den Toolboxen „Spatial Analyst Tools“ und „Data Management Tools“ sowie mit der Stand-alone Software SedInConnect 2.3 (siehe Kap. 4.2.2) durchgeführt worden.

## 4.1. Datengrundlage und Datenaufbereitung

Die Datenakquise mit genügender Datenqualität in der physischen Geographie bei Fragestellungen zu betreiben, die sich auf abgelegene und schwer zugängliche Gebiete beziehen, sind häufig mit Schwierigkeiten verbunden (RUDOLF-MIKLAU et al. 2009). So sind Datensätze, die mit Fernerkundungsmethoden gesammelt werden, ein häufiger und nützlicher Ansatz. Als Grundlage für diese vorliegende Arbeit wurden demnach Daten aus Fernerkundungsmethoden verwendet. Die Messung von schnellablaufenden gravitativen Massenbewegungen in diesen abgelegenen Gebieten ist in den meisten Fällen ebenfalls schwierig, unter anderem da die Messungen und die daraus resultierenden Vorhersagen Unsicherheiten aufweisen. Somit muss man häufig auf die Messung und Interpretation von „stummen Zeugen“ und anderen Indizien zurückgreifen (ebd.). So kann beispielsweise die Höhe einer Flutwelle im Hochgebirge an der Höhe der geschädigten Baumrinden der säumenden Bäume des Gerinnes geschätzt werden oder die Ablagerungen von Muren können Hinweise auf die Häufigkeit, Magnitude und Art der Muren sein (PÖPPL und SASS 2020; RUDOLF-MIKLAU et al. 2009).

Die Grundlage des praktischen Teils der Arbeit sind Daten (siehe Tabelle 2), welche mittels GIS-Softwaretools bearbeitet werden können. Eine Datenquelle stellt das „Referat Statistik und Geoinformation des Landes Steiermark“ mit seinem Steiermark-GIS dar. Bei dieser Datenquelle können aktuelle und ältere Orthofotos, Höhendaten, oder geologische Daten für die Verwendung und Bearbeitung in einer GIS-Software heruntergeladen werden (LAND STEIERMARK 2023). Des Weiteren werden Daten von Die Wildbach, Sektion Liezen verwendet, welche die kartierten Aufstaubereiche und die Schadensflächen darstellen sowie rekonstruierte Durchflussraten des Extremereignisses von 2010 beinhalten. Diese Daten werden aus dem Bericht „Multi-Hazards und Kaskadeneffekte“ entnommen bzw. bei den Autoren des Berichtes erbeten (PÖPPL und SASS 2020). Als weitere Datengrundlage wurden die Muranrissbereiche aus der Arbeit von Traper (2016) verwendet, welche die Bereiche wiedergeben, die die Einzugsgebiete der Gerinnemuren des Extremereignisses vom 17.07.2010 darstellen. Hierbei wurden einige dieser Einzugsgebiete durch das Setzen eines neuen Punktes als Auslass der Gerinnemuren verkleinert oder vergrößert, wobei die Punkte in jedem Fall den Auslass des Einzugsgebietes der Gerinnemuren darstellen. Diese Anpassung wurde vorgenommen, wenn die Einzugsgebiete bei dem Vergleich mit den Orthofotos 2010/2012 nicht übereinstimmten. Hierbei war maßgebend, wo die Einzugsgebiete der Gerinnemuren in einem Gerinne mündeten und somit ein eindeutiger Auslasspunkt und der räumliche Beginn der kanalisierten Massenbewegung identifiziert werden konnte.

Als aktuelles Orthofoto wurde das Orthofoto von 2021 verwendet. Für die bildliche Überprüfung der Anrissbereiche und der Ablagerungsbereiche wurden die Orthofotos von 2009/2010 bzw. für die Bereiche, welche bei dieser Befliegung 2009 aufgenommen wurden, von 2012 verwendet. Um einen Vergleich von vor dem Extremereignis und nach dem Extremereignis zu haben, insbesondere bei den flächigen Anrissbereichen, wurde das

Orthofoto von 2004/2006 verwendet (siehe Tabelle 2).

Die Vorbereitung der Daten umfasste den Datendownload (LAND STEIERMARK 2023) und das Sammeln der Daten. Die weitere Datenaufbereitung wurde mit der Software ArcGIS Pro und den Funktionen von ArcGIS Pro durchgeführt. Beim Datendownload wurden einzelne Kacheln heruntergeladen, welche mit der Funktion „Mosaic“ von ArcGIS Pro zusammengefügt und in weiterer Folge auf das UG mit den Funktionen „Clip Raster“ und „Extract by Mask“ zugeschnitten wurden. Für jede weitere hydrologische Analyse ist es wichtig, dass das DEM von kleineren Fehlern bereinigt wird. Dies wurde mit der Funktion „Fill“ erreicht, mit welcher kleine Senken „aufgefüllt“ wurden, die auf Grund von Unschärfen der Daten, auftreten können (ARCGIS PRO 2023).



Abbildung 29:  
Schematische Darstellung  
der Funktion „Fill“ (Quelle:  
ARCGIS PRO 2023)

Tabelle 2: Qualität, Quellen und Jahr der verwendeten Daten (Quelle: eigene Darstellung).

Daten	Auflösung	Quelle	Format	Jahr/Erstellt
<b>DEM</b>	1x1 m	LAND STEIERMARK 2023	Raster	2012
<b>Orthofoto 2021</b>	20x20 cm	LAND STEIERMARK 2023	Raster	08. & 09.2021
<b>Orthofoto 2012</b>	20x20 cm	LAND STEIERMARK 2023	Raster	08.2012
<b>Orthofoto 2009/2010</b>	20x20 cm	LAND STEIERMARK 2023	Raster	09.2009 bzw. 09.2010
<b>Orthofoto 2004/2006</b>	25x25 cm	LAND STEIERMARK 2023	Raster	09.2004 bzw. 09.2006
<b>Lithologie</b>	-	LAND STEIERMARK 2023	Vektor	
<b>Aufstaubereiche</b>	-	PÖPPL und SASS 2020, IfGR	Vektor	2010
<b>Schadensflächen</b>	-	PÖPPL und SASS 2020, IfGR	Vektor	2010
<b>Abrissbereiche d. Gerinnemuren</b>	-	TRAPER 2016	Vektor	2016

## 4.2. Modellierung des Indexes IC und des ECA-Ansatzes

Das DEM von 2012, die DEMs nach den Modellierungen des Extremereignisses und der Extremeszenarien sowie das aktuelle Orthofoto bildeten die Basis für die Berechnung der Konnektivitätsanalysen. Der ECA-Ansatz (FRYIRS et al. 2007b) wird direkt mit ArcGIS und der IC (BORSELLI et al. 2008; CAVALLI et al. 2013) mit der Stand-alone Software SedInConnect (CREMA und CAVALLI 2018) errechnet. Auch hierfür müssen die Daten vorher sorgfältig vorbereitet und bearbeitet werden. Für den ECA-Ansatz ist auch eine Feldanalyse notwendig, während dies für den IC nicht nötig ist. Der IC kann allerdings während der Feldarbeit eine hilfreiche Ergänzung sein. Der IC ist ein rasterbasierter Konnektivität-Index, während der ECA eher einen Ansatz darstellt, der ein Konnektivitätskonzept umsetzt. Hierdurch kann der ECA-Ansatz besser berücksichtigen, dass nicht alle sedimentproduzierenden Gebiete eines UGs auch tatsächlich Sediment *in* das Hautgerinne

transportieren. Auf der anderen Seite wird bei den ECAs nicht weiter unterschieden, woher das Sediment innerhalb eines ECAs kommt, d.h. die Konnektivität innerhalb der ECAs wird nicht weiter berücksichtigt (HECKMANN et al. 2018).

#### 4.2.1. Modellierung der ECAs

Für die Modellierung der ECAs wurden sowohl das DEM als auch das Orthofoto von 2019 (siehe Tabelle 2) benötigt. Wie bei allen Analysen wurde hierbei das DEM verwendet, welches mit der Funktion „Fill“ vorbereitet wurde. Als Grundlage dieser Modellierung bzw. dieser Methode diente die Arbeit von FRYIRS et al. (2007b). Somit musste für jeden Pixel des DEMs entlang des Böschungsbereiches des Schwarzenseebaches ein Punkt erstellt werden, der als möglicher Auslasspunkt der ECAs dient. Hierfür wurde anhand des Orthofotos von 2019 und bei dichter Vegetation zusätzlich anhand des DEMs händisch ein Polygon erstellt, welches den Schwarzenseebach umschließt und der Rand des Polygons am Böschungsufers des Baches verläuft (siehe Abbildung 33). An den Rändern des Polygons ist somit der Übergang zwischen den morphologischen Einheiten Hang und Gerinne. Da Wildbäche im Hochgebirge in ihrer lateralen Ausdehnung, beispielsweise auf Grund von breiten Umlagerungsstrecken und schmalen Schluchten, stark variieren, wurde dieser händische Ansatz gewählt (SCHOPPER et al. 2019). Der Ansatz nach FRYIRS et al. (2007b) beschreibt hingegen eine Annährung an diesen Übergang entlang des Böschungsufers, indem um das digitalisierte Gerinne mit der Funktion „Buffer“ ein Polygon erstellt wird. Um nun einem Punktlayer entlang dieses Überganges zu generieren, wurde als erster Schritt mit der Funktion „Polygon to Line“ aus dem Rand des Polygons eine Linie erstellt, mit welcher im nächsten Schritt mit der Funktion „Polyline to Raster“ ein Rasterlayer erstellt wurde. Bei diesem Schritt war es wichtig (wie bei allen Berechnungen mit ArcGIS hinsichtlich Rasterlayer, welche zusammen für eine Analyse verwendet werden), unter dem Reiter „Environments“ (Umgebungseinstellungen) mit „Snap Raster“ (Fang-Raster) sicherzustellen, dass die erzeugten Rasterzellen mit Rasterzellen des DEMs deckungsgleich sind. Hierbei wurde sichergestellt, dass bei der Ausführung der nächsten Funktion „Raster to Point“ bei erneuter Berücksichtigung der „Snap Raster“ Einstellung, die Punkte direkt auf den Rasterzellen des DEMs liegen und somit entlang des Schwarzenseebaches jeder mögliche Auslass der ECAs auf Grundlage des DEMs von 2012 als Punkt vorhanden ist (siehe Abbildung 33). Sobald diese Grundlage vorhanden war, ließen sich mögliche ECAs mit der Funktion „Watershed“ relativ einfach erstellen, indem bei dem Feld „Input pour point data“ der Punktlayer eingefügt wurde. Die Grundlage für die Funktion „Watershed“ bildete der Rasterlayer, welcher mit der Funktion „Flow Direction“ aus dem DEM erstellt wurde. Hierbei wurde für jede Rasterzelle des DEMs die Fließrichtung bestimmt (siehe Abbildung 30). Mit diesem Rasterlayer sowie dem Punktlayer für die Auslasse, ließen sich alle hydrologischen Einzugsgebiete des Schwarzenseebaches erstellen (siehe Abbildung 30). Welche Einzugsgebiete nun ein ECA (Effektive Einzugsgebiete) darstellen, wird, wie im Folgendem beschrieben, im Feld kartiert.

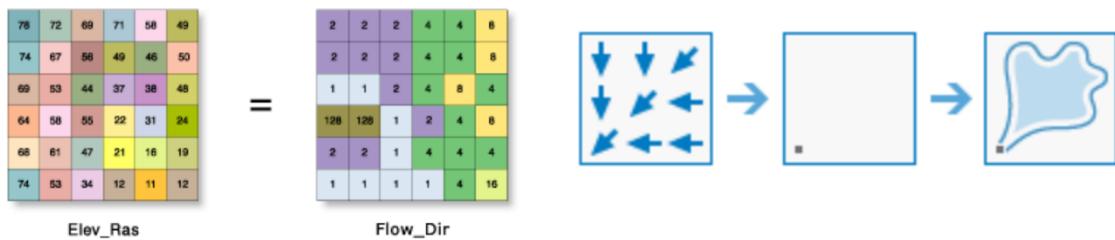


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Funktionen „Flow Direction“ (links) und „Watershed“ (Quelle: ARCGIS PRO 2023).

Nachdem mittels der Berechnungen mit ArcGIS jedes mögliche Einzugsgebiet bezüglich der (Sediment-)Konnektivität entlang des Schwarzenbaches vom Schwarzensee bis zum Auslass des Schwarzenbaches errechnet wurde, müssen diese Einzugsgebiete danach im Feld überprüft werden. Hierbei wurde entlang des Schwarzenbaches kartiert, wo ein rezenter Sedimenteintrag vorhanden ist. Der gesamte Schwarzenbach musste hierfür abgegangen und überprüft werden, wo erkennbare Zeichen für einen Sedimenttransport vorhanden sind. Dies bedeutet, dass hierbei nach fluvialen Sedimentablagerungen in den Zuflüssen und/oder im Schwarzenbach gesucht wurde (siehe Abbildung 31 A bis D). Des Weiteren wurde überprüft, ob Sedimentablagerungen auf der Vegetation vorzufinden war sowie ob die Vegetation auf Grund von Ablagerungen gestört war, wie beispielsweise bei Murgerinnen und Murkegeln. Hierbei wurde unterschieden, ob das Sediment bis zum Gerinne (Schwarzenbachtal) transportiert wurde oder ob der Transport vorher stoppte (vgl. Abbildung 31 A bis F).

Die Versuche in diesem UG ECAs mit Hilfe von Schwellenwerten zwischen  $0,5^\circ$  bis  $8^\circ$  zu berechnen (FRYIRS et al. 2007b; NICOLL und BRIERLEY 2017; SCHOPPER et al. 2019), führten, auf Grund des hohen anthropogenen Einflusses im UG, zu keinen hilfreichen Ergebnissen. Dass Straßen, Brücken und andere anthropogene Bauwerke mögliche Fehlerquellen sein können, wurde auch von SCHOPPER et al. (2019) erkannt und als solche benannt. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit eine Variante dieses Ansatzes mit einem Schwellenwert von  $0^\circ$  (d.h. keinen Schwellenwert) in Kombination mit der Feldanalyse angewendet. Des Weiteren wurden insbesondere durch anthropogenen Einfluss, einige möglichen Einzugsgebiete anders berechnet als in der Realität vorgefunden wurde, da die Berechnung auf Grundlage des DEMs basiert und somit anthropogene Veränderungen, die unterhalb der Oberfläche vorgenommen wurden und dabei die Hydrologie verändern, hierbei nicht berücksichtigt werden konnten. Dies führte dazu, dass insbesondere auf der orographisch rechten Seite des Schwarzenbaches, entlang der Zufahrtsstraße, verschiedene hydrologische Untertunnelungen nicht berücksichtigt wurden. Dies hatte zur Folge, dass die hydrologischen Einzugsgebiete zu groß und nicht korrekt dargestellt wurden. An solchen Untertunnelungen, welche im Feld als verbunden (connected) klassifiziert wurden, wurden hinterher zur korrekten Berechnung der Einzugsgebiete, auf der zum Hang gerichteten Seite der Straße mögliche Auslasspunkte auf Pixel des DEMs gesetzt und anhand von diesen Auslasspunkten ein neues Einzugsgebiet erzeugt (siehe Abbildung 33).

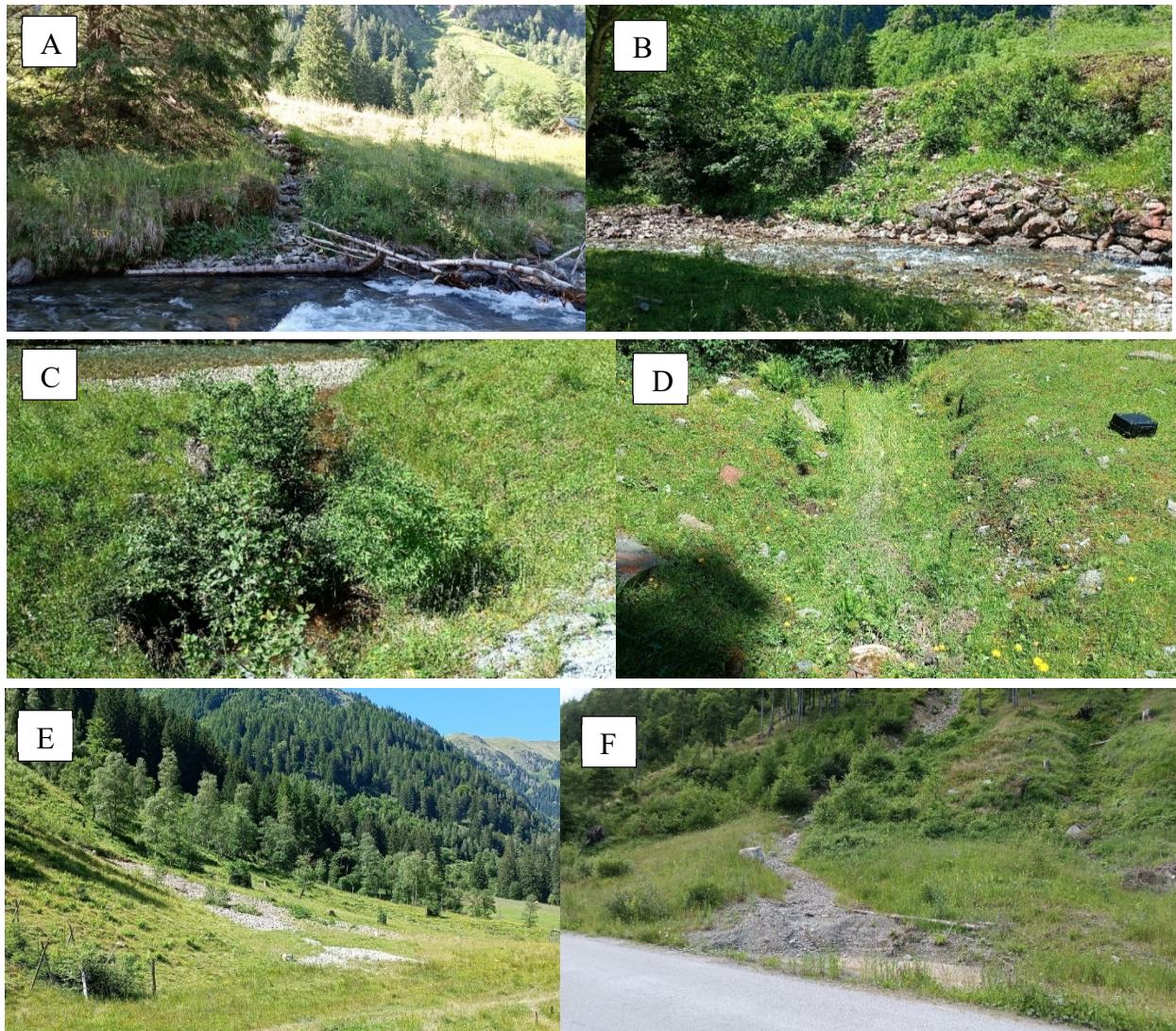


Abbildung 31: A: Erkennbare Sedimentablagerungen bis zum Schwarzenbach, weshalb das dazugehörige Einzugsgebiet verbunden ist; B: Verbunden, da das Material trotz einen möglichen Puffer durch alluviale Ablagerung bis zum Schwarzenbach transportiert wird; C: Durch Untertunnelung unter der Zufahrtsstraße (Standort der Kamera) eindeutig verbunden; D: Materialablagerungen auf der Vegetation bis zum Schwarzenbach ist erkennbar, weshalb auch hier ein lateraler Sedimenteneintrag erkennbar ist; E: Ein nicht verbundenes Einzugsystem, da der Sedimenttransport vorher durch einen Puffer (Überschwemmungsgebiet/Schuttkegel) stoppt; F: Durch Straße (Puffer) geblocktes Einzugsgebiet (bei größeren Ereignissen dürfte die Straße allerdings überspült werden) (Quelle: eigene Aufnahmen 29.07.2023).

Auch der Effekt, dass durch anthropogenen Einfluss Teilbereiche der hydrologischen Einzugsgebiete der ECAs geblockt bzw. in verbundene (coupled) und nicht verbundene (decoupled) Gebiete geteilt werden, war im Schwarzenbachtal zu beobachten. So wurde bei der Breitlahnhütte auf der orographisch rechten Seite bei der Berechnung mit der „Watershed“ Funktion ein großes mögliches ECA ausgegeben, welches sich über die Zufahrtsstraße erstreckte. Da im Feld die Straße an diesem Abschnitt allerdings als blockendes Element identifiziert werden konnte und von der Hangseite das Sediment erkennbar nicht über die Straße transportiert wurde, sondern dort eine Sedimentsenke entstanden ist, gleichzeitig jedoch der flussseitige Abschnitt verbunden war, wurde dieses Einzugsgebiet entlang der Zufahrtsstraße zugeschnitten (siehe Abbildung 32). Für diese

Anpassung wurde die Funktion „Split“ verwendet und somit das ursprüngliche Polygon geteilt und das neue hangseitige Polygon entfernt.

Nachdem die ECAs des UGs ermittelt wurden, wurden mit den ArcGIS Funktionen „Calculate Geometry Attributes“ und „Summary Statistics“ die Flächen der ECAs ermittelt und zusammengefasst, um Aussagen treffen zu können, wie z.B. welche Anteile des UGs als ECA ausgewiesen werden können.

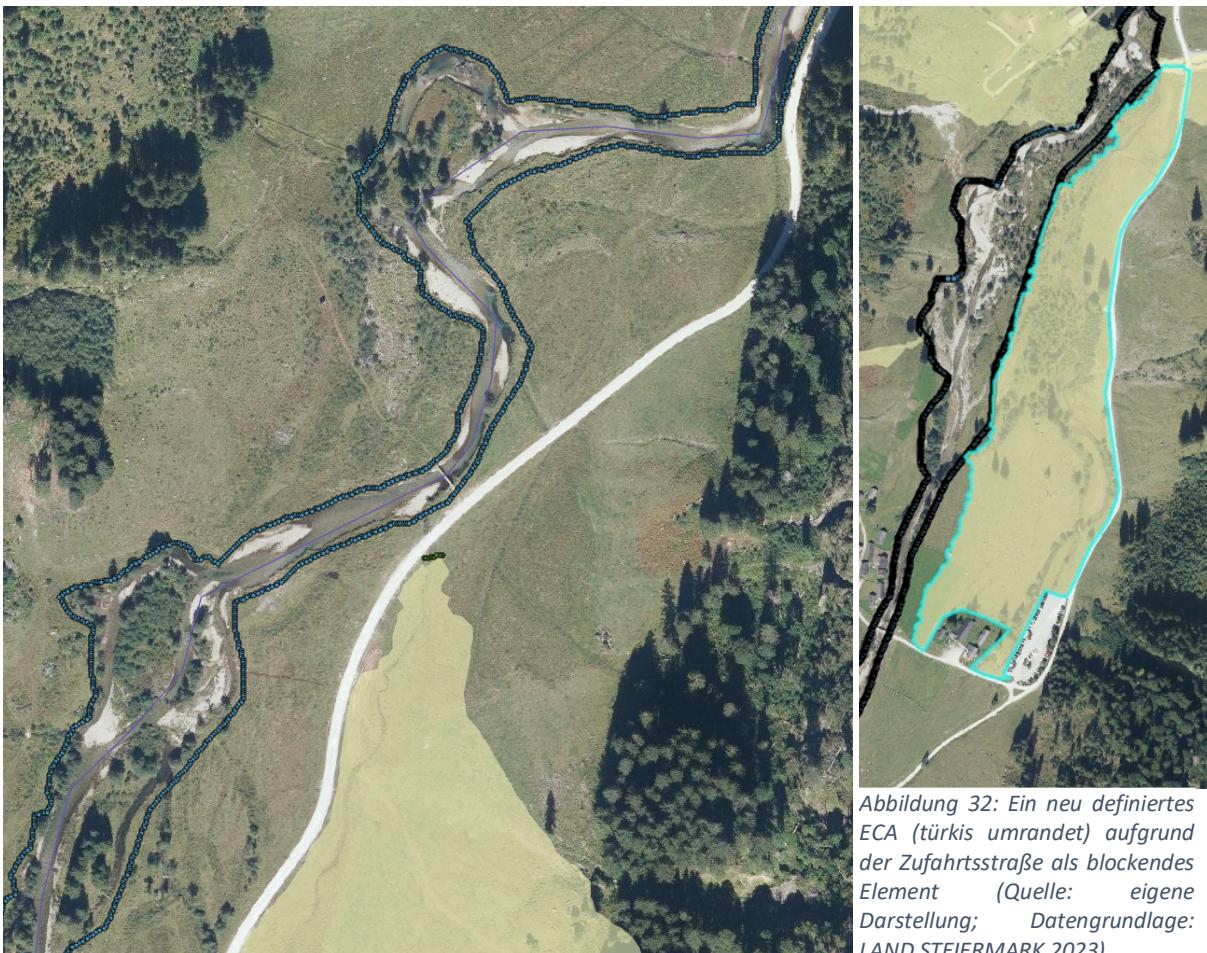


Abbildung 32: Ein neu definiertes ECA (türkis umrandet) aufgrund der Zufahrtsstraße als blockendes Element (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).

Abbildung 33: Um den Schwarzenbach ist deutlich der Punktlayer zu erkennen, welcher den Böschungsbereich und jeden möglichen Auslasspunkt von ECAs darstellt. Neuberechnung eines ECAs, welches verbunden ist, aber nicht als einzelnes ECA ausgegeben wurde, da, aufgrund der Straße, der Auslass falsch berechnet wurde (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).

#### 4.2.2. Modellierung der ICs

Durch die Open-Source und Stand-alone Software SedInConnect lässt sich der IC auf Grundlage eines DEMs einfach ermitteln (CREMA et al. 2015; CREMA und CAVALLI 2018), auch wenn die zugrundeliegenden Berechnungen deutlich komplexer als die des ECA-Ansatzes sind (HECKMANN et al. 2018; SCHOPPER et al. 2019). Diese Software wendet den IC, wie er in Kapitel 3.4.4 vorgestellt wurde, auf Grundlage eines Eingabe-DEM an. Hierbei kann ein ausgewähltes Ziel, auf welches sich die Konnektivität bezieht (siehe Kap 3.4.4), als Polygon in SedInConnect angegeben werden. Wenn dieses Ziel das Hauptgerinne darstellt, wird hiermit die laterale Konnektivität zu diesem Gerinne untersucht. Der

Gewichtungsfaktor sowie der Rauheitsindex (siehe Kap. 3.4.4) wird ebenfalls durch die Auswahl eines Eingabe-DEMs berechnet und für die Erstellung des ICs verwendet. Die Pixelanzahl des beweglichen Fensters für die Berechnung des Rauheitsindexes (siehe Kap. 3.4.4) sowie die Eingabepixelgröße müssen ausgewählt bzw. festgelegt werden (siehe Abbildung 34). Bei hochauflösenden DEMs mit einer Pixelauflösung von 1x1 m werden häufig bei der Pixelanzahl des beweglichen Fensters 5x5 Pixel festgelegt (z.B. CAVALLI et al. 2013; SCHOPPER et al. 2019), während bei DEMs mit einer Pixelauflösung von 5x5 Metern eine Pixelanzahl von 3x3 Pixeln üblich ist (z.B. CREMA und CAVALLI 2018; TIRANTI et al. 2016). Für die Berechnung des Rauheitsindexes wird in den meisten Fällen das DEM verwendet, welches nicht mit der „Fill“ Funktion durch das füllen von kleinen Senken „geglättet“ wurde, während das Eingabe-DEM für den IC mit der Funktion „Fill“ bearbeitet wurde (CREMA und CAVALLI 2018). Die Software nutzt bei der Berechnung zwei Komponenten: So verwendet SedInConnect Python-Skripte und erstellt Ad-hoc-Bibliotheken für die Verwaltung von Geodaten (GDAL-Geospatial Data Abstraction Library) und für die numerische Optimierung von Matrizen (Numpy). Des Weiteren greift SedInConnect für die hydrologischen Analysen und der Berechnung von Strömungsrouten auf die Werkzeuge von TauDEM (TARBOTON 2023) zurück, welches separat installiert werden muss (CAVALLI et al. 2014; CREMA et al. 2015; CREMA und CAVALLI 2018).

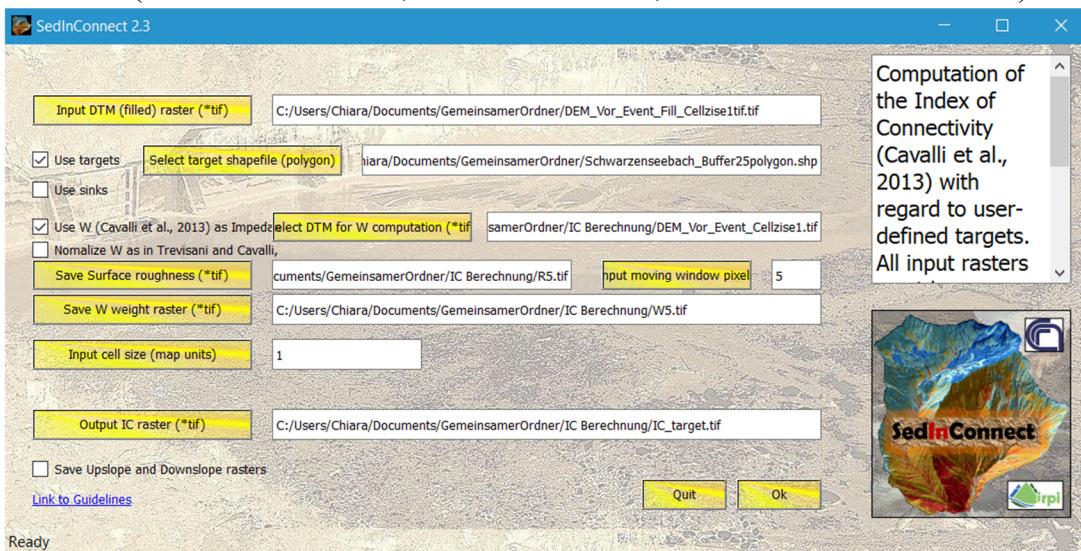


Abbildung 34: Die Benutzeroberfläche der SedInConnect 2.3 Anwendung, mit den verfügbaren Eingabemöglichkeiten (Quelle: eigener Screenshot; 03.10.2023)

Für die Beantwortung der Forschungsfragen wurden auf diese Weise die ICs sowohl auf Grundlage des DEMs von 2012 als auch auf Grundlage der DEMs, welches nach den modellierten Murabgängen des Extremereignisses von 2010 (siehe Kap. 4.3.1.1) und der Extremeszenarien (Kap. 4.3.2.2 und 4.3.2.3) erstellt wurden (siehe Kap. 4.3.1.2), errechnet. Für den IC vor den Murabgängen wurde ein bewegtes Fenster von 5 x 5 Eingabepixel bestimmt, da die Rastergröße des DEMs bei 1 x 1 m lag. Für die Berechnung des Gewichtungsfaktors wurde ein DEM verwendet, welches nicht mit der „Fill“ Funktion durch das Füllen von kleinen Senken „geglättet“ wurde, während das Eingabe DEM für den IC vorher „geglättet“ wurde. Es wurde jeweils ein IC mit Zieleingabe und ein IC ohne Zieleingabe vor den modellierten Murabgängen erstellt. Die Zieleingabe war ein Polygon,

welches mit der ArcGIS Funktion „Buffer“ um den Schwarzenseebach mit einem Puffer von 25m erstellt wurde. Auf die gleiche Weise wurden auch die erstellten DEMs nach den jeweiligen Modellierungen der Murabgänge des Extremereignisses und der Extremeszenarien als Grundlage für die Berechnungen der ICs verwendet. Da die Zieleingabe einen Puffer von 25 m um den Schwarzenseebach aufwies, konnte die gleiche Zieleingabe für alle Berechnungen der ICs mit Zieleingabe verwendet werden. Des Weiteren wurde für jedes DEM der IC auch ohne Zieleingabe, also auf Grundlage des Auslasses des UGs berechnet. Da die Pixelauflösung der DEMs nach den modellierten Muren 5 x 5 m betrug, wurde das bewegende Fenster im Gegensatz zu den ICs von vor den modellierten Muren mit 3 x 3 Eingabepixeln berechnet. Diese Auflösung wurde für Regionen des Hochgebirges erfolgreich angewendet (vgl. CREMA und CAVALLI 2018; TIRANTI et al. 2016), weshalb davon auszugehen ist, dass diese Auflösung die morphologischen Eigenschaften noch gut abbilden kann.

Um die verschiedenen ICs miteinander vergleichen zu können, wurden die ICs auf Grundlage des DEMs von 2012 (Auflösung von 1 x 1 m) für den Vergleich der verschiedenen ICs auch mit einem Gewichtungsfaktor mit einem bewegenden Fenster von 15 x 15 Rasterzellen errechnet, damit dieses bewegende Fenster die gleiche Größe aufweist, wie bei einem DEM mit einer Pixelauflösung von 5 x 5 m und einem bewegenden Fenster mit 3 x 3 Eingaberasterpixeln.

Um die verschiedenen ICs nun zu vergleichen, wurden diese Rasterdatensätze voneinander subrahiert und somit ICoD (Indices of Connectivity of Difference) kreiert. Hierfür wurden die ICs mit einer Pixelauflösung von 1 x 1 m, mit der ArcGIS Funktion „Resample“ auf 5 x 5 m verkleinert, da die DEMs nach den modellierten Murabgängen (sowohl bei der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010 als auch bei den Modellierungen der Extremeszenarien) in einer Auflösung von 5x5 m vorhanden waren.

### 4.3. Modellierung mit r.avaflow

Um nun ein Extremereignis wie vom 17.07.2010 zu modellieren, wurden die Auswirkungen dieses Ereignisses, also z.B. Durchflussraten, Ablagerungen, Stauungsbereiche oder Einzugsgebiete von Muren, verwendet, um mit r.avaflow (siehe Kap. 3.3) anhand dieser Merkmale des Extremereignisses eine Simulation solch eines Ereignisses zu modellieren. Auf diese Weise können mit diesem Extremereignis die Parameter für r.avaflow kalibriert werden, um weitere mögliche Extremeszenarien zu modellieren.

Wie in Kap. 3.3 erwähnt, läuft r.avaflow in einer Linux-Umgebung. Dies bedeutet, dass für die Modellierung mit r.avaflow auf einem Computer mit Windowsbetriebssystem eine Virtuelle Maschine mit dem Betriebssystem Ubuntu von Linux eingerichtet werden muss. In diesem Betriebssystem müssen die nötigen Installationen von GRASS GIS, R und diverse R-Erweiterungspakete sowie die Programmiersprache Python 3 mit der Bildbibliothek Pillow durchgeführt werden (MERGILI 2023; MERGILI et al. 2017a). Wenn die Umgebung für r.avaflow eingerichtet ist, kann ein Startskript auf der Homepage von r.avaflow erstellt

werden, um r.avaflow im GRASS GIS Terminal zu starten, wobei eine Vielzahl an Parametern und Funktionen der Modellierung auszuwählen sind (MERGILI 2023; siehe Abbildung 35). Solch ein Startskript kann auch eigenhändig erstellt oder verändert werden, um Parameter und Funktionen anzupassen oder zu ergänzen. Das Startskript ist, nachdem die Eingabe-Rasterdaten aufbereitet wurden, das entscheidende Dokument für die Modellierung, da über dieses die gesamte Modellierung und die Art und Weise der Modellierung definiert wird (die Startskripts für die Modellierungen dieser Arbeit befinden sich in Kap. 9). Die wichtigsten Eingabeparameter stellen dabei die Reibungsparameter und die Dichte dar, da diese die physikalischen Eigenschaften der sich bewegenden Masse in der Modellierung beschreiben. Die Eingabedaten müssen für r.avaflow entweder im GEOTIF-Format oder ASCII-Format vorliegen. Da in r.avaflow verschiedene Rheologien und Modellierungsansätze implementiert sind, ist die Wahl des Modellierungsansatzes auch entscheidend und sollte passend zur Fragestellung, Komplexität und zum Untersuchungsgegenstand ausgewählt werden. Die Eingabeparameter unterscheiden sich demnach auch je nach Modellierungsansatz, da man beispielsweise für das Mehrphasenmodell die jeweiligen Phasen und ihre physikalischen Eigenschaften mit den Eingabeparametern beschreibt, während bei dem Einphasenmodell oder Voellmy-Ansatz *ein* physikalischer Körper mit den Eingabeparametern beschrieben wird.

Parameter	Symbol	Unit	Format	Remarks
Input				
Initial elevation of basal surface	$Z_0$	m	Raster map	1
s, f release heights	$H_{0,s}, H_{0,f}$	m, m	Raster maps	2A
Total release height, s concentration of release mass	$H_0, \alpha_{s0}$	m, –	Raster map, value	2B
s, f entrainable heights	$H_{Emax,s}, H_{Emax,f}$	m, m	Raster maps	3A
Entrainable total height, s concentration of entrainable mass	$H_{Emax}, \alpha_{s,Emax}$	m, –	Raster map, value	3B
$n_C$ hydrograph tables: s and f flow heights and velocities at defined points of time (see Fig. 2)	$H_{P,s}, v_{P,s}, H_{P,f}, v_{P,f}$	$m, ms^{-1}, m, ms^{-1}$	Tables	2C
$n_D$ sets of centre coordinates, length, and aspect of hydrograph	–	m, degree	Sets of 4 values	2D
Flow parameters (see Table 2)	–	–	Set of 14 values	1
Entrainment coefficient (see Table 2)	$C_E$	$kg^{-1}$	Value	3C
Time interval for output, max. time after which simulation terminates	$\Delta t_{out}, t_{term}$	s, s	Set of 2 values	1
Threshold flow height for visualization and validation	$H_t$	m	Value	1
Observed impact area, observed deposition area	OIA, ODA	–, –	Raster maps	4A, B
Vertex coordinates of flow path	–	m	Even number of $\geq 4$ values	4C
Output (excluding validation and visualization output; see Sect. 2.6)				
Maximum flow height, kinetic energy, and pressure (each for s, f, t)	$H_{Max}, T_{Max}, P_{Max}$	m, J, Pa	Raster maps	Always
Flow height, flow kinetic energy, and flow pressure at each output time step $t_{out}$ (each for s, f, t)	$H_{tout}, T_{tout}, P_{tout}$	m, J, Pa	Raster maps	Always
Flow velocities in x and y direction, and in absolute values (each for s, f)	$v_x, v_y, v$	$ms^{-1}$	Raster maps	Always
Change of basal topography (s, f, t)	$H_C$	m	Raster maps	Always
Impact indicator index, deposition indicator index	III, DII	–, –	Raster maps	Multiple runs
$n_D-n_C$ output hydrograph tables: flow heights, velocities, and discharges at defined points of time (s, f)	$H_p, v_p, Q$	$m, ms^{-1}, m^3 s^{-1}$	Tables	If $n_D > n_C$

Abbildung 35: Wichtige Eingabe- und Ausgabeparameter von r.avaflow nach MERGILI et al. (2017a) – s: fest; f: flüssig; t: insgesamt. Anmerkungen (Remarks): 1: obligatorisch; 2: entweder A, B oder C+D obligatorisch, wobei C+D auch zusätzlich zu A oder B angegeben werden kann;  $n_D \geq n_C$  wenn  $n_D > n_C$  die verbliebenen Eingabedatensätze von D Ausgabe Hydrographen sind; 3: A oder B kann angegeben werden, wenn Loslösen und Mitnahme (Entrainment) aktiviert ist, andernfalls sind alle Werte von  $H_{Emax} = \infty$ ; C ist obligatorisch wenn Entrainment aktiviert ist; 4: zumindest ein Datensatz von A, B und C ist für die Validierung obligatorisch. Einige Funktionen und mögliche Eingabeparameter wurden seit der Veröffentlichung 2017 noch hinzugefügt, wobei die grundlegenden Eingabeparameter die gleichen sind (Quelle: MERGILI et al. 2017a).

Die Modellierungen für diese Arbeit mit r.avafow wurden auf einem LENOVO Laptop mit einem Betriebssystem Microsoft Windows 10 Pro durchgeführt. Hierbei war ein Prozessor Intel® Core™ i7-7600U mit 2.80GHz und 2 Kerne sowie 4 logische Prozessoren verbaut und 24 GB RAM integriert. Für die verwendete Linux-Umgebung Ubuntu 22.04 standen davon 15GB physikalischer Speicher zur Verfügung sowie die 2 Kerne des Prozessors.

Für die Modellierung bilden die Höhendaten die Grundlage für die Analyse mit r.avafow, nachdem sie bearbeitet und angepasst wurden, um die Prozesse zu modellieren. Des Weiteren werden Mächtigkeiten der freigesetzten Masse im Anrissgebiet je Rasterzelle benötigt. Die Höhendaten stellen die basale Gleitfläche des Ereignisses, nach der Subtraktion der Werte der Mächtigkeiten der Freigesetzten Masse je Rasterzelle, dar. Dies bedeutet, dass die basale Gleitfläche addiert mit den Mächtigkeiten der freigesetzten Masse je Rasterzelle die Höhendaten vor dem modellierten Ereignis darstellen.

#### 4.3.1. Modellierung eines potenziellen Extremereignisses, welches dem Extremereignis vom 17.07.2010 gleicht

Auf Grund dessen, dass das Extremereignis vom 17.07.2010 zwar eine Prozesskette (allerdings nach der Definition von VAN WESTEN et al. (2014) eine Prozesskombination; siehe Kap. 3.2) darstellt, diese damit zeitlich klar getrennt nacheinander abläuft, ist es sinnvoll dieses Ereignis mittels zwei getrennt laufenden Modellierungen zu modellieren. Hierbei schafft die erste Modellierung die Grundlage für die zweite Modellierung, womit die beiden Prozessabschnitte nicht nur bei dem Extremereignis von 2010, sondern auch bei der Modellierung eines solchen Extremereignisses abhängig voneinander sind. Der erste Abschnitt stellt dabei die gravitativen Massenbewegungen dar, welche nach dem Starkniederschlagsereignis aufgetreten sind und den Schwarzenseebach an mindestens drei Stellen gestaut haben. Diese Massenbewegungen waren sowohl Gerinnemuren als auch Hangmuren (siehe Kap. 2.5 und Kap. 3.1). Der zweite Abschnitt ist das Durchbruchsereignis des an mindestens drei Stellen gestauten Schwarzenseebaches mit anschließender Flutwelle.

##### 4.3.1.1. Die stauenden Murabgänge

Um die stauenden Murabgänge mit r.avafow zu modellieren, wurde die implementierte Voellmy-Rheologie gewählt. Der Vorteil dieser Rheologie ist, dass sie verhältnismäßig einfach ist, was bedeutet, dass weniger Parameter zu bestimmen sind und somit weniger mögliche Fehlerquellen durch ungenaue Parametrisierung vorhanden sind (siehe Kap. 3.1.1). Auch in dem Leitfaden von r.avafow (MERGILI 2023) wird empfohlen für Rutschungen und Muren diese Voellmy-Rheologie zu verwenden. Dies entspricht dem Grundsatz, Rheologien mit so vielen Parametern wie nötig (Genauigkeit) und so wenig wie möglich (Einfachheit und weniger mögliche Fehlerquellen) anzuwenden (MERGILI und PUDASAINI 2021). Wie in Kap. 3.1.1 beschrieben ist diese Rheologie gut erprobt und wird

bis heute für die Modellierung von Muren häufig angewendet (z.B. CHRISTEN et al. 2010; MEYRAT et al. 2023; TANG et al. 2023).

Ziel der Modellierung der Murabgänge war, dass die modellierten Muren, wie bei dem Extremereignis vom 17.07.2010, das Schwarzenseebachtal auf dem DEM von 2012 vermuren. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die stauenden Murabgänge gelegt, da diese entscheidend für den Durchbruch mit anschließendem fluviatilem Abfluss des Schwarzenseebaches waren. Um eine ungefähre Abschätzung über die Stauhöhe und über das Stauvolumen der drei Aufstauungen zu erhalten, wurde mit Hilfe der ArcGIS Funktion „Raster to TIN“ aus der Toolbox „3D Analyst Tools“ eine 3D Oberfläche des Schwarzenseebachtals kreiert. „Raster to TIN“ konvertiert einen Oberflächen-Rasterdatensatz in einen TIN-Datensatz (Triangulated Irregular Network). Mit den kartierten Stauungsbereichen als Polygon (siehe Kap. 4.1) konnte das Volumen der Aufstauungen mit der Funktion „Polygon Volume“ berechnet werden. Die Funktion „Polygon Volume“ berechnet das Volumen und die Oberfläche zwischen einem Polygon mit konstanter Höhe und einer Vektor-Oberfläche. Für die ungefähre Stauhöhe der Murabgänge wurde die Differenz zwischen der Höhe des niedrigsten Punktes an jener Stelle, an der der Schwarzenseebach das Gebiet der Stauung verlässt und den gerundeten gemittelten Höhenwerten, welche an den hangseitigen Rändern der kartierten Aufstauungen nach dem Zufallsprinzip durch Auslesen der Rasterzellenwerte ermittelt wurden (siehe Tabelle 3). Auf diese Weise war eine Abschätzung möglich, auf welche Höhe die Murabgänge den Schwarzenseebach denn stauen müssen, um ein vergleichbares Aufstau-Volumen zu erreichen.

*Tabelle 3: Kennwerte der drei Stauungen durch die Murabänge: Höhe der Stauung, Höhe vom "Auslass" der Stauung und die daraus resultierende Dammhöhe sowie das Volumen der Stauung (Quelle: eigene Berechnung auf Datengrundlage von: LAND STEIERMARK 2023 sowie PÖPPL und SASS 2020, IfGR)*

Stauungsbereich	Höhe d. Stauung (in m. ü. NN)	Höhe v. „Auslass“ (in m. ü. NN)	Dammhöhe (in m)	Volumen (in m <sup>3</sup> )
<b>Stauung „Haselrinne“</b>	1039	1030,5	8,5	202931
<b>Stauung „Stiegelbach“</b>	1057	1050	7	436642
<b>Stauung „Stummerbach“</b>	1065	1060,8	4,2	77544

Nachdem die Höhe der Stauung geschätzt werden konnte, die Geschwindigkeit von Muren ebenfalls bekannt ist (siehe Kap. 3.1), die Schadensflächen und die entsprechenden Orthofotos für den bildlichen Abgleich vorhanden sind, ist die Definition der Anrissbereiche und der Anriss Höhen, die fehlende Grundlage für den Beginn und der Parametrisierung der Modellierung des Extremereignisses. Um diese Anrissgebiete zu definieren, waren die Orthofotos von 2010 und 2012 entscheidend. Für den Vergleich der Anrissgebiete mit der Situation vor dem Extremereignis von 2010 wurden die Teilbereiche, welche 2009 aufgenommen wurden und das Orthofoto 2004/2006 verwendet (siehe Kap. 4.1). Für die

Anrissbereiche der Gerinnemuren wurde ein innovativer neuer Ansatz in Kombination mit einem erprobten Ansatz verwendet. Bei den Hangmuren wurde ausschließlich der erprobte „klassische“ Ansatz verwendet, wie er auch in der Modellierungssoftware RAMMS implementiert ist (CHRISTEN et al. 2010). Die Anrisse der Hangmuren wurden anhand der Orthofotos als Polygone kartiert und die Mächtigkeiten dieser Anrisse in Metern geschätzt. Somit kann Annäherungsweise das Volumen des jeweiligen Anrissmaterials ermittelt werden (z.B. CHRISTEN et al. 2010; MEYRAT et al. 2023; MIKOŠ und BEZAK 2021). Hierbei können durch den „best-fit“ Ansatz, die Volumina, d.h. bei gleichbleibender Fläche die Mächtigkeiten der Anrissbereiche, angepasst werden, je nachdem wie die Modellierungsergebnisse mit den jeweiligen geschätzten Volumina sind (z.B. BAYISSA 2017; WORNI et al. 2014). Eine weitere Möglichkeit für die Abschätzung solcher Abrissvolumina wäre die Berechnung mit einem DEM von vor dem Ereignis und einem DEM nach dem Ereignis, um so ein DoD (DEM of Difference) errechnen zu können (BAGGIO et al. 2021). Auch dieser Versuch wurde für die vorliegende Arbeit unternommen, welcher allerdings auf Grund der verfügbaren Datenqualität des DEMs von vor dem Extremereignis 2010 keine Ergebnisse erzielen konnte, die verwendbar waren. Die Kartierung der Anrissflächen anhand der Orthofotos und die dazugehörigen Mächtigkeitsabschätzungen der kartierten flächigen Anrisse, hat bei den Hangmuren in der Modellierung zu guten Ergebnissen geführt. Bei den Gerinnemuren hat dieser Ansatz hingegen zu einer Unterschätzung der Volumina geführt. Nach dem Abgleich der möglichen flächigen Anrissgebiete in den Einzugsgebieten der Gerinnemuren mit den Orthofotos von 2004/2006 und 2009 blieben zu wenige Anrisse übrig, um von einer Vermurung des Schwarzenseebaches, wie sie am 17.07.2010 geschah, auszugehen (siehe Abbildung 37 und Abbildung 36 und Abbildung 38). Die Grundlage der Einzugsgebiete der Gerinnemuren stellen hierbei die kartierten Einzugsgebiete aus der Arbeit von TRAPER (2016) dar (siehe Kap. 4.1). Um die Einzugsgebiete der Gerinnemuren zu definieren, wurden die Einzugsgebiete in der Arbeit von TRAPER (2016) mit der Funktion „Watershed“ in ArcGIS (siehe Kap. 4.2.1) bestimmt. Dabei hat TRAPER (2016) das DEM mit der „Fill“ Funktion in ArcGIS für hydrologische Untersuchungen vorbereitet. Des Weiteren wurde, nachdem auf Grundlage des DEMs die Funktion „Flow Direction“ ausgeführt wurde, mit der Funktion „Flow Accumulation“ ein Datensatz erstellt. Diesem Rasterdatensatz wurde mit dem Werkzeug „reclassify“ in ArcGIS für jeden Pixel neue Werte zugewiesen. Bei dieser Klassifizierung wurde unterschieden zwischen „1“ und „NoData“. Hierfür musste der Schwellenwert für die „Pour Points“, also zwischen den Werten „1“ und „NoData“, manuell festgelegt werden, was in der Arbeit von TRAPER (2016) als der Mittelwert der verfügbaren Werte des Datensatzes „Flow Accumulation“ definiert wurde. Mit diesem neuen Datensatz konnte mit der Funktion „Pour Points“ der „Auslass“ der jeweiligen Einzugsgebiete jeder möglichen Gerinnemure bestimmt werden. Dieser Punktdatensatz, mit den Auslassen jeder möglichen Gerinnemure, wurde verwendet, um von diesen Punkten die hydrologischen Einzugsgebiete jeder möglichen Gerinnemure mit Hilfe der Funktion „watershed“ als Polygone zu bestimmen. Für die großen Einzugsgebiete der Seitentäler entlang des Stummerbaches und des Lassachbaches wurde dies wiederholt, da diese sonst als ein großes

Einzugsgebiet definiert worden wären, obwohl diese Seitentäler als eigenständige geomorphologische (Sub-)Systeme zu definieren sind (siehe auch Kap. 2.2 in der vorliegenden Masterarbeit). TRAPER (2016) hat für ihre Arbeit in weiterer Folge jene Einzugsgebiete gelöscht, in denen, nach Überprüfung durch Abgleich mit Orthofotos, keine Gerinnemuren während des Extremereignisses vom 17.07.2010 aufgetreten sind, so dass nur die Polygone vorhanden waren, bei denen Gerinnemuren aufgetreten sind. Diese Polygone wurden in die vorliegende Masterarbeit integriert, mit den vorhandenen Orthofotos von 2011 und 2012 abgeglichen und in weiterer Folge auf Grundlage des bildlichen Abgleiches mit den Orthototos angepasst (meistens verkleinert, aber auch vergrößert). Dabei war entscheidend, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, wo die Einzugsgebiete der Gerinnemuren in einem Gerinne mündeten und somit ein eindeutiger Auslasspunkt und der räumliche Beginn der kanalisierten Massenbewegung identifiziert werden konnte. Auf diese Weise wurden die Größen der Einzugsgebiete der Gerinnemuren, basierend auf bildlich validierten Ausdehnungen, angepasst (siehe Abbildung 36).

In diesen hydrologischen Einzugsgebieten der Gerinnemuren vom 17.10.2010 liegen zwar einige der flächig kartierten Anrissbereiche, welche auch die Hangmuren umfassen, wie weiter oben beschrieben wurden. Allerdings gab es in vielen Einzugsgebieten nur wenige flächige Anrisse, wie sie bei den Hangmuren vorzufinden waren. Dies kann an der Genese und Morphologie liegen, welche Gerinnemuren aufweisen können. So kann die Genese von Gerinnemuren, insbesondere bei Starkniederschlagsereignissen, durch die Aufnahme von Material während des Abflusses des Niederschlagswassers erfolgen und dabei im Gerinne von einem Newton-Fließen in eine viskos-plastische Fließbewegung übergehen (siehe Kap. 3.1). Dies bedeutet für die Bestimmung des Abrissmaterials für die Modellierung, dass ein erheblicher Teil des Materials der Gerinnemuren innerhalb der hydrologischen Einzugsgebiete der Gerinnemuren diffus mobilisiert wurde (siehe Abbildung 37 und Abbildung 36). Dies stellte eine Herausforderung für die Modellierung mit r.avaflow dar, da ein definierter Freisetzungsbereich mit angegebenen Volumina je Rasterzelle erforderlich ist, da die Möglichkeit der Eingabe-Hydrographen (siehe Kap. 4.3) sich für jede Gerinnemure nicht eignen. Aus diesem Anlass wurde ein neuer Ansatz zur Bestimmung des Anrissmaterials verwendet. Die Grundlegende Idee hinter diesem Ansatz ist, dass bei solch einer Genese von Gerinnemuren das Material dort mobilisiert wird, wo das Niederschlagswasser innerhalb des Einzugsgebietes abfließt. Hierfür wurde mit der ArcGIS Funktion „Extract by Mask“ aus den Polygonen der Einzugsgebiete der Gerinnemuren diese Bereiche des DEMs ausgeschnitten, um die Höhenwerte der jeweiligen Einzugsgebiete zu extrahieren. Auf Grundlage dieser ausgeschnittenen Bereiche des DEMs, wurde mit den Funktionen „Flow Direction“ und „Flow Accumulation“ berechnet, mit welcher Verteilung und Akkumulation der Oberflächenabfluss durch Niederschlagswasser im jeweiligen Einzugsgebiet der Gerinnemuren je Rasterzelle fließt. Um aus diesem Rasterdatensatz nun Mächtigkeiten und Verteilung des Anrissmaterials zu generieren, wurde mit der Funktion „reclassify“ Klassen kreiert, welche mit neuen Pixelwerten die Mächtigkeiten des Anrissmaterials wiedergeben. Ähnlich wie bei den flächigen Anrissbereichen der Hangmuren, werden hierbei die Mächtigkeiten des Anrissmaterials aber auch deren

Abstufungen innerhalb der Einzugsgebiete der Gerinnemuren durch Plausibilität, Ausprobieren und „best-fit“ in der Modellierung der Murabgänge ermittelt. Mit der Zeit wurde deutlich, dass als Maximalwert eine Mächtigkeit von 4 Metern (m) sowie eine Abstufung von 3 m, 2 m, und 1 m angenommen werden kann. Bei Rasterwerten des Rasterdatensatzes „Flow Accumulation“ von unter 100 wurde eine Mächtigkeit von 0 m angenommen, was bedeutet, dass in diesen Bereichen der Einzugsgebiete für die Modellierung kein Anrissmaterial durch das Wasser mobilisiert wurde (siehe Tabelle 4). Da r.avaflow bei dem Anriss-Datensatz nicht mit „NoData“-Werten umgehen kann, müssen „NoData“-Werte ebenfalls in „0“-Werte umgewandelt werden.

*Tabelle 4: Der Wertebereich des Datensatzes „Flow Accumulation“ und die neu definierte Mächtigkeit des Anrissmaterials  
(Quelle: eigene Reklassifizierung)*

Wertebereich „Flow Accumulation“	Anrissmächtigkeit (in m)
0 – 100	0
100 – 1000	1
1000 – 2000	2
2000 – 5000	3
5000 – $\infty$	4

Die Idee hinter diesem „Flow Accumulation-Ansatz“ basiert auf der Annahme, dass dort, wo sich das Wasser beim Abfluss akkumuliert, mehr Material vom Wasser mittransportiert wird und so auch immer mehr murfähiges Material

mittransportiert wird und sich auf diese Weise ein Murabgang bildet. Dabei ist nicht jeder Bereich der als Anrissbereich, bzw. bei genauerer Betrachtung auf Grund ihrer linienhaften Erstellung als „Anrisslinie“ definiert ist, auch in der Realität ein Anrissbereich. Allerdings sollte die Summe der erstellten Anrissbereiche möglichst nah an den tatsächlichen Anrissbereichen liegen. Nichtsdestotrotz muss dieser Ansatz zum Teil als eine statistische Annährung verstanden werden, da es Bereiche gibt, die überschätzt und andere Bereiche, die unterschätzt werden können. Dies kann auch eine Erklärung sein, weshalb dieser Ansatz bei großen Einzugsgebieten von Gerinnemuren besser funktioniert hat, als bei kleineren Einzugsgebieten. Demnach können bei kleineren Einzugsgebieten solche Annährungen, aufgrund der höheren Variabilität und Sensitivität der einzelnen Faktoren dieses Murgangs, ungenauer sein.

Für die Modellierung der Murgänge wurde am Anfang eine „Versuchsmure“ von dem Extremereignis vom 17.07.2010 definiert, an der sowohl die Anrissflächen, wie eben beschrieben, ausprobiert und justiert wurden, als auch in weiterer Folge die Eingabeparameter der Modellierung in r.avaflow kalibriert wurden. Diese „Versuchsmure“ war für diese Arbeit der Murabgang beim Stiegelbach, also bei der mittleren Stauung des Schwarzenbachs (siehe Abbildung 36). Um die basale Oberfläche als digitale Oberfläche, auf der die gravitative Massenbewegung stattfindet, zu bestimmen, musste das vorhandene DEM mit der Funktion in ArcGIS „raster calculator“ angepasst werden, indem die Mächtigkeiten des Anrissmaterials je Rasterzelle von dem DEM subtrahiert wurden. Damit bilden die beiden Rasterdatensätze der basalen Oberflächen und der Anrissbereiche zusammen die gleiche Oberfläche, wie das DEM vor der Modellierung. Die Funktion „raster calculator“ erstellt hierbei unter Verwendung von Python-Syntax eine einzelne Karte und

führt diese mittels Algebra dann aus (ARCGIS PRO 2023). Mit den Eingabe-Rasterdatensätzen der basalen Oberfläche sowie der Anrissbereiche konnte die Modellierung und die Anpassung der Eingabeparameter in r.avaflow beginnen, in dem die Parameter im Startskript für r.avaflow nach jedem Versuch angepasst wurden (das endgültige Startskript befindet sich in Kap. 9 *Startskript r.avaflow stauende Muren Extremereignis 2010*).

Die wichtigsten zu kalibrierenden Parameter für das Fließverhalten der Murabgänge sind hierbei die Reibungsparameter, also der innere Reibungswinkel ( $\varphi$  in °), der basale Reibungswinkel ( $\delta$  in °) sowie die turbulente Reibung ( $\zeta$  in  $\text{m/s}^2$ ), als auch die Dichte der Masse ( $\rho$  in  $\text{kg/m}^3$ ) (MERGILI et al. 2017a). Insbesondere diese Parameter wurden an der „Versuchsmure“ optimiert. Hierbei wurden die Parameter der ersten Versuche anhand von Werten aus der Literatur geschätzt (ABRAHAM et al. 2022; BAGGIO et al. 2021; BEGUERIA et al. 2009; HOCHSCHWARZER 2009; MERGILI et al. 2020a; MERGILI et al. 2017a; MEYRAT et al. 2023; TANG et al. 2023; WENDELER 2008; YANAGISAKI et al. 2016). In weiter Folge wurden diese wesentlichen Parameter im Zuge mehrerer Modellierungen dieser Versuchsmure verändert und angepasst. Dabei waren die Vergleiche zu den Ablagerungen auf den Orthofotos, sowie den kartierten Schadensflächen wichtig. Bei den Schadensflächen ist allerdings zu beachten, dass es sich um *Schadensflächen* handelt und nicht ausschließlich um *Ablagerungsflächen*. Dies war durch die Kontrolle mit den Orthofotos 2010 und 2012 berücksichtigt. Des Weiteren war wichtig die Plausibilität der Geschwindigkeit sowie die

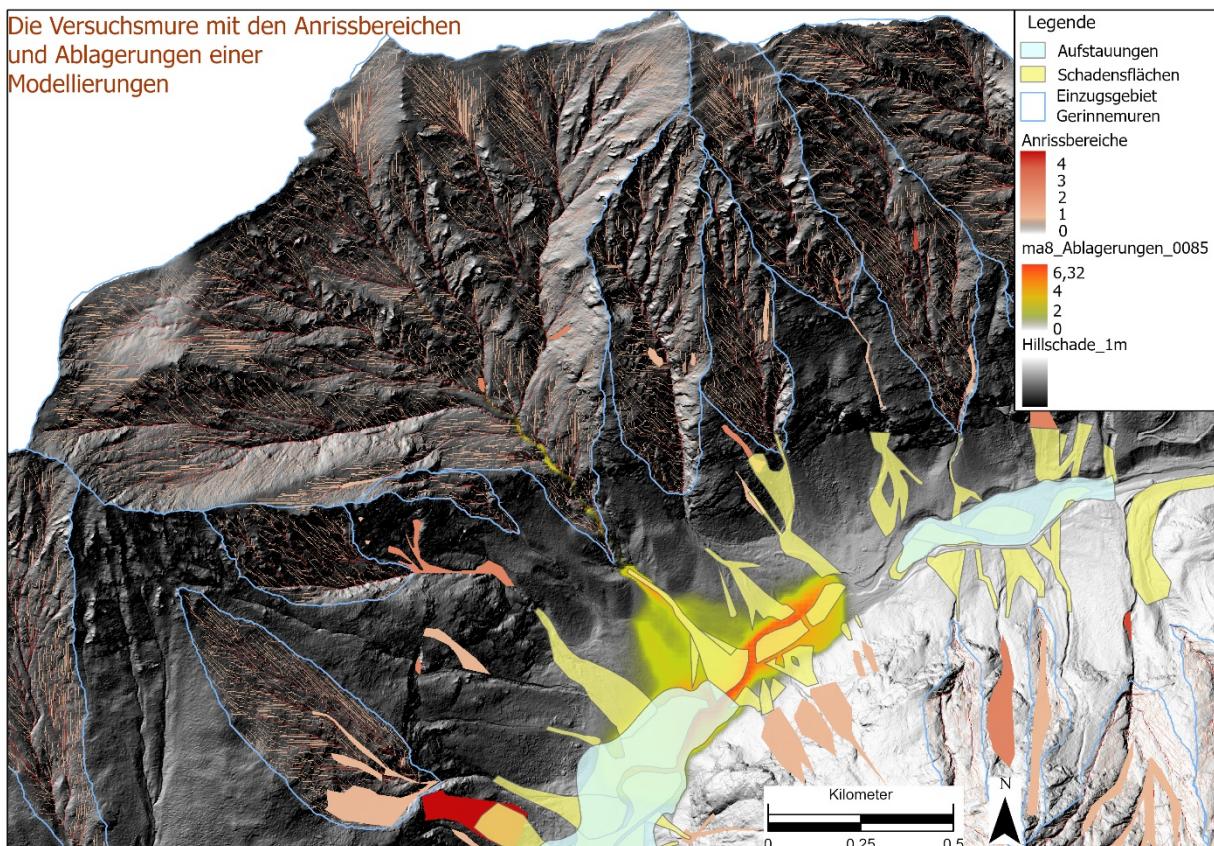


Abbildung 36: Die Versuchsmure beim Stiegelbach mit den flächigen Anrissbereichen und den linienhaften Anrissbereichen. Des Weiteren ist eine Ablagerung einer Modellierung zu erkennen. Auch die Schadensflächen, Aufstauungen des Schwarzenseebaches und die Einzugsgebiete der Gerinnemuren sind zu erkennen (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023 und PÖPPL und SASS 2020, IfGR).

Höhe und Verteilung der Ablagerung zu überprüfen. Dabei wurde die anschließende Stauhöhe der Stauung des Scharzenseebaches mitberücksichtigt. Auch die Geschwindigkeit des Murabganges sollte auf Grundlage der in Kapitel 3.1 festgehaltenen maximalen Geschwindigkeit von ungefähr 20 m/s berücksichtigt werden. Des Weiteren wurde die räumliche Dimension der Bewegung, also über welche Bereiche die modellierte Mure fließt und über welche Bereiche die modellierte Mure nicht fließt, beachtet, überprüft und auch mit den Schadensflächen und Orthofotos von 2010 und 2012 abgeglichen. Bei dieser Kalibrierung wurde der innere Reibungswinkel konstant bei  $35^\circ$  gehalten, da dieser Wert in der Literatur häufig als gegeben betrachtet wird, bzw. die ermittelten Werte nah an diesem Wert liegen (vgl. ABE und KONAGAI 2016; BAGGIO et al. 2021; DIKAU et al. 2019; MERGILI et al. 2018b; MERGILI et al. 2017a; WENDELER 2008; YANAGISAKI et al. 2016). Die anderen Reibungsparameter und auch die Angabe der Dichte unterscheiden sich in der Literatur je nach Untersuchungsgegenstand jedoch deutlich voneinander. So wurde die turbulente Reibung so lange angepasst, bis die Geschwindigkeit der „Versuchsmure“ plausibel erschien, während die anderen Parameter konstant gehalten wurden. Danach wurde der basale Reibungswinkel durch Ausprobieren so angepasst, dass die Ablagerungen zu den Schadensflächen und Orthofotos 2010 und 2012 passten. Bei starken Anpassungen dieser Werte, wurde der jeweils andere Wert auch wieder nachjustiert. Bei der Dichte war dies ein ständiges Ausprobieren zusammen mit den Reibungsparametern und ein erneutes Anpassen der Reibungsparametern nach Anpassungen der Dichte, da das Fließverhalten auch durch diesen Parameter mitbestimmt wird. Ein weiterer wichtiger Parameter, welcher sich stark auf das Volumen auswirkt, ist der empirische Entrainment-Koeffizient. Dieser beschreibt die erosive Kraft der gravitativen Massenbewegung und die anschließende Mitnahme von Material. Nachdem durch die Literatur, mit der auch die anderen



Abbildung 37: Ausschnitte von Orthofotos von 2006 (Oben) und nach dem Extremereignis 2010 (Mitte) sowie mit den flächigen und linienhaften Anrissbereichen (Unten), wobei je roter die Farbe, desto mächtiger die Anrisstiefe (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).

Parameter geschätzt wurden, ein Wertebereich ermittelt wurde, wurde dieser Entrainment-Koeffizient durch Ausprobieren ermittelt, während die anderen Parameter konstant gehalten wurden, bis die Materialmitnahme plausibel war. Als Abbruchkriterium der Modellierung wurde der Zeitpunkt gewählt, an welchem sich das Material abgelagert hatte. Auf Grund der Verwendung von einem numerischen Modell (siehe Kap. 3.3), bleibt das Material der gravitativen Massenbewegung immer in Bewegung, weshalb ein Zeitpunkt ausgewählt werden muss, an dem sich das Material realistischerweise ablagern würde, da kaum noch kinetische Energie vorhanden ist. Ein einheitliches Abbruchskriterium ist dabei meistens nicht bestimmbar (z.B. HOCHSCHWARZER 2009; MERGILI et al. 2020a).

Nachdem die Anrißbereiche und die Eingabeparameter an der „Versuchsmure“ kalibriert wurden, wurde dies auf das gesamte UG übertragen und in weiterer Folge eine weitere Feinjustierung der Eingabeparameter, ähnlich wie bei der „Versuchsmure“, vorgenommen. Dabei wurden wieder folgende Kriterien auf deren Plausibilität geprüft sowie mit den Schadensflächen und den Orthofotos von 2010 und 2012 abgeglichen: maximale Geschwindigkeit, Höhe der stauenden Muren für die Stauungen des Schwarzenseebaches, die Ablagerungsgeometrie inklusive Form, Breite und Länge, das Fließverhalten und welche Gebiete hierbei durch die modellierten Murbewegungen betroffen waren und welche nicht betroffen waren. Hierbei stellte sich als eine Herausforderung heraus, dass die Murabgänge, aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen und den daraus resultierenden unterschiedlichen Geschwindigkeiten jeder Mure und den unterschiedlichen Distanzen bis zum jeweiligen Ablagerungsbereich, zu verschiedenen Zeitpunkten der Modellierung die Ablagerungsbereiche erreichten. Wie schon erwähnt, bleiben bei numerischen Modellen das Material von gravitativen Massenbewegungen auch dann noch in Bewegung und verändert seine Ausdehnung und Form, wenn es in der Realität abgelagert werden würde und die Bewegung somit aufhören würde. Aus diesem Grund wurde der Startzeitpunkt der Murabgänge jedes einzelnen Einzugsgebietes so gewählt, dass jede Mure sich am Ende der Modellierung ablagern würde. Als Gesamtdauer der Modellierung wurde der Murabgang gewählt, welcher die längste Zeit für seine Bewegung benötigte. Dies entsprach 1200 Sekunden und war das Einzugsgebiet

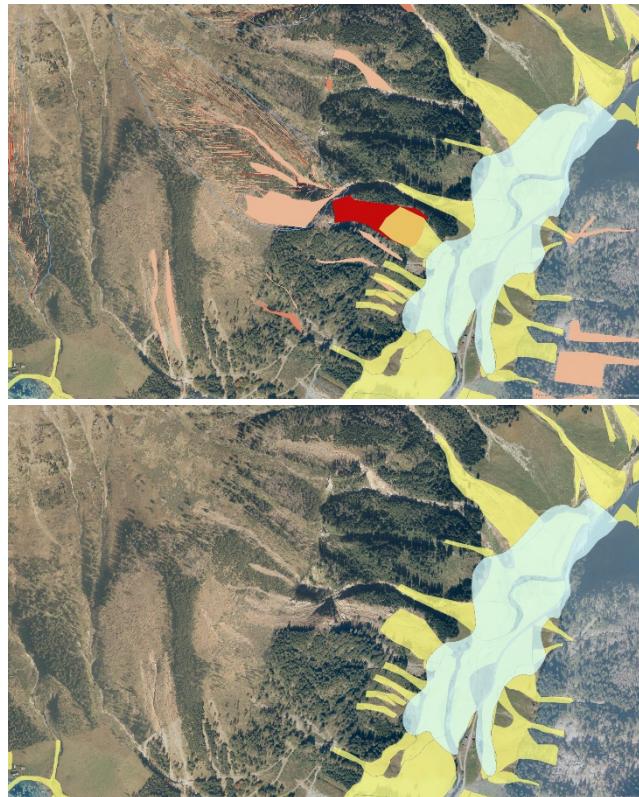


Abbildung 38: Ausschnitt aus dem Orthofoto von 2010 nach dem Extremereignis mit Anrißen von Hangmuren und einer kleineren Gerinnemure (Oben) und ohne die digitalisierten Anriße (Unten). Auf beiden Ausschnitten sieht man die Stauung beim Stiegelbach (türkis) und die digitalisierten Schadensflächen (gelb) (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).

des Lassachbaches. Die nächsten Murabgänge begannen nach den ersten 200 Sekunden und in weiterer Folge nach den ersten 700 Sekunden usw. Dabei wurde bei jedem Murabgang überprüft, nach welcher Zeit die Bewegung dieses Murabgangs realistischerweise abgelagert werden würde und diese Zeit von der Gesamtzeit der Modellierung subtrahiert und als Startzeitpunkt gewählt. Diese unterschiedlichen Startzeiten der Murabgänge können in r.avaflow durch einen Rasterdatensatz mit Rasterwerten der Startzeiten (also 0, 200, 700 usw.) berücksichtigt werden.

Auf Grund dessen, dass r.avaflow bei der Berechnung einen großen physikalischen Speicher (RAM) benötigt, musste bei der Modellierung des gesamten Einzugsgebietes die Rastergröße auf 5x5 m festgelegt werden.

#### 4.3.1.2. Die Durchbrüche der Stauungen

Im Gegensatz zu der Modellierung der stauenden Murabgänge wurden die Durchbrüche des Schwarzenseebaches, welche infolge der Stauungen durch die Murabgänge auftraten, mit dem Mehrphasenmodell, als Zweiphasenmodell ausgeführt, modelliert (sieh Kap. 3.2.1). Mit diesem Modell können sowohl das flüssige aufgestaute Wasser des Schwarzenseebaches als auch das feste Material, welches ebenfalls in den Stauungsbereichen vorhanden war, aber auch das feste stauende Material der Murdämme beschrieben werden. Bei extremen Prozessen, wie solchen Durchbrüchen durch Stauungen, ist der Vorteil des Mehrphasenmodells, dass auch Prozesse beschrieben und modelliert werden können, bei denen das Material nicht als ein Kontinuum mit quasi physikalischen Eigenschaften definierbar ist. Die Interaktionen und die Zusammensetzung der physischen Phasen sind bei solch komplexen Ereignissen in ihrer Ausprägung sehr unterschiedlich, weshalb eine Modellierung der Prozesse solcher Ereignisse nur durch eine Annäherung der physikalischen Eigenschaften der jeweiligen physikalischen Phasen möglich ist (siehe Kap. 3.2.1). Des Weiteren verändern sich die physikalischen Eigenschaften und Phasenzusammensetzungen während des Ereignisses zu stark, als dass man von einer Masse als Kontinuum mit gleichbleibenden Eigenschaften ausgehen könnte. Aus diesem Grund wurde, wie erwähnt, bei den Durchbrüchen nach den Stauungen des Schwarzenseebaches das Mehrphasenmodell als Zweiphasenmodell ausgeführt und ausgewählt (für mehr Details siehe Kap. 3.2.1 und 2.5 und 3.3) (vgl. MERGILI et al. 2020b; MERGILI et al. 2017b).

Die Grundlage dieser Modellierung bildet das Ergebnis der Modellierung der stauenden Murabgänge (siehe Kap. 5.2.1). Das modellierte abgelagerte Murmaterial wurde dabei in das vorhandene DEM von 2012 integriert. Mit der ArcGIS Funktion „raster calculator“ wurde der finale Rasterdatensatz der modellierten Murablagerungen mit dem DEM addiert. Auf diese Weise wurde ein DEM mit den Ablagerungen der Murgänge im Schwarzenseebachtal erzeugt, welches eine Auflösung von 5x5 m hat, da bei der Modellierung der Murabgänge aufgrund der hohen Belastung des physikalischen Speichers, die Pixelgröße reduziert werden musste. Da es bei diesem Prozessabschnitt der Modellierung

nicht ausschließlich um das Schwarzenseebachtal geht, sondern die Fließbewegungen auch im Kleinsölktaal modelliert werden sollen (da hier z.T. der Einflüsse und die Auswirkungen der Durchbruchsflut zu erkennen sind), wurde das DEM von 2012 bis zur Mündung des Kleinsölkbaches in die Enns zugeschnitten. Dieses DEM wurde mit dem DEM mit dem abgelagerten Murmaterial mit der ArcGIS Funktion „mosaic“ zusammengefügt, so dass das DEM mit dem abgelagerten Murmaterial in dem DEM mit dem Kleinsölktaal integriert wurde.

Da das Murmaterial bei der Modellierung der Muren so abgelagert wurde, dass dies bei der Modellierung der Durchbrüche nicht zu Stauungen wie bei dem Extremereignis vom 17.07.2010 führen konnten, wurden Lücken in den Murdämmen mit weiterem Material aufgefüllt. Es gab in den modellierten Murdämmen somit Bereiche, die für Stauungen wie am 17.07.2010 nicht die nötige Stauhöhe aufwiesen. Die Ursache kann an Ungenauigkeiten und Unsicherheiten der Modellierung der Murabgänge liegen, wobei es auch während des Extremereignises vom 17.07.2010 zu ähnlichen Effekten der Murdämme gekommen sein kann und die Muren mit unterschiedlichen Höhen abgelagert wurden. Dies kann auch während des Ereignisses dazu führen, dass das gestaute Wasser schon vor dem Erreichen der maximalen Stauhöhen mit geringem Abfluss über das stauende Material geflossen sein kann. Allerdings mussten von insgesamt 157 erhöhten Rasterzellen bei den Stauungsbereichen „Haselrinne“ und „Stigelbach“ insgesamt ca. 6 Rasterzellen (zu je 5x5 m) um ca. 4 m erhöht werden. Aufgrund dieses Höhenunterschieds kann dies auch auf Unsicherheiten und Ungenauigkeiten der Modellierung der Murabgänge zurückgeführt werden. Von den 157 händisch erhöhten Rasterzellen wurden 33 Rasterzellen bis zu 1 m, 70 Rasterzellen bis zu 2 m sowie 33 Pixel bis zu 3m erhöht. Bei der Implementierung des gestauten Wassers in das DEM muss bei r.avaflow der niedrigste Rasterwert des Murdammes mindestens die gleiche Höhe aufweisen, wie die Höhe der Stauung, da die maximale Wasserhöhe von stehenden Wasserkörpern in r.avaflow die niedrigste Höhenangabe als Rasterwert um den Wasserkörper nicht überschreiten darf (MERGILI 2023: Erweiterung r.lakefill). Diese Auffüllungen der Murdämmen wurde mit dem Erstellen eines Punktlayers und dem Setzen von Punkten auf die einzelnen Pixel des Rasterdatensatzes, welche nicht die Zielhöhe erreicht haben, begonnen. In weiterer Folge wurde jedem Punkt ein Wert zugewiesen, welcher sich aus der Subtraktion des Rasterwertes von der Zielhöhe der Murdämme ergab. In weiterer Folge wurden die Punkte mit der ArcGIS Funktion „point to raster“ in Rasterzellen umgewandelt, wobei hierbei die Rasterzellen Deckungsgleich mit den Rasterzellen des DEMs mit den Murablagerungen sein mussten. Den neu kreierten Pixeln wurden dabei die Werte zugewiesen, welche vorher den Punktdaten zugewiesen wurden. Somit konnte durch das Addieren der neu kreierten Rasterzellen und dem DEM mit den Murablagerungen die Zielhöhe der Murdämme erreicht werden. Hierbei war auch zu beachten, dass die longitudinale Ausdehnung der Dämme so gewählt wurde, dass bei einer anschließenden Modellierung mit einer Rastergröße von 15x15 m oder 20x20 m die Zielhöhe noch abgebildet wird (siehe Abbildung 39). Um eine ähnliche Ausdehnung der Staufläche wie beim Extremereignis von 2010 zu erreichen, mussten hierbei nach den modellierten Murabgängen die Höhe des Dammmaterials im Vergleich zur ermittelten

Stauhöhen in Kapitel 4.3.1.1 etwas erhöht werden. So wurde die Zielhöhe der Murdämme beim Stummerbach auf 1066 m. ü. NN, beim Steigelbach auf 1059 m. ü. NN und bei der Haselrinne auf 1041 m. ü. NN festgelegt.

Dieses angepasste DEM war die Grundlage für die Modellierung der Durchbrüche des Schwarzenbachs durch die Murdämme wie beim Extremereignis vom 17.07.2010. In dieses DEM wurde mit der ergänzenden r.avaflow-Funktion „r.lakefill“ die Senken, welche die Staubereiche darstellten, mit Wasser gefüllt. Die Wasserhöhe wurde dabei auf 1066.023 m. ü. NN beim Stummerbach, auf 1058 m. ü. NN beim Steigelbach und bei der Haselrinne auf 1040 m. ü. NN gesetzt. Diese drei Wasserkörper wurden zu 90% zur flüssigen Phase und zu 10% zur festen Phase gezählt, da davon auszugehen ist, dass ein erheblicher Sedimenttransport in die Stauungsbereiche stattgefunden hat, wie Fotoaufnahmen zeigen (siehe Abbildung 40). Des Weiteren wurde auch das Material, welches beim Murdamm der oberen Stauung (Stummerbach) als Auffüllung in das DEM gesetzt wurde, zur festen Phase gezählt. Somit wurden 10% des Materials der eingestaute Masse sowie Teile des oberen Murdamms als Ausgangsmaterial der festen Phase festgelegt, während 90% des Materials der eingestaute Masse als Ausgangsmaterial der flüssigen Phase dieser Modellierung fungierte. Dabei wurde festgelegt, dass die Anfangsgeschwindigkeit des Ausgangsmaterials vom oberen Murdamm 2 m/s in x-Richtung sowie 5 m/s in y-Richtung betrug, um den Beginn der Erosion des oberen Murdamms zu simulieren. Um den Abfluss oberhalb der Stauungen zu simulieren, wurde ein Hydrograph oberhalb der Stauung beim Stummerbach in dem Modell integriert, welcher dem Modell angibt wieviel Material sich an dieser Stelle

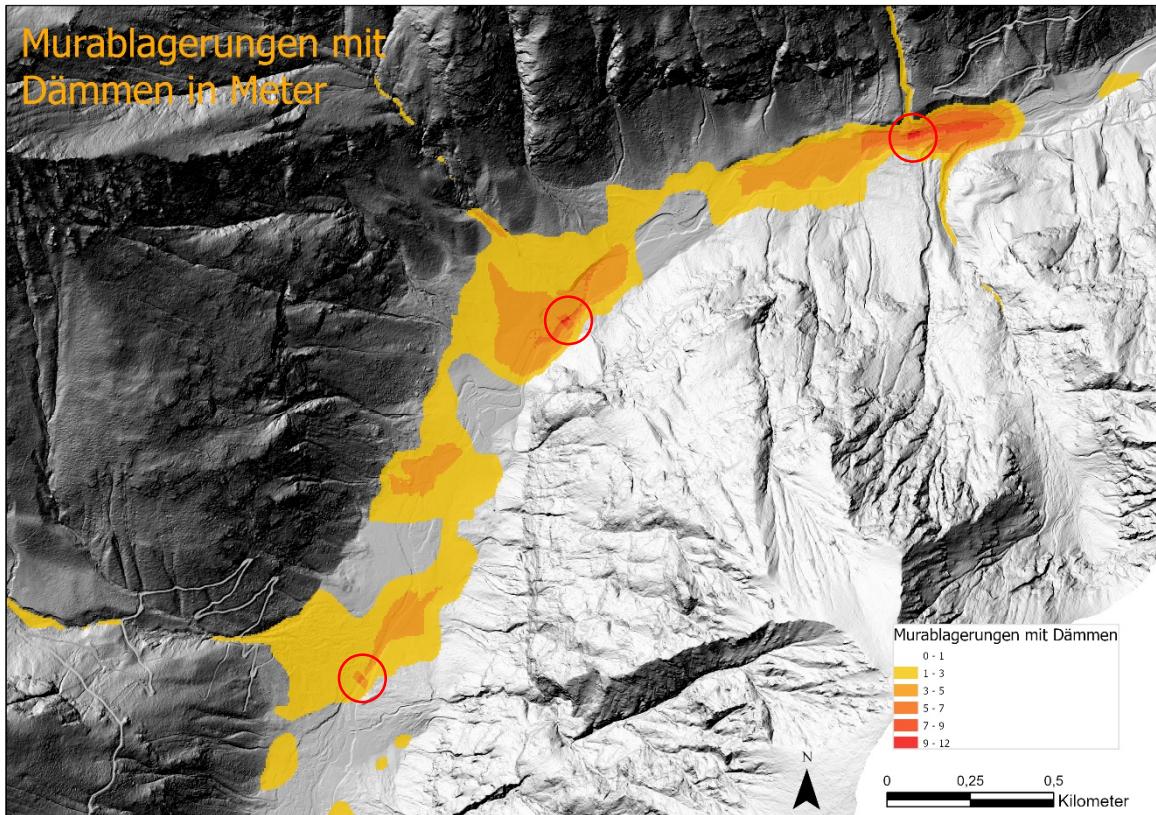


Abbildung 39: Die Muraburgs der Modellierung der stauenden Murabgänge mit dem zusätzlichen Material (siehe rote Kreise), um die nötige Dammhöhen zu erreichen in Metern (Quelle: eigene Darstellung).

pro Zeiteinheit und mit welcher Geschwindigkeit bewegt. Als Maximalmenge wurde hierbei am Anfang der Modellierung  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ , nach 1000 Sekunden  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  angegeben (PÖPPL und SASS 2020; siehe auch Kap. 2.5), und danach schrittweise bis zur Sekunde 20000 auf  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  reduziert (siehe Kap. 9 *Eingabe-Hydrograph Durchbrüche der Stauungen Extremereignis 2010*). Die Modellierungsdauer wurde auf 20.000 Sekunden (ca. 5  $\frac{1}{2}$  Stunden) festgelegt, weil nach dieser Zeit das Durchbruchsergebnis im Schwarzenseebachtal als abgeschlossen betrachtet werden konnte und sich die Durchflussraten des Ausgabe-Hydrograph stabilisiert hatten. Die Modellierungsdauer wurde durch Ausprobieren und Plausibilität abgeschätzt. Bei dieser Modellierung wurde die maximale Tiefe der Erosion definiert, d.h. wieviel Material durch Erosion und Mitnahme (Entrainment) während der Modellierung potenziell mitaufgenommen werden kann. Als Grundlage dieser Definition wurde der Rasterdatensatz der modellierten Murablagerungen verwendet. Hinzugefügt wurde noch das Material, welches bei der unteren Stauung (Haselrinne) sowie bei der mittleren Stauung (Stiegelbach) für die Dämme hinzugefügt wurde sowie für das gesamte Gebiet eine zusätzliche Tiefe von 30 cm. Somit war potenziell das gesamte Material, welches durch die Murabgänge (inklusive der Anpassungen bei den stauenden Murabgängen) abgelagert wurde sowie weitere 30 cm, mobilisierbar. Bei dem dazugehörigen empirischen Entrainment-Koeffizienten wurde als Orientierung die Ergebnisse von MERGILI et al. (2017b) verwendet und darauf aufbauend an den eigenen Modellierungsergebnissen nach dem Plausibilitätsprinzip angepasst, wobei diese letztendlich sehr nah an den Koeffizienten von den Versuchen aus MERGILI et al. (2017b) waren, welche den fluiden Charakter beibehielten.



Abbildung 40: Fluvialter Feststofftransport während des Extremereignisses am 17.07.2010 bei der Breitlahnhütte (Quelle: Infotafel bei der Breitlahnhütte; Copyright: ZEHETNER)

#### 4.3.2. Modellierung einer Auswahl möglicher Szenarien von Extremereignisse

Nachdem ein mögliches Extremereignis wie vom 17.07.2010 nachgestellt wurde, und dabei die Modellierung mit r.avaflow kalibriert werden konnte, wurden mögliche Szenarien im Schwarzenseebachtal modelliert, um mögliche Auswirkungen anderer Ereignisse besser abschätzen zu können. Für die Szenarienauswahl wurden die Ergebnisse der Konnektivitätsanalysen berücksichtigt, und mögliche Umweltveränderungen mitgedacht.

#### 4.3.2.1. Szenarienauswahl für die Modellierung

Für die Auswahl der Extremeszenarien werden auch Szenarien gewählt, die sich nach der Definition der vorliegenden Arbeit als Prozesskette darstellen und nach der von PÖPPL und SASS (2020) angepassten Interaktions-Matrise von GILL und MALAMUD (2014) als Typ 1b und Typ 2 kategorisiert werden können. Somit kann die Kalibrierung der Modellierung vom Extremereignis wie von 2010 gut auf die Szenarien angewendet werden. Als weitere Grundlage werden die Ergebnisse der Konnektivitätsanalysen mitberücksichtigt. Hierbei werden insbesondere die Ergebnisse der ECAs als Grundlage für die Bestimmung der räumlichen Verortung der Prozesse verwendet und in Verbindung mit Annahmen über zukünftige Umweltveränderungen Rückschlüsse auf die Szenarienauswahl getroffen.

Bei der *Szenarienauswahl A* wurde davon ausgegangen, dass sich das modellierte Extremereignis wie 2010 mit einer 30% höheren Intensität wiederholt. Als Grundlage dieser Überlegung dient die Tatsache, dass sich solche Starkniederschlagsereignisse zukünftig häufen könnten und somit die Wahrscheinlichkeit für stärkere Niederschlagsereignisse ebenfalls erhöhen kann (siehe Kap. 1.1 und GOBIET et al. 2014). Des Weiteren ist auch vermehrter Borkenkäferbefall auf Grund der globalen Klimaveränderung wahrscheinlich (BENTZ und JÖNSSON 2015; JAKOBY et al. 2019), weshalb weiterhin eine erhöhte Materialmobilisierung möglich erscheint (siehe Kap. 2.5). Dies würde sowohl die Hangmuren betreffen als auch die Gerinnemuren. Wahrscheinlich würde die höhere Niederschlagssumme zu vermehrtem Abfluss und Materialtransport der Gerinnemuren führen und der vermehrte Borkenkäferbefall zusammen mit erhöhten Niederschlagssummen die Wahrscheinlichkeit von Hangmuren erhöhen (vgl. Kap. 3.1).

Bei der *Szenarienauswahl B* wurde zunächst versucht mit Hilfe der ECAs einen weiteren möglichen Stauungsbereich näher am Schwarzensee zu finden, dies war aber nicht möglich, da auf Grundlage der räumlichen Verortung der ECAs eine weitere Stauung als unwahrscheinlich angesehen werden musste. Auch wenn ein weiteres großes Einzugsgebiet entlang des Lassachbaches vorhanden ist, so kann sich das Material aus diesem Seitental besser *parallel neben* dem Schwarzenseebach verteilen als bei Einzugsgebiet des Stummerbaches und des Weiteren ist auf der gegenüberliegenden Seite kein großes Einzugsgebiet als ECA vorhanden (siehe Abbildung 41). Die drei Stauungen von 2010 zeigen, dass entweder von beiden Seiten aus einem relativ großen Einzugsgebiet vermutet wurde oder die Morphologie den Talboden auf einer Seite mit steilen Hängen begrenzte. Beides findet sich auf Grundlage der ECAs und des DEMs kein weiteres Mal im Schwarzenseebachtal. Dies wurde auch bestätigt durch die DEMs mit den modellierten Murablagerungen des Extremeszenarios A, da keine weiteren möglichen Senken, trotz der erhöhten Intensität, vorhanden waren. So wurde entschieden, dass auf Grundlage der ECAs, und der Morphologie eine zusätzliche Stauung im Schwarzenseebachtal durch Murabgänge unwahrscheinlich ist und als Szenario demnach ausgeschlossen werden kann.

Dass es zu erneuten Stauungen bei den Stauungsbereichen von 2010 kommen kann, kann jedoch als möglich betrachtet werden, da sich die grundsätzlichen Voraussetzungen nicht

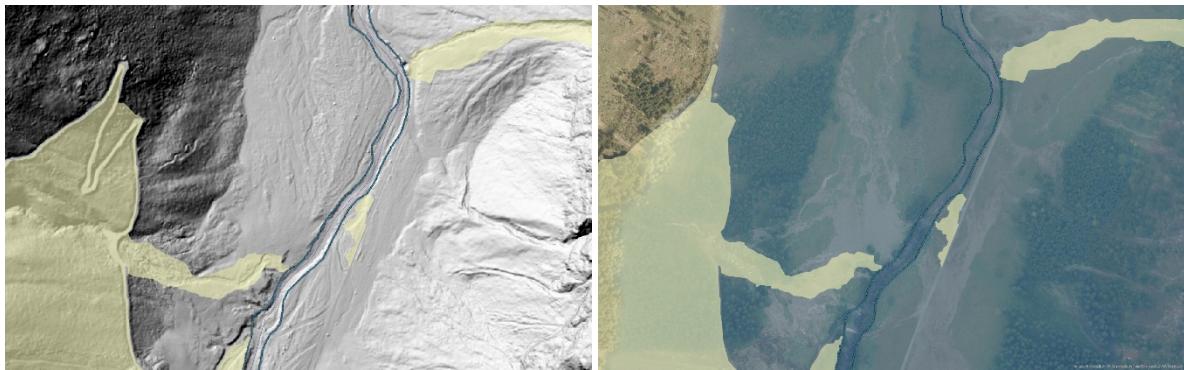


Abbildung 41: Mündungsbereich des Lassachbaches als Hillshade (links) und als Orthofoto von 2010 (rechts). Die gelben Bereiche sind die ermittelten ECAs, wobei links in den Ausschnitten die Mündung des Lassachbaches ist. Auf dem Orthofoto ist zu sehen, wie sich das Material aus dem Lassachbach vom Extremereignis 2010 abgelagert hat und auf dem Hillshade erkennt man die Struktur des Ablagerungsbereiches. Gegenüber des Mündungsbereiches des Lassachbaches ist keine ermitteltes ECA zu erkennen (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).

verändert haben. Da es sich bei allen Stauungsbereichen um Vermurungen von Gerinnemuren mit Einzugsgebieten oder von einem Seitental als Einzugsgebiet handelt, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei Starkniederschlagsereignissen oder bei einer Kombination von Starkniederschlagsereignissen mit Schneeschmelze oder länger andauernden Niederschlagsereignissen mehr Material in den Einzugsgebieten mobilisiert werden kann (siehe Kap. 3.1 und Kap. 3.2). Dies trifft insbesondere auf die Stauungsbereiche beim Stiegelbach und beim Stummerbach zu, da beim Stummerbach zwei ECAs von beiden Seiten vorhanden sind (siehe Kap. 5.1.1), und beim Stiegelbach ist sowohl das Einzugsgebiet des Stiegelbaches als ECA ausgewiesen als auch die Morphologie auf der orographisch rechten Seite mit seinen steilen Hängen nah am Schwarzenbach unverändert. Des Weiteren zeigt der IC in diesem Bereich auf der orographisch rechten Seite hohe IC-Werte auf (siehe Abbildung 47). Bei der dritten Stauung, bei der Haselrinne, konnte allerdings nur die Haselrinne (orographisch links) als ECA ausgewiesen werden, während die orographisch rechte Seite dem ECA-Ansatz zufolge nicht verbunden ist. Nach dem Orthofoto von 2012 sind auf der orographisch rechten Seite (Bärenrinne) auch bauliche Maßnahmen nach dem Extremereignis von 2010 vorgenommen worden, die den Materialtransport aus der Bärenrinne dämmen sollen bzw. bei größeren Ereignissen das Material Richtung Auslass lenken sollen (siehe Abbildung 42).

Auf dieser Grundlage wurde für das Extremenszenario B festgelegt, dass die Ausgangslage mit 30% mehr Intensität ähnlich wie bei Extremenszenario A ist, allerdings befördern die stauenden Muren, welche dem ECA-Ansatz zufolge verbunden sind (ECA-Nr. 4, 6, 10, 11; siehe Kap. 5.1.1), um den Faktor 2 mehr Material ins Tal und erzeugen damit einen größeren Stauungsbereich. Für das Seitental entlang des Stummerbaches wurde dieser Faktor auf alle Gerinnemuren in diesem Seitental angewendet.



Abbildung 42: Mündungsbereich der Bärenrinne vom Orthofoto 2012 mit den erkennbar aufgeschütteten Dämmen (Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).

#### 4.3.2.2. Modellierung des Extremszenarios A

Die Murabgänge des Extremszenarios A wurden auf Grundlage eines ergänzten Startskripts der Modellierung der Murabgänge des Extremereignisses wie von 2010 durchgeführt. Dabei wurde es mit Hilfe der GRASS Gis Funktion „r.mapcalc“ erweitert, indem das Anrissmaterial mit dem Faktor 1,33 multipliziert wurde. Des Weiteren wurde die basale Oberfläche mit der gleichen GRASS Gis Funktion angepasst, indem von der basalen Oberfläche 33% des Anrissmaterials subtrahiert wurde. Da auf Grund der höheren Materialmenge der Materialtransport in der Modellierung eine längere Zeit bis zur Ablagerung benötigte, wurde der Modellierungszeitraum dementsprechend um 100 Sekunden auf insgesamt 1300 Sekunden verlängert

Für die Durchbrüche wurde, wie in Kapitel 4.3.1.2 erläutert, das neue DEM mit den modellierten Murabgängen als Ablagerungen des Extremszenarios A erstellt. Des Weiteren wurden ebenfalls Lücken der Murdämme ausgebessert, wobei die räumliche Ausdehnung der Ausbesserungen möglichst nah an den Ausbesserungen aus dem Kapitel 4.3.1.2 waren. Hierbei wurde die neuen Zielhöhen der Stauungen auf 1042 m. ü. NN bei der Haselrinne, auf 1061 m. ü. NN beim Stiegelbach sowie auf 1068 m. ü. NN beim Stummerbach festgelegt, da dies die Höhe war, bei der die Ausdehnung des eingefügten Materials fast identisch mit der Ausdehnung von der Modellierung aus Kapitel 4.3.1.2 war. Auch der Rasterdatensatz für das Material, welches durch Erosion und Mitnahme (Entrainment) aufgenommen werden kann, wurde auf identische Weise wie in Kapitel 4.3.1.2 vorbereitet – nur dass die Ablagerungen der Murabgänge des Extremszenarios A statt des Extremereignisses verwendet wurden. Das Gleiche gilt auch für das eingefügte Material des Dammes beim Stummerbach, welches als ein Teil des Ausgangsmaterial der Modellierung dient. Dieses Material bewegt sich, wie auch in Kapitel 4.3.1.2 erläutert, am Anfang der Modellierung mit 2 m/s in x-Richtung sowie 5 m/s in y-Richtung, um den Beginn der Erosion des Dammes zu simulieren. Da bei einer 30% höheren Intensität auch mit einem höheren Abfluss zu rechnen ist, wurde der maximale Abfluss des Schwarzenbachs oberhalb der Stauungen mit Hilfe des Eingabe-Hydrographen auf 55 m<sup>3</sup>/s nach 1000 Sekunden festgelegt, wobei die Kurve der Durchflussverteilung wie bei der Modellierung des Extremereignisses angelegt wurde (siehe Kap. 9 *Eingabe-Hydrograph Durchbrüche der Stauungen Extremszenario A*). Außer, dass die Höhe der Stauungen bei dem Füllvorgang mit r.lakefill auf 1068 m. ü. NN beim Stummerbach, auf 1060.8 m. ü. NN beim Stiegelbach und bei der Haselrinne auf 1041.9 m. ü. NN angepasst wurden, waren die restlichen Parameter der Modellierung der Durchbruchsflut des Extremszenarios A dieselben Parameter wie in der Modellierung in Kapitel 4.3.1.2.

#### 4.3.2.3. Modellierung des Extremszenarios B

Für die Modellierung der Murabgänge des Extremszenarios B wurde ein ergänztes Startskript der Murabgänge des Extremszenarios A verwendet. So wurde ein weiterer Rasterdatensatz („faktor“) hinzugefügt, der bei allen Rasterzellen des Anrissmaterials in

jenen Einzugsgebieten, welche in Kapitel 4.3.2.1 definiert wurden, den Wert 1 aufweist. Somit konnte mit diesem Datensatz mit der GRASS Gis Funktion „r.mapcalc“ die Werte in den entsprechenden Einzugsgebieten mit einem beliebigen Faktor multipliziert werden. Um die in Kapitel 4.3.2.1 definierte Ausgangslage zu erzeugen, wurden zwei Rechenschritte für das angepasste Anrissmaterial durchgeführt. Mit der Funktion „r.mapcalc“ wurde zuerst das Anrissmaterial (vom modellierten Extremereignis wie am 17.07.2010) mit „faktor“\*0,67 multipliziert, und dieses Ergebnis dann wieder mit der Funktion „r.mapcalc“ mit Anrissmaterial\*1,33 addiert. Somit konnte das Anrissmaterial wie in Extremszenario A bestimmt werden, nur dass die Einzugsgebiete, welche mit Hilfe der ECAs in Kapitel 4.3.2.1 definiert wurden, die doppelte Menge des Anrissmaterials wie beim modellierten Extremereignis wie von 2010 aufwiesen. Um die basale Oberfläche anzupassen, wurde die, für das modellierten Extremereignis 2010 definierte, basale Oberfläche mit dem Anrissmaterial vom Extremereignis addiert und mit dem neu definierten Anrissmaterial subtrahiert. Der Modellierungszeitraum betrug wie beim Extremszenario A 1300 Sekunden.

Auch für die Durchbruchsflut war die Vorgehensweise der Modellierung wie bei den Durchbrüchen des modellierten Extremereignisses wie von 2010 und dem Extremszenario A. So wurde auf dem neu erstellten DEM mit den entsprechenden Murablagerungen Lücken in den Murdämmen ausgebessert, wie sie bei den vorherigen Modellierungen ebenfalls durchgeführt wurden. Dabei wurde wieder darauf geachtet, dass die räumliche Ausdehnung bis auf wenige Rasterzellen die gleiche Ausdehnung wie bei dem modellierten Extremereignis 2010 und dem Extremszenario A hatten. Dies ergab neue Zielhöhen der Stauungen von 1043 m. ü. NN bei der Haselrinne, 1062 m. ü. NN beim Stiegelbach sowie von 1069 m. ü. NN beim Stummerbach. Dies war die Höhe, bei der die Ausdehnung des eingefügten Materials fast identisch mit der Ausdehnung von der Modellierung aus Kapitel 4.3.1.2 war. Auch der Rasterdatensatz für das Material, welches durch Erosion und Mitnahme (Entrainment) aufgenommen werden kann, wurde auf identische Weise wie beim modellierten Extremereignis 2010 vorbereitet – nur dass die Ablagerungen der Murabgänge des Extremszenarios B statt des Extremereignisses verwendet wurden. Das Gleiche gilt auch für das eingefügte Material des Dammes beim Stummerbach, welches als ein Teil des Ausgangsmaterial der Modellierung dient. Dieses Material bewegt sich, wie auch in Kapitel 4.3.1.2 erläutert, am Anfang der Modellierung mit 2 m/s in x-Richtung sowie 5 m/s in y-Richtung, um den Beginn der Erosion des Dammes zu simulieren. Da die Ausgangslage des Extremszenarios B der Ausgangslage des Extremszenarios A sehr ähnlich ist, außer bei den entsprechend definierten Einzugsgebieten, wird der Eingabe-Hydrograph, wie er beim Extremszenario A definiert wurde, verwendet (siehe Kap. 4.3.2.2 und Kap. 9 *Eingabe-Hydrograph Durchbrüche der Stauungen Extremszenario A*). Außer, dass die Höhe der Stauungen auf 1069 m. ü. NN beim Stummerbach, auf 1061.8 m. ü. NN beim Stiegelbach und bei der Haselrinne auf 1042.9 m. ü. NN angepasst wurden, waren die restlichen Parameter der Modellierung der Durchbruchsflut des Extremszenarios B dieselben Parameter wie in der Modellierung in Kapitel 4.3.1.2.

## 5. Ergebnisse und Auswertung

Im folgenden Kapitel werden die Analyseergebnisse, die Modellierungsergebnisse und die Auswertungen vorgestellt. Dabei werden im ersten Abschnitt die Ergebnisse der Konnektivitätsanalysen, sowohl des Indexes IC als auch des ECA-Ansatzes, präsentiert. In weiterer Folge werden die Ergebnisse der Modellierung mit r.avaflow dargestellt. Dabei wird zwischen dem modellierten Extremereignis wie am 17.07.2010 und den jeweiligen Extremeszenarien unterschieden. Es wird auch zwischen den stauenden Murgängen und den Durchbrüchen nach den Stauungen unterschieden.

### 5.1. Ergebnisse der Modellierung des Indexes IC und des ECA-Ansatzes

Die (Sediment-)Konnektivität im UG wurde sowohl mit dem ECA-Ansatz als auch mit dem Index IC analysiert. Dabei wurden die effektiven Einzugsgebiete (ECA) für die heutige Sedimentkonnektivität erstellt, um deutlich zu machen, welche Einzugsgebiete heute als ECA angesehen werden können bzw. welche als entkoppelt angesehen werden können, um auf dieser Grundlage Rückschlüsse ziehen zu können. Der IC wurde hingegen sowohl für die heutige Konnektivität im Schwarzenseebachtal erstellt als auch für die Konnektivität nach den einzelnen Modellierungen der Murabgänge des Extremereignisses bzw. der Extremeszenarien, um so die Veränderung der Konnektivität während solcher Extremereignisse deutlich zu machen.

#### 5.1.1. Ergebnisse der ECAs

Die ECAs wurden mit einem  $0^\circ$  Grenzwert berechnet, was bedeutet, dass kein Hangneigungsgrenzwert berücksichtigt wurde. Alle möglichen ECAs wurden in weiterer Folge im Feld überprüft und die möglichen ECAs, bei denen ein Sedimenteintrag in den Schwarzenseebach festgestellt werden konnte, wurde als ECA gekennzeichnet. Die Ergebnisse der ECAs sind in der Tabelle 5 und Abbildung 43 zusammengefasst worden. So ist in der Tabelle 5 zu erkennen, dass 30,35% des gesamten Einzugsgebietes als effektives Einzugsgebiet ausgewiesen werden kann, wobei dieser Wert mit 57,67% deutlich steigt, wenn das Einzugsgebiet des Schwarzensees in der Berechnung nicht berücksichtigt wird, da der Schwarzensee eine lokale Erosionsbasis darstellt und somit das gesamte Gebiet oberhalb des Schwarzensees entkoppelt ist (siehe Kap. 2.2). Grundsätzlich ist zu erkennen, dass auf der orographisch linken Seite deutlich größere Gebiete als ECA ausgewiesen werden konnten, als auf der orographisch rechten Seite. So sind 86,71% der Fläche, die als ECA ausgewiesen wurden, auf der orographisch linken Seite des Schwarzenseebaches. Wobei hierbei insbesondere die seitlichen Hängetäler entlang des Stummerbaches (ECA-Nr. 11) und entlang des Lassachbaches (ECA-Nr. 19) mit einem Flächenanteil von 61,85% an der Fläche der ECA insgesamt den nominell größten Unterschied zwischen der orographisch

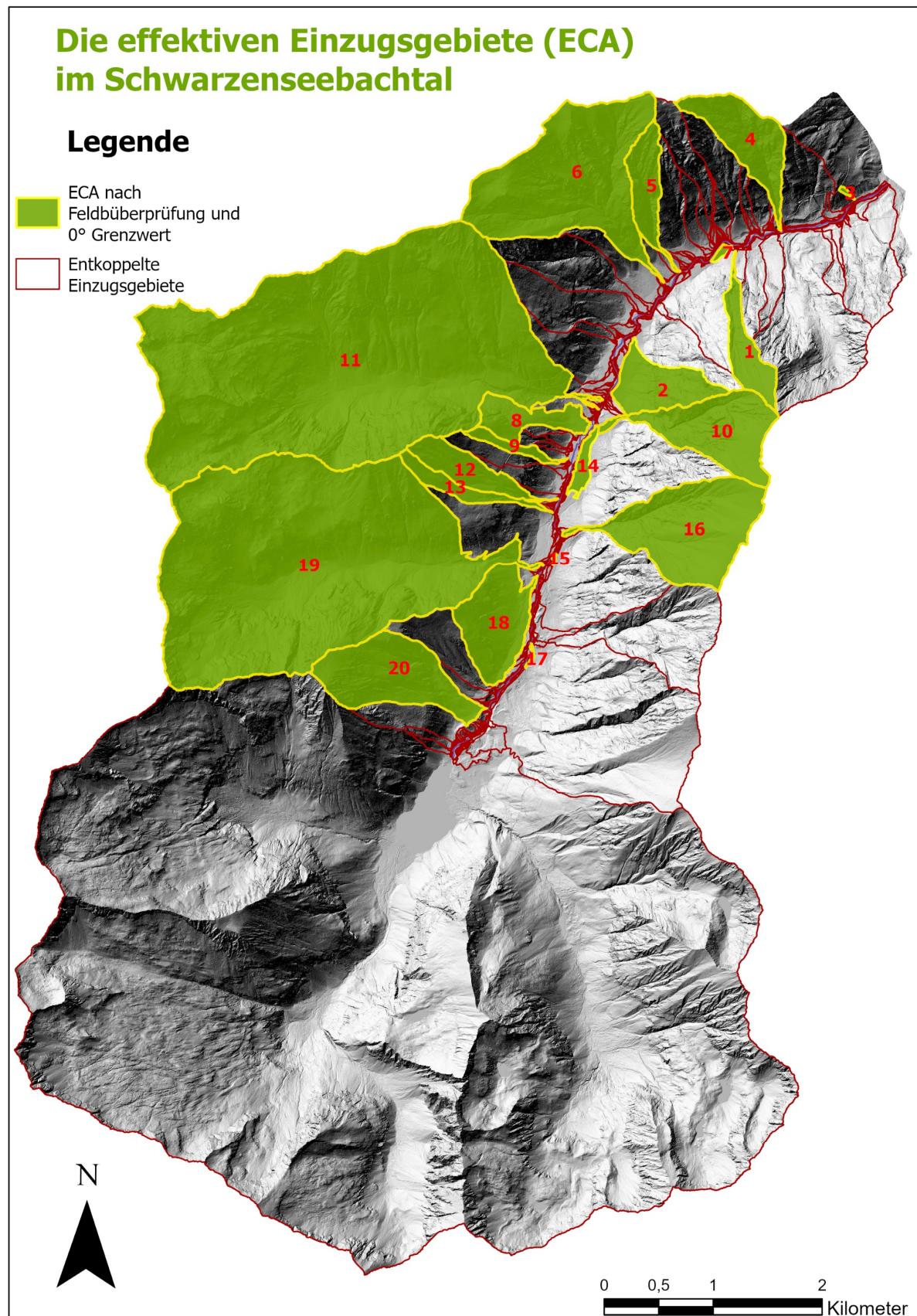


Abbildung 43: Die modellierten und im Feld validierten ECAs des Schwarzenbachs. Es wurden jene Einzugsgebiete als ECA ausgewiesen, die im Feld als gekoppelt identifiziert werden konnten. Falls Einzugsgebiete durch antropogenen Einfluss eine andere Ausdehnung aufwiesen als durch die Modellierung ausgewiesen, wurden diese vorher angepasst (Quelle: eigene Darstellung; Datengrundlage: LAND STEIERMARK 2023).

linken und orographisch rechten Seite ausmachen. Diese Seitentäler sind dabei flächenmäßig die beiden größten ECAs.

Tabelle 5: Kennwerte der ECAs im Schwarzenseebachtal.

ECA-Kennwerte	
<b>Gesamtgröße UG (km<sup>2</sup>)</b>	57
<b>Größe ECA insgesamt (km<sup>2</sup>)</b>	17,3
<b>Anteil ECA am gesamten UG (%)</b>	30,35
<b>Größe UG ohne Einzugsgebiet Schwarzensee (km<sup>2</sup>)</b>	30,0
<b>Anteil ECA am UG ohne Einzugsgebiet Schwarzensee (%)</b>	57,67
<b>Größe ECA orographisch links (km<sup>2</sup>)</b>	15,0
<b>Anteil der orographisch linken ECAs an ECAs insgesamt (%)</b>	86,71
<b>Größe ECA Lasachbach (19) und Stummerbach (11) (km<sup>2</sup>)</b>	10,7
<b>Anteil der ECAs Nummer 19 und 11 an ECA insgesamt (%)</b>	61,85

Während der Feldarbeit war auffällig, dass auf der orographisch rechten Seite, die Einzugsgebiete durch die Funktion der Zufahrtsstraße als Puffer, immer wieder geblockt wurden. Dieser Puffer wurde meistens nur dann hydrologisch überwunden, wenn durch Untertunnelung der Zufahrtsstraße bauliche hydrologische Verbindungen zum Schwarzenseebach geschaffen wurden, wobei diese Untertunnelungen für den Sedimenttransport trotzdem ein Puffer darstellten kann (siehe Abbildung 44). Des Weiteren ist der Flusslauf beim Auslass des Schwarzenseebachtals durch bauliche Maßnahmen befestigt und reguliert (siehe Abbildung 45). Dies ist wahrscheinlich ein Mitgrund, weshalb hier, außer ECA-Nr. 3, kein weiteres ECA vorhanden ist.

Die ECAs des Schwarzenseebaches sind die Einzugsgebiete, welche in der heutigen Situation als effektive sedimentliefernde Einzugsgebiete ausgewiesen werden können. Dies

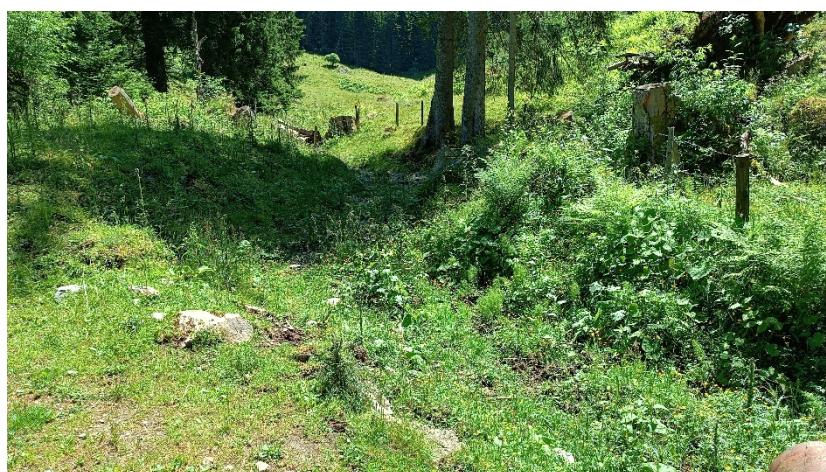


Abbildung 44: Standort der Kamera ist am Rand der Straße (ca. 40 m nördlich von ECA-Nr. 17), während sich der Schwarzenseebach hinter der Kamera befindet. Rechts unten im Bildrand ist ein Rohr für die Untertunnelung zu erkennen, während in der Bildmitte bis zum Rohr eine Sedimentsenke (Puffer) zu erkennen ist, da das Rohrende in der Luft endet und keinen Kontakt zum Boden hat (Quelle: eigene Aufnahme 29.06.2023)

bedeutet für zukünftige Extremereignisse eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass diese Einzugsgebiete als Einzugsgebiet für Murabgänge verfügbar sind und die Sedimentverfügbarkeit grundsätzlich auch als vorhanden eingeschätzt werden kann – auch wenn keine Aussage über die verfügbare

Sedimentmenge zulässig ist. In Extremscenario B konnten diese Ergebnisse der ECAs



Abbildung 45: Wehranlage kurz vor dem Auslass des Schwarzenseebachtals (nähe ECA-Nr. 3). Die Begradiung des Flusslaufes ist an beiden Seiten des Flusslaufes zu erkennen (Quelle: eigene Aufnahme 29.06.2023).

berücksichtigt werden. Wie in Abbildung 46 zu erkennen ist, sind die Mündungsbereiche der beiden Seitentäler bezüglich der Sedimentablagerungen unterschiedlich. So liefert der Stummerbach (ECA-Nr. 11) deutlich mehr Sedimentfracht unterschiedlichster Größe, da deutlich mehr Materialablagerungen mit geringer Vegetationsbedeckung vorhanden ist, als beim Mündungsbereich des

Lassachbaches (ECA-Nr. 11), da hier kaum grobkörniges abgelagertes Sediment ohne Vegetation erkennbar ist. Dies stimmt mit den Überlegungen zu Extremscenario B überein (vgl. Kap. 4.3.2.1 und Abbildung 41).



Abbildung 46: Links: Mündungsbereich des Lassachbaches (ECA-Nr. 19). Rechts: Mündungsbereich des Stummerbaches (ECA-Nr. 11) (Quelle: eigene Aufnahme 29.06.2023).

### 5.1.2. Ergebnisse der ICs vor und nach den Modellierungen der Murabgänge

Der IC wurde wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 47 bis Abbildung 51 dargestellt. Der IC wurde sowohl vor den Modellierungen ermittelt als auch nach den modellierten Murabgängen des Extremereignisses und der Extremzenarien. Dabei wurde die Konnektivität jeweils zum Auslass oder zum Schwarzenseebach ermittelt. Somit konnte die laterale Konnektivität zum Schwarzenseebach betrachtet werden, aber auch die longitudinale Konnektivität berücksichtigt werden. So zeigt der IC mit Zieleingabe des Schwarzenseebaches eine hohe laterale Konnektivität an mehreren Abschnitten entlang des Schwarzenseebaches, wie in der Abbildung 47 zu erkennen ist. Deutlich zu erkennen ist die Entkopplung des Einzugsgebietes des Schwarzensees, da dieser eine lokale Erosionsbasis darstellt. Dies ist auch bei den ICs nach den modellierten Murabgängen zu erkennen (siehe Abbildung 49). Im Vergleich zum IC mit Zieleingabe vor den modellierten Muren, unterscheiden sich die ICs mit Zieleingabe nach den modellierten Muren, hinsichtlich ihrer lateralen Konnektivität. Grundsätzlich weist das UG eine hohe laterale

Konnektivität auf, allerdings verringert sich der IC-Wert einiger Hangabschnitte nach den modellierten Muren (vgl. Abbildung 47, Abbildung 49 und Abbildung 51). Die ICs ohne Zieleingabe berücksichtigen neben der lateralen Konnektivität auch die longitudinale Konnektivität in Bezug auf den Auslass des UGs. Somit ist bei diesem Ansatz ersichtlich, dass die IC-Werte mit der Nähe zum Auslass steigen (vgl. Abbildung 48 und Abbildung 49). Bei dem direkten Vergleich der ICs ohne Zieleingabe vor den Modellierungen der Muren und nach den Modellierungen der Muren, wird deutlich, weshalb diese ICs bezüglich der longitudinalen einen Erkenntnisgewinn generieren, da in Abbildung 50 ersichtlich ist, wie sich die longitudinale Konnektivität auf Grund der Murablagerungen verändert hat. So ist zu erkennen, dass bei den ICs ohne Zieleingabe nach den modellierten Muren verringerte IC-Werte bei den drei Stauungsbereichen vorhanden sind. Dieser Unterschied bezieht sich vorwiegend auf die longitudinale Konnektivität, welche durch die Murdämme vor den Durchbrüchen der Stauungen, dem IC zufolge, verringert ist, weil die Murdämme als Barriere fungieren. Somit zeigt dies, dass die longitudinale Konnektivität mit diesem Ansatz mitberücksichtigt werden kann und beim Vergleich auch darstellbar ist. Der IC mit dem Schwarzenbach als Zieleingabe (siehe Abbildung 51), zeigt hingegen ausschließlich die Veränderungen der lateralen Konnektivität zum Schwarzenbach an. Hierbei gibt es erkennbare Unterschiede zwischen den einzelnen Modellierungen des Extremereignisses wie von 2010, dem Extremzenario A und dem Extremzenario B. Die meisten Unterschiede beziehen sich dabei auf eine

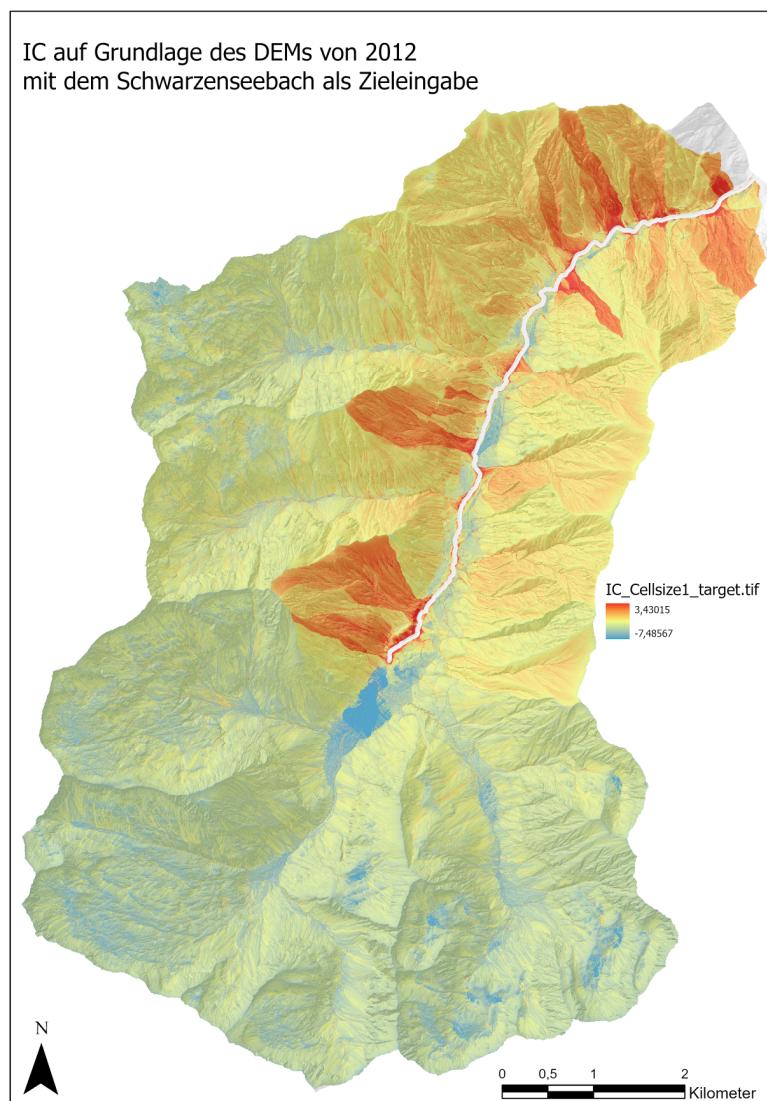


Abbildung 47: Der IC mit dem Schwarzenbach als Zieleingabe auf dem DEM von 2012 vor den modellierten Murablagerungen. Durch die Zieleingabe wird dabei der Grad der lateralen Konnektivität zum Schwarzenbach ausgedrückt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Einzugsgebiet des Schwarzensees in Bezug auf den Schwarzenbach eine geringe Konnektivität aufweist, während es insbesondere auf der orographisch linken Seite einige Hänge gibt, welche eine hohe Konnektivität aufweisen. Auch auf der orographisch rechten Seite gibt es einige Hänge welche einen hohen IC-Wert aufweisen, allerdings sind auf einem hohen Niveau der Konnektivität weniger Bereiche vorhanden, die die höchsten IC-Werte aufweisen, wie auf der orographisch linken Seite.

Reduktion der IC-Werte bezüglich der Hang-Gerinne-Kopplung. Hierbei sind insbesondere Unterschiede zwischen den modellierten Muren des Extremereignisses und den modellierten Muren der Extremeszenarien zu erkennen, wenngleich es auch Unterschiede zwischen den beiden Extremeszenarien gibt. Die Unterschiede zwischen den Szenarien beziehen sich erwartungsgemäß auf die Gebiete um die Staungsbereiche, während sich die Unterschiede zwischen den modellierten Muren des Extremereignisses und den Extremeszenarien auf verschiedene Abschnitte des Schwarzenseebachtals verteilt (siehe Abbildung 51).

Somit weisen die ICs des UGs grundsätzlich auf eine hohe Konnektivität hin, allerdings mit einer hohen Variabilität und einer geringen Konnektivität des Gebietes, welche durch den Schwarzensee entkoppelt wird. Dieser geringe Grad der Verbundenheit zum restlichen Bereich des UGs ist durch die Funktion des Schwarzensees als lokale Erosionsbasis zu erklären. Die Konnektivität der beiden Seitentäler entlang des Stummerbaches (ECA-Nr. 11) und entlang des Lassachbaches (ECA-Nr. 19) weist ebenfalls eher niedrige IC-Werte auf, was eine Unterschätzung sein könnte, wie die ECA-Ergebnisse vermuten lassen. Dies könnte damit erklärt werden, dass diese Seitentäler auch als eigene geomorphologische Einheiten betrachtet werden können und somit die Ausdifferenzierung mit der Zieleingabe des Schwarzenseebaches zu gering ist, da somit die Seitentäler nur in Bezug ihres Auslasses errechnet werden. Die Seitentäler können auch als eine Kopplung zwischen Seitenarm und Hauptgerinne verstanden werden, wonach die Seitentäler in Bezug auf den Schwarzenseebach eine

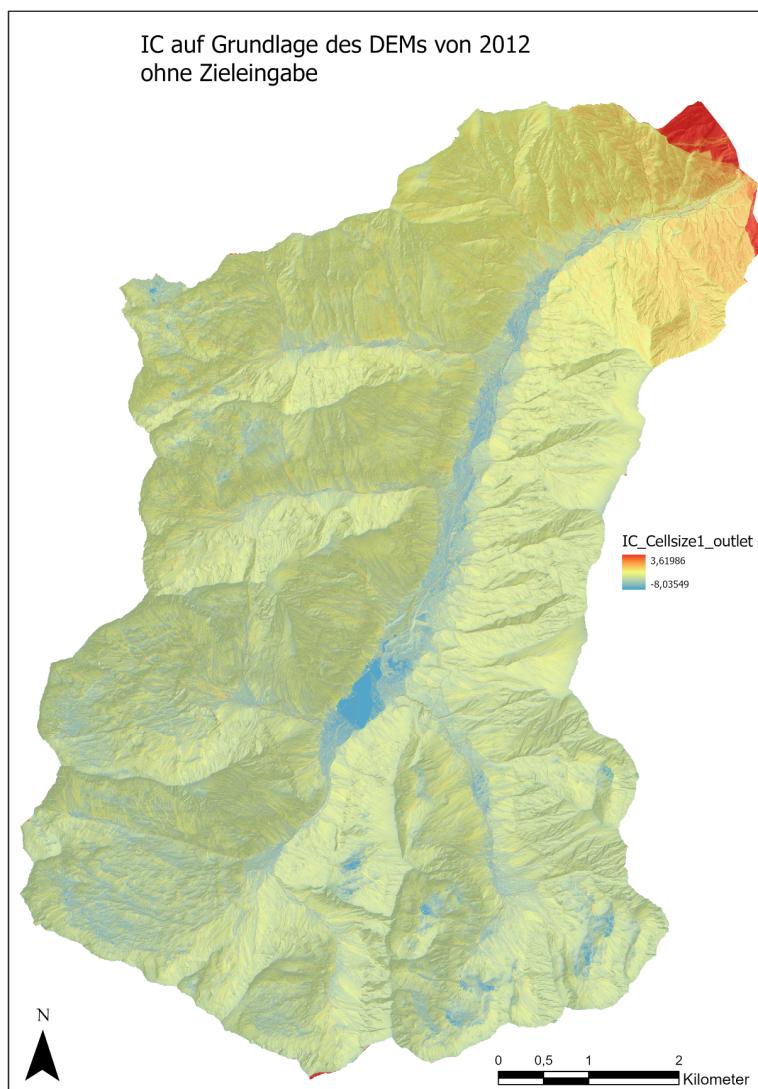


Abbildung 48: Der IC auf Grundlage des DEMs von 2012 ohne Zieleingabe, was bedeutet, dass die Konnektivität in Bezug auf den Auslass abgebildet wird. Somit kann die laterale aber auch die longitudinale Konnektivität berücksichtigt werden. Allerdings ist ebenfalls zu erkennen, dass die Konnektivität stärker wird, je näher am Auslass der IC untersucht wird. Die beiden Bereiche mit den hohen IC-Werten in der Nähe des Auslasses (die roten Bereiche), sind allerdings nicht in Bezug auf den Auslass berechnet worden, sondern zum Rand des Ausschnittes, weshalb diese Bereiche in die Betrachtung des Schwarzenseebachtals nicht zu beachten sind.

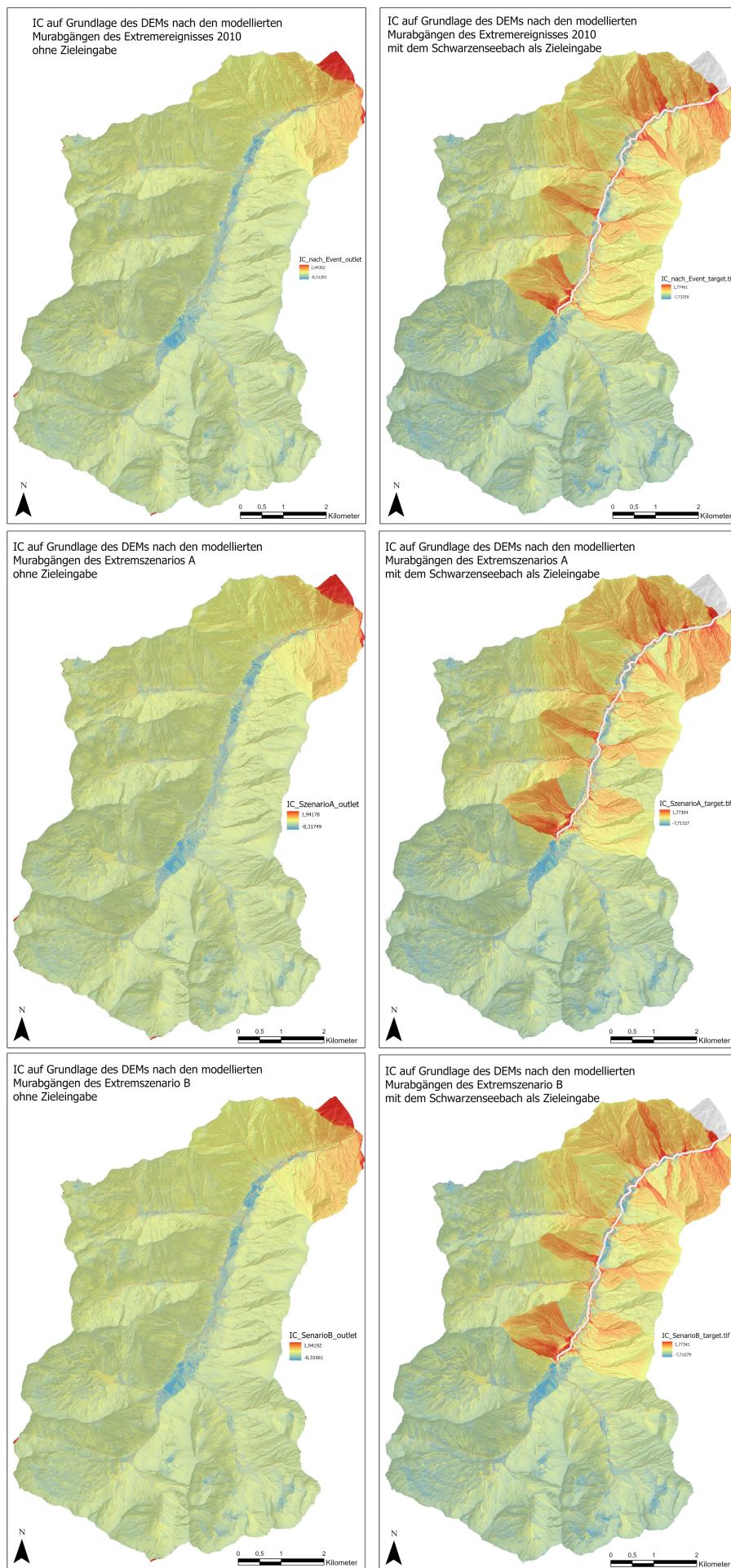


Abbildung 49: Die ICs nach den modellierten Murabgängen des Extremereignisses 2010 (Oben), des Extremeszenarios A (Mitte) und des Extremeszenarios B (Unten). Auf der linken Seite sind die jeweiligen ICs bei denen sich die Konnektivität auf den Auslass bezieht und auf der rechten Seite sind die ICs, bei denen als Ziel der Schwarzenbach eingegeben wurde, auf das sich die Konnektivität bezieht. Somit werden auf der linken Seite die laterale und die longitudinale Konnektivität gleichzeitig dargestellt, während auf der rechten Seite die laterale Konnektivität im Kontext des Schwarzenbachs dargestellt wird.

## Ergebnisse der Modellierung des Indexes IC und des ECA-Ansatzes

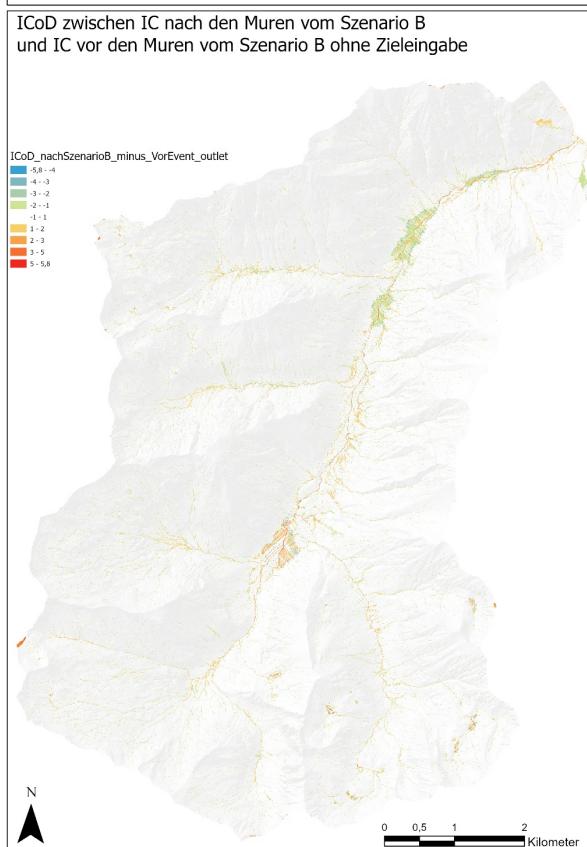
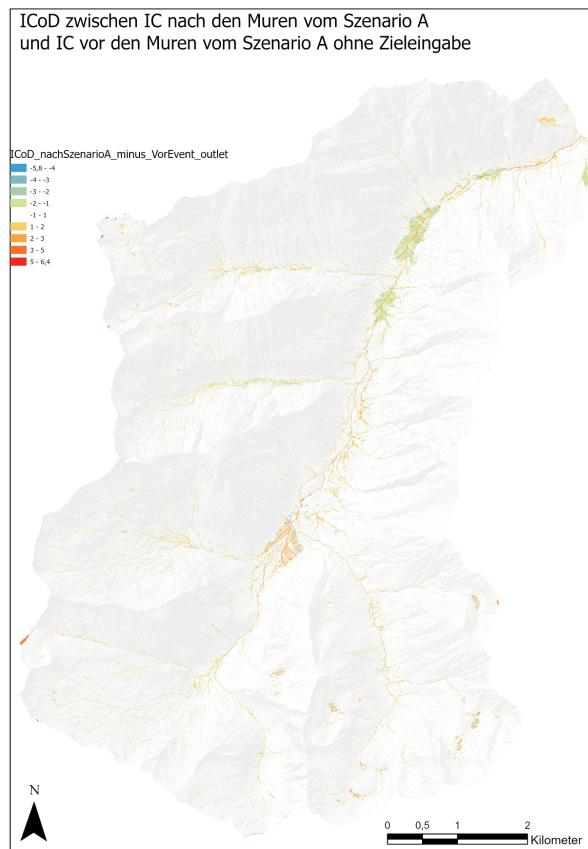
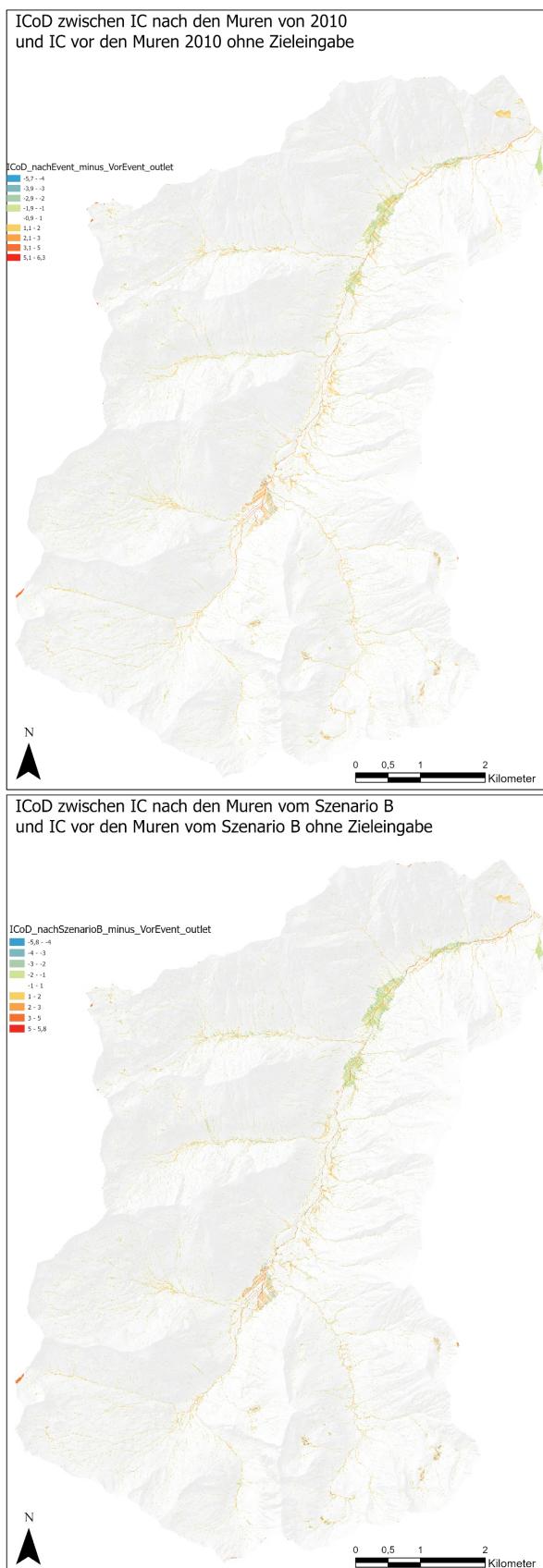
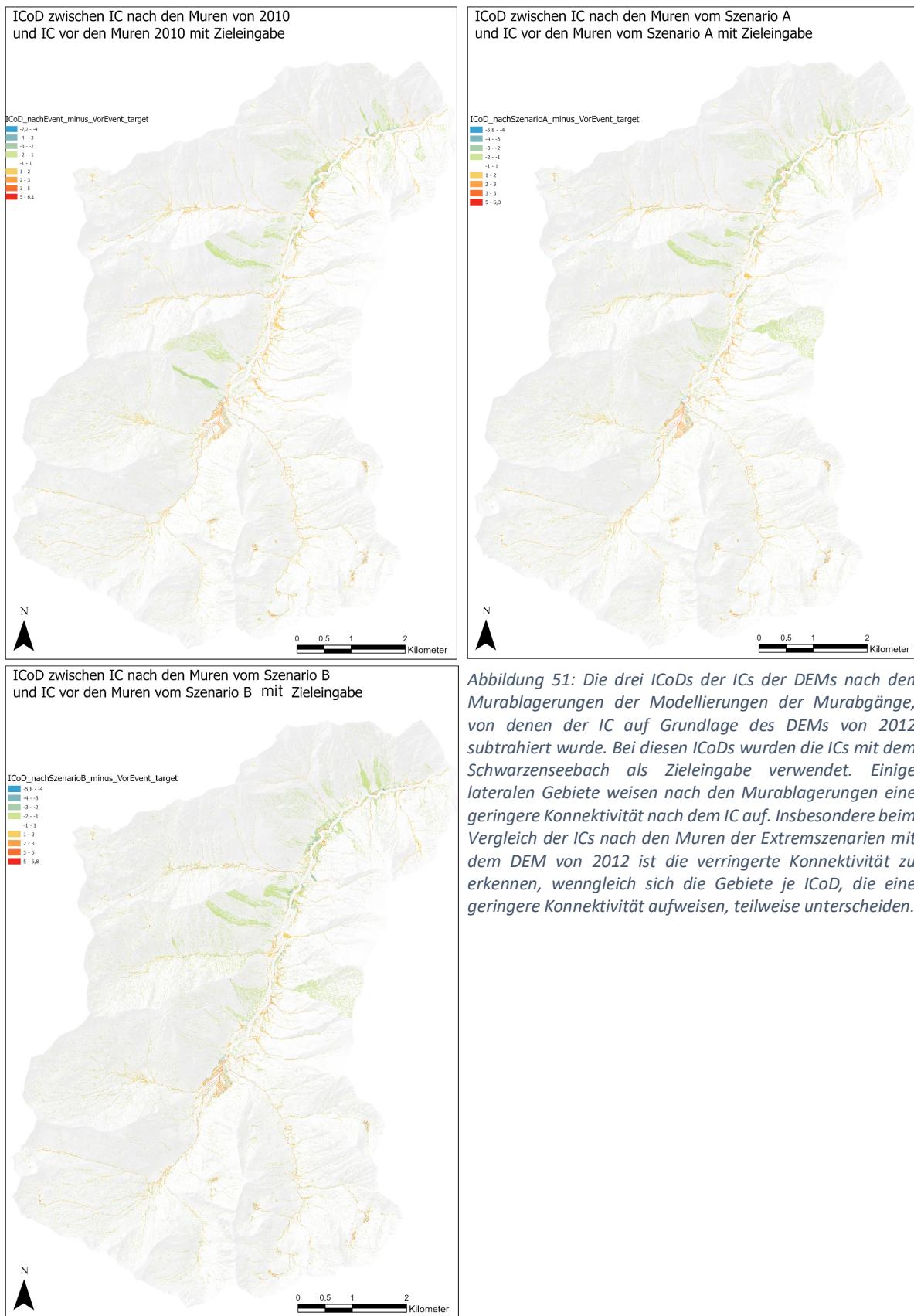


Abbildung 50: Die drei ICoDs der ICs der DEMs nach den Murablagerungen der Modellierungen der Murabgänge, von denen der IC auf Grundlage des DEMs von 2012 subtrahiert wurde. Bei diesen ICoDs wurden die ICs ohne den Schwarzenseebach als Zieleingabe verwendet. Insbesondere die drei Stauungsbereiche weisen nach den modellierten Muren eine geringere Konnektivität nach dem IC auf. Insbesondere beim Vergleich der ICs nach den Muren der Extremzenarien mit dem DEM von 2012 ist die verringerte Konnektivität zu erkennen, wenngleich diese auch bei dem Vergleich des ICs nach den modellierten Murabgängen des Extremereignisses mit dem IC von vor dem modellierten Extremereignis zu erkennen ist.



## 5.2. Ergebnisse der Modellierung mit r.avaflow

Ein Extremereignis wie das Ereignis am 17.07.2010 im Schwarzenseebachtal wurde mit r.avaflow auf einem hochauflösenden DEM von 2012 modelliert. In weiterer Folge wurden, mit den auf diese Weise kalibrierten Eingabeparametern, Extremeszenarien modelliert. Dabei wurden jeweils die stauenden Murabgänge und die anschließenden Durchbrüche voneinander getrennt mit unterschiedlichen Modellierungstypen, Rheologien und Phasendefinitionen modelliert. Für die Murabgänge wurde die in r.avaflow implementierte Voellmy-Rheologie verwendet, während für die Durchbrüche das Mehrphasenmodell verwendet wurde.

### 5.2.1. Das modellierte Extremereignis wie vom 17.07.2010

Die Parameter und die Anrissbereiche der Modellierung wurden so angepasst, bis die Ergebnisse der Modellierung so nah wie möglich an dem Extremereignis vom 17.07.2010 waren. Für die Validierung wurden die Beobachtungen von verschiedenen Quellen, wie Orthofotos oder Bestandaufnahmen, welche die Autoren PÖPPL und SASS (2020) zusammengeführt haben, verwendet. So konnten neben dem Abgleich mit den Orthofotos von 2010 und 2012, den kartierten Schadensflächen und Stauungsbereichen für die Murabgänge in Kombination mit den bekannten morphologisch-physikalischen Eigenschaften von Muren verwendet werden. Für die Durchbrüche des Schwarzenseebaches konnten ebenfalls die Stauungsbereiche sowie die Schätzung der maximalen Durchflussmenge während der Durchbrüche am Auslass des Schwarzenseebaches von 104 m<sup>3</sup>/s (PÖPPL und SASS 2020) für die Validierung verwendet werden.

#### 5.2.1.1. Die stauenden Murabgänge

Die stauenden Murabänge wurden auf die Weise wie in Kapitel 4.3.1.1 beschrieben, modelliert und kalibriert. Auf diese Weise wurden die endgültigen Parameter ermittelt, die zu den Ergebnissen führten, welche beim Abgleich mit den genannten Validierungsparametern, dem Extremereignis von 2010 am ähnlichsten waren. Diese Parameter sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Die ermittelten Eingabeparameter der Modellierung der stauenden Murabgänge.

Symbol	Parameter	Einheit	Wert
$\rho$	Materialdichte	kg/m <sup>3</sup>	1800
$\varphi$	Interner Reibungswinkel	Grad	35
$\delta$	Basaler Reibungswinkel	Grad	13
$\xi$	Turbulente Reibung	m/s <sup>2</sup>	199.53
$C_E$	Entrainment Koeffizient	Empirisch ermittelt	$10^{-6,6}$

Mit diesen Eingabeparametern wurde die Modellierung der stauenden Murabänge durchgeführt. Als ergänzender Parameter kann der Zeitparameter betrachtet werden, welcher

im Kapitel 4.3.1.1 beschrieben wurde, da mit diesem Parameter auf die unterschiedliche Prozessdauer der einzelnen Murabgänge eingegangen wurde.

Das Ergebnis der Modellierung ist in Abbildung 52 mit ausgewählten Zeitpunkten dargestellt. In Abbildung 53 ist ein beispielhafter Ausschnitt der Ablagerungen der Modellierung auf dem Orthofoto von 2010 dargestellt, auf dem vergleichend zu sehen ist, wie sich die Ablagerungen der Modellierung und die Ablagerungen und Schadensflächen des Extremereignisses von 2010 auf dem Orthofo darstellen.

Bei dem Vergleich der beiden Ausschnitte in Abbildung 53 wird deutlich, dass die modellierten Ablagerungen zum Teil die Ablagerungsgebiete von 2010 gut abdecken, die auch auf dem Orthofoto als vermurte Gebiete zu erkennen sind. In den Stauungsbereichen sind auf dem Orthofoto zwar Ablagerungen zu erkennen, die Genese ist zum Teil allerdings nicht auf Vermurungen zurückzuführen, sondern durch fluviale oder fluviatile Ablagerungen der Einstauungen. Nichtsdestotrotz sind einige Murablagerungsbereiche nicht durch die modellierten Ablagerungen wiedergegeben worden oder die Ausdehnung und Form der Ablagerungen weichen von den tatsächlichen Ablagerungen ab (Für den Vergleich zwischen Orthofoto/Schadensflächen und den modellierten Ablagerungen im gesamten UG siehe auch Kap. 9 *Vergleich Murablagerungen Modellierungen und Schadensflächen Extremereignis 2010*).

Wie in Abbildung 52 zu erkennen ist, lag die maximale Geschwindigkeit bei 20,7 m/s. Die genaue Aufschlüsselung der Geschwindigkeiten ist in Kapitel 9 in *Summary Textdatei Murabgänge (vmax)* einzusehen, wobei auffällt, dass die Geschwindigkeit meistens zwischen 15 m/s und 8 m/s lag und nur zwischen Sekunde 750 und 850 schneller wurde. Auf Grundlage des von r.avaflow erstellten Rasterdatensatz *[prefix]\_vfront*, beträgt die maximale Geschwindigkeit aller Murfronten hingegen ca. 8 m/s. Die Höhe der Ablagerungen der stauenden Murabgängen entspricht in etwa der Richthöhe, welche in Kap. 4.3.1.1 ermittelt wurde (siehe Kap. 9 *Vergleich Murablagerungen Modellierungen und Schadensflächen Extremereignis 2010* und Abbildung 52). Wie in Kapitel 5.2.1.2 erläutert, waren diese Ablagerungen nach der Integration in das DEM allerdings nicht gleichmäßig genug über der Talsohle verteilt, um zur Gänze die Stauungen erklären zu können.

Die Materialdichte  $\rho$  von 1800 kg/m<sup>3</sup> spricht für einen relativ hohen Wasseranteil der Muren (vgl. Kap. 3.1), während die basale Reibung ( $\delta$ ) als vergleichsweise niedrig beschrieben werden, kann (vgl. ABRAHAM et al. 2022; BAGGIO et al. 2021; BEGUERIA et al. 2009; HOCHSCHWARZER 2009; MERGILI et al. 2020a; MERGILI et al. 2017a; MEYRAT et al. 2023; TANG et al. 2023; WENDELER 2008; YANAGISAKI et al. 2016). Dies kann ebenfalls mit der großen Verfügbarkeit von Wasser zusammenhängen. Da die Reibungsparameter der Voellmy-Rheologie mehr als Parameter eine technische Berechnungsformel und weniger als eine physikalische Beschreibung zu definieren sind (vgl. Kap. 3.1.1), sind die Eingabeparameter aus Tabelle 6 als die durchschnittlichen „best-fit“ Parameter aller Murabgänge zu betrachten, welche die physikalischen Eigenschaften der Prozesse allerdings nur bedingt wiedergeben können.

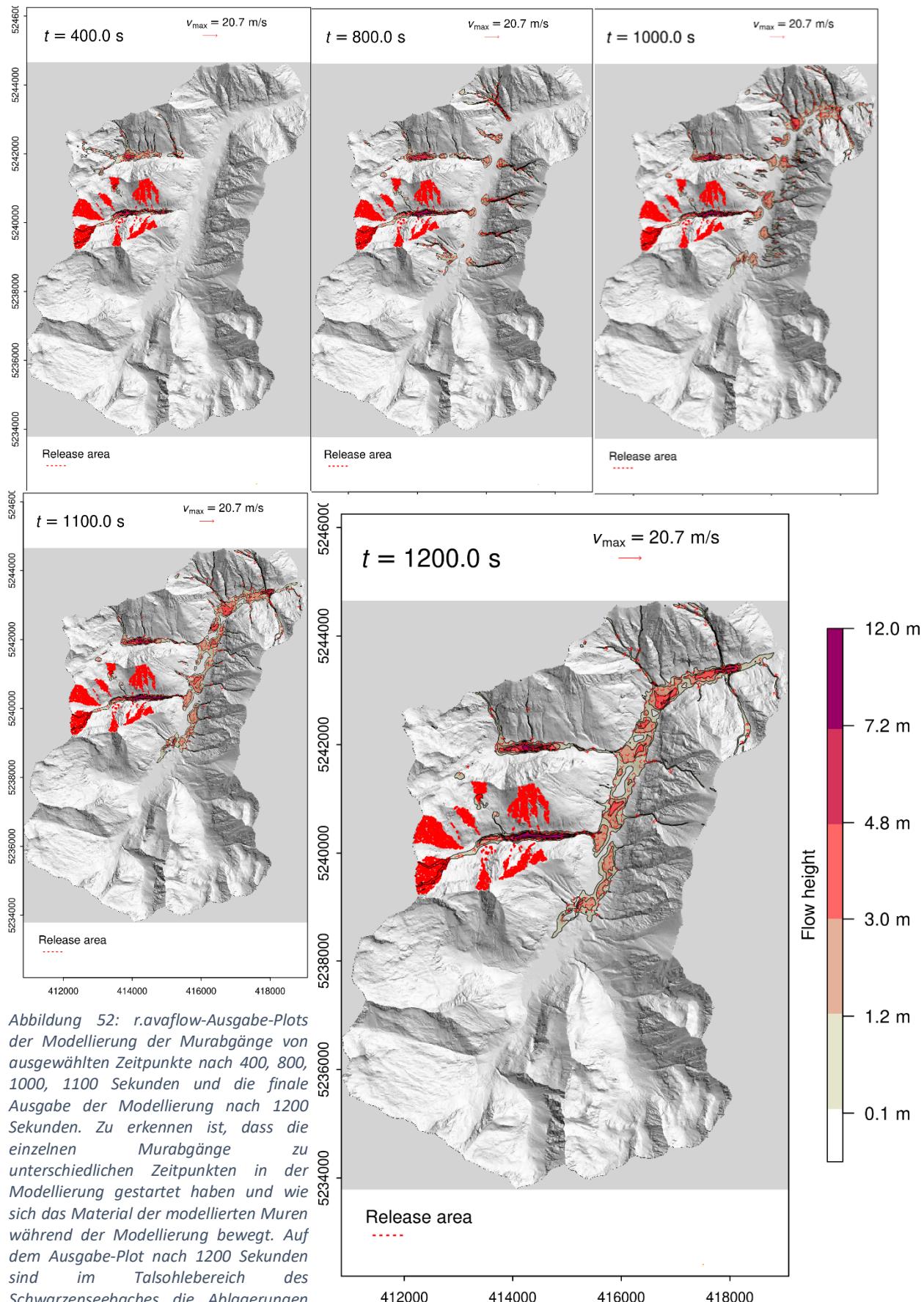
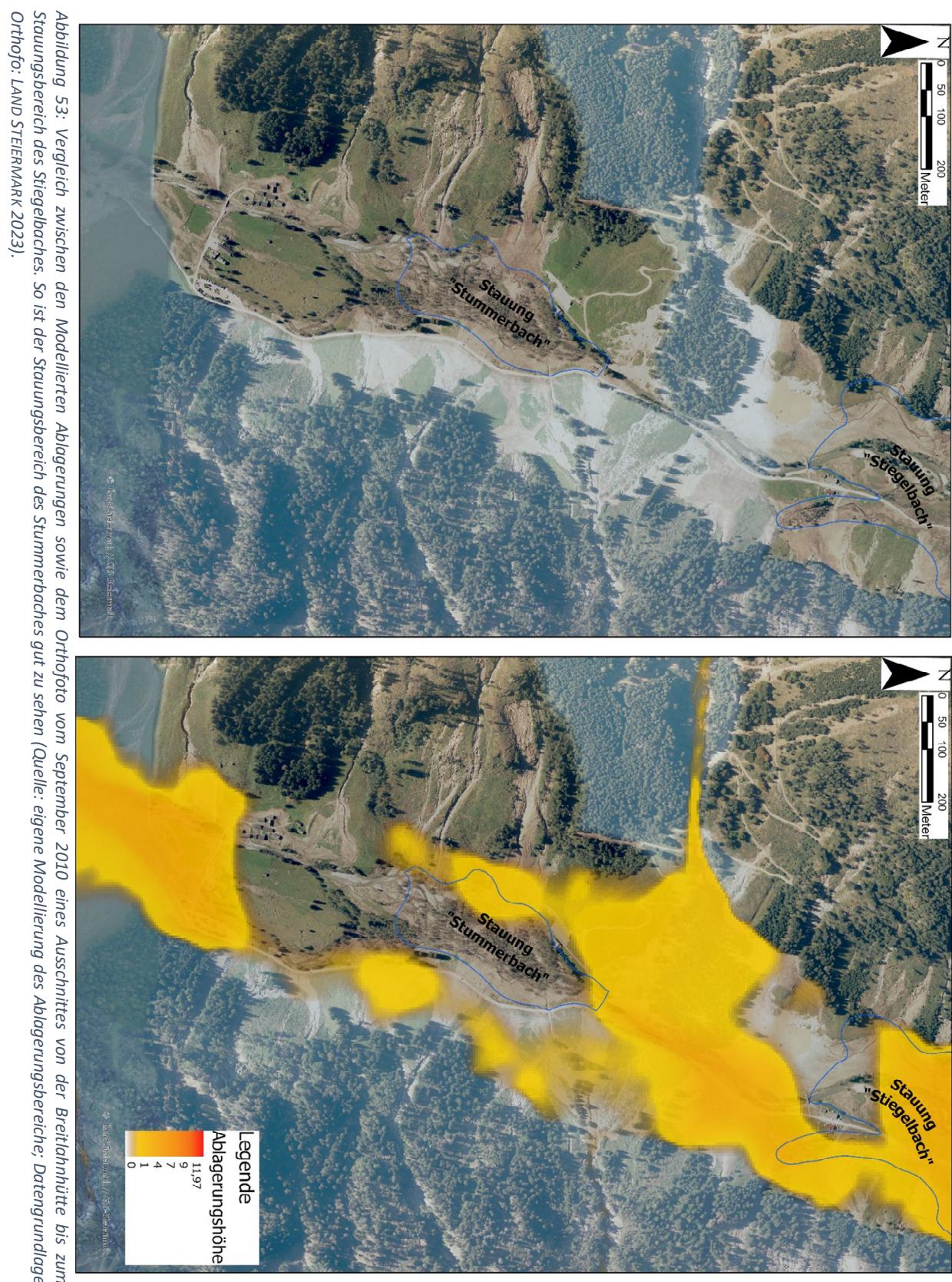


Abbildung 52: r.avaflow-Ausgabe-Plots der Modellierung der Murabgänge von ausgewählten Zeitpunkten nach 400, 800, 1000, 1100 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 1200 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die einzelnen Murabgänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Modellierung gestartet haben und wie sich das Material der modellierten Muren während der Modellierung bewegt. Auf dem Ausgabe-Plot nach 1200 Sekunden sind im Talsohlbereich des Schwarzenseebaches die Ablagerungen der Muren zu erkennen.



### 5.2.1.2. Die Durchbrüche nach den Aufstauungen

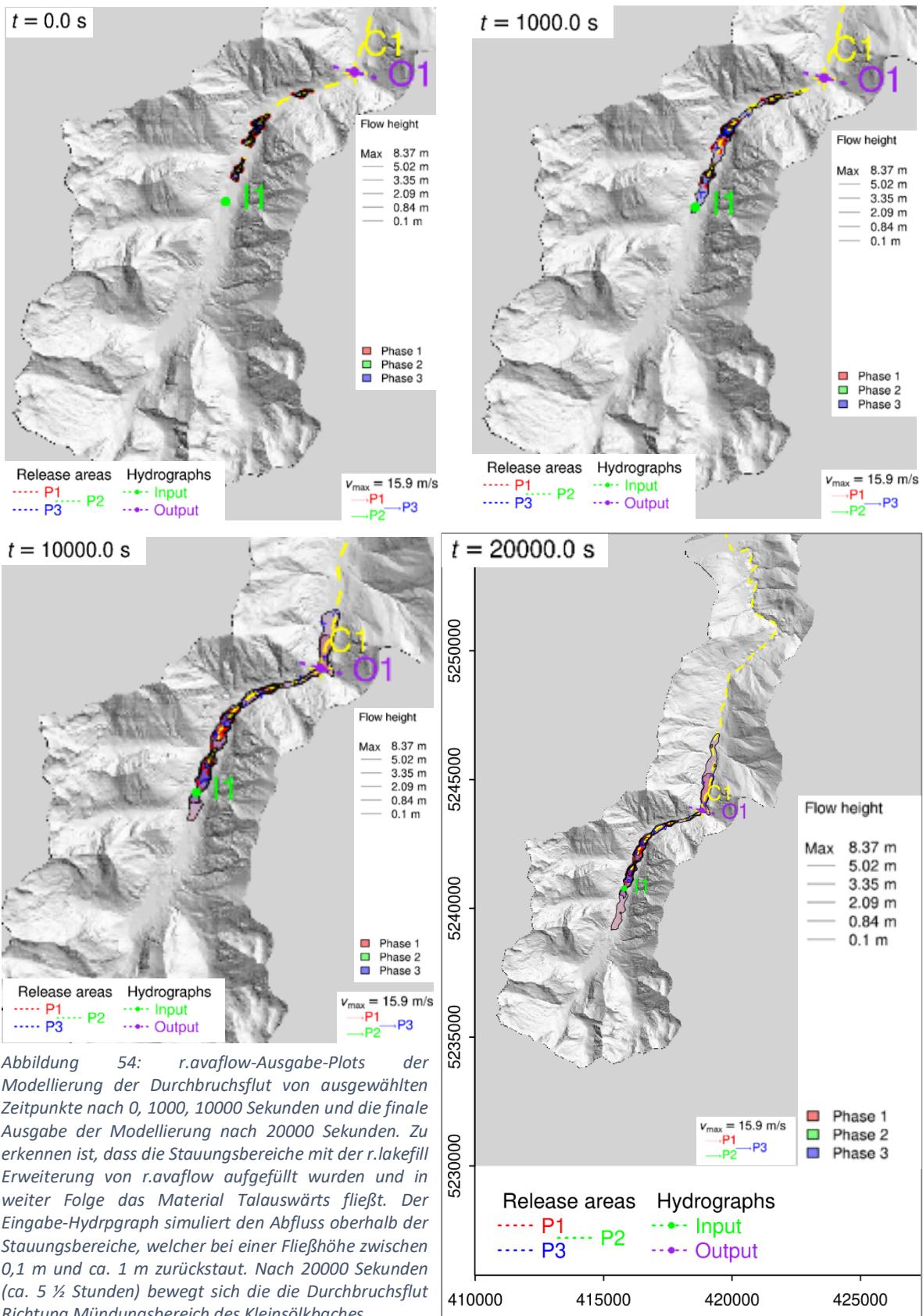
Die Durchbrüche der Stauungen mit anschließender Durchbruchsflut, wurde wie in Kapitel 4.3.1.2 beschrieben modelliert. Da hierfür ein Mehrphasenmodell verwendet wurde, wurden die Eingabeparameter sowohl für die feste als auch für die flüssige Phase kalibriert und bestimmt. Diese Eingabeparameter beschreiben die Eigenschaften des sich bewegenden Materials und sind in Tabelle 7 zusammengefasst. In der Abbildung 54 sind Plot-Ausgaben von r.avaflow zu ausgewählten Zeitpunkten zu sehen.

Tabelle 7: Die ermittelten Eingabeparameter der Modellierung der Durchbrüche nach den Aufstauungen.  $s$ =solid (fest)  $f$ =fluid (flüssig).

Symbol	Parameter	Einheit	Wert
$\rho_s$	Materialdichte fest	kg/m <sup>3</sup>	2600
$\rho_f$	Materialdichte flüssig	kg/m <sup>3</sup>	1000
$\varphi_s$	Interner Reibungswinkel fest	Grad	35
$\varphi_f$	Interner Reibungswinkel flüssig	Grad	0
$\delta_s$	Basaler Reibungswinkel fest	Grad	13
$\delta_f$	Basaler Reibungswinkel flüssig	Grad	0
$\nu$	Kinematische Viskosität flüssig	m <sup>2</sup> /s	10 <sup>-3,0</sup>
$C_{FF}$	Flüssiger Reibungsnummer	(Ähnlich zu Manning's $n$ )	0,05
$C_E$	Entrainment Koeffizient	Empirisch ermittelt	10 <sup>-6,3</sup>

Das Füllen der Stauungsbereiche mit der r.lakefill Erweiterung von r.avaflow ist in seiner Ausdehnung ähnlich zu den kartierten Aufstaubereichen (vgl. Abbildung 11 und Abbildung 54 zum Zeitpunkt 0,0 s). Bei dem Eingabe-Hydrographen entsteht mit der Dauer der Modellierung ein flacher Rückstau von 0,1 m bis zu ca. 1 m, welcher z.T. auch mit den Bildern der Abbildung 40 verglichen und erklärt werden kann, da der Abfluss im Bereich der Breitlahnhütte während des Extremereignisses einen Großteil der Talsohle überspülte. Eventuell würde die Setzung des Eingabe-Hydrograph mit einer größeren Entfernung zur letzten Stauung am Stummerbach im Hinblick auf den Abfluss realistischer sein. Die Setzung des Entrainment Koeffizienten auf 10<sup>-6,3</sup> ist ein höherer Wert als bei der Modellierung der Murabgänge. Für Dammbrüche ist dieser Wert und der basale Reibungswinkel die beiden entscheidenden Parameter, damit simuliert werden kann, dass das Dammmaterial bricht (MERGILI et al. 2017b). Bei diesen beiden Werten aus Tabelle 7 haben die Durchbrüche der Murdämme realistisch funktioniert. Dies wird auch durch die Erkenntnisse in MERGILI et al. (2017b) bestätigt.

In Abbildung 55 ist links ein vertikales Höhenprofil nach 20000 Sekunden zu sehen, welches die Fließgeschwindigkeit entlang des Querschnittes anzeigt. Dabei ist zu sehen, dass nach ca. 2500 m eine etwas höhere Geschwindigkeit vorhanden war, als auf der restlichen Strecke und dass die Geschwindigkeit grundsätzlich nach den 20000 Sekunden bei niedrigen ~1 bis ~5 m/s lag. Die Maximalgeschwindigkeit der Modellierung lag bei 15,9 m/s (für eine genaue Betrachtung je Zeitabschnitt siehe Kap. 9 *Summary Textdatei Durchbrüche der Stauungen Extremereignis 2010*). Auf der rechten Seite der Abbildung 55 ist der Ausgabe Hydrograph



zu sehen, welcher für beide Phasen zusammen bei etwas über  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  lag. Dies liegt sehr nah an den geschätzten  $104 \text{ m}^3/\text{s}$  aus Kapitel 2.5 (siehe auch PÖPPL und SASS 2020). Allerdings erscheint der Anteil der festen Phase mit ca.  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  etwas überschätzt zu werden, da die flüssige Phase mit ca.  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  einen geringeren Anteil ausmacht. Jedoch ist im

zeitlichen Verlauf eine Tendenz zu erkennen, dass die feste Phase an Fließhöhe verliert, während die flüssige Phase eine konstante Fließhöhe aufweist. Nichtsdestotrotz erscheint die Fließbewegung in den r.avaflow-Ausgabe-Plots realistisch. Eventuell sollten dennoch die Einstellungen der Aufnahme und Mitnahme (Entrainment) nachgebessert werden. Bei dieser Modellierung wurde der dimensionslose Parameter rhentrmax1 auf 0,5 gesetzt. Dieser Parameter bestimmt die Zusammensetzung der Phasen des aufgenommenen Materials. Dieser Parameter in Kombination mit dem Entrainment Koeffizienten und der Maximaltiefe des potenziell aufnehmbaren Materials, könnten überprüft werden, um das Phasenverhältnis realistischer zu gestalten.

Die restlichen Eingabeparameter, um die physikalischen Eigenschaften zu beschreiben, wurden überwiegend aus der Literatur übernommen. Insbesondere die Materialdicht und der interne Reibungswinkel der jeweiligen Phase sowie der basale Reibungswinkel der flüssigen Phase und die flüssige Reibungsnummer sind in der Literatur definiert (MERGILI et al. 2020b; MERGILI et al. 2017a; MERGILI et al. 2017b). Somit sind insbesondere der basale Reibungswinkel der festen Phase sowie die kinematische Viskosität der flüssigen Phase durch Plausibilitätsprüfung der Modellierungsergebnisse angepasst worden. Die Phasenzusammensetzung am Beginn der Modellierung hat auf den Modellierungsverlaufen einen bedeutenden Einfluss, welche bei dieser Modellierung, auf Grundlage des Plausibilitätsprinzips und dem „best-fit“-Ansatz, auf 90% flüssige Phase und 10% feste Phase in den Stauungsbereichen festgelegt wurde.

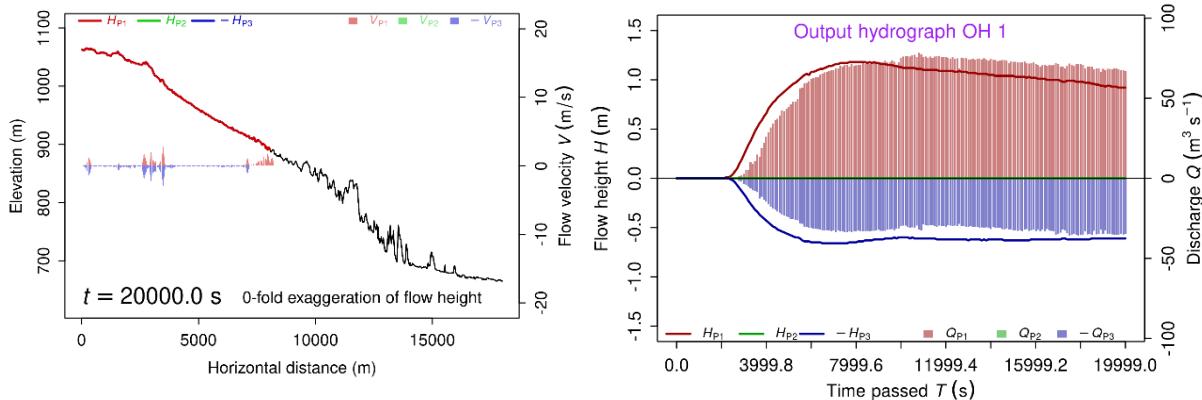


Abbildung 55: Links ist ein vertikales Höhenprofil nach 20000 Sekunden zu sehen, welches die Fließgeschwindigkeit je Profilabschnitt anzeigt. Das Höhenprofil entspricht der gelben Linie in Abbildung 54. Rechts ist der Ausgabe-Hydrograph zu erkennen, welcher sowohl für die flüssige als auch für die feste Phase die Fließhöhe (in m) und den Abfluss (in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) am Auslass des Schwarzenbachtales anzeigt.

### 5.2.2. Die Modellierung der Extremzenarien

Die Modellierung der in Kapitel 4.3.2.1 beschriebenen Extremzenarien, wurden auf die gleiche Weise wie das Extremereignis wie von 2010 modelliert, nur dass die veränderten Ausgangsbedingungen der Szenarien dabei berücksichtigt wurden, wie in Kapitel 4.3.2.2 und 4.3.2.3 beschrieben wurde. Um die Ergebnisse vergleichbar zu machen, werden im folgenden Kapitel die Ausgabe-Plots von den stauenden Murabgängen und den Durchbrüchen

vorgestellt. Des Weiteren werden die Ablagerungen der Murabgänge der Extremeszenarien mit den Murablagerungen der Modellierung des Extremereignisses verglichen, während bei den Durchbrüchen die Ausgabe-Hydrographen verglichen werden.

### 5.2.2.1. Extremeszenario A

Für das Ergebnis der stauenden Murabgänge des Extremeszenarios A wird der Vergleich zu den modellierten Murabgänge des Extremereignisses wie 2010 gezogen, um die Veränderungen zwischen dem modellierten Extremereignis wie vom 17.07.2010 und dem möglichen Szenario deutlich zu machen. In Abbildung 57 ist deutlich zu erkennen, dass die modellierten Murabgänge grundsätzlich mit den Muren wie 2010 vergleichbar sind, aber die Ablagerungsflächen größer und die Mächtigkeiten teilweise deutlich höher sind. Dies bestätigt dann auch der direkte Vergleich der beiden modellierten Murablagerungen in Abbildung 56. Die Abbildung 56 zeigt den direkten Vergleich der modellierten Murablagerungen zwischen dem Extremereignis wie von 2010 und dem Extremeszenario A. Hier wird deutlich welche Flächen durch die Murablagerungen im Extremeszenario A zusätzlich vermutet werden, während dies bei der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010 noch nicht der Fall war. So wird beispielsweise die Breitlahnhütte im Extremeszenario deutlich stärker vermutet als bei der Modellierung des Extremereignisses (siehe Abbildung 56). Die Geschwindigkeitsverteilung ist zwischen den beiden Modellierungen ähnlich (siehe Kap. 9 *Summary Textdatei Murabgänge Extremeszenario A [vmax]*), wobei die Geschwindigkeit beim Extremeszenario über die gesamte Modellierung etwas schneller ist und die Maximalgeschwindigkeit mit 24,8 m/s auch relativ hoch ist. Ähnlich wie beim modellierten Extremereignis wie von 2010, erreicht die Geschwindigkeit zwischen den Sekunden 750 und 850 ihren Maximalwert, bleibt hingegen in weiterer Folge bis Sekunde 1000 mit ungefähr 18-20 m/s einen längeren Zeitraum auf hohem Niveau. In den restlichen Modellierungszeiträumen schwankt die Maximalgeschwindigkeit meistens zwischen 9 und 16 m/s. Bei den Murabgängen des Extremeszenarios wurden am Ende der Modellierung inklusive des erodierten und aufgenommenen Materials ca. 57,9% mehr Material bewegt, als bei der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010, während am Beginn der Modellierung der Unterschied bei 33% lag (vgl. Kap. 9 *Summary Textdatei Murabgänge Extremereignis 2010* sowie *Extremeszenario A*). Der größer werdende Unterschied der Volumina ist durch die höhere erosive Kraft erklärbar, die sich erhöht, je mehr Material bewegt wird, da sich dabei die kinetische Energie erhöht (siehe Kap. 3.1).

Durch die höheren Ablagerungsmächtigkeiten in den Staubereichen von 1 bis 3 m, kann davon ausgegangen werden, dass die eingestauten Volumina bei diesem Szenario größer als bei dem modellierten Extremereignis sind. Dies ist in Abbildung 58 bildlich zwar kaum feststellbar, bei den modellierten Volumina (siehe Kap. 9 *Summary Textdatei Durchbrüche der Stauungen Extremeszenario A [Volume 3]* und *Summary Textdatei Durchbrüche der Stauungen Extremereignis 2010 [Volume 3]*) ist allerdings ein deutlicher Unterschied erkennbar, da das Startvolumen der flüssigen Phase beim Extremereignis ca. 439.239 m<sup>3</sup> und beim Extremeszenario A ca. 719.401 m<sup>3</sup> betrug. Wenn zu den jeweiligen Volumina die 10%

der festen Phase addiert werden, sind die Gesamtvolumina ca. 483.163 m<sup>3</sup> beim modellierten Extremereignis und ca. 791.341 m<sup>3</sup> beim Extremszenario A. Dies entspricht einem Mehranteil an eingestaumtem Material von ca. 61%, welches offensichtlich vor allem mit einer höheren Mächtigkeit des eingestauten Materials begründet werden kann.

Die Art und Weise der Bewegung ist im Vergleich zum modellierten Extremereignis wie von 2010 ähnlich. Auch das Verhältnis der festen und flüssigen Phasen des Ausgabe-Hydrographen (siehe Abbildung 59) ist ähnlich, wobei der Austrag aus dem UG insgesamt auf einem höheren Niveau liegt. So ist der Gesamtaustrag der festen und flüssigen Phase zusammen bei ca. 140-150 m<sup>3</sup>/s. Die flüssige Phase weist dabei einen Austrag von ca. 50-60 m<sup>3</sup>/s und die feste Phase von 90-100 m<sup>3</sup>/s auf. Der zeitliche Verlauf des Austrags und der Fließhöhe sind auch ähnlich wie der zeitliche Verlauf der Ergebnisse des modellierten Extremereignisses wie von 2010, nur auf einem höheren Niveau. Die letzten 5000 Sekunden beschleunigt sich die Frontgeschwindigkeit im Gegensatz zu den Ergebnissen des modellierten Extremereignisses wie von 2010 allerdings und fließt das enger werdende Kleinsölkatal Richtung Enns (vergleiche hierfür Abbildung 54 und Abbildung 58 zum Zeitpunkt t = 20000s). Dies ist auch beim Vergleich der vertikalen Höhenprofile in Abbildung 55 und Abbildung 59 zu erkennen, da die Geschwindigkeit nach 20000 Sekunden in Abbildung 59 im vorderen Bereich der Durchbruchsflut mit ca. 13-18 m/s deutlich höher liegt. Auch hier ist zu erkennen, dass das Material der Durchbruchsflut des Extremszenarios A in den 20000 Sekunden eine längere Strecke zurückgelegt hat, als bei der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010. Eventuell ist dies ein Hinweise, auf den weiteren Verlauf der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010 bei einer längeren Modellierungsdauer.

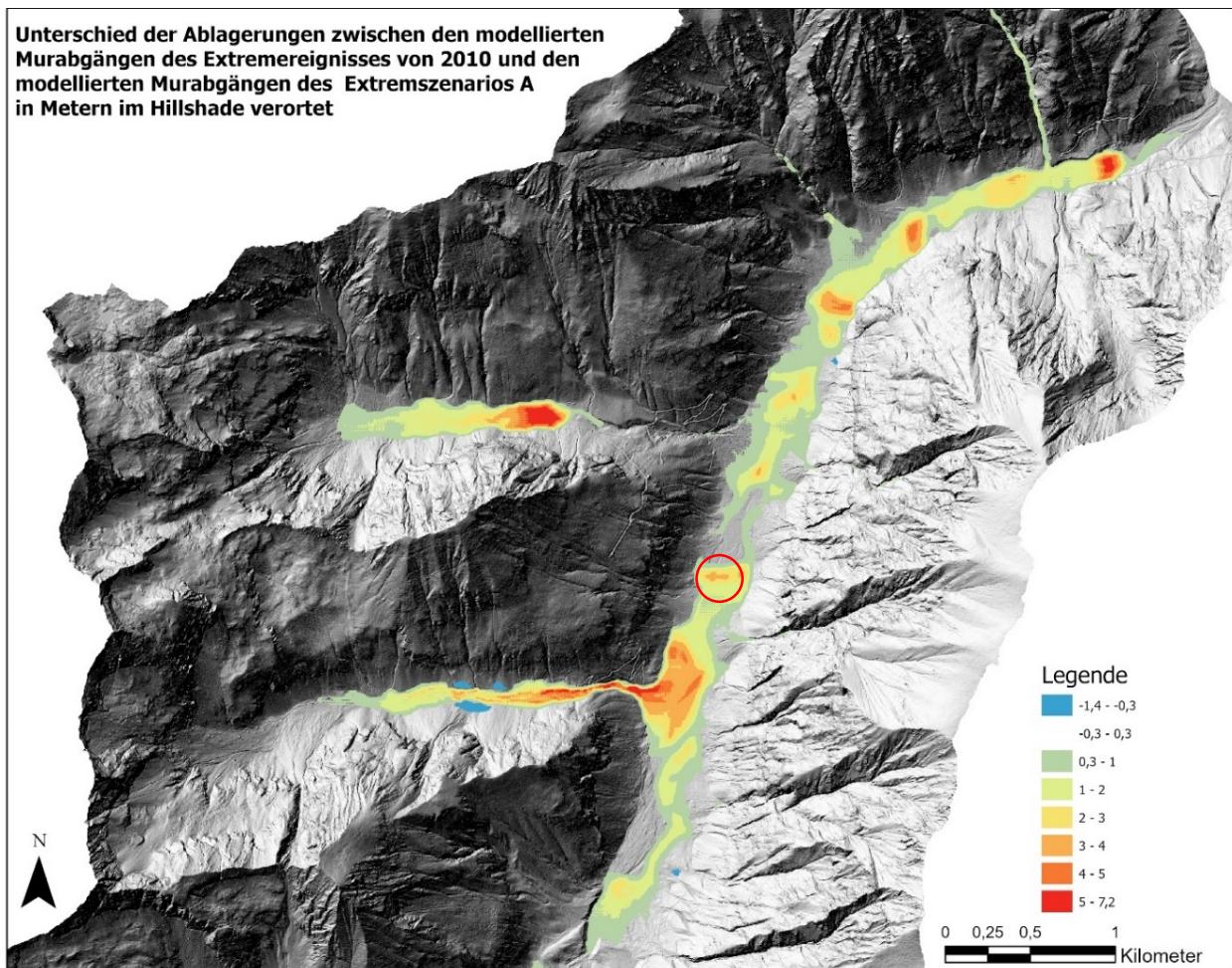


Abbildung 56: Die Unterschiede der modellierten Ablagerungen zwischen dem modellierten Extremereignis 2010 und dem Extremeszenario A angegeben in Metern. Die modellierten Ablagerungen des Extremereignisses wie von 2010 wurde von den modellierten Ablagerungen des Extremeszenarios A subtrahiert, um insbesondere die Mehrablagerungen des Extremeszenarios A deutlich zu machen (grün, gelb und rot). Dabei wurden alle Unterschiede die größer 0,3 oder kleiner -0,3 Metern waren angezeigt. Der rote Kreis zeigt den Bereich der Breitlahnhütte an.

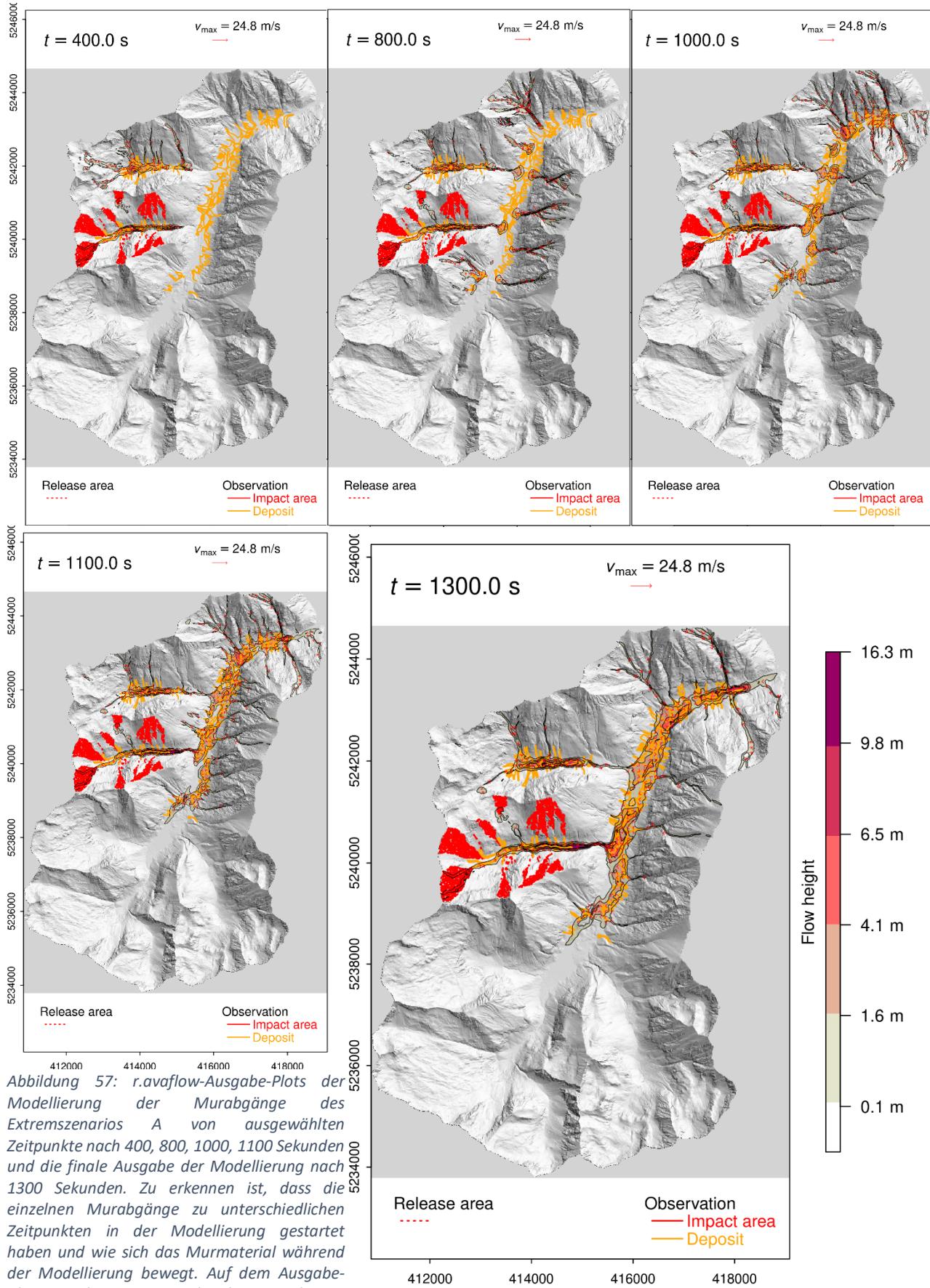


Abbildung 57: r.avaflow-Ausgabe-Plots der Modellierung der Murabgänge des Extremeszenarios A von ausgewählten Zeitpunkten nach 400, 800, 1000, 1100 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 1300 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die einzelnen Murabgänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Modellierung gestartet haben und wie sich das Murnmaterial während der Modellierung bewegt. Auf dem Ausgabe-Plot nach 1300 Sekunden sind im Talsohlebereich des Schwarzenseebaches die Ablagerungen der Muren zu erkennen. (Warum die Schadensflächen des Extremereignisses von 2010 bei dieser Abbildung integriert wurde, konnte nicht geklärt werden).

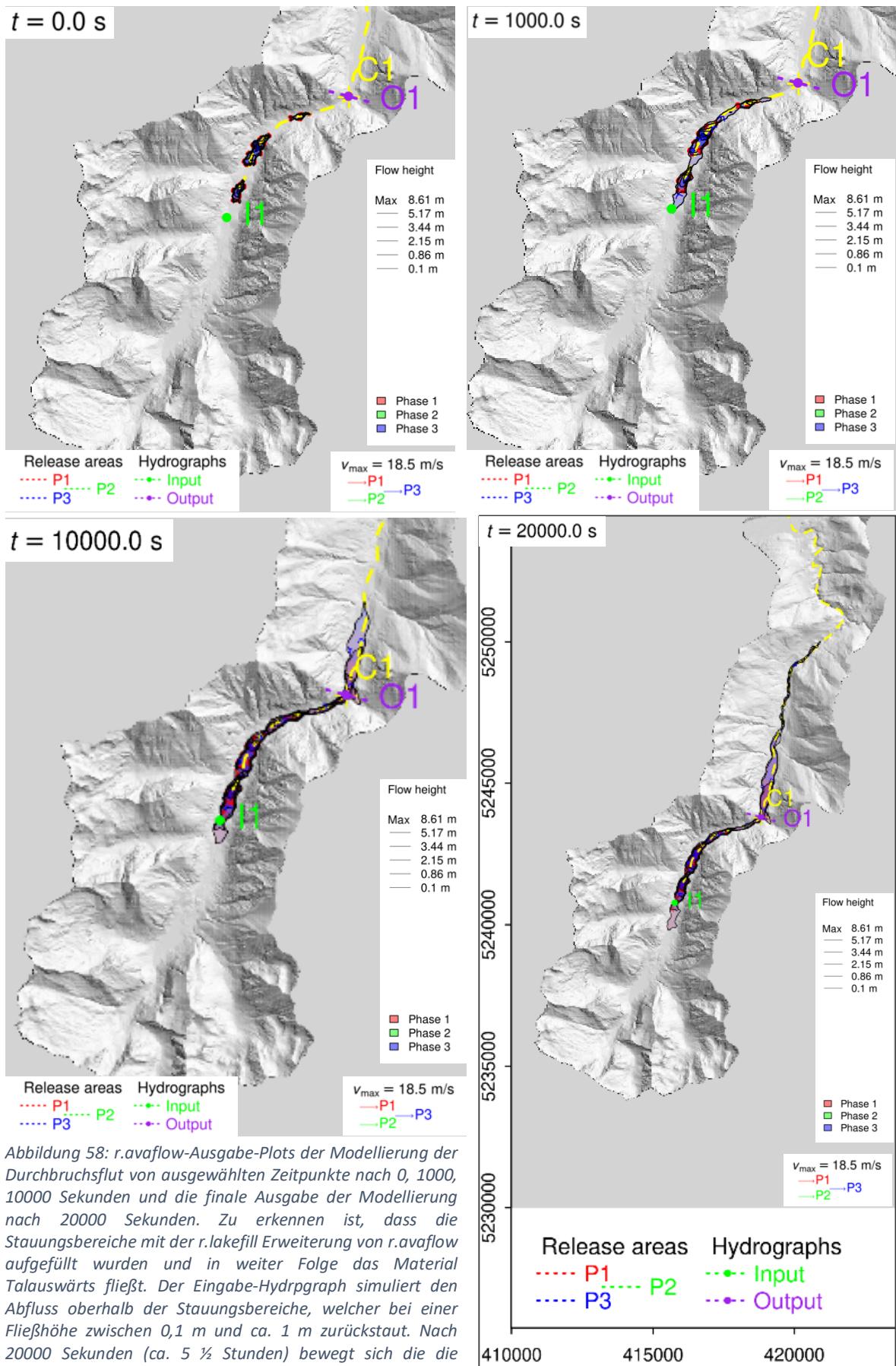


Abbildung 58: r.avaflood-Ausgabe-Plots der Modellierung der Durchbruchsflut von ausgewählten Zeitpunkten nach 0, 1000, 10000 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 20000 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die Stauungsbereiche mit der r.lakefill Erweiterung von r.avaflood aufgefüllt wurden und in weiter Folge das Material talauwärts fließt. Der Eingabe-Hydrgraph simuliert den Abfluss oberhalb der Stauungsbereiche, welcher bei einer Fließhöhe zwischen 0,1 m und ca. 1 m zurückstaut. Nach 20000 Sekunden (ca. 5 ½ Stunden) bewegt sich die die Durchbruchsflut Richtung Mündungsbereich des Kleinsölkbaches, wobei die Front der Flut eine längere Strecke zurückgelegt hat als bei der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010.

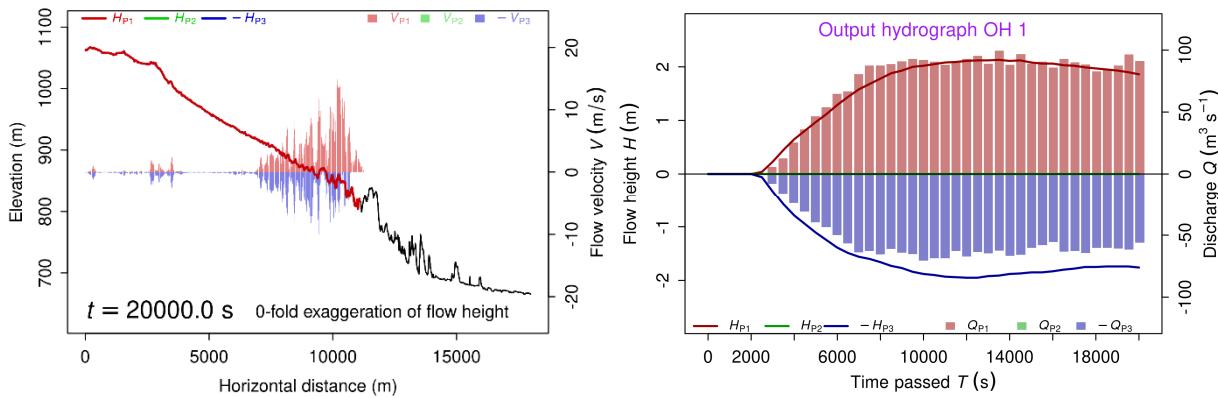


Abbildung 59: Links ist ein vertikales Höhenprofil nach 20000 Sekunden zu sehen, welches die Fließgeschwindigkeit je Profilabschnitt anzeigt. Das Höhenprofil entspricht der gelben Linie in Abbildung 58. Rechts ist der Ausgabe-Hydrograph zu erkennen, welcher sowohl für die flüssige als auch für die feste Phase die Fließhöhe (in m) und den Abfluss (in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) am Auslass des Schwarzenseebachtals anzeigt.

### 5.2.2.2. Extremszenario B

Für das Ergebnis der stauenden Murabgänge des Extremszenarios B wird der Vergleich zu den modellierten Murabgänge des Extremereignisses wie von 2010 gezogen, um die Veränderungen zwischen dem modellierten Extremereignis wie vom 17.07.2010 und dem möglichen Extremszenario B deutlich zu machen. Dabei gibt es Überschneidungen der Ergebnisse mit den beschriebenen Ergebnissen des Extremszenarios A. In Abbildung 61 ist deutlich zu erkennen, dass die modellierten Muren grundsätzlich mit den modellierten Muren wie von 2010 vergleichbar sind, aber die Ablagerungsflächen größer und die Mächtigkeiten teilweise deutlich höher sind, wie auch Abbildung 60 deutlich macht. Das Extremszenario B weist dabei im Vergleich mit dem Extremzenario A höhere Mächtigkeiten entlang des Stummerbaches und entlang der Talsohle des Schwarzenseebachtals bei den Stauungsbereichen auf. Dabei ist deutlich, dass insbesondere die longitudinale Ausdehnung der Murkegel im Schwarzenseebachtal der modellierten stauenden Muren breiter sind. Die Geschwindigkeitsverteilung ist zwischen den Modellierungen des Extremereignisses wie von 2010 und dem Extremzenario B ähnlich (siehe Kap. 9 *Summary Textdatei Murabgänge Extremszenario B [vmax]*), wobei die Geschwindigkeit beim Extremzenario über die gesamte Modellierung etwas schneller ist und die Maximalgeschwindigkeit mit 24,6 m/s auch relativ hoch ist – allerdings ist die Geschwindigkeit nicht höher als beim Extremzenario A. Ähnlich wie beim modellierten Extremereignis wie von 2010 erreicht die Geschwindigkeit zwischen den Sekunden 750 und 850 ihren Maximalwert. In den restlichen Modellierungszeiträumen schwankt die Maximalgeschwindigkeit meistens zwischen 9 und 16 m/s. Bei den Murabgängen des Extremszenarios B wurden am Ende der Modellierung inklusive des erodierten und aufgenommenen Materials ca. 84,6% mehr Material bewegt, als bei der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010, während am Beginn der Modellierung der Unterschied bei 53,8% lag (vgl. Kap. 9 *Summary Textdatei Murabgänge Extremereignis 2010* sowie *Extremszenario B*). Der größer werdende Unterschied des Volumens, ist durch die höhere

erosive Kraft erklärbar, die sich erhöht, je mehr Material bewegt wird, da sich dabei die kinetische Energie erhöht (siehe Kap. 3.1).

Durch die höheren Ablagerungsmächtigkeiten bei den Murdämmen, kann davon ausgegangen werden, dass die eingestaute Volumina bei diesem Extremenszenario größer als bei dem modellierten Extremereignis wie von 2010 und dem Extremenszenario A sind. Allerdings wurde beim Extremenszenario B auch mehr Murmaterial als beim modellierten Extremereignis und Extremenszenario A in den Stauungsbereichen abgelagert, was die Volumina der Einstauungen wieder mindert. Bildlich ist in Abbildung 62 kaum ein Unterschied zu den Einstaubereichen des modellierten Extremereignisses wie von 2010 feststellbar (im Vergleich zu Abbildung 54). Bei den modellierten Volumina (siehe Kap. 9 *Summary Textdatei Durchbrüche der Stauungen Extremenszenario B [Volume 3]*, *Summary Textdatei Durchbrüche der Stauungen Extremenszenario A [Volume 3]* und *Summary Textdatei Durchbrüche der Stauungen Extremereignis 2010 [Volume 3]*) sind allerdings zum Teil deutliche Unterschiede feststellbar. So waren die Startvolumina der flüssigen Phase bei der Modellierung des Extremereignisses ca. 439.239 m<sup>3</sup> und beim Extremenszenario A ca. 719.401 m<sup>3</sup>, während dies beim Extremenszenario B 771.878 m<sup>3</sup> betrug. Der Unterschied zwischen dem Extremenszenario A und Extremenszenario B ist damit verhältnismäßig klein, obwohl der Unterschied der Stauhöhe 1 m betrug. Wenn zu den jeweiligen Volumina die 10% der festen Phase addiert werden, sind die Gesamtvolumina der Einstauungen ca. 483.163 m<sup>3</sup> beim modellierten Extremereignis wie von 2010 und ca. 791.341 m<sup>3</sup> beim Extremenszenario A, während beim Extremenszenario B dann ca. 849.066 m<sup>3</sup> eingestaут wurden. Dies entspricht einem Mehranteil an eingestaute Material beim Extremenszenario B im Vergleich zum modellierten Extremereignis von ca. 76% und im Vergleich zum Extremenszenario A von ca. 7 %. Dass der Unterschied zwischen dem modellierten Extremereignis und dem Extremenszenario B so groß ist, lässt sich vor allem mit einer höheren Mächtigkeit des eingestaute Materials erklären, während der geringere Unterschied zwischen Extremenszenario A und B mit der höheren Mächtigkeit des Murmaterials in den Stauungsbereichen erklärt werden kann.

Die Art und Weise der Bewegung ist im Vergleich zum modellierten Extremereignis und zum Extremenszenario A ähnlich. Allerdings ist das Verhältnis beim Extremenszenario B zwischen der festen und flüssigen Phase ausgeglichener (siehe Abbildung 63) und der Austrag aus dem UG während der Durchbruchsflut insgesamt höher. So liegt der Gesamtaustrag der festen und flüssigen Phase zusammen bei ca. 170-180 m<sup>3</sup>/s. Die flüssige Phase weist dabei einen Austrag von ca. 70-80 m<sup>3</sup>/s und die feste Phase von 90-110 m<sup>3</sup>/s auf. Der zeitliche Verlauf des Austrags und der Fließhöhe sind auch ähnlich wie der zeitliche Verlauf der Ergebnisse des modellierten Extremereignisses und dem Extremenszenario A, nur auf einem höheren Niveau. Die letzten 5000 Sekunden beschleunigt sich die Frontgeschwindigkeit im Gegensatz zu den Ergebnissen des modellierten Extremereignisses wie von 2010 allerdings und fließt das enger werdende Kleinsölkatal Richtung Enns (vergleiche hierfür Abbildung 54, Abbildung 58 und Abbildung 62 zum Zeitpunkt t = 20000s). Dies ist auch beim Vergleich der vertikalen Höhenprofile in Abbildung 55 und

Abbildung 63 zu erkennen, da die Geschwindigkeit nach 20000 Sekunden in Abbildung 63 im vorderen Bereich der Durchbruchsflut mit ca. 13-18 m/s deutlich höher liegt. Auch hier zeigt sich, dass das Material der Durchbruchsflut des Extremeszenarios B in den 20000 Sekunden eine längere Strecke zurückgelegt hat als bei der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010. Eventuell ist dies ein Hinweise, auf den weiteren Verlauf der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010 bei einer längeren Modellierungsdauer.

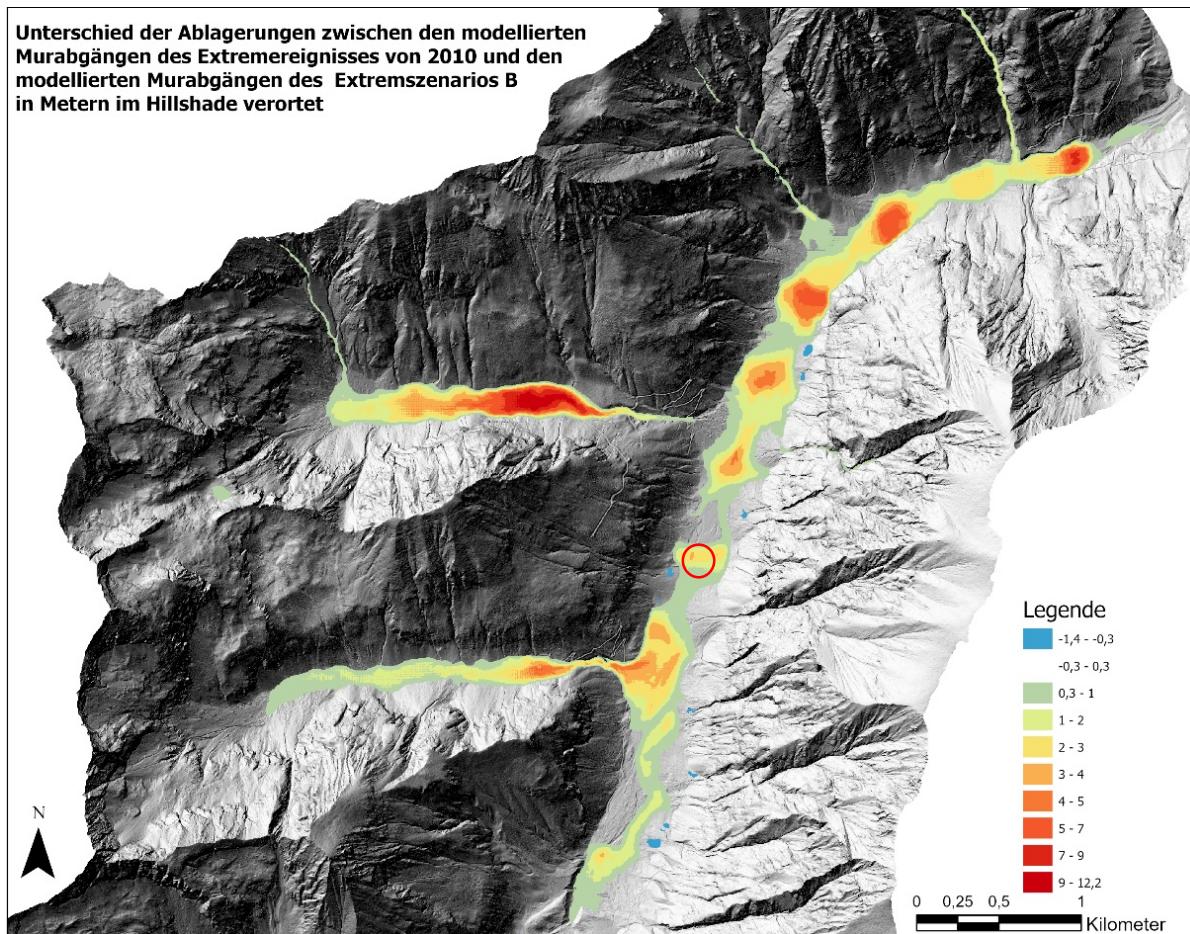


Abbildung 60: Die Unterschiede der modellierten Ablagerungen zwischen dem modellierten Extremereignis 2010 und dem Extremeszenario B angegeben in Metern. Die modellierten Ablagerungen des Extremereignisses wie von 2010 wurde von den modellierten Ablagerungen des Extremeszenarios B subtrahiert, um insbesondere die Mehrablagerungen des Extremeszenarios B deutlich zu machen (grün, gelb und rot). Dabei wurden alle Unterschiede die größer 0,3 oder kleiner -0,3 m sind angezeigt. Der rote Kreis zeigt den Bereich der Breitlahnhütte an. Am meisten fällt beim Vergleich mit der Abbildung 56 die größeren Mächtigkeiten und eine größere Fläche von longitudinalen Murablagerungen der stauenden Murabände und im Stummerbachtal (ECA-Nr.: 11) auf.

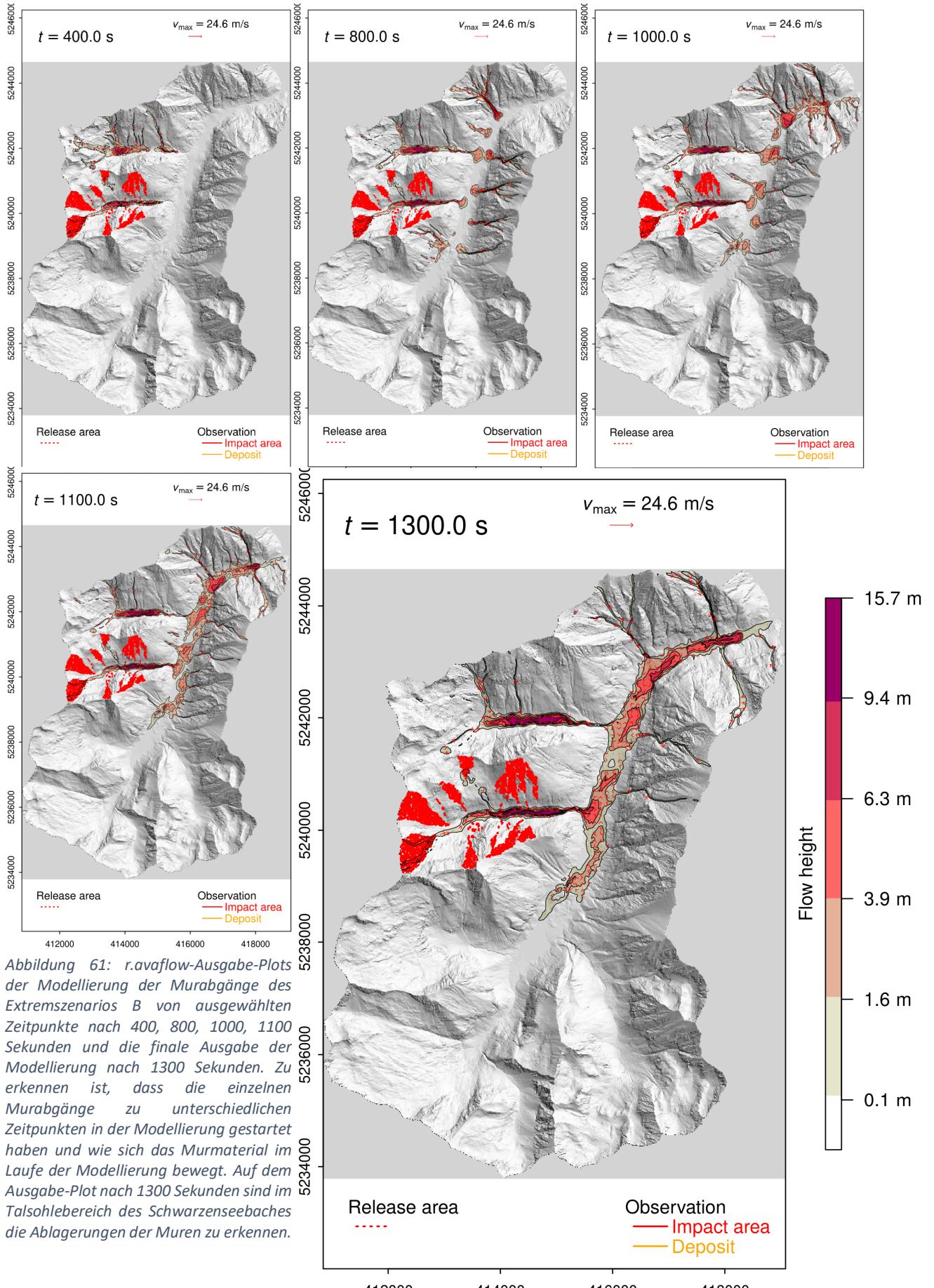


Abbildung 61: r.avaflow-Ausgabe-Plots der Modellierung der Murabgänge des Extremeszenarios B von ausgewählten Zeitpunkten nach 400, 800, 1000, 1100 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 1300 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die einzelnen Murabgänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Modellierung gestartet haben und wie sich das Murnmaterial im Laufe der Modellierung bewegt. Auf dem Ausgabe-Plot nach 1300 Sekunden sind im Talsohlebereich des Schwarzenbachs die Ablagerungen der Muren zu erkennen.

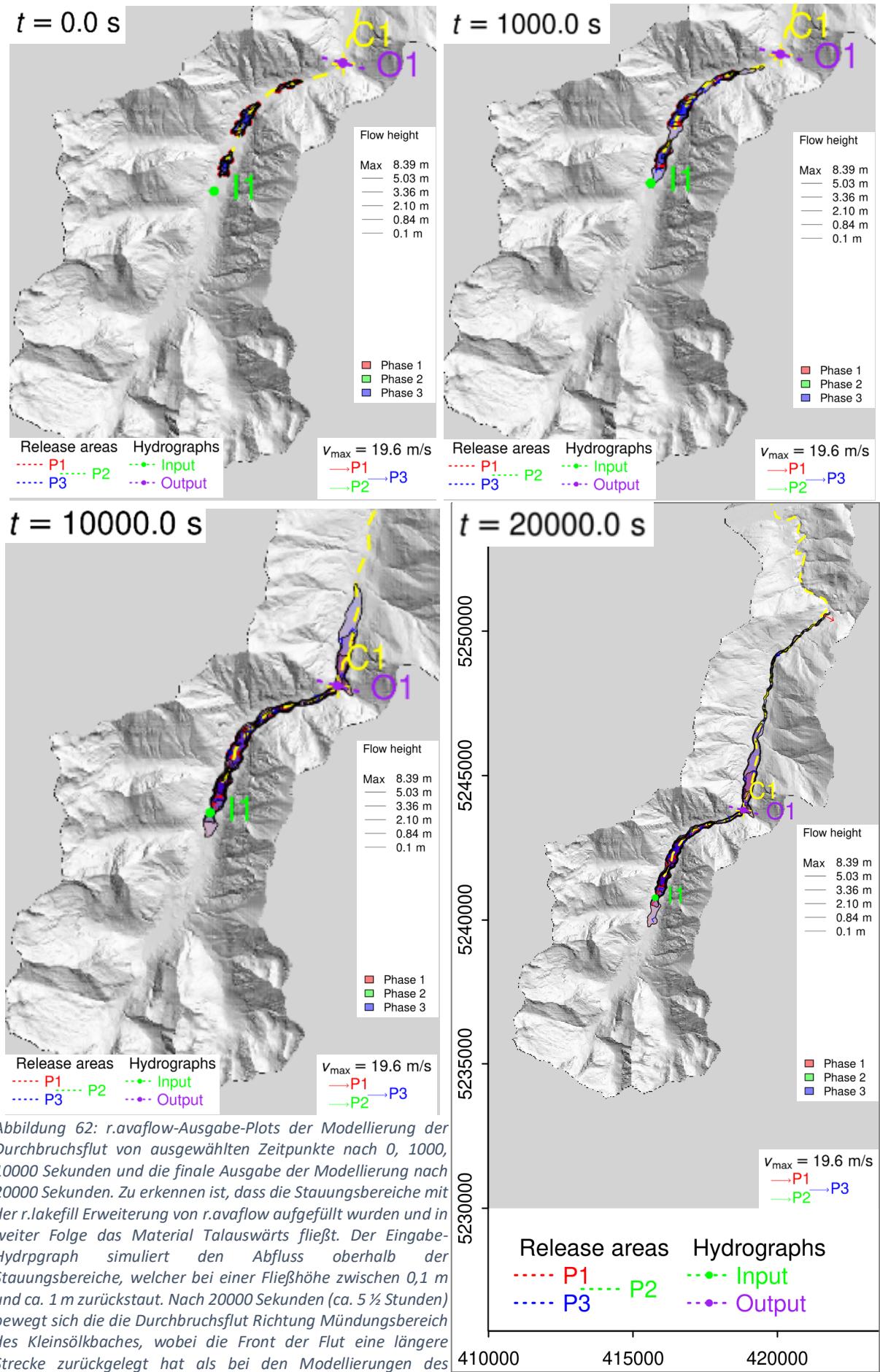


Abbildung 62: r.avaflow-Ausgabe-Plots der Modellierung der Durchbruchsflut von ausgewählten Zeitpunkten nach 0, 1000, 10000 Sekunden und die finale Ausgabe der Modellierung nach 20000 Sekunden. Zu erkennen ist, dass die Stauungsbereiche mit der r.lakefill Erweiterung von r.avaflow aufgefüllt wurden und in weiter Folge das Material talauswärts fließt. Der Eingabe-Hydrgraph simuliert den Abfluss oberhalb der Stauungsbereiche, welcher bei einer Fließhöhe zwischen 0,1 m und ca. 1 m zurückstaut. Nach 20000 Sekunden (ca. 5 ½ Stunden) bewegt sich die die Durchbruchsflut Richtung Mündungsbereich des Kleinsölkbaches, wobei die Front der Flut eine längere Strecke zurückgelegt hat als bei den Modellierungen des Extremereignisses wie von 2010 und Extremenszenario A.

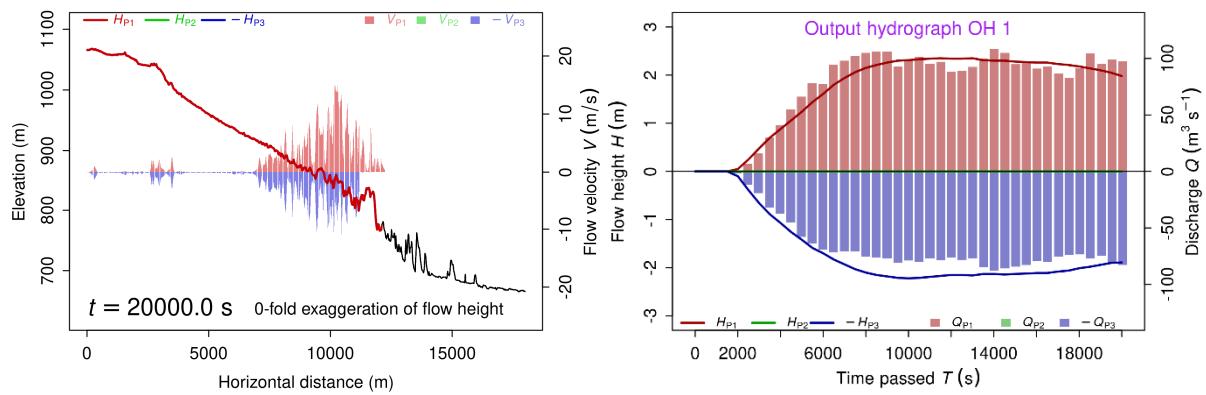


Abbildung 63: Links ist ein vertikales Höhenprofil nach 20000 Sekunden zu sehen, welches die Fließgeschwindigkeit je Profilabschnitt anzeigt. Das Höhenprofil entspricht der gelben Linie Abbildung 62. Rechts ist der Ausgabe-Hydrograph zu erkennen, welcher sowohl für die flüssige als auch für die feste Phase die Fließhöhe (in m) und den Abfluss (in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) am Auslass des Schwarzenseebachtals anzeigt.

## 6. Diskussion

Im folgenden Abschnitt werden die Analyseergebnisse aus dem vorherigen Kapitel diskutiert und kontextualisiert. Des Weiteren werden die Herausforderungen und Einschränkungen der Arbeit erläutert und welche möglichen Ausblicke sich hierbei für Weiterentwicklungen und Forschungsansätze ergeben.

### 6.1. Diskussion der Analyseergebnisse

Im Kapitel 5 wurden die Analyseergebnisse vorgestellt, welche nun in diesem Kapitel diskutiert und in den Kontext der aktuellen Forschung gestellt werden. Dabei wurde ein potenzielles Extremereignis wie vom 17.07.2010 im Schwarzenseebachtal in den Kontext des Konnektivitätsansatzes gestellt und mit r.avaflow modelliert. Durch die Modellierung des Extremereignisses konnten sowohl die Eingabeparameter kalibriert und somit für mögliche Extremeszenarien angewendet werden, als auch in Kombination mit den Konnektivitätsanalysen ein wertvoller Blick auf die laterale und longitudinale Dimension, aber auch auf die „vierte“ Dimension, der Konnektivität während der Modellierung von Prozessketten potenzieller Extremereignisse mit Kaskadeneffekten geworfen werden. Die Konnektivitätsanalysen konnten hilfreiche Hinweise für mögliche Szenarien solcher Extremereignisse liefern, insbesondere der ECA-Ansatz. Diese Arbeit hat durch die Kombination von Konnektivitätsanalysen und der Modellierung von Extremereignissen mit numerischen Modellen einen Beitrag zur Wissensgenerierung leisten können, wie er von PÖPPL und SASS (2020) gefordert wurde. PÖPPL und SASS (2020: 617) formulieren diese Forderung wie folgt: „Zukünftige Forschungsaktivitäten sollten sich allgemein stärker um eine integrative Betrachtung verschiedener Prozesse und ihrer Interaktionen in numerischen Modellen bemühen [...] und dabei auch geomorphologische Überlegungen zur Kopplung und Entkopplung von Prozessen einfließen lassen [...].“ Dies sei notwendig, da pauschale Aussagen zu Handlungsoptionen bezüglich möglicher Kaskadeneffekte wenig sinnvoll erschienen, da diese einen „individuellen und vielfältigen Charakter [...]“ aufwiesen (ebd.).

Die Modellierung des Extremereignisses wie vom 17.07.2010, auf Grundlage des DEMs von 2012, wurde mit r.avaflow durchgeführt. Hierfür wurden zwei implementierte Modellierungstypen verwendet, das gemischte Modell (Voellmy-Rheologie) für die Murabgänge sowie das Mehrphasenmodell für das Durchbruchsereignis. Beide Prozessabschnitte konnten auf diese Weise modelliert werden und die Modellierbarkeit dieses Extremereignisses mit Kaskadeneffekten damit bestätigen. Dies bedeutet, dass die kaskadenhaft interagierenden Prozessstypen 1b und 2 nach der von PÖPPL und SASS (2020) angepassten Interaktions-Matrise von GILL und MALAMUD (2014) mit ihren komplexen Interaktionen modellierbar sind. Bei den Modellierungen der Gerinnemuren ist bezüglich des Anrissmaterials, auf eine innovative Methodik zurückgegriffen worden, welche für diese Modellierung gute Ergebnisse erzielt, allerdings in weiteren Untersuchungsgebieten mit unterschiedlichen Ausgangssituationen überprüft werden muss. Die Parametrisierung der Voellmy-Rheologie hat sich als eine Herausforderung erwiesen, um die Muren in dem UG

beschreiben zu können. Das beste Ergebnis liefert die Modellierung, welche die Muren mit den Eingabeparametern aus der Tabelle 6 beschreibt. Als ergänzender Eingabeparameter ist die unterschiedliche Prozessdauer jeder Mure eingegeben worden, die vorher durch die Modellierung der Murabgänge mit längeren Zeiträumen und der Abschätzung der Dauer jedes Prozesses ermittelt worden sind. Auf diese Weise lassen sich die Muren des Extremereignisses vom 17.07.2010 und deren Ablagerungsbereiche adäquat auf dem DEM von 2012 modellieren – auch wenn es händische Anpassungen der Höhe der Murdämme für die Modellierung des Durchbruchsereignisses benötigt. Dennoch konnten auf Grundlage der Orthofotos und der kartierten Schadensflächen im UG durch den „best-fit“-Ansatz, die Eingabeparameter so kalibriert werden, dass die modellierten Muren den Muren des Extremereignisses von 2010 gleichen. Für die Durchbruchsflut sind die Stauungsbereiche mit der r.avaflow-Ergänzung r.lakefill gefüllt worden. Der Durchbruch dieses Materials ist durch Erosion und Aufnahme von Material (Entrainment) sowie einer initialen Bewegung im oberen Murdamm (Stummerbach) und des Weiteren durch Abfluss oberhalb der Stauungen erzeugt worden. Die physikalischen Eingabeparameter aus der Tabelle 7 sind die Eingabeparameter, welche gute Fließeigenschaften der modellierten Durchbruchsfluten aufweisen, auch wenn hierbei eine Nachjustierung, wie in Kapitel 5.2.1.2 angesprochen, sinnvoll erscheint, da das Verhältnis der Phasenzusammensetzung beim Auslass des Schwarzenseebachtals nicht realistisch ist. So sind die Volumina der festen Phase beim Ausgabe-Hydrographen im Verhältnis zu den Volumina der flüssigen Phase zu groß. Die Durchflussrate beider physikalischen Phasen zusammen ist hingegen nahe an dem geschätzten Wert von ca. 104 m<sup>3</sup>/s, welcher als Vergleichswert dieses Prozesses dient. Die modellierten Durchflussraten von etwas mehr als 100 m<sup>3</sup>/s kann mit der mittleren Durchflussrate von ca. 2 m<sup>3</sup>/s des Schwarzenseebaches (PÖPPL und SASS 2020) kontextualisiert werden, weil die Dimension dieser Durchbruchsflut damit verständlicher wird. Die Fließhöhe liegt dabei ca. bei 1,5 bis 1,6 m. Das Fließverhalten der modellierten Flut entspricht dabei dem Fluidtyp Nichtnewton und der Fließkategorie Wasserfluss (vgl. Abbildung 17), welcher sich gleichmäßig im Gerinne und auf den Umlagerungsstrecken verteilt.

Auf der einen Seite können numerische Modelle und Simulationsanwendungen dazu führen, dass wichtige Mechanismen von Prozessen mit Kaskadeneffekten in Hochgebirgsregionen besser verstanden werden, auf der anderen Seite sind gut dokumentierte Fallstudien wichtig für numerische Modelle, um diese zu verbessern und herauszufinden wo die bisherigen Grenzen und wo die Stärken solcher Modelle liegen und welche Fragestellungen damit beantwortbar sind (MERGILI et al. 2020b). Die vorliegende Forschungsarbeit liegt zwischen diesen beiden Anforderungen, da sowohl die Prozesse und die Kaskadeneffekte mit Hilfe der numerischen Modellierung besser verstanden werden, diese Modellierungen allerdings auch Rückschlüsse auf die Rheologien und das numerische Modell herleiten lassen.

So können auf Grund der numerischen Modellierung und den kalibrierten (quasi-) physikalischen Eingabeparametern, Aussagen bezüglich der Prozesse solcher Extremereignisse getroffen werden. Der basale Reibungswinkel ( $\delta$ ) der Modellierung der

Muren ist mit  $13^\circ$  für Muren relativ gering (vgl. TANG et al. 2023; WENDELER 2008). Dies lässt den Rückschluss zu, dass der Wassergehalt der Muren relativ hoch ist (vgl. HOCHSCHWARZER 2009; MIKOŠ und BEZAK 2021; RAMMS 2022). Auch die verhältnismäßig geringe Dichte ( $\rho$ ) deutet auf einen vergleichsweise hohen Wasseranteil hin (vgl. Kap. 3.1). Die turbulente Reibung ( $\zeta$ ) beschreibt den Verlust an kinetischer Energie durch Interaktionen und Reibung innerhalb der bewegten Masse. So liegt der Wert von ca.  $200 \text{ m/s}^2$  ungefähr bei der Grenze zwischen einem granularem Fließen, welches durch die feste Phase bestimmt wird, und einem schlammigem Fließen, welches flüssigartiger fließt (MIKOŠ und BEZAK 2021; RAMMS 2022) und stellt damit einen typischen Wert für Muren mit ihren inneren Reibungswiderständen dar (vgl. ABE und KONAGAI 2016; HOCHSCHWARZER 2009; MIKOŠ und BEZAK 2021). Dies wird durch die Empirie der vorliegenden Arbeit bestätigt. Die Reibungsparameter und die Eingabe-Dichten bei dem Mehrphasenmodell – in diesem Fall als Zweiphasenmodell verwendet – sind häufig durch die Beschreibung der jeweiligen physikalischen Phasen definiert, da die verschiedenen physikalischen Phasen bekannte physikalische Eigenschaften aufweisen, die diesen Phasen inhärent sind. Der basale Reibungswinkel der festen Phase sowie der empirische Entrainment Koeffizient müssen allerdings empirisch ermittelt werden. Die Phasenzusammensetzung hat dabei eine umso größere Bedeutung für die Modellierung der Massenbewegung. Da es sich bei der Modellierung der Durchbruchsfluten um einen fluviatilen Abfluss handelt, das eingestaute Material in den Stauungsbereichen jedoch vorwiegend der flüssigen Phase zuzuschreiben ist, ist in den Modellierungen der Durchbruchsfluten angenommen worden, dass das Material in den Stauungsbereichen zu 90% aus der flüssigen Phase besteht und die feste Phase vorwiegend durch Mitnahme von Material in die modellierte Masse aufgenommen wird.

Die Auswahl der Extremszenarien mit Kaskadeneffekten ist so gewählt worden, dass mögliche zukünftige Entwicklungen bezüglich des Umweltwandels berücksichtigt werden (siehe Kap. 4.3.2.1), um realistische Zukunftsszenarien zu modellieren und Aussagen über mögliche zukünftige kaskadenhafte Ereignisse tätigen zu können. Für diese Szenarien werden dieselben kalibrierten Eingabeparameter verwendete, welche durch die Modellierung des Extremereignisses wie am 17.07.2010 kalibriert wurden, nur dass sich bei den Szenarien die Ausgangssituationen von der Modellierung des Extremereignisses wie vom 17.07.2010 unterscheidet. So wird bei Extremszenario A angenommen, dass mehr Oberflächenabfluss vorhanden ist und damit 33% mehr Murmaterial als bei der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010 in den Anrißbereichen der Muren mobilisiert wird. Dies könnte durch stärkere bzw. länger andauernde Niederschlagsereignisse auftreten (GOBIET et al. 2014) oder durch eine Kombination aus Schneeschmelze und Starkniederschlagsereignissen. Ein erhöhter Borkenkäferbefall ist im Allgemeinen im Alpenraum ebenfalls zu erwarten, was zu vermehrten Hangmuren führen kann (BENTZ und JÖNSSON 2015; GHESTEM et al. 2011; JAKOBY et al. 2019). Bei Extremszenario B ist die gleiche Ausgangslage wie in Extremszenario A gewählt worden, außer dass die stauenden Murabgänge, welche bei dem ECA-Ansatz als verbunden klassifiziert sind, die doppelte Menge Material im Vergleich zur Modellierung des

Extremereignisses wie von 2010 in den Einzugsgebieten der Gerinnemuren mobilisieren können. Hier können die Ergebnisse des ECA-Ansatzes nützliche Hinweise auf Einzugsgebiete geben, die potenziell einen starken Eintrag generieren können, da sie verbunden sind und damit auch mobilisierbares Sediment vorhanden ist, wie der erkennbare Sedimentaustrag während der Feldarbeit zeigt. Des Weiteren geben die ausgewiesenen ECAs des UGs Hinweise, dass ein weiterer Stauungsbereich bei einem ähnlichen Extremereignis im Schwarzenseebachtal unwahrscheinlich ist, da die räumliche Lage der einzelnen ECAs zueinander hierfür nicht geeignet ist. Für solch eine Stauung kann davon ausgegangen werden, dass es zwei gegenüberliegende aktive Einzugsgebiete benötigen würde, wenn die Talmorphologie die Talsohle von mindestens einer Seite nicht stark verengt, wie beim mittleren Stauungsbereich beim Stiegelbach (ECA-Nr.: 6). Dass die Wahrscheinlichkeit für weitere Stauungsbereiche, außer bei den drei Stauungsbereichen von 2010, durch die Konnektivitätsanalysen als gering eingestuft werden kann, wird indirekt durch die modellierten Murablagerungen bestätigt, da auf dem DEM mit den Murablagerungen keine weiteren Senken oberhalb der Stauungsbereiche vorhanden sind, die zu Stauungsbereichen werden könnten. Auch der IC liefert keine Hinweise auf weitere mögliche Stauungsbereiche, da auch dieser keine Hinweise auf weitere mögliche starke Vermurung des Schwarzenseebaches von beiden Talseiten durch hohe IC-Werte liefert. Auch die Kombination der Ergebnisse dieser beiden Konnektivitätsansätze (siehe Abbildung 65), zeigt keine auffällig hohe laterale Konnektivität, welche orographisch rechts und links gegenüber liegen würde. Wie SCHOPPER et al. (2019) aufzeigt, korreliert die Wahrscheinlichkeit von Muren, die das Hauptgerinne erreichen und somit für die laterale Konnektivität entscheidend sind, mit dem ECA-Ansatz und dem IC. Die Ergebnisse des ECA-Ansatzes konnten die Stauungsbereiche in Kombination mit dem IC und der morphologischen Betrachtung des UGs z.T. erklären, da beim Stauungsbereich des Stummerbaches zwei größere ECAs gegenüberliegen (ECA-Nr.: 10 und 11) und, beim Stauungsbereich des Stiegelbaches, ist das Einzugsgebiet des Stiegelbachs als ein ECA ausgewiesen (ECA-Nr.: 6) und auf der orographisch rechten Seite begrenzt die Talmorphologie die Talsohle. Des Weiteren zeigt der IC hohe Werte auf der orographisch rechten Seite. Beim dritten Stauungsbereich, bei der Haselrinne, ist die orographisch linke Seite als ECA (ECA-Nr.: 4) ausgewiesen, die orographisch rechte Seite hingegen nicht, obwohl die Stauung 2010 durch beidseitige Vermurungen hervorgerufen wurde. Der IC weist hier ebenfalls keine auffallend höheren IC-Werte auf. Allerdings sind hier seit 2010 bauliche Schutzmaßnahmen vorgenommen worden (siehe Kap. 4.3.2.1), die die Ergebnisse des ECA-Ansatzes und des ICs an dieser Stelle beeinflussen könnten. Trotz der Ergebnisse der Konnektivitätsanalysen fällt bei der morphologischen Betrachtung auf, dass sich auf der orographisch rechten Seite zwei größere Einzugsgebiet für mögliche Gerinnemuren befinden, welche zusammen bei einem Überspülen der Dämme potenziell viel Material in den Schwarzenseebach gegenüber der Haselrinne (ECA-Nr.: 4) transportieren könnten. Aus diesem Grund könnten die baulichen Maßnahmen dazu führen, dass die Konnektivitätsanalysen an dieser Stelle die Möglichkeit eines stauenden Murgangs unterschätzen, wie die Morphologie vermuten lässt. Des Weiteren ist die Talsohle an dieser

Stelle, im Verhältnis zu dem Bereich zwischen Schwarzensee und oberer Stauung, enger, was in Kombination mit den Einzugsgebieten möglicher Gerinnemuren auf der orographisch rechten Seite den Rückschluss zulässt, dass hier eine erneute Stauung möglich erscheint.

Die Kombination aus einer morphologischen Betrachtung, den Ergebnissen des ECA-Ansatzes und als zusätzliche Ergänzung die Ergebnisse des ICs, kann somit eine nützliche und hilfreiche Methodik sein, um die Gefahren eines solchen Extremereignisses mit Kaskadeneffekten des Typs 1b und 2 nach der von PÖPPL und SASS (2020) angepassten Interaktions-Matrize von GILL und MALAMUD (2014), zukünftig besser einschätzen zu können. Gerade, da die Modellierungen der Extremeszenarien gezeigt haben, welche Bereiche bei stärkeren Vermurungen durch eine verstärkte Mobilisation von Material betroffen sein könnten und in weiterer Folge, dass Durchbruchsfluten höhere Durchflussraten aufweisen könnte, als dies 2010 der Fall war, ist diese Methodik eine wichtige Ergänzung für Risikoanalysen.

Die Modellierungen der Extremeszenarien in Kombination mit den Konnektivitätsanalysen können Hinweise darauf geben, welche Bereiche des UGs potenziell durch solch ein Ereignis betroffen sein könnten. So fällt, wie erwähnt, auf, dass es keine Hinweise auf weitere mögliche Stauungsbereiche gibt. Sowohl die DEMs nach den modellierten Murablagerungen als auch die Konnektivitätsanalysen (siehe Abbildung 65) in Kombination mit der morphologischen Betrachtung des UGs, geben keine Hinweise auf weitere Stauungsbereiche. Allerdings erscheint eine erneute ähnliche Vermurung mit anschließender Durchbruchsflut denkbar. Des Weiteren erscheint der Vermurungsprozess sogar mit Muren möglich, die eine größere Fläche mit höheren Mächtigkeiten vermurten, wie in Abbildung 56 und Abbildung 60 deutlich zu sehen ist. So ist beispielsweise eine stärkere Vermurung des Bereiches um die Breitlahnhütte oder der Lassachalm (im ECA-Nr.: 19) sowie der Stummer Alm (im ECA-Nr.: 11) nach den Modellierungsergebnissen der Extremeszenarien möglich. Auch die mobilisierten Volumina an Murmaterial kann nach den Modellierungsergebnissen noch um über 80% steigen, auch wenn hierbei die Annahme der uneingeschränkten Sedimentverfügbarkeit gilt, welche in der Realität, trotz der grundsätzlich hohen Sedimentverfügbarkeit von Hochgebirgsregionen, nicht unbedingt als gegeben angenommen werden kann. Auch bei der Durchbruchsflut erscheint hierbei eine deutlich höhere Höhe der Flutwelle möglich. So beträgt die Durchflusshöhe am Auslass des UGs bei der Modellierung des Extremereignisses wie von 2010 noch ca. 1,7 m, während die Durchflusshöhe bei der Modellierung der Extremeszenarien A und B mit ca. 4 m mehr als doppelt so hoch ist (vgl. Abbildung 55, Abbildung 59 und Abbildung 63). Auch bei der Stauhöhe und den damit verbundenen Volumina der Einstauungen, ist die Sedimentverfügbarkeit dabei die große Unbekannte, da je nach Niederschlagsereignis bzw. Schmelzwasserverfügbarkeit davon ausgegangen werden kann, dass größere Mengen der flüssigen Phase in den Stauungsbereichen durchaus möglich sind.

Die (Sediment-)Konnektivität im UG kann nach dem ECA-Ansatz und dem IC entlang des Schwarzenseebaches als hoch eingestuft, werden. Dabei ist zu beachten, dass das Einzugsgebiet des Schwarzensees bei dieser Betrachtung nicht mitberücksichtigt wird.

Wenn man das Einzugsgebiet des Schwarzensees mitberücksichtigt, sind nach dem ECA-Ansatz ca. 30% des UGs gekoppelt, was vergleichsweise einen geringen Anteil für ein UG mit einem Hochgebirgsrelief ausmacht (vgl. FRYIRS et al. 2007b; SCHOPPER et al. 2019). Da der Schwarzensee, wessen Genese wahrscheinlich durch einen Bergsturz zu erklären ist (siehe, Kap. 2.2), eine lokale Erosionsbasis darstellt und der Bereich oberhalb dieses Sees somit bezüglich der Sedimentkonnektivität funktional entkoppelt ist und der See auch beim Extremereignis vom 17.07.2010 die Funktion einer Barriere dargestellt hat, liegt der Fokus der Konnektivitätsanalysen auf dem Bereich zwischen dem Schwarzensee und dem Auslass des UGs. Für diesen Bereich sind nach dem ECA-Ansatz ca. 58% des UGs gekoppelt. Dieser Wert deckt sich mit Werten aus Analysen aus anderen Forschungsarbeiten (vgl. ebd.). Dabei gibt es im UG einen Unterschied zwischen der orographisch rechten und orographisch linken Seite, da die orographisch linke Seite nach den Ergebnissen des ECA-Ansatzes eine deutlich höhere Sedimentkonnektivität aufweist. Des Weiteren sind die effektiven Einzugsgebiete auf der orographisch linken Seite sowohl größer als auch ihre Anzahl höher.

Grundsätzlich weisen die Ergebnisse der ICs mit Zieleingabe eine ähnliche Verteilung der Konnektivität wie die Ergebnisse des ECA-Ansatzes auf. Dabei weisen insbesondere die Ergebnisse der ICs mit Zieleingabe deutlich einzelne Hangabschnitte durch höhere IC-Werte aus, welche sich vorwiegend auf der orographisch linken Seite und in der Nähe der Stauungsbereiche befinden. Das Einzugsgebiet des Schwarzensees wird dabei erwartungsgemäß durch niedrige IC-Werte als weniger stark verbunden eingestuft. Somit bestätigen die Ergebnisse des ICs die Ergebnisse des ECA-Ansatzes, dass die orographisch linke Seite eine höhere Konnektivität aufweist als die orographisch rechte Seite. Die Ursache der geringeren Konnektivität der orographisch rechten Seite könnte sowohl durch die Morphologie und dem damit verbundenen Auftreten von Puffern, als auch durch die durchgehende Zufahrtsstraße interpretiert werden. SCHOPPER et al. (2019) kommt auch zu dem Rückschluss, dass Straßen funktional häufig als Puffer fungieren, wenngleich eine allgemeingültige Aussage nicht möglich ist, da Zufahrtsstraßen bei Extremereignissen häufig überbrückt werden (z.B. KUMAR et al. 2014; SCHOPPER et al. 2019) und steile Straßenabschnitte sogar als Erosionsbeschleuniger durch den ungehinderten Abfluss fungieren können (z.B. CROKE et al. 2005; LATOCHA 2014). Bei der Betrachtung der ICoDs werden kleinere Unterschiede zwischen den einzelnen ICs deutlich. So zeigt sich bei der Betrachtung der ICoDs (siehe Abbildung 50 und Abbildung 51), dass sich die longitudinale Konnektivität dem IC zufolge durch die modellierten Murablagerungen erwartbar verändert und sich dabei die IC-Werte bei den drei Stauungsbereichen verringert. Die ICoDs auf Grundlage der ICs ohne Zieleingabe zeigen somit, dass sie die Veränderungen der longitudinalen Konnektivität darstellen können. Die ICoDs auf Grundlage der ICs mit Zieleingabe zeigen, dass sich die laterale Konnektivität nach den modellierten Murabgängen an verschiedenen Hängen verändert bzw. vorwiegend verringert, wahrscheinlich, da die neuen Murkegel als Puffer fungieren. Diese Erkenntnis kann ein Hinweis darauf sein, dass sich Gebirgsregionen, als metastabiles System, nach solchen Extremereignissen bezüglich weiterer Gerinnemuren tendenziell stabilisieren, wenngleich solche Ereignisse auch als

Trigger fungieren können und die Disposition für andere Prozesse verändern können (KAPPES et al. 2012; VAN WESTEN et al. 2014).

Wie in Abbildung 65 deutlich wird, kann der IC ausdifferenziertere Aussagen über die räumliche Verteilung und über qualitative Unterschiede der Konnektivität in den jeweiligen ECAs bzw. im gesamten UG geben, wie auch HECKMANN et al. (2018) und SCHOPPER et al. (2019) beschreiben. Grundsätzlich wird an den Ergebnissen der beiden Konnektivitätsansätze deutlich, dass die Schwächen des einen Ansatzes häufig die Stärken des anderen Ansatzes sind (vgl. HECKMANN et al. 2018; SCHOPPER et al. 2019). Der ECA-Ansatz kann klar definieren, ob ein potenzielles Sedimenteinzugsgebiet verbunden oder nicht verbunden ist, während der IC diese Rückschlüsse nicht ermöglicht. Allerdings ist dies auch ein Nachteil des ECA-Ansatzes, da Aussagen zu qualitativen Unterschieden im Allgemeinen zwischen verschiedenen ECAs nicht möglich sind und quantitative Unterschiede zwischen verschiedenen ECAs, nur in Bezug auf die räumliche Ausdehnung der ECAs möglich sind. Der IC hingegen unterscheidet nicht zwischen verbunden (gekoppelt) und nicht verbunden (entkoppelt) von Sedimenteinzugsgebieten, weshalb keine Aussagen zu den Anteilen von Gebieten des UGs hinsichtlich der Kopplung der lateralen Sedimentkonnektivität möglich sind. Der IC kann Aussagen treffen, wo die Konnektivität im UG stärker und wo schwächer ausgeprägt ist. Dies macht es möglich, relative Aussagen innerhalb eines Einzugsgebietes tätigen zu können. So ist im Schwarzenseebachtal die Aussage möglich, dass auf der orographisch rechten Seite gegenüber des Stiegelbaches (ECA-Nr.: 6), höhere IC-Werte auf eine besonders hohe Konnektivität im Vergleich zur gesamten orographisch rechten Seite hinweisen, auch wenn hier kein ECA ausgewiesen ist. Somit kann ein ECA an solch einer Stelle beispielsweise durch einen Puffer geblockt werden, allerdings zeigen hohe IC-Werte an, dass die Voraussetzungen für eine hohe laterale Konnektivität wahrscheinlich sind. In solch einem Fall auch durch eine Schwäche des ICs, der Nichtbeachtung der Sedimentverfügbarkeit, zu einer Überschätzung der Konnektivität führen. Grundsätzlich berücksichtigen beide Ansätze die Sedimentverfügbarkeit, welches für die Mobilisierung zu Verfügung steht, nicht (SCHOPPER et al. 2019) bzw. nicht direkt. Dieses Sediment ist für die Sedimentkonnektivität jedoch unabdingbar, da es ohne verfügbares Sediment keine Sedimentkonnektivität geben kann. Der Sedimenteintrag in das Hauptgerinne wird jedoch beim ECA-Ansatz zumindest durch die Feldüberprüfung bestätigt und die Sedimentverfügbarkeit damit indirekt berücksichtigt, da ein Eintrag nur dann möglich ist, wenn Material für diesen Eintrag auch zur Verfügung steht. Beim ECA-Ansatz sind quantitative und weitergehende qualitative Aussagen bezüglich der Sedimentverfügbarkeit und dem Sedimentaustausch nicht möglich. In Bereichen, welche nicht als ECA des UGs ausgewiesen sind, lassen hingegen generell keine Rückschlüsse auf die Sedimentverfügbarkeit herleiten. Beim IC wird die Sedimentverfügbarkeit allerdings zur Gänze nicht berücksichtigt – außer bei fast-vertikalen Hangabschnitten, bei denen angenommen wird, dass diese Abschnitte nur eine begrenzte Sedimentverfügbarkeit aufweisen (CAVALLI et al. 2013). Somit ist die Sedimentverfügbarkeit eine der großen Unbekannten der Konnektivitätsanalysen und damit auch bei den Rückschlüssen der vorliegenden Arbeit von den Konnektivitätsanalysen auf mögliche Extremzonen.

Die morphologische Betrachtung in Kombination mit der Konnektivitätsanalysen können, wie erwähnt, das Auftreten der Stauungen erklären. Ein weiterer Grund, welcher die Morphologie bei den Stauungsbereichen und die zwei Einzugsgebiete der stauenden Gerinnemuren der orographisch rechten Seite erklären kann, kann eine Sackung und in deren Folge ein Talzuschub von der orographisch rechten Seite sein. Hierdurch lässt sich erklären, warum der morphologisch steile Hang gegenüber des Stiegelbaches die Talsohle an dieser Stelle verengt und damit die Ausweichfläche für den Schwarzenbach und die Murablagerungsfläche auf der Talsohle begrenzt. Des Weiteren wird damit erklärt warum die orographisch rechten Einzugsgebiete, gegenüber des Stummerbaches (ECA-Nr.: 11) und gegenüber der Haselrinne (ECA-Nr. 4), in den höheren Bereichen dieser Einzugsgebiete hydrologisch längs zum Schwarzenbach ausgerichtet sind, wie im Ausschnitt von Abbildung 56 ersichtlich ist (siehe Abbildung 64).

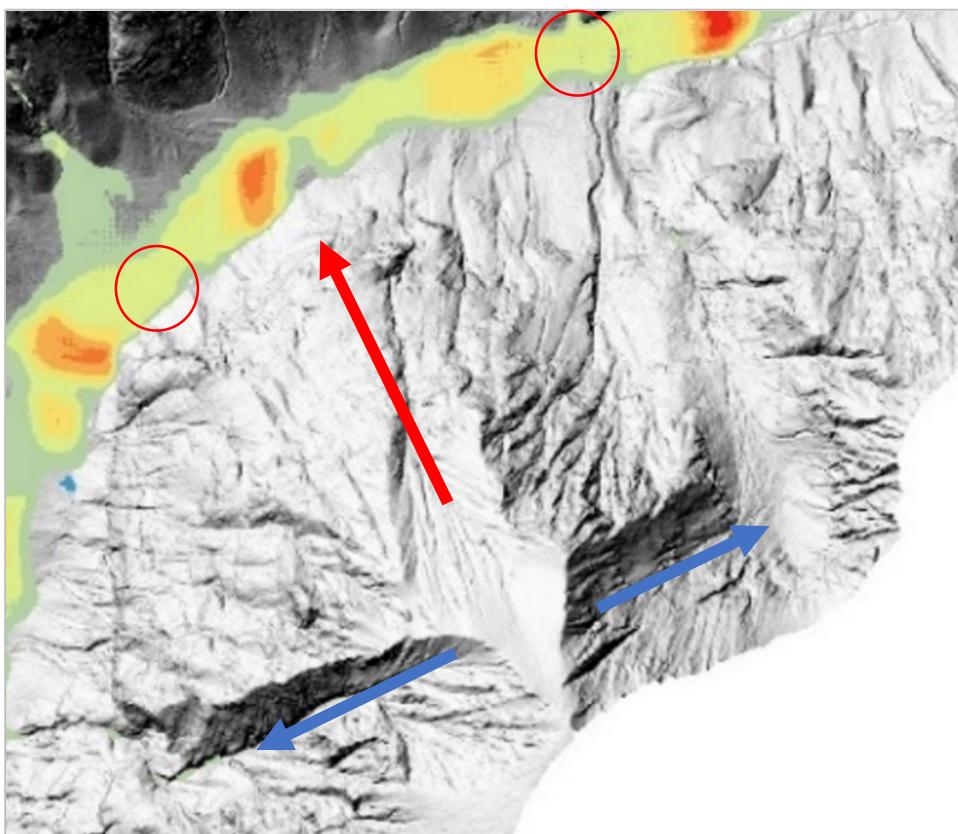


Abbildung 64: Ausschnitt aus der Abbildung 56, welcher die mögliche Sackung mit Talzuschub auf der orographisch rechten Seite zeigt. Die hinzugefügten roten Kreise markieren die Murdämme der Stauungen beim Stiegelbach und bei der Haselrinne. Die hinzugefügten blauen Pfeile symbolisieren den hydrologischen Abfluss in den höheren Bereichen der Einzugsgebiete und der rote Pfeil die mögliche Bewegung der Sackung.

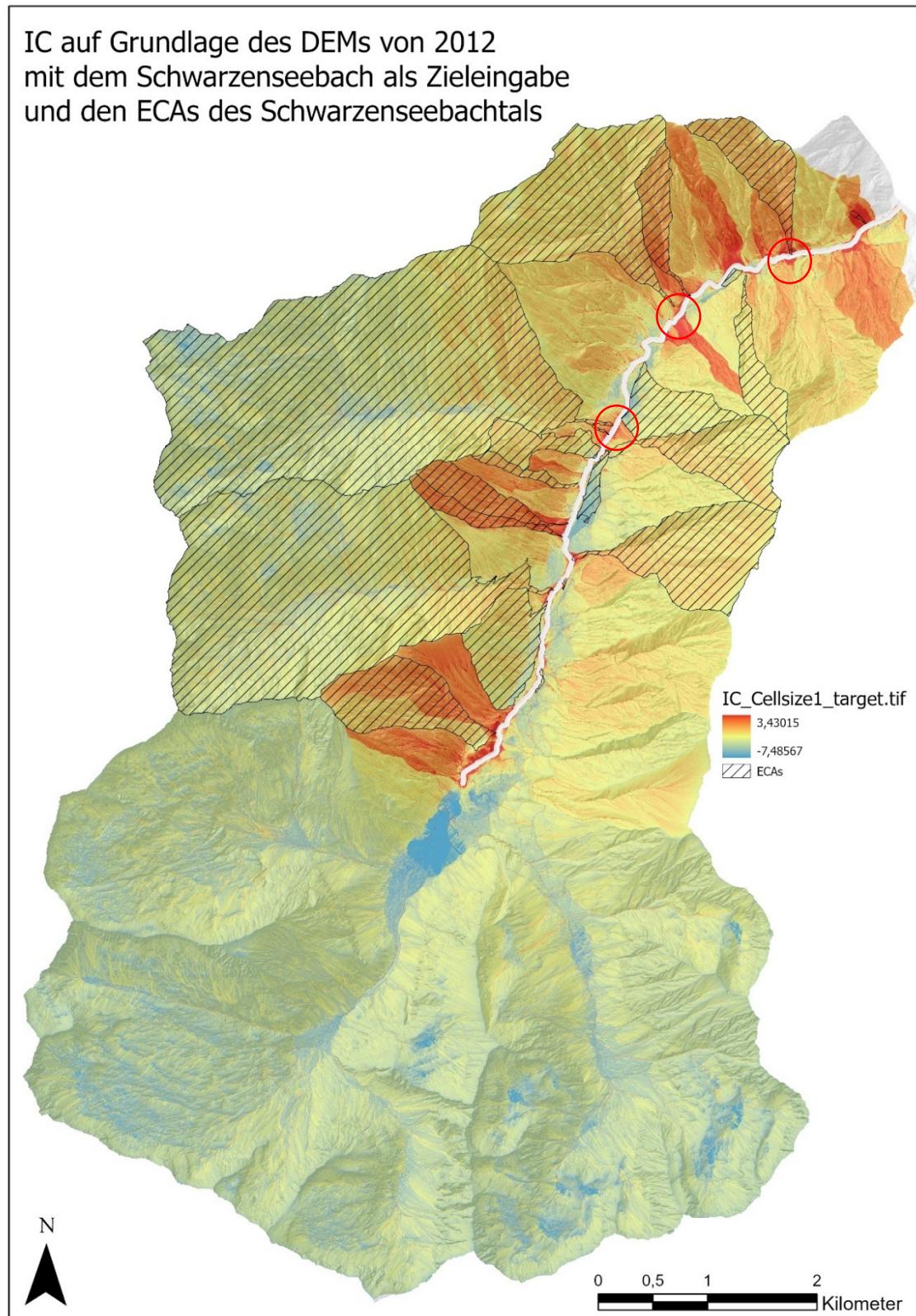


Abbildung 65: In dem errechneten IC mit dem Schwarzenseebach als Zieleingabe auf Grundlage des DEMs von 2012 wurden die Ergebnisse der ECA-Analyse integriert. So lässt sich die laterale Konnektivität beider Ansätze gleichzeitig betrachten. Die beiden Ansätze können sich auf diese Weise gut ergänzen, da der IC Unterschiede innerhalb der ECAs anzeigen kann und somit die ECAs ausdifferenziert werden können, und die ECAs zeigen gleichzeitig an, welche Einzugsgebiete tatsächlich „effektive“ Einzugsgebiete sind. So wird z.B. die Unterschätzung des ICs der Seitentäler entlang des Stummerbaches und des Lassachbaches deutlich sowie die ECAs können weiter unterteilt werden, welche Gebiete innerhalb der ECAs einen besonders großen Einfluss auf den Sedimentaustrag haben. Mit diesen Ergebnissen können zwei der drei Stauungen (rote Kreise) gut erklärt werden, da beim Stummerbach zwei ECA gegenüber liegen und beim Stiegelbach ein ECA und auf der orographisch rechten Seite hohen IC-Werte vorhanden sind.

## 6.2. Einschränkungen der Arbeit und Ausblick

Als eine Einschränkung dieser Arbeit haben sich verschiedene Aspekte und Unsicherheiten bei der Modellierung der potenziellen Extremereignisse herausgestellt. So sind bei der Modellierung der Muren Ungenauigkeiten beim Vergleich mit dem Extremereignis vom 17.07.2010 zu erkennen, da es hier, beim Vergleich der modellierten Murablagerungen mit den Orthofotos und den Schadensflächen, z.T. größere Abweichungen gibt (vgl. Abbildung 53 und Kap. 9 *Vergleich Murablagerungen Modellierungen und Schadensflächen Extremereignis 2010*). Als eine Herausforderung kann dabei die Wahl der Voellmy-Rheologie betrachtet werden, die zwar häufig erfolgreich bei der Modellierung von Murabgängen angewendet wurde, wie in Kapitel 3.1.1 und 4.3.1.1 erläutert, allerdings scheint diese Rheologie, die bei der Modellierung von Muren als eine technische Berechnungsformel betrachtet werden kann, bei der Modellierung von vielen verschiedenen Murabgängen an ihre Grenzen für die Beschreibung der verschiedenen Murabgänge zu kommen. In dieser Arbeit wurden für alle Muren die Voellmy-Rheologie mit den gleichen quasi-physikalischen Eigenschaften angewendet und durch unterschiedliche Prozessdauern je Mure ergänzt. Jedoch waren die physikalischen Unterschiede der einzelnen Muren im UG wahrscheinlich zu groß, um alle Murabgänge mit den gleichen Eingabeparametern so zu beschreiben, dass die Ergebnisse sowohl die Höhe der Murdämme als auch die räumliche Dimension der Murablagerungen präzise genug wiedergeben können. Dass der basale Reibungswinkel mit 13° relative niedrig ist, könnte eine Folge dieser Ungenauigkeiten sein, da sich das Murmaterial in den Seitentälern bis zum Schwarzenseebachtal auf eine andere Weise bewegen muss, als Gerinnemuren oder Hangmuren, die direkt ins Schwarzenseebachtal münden, um sinnvolle Ablagerungsbereiche im Schwarzenseebachtal zu generieren. Damit das Murmaterial aus den Seitentälern die Talsohle des Schwarzenseebachtals erreicht, könnte der basale Reibungswinkel für andere Muren somit als zu niedrig ermittelt worden sein. Diese Vermutung wurde versucht mit dem Faktor der unterschiedlichen Prozessdauer je Mure entgegenzuwirken, so dass die unterschiedlichen Murabgänge der Modellierung unterschiedlich viel Zeit hatten, um sich im Schwarzenseebachtal abzulagern. Da davon auszugehen ist, dass die einzelnen Prozesse auch während des Extremereignisses am 17.07.2010 unterschiedlich lange angedauert haben werden, erscheint diese Ergänzung der Modellierung als sinnvoll – allerdings nur bedingt als Ausgleich der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Muren. Die Ungenauigkeiten des Modells könnten auch die Notwendigkeit erklären, weshalb Bereiche in den Murdämmen für die Modellierung der Durchbruchsfluten ausgebessert werden mussten. Dabei ist aber auch zu betonen, dass Modellierungen bisher grundsätzlich die Dynamiken von einzelnen großen Felsblöcken und Baumstämmen nicht gut darstellen können (TRUJILLO-VELA et al. 2022), welche jedoch zu Verklausungen und Staueffekten führen können. Auf Grundlage dieser Betrachtung, kann nichtsdestotrotz die Schlussfolgerung gezogen werden, dass bei einem Ereignis, bei dem mehrere Murabgänge de facto gleichzeitig modelliert werden, eine Ausdifferenzierung der einzelnen Muren mit dem Mehrphasenmodell bessere Ergebnisse erzielen könnte – gerade da bei diesem Modell

der Auftrieb der festen Phasen mitberücksichtigt wird (PUDASAINI und MERGILI 2019). Dabei könnten Eingaberasterdaten, die die physikalischen Eingabeparameter für jede Mure bzw. zwischen verschiedenen Gruppen von Muren (z.B. Hangmuren versus Gerinnemuren versus Seitentäler) unterschiedlich definieren, sinnvoll sein. Hier zeigt r.avaflow einen großen Vorteil zu anderen Modellierungsanwendungen von Muren, da r.avaflow die Möglichkeit bietet, auf das Mehrphasenmodell zu wechseln und somit, wenn die Voellmy-Rheologie als nicht mehr ausreichend zu betrachten ist, auf den anderen Modellierungstyp gewechselt werden kann. Dabei kann die Modellierung mit der Voellmy-Rheologie in r.avaflow dennoch erste Anhaltspunkte geben, was bei der Modellierung mit dem Mehrphasenmodell berücksichtigt werden sollte, wie z.B. die Annahme, dass die Seitentäler des UGs ein anderes Fließverhalten mit einem höheren Anteil der flüssigen Phase für die Murabgänge aufweisen könnten. Die Ungenauigkeiten der Modellierungen mit der Voellmy-Rheologie können allerdings z.T. auch aufgrund des verwendeten DEMs erklärt werden, da dieses nach dem Extremereignis erstellt wurde und das Relief sowohl durch das Extremereignis von 2010 als auch durch bauliche Maßnahmen (siehe Kap. 4.3.2.1 bezüglich Schutzdämme) verändert wurde. Dies bedeutet, dass die Unterschiede der Murablagerungen zwischen dem Extremereignis von 2010 und der Modellierung des Extremereignisses, zumindest teilweise, zu der Interpretation führen, dass die Murgänge auf der Oberfläche von 2012 zu anderen Murablagerungen führen würde, als dies vor dem Extremereignis der Fall war. Welche Unterschiede zwischen den modellierten Ablagerungen und den Ablagerungen des Extremereignisses von 2010 zu welchem Anteil an dem verwendeten DEM und zu welchem Anteil an dem verwendeten Modell liegen, ist allerdings schwer zu definieren. Auch diese Ausdifferenzierung könnte mit einem Mehrphasenmodell und der physikalischen Beschreibung jeder einzelnen Muren eventuell besser gelingen. Bei dem Extremzenario B konnte hingegen zumindest bei den stauenden Murabgängen einige Veränderungen des Reliefs und möglicherer Puffer integriert werden, da die Ergebnisse des ECA-Ansatzes und des ICs diese Veränderungen berücksichtigen.

Die implementierte Evaluierungsfunktion in r.avaflow, hat auf Grund eines Softwarefehlers von r.avaflow bei den Analysen der vorliegenden Arbeit nicht funktioniert. Bei der Modellierung der Murabgänge des Extremereignisses wie von 2010 hätte diese Evaluierungsfunktion Aussagen bezüglich der Genauigkeit der Ablagerungsbereiche der Muren zwischen der Modellierung und dem Extremereignis vom 17.07.2010 treffen können, da die Ablagerungsbereiche und Schadensflächen des Extremereignisses bekannt sind. Die Versuche den Softwarefehler zu beheben sind mit Unterstützung des Entwicklers von r.avaflow (MERGILI 2023) bisher nicht erfolgreich gewesen. Das Problem wird jedoch weiterhin versucht zu lösen.

Bei der Modellierung der Durchbruchsfluten stellte sich nicht nur die Simulation der Durchbrüche als Herausforderung heraus, welche als gelöst betrachtet werden können, sondern auch das Verhältnis zwischen der flüssigen und festen Phase. So entspricht das Verhältnis der beiden Phasen bei allen Modellierungen der Durchbruchsfluten am Auslass des UGs wahrscheinlich nicht der Realität, da der Anteil der festen Phase als zu groß

eingeschätzt werden kann, wenn der Abfluss des Durchbruchs als fluviatiler Abfluss (Hyperkonzentrierter Abfluss) definiert wird (siehe Kap. 3.1 und 2.5). Insbesondere bei der Modellierung der Durchbruchsflut des Extremereignisses ist der Anteil der festen Phase zu groß (siehe Abbildung 55). Allerdings entspricht der Fluidtyp der modellierten Durchbruchsflut einem fluviatilem „Nichtnewton“-Fließen (siehe Kap. 3.1) mit gleichmäßiger Verteilung und horizontaler Oberfläche. Nichtsdestotrotz stellt diese Phasenverteilung eine Einschränkung dar, welche weiter untersucht werden sollte – auch wenn die Gesamtabflussvolumina als realistisch eingeschätzt werden können. Erste Möglichkeiten diese Einschränkungen zu verringern, könnte darin bestehen, den Eingabeparameter rhentrmax1, welcher als dimensionslose Nummer zwischen 0 und 1 die Phasenzusammensetzung des aufgenommenen und mittransportierten Materials definiert, weiter anzupassen. Für die Modellierungen der vorliegenden Arbeit wurde er mit 0,5 definiert. Des Weiteren kann der empirische Entrainment Koeffizient ( $C_E$ ) erhöht werden, da dieser die Menge des aufgenommenen und mitgenommenen Materials definiert, wobei dieser Eingabeparameter ebenfalls für die Durchbrüche durch die Murdämme entscheidend ist, weshalb dann in weiterer Folge wahrscheinlich eine weitere Verringerung des basalen Reibungswinkels der festen Phase ( $\delta_s$ ) vorzunehmen wäre. Auch die kinematische Viskosität ( $\nu$ ) könnte noch etwas verringert werden, um die etwas zu langsam ablaufende Fließbewegung anzupassen (vgl. die verwendeten Eingabeparameter in Tabelle 7). Des Weiteren wäre ein längerer Modellierungszeitraum der Durchbruchsfluten interessant, um abschätzen zu können, wie sich das Material weiterbewegt und sich im Mündungsbereich des Kleinsölkbaches in die Enns verteilt. Der Modellierungszeitraum von 20000 Sekunden für das Durchbruchsereignis wurde gewählt, da nach diesem Modellierungszeitraum die Durchflussraten am Auslass des UGs durch einen Ausgabe-Hydrographen darstellbar und überprüfbar ist und dabei sinnvolle Aussagen bezüglich der Durchbrüche im UG möglich sind.

Nach der Überprüfung und Anpassung der Verbesserungsvorschläge der Modellierungen sowie den überarbeiteten Modellierungsansätzen der einzelnen Prozessabschnitte mit dem Mehrphasenmodell, wäre es auch denkbar, dass gesamte Extremereignis mit einem Startskript durchzuführen. Allerdings müsste dieses Startskript auch in zwei Modellierungsschritten aufgebaut sein, so, dass die Murabgänge modelliert werden, und in weiterer Folge mit r.lakefill die Stauungen modelliert werden. Hierfür müssten die Ergebnisse der Murabgänge für die Modellierung der Durchbruchsfluten mit Hilfe der Funktion „r.mapcalc“ in die Eingabedaten integriert werden. In weiterer Folge könnten die Durchbrüche modelliert werden. Diese Überlegungen können ein Hinweis für eine Weiterentwicklungsmöglichkeit der r.avaflow Anwendung sein: So wäre die Möglichkeit sinnvoll, während der Modellierung mit dem r.avaflow.main.c Skript eine Funktion zu implementieren, die, wie die r.lakefill Erweiterung, die Möglichkeit bietet, ausgewählte Senken während der Modellierung nach einem bestimmten Zeitpunkt mit Wasser zu befüllen. Auf diese Weise können Senken zu Stauungen werden, die sich während der Modellierung bilden. Dies könnte z.B. den Prozesstyp 1b nach der angepassten Interaktions-Matrize (GILL und MALAMUD 2014; PÖPPL und SASS 2020) leichter und unkomplizierter

modellierbar machen. Und würde auch bedeuten, dass beide Prozessabschnitte in den Ausgabe-Plots von r.avafow zusammengefasst wären und die Interaktionen zwischen den Prozesstypen 1b und 2 (siehe Kap. 3.2) besser berücksichtigt werden kann.

Grundsätzlich ist bei Modellierungen jeglicher Art, auch bei numerischen Modellen, zu beachten, dass kleine Änderungen der Parameter oder allein bei Änderungen der Rastergröße, andere Ergebnisse erzielen werden. Somit würden beispielsweise durch die Änderung der Rastergröße von 5 x 5 m auf 2 x 2 m bei der Modellierung der Muren der vorliegenden Arbeit, die Ergebnisse verändert werden. Dies bedeutet, dass die übrigen Eingabeparameter nicht mehr passend erscheinen und nachjustiert werden müssten, wie auch die Arbeit von MERGILI et al. (2017a) betont. Dies zeigt auf, dass Modelle und Modellierungen immer eine Annäherung an die Realität sind und somit nie die Realität darstellen können, wenngleich sie dennoch, wie die vorliegende Arbeit aufzeigt, sehr nützlich sind und die Annährungen so gut wie möglich die Realität abbilden sollten. Dass diese Annährungen an die Realität immer präziser werden, ist und bleibt Aufgabe und Herausforderung der Forschung. Die vorliegende Arbeit konnte mit den Ergebnissen der Arbeit einen Beitrag zu dieser Aufgabe und Herausforderung leisten – auch wenn es viele weiteren Entwicklungen benötigt.

Obwohl im Hochgebirge die Vegetationsdecke weniger dicht ist und das Relief eine höhere Reliefenergie aufweist und die Vegetation somit, im Verhältnis zu Landschaften mit einer dichteren Vegetationsdecke und geringerer Reliefenergie, als Einflussfaktor einen geringeren Einflussfaktor darstellt, kann die vorhandene Vegetation im Hochgebirge einen bedeutende Einfluss auf die Mobilisierung von Material haben (HASELBERGER et al. 2021). Die Vegetation wird jedoch bei den Ansätzen der vorliegenden Arbeit nicht bzw. kaum berücksichtigt. Sowohl in r.avafow als auch beim IC – so wie der IC in dieser Arbeit angewendet wurde – wird die Vegetation nicht berücksichtigt (BOURRIER et al. 2012; Moos et al. 2017). Beim ECA-Ansatz wird die Vegetation indirekt durch die Feldanalyse berücksichtig, da die Vegetation einen großen Einfluss darauf haben kann, ob Sediment in das Hauptgerinne gelangt oder nicht. So kann eine dichte Vegetationsdecke die Mobilisierung von Sediment verhindern oder Puffer mit dichteren Vegetationsdecken den Sedimenteintrag ins Hauptgerinne mit einer höheren Wahrscheinlichkeit verhindern als Puffer mit lichteren Vegetationsdecken, weshalb bei der Beurteilung, ob ein Sedimenteinzugsgebiet verbunden oder nicht verbunden ist, die Vegetation indirekt Einfluss nimmt. So hat auch die Vegetationsdecke einen Einfluss auf die Sedimentverfügbarkeit (vgl. HASELBERGER et al. 2021). Wie in Kapitel 6.1 dargelegt wurde, wird auch die Sedimentverfügbarkeit, bei den angewendeten Methoden der vorliegenden Arbeit nicht bzw. kaum berücksichtigt. Dies zeigt auf, dass der Aspekt der Sedimentverfügbarkeit bei der Weiterentwicklung der beiden Konnektivitätsansätze stärker berücksichtigt werden sollte, da durch die Sedimentverfügbarkeit, insbesondere im Hinblick auf Extremereignisse, das Auftreten von gravitativen Prozessen stark beeinflusst wird (BEL et al. 2017; HUSSIN et al. 2014). Dabei sollte sowohl das Vorhandensein von Sedimenten als auch die Wechselwirkungen zwischen Sedimenten und Vegetation berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit hat der ECA-Ansatz mit einem spezifischen Schwellenwert zu keinen sinnvollen Ergebnissen geführt, weshalb der Schwellenwert auf  $0^\circ$  gesetzt wurde und jedes mögliche ECA durch eine Überprüfung im Feld evaluiert wurde. Die Ursache, dass bei Schwellenwerten zwischen  $0,5^\circ$  bis  $8^\circ$  die ECAs nicht sinnvoll generiert werden konnten, könnte an dem anthropogenen Einfluss durch Infrastrukturbauten liegen (siehe Kap. 4.2.1). Eine mögliche Lösung könnte eine Verkleinerung der Rasterauflösung des DEMs sein, da auf diese Weise kleinere Unterbrechungen der Hangneigungswinkel, wie z.B. durch Zufahrtsstraßen, nicht mehr so stark ausdifferenziert werden. SCHOPPER et al. (2019) hat zwar aussagekräftige Ergebnisse mit einer Rasterauflösung von  $5 \times 5$  m und einem Schwellenwert von  $2^\circ$  erzielen können, nach LISENBY und FRYIRS (2017) ergab eine Rasterauflösung des DEMs von  $25 \times 25$  m hingegen die besten Ergebnisse. Auch die Forschungsarbeit von FRYIRS et al. (2007b) hat mit einer Rasterauflösung von  $25 \times 25$  m aussagekräftige Ergebnisse erzielen können. Somit könnte ein Schwellenwert, welcher durch die heuristische Methode „best-fit“ durch Ausprobieren definiert werden müsste, mit einer geringeren Auflösung besser Ergebnisse erzielen – auch wenn dies die Überprüfung im Feld nicht ersetzt.

Die Seitentäler, sowohl entlang des Stummerbaches vom Stummerkessel über die Stummer Alm bis zum Schwarzenseebach als auch entlang des Lassachbaches vom Lassachkar über die Lassachalm bis zum Schwarzenseebach, sind, bei genauerer Betrachtung, zwei eigenständige geomorphologische Einzugsgebiete (siehe Kap. 2.2), welche bei weiteren Untersuchungen als eigenständige Einzugsgebiete für die Analysen betrachtet werden können. So kann es sinnvoll sein, die ECAs und die ICs sowohl vom Stummerbach als auch vom Lassachbach nochmal separat jeweils für die beiden Einzugsgebiete in Bezug zum Stummerbach bzw. Lassachbach zu berechnen. Auf diese Weise kann die Sedimentkonnektivität für die beiden geomorphologischen Einzugsgebiete differenzierter betrachtet werden und genauere Aussagen getroffen werden, welche Gebiete der Seitentäler gekoppelt oder nicht gekoppelt sind bzw. welche relative räumliche Verteilung die Konnektivität aufweist.

Das Kapitel 2.2 gibt Hinweise auf einen Bergsturz, welcher zur Bildung des Schwarzensees geführt haben könnte. Um diesen Bergsturz zu bestätigen, wären Datierungsmethoden und Beprobungen der möglichen Bergsturzmasse sinnvoll, um die These des Bergsturzes bestätigen zu können.

Die Hinweise auf die Einschränkungen dieser Arbeit sind auch wichtige Hinweise und Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten, da in diesen Bereichen weitere Forschungsarbeiten notwendig sind und weitere Beiträge geleistet werden können, um zukünftige Methodiken zu verbessern und anzupassen. Trotz der erwähnten Einschränkungen konnten die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit, hinreichend beantwortet werden und einen wichtigen Beitrag, auch im Hinblick auf die sich verändernden Umweltbedingungen, leisten. So konnten Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie die Kombination von Konnektivitätsanalysen und Modellierungen von Extremereignissen bzw. Extremzenarien Erkenntnisgewinne generieren können, welche

auch in der Naturgefahren- und Risikoforschung zukünftiger (Extrem-)Ereignisse hilfreich sein können. Solche erweiterten Ansätze im Kontext der globalen Umweltveränderungen hat auch VAN WESTEN et al. (2014) für die Risikoforschung gefordert. So können die Ergebnisse dieser Arbeit für die Naturgefahren- und Risikoforschung im Hinblick auf die Prozessstypen 1b und 2 nach PÖPPL und SASS (2020) auf Grundlage der Interaktions-Matze von GILL und MALAMUD (2014) hilfreiche Ansätze liefern. Ob das Bauen von Schutzbauwerken oder andere raumplanerische Maßnahmen dabei als sinnvoll betrachtet werden kann, ist dabei eine zentrale Fragestellung, die im Kontext der lokalen Auswirkungen der globalen Umweltveränderungen für die jeweiligen Gebiete abgewogen werden müssen (vgl. PÖPPL und SASS 2020; VAN WESTEN et al. 2014). So führen die konkreten Ergebnisse dieser Forschungsarbeit bezüglich der räumlichen Ausdehnung und Mächtigkeiten der Vermurungen der Extremzenarien sowie der höheren Durchflusshöhe beim Ausgabe-Hydrographen der Extremzenarien zu der berechtigten Frage, welche Schutzmaßnahmen als sinnvoll erachtet werden können. Die Frage muss gestellt werden, da Extremzenarien denkbar sind, welche noch schadensbringender als das Extremereignis von 2010 sind und durch die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit auch die Bereiche definierbar sind, welche von solchen Ereignissen betroffen sein könnten. Die Kombination aus den Ergebnissen des ECA-Ansatzes bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Morphologie des UGs können bei der Auswahl, wo welche präventiven Maßnahmen ergriffen werden sollten, hilfreiche und wichtige Hinweise geben, da die ECAs aufzeigen, wo sich aktive Einzugsgebiete im UG befinden. Solche Überlegungen müssen Gegenstand der Naturgefahren- und Risikoforschung für zukünftige Anpassungsstrategien sein. Ob Schutzbauwerke dabei die bestmögliche Anpassung, inklusive seiner möglichen Folgekosten, sind (z.B. THALER et al. 2018) oder andere raumplanerische Maßnahmen, wie Freihalten potenziell betroffener Bereiche von permanenter Nutzung oder punktuelle Frühwarnsysteme, müssen Gegenstand der Untersuchung sein. Die vorliegende Arbeit liefert Ergebnisse und Erkenntnisse, die einen Beitrag zum notwendigen und wichtigen Prozessverständnis für die Abwägung und Ausgestaltung von Schutzmaßnahmen beitragen. Damit konnte die vorliegende Arbeit einen Beitrag zu der Forderung von PÖPPL und SASS (2020) leisten, die ein vertieftes Prozessverständnis als Grundlage für die Ausgestaltung von Präventionsmaßnahmen für notwendig beschreibt.

## 7. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat sich mit kaskadenhaften Extremereignissen auseinandergesetzt und untersucht, inwiefern die Prozesse solcher Extremereignisse mit Kaskadeneffekten modellierbar sind. Dabei lag ein weiterer Fokus auf Konnektivitätsanalysen von Hochgebirgsregionen und Extremereignissen. Die Kombination und Verknüpfung der Modellierung von Extremereignissen mit numerischen Modellen und Konnektivitätsanalysen ist ein neuer und innovativer Ansatz, um auf diese Weise jeweils Rückschlüsse von den Ergebnissen der einen Methodik auf die Ergebnisse der anderen Methodik herzuleiten. Auf diese Weise konnten auf der einen Seite mit Hilfe des ECA-Ansatzes und des ICs Erkenntnisse für mögliche zukünftige Extremereignisse und die Modellierung dieser Extremszenarien, gewonnen werden. Auf der anderen Seite konnten durch die Modellierungen von Muren, Erkenntnisse über die Veränderung der Konnektivität durch Muren, die im weiteren Verlauf kaskadenhaft zu Durchbruchsfluten führen, gewonnen werden. Das Hauptziel war dabei, ein Extremereignis mit Kaskadeneffekten, wie das Extremereignis vom 17.07.2010 im Schwarzenseebachtal, durch die Modellierung zu untersuchen und herauszufinden, welche Auswirkungen solch ein Extremereignis auf die Konnektivität hat. Durch die Modellierung solch eines kaskadenhaften Extremereignisses wie dem Extremereignis im Schwarzenseebachtal, konnten Erkenntnisse für die Modellierung von Extremszenarien gewonnen werden. Sowohl bei dem modellierten kaskadenhaften Extremereignis, welches dem Extremereignis von 2010 im Schwarzenseebachtal gleicht, als auch bei den modellierten kaskadenhaften Extremszenarien, handelte es sich nach PÖPPL und SASS (2020) auf Grundlage der Interaktions-Matrize von GILL und MALAMUD (2014) um die Prozesstypen 1b und 2.

Die Konnektivitätsanalysen können erklären, wo die Stauungen beim Extremereignis von 2010 aufgetreten sind. Des Weiteren können mit den Konnektivitätsanalysen Aussagen getroffen werden, in welchen Einzugsgebieten von Gerinnemuren potenziell mehr Material als in anderen Einzugsgebieten von Gerinnemuren mobilisiert werden könnte. Diese Erkenntnisse konnten in eines der modellierten Extremszenarien integriert werden, um Folgenabschätzungen zu ermöglichen. Die modellierten Murablagerungen werden mit den Konnektivitätsanalysen untersucht, um Veränderungen von solchen Muren, die kaskadenhafte Folgeereignisse hervorrufen, auf die Konnektivität festzustellen. Es fällt auf, dass sich sowohl die laterale Konnektivität an einigen Hangbereichen als auch die longitudinale Konnektivität bei den Stauungsbereichen dabei verringert. Grundsätzlich weist das Untersuchungsgebiet jedoch eine hohe Konnektivität auf, wie der IC und der ECA-Ansatz verdeutlichen. So wurde beim ECA-Ansatz über 55% des Untersuchungsgebietes als gekoppelt ausgewiesen, wobei insbesondere die orographisch linke Seite eine hohe Konnektivität aufweist, wie auch die Ergebnisse des ICs bestätigen. Das verwendete numerische Modell ermöglicht Rückschlüsse auf die Prozesseigenschaften des Extremereignisses von 2010, basierend auf den kalibrierten Eingabeparametern und der Modellierungskonzeption.

Das Thema und die Kombination von Modellierung mit einem nummerischen Modell sowie von Konnektivitätsanalysen, im Kontext eines Extremereignisses mit Kaskadeneffekten, ist ein multidimensionales Thema, welches weitere Forschung benötigt. Die Kombination der Methoden ist ein neuer Ansatz, der in der Literatur bisher kaum behandelt wird. Nach dieser Arbeit bleiben weitere Fragen offen, insbesondere im Hinblick auf mögliche Synergien durch die beiden Forschungsfelder – numerische Modellierung sowie Konnektivitätsanalysen – in der Geomorphologie. Ein mögliches Forschungsfeld ergibt sich dabei für die Naturgefahren- und Risikoforschung, die auf Grundlage der angewendeten Methodiken und der Forschungsergebnisse weitere Schlussfolgerungen im Hinblick auf mögliche Präventionsmaßnahmen herleiten können. Hierbei sind insbesondere die Ergebnisse der Extremszenarien und die Konzeption der Extremszenarien mit Hilfe der Ergebnisse der Konnektivitätsanalysen wichtige Grundlagen für die Beurteilung der Risiko- und Gefahreneinschätzung.

## 8. Literaturverzeichnis

- ABE, K. und K. KONAGAI (2016): Numerical simulation for runout process of debris flow using depth-averaged material point method. In: Soils and Foundations 56 (5): 869–888.
- ABRAHAM, M. T., N. SATYAM, B. PRADHAN und H. TIAN (2022): Debris flow simulation 2D (DFS 2D): Numerical modelling of debris flows and calibration of friction parameters. In: Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 14 (6): 1747–1760.
- AHNERT, F. (2015): Einführung in die Geomorphologie. UTB Geowissenschaften, Geologie. Stuttgart.
- ARCGIS PRO (2023): An overview of the Spatial Analyst toolbox. Internet: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm> (29.09.2023).
- BAGGIO, T., M. MERGILI und V. D'AGOSTINO (2021): Advances in the simulation of debris flow erosion: The case study of the Rio Gere (Italy) event of the 4th August 2017. In: Geomorphology 381: 107664.
- BAYISSA, L. F. (2017): Back Calculation of Debris Flow Run-Out & Entrainment Using the Voellmy Rheology. Masterarbeit. Trondheim. Internet: [https://ntuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2457822/16897\\_FULLTEXT.pdf?sequence=1](https://ntuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2457822/16897_FULLTEXT.pdf?sequence=1).
- BECKER, L. P. (1989): Die Geologie der Sölkäler. 500 Millionen Jahre Erdgeschichte. In: HÖLLRIEGL, R. (Hrsg.) (1989): Naturparkführer Sölkäler. Streifzüge durch Lebensbereiche von Natur und Mensch. Graz: 13–19.
- BEGUERIA, S., M. V. HEES und M. GEERTSEMA (2009): Comparison of three landslide runout models on the Turnoff Creek rock avalanche, British Columbia. Internet: <http://rgdoi.net/10.13140/2.1.4569.3767> (11.09.2023).
- BEL, C., F. LIÉBAULT, O. NAVRATIL, N. ECKERT, H. BELLOT, F. FONTAINE und D. LAIGLE (2017): Rainfall control of debris-flow triggering in the Réal Torrent, Southern French Prealps. In: Geomorphology 291: 17–32.
- BENTZ, B. J. und A. M. JÖNSSON (2015): Modeling Bark Beetle Responses to Climate Change. In: (2015): Bark Beetles. 533–553. Internet: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124171565000137> (29.09.2023).
- BERG, P., C. MOSELEY und J. O. HAERTER (2013): Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. In: Nature Geoscience 6 (3): 181–185.
- BERGMEISTER, K., J. SUDA, J. HÜBL und F. RUDOLF-MIKLAU (2009): Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Internet: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783433600283> (11.09.2023).

- BOHNER, A., S. WINTER, B. KRAML und W. HOLZNER (2013): Destructive and constructive effects of mudflows – primary succession and success of pasture regeneration in the nature park Sölktäler (Styria, Austria). In: (2013): Conference Volume 5th Symposium for Research in Protected Areas, Salzburger Nationalparkfonds, Band 5. Matrei in Osttirol: 71–74.
- BORSELLI, L., P. CASSI und D. TORRI (2008): Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. In: CATENA 75 (3): 268–277.
- BOURRIER, F., L. DORREN und BERGER (2012): Full scale field tests on rockfall impacting trees felled transverse to the slope. In: (2012): 12th Congress INTERPRAEVENT, Band 12. Grenoble.
- BRACKEN, L. J. und J. CROKE (2007): The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. In: Hydrological Processes 21 (13): 1749–1763.
- BRACKEN, L. J., L. TURNBULL, J. WAINWRIGHT und P. BOGAART (2015): Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales: SEDIMENT CONNECTIVITY: SEDIMENT TRANSFER AT MULTIPLE SCALES. In: Earth Surface Processes and Landforms 40 (2): 177–188.
- BRIERLEY, G., K. FRYIRS und V. JAIN (2006): Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. In: Area 38 (2): 165–174.
- BURT, T. P. und R. J. ALLISON (Hrsg.) (2010): Sediment cascades: an integrated approach. Chichester ; Hoboken, NJ.
- CARSON, M. A. und M. J. KIRKBY (2009): Hillslope form and process. Cambridge.
- CAVALLI, M., S. CREMA und L. MARCHI (2014): Guidelines on the Sediment Connectivity ArcGis Toolbox and stand-alone application. Internet: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3243.5361> (29.09.2023).
- CAVALLI, M., P. TAROLLI, L. MARCHI und G. DALLA FONTANA (2008): The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. In: CATENA 73 (3): 249–260.
- CAVALLI, M., S. TREVISANI, F. COMITI und L. MARCHI (2013): Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. In: Geomorphology 188: 31–41.
- CHARTIN, C., O. EVRARD, Y. ONDA, J. PATIN, I. LEFÈVRE, C. OTTLÉ, S. AYRAULT, H. LEPAGE und P. BONTÉ (2013): Tracking the early dispersion of contaminated sediment along rivers draining the Fukushima radioactive pollution plume. In: Anthropocene 1: 23–34.
- CHEN, L., C. J. VAN WESTEN, H. HUSSIN, R. L. CIUREAN, T. TURKINGTON, D. CHAVARRO-RINCON und D. P. SHRESTHA (2016): Integrating expert opinion with modelling for quantitative multi-hazard risk assessment in the Eastern Italian Alps. In: Geomorphology 273: 150–167.

- CHRISTEN, M., J. KOWALSKI und P. BARTEL (2010): RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. In: *Cold Regions Science and Technology* 63 (1–2): 1–14.
- CREMA, S. und M. CAVALLI (2018): SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. In: *Computers & Geosciences* 111: 39–45.
- CREMA, S., L. SCHENATO, B. GOLDIN, L. MARCHI und M. CAVALLI (2015): Toward the development of a stand-alone application for the assessment of sediment connectivity. In: *Rendiconti online della Società Geologica Italiana* 34: 58–61.
- CROKE, J., S. MOCKLER, P. FOGARTY und I. TAKKEN (2005): Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. In: *Geomorphology* 68 (3): 257–268.
- CROZIER, M. J. und T. GLADE (¹2005): Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach. In: GLADE, T., M. ANDERSON und M. J. CROZIER (Hrsg.) (¹2005): *Landslide Hazard and Risk*. 1–40. Internet: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470012659.ch1> (10.09.2023).
- CRUDEN, D. M. und D. J. VARNES (1996): Landslide type and processes. In: (1996): *Landslides: investigations and mitigation, Special Report*, Band 247. Washington, D. C: 36–75.
- DIKAU, R., K. EIBISCH, J. EICHEL, K. MEßENZEHL und M. SCHLUMMER-HELD (2019): *Geomorphologie*. Berlin, Heidelberg. Internet: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-59402-5> (10.09.2023).
- DIKAU, R. und EUROPEAN COMMISSION (Hrsg.) (1996): Landslide recognition: identification, movement, and causes. Publication / International Association of Geomorphologists. Chichester ; New York.
- DRAGO, E. C., A. R. PAIRA und K. M. WANTZEN (2008): Channel-floodplain geomorphology and connectivity of the Lower Paraguay hydrosystem. In: *Ecohydrology & Hydrobiology* 8 (1): 31–48.
- DRESCHER, A. (2002): Grauerlenbestände im Naturpark Sölkäler (Niedere Tauern, Steiermark). In: *Stapfia* (80): 417–434.
- EUROPEAN COMMISSION. DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH (2009): Principles of multi-risk assessment: interaction amongst natural and man-induced risks. LU. Internet: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/30886> (27.08.2023).
- EVANS, S. G., N. F. BISHOP, L. FIDEL SMOLL, P. VALDERRAMA MURILLO, K. B. DELANEY und A. OLIVER-SMITH (2009): A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. In: *Engineering Geology* 108 (1): 96–118.
- FISCHER, J.-T., J. KOWALSKI und S. P. PUDASAINI (2012): Topographic curvature effects in applied avalanche modeling. In: *Cold Regions Science and Technology* 74–75: 21–30.

- FRYIRS, K. (2013): (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 38 (1): 30–46.
- FRYIRS, K. A., G. J. BRIERLEY, N. J. PRESTON und M. KASAI (2007a): Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. In: *CATENA* 70 (1): 49–67.
- FRYIRS, K. A., G. J. BRIERLEY, N. J. PRESTON und J. SPENCER (2007b): Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upper Hunter catchment, New South Wales, Australia. In: *Geomorphology* 84 (3): 297–316.
- GEMS, B., J. KAMMERLANDER, M. MOSER und M. AUFLEGER (2020): Fluviaile Feststoffereignisse. In: GLADE, T., M. MERGILI und K. SATTNER (Hrsg.) (2020): *ExtremA 2019 - Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. Wien: 287–316.
- GHESTEM, M., R. C. SIDLE und A. STOKES (2011): The Influence of Plant Root Systems on Subsurface Flow: Implications for Slope Stability. In: *BioScience* 61 (11): 869–879.
- GILL, J. C. und B. D. MALAMUD (2014): Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards: Interactions of Natural Hazards. In: *Reviews of Geophysics* 52 (4): 680–722.
- GLADE, T., R. BELL, P. DOBESBERGER, C. EMBLETON-HAMANN, R. FROMM, S. FUCHS, K. HAGEN, J. HÜBL, G. LIEB, J.-C. OTTO, F. PERZL, R. PETICZKA, C. PRAGER, C. SAMIMI, O. SASS, W. SCHÖNER, D. SCHRÖTER, L. SCHROTT, C. ZANGERL und A. ZEIDLER (2014): Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre. In: KROMPKOLB, H. (Hrsg.) (2014): *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. 557–600. Internet: [https://ucris.univie.ac.at/portal/en/publications/der-einfluss-des-klimawandels-auf-die-reliefsphare\(9dd361b4-1f73-460c-926a-87ab2d1654f4\)/export.html](https://ucris.univie.ac.at/portal/en/publications/der-einfluss-des-klimawandels-auf-die-reliefsphare(9dd361b4-1f73-460c-926a-87ab2d1654f4)/export.html) (25.05.2023).
- GLADE, T. und M. J. CROZIER (¹2005a): The Nature of Landslide Hazard Impact. In: GLADE, T., M. ANDERSON und M. J. CROZIER (Hrsg.) (¹2005a): *Landslide Hazard and Risk*. 41–74. Internet: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470012659.ch2> (10.09.2023).
- GLADE, T. und M. J. CROZIER (¹2005b): A Review of Scale Dependency in Landslide Hazard and Risk Analysis. In: GLADE, T., M. ANDERSON und M. J. CROZIER (Hrsg.) (¹2005b): *Landslide Hazard and Risk*. 75–138. Internet: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470012659.ch3> (10.09.2023).
- GLADE, T., M. MERGILI und K. SATTNER (Hrsg.) (¹2020): *ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. Göttingen. Internet: <https://www.vr-elibrary.de/doi/book/10.14220/9783737010924> (31.03.2023).
- GOBIET, A., S. KOTLARSKI, M. BENISTON, G. HEINRICH, J. RAJCZAK und M. STOFFEL (2014): 21st century climate change in the European Alps—A review. In: *Science of The Total Environment* 493: 1138–1151.

- GROTZINGER, J. und T. JORDAN (2017): Press/Siever Allgemeine Geologie. Berlin, Heidelberg. Internet: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-48342-8> (18.03.2020).
- GRUBER, F. E. und M. MERGILI (2013): Regional-scale analysis of high-mountain multi-hazard and risk indicators in the Pamir (Tajikistan) with GRASS GIS. In: Natural Hazards and Earth System Sciences 13 (11): 2779–2796.
- HANTEL, M. (1997): Klimatologie. In: RAITH, W., L. BERGMANN und C. SCHAEFER (Hrsg.) (1997): Erde und Planeten, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 7. Berlin: 311–426.
- HARVEY, A. M. (2002): Effective timescales of coupling within fluvial systems. In: Geomorphology 44 (3): 175–201.
- HASELBERGER, S., L. OHLER, R. R. JUNKER, J. OTTO, T. GLADE und S. KRAUSHAAR (2021): Quantification of biogeomorphic interactions between small-scale sediment transport and primary vegetation succession on proglacial slopes of the Gepatschferner, Austria. In: Earth Surface Processes and Landforms 46 (10): 1941–1952.
- HE, Z. und W. WENG (2021): A Risk Assessment Method for Multi-Hazard Coupling Disasters. In: Risk Analysis 41 (8): 1362–1375.
- HECKMANN, T., M. CAVALLI, O. CERDAN, S. FOERSTER, M. JAVAUX, E. LODE, A. SMETANOVÁ, D. VERICAT und F. BRARDINONI (2018): Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. In: Earth-Science Reviews 187: 77–108.
- HECKMANN, T. und D. MORCHE (Hrsg.) (2019): Geomorphology of Proglacial Systems: Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes. Geography of the Physical Environment. Cham. Internet: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-94184-4> (06.03.2019).
- HECKMANN, T. und W. SCHWANGHART (2013): Geomorphic coupling and sediment connectivity in an alpine catchment — Exploring sediment cascades using graph theory. In: Geomorphology 182: 89–103.
- HERMANN, S. (1996): Initiale Bergzerreiung als Gefahrenherd für Bergstürze, Nährgebiet für Muren und Großrutschungen. Beispiele aus dem Naturpark Sölkäler Österreich. In: (1996): Band 1. Garmisch-Partenkirchen: 409–418. Internet: [http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload\\_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/1996\\_1\\_409.pdf](http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/1996_1_409.pdf) (14.07.2023).
- HERMANN, S. und L. P. BECKER (1998): Rutschungs- und Erosionserscheinungen im Naturpark Sölkäler, ausgelöst durch ein Niederschlagsereignis vom 29. Juni 1994. In: (1998): Mitteilungen des Naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark, Band 128. Graz: 5–15. Internet: [https://www.zobodat.at/pdf/MittNatVerSt\\_128\\_0005-0015.pdf](https://www.zobodat.at/pdf/MittNatVerSt_128_0005-0015.pdf) (14.07.2023).
- HOCHSCHWARZER, M. (2009): Vergleich von Simulationsmodellen zur Reichweitenabschätzung alpiner Murgänge am Beispiel südtiroler Ereignisse.

Diplomarbeit. Wien. Internet:  
<https://epub.boku.ac.at/obvbokhs/content/titleinfo/1036464/full.pdf>.

HOHENSINNER, S., S. MUHAR, M. JUNGWIRTH, G. POHL, A. EICHSBERGER, U. BLANDA, W. PORZER und F. SEEBAKER (2008): Konzept für die Entwicklung des Fluss-Auen-Systems Steirische Enns (Mandling – Hieflau): Hochwasserschutz – Gewässerökologie – Flusslandschaftsentwicklung – Siedlungsentwicklung – Erholungsnutzung. Leitlinie. Wien.

HÖLLRIEGL, R. und H. MAYRHOFER (1989): Der Alpenraum – Lebensraum für Pflanze, Tier und Mensch. In: HÖLLRIEGL, R. (Hrsg.) (1989): Naturparkführer Sölktaler: Streifzüge durch Lebensbereiche von Natur und Mensch. Graz: 9–12.

HUGGEL, C., S. ZGRAGGEN-OSWALD, W. HAEBERLI, A. KÄÄB, A. POLKVOJ, I. GALUSHKIN und S. G. EVANS (2005): The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. In: Natural Hazards and Earth System Sciences 5 (2): 173–187.

VAN HUSEN, D. (1987): Die Ostalpen in den Eiszeiten. Aus der geologischen Geschichte Österreichs. Wien.

HUSSIN, H. Y., L. CHEN, R. CIUREAN, C. J. VAN WESTEN, P. REICHENBACH und S. STERLACCHINI (2014): Analysing changes in landslide risk using multi temporal landslide susceptibility and run-out modeling on a regional scale : extended abstract. In: (2014).

HUTTER, K., B. SVENDSEN und D. RICKENMANN (1994): Debris flow modeling: A review. In: Continuum Mechanics and Thermodynamics 8 (1): 1–35.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2023): Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Internet: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book> (12.09.2023).

IVERSON, R. M. (1997): The physics of debris flows. In: Reviews of Geophysics 35 (3): 245–296.

JAKOBY, O., H. LISCHKE und B. WERTELINGER (2019): Climate change alters elevational phenology patterns of the European spruce bark beetle (*Ips typographus*). In: Global Change Biology 25 (12): 4048–4063.

JUNGWIRTH, M., G. HAIDVOGL und F. und A. INSTITUT FÜR WASSERVORSORGE Gewässerökologie und Abfallwirtschaft Abteilung für Hydrobiologie (1996): Die Steirische Enns: Fischfauna und Gewässermorphologie. Internet: <https://books.google.at/books?id=G4eBAGAACAAJ>.

KAITNA, R., D. PRENNER und J. HÜBL (2020): Muren. In: GLADE, T., M. MERGILI und K. SATTLER (Hrsg.) (2020): ExtremA 2019 - Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. Wien: 489–510.

- KAPPES, M. S., M. KEILER, K. VON ELVERFELDT und T. GLADE (2012): Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. In: *Natural Hazards* 64 (2): 1925–1958.
- KEESSTRA, S., J. P. NUNES, P. SACO, T. PARSONS, R. POEPLI, R. MASSELINK und A. CERDÀ (2018): The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics? In: *Science of The Total Environment* 644: 1557–1572.
- KLEIN, J. A., C. M. TUCKER, C. E. STEGER, A. NOLIN, R. REID, K. A. HOPPING, E. T. YEH, M. S. PRADHAN, A. TABER, D. MOLDEN, R. GHATE, D. CHOUDHURY, I. ALCÁNTARA-AYALA, S. LAVOREL, B. MÜLLER, A. GRÉT-REGAMEY, R. B. BOONE, P. BOURGERON, E. CASTELLANOS, X. CHEN, S. DONG, M. KEILER, R. SEIDL, J. THORN und K. YAGER (2019): An integrated community and ecosystem-based approach to disaster risk reduction in mountain systems. In: *Environmental Science & Policy* 94: 143–152.
- KRAML, B. (2016): Analysis of the initial vegetation development on sown sites after landslides in the valley Schwarzenseebach, Nature Park Sölkäler (Styria, Austria). Masterarbeit. Wien.
- KUMAR, R., V. JAIN, G. PRASAD BABU und R. SINHA (2014): Connectivity structure of the Kosi megafan and role of rail-road transport network. In: *Geomorphology* 227: 73–86.
- LAATSCH, W. und W. GROTTENTHALER (1972): Typen der Massenverlagerung in den Alpen und ihre Klassifikation. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 91 (1): 309–339.
- LAND STEIERMARK (2023): GIS-Steiermark. Arbeitskarten, Dienste und Geodaten Download. Internet: <https://www.landesentwicklung.steiermark.at/cms/ziel/143660187/DE/> (07.06.2023).
- LANDA, M., M. NETELER, M. METZ, A. PETRASOVA, GLYNN, HAMISHB, VACLAV PETRAS, HUHABLA, HUIDAE CHO, L. DELUCCHI, P. ZAMBELLI, M. BARTON, T. ZIGO, Y. CHEMIN, MĀRIS NARTIŠS, OSTEPOK, H. KUDRNOVSKY, M. LENNERT, N. LARSSON, S. BLUMENTRATH, L. KLADIVOVA, W. KYNGESBURY, A. GHISLA, V. ANDREO, 積丹尼 DAN JACOBSON, D. OVSIEJKO, M. DI LEO, H. MITASOVA, C. TAWALIKA und O. PESEK (2022): OSGeo/grass: GRASS GIS 8.0.1. Internet: <https://zenodo.org/record/6264482> (15.09.2023).
- LANE, S. N., M. BAKKER, C. GABBUD, N. MICHELETTI und J.-N. SAUGY (2017): Sediment export, transient landscape response and catchment-scale connectivity following rapid climate warming and Alpine glacier recession. In: *Geomorphology* 277: 210–227.
- LANE, S. N. und K. S. RICHARDS (1997): Linking River Channel Form and Process: Time, Space and Causality Revisited. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 22 (3): 249–260.
- LATOCHA, A. (2014): Geomorphic connectivity within abandoned small catchments (Stołowe Mts, SW Poland). In: *Geomorphology* 212: 4–15.

- LISENBY, P. E. und K. A. FRYIRS (2017): ‘Out with the Old?’ Why coarse spatial datasets are still useful for catchment-scale investigations of sediment (dis)connectivity. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 42 (10): 1588–1596.
- LORENZINI, G. und N. MAZZA (2004): Debris flow: phenomenology and rheological modelling. Southampton ; Boston.
- MARÇAL, M., G. BRIERLEY und R. LIMA (2017): Using geomorphic understanding of catchment-scale process relationships to support the management of river futures: Macaé Basin, Brazil. In: *Applied Geography* 84: 23–41.
- MAYRHOFER, H., M. MAYRHOFER und Ch. SCHEUER (1989): Die Pflanzenwelt der Sölkäler. Begegnungen auf naturkundlichen Wanderungen. In: HÖLLRIEGL, R. (Hrsg.) (1989): *Naturparkführer Sölkäler: Streifzüge durch Lebensbereiche von Natur und Mensch*. Graz: 30–77.
- MERGILI, M. (2023): r.avaflow - The mass flow simulation tool. r.avaflow - The mass flow simulation tool. r.avaflow.direct Web interface. Internet: <https://www.avaflow.org/direct.php> (09.06.2023).
- MERGILI, M., A. EMMER, A. JUŘICOVÁ, A. COCHACHIN, J.-T. FISCHER, C. HUGGEL und S. P. PUDASAINI (2018a): How well can we simulate complex hydro-geomorphic process chains? The 2012 multi-lake outburst flood in the Santa Cruz Valley (Cordillera Blanca, Perú): How well can we simulate complex hydro-geomorphic process chains? In: *Earth Surface Processes and Landforms* 43 (7): 1373–1389.
- MERGILI, M., J.-T. FISCHER, J. KRENN und S. P. PUDASAINI (2017a): r.avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. In: *Geoscientific Model Development* 10 (2): 553–569.
- MERGILI, M., J.-T. FISCHER und S. P. PUDASAINI (2017b): Process Chain Modelling with r.avaflow: Lessons Learned for Multi-hazard Analysis. In: MIKOS, M., B. TIWARI, Y. YIN und K. SASSA (Hrsg.) (2017b): *Advancing Culture of Living with Landslides*. Cham: 565–572. Internet: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-53498-5\\_65](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-53498-5_65) (15.09.2023).
- MERGILI, M., B. FRANK, J.-T. FISCHER, C. HUGGEL und S. P. PUDASAINI (2018b): Computational experiments on the 1962 and 1970 landslide events at Huascarán (Peru) with r.avaflow: Lessons learned for predictive mass flow simulations. In: *Geomorphology* 322: 15–28.
- MERGILI, M., M. JABOYEDOFF, J. PULLARELLO und S. P. PUDASAINI (2020a): Back calculation of the 2017 Piz Cengalo–Bondo landslide cascade with r.avaflow: what we can do and what we can learn. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20 (2): 505–520.
- MERGILI, M. und S. P. PUDASAINI (2021): Advanced Methods for Simulating Complex Landslides. In: TIWARI, B., K. SASSA, P. T. BOBROWSKY und K. TAKARA (Hrsg.) (2021): *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk, ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction*. Cham: 211–216. Internet: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-60706-7\\_18](http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-60706-7_18) (11.09.2023).

- MERGILI, M., S. P. PUDASAINI, A. EMMER, J.-T. FISCHER, A. COCHACHIN und H. FREY (2020b): Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). In: *Hydrology and Earth System Sciences* 24 (1): 93–114.
- MEYRAT, G., B. MCARDELL, C. R. MÜLLER, J. MUNCH und P. BARTELT (2023): Voellmy-type mixture rheologies for dilatant, two-layer debris flow models. In: *Landslides*. Internet: <https://link.springer.com/10.1007/s10346-023-02092-w> (11.09.2023).
- MIKOŠ, M. und N. BEZAK (2021): Debris Flow Modelling Using RAMMS Model in the Alpine Environment With Focus on the Model Parameters and Main Characteristics. In: *Frontiers in Earth Science* 8: 605061.
- MOOS, C., L. DORREN und M. STOFFEL (2017): Quantifying the effect of forests on frequency and intensity of rockfalls. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17 (2): 291–304.
- NESSYAHU, H. und E. TADMOR (1990): Non-oscillatory central differencing for hyperbolic conservation laws. In: *Journal of Computational Physics* 87 (2): 408–463.
- NETELER, M. und H. MITASOVA (2008): Open source GIS: a GRASS GIS approach. New York, NY.
- NICOLL, T. und G. BRIERLEY (2017): Within-catchment variability in landscape connectivity measures in the Garang catchment, upper Yellow River. In: *Geomorphology* 277: 197–209.
- ONR 24800 (2009): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung.
- OWOLABI, T. A. und M. SAJJAD (2023): A global outlook on multi-hazard risk analysis: A systematic and scientometric review. In: *International Journal of Disaster Risk Reduction* 92: 103727.
- PACHINGER, B. und M. KROPF (2015): Wildbienen (Hymenoptera: Apiformes) und Heuschrecken (Orthoptera) im Schwarzenbach-Talboden und auf angrenzenden Almen des Naturparks Sölktaler. In: *Verhandlungen der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Wien*. Frueher: Verh.des Zoologisch-Botanischen Vereins in Wien. seit 2014 „Acta ZooBot Austria“ (152): 135–145.
- PFIFFNER, O. A. (2015): Geologie der Alpen. UTB. Bern.
- POEPPL, R. E., S. D. KEESSTRA und J. MAROULIS (2017): A conceptual connectivity framework for understanding geomorphic change in human-impacted fluvial systems. In: *Geomorphology* 277: 237–250.
- POEPPL, R. E., M. KEILER, K. VON ELVERFELDT, I. ZWEIMUELLER und T. GLADE (2012): The influence of riparian vegetation cover on diffuse lateral sediment connectivity and biogeomorphic processes in a medium-sized agricultural catchment, austria. In: *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 94 (4): 511–529.

- PÖPPL, R. und O. SASS (2020): Multi-Hazards und Kaskadeneffekte. In: GLADE, T., M. MERGILI und K. SATTLER (Hrsg.) (2020): ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. 605–620.
- PUDASAINI, S. P. (2012): A general two-phase debris flow model. In: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117 (F3). Internet: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JF002186> (13.09.2023).
- PUDASAINI, S. P. und M. MERGILI (2019): A Multi-Phase Mass Flow Model. In: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 124 (12): 2920–2942.
- R CORE TEAM (2022): R: A Language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna. Internet: <https://www.R-project.org/> (15.09.2023).
- RAMMS (2022): RAMMS::DEBRISFLOW User Manual v1.8.0 Debris Flow. Internet: [https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS\\_DBF\\_Manual.pdf](https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_DBF_Manual.pdf) (28.08.2023).
- RESSEL, M. und M. WIRTITSCH (2007): Projektbericht „Kulturlandschaftsmanagement in den Naturparken Sölktaler und Grebenzen“ – Teil Naturpark Sölktaler. Biotopkartierung und Beschreibung des Natura 2000 Gebietes.
- RICE, S. P. (2017): Tributary connectivity, confluence aggradation and network biodiversity. In: *Geomorphology* 277: 6–16.
- RICKENMANN, D., D. LAIGLE, B. W. MCARDELL und J. HÜBL (2006): Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. In: *Computational Geosciences* 10 (2): 241–264.
- RUDOLF-MIKLAU, F., J. HÜBL und INTERNATIONAL RESEARCH SOCIETY INTERPRAEVENT (Hrsg.) (2009): Alpine Naturkatastrophen: Lawinen, Muren, Felsstürze, Hochwässer. Graz Stuttgart.
- RUSK, J., A. MAHARJAN, P. TIWARI, T.-H. K. CHEN, S. SHNEIDERMAN, M. TURIN und K. C. SETO (2022): Multi-hazard susceptibility and exposure assessment of the Hindu Kush Himalaya. In: *Science of The Total Environment* 804: 150039.
- SALM, B. (1993): Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches. In: *Annals of Glaciology* 18: 221–226.
- SANDERCOCK, P. J. und J. M. HOOKE (2011): Vegetation effects on sediment connectivity and processes in an ephemeral channel in SE Spain. In: *Journal of Arid Environments* 75 (3): 239–254.
- SAVAGE, S. B. und K. HUTTER (1989): The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. In: *Journal of Fluid Mechanics* 199: 177–215.
- SCHNEIDER, D., C. HUGGEL, A. COCHACHIN, S. GUILLÉN und J. GARCÍA (2014): Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. In: *Advances in Geosciences* 35: 145–155.

- SCHOPPER, N., M. MERGILI, S. FRIGERIO, M. CAVALLI und R. POEPLI (2019): Analysis of lateral sediment connectivity and its connection to debris flow intensity patterns at different return periods in the Fella River system in northeastern Italy. In: *Science of The Total Environment* 658: 1586–1600.
- SCHUSTER, R., A. DAURER, H.-G. KRENMAYR, M. LINNER, G. W. MANDL, G. PESTAL und J. M. REITNER (2013): *Rocky Austria: Geologie von Österreich kurz und bunt*.
- SELBY, M. J. (1993): *Hillslope materials and processes*. Oxford.
- SHUGAR, D. H., M. JACQUEMART, D. SHEAN, S. BHUSHAN, K. UPADHYAY, A. SATTAR, W. SCHWANGHART, S. MCBRIDE, M. V. W. DE VRIES, M. MERGILI, A. EMMER, C. DESCHAMPS-BERGER, M. McDONNELL, R. BHAMBRI, S. ALLEN, E. BERTHIER, J. L. CARRIVICK, J. J. CLAGUE, M. DOKUKIN, S. A. DUNNING, H. FREY, S. GASCOIN, U. K. HARITASHYA, C. HUGGEL, A. KÄÄB, J. S. KARGEL, J. L. KAVANAUGH, P. LACROIX, D. PETLEY, S. RUPPER, M. F. AZAM, S. J. COOK, A. P. DIMRI, M. ERIKSSON, D. FARINOTTI, J. FIDDES, K. R. GNYAWALI, S. HARRISON, M. JHA, M. KOPPES, A. KUMAR, S. LEINSS, U. MAJEEED, S. MAL, A. MUHURI, J. NOETZLI, F. PAUL, I. RASHID, K. SAIN, J. STEINER, F. UGALDE, C. S. WATSON und M. J. WESTOBY (2021): A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. In: *Science* 373 (6552): 300–306.
- SKILODIMOU, H. D., G. D. BATHRELLOS, K. CHOUSIANITIS, A. M. YOUSSEF und B. PRADHAN (2019): Multi-hazard assessment modeling via multi-criteria analysis and GIS: a case study. In: *Environmental Earth Sciences* 78 (2): 47.
- SOMOS-VALENZUELA, M. A., R. E. CHISOLM, D. S. RIVAS, C. PORTOCARRERO und D. C. MCKINNEY (2016): Modeling a glacial lake outburst flood process chain: the case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (6): 2519–2543.
- SOUZA, J. O. P., A. C. B. CORREA und G. J. BRIERLEY (2016): An approach to assess the impact of landscape connectivity and effective catchment area upon bedload sediment flux in Saco Creek Watershed, Semiarid Brazil. In: *CATENA* 138: 13–29.
- TAKAHASHI, T. (2014): *Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures*. Boca Raton, FL London New York.
- TANG, J., P. CUI, H. WANG und Y. LI (2023): A numerical model of debris flows with the Voellmy model over a real terrain. In: *Landslides* 20 (4): 719–734.
- TARBOTON, D. (2023): TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models). Internet: <https://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/>.
- THALER, T., M.-S. ATTEMS und S. FUCHS (2018): Neue gesellschaftliche Herausforderungen im Naturgefahrenmanagement: Welche Entwicklungen kommen auf uns zu? In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70 (3): 230–235.
- TIRANTI, D., M. CAVALLI, S. CREMA, M. ZERBATO, M. GRAZIADEI, S. BARBERO, R. CREMONINI, C. SILVESTRO, G. BODRATO und F. TRESSO (2016): Semi-quantitative method for the assessment of debris supply from slopes to river in ungauged catchments. In: *Science of The Total Environment* 554–555: 337–348.

- TIRANTI, D., S. CREMA, M. CAVALLI und C. DEANGELI (2018): An Integrated Study to Evaluate Debris Flow Hazard in Alpine Environment. In: *Frontiers in Earth Science* 6. Internet: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2018.00060> (24.08.2023).
- TRAPER, S. (2016): Influential factors on the occurrence and characteristics of debris flow events in alpine regions: case studies from two geologically different regions in Styria. Masterarbeit. Wien.
- TRUJILLO-VELA, M. G., A. M. RAMOS-CAÑÓN, J. A. ESCOBAR-VARGAS und S. A. GALINDO-TORRES (2022): An overview of debris-flow mathematical modelling. In: *Earth-Science Reviews* 232: 104135.
- TURNBULL, B., E. T. BOWMAN und J. N. MC ELWAINE (2015): Debris flows: Experiments and modelling. In: *Comptes Rendus Physique* 16 (1): 86–96.
- TURNBULL, L., M.-T. HÜTT, A. A. IOANNIDES, S. KININMONTH, R. POEPLL, K. TOCKNER, L. J. BRACKEN, S. KEESSTRA, L. LIU, R. MASSELINK und A. J. PARSONS (2018): Connectivity and complex systems: learning from a multi-disciplinary perspective. In: *Applied Network Science* 3 (1): 11.
- UMWELTBUNDESAMT GMBH, OIKOS - INSTITUT FOR ANGEWANDTE ÖKOLOGIE & GRUNDLAGENFORSCHUNG und STIPA - BÜRO FÜR PLANUNG & BERATUNG IN ANGEWANDTER ÖKOLOGIE (2008): BIOTOPTYPEN-KATALOG der Steiermark. Granz. Internet: [https://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/12104068\\_110669295/b9589e04/Biotypen.pdf](https://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/12104068_110669295/b9589e04/Biotypen.pdf) (18.07.2023).
- UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION, (UNDRR) (2023): Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction. Terminology. Internet: <https://www.undrr.org/terminology> (24.08.2023).
- VAN WESTEN, C. J. und S. GREIVING (2017): Multi-hazard risk assessment and decision making. In: DALEZIOS, N. R. (Hrsg.) (2017): Environmental Hazards Methodologies for Risk Assessment and Management. 31–94. Internet: <https://iwaponline.com/ebooks/book/273/chapter/660015/Multi-hazard-risk-assessment-and-decision-making> (12.09.2023).
- VAN WESTEN, C., M. S. KAPPES, B. Q. LUNA, S. FRIGERIO, T. GLADE und J.-P. MALET (2014): Medium-Scale Multi-hazard Risk Assessment of Gravitational Processes. In: VAN ASCH, T., J. COROMINAS, S. GREIVING, J.-P. MALET und S. STERLACCHINI (Hrsg.) (2014): Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance, Advances in Natural and Technological Hazards Research, Band 34. Dordrecht: 201–231. Internet: [https://link.springer.com/10.1007/978-94-007-6769-0\\_7](https://link.springer.com/10.1007/978-94-007-6769-0_7) (24.05.2023).
- VARNES, D. J. (1978): Slope movement types and processes. In: (1978): Landslides, analysis and control, Special Report, Band 176. Washington, D. C: 11–33.
- VILCA, O., M. MERGILI, A. EMMER, H. FREY und C. HUGGEL (2021): The 2020 glacial lake outburst flood process chain at Lake Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Peru). In: *Landslides* 18 (6): 2211–2223.

- VOELLMY, A. (1955): Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Internet: <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=sbz-002:1955:73::218> (11.09.2023).
- WANG, Y., K. HUTTER und S. P. PUDASAINI (2004): The Savage-Hutter theory: A system of partial differential equations for avalanche flows of snow, debris, and mud. In: ZAMM 84 (8): 507–527.
- WARD, J. V. (1989): The Four-Dimensional Nature of Lotic Ecosystems. In: Journal of the North American Benthological Society 8 (1): 2–8.
- WEIDINGER, J. T. (2023): Feldkampagne. mündlich. Schwarzenseebachtal.
- WENDELER, C. S. I. (2008): Murgangrückhalt in Wildbächen - Grundlagen zu Planung und Berechnung von flexiblen Barrieren. Zürich.
- WOHL, E., B. P. BLEDSOE, R. B. JACOBSON, N. L. POFF, S. L. RATHBURN, D. M. WALTERS und A. C. WILCOX (2015): The Natural Sediment Regime in Rivers: Broadening the Foundation for Ecosystem Management. In: BioScience 65 (4): 358–371.
- WOHL, E., G. BRIERLEY, D. CADOL, T. J. COULTHARD, T. COVINO, K. A. FRYIRS, G. GRANT, R. G. HILTON, S. N. LANE, F. J. MAGILLIGAN, K. M. MEITZEN, P. PASSALACQUA, R. E. POEPL, S. L. RATHBURN und L. S. SKLAR (2019): Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. In: Earth Surface Processes and Landforms 44 (1): 4–26.
- WORNI, R., C. HUGGEL, J. J. CLAGUE, Y. SCHAUB und M. STOFFEL (2014): Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective. In: Geomorphology 224: 161–176.
- YANAGISAKI, G., M. AONO, H. TAKENAKA, M. TAMAMURA, K. NAKATANI, E. IWANAMI, S. HORIUCHI, Y. SATOFUKA und T. MIZUYAMA (2016): Debris Flow Simulation by Applying the Hyper KANAKO System for Water and Sediment Runoff from Overtopping Erosion of a Landslide Dam. In: International Journal of Erosion Control Engineering 9 (2): 43–57.
- ZAMG (2002): Station Kleinsölkatal. Internet: <http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/daten/klimadaten/stm/12800.htm> (30.05.2023).
- ZEPP, H., S. HARNISCHMACHER, J. HEGERT und T. KASIELKE (2023): Geomorphologie: Eine Einführung. Grundriss Allgemeine Geographie. Paderborn.
- ZEUG, S. C., K. O. WINEMILLER und S. TARIM (2005): Response of Brazos River Oxbow Fish Assemblages to Patterns of Hydrologic Connectivity and Environmental Variability. In: Transactions of the American Fisheries Society 134 (5): 1389–1399.
- ZISCHINSKY, U. (1969): Über Sackungen. In: Rock Mechanics Felsmechanik 1 (1): 30–52.

## 9. Anhang

### Startskript r.avaflow stauende Muren Extremereignis 2010

```
#r.avaflow start script for Debris Flow 17.07.2010
```

```
g.region -d
```

```
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/elevation.tif output=basal_watersh  
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/Anriss_FlaecheReclass.tif output=release_watershed  
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/Impact_1.tif output=impact  
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/trelease_raster.tif output=trelease
```

```
g.region -s rast=basal_watersh
```

```
r.avaflow prefix=maf2n2 cellsize=5 phases=x gravity=9.81 controls=0,0,1,0,1,0,0,0,0,2,0 elevation=basal_watersh  
trelease=trelease hrelease=release_watershed hdeposit=impact density=1800 friction=35,13,2,3 basal=-6.6,0,0  
special=0.05,0.0,1.0,5.0,1.0,100.0 dynfric=-0.6.0 cfl=0.4,0.001 slidepar=0.0,0.0,0.0  
thresholds=0.1,10000,10000,0.00001 time=10,1200 slomo=1.0 ctrlpoints=None visualization=0.1,5.0,5.0,1,100,2,-  
11000,9000,100,0.60,0.25,0.15,0.2,2.0,None,None,None
```

```
g.region -d
```

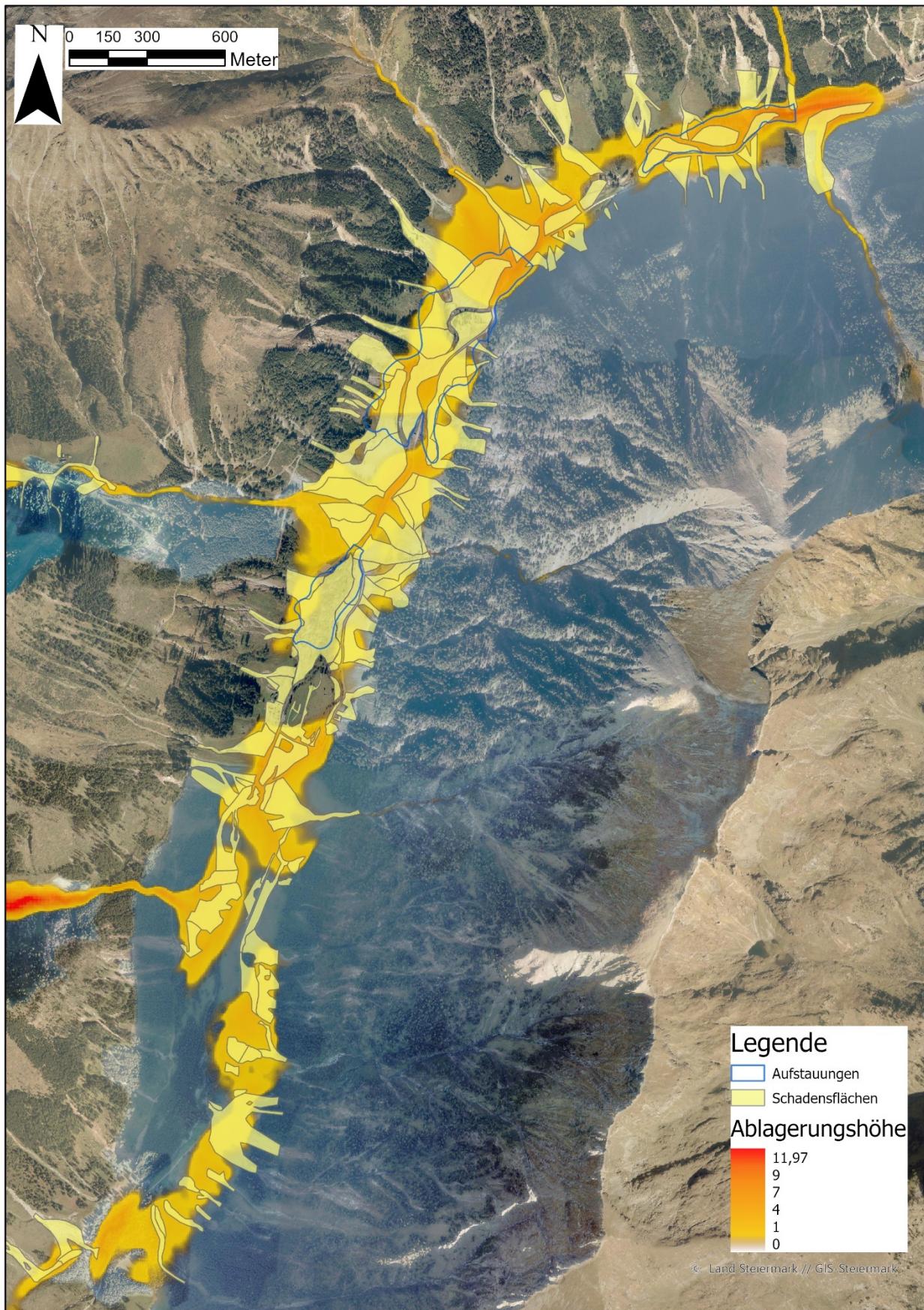
### Summary Textdatei Muren Extremereignis 2010

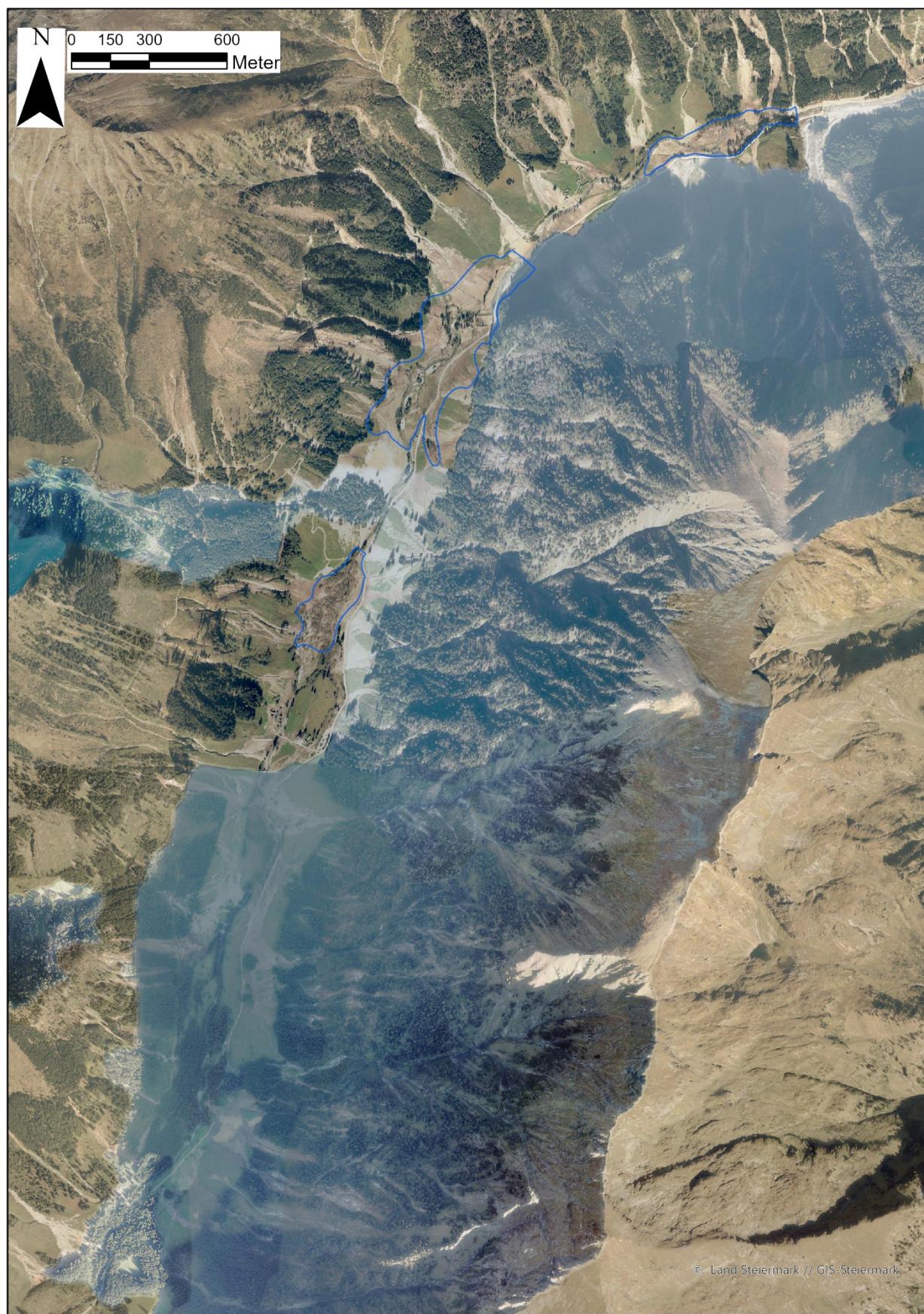
nout	nsum	cfl	tlength	tsum	dmax	vmax	volume	ekin	----
R	----	----	----	----	*4.000	----	*2700400.0	-----	
0	0	----	----	0.0	4.000	0.00	263075.0		
1	53	0.387	9.0	10.1	3.007	12.68	539652.1	21195851776	
2	111	0.385	8.2	20.0	3.087	14.00	555143.5	21406232576	
3	170	0.386	8.9	30.1	3.525	14.95	570706.1	21351483392	
4	227	0.383	9.0	40.1	3.787	15.57	586263.2	21703649280	
5	283	0.368	8.9	50.0	3.931	15.31	601457.9	21418104832	
6	342	0.376	8.4	60.0	3.886	15.26	616420.2	20077854720	
7	401	0.370	8.6	70.1	4.655	13.87	630690.4	17852680192	
8	459	0.368	8.6	80.1	5.056	12.70	643748.0	15520339968	
9	516	0.370	8.8	90.1	5.540	11.95	655818.3	13049265152	
10	571	0.368	9.5	100.2	6.749	11.29	666953.5	10706753536	
11	624	0.372	9.4	110.1	7.514	10.49	676962.4	8639995904	
12	677	0.372	9.3	120.0	7.884	9.63	685946.2	6939193856	
13	731	0.375	9.2	130.0	8.115	9.02	694248.9	5610313216	
14	786	0.371	9.2	140.1	8.136	8.53	701929.9	4627089920	
15	840	0.369	9.3	150.0	8.057	8.12	708912.6	3900044032	
16	894	0.369	9.3	160.0	8.114	7.84	715532.9	3383239168	
17	949	0.364	9.3	170.2	8.051	7.60	721968.7	2997591040	
18	1003	0.368	9.3	180.2	8.099	7.46	728035.2	2697489408	
19	1057	0.372	9.4	190.2	7.978	7.46	733899.6	2501768960	
20	1111	0.378	9.1	200.1	8.131	7.45	1240044.1	2442463488	
21	1169	0.377	8.1	210.1	8.336	13.73	1255812.4	15758980096	
22	1232	0.370	7.8	220.1	8.617	13.50	1272401.4	14788971520	
23	1292	0.371	9.0	230.1	9.027	11.65	1288848.2	14222068736	
24	1347	0.376	8.9	240.2	9.383	11.52	1305258.2	13923130368	
25	1402	0.385	8.9	250.1	9.459	11.23	1321303.1	14174199808	

26	1457	0.375	8.9	260.0	9.476	11.35	1337305.814254622720
27	1513	0.370	9.0	270.1	9.685	11.75	1353417.114076604416
28	1569	0.366	9.0	280.2	9.703	11.95	1369189.013633565696
29	1624	0.366	9.0	290.0	9.637	11.89	1384326.912827501568
30	1680	0.366	9.0	300.1	9.560	12.00	1399307.611722791936
31	1735	0.363	9.0	310.0	9.508	11.83	1413433.810543804416
32	1791	0.361	9.1	320.1	9.427	11.57	1427193.29404992512
33	1846	0.363	9.1	330.1	9.384	11.23	1440128.58381189632
34	1901	0.361	9.1	340.1	9.360	10.80	1452485.57492424192
35	1956	0.362	9.0	350.0	9.301	10.61	1464322.16713377792
36	2012	0.370	8.9	360.1	9.229	10.22	1475779.86021369344
37	2069	0.373	8.8	370.2	9.119	9.88	1486844.85458118656
38	2126	0.366	8.7	380.1	9.093	9.67	1497410.95014134784
39	2184	0.366	8.7	390.1	9.244	9.38	1507767.54604397568
40	2242	0.369	8.7	400.1	9.339	9.06	1517766.64277242624
41	2300	0.372	8.7	410.0	9.443	8.77	1527472.04023355904
42	2359	0.374	8.6	420.0	9.534	8.43	1537111.03807973632
43	2418	0.374	8.6	430.0	9.600	8.13	1546571.63647151104
44	2478	0.373	8.5	440.1	9.703	7.89	1556051.93514813184
45	2537	0.372	8.5	450.0	9.818	7.67	1565277.43416120320
46	2597	0.371	8.5	460.1	9.907	7.46	1574579.43346769152
47	2657	0.370	8.5	470.1	9.971	7.45	1583842.23305336064
48	2717	0.369	8.4	480.1	10.037	7.45	1593104.23286618112
49	2776	0.368	8.4	490.0	10.138	7.45	1602289.13286725376
50	2836	0.366	8.4	500.1	10.221	7.45	1611645.43292755456
51	2896	0.364	8.4	510.1	10.270	7.45	1621038.63322803712
52	2956	0.363	8.4	520.1	10.304	7.45	1630522.13370056960
53	3016	0.363	8.4	530.2	10.320	7.49	1640061.63442457088
54	3075	0.362	8.4	540.0	10.314	7.75	1649542.53524323840
55	3135	0.362	8.4	550.1	10.292	8.13	1659310.03618145280
56	3195	0.362	8.4	560.1	10.265	8.31	1669241.23708319232
57	3254	0.361	8.4	570.1	10.232	8.51	1679110.83790642432
58	3313	0.361	8.5	580.0	10.188	8.73	1689147.53870016000
59	3373	0.363	8.5	590.2	10.130	8.91	1699504.13946790400
60	3432	0.368	8.5	600.1	10.054	9.02	1709761.54023942656
61	3491	0.372	8.6	610.1	9.974	9.11	1720076.84093148416
62	3550	0.375	8.5	620.0	9.986	9.20	1730437.44116832256
63	3610	0.373	8.4	630.0	10.133	9.29	1740875.14076287232
64	3671	0.372	8.5	640.1	10.202	9.36	1751501.14121561088
65	3731	0.372	8.3	650.1	10.319	9.38	1761982.44046400768
66	3792	0.365	8.3	660.2	10.362	9.45	1772581.24050426624
67	3852	0.365	8.3	670.0	10.421	9.43	1783013.44034284032
68	3913	0.364	8.2	680.0	10.486	9.44	1793614.84013763328
69	3974	0.362	8.2	690.0	10.506	9.50	1804212.54006859776
70	4036	0.371	8.3	700.1	10.512	9.50	2675331.24314650112
71	4097	0.374	8.2	710.1	10.568	13.71	2703226.528543909888
72	4159	0.379	7.7	720.0	10.493	15.57	2734905.533808766976
73	4225	0.367	7.9	730.0	10.511	15.58	2768900.539105810432
74	4288	0.381	8.4	740.1	10.492	16.56	2805655.244254736384
75	4350	0.381	7.8	750.1	10.600	16.83	2843809.047919640576
76	4415	0.382	7.4	760.0	10.523	18.07	2882596.851047383040
77	4484	0.375	6.9	770.0	10.512	18.43	2922461.052918509568
78	4559	0.387	6.1	780.0	10.733	18.14	2962633.854369005568
79	4639	0.387	6.2	790.1	10.482	18.86	3003245.857547882496
80	4720	0.380	6.0	800.0	10.529	20.17	3044118.060792659968
81	4804	0.385	6.0	810.1	10.627	20.33	3098960.060345876480
82	4886	0.370	6.1	820.0	10.685	19.92	3139612.055129284608
83	4966	0.377	6.4	830.0	10.841	19.30	3178594.847263965184
84	5043	0.370	6.6	840.1	10.797	18.47	3214806.838889181184
85	5116	0.370	7.0	850.1	10.874	17.76	3247683.531748698112
86	5186	0.370	7.4	860.1	11.152	17.01	3277896.826056726528
87	5252	0.369	7.7	870.1	11.384	16.50	3305573.021895587840
88	5315	0.367	7.9	880.0	11.407	15.75	3331549.018686994432

89	5379	0.362	7.9	890.1	11.524	15.36	3356526.015959541760
90	5442	0.361	7.9	900.1	11.582	14.68	3935913.213984359424
91	5511	0.376	6.4	910.1	11.197	18.57	3971980.034225938432
92	5582	0.373	7.4	920.1	11.585	14.24	4009157.033587634176
93	5648	0.374	7.5	930.0	11.581	14.99	4046327.232755490816
94	5716	0.375	7.4	940.0	11.642	15.36	4082889.231997128704
95	5783	0.373	7.7	950.1	11.730	14.41	4119428.230724624384
96	5847	0.372	7.9	960.1	11.808	15.39	4155074.529717125120
97	5910	0.365	7.9	970.0	11.853	16.94	4189652.028559681536
98	5974	0.363	7.9	980.0	11.876	16.44	4222892.026753241088
99	6038	0.363	7.9	990.1	11.894	15.54	4256143.024790190080
100	6102	0.363	7.8	1000.1	11.919	14.85	4788153.022756255744
101	6173	0.369	6.9	1010.1	11.676	16.53	4836279.056179044352
102	6242	0.375	6.7	1020.1	11.747	16.79	4881353.537094313984
103	6314	0.374	7.3	1030.1	11.807	18.51	4920383.529969459200
104	6380	0.370	7.9	1040.1	11.921	16.53	4956741.525505914880
105	6444	0.364	7.9	1050.1	11.940	14.17	4990624.020385949696
106	6508	0.364	7.9	1060.1	11.946	13.49	5022487.516677808128
107	6572	0.364	7.9	1070.1	11.936	13.11	5052349.514164473856
108	6636	0.364	7.9	1080.2	11.949	12.61	5080670.512465481728
109	6699	0.365	7.9	1090.0	11.949	11.99	5107555.511303092224
110	6763	0.365	7.9	1100.0	11.935	11.60	5133972.010459151360
111	6827	0.366	7.9	1110.1	11.934	11.10	5159671.59870149632
112	6891	0.365	7.9	1120.1	11.927	10.67	5185290.59427081216
113	6955	0.364	7.9	1130.1	11.915	10.28	5210418.09090846720
114	7019	0.363	7.8	1140.1	11.914	9.92	5235321.08861650944
115	7083	0.361	7.8	1150.1	11.910	9.96	5259997.58707951616
116	7147	0.361	7.8	1160.1	11.902	10.06	5284474.58616706048
117	7211	0.362	7.8	1170.1	11.886	10.25	5309024.58561790976
118	7275	0.362	7.8	1180.0	11.898	10.53	5333433.58557242880
119	7339	0.363	7.8	1190.0	11.936	10.74	5357854.58586754048
120	7404	0.363	7.7	1200.1	11.971	11.03	5382570.08655237120

Vergleich Murablagerungen Modellierungen und Schadensflächen  
Extremereignis 2010





## Startskript r.avaflow Durchbrüche der Stauungen Extremereignis 2010

```
#r.avaflow start script for Durchbrüche

profile="416078,5241521,416308,5241908,416375,5242284,416571,5242560,416738,5242791,416999,5243022,417110,5243130,4173
73,5243230,417603,5243320,417915,5243390,418549,5243575,418861,5243817,418948,5244355,419042,5244481,419181,5245021,4
19188,5245200,419237,5245397,419318,5245668,419257,5246128,419242,5246375,419446,5246830,419576,5246995,419565,524732
2,419553,5247661,419710,5247979,419815,5248221,419762,5248329,419788,5248575,419898,5249088,420333,5249342,420851,524
9906,421248,5250215,421788,5250814,421629,5251109,420995,5251393,420769,5251814,420968,5252736,420646,5252661,420730,
5253080,420990,5253309,420703,5253428,420777,5253774,420594,5253955,420315,5253817,419959,5253952,419671,5254734"

g.region -d

r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/DEM_mafin2_Kleinsoelk_Dam.tif output=elevations
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/mafin2_hflow_fin_Damm_Kleins_Etrain.tif output=entrains
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/release_damm_mafin2kleins1.tif output=dammrelease
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/kleinsoelk_vinx1.tif output=vinx1
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/kleinsoelk_viny1.tif output=viny1

g.region -s rast=elevations

r.lakefill cellsize=15 elevation=elevations lakedepth=zw_lake1 level=1066.023 seedcoords=416044,5241543
r.lakefill cellsize=15 elevation=elevations lakedepth=zw_lake2 level=1058 seedcoords=416539,5242476
r.lakefill cellsize=15 elevation=elevations lakedepth=zw_lake3 level=1040 seedcoords=417784,5243379

r.mapcalc --overwrite "lakes = zw_lake1+zw_lake2+zw_lake3"
r.mapcalc --overwrite "entrain = entrains + 0.3"
r.mapcalc --overwrite "lakessolid = (lakes*0.1)+dammrelease"
r.mapcalc --overwrite "lakesfluid = lakes*0.9"
r.mapcalc --overwrite "elevation = elevations-dammrelease"

r.avaflow prefix=zw cellsize=15 phases=s,f,gravity=9.81 limiter=1 layers=0 controls=0,0,1,0,1,0,0,3,0,2,0 elevation=elevation
hrelease1=lakessolid hrelease3=lakesfluid hentrmax1=entrain rhentrmax1=0.5 vinx1=vinx1 viny1=viny1
hydrograph=DATA/ca_hydrograph5.txt hydrocoords=415805,5240776,140,275,418828,5243785,1000,255 density=2600,1000,1000
friction=35,13,0,0,0,0.05 viscosity=-9999,-9999,-3,-9999,-3,0 basal=-6.3,0.0
special=0.05,0.0,0.333,0,10,0.12,1,1,3,1,0.1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,10,0,1,1,1,1,0,1,0.5,0,1.0,100.0 dynfric=0,-6.0,0 cfl=0.4,0.001
slidepar=0.0,0.0,0.0 thresholds=0.1,10000,10000,0.000001 time=50,5000 slomo=1.0 profile="$profile" ctrlpoints=418828,5243785
visualization=0,1,5,0,5,0,1,100,2,-11000,9000,100,0.60,0.25,0.15,0.2,undefined,None,None,None

#####
# Der Input „time=“ wurde einmal mit 50,5000 und einmal mit 100,20000 durchgeführt, um für die ersten 5000 Sekunden der
Modellierung alle 50 Sekunden eine Ausgabe zu haben.

#####
g.region -d
```

## Summary Textdatei Durchbrüche der Stauungen Extremereignis 2010

	nout	nsum	cfl	tlength	tsum	dmax1	vmax1	dmax2	vmax2	dmax3	vmax3	volume1	volume2	volume3	ekin
R	----	----	----	----	----	*2.400	----	*0.000	----	*5.972	----	*51999.31	----	----	----
0	0	----	----	0.0	2.400	0.00	0.000	0.00	5.972	0.00	51999.31	0.00	439238.59	----	
1	193	0.400	35.8	100.1	0.580	7.24	0.000	0.00	4.799	11.01	62718.58	0.00	446553.66	404809824	

2	370	0.399	37.6	200.5	0.574	7.05	0.000	0.00	4.746	10.93	73240.90	0.00
3	536	0.292	36.7	300.1	0.576	7.18	0.000	0.00	4.676	10.81	83244.05	0.00
4	703	0.353	35.6	400.4	0.652	7.85	0.000	0.00	4.607	10.86	93452.44	0.00
5	876	0.360	43.4	500.0	0.753	7.91	0.000	0.00	4.516	10.67	104065.63	0.00
6	1056	0.381	36.3	600.1	0.857	8.54	0.000	0.00	4.441	11.46	115265.09	0.00
7	1239	0.363	41.8	700.2	0.955	8.12	0.000	0.00	4.411	10.80	126719.09	0.00
8	1422	0.395	23.2	800.2	1.069	7.79	0.000	0.00	4.353	10.60	138368.12	0.00
9	1604	0.400	32.8	900.5	1.142	9.37	0.000	0.00	4.292	11.30	150019.75	0.00
10	1786	0.399	28.5	1000.5	1.224	8.22	0.000	0.00	4.233	10.81	161533.22	0.00
11	1976	0.399	21.1	1100.0	1.313	8.88	0.000	0.00	4.187	10.91	173497.06	0.00
12	2165	0.398	29.9	1200.5	1.371	9.39	0.000	0.00	4.132	11.37	185641.16	0.00
13	2356	0.400	16.3	1300.1	1.441	8.74	0.000	0.00	4.117	10.42	198089.67	0.00
14	2555	0.400	38.9	1400.1	1.472	9.74	0.000	0.00	3.999	11.90	211046.58	0.00
15	2751	0.400	19.7	1500.2	1.581	9.78	0.000	0.00	4.005	11.08	224517.14	0.00
16	2949	0.400	27.1	1600.0	1.634	10.02	0.000	0.00	3.929	10.93	238246.53	0.00
17	3147	0.399	5.1	1700.0	1.706	8.91	0.000	0.00	3.901	9.95	252370.80	0.00
18	3347	0.400	25.8	1800.1	1.747	9.68	0.000	0.00	3.874	11.01	266713.72	0.00
19	3548	0.400	29.4	1900.1	1.764	9.61	0.000	0.00	3.846	11.50	281308.47	0.00
20	3751	0.400	21.6	2000.5	1.796	9.32	0.000	0.00	3.804	10.92	296353.66	0.00
21	3952	0.399	26.3	2100.2	1.838	10.05	0.000	0.00	3.791	10.83	311409.53	0.00
22	4153	0.400	4.9	2200.1	1.867	9.22	0.000	0.00	3.764	11.97	326591.09	0.00
23	4358	0.399	27.1	2300.4	1.871	10.13	0.000	0.00	3.745	11.69	342054.25	0.00
24	4561	0.399	27.3	2400.3	1.895	10.10	0.000	0.00	3.727	11.53	357147.75	0.00
25	4765	0.399	27.2	2500.2	1.905	10.15	0.000	0.00	3.703	11.71	372052.28	0.00
26	4968	0.400	24.6	2600.2	1.937	9.26	0.000	0.00	3.693	10.75	386888.09	0.00
27	5171	0.400	37.8	2700.4	1.955	10.53	0.000	0.00	3.690	11.57	401701.09	0.00
28	5374	0.400	23.6	2800.4	1.974	10.31	0.000	0.00	3.672	11.16	416252.75	0.00
29	5580	0.400	27.1	2900.4	1.967	9.93	0.000	0.00	3.643	11.58	430393.34	0.00
30	5782	0.398	27.2	3000.0	1.990	9.98	0.000	0.00	3.645	10.87	444075.88	0.00
31	5982	0.400	24.0	3100.2	1.992	9.77	0.000	0.00	3.623	11.02	457233.59	0.00
32	6189	0.398	16.6	3200.1	1.987	9.81	0.000	0.00	3.574	10.76	470416.66	0.00
											753516.06	1716823680

33	6398	0.398	27.2	3300.2	1.982	9.36	0.000	0.00	3.563	11.67	483468.34 0.00
34	6611	0.399	24.5	3400.3	1.975	10.69	0.000	0.00	3.539	11.61	496194.12 0.00
35	6824	0.397	27.8	3500.0	1.994	9.70	0.000	0.00	3.522	11.81	508540.94 0.00
36	7042	0.397	26.1	3600.3	1.994	10.09	0.000	0.00	3.503	11.87	520790.09 0.00
37	7262	0.400	39.1	3700.5	2.049	10.55	0.000	0.00	3.498	11.75	532802.00 0.00
38	7484	0.397	23.0	3800.3	2.020	9.49	0.000	0.00	3.464	11.41	544343.38 0.00
39	7716	0.391	21.8	3900.2	1.997	10.99	0.000	0.00	3.419	11.92	555712.50 0.00
40	7952	0.197	22.7	4000.4	2.011	11.09	0.000	0.00	3.395	11.95	566862.12 0.00
41	8187	0.200	22.1	4100.1	2.018	11.06	0.000	0.00	3.383	11.89	577604.69 0.00
42	8424	0.198	22.1	4200.3	2.023	11.08	0.000	0.00	3.362	11.90	588189.19 0.00
43	8661	0.197	22.3	4300.2	2.029	11.10	0.000	0.00	3.343	11.94	598444.31 0.00
44	8900	0.196	22.0	4400.4	2.037	11.06	0.000	0.00	3.325	11.89	608421.81 0.00
45	9139	0.194	21.4	4500.0	2.043	10.99	0.000	0.00	3.307	11.86	618024.62 0.00
46	9380	0.193	21.6	4600.2	2.047	11.05	0.000	0.00	3.293	11.89	627495.00 0.00
47	9622	0.189	21.3	4700.1	2.045	11.06	0.000	0.00	3.272	11.90	636747.88 0.00
48	9865	0.189	20.9	4800.0	2.054	11.02	0.000	0.00	3.260	11.88	645795.06 0.00
49	10109	0.188	21.0	4900.2	2.055	11.04	0.000	0.00	3.247	11.88	654636.12 0.00
50	10353	0.187	21.0	5000.0	2.055	11.05	0.000	0.00	3.225	11.89	663283.62 0.00
51	10598	0.187	20.8	5100.0	2.058	11.07	0.000	0.00	3.215	11.90	671779.06 0.00
52	10844	0.189	20.2	5200.2	2.059	11.06	0.000	0.00	3.205	11.90	680027.38 0.00
53	11090	0.191	20.1	5300.2	2.063	11.07	0.000	0.00	3.194	11.90	688019.69 0.00
54	11337	0.193	19.9	5400.2	2.063	11.08	0.000	0.00	3.182	11.91	695840.75 0.00
55	11597	0.241	10.0	5500.3	2.081	12.64	0.000	0.00	3.120	12.07	703936.06 0.00
56	11864	0.240	12.0	5600.1	2.074	12.83	0.000	0.00	3.105	12.22	712156.81 0.00
57	12136	0.233	12.1	5700.0	2.091	12.89	0.000	0.00	3.078	12.21	720374.19 0.00
58	12410	0.242	10.7	5800.1	2.087	12.81	0.000	0.00	3.061	12.16	728404.81 0.00
59	12686	0.246	10.2	5900.3	2.113	12.96	0.000	0.00	3.041	12.39	736298.31 0.00
60	12965	0.246	9.8	6000.1	2.106	12.95	0.000	0.00	3.023	12.38	744158.69 0.00
61	13245	0.247	9.6	6100.1	2.120	12.97	0.000	0.00	3.008	12.39	751771.06 0.00
62	13526	0.248	9.6	6200.3	2.124	12.97	0.000	0.00	2.992	12.37	759152.31 0.00
63	13806	0.248	9.7	6300.0	2.126	12.97	0.000	0.00	2.979	12.37	766320.62 0.00
									1001788.25		3411597568

64	14087	0.248	9.6	6400.0	2.127	12.96	0.000	0.00	2.965	12.38	773348.44 0.00
65	14369	0.248	9.7	6500.1	2.128	12.97	0.000	0.00	2.952	12.37	780223.25 0.00
66	14651	0.249	9.8	6600.1	2.131	12.97	0.000	0.00	2.940	12.38	786990.50 0.00
67	14933	0.249	9.5	6700.1	2.132	12.96	0.000	0.00	2.926	12.30	793657.88 0.00
68	15216	0.248	9.7	6800.3	2.133	12.96	0.000	0.00	2.914	12.31	800177.19 0.00
69	15499	0.247	9.4	6900.3	2.134	12.96	0.000	0.00	2.902	12.29	806495.81 0.00
70	15782	0.245	9.5	7000.3	2.136	12.98	0.000	0.00	2.890	12.30	812734.69 0.00
71	16065	0.245	9.5	7100.2	2.142	12.99	0.000	0.00	2.877	12.36	818896.75 0.00
72	16348	0.246	9.9	7200.1	2.141	13.02	0.000	0.00	2.866	12.38	824910.56 0.00
73	16632	0.246	9.3	7300.3	2.138	12.97	0.000	0.00	2.855	12.35	830828.56 0.00
74	16915	0.245	10.0	7400.0	2.140	12.97	0.000	0.00	2.845	12.26	836581.50 0.00
75	17199	0.244	9.9	7500.0	2.142	12.96	0.000	0.00	2.834	12.24	842283.94 0.00
76	17484	0.244	9.6	7600.3	2.141	12.94	0.000	0.00	2.824	12.24	847972.56 0.00
77	17768	0.244	9.9	7700.2	2.143	12.98	0.000	0.00	2.814	12.24	853566.06 0.00
78	18052	0.243	10.1	7800.1	2.140	13.01	0.000	0.00	2.803	12.26	858996.31 0.00
79	18336	0.242	10.5	7900.0	2.140	13.01	0.000	0.00	2.793	12.26	864372.56 0.00
80	18621	0.241	9.7	8000.1	2.142	12.99	0.000	0.00	2.782	12.39	869671.12 0.00
81	18906	0.241	9.9	8100.3	2.146	12.98	0.000	0.00	2.773	12.30	874930.62 0.00
82	19191	0.241	12.5	8200.3	2.150	13.18	0.000	0.00	2.762	11.92	880145.38 0.00
83	19476	0.241	8.7	8300.1	2.147	12.91	0.000	0.00	2.749	12.22	885308.62 0.00
84	19762	0.241	9.7	8400.2	2.149	13.03	0.000	0.00	2.739	12.38	890428.31 0.00
85	20048	0.241	9.7	8500.0	2.151	13.02	0.000	0.00	2.729	12.32	895479.38 0.00
86	20336	0.242	9.8	8600.1	2.153	13.08	0.000	0.00	2.714	12.43	900498.50 0.00
87	20626	0.242	8.5	8700.2	2.154	13.33	0.000	0.00	2.698	12.47	905512.75 0.00
88	20921	0.249	8.0	8800.2	2.159	13.37	0.000	0.00	2.678	11.86	910579.62 0.00
89	21216	0.246	7.5	8900.0	2.158	13.31	0.000	0.00	2.667	12.44	915598.00 0.00
90	21512	0.245	8.1	9000.2	2.159	13.40	0.000	0.00	2.657	12.36	920569.38 0.00
91	21807	0.245	8.7	9100.0	2.158	13.40	0.000	0.00	2.647	11.91	925483.94 0.00
92	22104	0.249	11.1	9200.3	2.163	13.31	0.000	0.00	2.638	12.08	930425.31 0.00
93	22400	0.247	7.9	9300.2	2.154	13.38	0.000	0.00	2.626	11.83	935269.00 0.00
94	22696	0.246	8.3	9400.1	2.158	13.33	0.000	0.00	2.617	11.80	940072.12 0.00
									1179916.75		4050751488

95	22994	0.246	9.5	9500.1	2.163	13.43	0.000	0.00	2.605	11.95	944862.25 0.00
96	23292	0.247	5.9	9600.0	2.152	13.23	0.000	0.00	2.598	12.31	949606.62 0.00
97	23592	0.248	8.4	9700.3	2.163	13.48	0.000	0.00	2.607	12.51	954344.12 0.00
98	23892	0.400	8.5	9800.1	2.139	13.25	0.000	0.00	2.643	11.82	959075.94 0.00
99	24192	0.399	5.8	9900.0	2.150	13.73	0.000	0.00	2.630	12.82	963744.50 0.00
100	24493	0.400	5.1	10000.0	2.171	13.84	0.000	0.00	2.629	13.00	968421.62 0.00
101	24810	0.262	5.1	10100.2	2.160	13.86	0.000	0.00	2.636	13.00	973331.31 0.00
102	25126	0.263	5.0	10200.3	2.160	13.87	0.000	0.00	2.650	13.04	978201.31 0.00
103	25442	0.262	5.0	10300.1	2.160	13.86	0.000	0.00	2.664	13.05	983052.88 0.00
104	25758	0.263	5.0	10400.0	2.159	13.86	0.000	0.00	2.678	13.05	987887.88 0.00
105	26075	0.262	5.0	10500.1	2.157	13.87	0.000	0.00	2.692	13.05	992753.88 0.00
106	26392	0.262	4.9	10600.1	2.151	13.87	0.000	0.00	2.704	13.00	997605.19 0.00
									1240952.00		4528961536
107	26709	0.262	4.9	10699.9	2.146	13.87	0.000	0.00	2.719	13.00	1002426.19
									0.00	1245797.75	4545357312
108	27027	0.262	4.9	10799.9	2.145	13.87	0.000	0.00	2.732	13.01	1007231.31
									0.00	1250643.25	4562605568
109	27345	0.262	4.9	10899.9	2.143	13.87	0.000	0.00	2.744	13.01	1012000.06
									0.00	1255466.25	4583668736
110	27663	0.262	4.9	11000.0	2.144	13.88	0.000	0.00	2.757	13.02	1016702.06
									0.00	1260254.50	4587486208
111	27982	0.262	4.8	11100.3	2.139	13.87	0.000	0.00	2.770	13.01	1021397.00
									0.00	1265040.88	4603305984
112	28300	0.262	4.8	11200.0	2.136	13.88	0.000	0.00	2.783	13.05	1026058.88
									0.00	1269803.50	4625689088
113	28619	0.262	4.8	11300.0	2.133	13.88	0.000	0.00	2.797	13.01	1030708.56
									0.00	1274569.50	4632787456
114	28938	0.262	4.8	11399.9	2.125	13.88	0.000	0.00	2.810	13.02	1035314.62
									0.00	1279314.88	4654119936
115	29258	0.262	4.8	11500.1	2.121	13.88	0.000	0.00	2.821	13.02	1039896.00
									0.00	1284041.00	4668943872
116	29578	0.262	4.7	11600.2	2.116	13.88	0.000	0.00	2.833	13.01	1044467.50
									0.00	1288754.25	4684797440
117	29898	0.262	4.7	11700.0	2.111	13.88	0.000	0.00	2.846	13.02	1048988.88
									0.00	1293447.88	4705219584
118	30219	0.261	4.7	11800.1	2.108	13.88	0.000	0.00	2.857	13.01	1053528.00
									0.00	1298167.38	4711435264
119	30539	0.262	4.7	11899.9	2.103	13.89	0.000	0.00	2.869	13.02	1058048.62
									0.00	1302872.38	4728978432
120	30860	0.262	4.7	11999.9	2.101	13.88	0.000	0.00	2.880	13.02	1062568.25
									0.00	1307563.38	4743780864
121	31181	0.261	4.6	12099.9	2.092	13.88	0.000	0.00	2.890	13.02	1067047.75
									0.00	1312238.75	4756370432
122	31503	0.261	4.6	12200.0	2.082	13.88	0.000	0.00	2.900	13.02	1071510.88
									0.00	1316898.38	4777498112
123	31826	0.261	4.6	12300.1	2.079	13.89	0.000	0.00	2.911	13.02	1075939.38
									0.00	1321553.62	4798432256
124	32148	0.261	4.6	12399.8	2.073	13.88	0.000	0.00	2.921	13.01	1080331.25
									0.00	1326183.62	4810443264
125	32472	0.261	4.6	12500.0	2.072	13.88	0.000	0.00	2.929	13.02	1084736.88
									0.00	1330829.62	4824305152

126	32765	0.399	4.6	12599.9	2.081	13.85	0.000	0.00	2.985	13.02	1088874.88
127	33090	0.260	4.6	12700.0	2.064	13.92	0.000	0.00	2.945	13.08	1093229.88
128	33415	0.260	4.5	12800.1	2.062	13.92	0.000	0.00	2.950	13.08	1097575.00
129	33740	0.260	4.5	12900.0	2.059	13.92	0.000	0.00	2.959	13.08	1101923.12
130	34066	0.260	4.5	12999.9	2.053	13.93	0.000	0.00	2.964	13.09	1106252.25
131	34394	0.260	4.5	13100.0	2.050	13.96	0.000	0.00	2.970	13.12	1110581.00
132	34723	0.260	4.5	13200.2	2.048	13.94	0.000	0.00	2.976	13.10	1114877.12
133	35052	0.259	4.4	13300.3	2.044	13.95	0.000	0.00	2.985	13.10	1119187.62
134	35381	0.257	4.4	13400.0	2.040	13.95	0.000	0.00	2.990	13.10	1123473.38
135	35711	0.257	4.4	13500.1	2.037	13.95	0.000	0.00	2.998	13.10	1127731.62
136	36040	0.257	4.4	13599.9	2.032	13.94	0.000	0.00	3.006	13.10	1131959.75
137	36370	0.257	4.4	13700.0	2.028	13.95	0.000	0.00	3.012	13.10	1136195.00
138	36701	0.258	4.4	13800.2	2.023	13.94	0.000	0.00	3.017	13.10	1140446.50
139	37031	0.257	4.4	13900.1	2.017	13.94	0.000	0.00	3.025	13.09	1144660.00
140	37362	0.257	4.6	14000.2	2.011	13.94	0.000	0.00	3.031	13.09	1148894.00
141	37692	0.259	4.5	14100.1	2.005	13.92	0.000	0.00	3.038	13.11	1153091.88
142	38022	0.258	4.7	14200.0	1.998	13.93	0.000	0.00	3.044	13.08	1157290.62
143	38353	0.258	4.7	14300.2	1.993	13.93	0.000	0.00	3.050	13.11	1161503.38
144	38683	0.257	4.3	14400.1	1.986	13.92	0.000	0.00	3.057	13.11	1165710.00
145	39013	0.258	4.6	14500.0	1.981	13.90	0.000	0.00	3.063	13.05	1169948.12
146	39343	0.257	4.3	14600.0	1.974	13.85	0.000	0.00	3.071	13.08	1174178.12
147	39673	0.256	5.0	14700.1	1.968	13.90	0.000	0.00	3.077	13.04	1178417.00
148	40002	0.256	4.3	14800.1	1.964	13.94	0.000	0.00	3.084	13.05	1182613.75
149	40331	0.256	6.2	14900.0	1.959	13.97	0.000	0.00	3.090	13.06	1186782.88
150	40660	0.255	4.3	15000.1	1.952	13.91	0.000	0.00	3.096	12.98	1190931.38
151	40988	0.254	5.6	15099.8	1.946	13.92	0.000	0.00	3.102	13.02	1194947.12
152	41317	0.254	5.5	15200.1	1.941	13.94	0.000	0.00	3.108	13.04	1198945.25
153	41645	0.253	5.9	15300.0	1.935	13.96	0.000	0.00	3.112	13.00	1202923.12
154	41973	0.253	6.4	15399.9	1.929	14.00	0.000	0.00	3.117	12.95	1206917.62
155	42301	0.253	5.1	15500.0	1.925	13.89	0.000	0.00	3.123	12.93	1210903.12
156	42629	0.253	4.3	15600.0	1.917	13.92	0.000	0.00	3.128	12.93	1214902.00
								0.00	1468620.50		5185018880

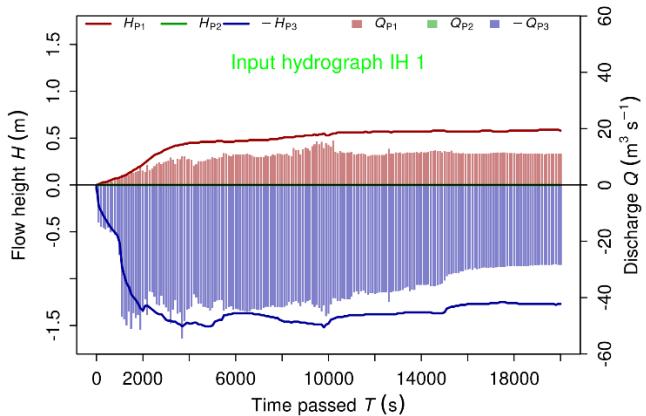
157	42957	0.252	6.6	15700.2	1.913	14.02	0.000	0.00	3.134	12.93	1218872.50
158	43284	0.252	4.3	15800.0	1.908	13.91	0.000	0.00	3.138	12.92	1222789.62
159	43611	0.252	5.4	15900.0	1.901	13.98	0.000	0.00	3.145	12.90	1226700.12
160	43938	0.251	4.7	16000.0	1.893	13.95	0.000	0.00	3.151	12.89	1230599.62
161	44265	0.251	5.5	16100.2	1.886	13.99	0.000	0.00	3.155	12.90	1234465.88
162	44592	0.250	4.3	16200.2	1.877	13.86	0.000	0.00	3.158	12.87	1238306.25
163	44918	0.250	6.5	16300.0	1.871	14.03	0.000	0.00	3.160	12.90	1242142.50
164	45245	0.250	5.1	16399.9	1.863	13.97	0.000	0.00	3.164	12.89	1245965.75
165	45573	0.250	5.6	16500.3	1.857	13.97	0.000	0.00	3.166	12.88	1249807.50
166	45900	0.249	5.4	16600.5	1.850	13.98	0.000	0.00	3.168	12.87	1253639.88
167	46227	0.249	5.6	16700.3	1.844	14.00	0.000	0.00	3.172	12.86	1257440.88
168	46554	0.248	5.7	16800.2	1.836	14.01	0.000	0.00	3.176	12.86	1261204.50
169	46880	0.248	5.6	16899.8	1.832	14.01	0.000	0.00	3.181	12.85	1264945.88
170	47207	0.247	5.8	17000.0	1.825	14.04	0.000	0.00	3.184	12.86	1268708.88
171	47534	0.247	5.7	17100.3	1.818	14.04	0.000	0.00	3.187	12.89	1272460.62
172	47860	0.247	5.9	17200.3	1.813	14.03	0.000	0.00	3.191	12.87	1276163.75
173	48186	0.247	5.8	17300.1	1.807	14.05	0.000	0.00	3.194	12.88	1279891.50
174	48512	0.247	5.7	17400.0	1.803	14.06	0.000	0.00	3.198	12.87	1283601.88
175	48838	0.247	5.8	17499.9	1.796	14.08	0.000	0.00	3.202	12.87	1287291.25
176	49163	0.247	5.8	17599.6	1.791	14.06	0.000	0.00	3.206	12.86	1290978.50
177	49488	0.247	5.8	17699.4	1.785	14.07	0.000	0.00	3.208	12.86	1294683.88
178	49813	0.247	5.7	17799.3	1.778	14.09	0.000	0.00	3.211	12.86	1298385.62
179	50137	0.247	5.6	17899.0	1.774	14.09	0.000	0.00	3.213	12.85	1302047.25
180	50462	0.246	6.0	17999.1	1.768	14.08	0.000	0.00	3.216	12.88	1305709.88
181	50786	0.247	6.5	18099.0	1.763	14.13	0.000	0.00	3.218	12.90	1309344.00
182	51110	0.247	6.6	18199.1	1.758	14.15	0.000	0.00	3.222	12.91	1312977.00
183	51434	0.247	6.0	18299.3	1.753	14.10	0.000	0.00	3.225	12.87	1316602.75
184	51757	0.247	6.1	18399.2	1.748	14.11	0.000	0.00	3.227	12.87	1320224.75
185	52080	0.247	6.1	18499.3	1.743	14.12	0.000	0.00	3.231	12.87	1323836.75
186	52403	0.247	6.0	18599.6	1.738	14.12	0.000	0.00	3.234	12.86	1327453.50
187	52725	0.247	6.4	18699.6	1.734	14.19	0.000	0.00	3.241	12.90	1331052.12
								0.00	1588055.00		5364812800

188	53047	0.247	6.6	18799.7	1.728	14.16	0.000	0.00	3.243	12.89	1334671.12
189	53369	0.247	6.3	18899.9	1.723	14.18	0.000	0.00	3.245	12.90	1338296.50
190	53690	0.247	6.4	18999.8	1.718	14.19	0.000	0.00	3.248	12.89	1341919.00
191	54012	0.247	6.5	19100.1	1.713	14.20	0.000	0.00	3.249	12.91	1345566.00
192	54333	0.247	6.4	19200.1	1.709	14.20	0.000	0.00	3.252	12.91	1349201.75
193	54653	0.247	6.4	19299.9	1.703	14.19	0.000	0.00	3.252	12.90	1352831.25
194	54974	0.247	6.6	19399.9	1.699	14.21	0.000	0.00	3.253	12.91	1356501.50
195	55294	0.247	5.9	19499.6	1.694	14.16	0.000	0.00	3.256	12.88	1360157.88
196	55615	0.247	6.5	19599.7	1.690	14.21	0.000	0.00	3.257	12.92	1363840.88
197	55935	0.247	6.6	19699.5	1.685	14.23	0.000	0.00	3.257	12.93	1367548.25
198	56255	0.247	6.8	19799.5	1.681	14.22	0.000	0.00	3.259	12.93	1371292.38
199	56575	0.247	6.2	19899.5	1.675	14.18	0.000	0.00	3.260	12.89	1375053.62
200	56894	0.247	6.7	19999.2	1.671	14.22	0.000	0.00	3.260	12.93	1378856.88
								0.00	1637671.62		5438420992

Eingabe-Hydrograph Durchbrüche der Stauungen Extremereignis 2010

<i>T</i>	<i>Q1</i>	<i>V1</i>	<i>Q2</i>	<i>V2</i>	<i>Q3</i>	<i>V3</i>
0	1	3	0	0	20	3
1000	1	3	0	0	45	6
2000	1	3	0	0	35	6
5000	1	3	0	0	30	5
10000	1	3	0	0	25	4
15000	0	0	0	0	20	3
20000	0	0	0	0	10	2

# Mit diesen Eingaben hat r.avaflow folgenden Eingabe-Hydrographen ermittelt:



Startskript r.avaflow Szenario Stauende Muren Extremszenario A

```
#r.avaflow start script for Szenario A Muren

g.region -d

r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/elevation.tif output=basal_watersh
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/Anriss_FlaecheReclass.tif output=release_watershed
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/Impact_1.tif output=impact
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/trelease_raster.tif output=trelease

g.region -s rast=basal_watersh

r.mapcalc --overwrite "release = release_watershed*1.33"
r.mapcalc --overwrite "basal = basal_watersh-(0.33*release_watershed)"

r.avaflow prefix=szen1.1 cellsize=5 phases=x gravity=9.81 controls=0,0,1,0,1,0,0,0,0,2,0 elevation=basal
trelease=trelease hrelease=release hdeposit=impact density=1800 friction=35,13,2.3 basal=-6.6,0.0
special=0.05,0.0,1.0,5.0,1.0,100.0 dynfric=-6.0 cfl=0.4,0.001 slidepar=0.0,0.0,0.0
thresholds=0.1,10000,10000,0.00001 time=10,1300 slomo=1.0 ctrlpoints=None visualization=0.1,5.0,5.0,1,100,2,-
11000,9000,100,0.60,0.25,0.15,0.2,2.0,None,None,None
```

g.region -d

Summary Textdatei Murabgänge Extremszenario A

nout	nsum	cfl	tlength	tsum	dmax	vmax	volume	ekin	-----
R	----	----	----	----	*5.320	----	*3591576.0		-----
0	0	----	----	0.0	5.320	0.00	349889.8		
1	52	0.392	8.7	10.1	3.485	15.11	719156.5	35171921920	
2	112	0.385	8.4	20.1	3.530	16.32	742335.7	36014956544	
3	172	0.373	8.0	30.1	3.959	17.13	765273.9	36100825088	
4	234	0.383	8.4	40.1	4.207	17.44	788621.6	36853260288	
5	294	0.377	8.2	50.1	4.654	17.21	811685.5	36928188416	
6	356	0.376	8.0	60.0	4.539	16.97	834465.8	35246387200	
7	419	0.373	8.0	70.0	4.954	16.11	856438.9	32019038208	
8	482	0.375	8.1	80.2	5.796	15.05	877276.6	28331190272	
9	543	0.375	8.3	90.1	6.385	13.96	896266.5	24292014080	
10	602	0.373	8.5	100.0	7.679	13.01	913771.0	20360837120	
11	659	0.373	8.9	110.1	8.654	12.16	929948.8	16796086272	
12	716	0.373	8.8	120.0	9.212	11.46	944549.4	13537967104	
13	773	0.366	8.7	130.0	9.240	10.64	957844.3	11036658688	
14	831	0.366	8.6	140.1	9.459	10.05	970157.9	9049746432	
15	889	0.367	8.6	150.2	9.555	9.47	981379.1	7592570368	
16	947	0.365	8.6	160.1	9.696	8.96	991750.9	6466288640	
17	1005	0.361	8.5	170.0	9.756	8.57	1001491.65646129664		
18	1064	0.363	8.5	180.1	9.820	8.27	1010952.05069306880		
19	1123	0.369	8.4	190.2	9.959	7.99	1020096.44631511552		
20	1181	0.365	8.5	200.0	9.835	7.80	1028811.84309458432		
21	1241	0.381	8.1	210.0	9.814	15.85	1717881.826942167040		
22	1304	0.392	7.8	220.1	9.973	14.46	1743673.525725179904		
23	1365	0.375	8.3	230.1	10.172	12.31	1768831.224502589440		

24	1426	0.361	8.2	240.1	10.291	14.00	1793881.223735590912
25	1486	0.361	8.2	250.0	10.375	12.55	1817987.923878916096
26	1547	0.361	8.2	260.0	10.435	12.57	1842393.124279283712
27	1608	0.361	8.2	270.0	10.455	12.72	1866738.824193187840
28	1669	0.361	8.2	280.1	10.437	13.08	1890979.623973386240
29	1730	0.361	8.2	290.1	10.402	13.16	1914974.423336749056
30	1791	0.361	8.3	300.2	10.346	13.13	1938495.822046976000
31	1851	0.363	8.3	310.1	10.302	13.13	1961017.920399130624
32	1911	0.367	8.4	320.0	10.227	13.03	1982813.018617829376
33	1972	0.368	8.4	330.1	10.143	12.67	2004100.616819306496
34	2032	0.368	8.4	340.1	10.099	12.54	2024175.015183647744
35	2092	0.368	8.4	350.0	10.134	12.34	2043437.113751418880
36	2153	0.368	8.3	360.2	10.449	12.11	2062334.012463218688
37	2213	0.366	8.2	370.1	10.709	11.96	2080142.611352773632
38	2274	0.364	8.2	380.0	10.921	11.79	2097404.510394340352
39	2336	0.364	8.1	390.0	11.118	11.50	2114125.09580001280
40	2399	0.365	8.0	400.2	11.292	11.17	2130770.88835940352
41	2461	0.365	8.0	410.0	11.437	10.86	2146603.58269662208
42	2525	0.365	7.9	420.1	11.553	10.56	2162440.27773691392
43	2588	0.366	7.9	430.1	11.651	10.19	2177686.57385808896
44	2652	0.366	7.9	440.1	11.716	9.84	2193036.57088211968
45	2716	0.366	7.9	450.1	11.764	9.52	2208184.26857729024
46	2780	0.366	7.8	460.1	11.805	9.29	2223199.86700354560
47	2844	0.366	7.8	470.0	11.815	9.05	2238121.06593012224
48	2909	0.366	7.8	480.1	11.824	8.86	2253157.06534713856
49	2974	0.366	7.8	490.1	11.802	9.18	2268149.56548975104
50	3039	0.366	7.8	500.1	11.824	9.47	2283262.06594900992
51	3104	0.365	7.7	510.1	11.844	9.75	2298421.06693232640
52	3169	0.366	7.7	520.1	11.854	10.01	2313725.26836838912
53	3234	0.365	7.7	530.1	11.856	10.25	2329158.06929083904
54	3299	0.365	7.7	540.1	11.845	10.43	2344760.27062661120
55	3364	0.363	7.7	550.1	11.839	10.62	2360648.27214820864
56	3428	0.368	7.8	560.0	11.875	10.74	2376591.87475034112
57	3493	0.367	7.8	570.1	11.945	10.86	2393013.57542152192
58	3557	0.363	7.8	580.1	12.075	10.98	2409270.57596080640
59	3622	0.363	7.7	590.1	12.196	10.98	2425821.57645440000
60	3687	0.362	7.7	600.1	12.288	11.08	2442401.87663268864
61	3752	0.362	7.7	610.1	12.370	11.09	2458957.87675750912
62	3818	0.363	7.7	620.1	12.434	11.12	2475773.87711588864
63	3883	0.363	7.6	630.1	12.501	11.32	2492379.57699286528
64	3949	0.363	7.6	640.1	12.560	11.39	2509201.27724450304
65	4015	0.363	7.6	650.1	12.609	11.47	2526091.27728656384
66	4081	0.364	7.6	660.1	12.649	11.47	2543000.87728579584
67	4147	0.364	7.6	670.1	12.682	11.46	2559965.87725439488
68	4213	0.364	7.6	680.1	12.716	11.40	2577022.27707265536
69	4279	0.364	7.6	690.0	12.849	11.48	2594110.57694106112
70	4345	0.363	7.5	700.0	13.028	11.55	2611239.57629434880
71	4412	0.363	7.5	710.1	13.124	15.00	3799213.547515095040
72	4479	0.378	7.6	720.0	13.139	17.01	3847793.555412666368
73	4547	0.375	7.5	730.1	13.318	18.36	3900986.564258174976
74	4614	0.364	7.4	740.1	13.453	17.76	3956458.572169988096
75	4681	0.365	7.4	750.1	13.556	18.62	4014501.279986720768
76	4749	0.375	7.2	760.0	13.709	20.25	4075489.287735926784
77	4818	0.381	7.1	770.0	13.631	21.55	4138621.893890297856
78	4891	0.389	6.5	780.1	13.544	21.82	4203047.597505542144
79	4969	0.393	6.1	790.0	14.075	23.32	4267429.0102167134208
80	5053	0.392	5.7	800.1	14.387	24.79	4351313.5110385487872
81	5140	0.379	5.5	810.1	15.306	24.22	4419423.5119169564672
82	5232	0.371	5.3	820.1	15.181	23.19	4488645.0120216461312
83	5325	0.376	5.5	830.1	14.993	23.16	4557325.0113888083968
84	5416	0.377	5.6	840.1	13.976	22.47	4624654.0102008610816
85	5504	0.377	5.7	850.1	13.486	21.90	4687865.087703166976
86	5589	0.372	6.1	860.1	13.508	21.32	4745280.574548625408

87	5671	0.371	6.2	870.1	13.596	21.00	4798464.063165407232
88	5750	0.370	6.4	880.1	13.647	20.56	4848853.054121877504
89	5826	0.370	6.7	890.1	13.823	20.18	4896415.547078776832
90	5899	0.375	7.0	900.1	13.922	19.46	5681218.041624289280
91	5972	0.388	6.4	910.1	13.871	22.86	5745985.074135879680
92	6047	0.377	7.0	920.1	14.047	18.43	5811466.070237249536
93	6116	0.378	7.3	930.0	14.046	18.03	5876687.567517206528
94	6187	0.388	7.3	940.1	14.101	17.78	5941009.065589645312
95	6257	0.381	7.2	950.1	14.164	17.06	6004348.563462084608
96	6327	0.381	7.3	960.1	14.210	16.62	6066302.560983447552
97	6396	0.368	7.2	970.1	14.183	17.48	6126991.559245436928
98	6465	0.367	7.2	980.0	14.241	20.09	6186876.5557727320064
99	6535	0.367	7.3	990.1	14.220	19.63	6246561.555090114560
100	6604	0.367	7.2	1000.0	14.237	18.80	6304197.051816321024
101	6677	0.371	6.6	1010.1	14.145	18.73	7056124.0108691677184
102	6747	0.370	7.0	1020.0	14.307	18.40	7134906.579779201024
103	6822	0.395	6.8	1030.1	14.180	20.90	7205575.565485676544
104	6892	0.389	7.2	1040.0	14.348	21.01	7271095.558761940992
105	6962	0.371	7.2	1050.1	14.422	18.55	7333630.051248111616
106	7031	0.374	7.2	1060.0	14.454	16.51	7391770.043297742848
107	7101	0.373	7.2	1070.1	14.341	15.49	7447322.037044097024
108	7171	0.382	7.1	1080.1	14.357	15.16	7499669.532464887808
109	7240	0.376	7.2	1090.0	14.364	14.65	7549462.530090065920
110	7310	0.384	7.2	1100.0	14.391	14.25	7598294.527717961728
111	7380	0.385	7.1	1110.0	14.405	13.59	7645947.026009387008
112	7450	0.377	7.1	1120.0	14.434	13.59	7692768.524599035904
113	7521	0.384	7.1	1130.1	14.437	13.73	7738938.523602323456
114	7591	0.386	7.0	1140.0	14.508	14.16	7783719.022594084864
115	7662	0.385	7.1	1150.1	14.734	14.27	7828553.022345062400
116	7732	0.374	7.0	1160.0	14.818	15.16	7872892.522583044096
117	7803	0.384	7.1	1170.1	15.083	15.93	7917861.022621231104
118	7874	0.387	6.9	1180.1	15.107	15.64	7961745.022581952512
119	7945	0.376	6.9	1190.1	15.205	15.95	8005922.522461585408
120	8016	0.379	6.9	1200.1	15.392	15.97	8050362.522260658176
121	8087	0.380	6.9	1210.1	15.592	16.09	8094666.021880532992
122	8158	0.382	6.8	1220.0	15.645	15.89	8138473.521589692416
123	8230	0.383	6.8	1230.1	15.824	16.38	8182832.521476575232
124	8301	0.385	6.8	1240.0	15.881	16.43	8226926.021281325056
125	8373	0.385	6.8	1250.1	15.908	16.76	8271863.021252548608
126	8444	0.385	6.8	1260.0	15.917	17.02	8315712.521518084096
127	8516	0.386	6.8	1270.0	16.061	16.71	8360311.521241468928
128	8588	0.385	6.8	1280.1	16.090	16.81	8406427.021123014656
129	8660	0.385	6.8	1290.0	16.082	17.33	8452495.021283311616
130	8732	0.384	6.8	1300.1	16.073	17.34	8497491.021448097792

### Startskript r.avaflow Durchbrüche der Stauungen Extremszenario A

```
#r.avaflow start script for Extremszenario A Durchbruchsflut
profile="416078,5241521,416308,5241908,416375,5242284,416571,5242560,416738,5242791,416999,5243022,417110,5243130,4173
73,5243230,417603,5243320,417915,5243390,418549,5243575,418861,5243817,418948,5244355,419042,5244481,419181,5245021,4
19188,5245200,419237,5245397,419318,5245668,419257,5246128,419242,5246375,419446,5246830,419576,5246995,419565,524732
2,419553,5247661,419710,5247979,419815,5248221,419762,5248329,419788,5248575,419898,5249088,420333,5249342,420851,524
9906,421248,5250215,421788,5250814,421629,5251109,420995,5251393,420769,5251814,420968,5252736,420646,5252661,420730,
5253080,420990,5253309,420703,5253428,420777,5253774,420594,5253955,420315,5253817,419959,5253952,419671,5254734"
```

g.region -d

```

r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/DEM_Szenario_Damm_kl_1.tif output=elevations
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/szen_hflow_dam_kleins_entrain1.tif output=entrains
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/release_dam_szenario_1.tif output=dammrelease
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/vin2ms.tif output=vinx1
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/vin5ms.tif output=viny1

g.region -s rast=elevations

r.lakefill cellsize=15 elevation=elevations lakedefault=sz1_lake1 level=1068 seedcoords=416044,5241543
r.lakefill cellsize=15 elevation=elevations lakedefault=sz1_lake2 level=1060.8 seedcoords=416539,5242476
r.lakefill cellsize=15 elevation=elevations lakedefault=sz1_lake3 level=1041.9 seedcoords=417784,5243379

r.mapcalc --overwrite "lakes = sz1_lake1+sz1_lake2+sz1_lake3"
r.mapcalc --overwrite "entrain = entrains + 0.3"
r.mapcalc --overwrite "lakessolid = (lakes*0.1)+dammrelease"
r.mapcalc --overwrite "lakesfluid = lakes*0.9"
r.mapcalc --overwrite "elevation = elevations-dammrelease"

r.avaflood prefix=FlutSz cellsize=15 phases=sff gravity=9.81 limiter=1 layers=0 controls=0,0,1,0,1,0,0,3,0,2,0 elevation=elevation
hrelease1=lakessolid hrelease3=lakesfluid hentrmax1=entrain rhentrmax1=0.5 vinx1=vinx1 viny1=viny1
hydrograph=DATA/ca_hydrograph5.txt hydrocoords=415805,5240776,140,275,418828,5243785,1000,255 density=2600,1000,1000
friction=35,13,0,0,0,0,0.05 viscosity=-9999,-9999,-3,-9999,-3,0 basal=-6.3,0,0
special=0.05,0.0,0.333,0,10,0.12,1,1,1,3,1,0.1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,10,0,1,1,1,1,0.5,0.1,0,100.0 dynfric=0,-6.0,0 cfl=0.4,0.001
slidepar=0.0,0.0,0.0 thresholds=0.1,10000,10000,0.000001 time=500,20000 slomo=1.0 profile="$profile" ctrlpoints=418828,5243785
visualization=0.1,5.0,5.0,1,100,2,-11000,9000,100,0.60,0.25,0.15,0.2,undefined,None,None,None

```

g.region -d

### Summary Textdatei Durchbrüche der Stauungen Extremzenario A

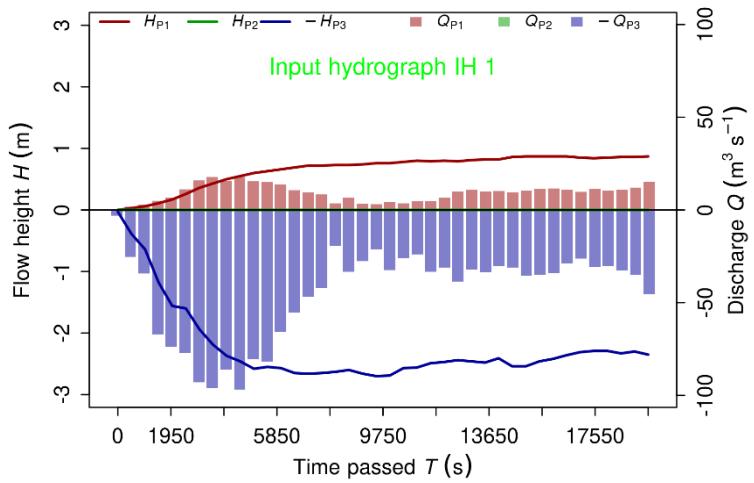
R	nout	nsum	cfl	tlength	tsum	dmax1	vmax1	dmax2	vmax2	dmax3	vmax3	volume1	volume2		volume3	ekin
													volume2	volume3		
0	0	----	----	0.0	2.600	*2.600	----	*0.000	----	*6.008	----	*81463.45	*0.00	*719401.06	----	----
1	771	0.400	37.1	500.4	0.727	8.84	0.000	0.00	5.333	10.92	134688.20 0.00	786916.06 526059392				
2	1574	0.366	35.9	1000.3	0.832	9.09	0.000	0.00	5.240	11.54	196628.72 0.00	863039.00 729190208				
3	2402	0.400	6.1	1500.1	1.004	8.46	0.000	0.00	5.145	10.81	268537.47 0.00	961679.19 990662848				
4	3235	0.400	32.1	2000.1	1.417	12.18	0.000	0.00	5.188	12.30	350856.78 0.00	1070407.62				1231900544
5	4157	0.400	21.2	2500.3	1.809	13.92	0.000	0.00	5.032	12.81	448864.91 0.00	1190016.00				2113468416
6	5221	0.400	33.2	3000.5	2.432	15.49	0.000	0.00	4.992	13.96	562609.19 0.00	1325687.38				2655167488
7	6289	0.400	16.0	3500.1	2.808	14.15	0.000	0.00	4.903	13.23	670578.12 0.00	1455437.38				3023865856
8	7393	0.400	24.0	4000.4	2.930	15.12	0.000	0.00	4.845	13.51	768167.19 0.00	1574187.75				3547754240
9	8521	0.400	24.1	4500.1	2.892	15.12	0.000	0.00	4.806	14.02	857313.19 0.00	1684435.62				4030923776
10	9683	0.400	23.8	5000.2	2.821	14.87	0.000	0.00	4.742	13.64	937773.38 0.00	1785966.38				4268247808
11	10833	0.400	22.6	5500.2	2.722	15.78	0.000	0.00	4.710	14.75	1006199.06	0.00				
12	11978	0.400	24.8	6000.1	2.676	15.20	0.000	0.00	4.741	14.20	1067490.00	0.00				4935744512
									1953112.88							4870751232

13	13110	0.400	11.3	6500.1	2.630	13.93	0.000	0.00	4.763	13.15	1124513.50
14	14271	0.400	15.3	7000.3	2.600	15.30	0.000	0.00	4.741	14.23	1179055.38
15	15459	0.400	7.5	7500.1	2.542	14.16	0.000	0.00	4.759	14.15	1231696.12
16	16668	0.400	19.7	8000.1	2.519	16.88	0.000	0.00	4.797	14.51	1282454.75
17	17854	0.400	21.2	8500.1	2.468	14.56	0.000	0.00	4.840	13.83	1331938.88
18	19030	0.400	20.8	9000.0	2.581	14.97	0.000	0.00	4.839	13.86	1380197.25
19	20214	0.400	19.8	9500.3	2.592	14.86	0.000	0.00	4.866	13.59	1427328.75
20	21363	0.400	10.4	10000.0	2.585	14.50	0.000	0.00	4.894	14.29	1472609.62
21	22517	0.400	19.2	10500.2	2.561	15.14	0.000	0.00	4.960	13.70	1517094.38
22	23668	0.400	18.7	11000.1	2.565	14.54	0.000	0.00	5.054	13.90	1560300.38
23	24820	0.400	4.0	11500.2	2.538	14.90	0.000	0.00	5.112	13.37	1602568.50
24	25962	0.400	13.6	12000.0	2.565	14.39	0.000	0.00	5.178	14.45	1642752.12
25	27108	0.400	9.5	12500.2	2.538	14.39	0.000	0.00	5.213	12.88	1681082.75
26	28255	0.400	18.6	13000.2	2.539	14.40	0.000	0.00	5.264	14.78	1716826.50
27	29413	0.400	7.9	13500.2	2.493	14.16	0.000	0.00	5.296	13.02	1750981.38
28	30585	0.400	5.2	14000.1	2.465	14.08	0.000	0.00	5.309	12.97	1783571.00
29	31786	0.400	10.2	14500.1	2.537	14.39	0.000	0.00	5.398	12.89	1815570.88
30	32928	0.396	13.7	15000.3	2.516	14.25	0.000	0.00	5.434	13.15	1847624.00
31	34059	0.393	12.5	15500.0	2.509	13.99	0.000	0.00	5.470	12.93	1880104.12
32	35188	0.395	12.7	16000.0	2.506	14.10	0.000	0.00	5.502	12.85	1912103.00
33	36318	0.400	29.9	16500.1	2.567	13.49	0.000	0.00	5.517	12.42	1945376.62
34	37438	0.400	23.7	17000.3	2.540	14.85	0.000	0.00	5.553	14.65	1977379.50
35	38566	0.400	23.7	17500.1	2.516	14.63	0.000	0.00	5.533	14.80	2008523.25
36	39689	0.400	24.0	18000.3	2.522	14.97	0.000	0.00	5.594	14.41	2038786.88
37	40815	0.400	29.9	18500.4	2.526	13.60	0.000	0.00	5.588	12.35	2067235.75
38	41931	0.400	31.8	19000.1	2.486	13.21	0.000	0.00	5.603	15.48	2094459.75
39	43090	0.400	12.4	19500.2	2.415	14.12	0.000	0.00	5.513	13.39	2123271.25
40	44312	0.398	8.8	20000.2	2.471	13.98	0.000	0.00	5.506	13.40	2150992.50
								0.00	3487404.25		9516893184

Eingabe-Hydrograph Durchbrüche der Stauungen Extremszenario A

$T$	$Q1$	$V1$	$Q2$	$V2$	$Q3$	$V3$
0	1	3	0	0	30	3
1000	1	3	0	0	55	5
2000	1	3	0	0	45	5
5000	1	3	0	0	40	4
10000	1	3	0	0	35	3
15000	0	0	0	0	30	3
20000	0	0	0	0	20	2

# Mit diesen Eingaben hat r.avaflow folgenden Eingabe-Hydrographen ermittelt:



Startskript r.avaflow Stauende Muren Extremszenario B

```
#r.avaflow start script for ma

g.region -d

r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/elevation.tif output=basal_watersh
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/VersuchAnrissFuerImp_1.tif output=release_watershed
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/Impact_1.tif output=impact
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/torelease_raster.tif output=torelease
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/FaktorAnrissStauendeMuren1.tif output=faktor

g.region -s rast=basal_watersh

r.mapcalc --overwrite "release1 = release_watershed*(faktor*0.67)"
r.mapcalc --overwrite "release = release1 + (release_watershed*1.33)"
r.mapcalc --overwrite "basal = basal_watersh + release_watershed - release"

r.avaflow prefix=szen2 cellsize=5 phases=x gravity=9.81 controls=0,0,1,0,1,0,0,0,0,2,0 elevation=basal torelease=torelease
hrelease=release hdeposit=impact density=1800 friction=35,13,2.3 basal=-6.6,0.0 special=0.05,0.0,1.0,5.0,1.0,100.0 dynfric=0,-6.0
cfl=0.4,0.001 slidepar=0.0,0.0,0.0 thresholds=0.1,10000,10000,0.00001 time=10,1350 slomo=1.0 ctrlpoints=None
visualization=0.1,5.0,5.0,1,100,2,-11000,9000,100,0.60,0.25,0.15,0.2,2.0,None,None,None
```

g.region -d

**Summary Textdatei Muren Extremszenario B**

<i>nout</i>	<i>nsum</i>	<i>cfl</i>	<i>tlength</i>	<i>tsum</i>	<i>dmax</i>	<i>vmax</i>	<i>volume</i>	<i>ekin</i>	-----
<i>R</i>	----	----	----	----	*8.000	----	*4154191.8	-----	
0	0	----	----	0.0	5.320	0.00	349889.8		
1	59	0.384	7.8	10.1	3.692	13.75	719729.1	35428126720	
2	123	0.384	7.7	20.0	3.767	15.04	742917.1	35578671104	
3	188	0.379	7.9	30.1	4.749	16.27	766448.5	35778531328	
4	250	0.375	8.0	40.2	4.938	17.06	789675.6	36244520960	
5	313	0.374	7.8	50.0	4.821	16.95	812252.6	34660913152	
6	378	0.371	7.7	60.1	5.240	15.66	834022.4	31121745920	
7	443	0.369	7.8	70.1	5.968	14.24	854251.1	26946136064	
8	506	0.370	8.2	80.0	6.407	13.05	872599.9	22368890880	
9	567	0.366	8.6	90.1	8.072	12.34	889517.3	17999755264	
10	625	0.371	8.5	100.0	9.072	11.36	904456.1	14150313984	
11	684	0.377	8.5	110.0	9.496	10.50	917970.4	11013808128	
12	744	0.375	8.6	120.1	9.567	9.97	930223.6	8763091968	
13	803	0.377	8.6	130.1	9.686	9.34	941267.2	7075272704	
14	862	0.374	8.6	140.2	9.502	8.82	951504.0	5957980672	
15	920	0.369	8.6	150.0	9.499	8.44	960945.9	5145478144	
16	979	0.380	8.5	160.0	9.762	8.23	970062.9	4509086720	
17	1038	0.369	8.6	170.0	9.590	8.21	978851.1	4179281152	
18	1097	0.373	8.6	180.1	9.537	8.21	987449.0	3920675840	
19	1156	0.377	8.6	190.0	9.548	8.22	995802.8	3712080640	
20	1216	0.380	8.6	200.1	9.647	8.21	1004097.5	3554284800	
21	1280	0.380	7.1	210.0	9.655	15.22	1973623.5	43164971008	
22	1353	0.374	6.9	220.1	9.698	15.15	2009568.6	43312631808	
23	1420	0.373	7.9	230.1	9.899	14.67	2045177.9	44001173504	
24	1484	0.374	7.9	240.1	10.050	13.69	2081490.4	45169467392	
25	1549	0.370	7.5	250.1	10.077	13.99	2117332.5	45714468864	
26	1616	0.375	7.3	260.1	10.074	15.11	2152752.8	44424245248	
27	1684	0.368	7.5	270.1	10.098	14.50	2187392.0	41027883008	
28	1750	0.372	7.5	280.1	10.153	14.51	2220314.5	35977789440	
29	1815	0.380	7.9	290.1	10.201	14.44	2251081.8	30901741568	
30	1879	0.378	7.8	300.1	10.146	13.94	2279748.0	26123511808	
31	1941	0.377	8.0	310.1	10.150	13.71	2306495.2	222315112448	
32	2002	0.374	8.2	320.1	10.050	13.42	2331740.5	19314345984	
33	2062	0.371	8.4	330.1	10.219	12.97	2355569.8	16933750784	
34	2123	0.371	8.3	340.1	10.564	12.83	2378380.2	14758124544	
35	2184	0.374	8.2	350.0	10.852	12.19	2399786.8	13076033536	
36	2247	0.377	8.1	360.1	11.069	11.78	2420686.2	11733886976	
37	2310	0.377	8.1	370.1	11.214	11.36	2440684.0	10774227968	
38	2373	0.377	8.0	380.1	11.332	10.96	2460084.2	10020274176	
39	2437	0.378	8.0	390.1	11.412	10.55	2479412.8	9491127296	
40	2501	0.378	8.0	400.1	11.483	10.08	2498402.5	9098979328	
41	2565	0.378	7.8	410.0	11.915	9.70	2517114.0	8710249472	
42	2630	0.375	7.9	420.0	11.539	9.34	2535821.2	8737476608	
43	2695	0.375	7.9	430.1	11.733	9.11	2554718.2	8762645504	
44	2760	0.377	7.7	440.1	11.831	8.70	2573522.0	8630646784	
45	2825	0.375	7.7	450.0	12.117	8.61	2592391.2	8735726592	
46	2891	0.376	7.5	460.0	12.603	8.76	2611419.8	8665749504	
47	2957	0.376	7.9	470.2	11.636	8.59	2630896.8	9059113984	
48	3022	0.378	7.5	480.1	12.534	8.54	2650199.0	8802708480	
49	3090	0.369	7.4	490.1	12.769	8.82	2669390.8	8758804480	
50	3156	0.379	7.9	500.1	11.719	8.82	2688981.8	9223830528	
51	3221	0.378	7.7	510.0	12.267	8.60	2708644.5	9077105664	
52	3287	0.378	7.8	520.1	12.145	8.80	2728515.0	9191646208	
53	3353	0.380	7.8	530.0	11.742	9.00	2748316.2	9218835456	
54	3418	0.378	7.9	540.1	11.830	9.18	2768549.2	9306963968	
55	3483	0.384	7.9	550.1	11.718	9.13	2789078.8	9243128832	
56	3547	0.380	7.8	560.1	11.667	9.52	2809435.0	9117654016	
57	3611	0.381	8.0	570.0	11.615	9.71	2829723.8	9315258368	

58	3676	0.375	7.8	580.1	12.066	9.62	2850426.59249024000
59	3741	0.378	7.8	590.0	11.782	9.95	2871010.09293171712
60	3806	0.377	7.8	600.0	11.960	10.15	2891735.59255528448
61	3872	0.377	7.8	610.0	12.116	10.20	2912577.09302735872
62	3938	0.380	7.6	620.1	12.407	10.27	2933655.59178019840
63	4003	0.375	7.8	630.1	12.179	10.42	2954500.29347795968
64	4069	0.375	7.6	640.1	12.685	10.37	2975646.29162014720
65	4135	0.377	7.7	650.1	12.214	10.45	2996756.59308144640
66	4200	0.374	7.7	660.0	12.325	10.46	3017724.89246146560
67	4266	0.376	7.7	670.1	12.378	10.43	3039107.89273457664
68	4332	0.370	7.7	680.1	12.418	10.43	3060579.29237685248
69	4398	0.369	7.7	690.1	12.459	10.42	3082032.29231974400
70	4464	0.369	7.7	700.1	12.493	10.50	4493096.59940864000
71	4530	0.377	7.4	710.1	12.633	17.57	4548009.069143715840
72	4600	0.378	7.1	720.1	12.626	19.04	4612438.583570925568
73	4672	0.368	6.9	730.1	12.737	19.15	4681331.098003591168
74	4744	0.373	6.6	740.0	12.725	19.96	4754499.0109290536960
75	4822	0.378	6.4	750.0	12.725	19.92	4831461.0119799283712
76	4901	0.377	6.4	760.1	12.775	21.41	4911398.5128035700736
77	4983	0.379	5.9	770.1	13.619	22.22	4993275.0137279651840
78	5071	0.381	5.5	780.0	14.298	23.75	5076053.0149771698176
79	5162	0.371	5.5	790.0	14.063	23.83	5161153.0154345078784
80	5253	0.370	5.6	800.0	13.626	23.24	5246051.5142352547840
81	5343	0.375	5.7	810.0	13.774	22.87	5344136.5119014875136
82	5430	0.373	5.9	820.0	13.144	21.67	5417690.093637132288
83	5513	0.371	6.1	830.0	13.054	20.78	5483396.072024301568
84	5593	0.370	6.5	840.1	13.151	19.79	5542824.556854392832
85	5669	0.370	6.8	850.1	13.273	18.91	5597182.546564691968
86	5741	0.373	7.1	860.1	13.330	18.27	5648157.039527145472
87	5811	0.379	7.2	870.1	13.483	17.35	5696688.533959344128
88	5880	0.379	7.4	880.0	13.456	16.62	5742481.530017935360
89	5950	0.380	7.4	890.1	13.483	16.05	5786887.026646265856
90	6019	0.380	7.4	900.0	13.506	15.52	5829271.524033957888
91	6094	0.380	6.1	910.0	13.293	19.68	6673365.060976603136
92	6170	0.375	6.9	920.1	13.542	15.66	6739717.062341611520
93	6244	0.388	6.6	930.0	13.514	16.61	6806010.061746900992
94	6319	0.373	6.8	940.1	13.586	16.25	6872600.061317111808
95	6392	0.376	7.2	950.1	13.656	15.32	6939289.060420206592
96	6462	0.379	7.2	960.1	13.720	18.03	7004557.558575998976
97	6533	0.377	7.0	970.1	13.704	17.98	7069563.555072673792
98	6605	0.373	7.0	980.1	13.796	16.98	7133255.550787479552
99	6676	0.380	7.1	990.1	13.748	16.05	7194449.046488272896
100	6747	0.374	7.2	1000.0	13.743	15.95	7253397.542225528832
101	6825	0.380	6.3	1010.1	13.544	18.12	8007421.094858575872
102	6901	0.379	6.4	1020.1	13.583	17.42	8085597.061466419200
103	6978	0.371	6.9	1030.1	13.757	19.45	8153925.051029098496
104	7049	0.381	7.3	1040.1	13.687	17.04	8219156.543665575936
105	7119	0.380	7.3	1050.1	13.669	14.71	8281007.535914866688
106	7189	0.379	7.3	1060.1	13.671	14.10	8339769.530908858368
107	7259	0.378	7.3	1070.0	13.656	13.57	8396460.027798845440
108	7329	0.377	7.3	1080.0	13.618	13.02	8454280.025841797120
109	7400	0.376	7.3	1090.1	13.653	12.49	8508972.024696838144
110	7470	0.375	7.2	1100.1	13.705	12.42	8562075.023944783872
111	7540	0.374	7.2	1110.0	13.736	12.61	8614802.023488120832
112	7611	0.374	7.2	1120.1	13.757	12.71	8668587.023275143168
113	7681	0.374	7.2	1130.1	13.784	12.74	8721244.023170054144
114	7751	0.373	7.2	1140.0	13.831	13.02	8773638.023107008512
115	7822	0.373	7.2	1150.1	13.959	13.10	8826754.023126007808
116	7892	0.377	7.2	1160.1	14.045	13.19	8882044.022840387584
117	7963	0.371	7.1	1170.1	14.146	13.08	8937678.022784997376
118	8034	0.366	7.1	1180.1	14.278	13.23	8991620.022753105920
119	8104	0.364	7.1	1190.0	14.393	13.37	9044994.022783264768
120	8175	0.363	7.0	1200.0	14.483	13.50	9099657.022974162944

121	8247	0.363	7.0	1210.1	14.469	13.79	9154890.023160322048
122	8318	0.362	7.0	1220.1	14.628	13.71	9210278.023291375616
123	8389	0.364	7.0	1230.0	14.682	13.79	9265714.023509350400
124	8461	0.365	7.0	1240.1	14.668	13.92	9321529.023626029056
125	8533	0.373	6.8	1250.0	14.713	13.69	9375883.023305095168
126	8605	0.369	7.0	1260.1	14.810	13.59	9430805.023807397888
127	8677	0.382	6.9	1270.1	14.800	13.80	9485257.023440596992
128	8749	0.386	7.0	1280.1	14.969	13.57	9540216.023940941824
129	8820	0.382	7.0	1290.0	15.177	13.46	9595495.023864858624
130	8892	0.372	6.9	1300.0	15.204	14.01	9650396.024306536448
131	8965	0.372	7.0	1310.1	15.043	14.28	9707391.025947183104
132	9037	0.385	7.0	1320.0	14.863	14.19	9763181.026956441600
133	9110	0.391	7.0	1330.1	15.074	14.41	9820666.027367061504
134	9182	0.384	7.1	1340.1	14.878	14.21	9878833.028617746432
135	9255	0.385	7.0	1350.1	15.041	14.27	9937505.027992567808

### Startskript r.avaflow Durchbrüche der Stauungen Extremscenario B

```
#r.avaflow start script for zw
profile="416078,5241521,416308,5241908,416375,5242284,416571,5242560,416738,5242791,416999,5243022,417110,5243130,4173
73,5243230,417603,5243320,417915,5243390,418549,5243575,418861,5243817,418948,5244355,419042,5244481,419181,5245021,4
19188,5245200,419237,5245397,419318,5245668,419257,5246128,419242,5246375,419446,5246830,419576,5246995,419565,524732
2,419553,5247661,419710,5247979,419815,5248221,419762,5248329,419788,5248575,419898,5249088,420333,5249342,420851,524
9906,421248,5250215,421788,5250814,421629,5251109,420995,5251393,420769,5251814,420968,5252736,420646,5252661,420730,
5253080,420990,5253309,420703,5253428,420777,5253774,420594,5253955,420315,5253817,419959,5253952,419671,5254734"
g.region -d

r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/DEM_Szenario_B_Damm_Klein.tif output=elevations
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/entrain_Szenario_B_Damm_k.tif output=entrains
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/release_Damm_Senario_B_kl.tif output=dammrelease
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/vinx_Kleinsoelk_Senario_B_1.tif output=vinx1
r.in.gdal -o --overwrite input=DATA/viny_Kleinsoelk_Senario_B_1.tif output=viny1

g.region -s rast=elevations

r.lakefill cellsize=15 elevation=elevations lakedefault=sz1_lake1 level=1069 seedcoords=416044,5241543
r.lakefill cellsize=15 elevation=elevations lakedefault=sz1_lake2 level=1061.8 seedcoords=416539,5242476
r.lakefill cellsize=15 elevation=elevations lakedefault=sz1_lake3 level=1042.9 seedcoords=417784,5243379

r.mapcalc --overwrite "lakes = sz1_lake1+sz1_lake2+sz1_lake3"
r.mapcalc --overwrite "entrain = entrains + 0.3"
r.mapcalc --overwrite "lakessolid = (lakes*0.1)+dammrelease"
r.mapcalc --overwrite "lakesfluid = lakes*0.9"
r.mapcalc --overwrite "elevation = elevations-dammrelease"

r.avaflow prefix=FlutSzB cellszie=15 phases=s,ff gravity=9.81 limiter=1 layers=0 controls=0,0,1,0,1,0,0,3,0,2,0 elevation=elevation
hrelease1=lakessolid      hrelease3=lakesfluid      hentrmax1=entrain      rhentrmax1=0.5      vinx1=vinx1      viny1=viny1
hydrograph=DATA/ca_hydrograph5.txt hydrocoords=415805,5240776,140,275,418828,5243785,1000,255 density=2600,1000,1000
friction=35,13,0,0,0,0.05      viscosity=-9999,-9999,-3,-9999,-3,0      basal=-6,3,0
special=0.05,0,0,0.333,0,10,0.12,1,1,1,3,1,0.1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,10,0,1,1,1,1,0,1,0.5,0,1,0,100,0      dynfric=0,-6,0,0      cfl=0.4,0.001
slidepar=0.0,0.0,0.0 thresholds=0.1,10000,10000,0.000001 time=500,20000 slomo=1.0 profile="$profile" ctrlpoints=418828,5243785
visualization=0,1,5,0,5,0,1,100,2,-11000,9000,100,0.60,0.25,0.15,0,2,undefined,None,None,None

g.region -d
```

Summary Textdatei Durchbrüche der Stauungen Extremszenario B

R	nout	nsum	cfl	tlength	tsum	dmax1	vmax1	dmax2	vmax2	dmax3	vmax3	volume1	*87744.20					
												volume2	volume3	ekin				
												*3.000	*0.000	*4.815	*0.00	*771878.12	771878.12	
0	0	----	----	0.0	3.000	0.00	0.000	0.00	0.00	4.815	0.00	87744.19	0.00	87744.20	0.00	87744.20	0.00	
1	801	0.400	29.3	500.2	0.679	7.75	0.000	0.00	3.723	10.43	148843.81	0.00	847437.31	614266112	847437.31	614266112	847437.31	614266112
2	1646	0.400	25.3	1000.4	1.211	12.69	0.000	0.00	3.607	12.60	228341.50	0.00	941334.06	983299520	941334.06	983299520	941334.06	983299520
3	2576	0.400	19.4	1500.4	1.579	14.13	0.000	0.00	3.714	12.80	318324.88	0.00	1058159.00	1445343872	1058159.00	1445343872	1058159.00	1445343872
4	3596	0.400	25.9	2000.2	2.087	14.21	0.000	0.00	3.753	13.64	422758.38	0.00	1189473.25	2022578432	1189473.25	2022578432	1189473.25	2022578432
5	4662	0.400	24.0	2500.2	2.720	15.47	0.000	0.00	4.493	14.10	535341.12	0.00	1323987.62	2766237184	1323987.62	2766237184	1323987.62	2766237184
6	5769	0.400	19.8	3000.1	3.098	15.05	0.000	0.00	4.887	14.27	647292.50	0.00	1457652.38	3373104384	1457652.38	3373104384	1457652.38	3373104384
7	6952	0.400	14.0	3500.0	3.030	14.34	0.000	0.00	4.631	13.66	757668.38	0.00	1589610.88	4349861888	1589610.88	4349861888	1589610.88	4349861888
8	8150	0.400	8.2	4000.1	3.065	14.04	0.000	0.00	4.719	13.63	862497.75	0.00	1715654.50	4368824320	1715654.50	4368824320	1715654.50	4368824320
9	9349	0.400	5.0	4500.1	2.911	13.97	0.000	0.00	4.618	13.30	959684.25	0.00	1833761.62	4874204160	1833761.62	4874204160	1833761.62	4874204160
10	10592	0.400	11.5	5000.3	2.891	14.67	0.000	0.00	4.735	13.90	1044061.12	0.00	1939356.62	5578379264	1939356.62	5578379264	1939356.62	5578379264
11	11830	0.400	17.3	5500.5	2.836	14.82	0.000	0.00	4.747	14.10	1117930.38	0.00	2032153.50	5366869504	2032153.50	5366869504	2032153.50	5366869504
12	13054	0.400	4.2	6000.2	2.670	13.71	0.000	0.00	4.495	13.72	1184980.25	0.00	2118043.50	6040578560	2118043.50	6040578560	2118043.50	6040578560
13	14344	0.400	7.4	6500.2	2.750	14.20	0.000	0.00	4.564	13.30	1253064.75	0.00	2205110.25	6287179776	2205110.25	6287179776	2205110.25	6287179776
14	15660	0.399	4.5	7000.3	2.723	13.92	0.000	0.00	4.449	13.23	1318464.12	0.00	2289623.00	6730760704	2289623.00	6730760704	2289623.00	6730760704
15	16963	0.400	5.5	7500.2	2.783	13.67	0.000	0.00	4.539	13.06	1380584.50	0.00	2370908.00	6696716800	2370908.00	6696716800	2370908.00	6696716800
16	18252	0.400	8.4	8000.2	2.772	14.74	0.000	0.00	4.619	13.89	1440151.38	0.00	2449567.50	6834160640	2449567.50	6834160640	2449567.50	6834160640
17	19557	0.400	5.8	8500.1	2.808	13.95	0.000	0.00	4.675	13.43	1499170.75	0.00	2527644.25	6993313280	2527644.25	6993313280	2527644.25	6993313280
18	20844	0.400	8.0	9000.4	2.819	14.28	0.000	0.00	4.742	13.68	1556581.00	0.00	2604168.75	6984912896	2604168.75	6984912896	2604168.75	6984912896
19	22077	0.400	20.1	9500.3	2.859	14.90	0.000	0.00	4.817	13.76	1610948.75	0.00	2677651.25	6421788160	2677651.25	6421788160	2677651.25	6421788160
20	23264	0.400	16.6	10000.2	2.865	15.60	0.000	0.00	4.862	14.09	1663010.12	0.00	2748563.75	6630069248	2748563.75	6630069248	2748563.75	6630069248
21	24430	0.400	13.3	10500.3	2.827	15.25	0.000	0.00	4.875	14.51	1713342.12	0.00	2815238.25	7009150976	2815238.25	7009150976	2815238.25	7009150976
22	25611	0.400	13.1	11000.1	2.814	15.19	0.000	0.00	4.897	14.94	1761796.25	0.00	2880237.00	7089594368	2880237.00	7089594368	2880237.00	7089594368
23	26811	0.400	21.4	11500.0	2.775	15.53	0.000	0.00	4.918	14.35	1808345.00	0.00	2943525.75	7016265216	2943525.75	7016265216	2943525.75	7016265216
24	28013	0.400	5.5	12000.1	2.718	14.44	0.000	0.00	4.921	13.76	1853485.50	0.00	3005331.25	7628077568	3005331.25	7628077568	3005331.25	7628077568
25	29223	0.400	22.3	12500.1	2.736	15.40	0.000	0.00	4.959	14.04	1896884.12	0.00	3065468.25	7884673024	3065468.25	7884673024	3065468.25	7884673024
26	30474	0.400	18.6	13000.2	2.770	15.19	0.000	0.00	4.974	14.20	1940438.50	0.00	3125341.00	7251266048	3125341.00	7251266048	3125341.00	7251266048
27	31824	0.399	22.8	13500.1	2.747	15.93	0.000	0.00	4.937	14.61	1983735.12	0.00	3185404.75	8933145600	3185404.75	8933145600	3185404.75	8933145600

28	33181	0.398	22.7	13999.9	2.755	15.75	0.000	0.00	4.962	14.57	2027082.38
29	34545	0.272	23.2	14500.0	2.760	15.70	0.000	0.00	3245554.25		8985493504
30	35852	0.400	15.9	14999.9	2.782	15.08	0.000	0.00	4.996	14.56	2071335.88
31	37145	0.400	15.0	15500.1	2.778	14.97	0.000	0.00	5.022	14.10	2113520.75
32	38427	0.400	5.3	16000.0	2.770	14.30	0.000	0.00	3365563.25		8663750656
33	39681	0.400	29.5	16500.1	2.915	17.00	0.000	0.00	5.046	14.04	2155896.00
34	40890	0.400	13.7	17000.0	2.831	14.41	0.000	0.00	3422561.25		9131587584
35	42073	0.400	6.0	17500.0	2.838	13.98	0.000	0.00	5.226	15.14	2235377.00
36	43232	0.400	28.0	18000.0	2.883	17.32	0.000	0.00	3531109.00		7847897088
37	44477	0.400	30.5	18500.3	2.970	13.56	0.000	0.00	5.223	13.39	2273844.25
38	45710	0.400	23.1	19000.2	2.905	16.48	0.000	0.00	3583771.00		8479021568
39	47045	0.400	8.5	19499.9	2.852	14.77	0.000	0.00	5.304	12.94	2309917.50
40	48540	0.400	7.3	19999.8	2.846	15.71	0.000	0.00	3633923.75		8095979520
									5.349	16.30	2345524.75
									3683516.00		9949932544
									5.373	15.58	2381601.25
									3733947.25		10099014656
									5.384	15.27	2415463.75
									3782181.75		11029822464
									5.296	14.43	2450271.75
									3831710.00		13006358528
									5.226	14.90	2486115.25
									0.00		15361652736

### Eingabe-Hydrograph Durchbrüche der Stauungen Extremscenario B

T	Q1	V1	Q2	V2	Q3	V3
0	1	3	0	0	30	3
1000	1	3	0	0	55	5
2000	1	3	0	0	45	5
5000	1	3	0	0	40	4
10000	1	3	0	0	35	3
15000	0	0	0	0	30	3
20000	0	0	0	0	20	2

# Mit diesen Eingaben hat r.avaflow folgenden Eingabe-Hydrographen ermittelt:

