



ForestFrame

Technischer Bericht – 2023

Entwicklungskooperation zwischen

Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Naturgefahren
Rennweg 1, Hofburg, A-6020 Innsbruck

Forsttechnischer Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung
Fachzentrum Geologie und Lawinen
Wilhelm-Greil-Straße 9, A-6020 Innsbruck

Autoren

Christoph Hesselbach
Andreas Huber
Anna Wirbel
Felix Oesterle
Michaela Teich
Jan-Thomas Fischer



Zusammenfassung

Die Entwicklungskooperation ForestFrame zielt darauf ab, den aktuellen Stand der Forschung, sowie neue Erkenntnisse der Wissenschaft im Bereich der Wechselwirkung zwischen Wald und Lawinen in Lawinensturzbahnen zusammenzufassen. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Überblick von Methoden zur Berücksichtigung dieser Wechselwirkung in etablierten Modellansätzen und Simulationswerkzeugen. Die Waldwiderstands-Implementierung von SamosAT, dient als Grundlage für die Integration in das Lawinensimulationsmodul AvaFrame:com1DFA. Anders als bei anderen etablierten tiefengemittelten 2D-Lawinensimulationsmodellen, welche klassischerweise die Reibungsparameter adaptieren oder den Massenverlust im Wald (Detrainment) berücksichtigen, wird die Berücksichtigung der Waldwirkung in SamosAT durch eine zusätzliche Widerstandskraft in die Impulsbilanz mit einbezogen. Für ausgewiesene Waldwiderstandsbereiche wird die Widerstandskraft anhand von empirisch bestimmten Waldparametern berechnet.

Die Wirksamkeit der AvaFrame:com1DFA Waldimplementierung wird auf theoretischer Ebene, sowie durch generische Testbespiele und praxisbezogene Simulationsszenarien untersucht. Die theoretische Analyse und Aufbereitung der Waldwiderstands-Implementierung hat ergeben, dass die resultierende Geschwindigkeit und demnach auch der Druck hauptsächlich von der effektiven Fließmächtigkeit und dem Reibungswiderstand, welcher im Term der Waldwiderstandskraft implementiert ist, abhängt und sich z.B. durch die Abhängigkeit der Fließmächtigkeit signifikant von anderen Ansätzen unterscheidet. Ebenfalls wurde gezeigt, dass der Auslauf insbesondere bei Lawinen mit kleiner Fließmächtigkeit durch die Wirkung der Waldwiderstandskraft mit den Standard SamosAT Parametern nur gering beeinflusst wird.

Potenzielle Weiterentwicklungen des ForestFrame-Projekts umfassen eine Anpassung der Widerstandskraft, um eine gezielte Beeinflussung von Aufpralldrücken, Fließgeschwindigkeiten und Auslaufängen zu erreichen. Dies könnte durch eine Parametrisierung des Widerstandskoeffizienten und Anpassungen des theoretischen Modells der Widerstandskraft oder in der Implementierung der Abhängigkeit von der effektiven Fließmächtigkeit erfolgen. Eine unabhängige Anpassung der Waldwiderstandskraft von geschwindigkeitsabhängigen Reibungstermen sowie die Möglichkeit der Anpassung der Fließmächtigkeiten durch Deposition oder Detrainment in Abhängigkeit von Waldparametern können insbesondere für kleine Lawinen einen signifikanten Unterschied bewirken.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Inhaltsverzeichnis	4
Ausgangslage und Zielsetzung.....	6
Wechselwirkung Wald-Lawine und Abbildung in Simulationswerkzeugen.....	7
Methoden.....	10
Modellansatz aus SamosAT	10
Analytischer Vergleich der Waldwiderstandskraft (SamosAT/AvaFrame:com1DFA) und vergleichbarer Reibungsansätze (turbulente Reibung/Voellmy).....	12
Lawinensimulation: Daten und Testbeispiele.....	12
Generische Beispiele	13
Beispiel mit Realbezug (Arzler Alm Lawine)	14
Analyse und Ergebnisse	16
Aktuelle AvaFrame:com1DFA/SamosAT Parametrisierung – Ausgangslage.....	16
Lawinensimulation: Testbeispiele und Parameterstudie.....	19
Zusammenfassung und Diskussion.....	22
Ausblick	25
Literaturverzeichnis	26



Ausgangslage und Zielsetzung

Simulationsmodelle werden zur Beurteilung von gravitativen Massenbewegungen und insbesondere für Lawinen eingesetzt. Das open-source Framework „AvaFrame“ erlaubt die Implementierung unterschiedlicher Simulationsmodelle wie z.B. dem Fließlawinenmodul com1DFA (Tonnel et al., 2023) und deren modulare Erweiterung (Oesterle et al., 2022). Entsprechende GIS-Schnittstellen erlauben eine einfache Bearbeitung von Eingangsdaten und Simulationsergebnissen. Neben der Beurteilung von maximalen Auslauflängen und Aufpralldrücken, welche z.B. eine zentrale Rolle in der Gefahrenzonenplanung spielen, können Simulationsmodelle auch als Werkzeug eingesetzt werden, um die Funktion von technischen oder naturbasierten Schutzmaßnahmen zu bestimmen oder deren Wirkung abzuschätzen. Wie aktuelle Beispiele aus Osttirol, sowie dem Ötz- oder Sellraintal eindrucksvoll zeigen, ist etwa eine Einschätzung der Wirkung von Schutzwäldern nach Störungen oder Kalamitäten (z.B. Sturmschäden oder Käferbefall) eine Fragestellung von hohem praktischem Interesse.

Ziel der Entwicklungskooperation ForestFrame ist es, existierende Modellansätze zu Lawine-Wald Interaktion in der Lawinensturzbahn zu evaluieren, neue Entwicklungen aufzuzeigen und etablierte Ansätze in das AvaFrame Berechnungsmodell com1DFA zu implementieren. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der Abbildung möglicher Interaktionen zwischen Wald und Lawinen, die sich bereits in Bewegung befinden; Funktion und Wirkung des Waldes auf die Lawinenbildung und -auslösung wurden im Zuge der vorliegenden Studie nicht untersucht.

Folgende Punkte wurden im Rahmen von ForestFrame bearbeitet:

- Überblick des aktuellen Standes der Wissenschaft zum Thema Wechselwirkung Wald-Lawine in der Lawinensturzbahn.
- Zusammenfassung von Methoden für die Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Wald und Lawine in der Sturzbahn in etablierten Lawinensimulationsmodellen.
- Analyse und Aufbereitung der Waldwiderstands-Implementierung aus SamosAT (Sampl, 2007) als Grundlage für die Integration in AvaFrame:com1DFA (Tonnel et al., 2023).
- Testen der Implementierung anhand generischer Beispiele und eines Beispiels mit Realbezug.
- Abschließende Zusammenfassung und Formulierung von möglichen Weiterentwicklungen.

Wechselwirkung Wald-Lawine und Abbildung in Simulationswerkzeugen

In Regionen mit hoher Reliefenergie und saisonaler Schneedeckung können Waldbestände die Entstehung, Größe und teilweise auch Reichweite von Lawinen wesentlich beeinflussen (Nairz et al., 2011). Dadurch leisten Wälder in alpinen Regionen einen wichtigen Beitrag zum Schutz menschlicher Siedlungen und Infrastruktur und ermöglichen in Kombination mit technischen und raumplanerischen Maßnahmen eine dauerhafte Besiedelung dieser Gebiete (vgl. Teich et al., 2022). Lawinen und Wald stehen dabei in einer Wechselwirkung. Die Struktur und Zusammensetzung des Waldbestandes beeinflussen einerseits die Lawinenaktivität, andererseits hat die Lawinenaktivität ihrerseits Einfluss auf die Waldzusammensetzung und -struktur (Bebi et al., 2009).

Die Wechselwirkung von Waldvegetation und Lawinen, kann dabei räumlich in (i) Interaktionen in potentiellen Lawinenauslösegebieten und (ii) Interaktionen in der Sturzbahn und im Ablagerungsbereich unterschieden werden. Während die primäre Schutzwirkung des Waldes vor Allem die Verhinderung von Lawinenauslösungen ist (vgl. Bebi et al., 2009), kann eine Sekundärwirkung auch in der Reichweiten- und Intensitätsreduktion von sich bereits in Bewegung befindlichen Lawinen bestehen (Teich et al., 2012). Diese mögliche "Bremswirkung" hängt neben der Waldstruktur auch von den Lawineneigenschaften (Größe, Fließregime) und der relativen Lage von Lawinenauslöse- und Waldflächen zueinander ab.

Stark vereinfachend kann festgehalten werden, dass zwischen der Auslaufstrecke von kleineren Lawinen mit Auslösegebieten im oder knapp oberhalb des Waldes eine tendenziell höhere Korrelation zwischen beobachteter Auslaufstrecke und Waldstrukturparametern festgestellt werden kann als für größere Lawinen mit Auslösegebieten weit oberhalb des Waldes (Teich et al., 2012). Während Wald zwar auch in diesem Fall zu einer Reduktion der Fließgeschwindigkeiten führen kann (vgl. Takeuchi et al., 2011), ist der Einfluss auf die Auslaufstrecke als geringer einzuschätzen. Bäume bleiben in ersterem Fall auch oft weitgehend intakt und fungieren so als effektive physische Barriere für die Lawine, während es mit zunehmender Lawinengröße und -intensität vermehrt zum Bruch und oder der Entwurzelung von einzelnen Bäumen oder ganzen Beständen kommt (Feistl et al., 2014). Ob und wie es zu Schäden an der Waldvegetation kommt, hängt dabei auch vom Fließregime der Lawine ab (Feistl et al., 2015). Die maßgeblichen Bremsmechanismen werden entscheidend davon beeinflusst, ob der Wald intakt bleibt oder zerstört wird. Im Fall intakt bleibender Bäume kann beobachtet werden, dass Lawinenschnee hinter Einzelbäumen oder Baumgruppen abgelagert wird, und so der Lawine Masse und damit auch Energie entzogen wird; bei einer Zerstörung des Waldes durch die Lawine besteht die mögliche Bremswirkung vor Allem in der Dissipation von Energie durch das Brechen oder Umwerfen von Bäumen und die Aufnahme organischer und anorganischer Fragmente in die Lawine (Feistl et al., 2015).

Genau diese zwei Mechanismen sind auch die gängigsten Ansätze, um eine mögliche bremsende Wirkung des Waldes in Lawinensimulationsmodellen abzubilden. (Friction --> große Lawinen; Detrainment --> kleine Lawinen).

Historisch gesehen wurden Lawinensimulationswerkzeuge für die Berechnung von Auslaufstrecken und Intensitäten von meist sehr großen Lawinen mit entsprechend hohen Wiederkehrperioden entwickelt (Anwendungsfälle Gefahrenzonenplanung, Bemessung von permanenten Schutzmaßnahmen im Lawinenpfad oder -auslauf). Dementsprechend wurde in vielen lawinendynamischen Modellen eine

Bremswirkung des Waldes ursprünglich nicht berücksichtigt oder später nur durch kleine Änderungen der Fließwiderstandsparameter abgebildet (Bartelt et al., 2017; Gruber & Bartelt, 2007). Gängige Methoden sind hierbei die Anpassung der Parametrisierung des basalen und/oder turbulenten Reibungsterms in Modellen vom Typ Voellmy (vgl. Voellmy, 1955; Christen et al., 2010) oder die Einführung zusätzlicher turbulenter Verlustterme in die Impulserhaltungsgleichungen ähnlicher Modelle (vgl. Oesterle et al., 2022; Sampl, 2007).

Tabelle 1: Überblick der Publikationen zum Thema Wald-Lawinen Interaktion in Simulationsmodellen

Titel	Autor	Thema	Relevanz für Modelansatz
Snow Avalanches in Forested Terrain: Influence of Forest Parameters, Topography, and Avalanche Characteristics on Runout Distance	Teich et al., 2012	Stat. Analyse von Waldstrukturparametern bzgl. Runout	Process-based Data-based
Observations and modeling of the braking effect of forests on small and medium avalanches	Feistl et al., 2014	Detrainment Ansatz	Process-based
Computational snow avalanche simulation in forested terrain	Teich et al., 2014	Optimierung Detrainment ansatz	Process-based
Forest damage and snow avalanche flow regime	Feistl et al., 2015	RAMMS::Extended Powder Cloud	Process-based
Evaluierung von Gefahrenbeurteilungsmethoden und deren Implikationen für die forstliche Raumplanung - EVAMETH	Fischer, 2015	Interaktion Wald / Lawine SamosAT	Process-based Data-based
Observations and numerical simulations of the braking effect of forests on large-scale avalanches	Takeuchi et al., 2018	Wald-Bremswirkung im Modell Titan 2D (Reibungsansatz)	Process-based
Determining forest parameters for avalanche simulation using remote sensing data	Brožová et al., 2020	Herleitung von Waldparametern	Process-based Data-based
Avalanche Protection Forest: From Process Knowledge to Interactive Maps	Bebi et al., 2022	Interaktion Wald / Lawine Methode zur Ausweisung von Schutzwald	Process-based Data-based
Modeling Protective Forests for Gravitational Natural Hazards and How It Relates to Risk-Based Decision Support Tools	D'Amboise, Teich, et al., 2021	Waldwirkungs-Modul in FlowPy (Friction Ansatz)	Data-based
Detrainment and braking of snow avalanches interacting with forests	Védrine et al., 2022	3D-Modell für Interaktion Wald / Lawine Parametrisierung unterschiedlicher Fließregime	Process-based
NAKSIN – a New Approach to Snow Avalanche Hazard Indication Mapping in Norway	Issler et al., 2023	Wald-Bremswirkung und -Zerstörung in NAKSIN (Voellmy-Reibungs-Ansatz)	Process-based

In der letzten Dekade hat ein gesteigertes Interesse an der Gefahrenbeurteilung für häufiger auftretende, kleine und mittlere Lawinen, welche für die Gefährdung von Personen in Skigebieten oder entlang von Straßen und Bahngleisen wichtig sind (Dreier et al., 2014), dazu geführt, dass die bis dahin nicht näher untersuchte Bremswirkung von Wald auf Lawinen dieser Größenordnung (vgl. Bebi et al., 2009) vermehrt in den Fokus von wissenschaftlichen Arbeiten getreten ist (z.B. Teich et al., 2012, 2014; Feistl et al., 2014). Im Zuge dieser Arbeiten (z.B. Feistl et al., 2014; Teich et al., 2014; Brozova et al., 2020) hat sich gezeigt, dass die bis dato verwendeten Ansätze zur Modellierung der Waldbremswirkung (geringfügige Modifikation der Reibungsterme) die in der Natur beobachteten Wechselwirkungen zwischen Wald und Lawinen kleiner und mittlerer Größe nur unzureichend abbilden. Auf Basis von Feldbeobachtungen entstand so der sog. "Detrainment"-Ansatz, bei dem der Lawine auch im numerischen Modell auf Waldflächen über eine 1-parametrische Funktion definierte Masse und der dieser Masse entsprechende Impuls entzogen wird (Feistl et al., 2014; Teich et al., 2014).

Mit ähnlichen Methoden wird auch bei Daten-basierten, empirisch-motivierten Modellen versucht, eine Waldwirkung in der Sturzbahn zu berücksichtigen (vgl. D'Amboise et al., 2021; D'Amboise et al., 2022).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über Publikationen, die sich mit der Berücksichtigung der Wald-Lawinen Interaktion in der Sturzbahn in unterschiedlichen Modellen beschäftigen.

Methoden

Modellansatz aus SamosAT

Die Bewegungsgleichungen werden ausführlich in Zwinger (2000); Salm (2004); Sampl (2007) hergeleitet und sind anschaulich in Fischer & Kofler (2013); Kofler (2014) und dem EVAMETH Projektbericht (Huber et al., 2015) zusammengefasst. Ebenso sind die Herleitungen auch auf docs.avaframe.org (Oesterle et al., 2022) und in Tonnel et al. (2023) zu finden. Die Massenerhaltungsgleichung (1) besagt, dass sich die Masse des fließenden Schnees während der Simulation bei Vernachlässigung von Schneeaufnahme oder -ablagerung (Entrainment, beziehungsweise Detrainment $q = 0$, vgl. Fischer et al., 2012; Jörg & Granig 2013; Fischer & Kofler 2013) nicht ändert:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d(A\bar{h})}{dt} = 0. \quad (1)$$

Die Änderung des Impulses, Gleichung (2) kann in eine Geschwindigkeitsänderung und eine Massenänderung (die im speziellen Fall gleich Null ist, $q = 0$) aufgeteilt werden:

$$\frac{d\bar{u}_i}{dt} = g_i + \frac{1}{\bar{\rho}A\bar{h}} \oint_{\partial A} \left(\frac{\bar{h}\sigma^{(b)}}{2} \right) n_i dl - \delta_{i1} \frac{\tau^{(b)}}{\bar{\rho}\bar{h}} - \frac{1}{2} c_{res} \bar{u}^2 \frac{\bar{u}_i}{\|\bar{u}\|}. \quad (2)$$

In der Impulsbilanz ergibt sich die Beschleunigung aus der Summe der Schwerkraft, Oberflächenkräften, Bodenschubspannung und Widerstandskräften durch Hindernisse, einschließlich der Berücksichtigung von Waldwirkung. Die Widerstandskraft durch Hindernisse und/oder Wald wird empirisch angenähert (vgl. Sampl, 2007). Sie hängt vom maßgebenden Durchmesser \bar{d} , seiner Höhe h_{res} , dem mittleren Abstand zu anderen Objekten s_{res} und einem empirischen Beiwert c_w ab (siehe Abbildung 1) und ergibt sich somit zu:

$$F_i^{res} = -\frac{1}{2} \left(\bar{d} \frac{c_w}{s_{res}^2} \right) \bar{\rho} A h^{eff} \bar{u}^2 \frac{\bar{u}_i}{\|\bar{u}\|}. \quad (3)$$

h^{eff} ist definiert als $\min(h, h_{res})$. Die Parameter \bar{d} , c_w und s_{res} werden zum Term c_{res} zusammengefasst.

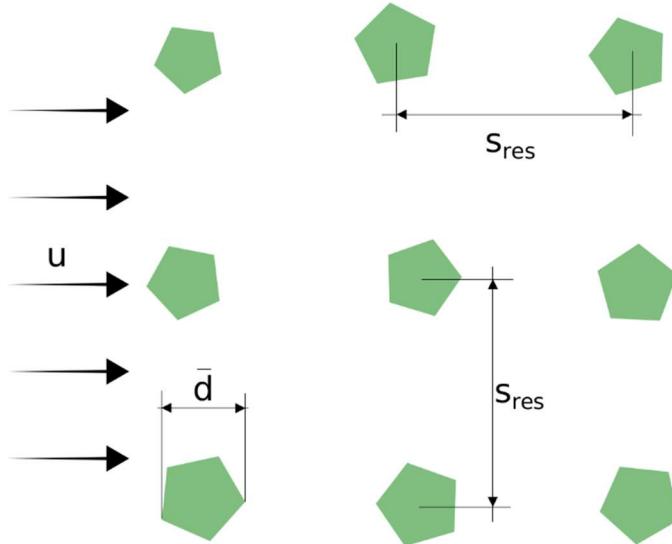


Abbildung 1: Widerstandskraft bei Hindernissen (Oesterle et al., 2022; Sampl, 2007)

Der Reibungswiderstand c_{res} wird gemäß den Standardparametern, wie sie in Tabelle 2, und der Gleichung 4 für Wald in SamosAT festgelegt sind, berechnet.

$$c_{res} = \frac{1}{2} \bar{d} \frac{c_w}{s_{res}^2}. \quad (4)$$

Tabelle 2: Aktuelle SamosAT Parametrisierung für Wald

Durchmesser \bar{d} [m]	Abstand s_{res} [m]	Höhe h_{res} [m]	Widerstandskoeffizient c_w [-]	Reibungswiderstand c_{res} [m^{-1}]
0,3	5	10	0,5	0,003

Zusammenfassen lässt sich folgendes für die Waldimplementierung für SamosAT und in weiterer Folge für die Integration in AvaFrame:com1DFA (Tonnel et al., 2023) daraus ableiten:

- Die Waldimplementierung in SamosAT ist in Zwinger (2000); Salm (2004); Sampl (2007); Oesterle et al. (2022) und Tonnel et al. (2023) hergeleitet und anschaulich in Fischer & Kofler (2013); Kofler (2014) und dem EVAMETH Projektbericht (Huber et al., 2015) zusammengefasst.
- Jeder ausgewiesene Widerstandsbereich berechnet die Widerstandskraft anhand empirisch bestimmter Waldparameter (Abbildung 1; Gleichung 4).
- Die Widerstandskraft wird in die Impulserhaltung (Gleichung 2) einbezogen.
- Die Widerstandskraft ähnelt dem Ansatz der erhöhten Reibung (Reibungsansatz).
- Massenverlust (Detrainment) wird nicht berücksichtigt.

Analytischer Vergleich der Waldwiderstandskraft (SamosAT/AvaFrame:com1DFA) und vergleichbarer Reibungsansätze (turbulente Reibung/Voellmy)

Der Waldwiderstandsterm von SamosAT wird mit dem Voellmy turbulenten Reibungsterm verglichen, um eine Abschätzung darüber zu erhalten, in welchem Bereich die Parameter des Waldwiderstandes im Vergleich zu den gängigen Waldimplementationsmodellen liegen. Nicht berücksichtigt wird an dieser Stelle die bereits implementierte turbulente Reibung in SamosAT und der Voellmy Coulomb Reibungsparameter μ welcher zum Beispiel in RAMMS::Avalanche (Christen et al., 2010) implementiert ist. Der Vergleich setzt sich zusammen aus der Waldwiderstandskraft F_i^{res} von SamosAT:

$$F_i^{res} = -\frac{1}{2} \left(\bar{d} \frac{c_w}{s_{res}^2} \right) \bar{\rho} A h^{eff} \bar{u}^2 \frac{\bar{u}_i}{\|\bar{u}\|} \quad (3 \text{ Wdh.})$$

und dem turbulenten Reibungsterm, dem Chezy Term, aus dem Voellmy Reibungsmodell:

$$\tau^{(b)} = \tan \delta \sigma^{(b)} + \frac{g}{\xi} \rho_0 \bar{u}^2. \quad (5)$$

Der Vergleich von Waldwiderstandskraft und turbulenter Reibungskraft ergibt:

$$c_{res} \rho_0 A h^{eff} \bar{u}^2 = A \frac{g}{\xi} \rho_0 \bar{u}^2 \quad (6)$$

und nach dem turbulenten Reibungsparameter ξ auflösen:

$$\xi = \frac{g}{h^{eff} c_{res}}. \quad (7)$$

Lawinensimulation: Daten und Testbeispiele

Um die Implementierung vom SamosAT-Waldwiderstandsterm in AvaFrame:com1DFA zu analysieren und zu testen, werden Testbeispiele mit unterschiedlichen Auslöseszenarien mit Widerstandsfläche (Wald-Variante) und ohne Widerstandsfläche (Null-Variante) aufgesetzt. Die Beispiele gliedern sich in zwei generische Beispiele mit jeweils zwei Auslöseszenarien und ein Beispiel mit Realbezug. Anschließend wird eine Parameterstudie mit varierenden Waldparametern, den aktuellen SamosAT-Parametern (Tabelle 2) sowie der Null-Variante durchgeführt.

Generische Beispiele

Für die zwei generischen Beispiele wird jeweils eine *hockey stick* Topographie mithilfe des AvaFrame (Oesterle et al., 2022) Tools `in3Utils.generateTopo` mit einer Auflösung von 5 m erstellt. Zusätzlich werden mit dem Tool `in3Utils.getReleaseArea` zwei Auslöseszenarien für jedes Beispiel generiert (Abbildung 2). Die beiden Beispiele repräsentieren kleine und große Lawinenszenarien, die sich in Höhenunterschieden der Topographien und dem Auslösevolumen unterscheiden (Tabelle 3). Die Widerstandsgebiete wurden so festgelegt, dass sie bei der Höhenmarke 1800 m beginnen und bis in den flachen Auslaufbereich reichen. Die Auslöseszenarien unterscheiden sich in der Entfernung zum Widerstandsgebiet, wobei Szenario-1 (AvaTest500-1 und AvaTest1000-1) von der oberen Begrenzung der Topographie startet und Szenario-2 (AvaTest500-2 und AvaTest1000-2) kurz vor dem Widerstandsgebiet beginnt.

Tabelle 3: Parameter set up für generische Testbeispiele. *Differenz von Auslösegebiet zu Dam

Szenario (code)	Topographie (res [m], meanAlpha [°], rCirc[m])	Höhen-differenz Topo [m]	Anbruch-mächtigkeit [m]	Auslöse-volumen [m³]	Wald Dimension (z[hm], x[m])	Distanz Auslösegebiet zu Wald (z[hm], x[m])
AvaTestGen500-1	hockey stick (5, 35, 500)	500	0.5	15000	200, 1000	190, 270
AvaTestGen500-2	hockey stick (5, 35, 500)	500	0.5	15000	200, 1000	60, 100
AvaTestGen1000-1	hockey stick (5, 35, 1000)	1000	1	70000	400, 2600	430, 630
AvaTestGen1000-2	hockey stick (5, 35, 1000)	1000	1	70000	400, 2600	100, 150

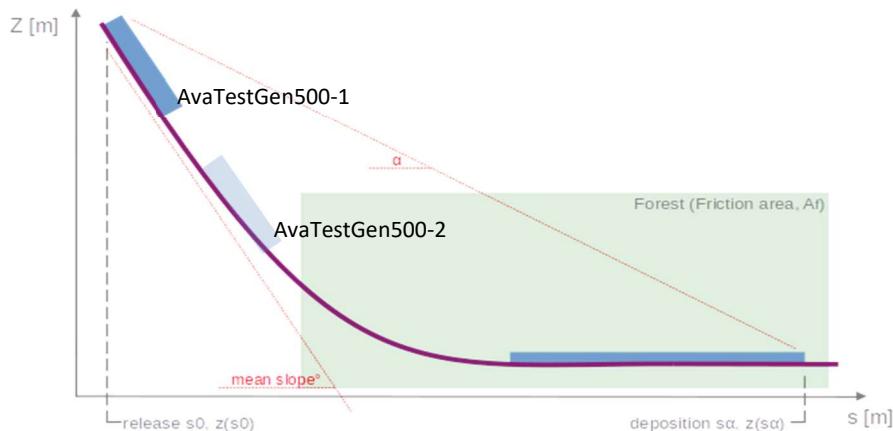


Abbildung 2: 2D Schema für generisches Beispiel (klein) – AvaTestGen500-1 Auslösung oben ($s_0, z(s_0)$) & AvaTestGen500-2 Auslösung unten. Topographie = *hockey stick*; Höhenunterschied ($Z[m]$) = 500m; Widerstandgebiet (grün) = Forest (Friction area, A_f); Auslauf = deposition ($s_\alpha, z(s_\alpha)$). Der mean slope bezieht sich auf einzustellenden Parameter `in3Utils.generateTopo` für die geneigte Fläche.

Beispiel mit Realbezug (Arzler Alm Lawine)

Für das Beispiel mit Realbezug wird die Arzler Alm Lawine verwendet (Abbildung 3). Als Datengrundlage für die Topographie und die Waldinformationen wurde das digitale Geländemodell sowie die Waldkategorien-Daten vom Server data.tirol.gv.at verwendet. Die Waldkategorien basieren auf den Daten von: Schutzwald im Ertrag, Schutzwald außer Ertrag, Wirtschaftswald – mittlere Schutzwirkung und Wirtschaftswald. Die Daten können von der tatsächlichen Bewaldung abweichen, anders als im generischen Beispiel ist der Wald hier nicht flächig geschlossen, sondern vor allem im Bereich des Dammes lückenhaft und von Forststraßen durchzogen. Da die Widerstandswirkung nur in ausgewiesenen Waldgebieten eine Rolle spielt ist die Definition und Überprüfung der entsprechenden Widerstandsgebiete von zentraler Bedeutung. Die Geländemodellauflösung beträgt 5 m. Das Auslöseszenario ist fiktiv. Die Auslösemächtigkeit wurde mit 1,76 m bestimmt, daraus folgt ein Auslösevolumen von ca. 70.000 m³ (Tabelle 4). Dies entspricht einer großen Lawine. Die rote Fläche in Abbildung 3 nähert sich dem Waldschaden von einem Lawinenabgang im Januar 2019 an, wird aber hier nicht weiter in die Analyse miteinbezogen. Dies ist damit begründet, dass das Auslösegebiet fiktiv ist, und AvaFrame:com1DFA für Fließlawinen entwickelt wurde, während der Schaden aber eher durch den Staubanteil der Lawine verursacht wurde.

Tabelle 4: Parameterset für das Testbeispiel mit Realbezug. *¹ Quelle: https://gis.tirol.gv.at/arcgis/services/Service_Public/terrain/MapServer/WCS? *² Differenz von Auslösegebiet zu Dam *³ Quelle: https://www.data.gv.at/katalog/dataset/land-tirol_waldkategorientirol (Schutzwald im Ertrag, Schutzwald ausser Ertrag, Wirtschaftswald - mittlere Schutzwirkung, Wirtschaftswald).

Szenario (code)	Topographie (res [m]) * ¹	Höhendifferenz [m] * ²	Anbruch-mächtigkeit [m]	Auslöse-volumen [m ³]	Wald * ³	Distanz Auslösegebiet zu Wald (z[hm], x[m])
AvaTestArzl	DEM (5)	1200	1.76	ca. 70000	Shp	700, 1200

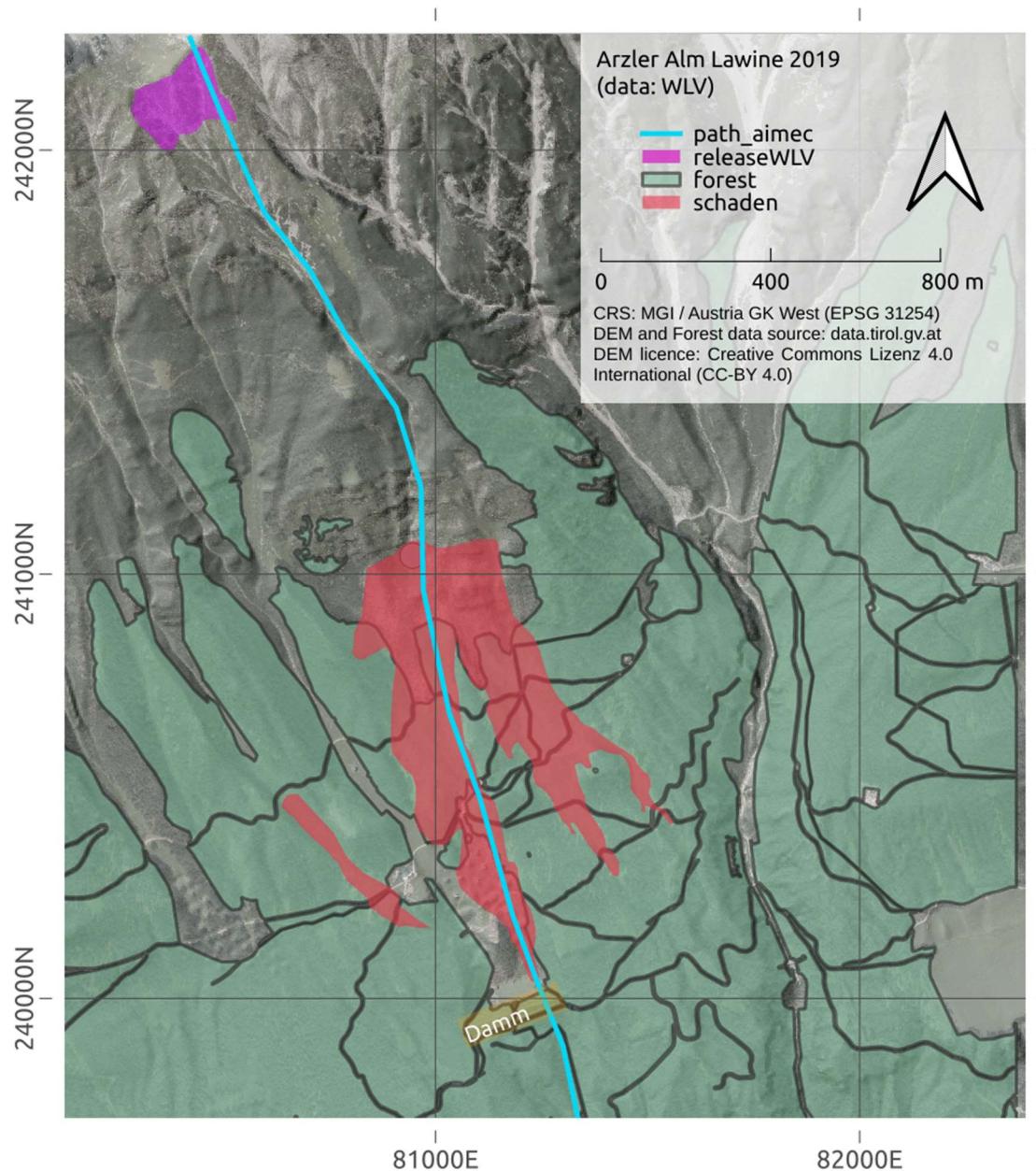


Abbildung 3: Testbeispiel mit Realbezug: Arzler Alm Lawine – Simulation Code: AvaTestArzl. Das Auslösegebiet (release WLV) ist fiktiv, die rote Fläche nähert sich dem Waldschaden von einem Lawinenabgang im Januar 2019 an. Grüne Flächen spiegeln die Waldflächen wider.

Analyse und Ergebnisse

Aktuelle AvaFrame:com1DFA/SamosAT Parametrisierung – Ausgangslage

Abbildung 4 zeigt die Simulationsergebnisse der maximalen Fließhöhen bzw. Fließmächtigkeit normal zur Oberfläche gemessen des Lawinenszenarios mit Realbezug (AvaTestArzl) von AvaFrame:com1DFA. Auf der linken Seite werden die maximalen Fließmächtigkeiten ohne den Einfluss von Wald (Null-Variante) dargestellt, während auf der rechten Seite die maximalen Fließmächtigkeiten unter Berücksichtigung des Waldwiderstands zu sehen sind. Der Waldwiderstand wurde unter Verwendung der Standardparameter gemäß Tabelle 2 und der Gleichung (4) berechnet.

Abbildung 5 zeigt die Simulationsergebnisse der maximalen Fließgeschwindigkeiten des Lawinenszenarios mit Realbezug (AvaTestArzl) von AvaFrame:com1DFA. Auf der linken Seite werden die maximalen Fließgeschwindigkeiten ohne den Einfluss von Wald (Null-Variante) dargestellt, während auf der rechten Seite die maximalen Fließgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung des Waldwiderstands mit Standardparametern (Tabelle 2) zu sehen sind.

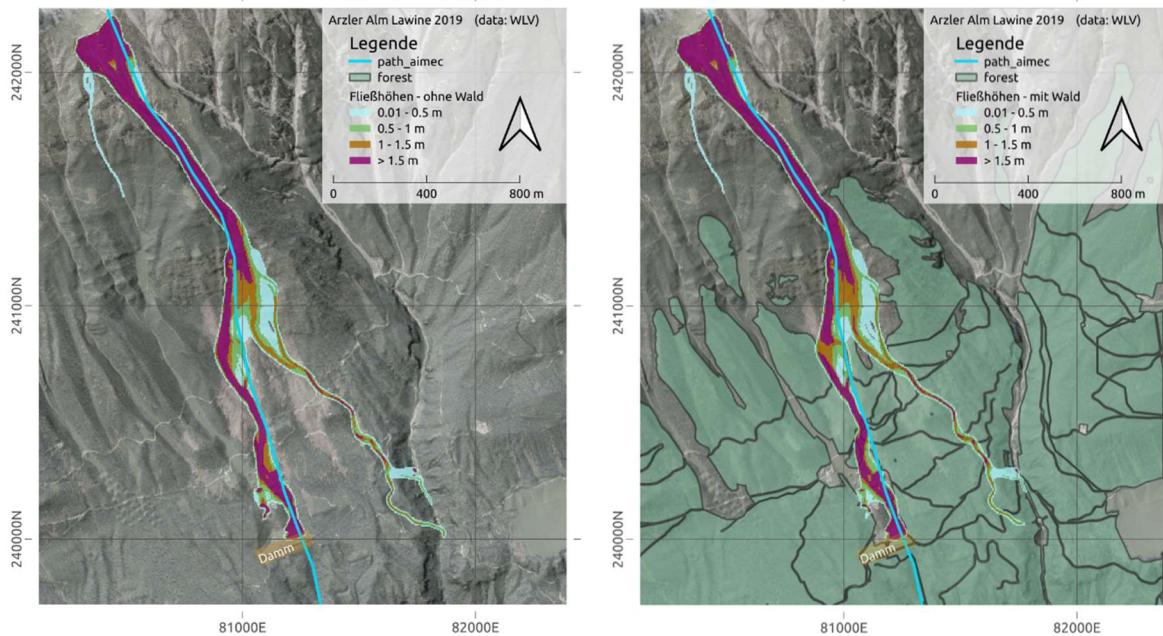


Abbildung 4: Simulationsergebnisse AvaFrame:com1DFA – maximale Fließhöhen bzw. Fließmächtigkeiten normal zur Oberfläche gemessen für AvaTestArzl. Links: ohne Waldwiderstand; rechts: mit Waldwiderstand mit SamosAT Standardparametern (Tabelle 2)

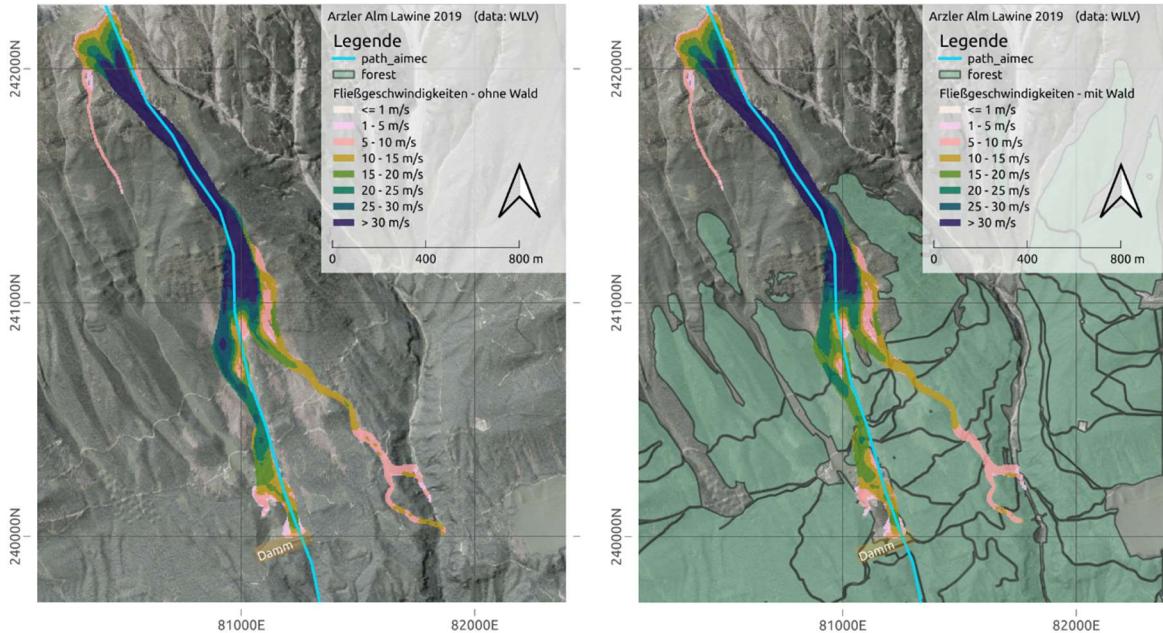


Abbildung 5: Simulationsergebnisse AvaFrame:com1DFA – maximale Fließgeschwindigkeiten für AvaTestArzl. Links: ohne Waldwiderstand; rechts: mit Waldwiderstand mit Standardparametern (Tabelle 2)

Daraus ergeben sich folgende Beobachtungen:

- Wald hat keine bis nur eine sehr geringe Wirkung auf Fließmächtigkeit bzw. max. Auslauf.
- Wald hat eine sehr geringe Wirkung auf Fließgeschwindigkeiten und Fließdrücke.

Aus der theoretischen Aufbereitung im Abschnitt Methoden und der Analyse der Impulsgleichung (2) lassen sich folgende Fragen formulieren, welche im Abschnitt Analyse und Ergebnisse untersucht und im Abschnitt Zusammenfassung und Diskussion diskutiert werden.

- Welchen Effekt hat die Widerstandskraft F_i^{res} bzw. der Reibungswiderstand c_{res} im Vergleich zum Reibungsterm?
- Welchen Effekt haben die effektive h^{eff} bzw. tatsächliche Fließmächtigkeit h und Fließgeschwindigkeit u auf die Widerstandskraft F_i^{res} ?
- Wie groß ist der Einfluss der aktuellen Parameter auf die Ergebnisse und welche relative Bandbreite haben diese?
- Wie lässt sich die Waldimplementierung von SamosAT mit klassischen Ansätzen vergleichen?

In Abbildung 6 wird der turbulente Reibungsparameter ξ aus dem Voellmy-Ansatz mit der effektiven Fließmächtigkeit h^{eff} bzw. tatsächlichen Fließmächtigkeit h und variierendem Reibungswiderstand c_{res} verglichen. Die Range des Reibungswiderstandes c_{res} wird durch die Variation des Reibungskoeffizienten c_w von 0,1 bis 50 erzeugt (Gleichung 4). Die sich daraus ergebende Range vom Reibungswiderstand c_{res} liegt dabei in einem Wertebereich von 0,0006 bis 0,03, wobei ein $c_{res} = 0,003$ sich durch die Standardparameter von SamosAT ergibt (Tabelle 2).

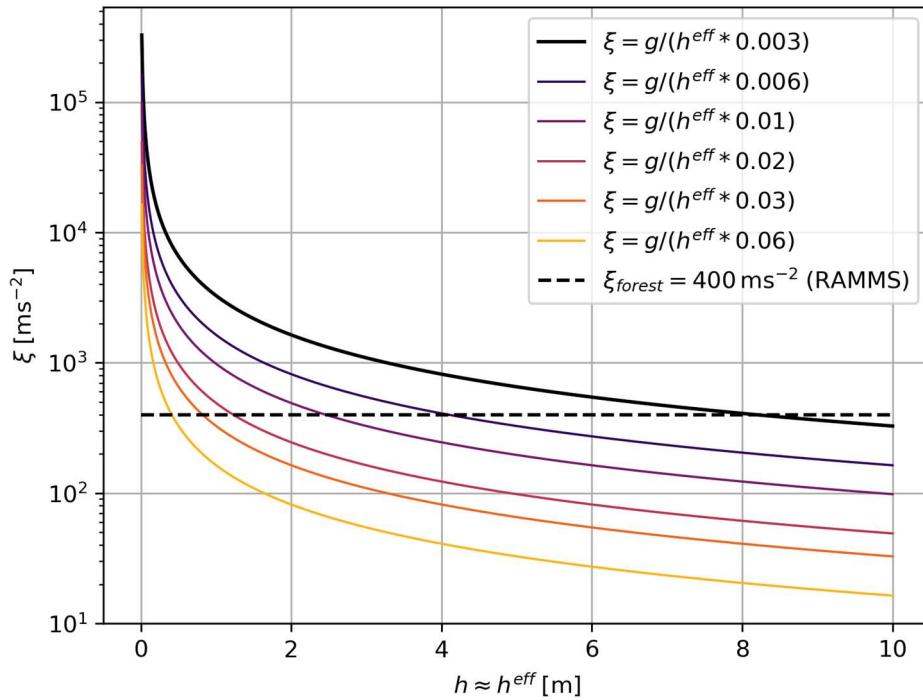


Abbildung 6: Vergleich des turbulenten Reibungsparameter ξ aus dem Voellmy-Ansatz mit der effektiven Fließmächtigkeit h^{eff} bzw. tatsächlichen Fließmächtigkeit h und varierendem Reibungswiderstand c_{res} .

Der Vergleich zeigt, dass:

- Ein Reibungswiderstand $c_{\text{res}} = 0,003$ (SamosAT) und eine effektive Fließmächtigkeit h^{eff} von ca. 8 m einem Reibungsparameter ξ von ca. 400 ms^{-2} entspricht. Dies wiederum gleicht einem Reibungsparameter ξ wie er in dem Voellmy-Ansatz beispielsweise im Lawinensimulationsmodell RAMMS::Avalanche (Christen et al., 2010) implementiert ist.
- Ein Reibungswiderstand $c_{\text{res}} = 0,003$ (SamosAT) und eine effektive Fließmächtigkeit h^{eff} von ca. 1 m einem turbulenten Reibungsparameter ξ von ca. 3200 ms^{-2} entspricht.
- Ein Reibungswiderstand $c_{\text{res}} = 0,03$ und eine effektive Fließmächtigkeit h^{eff} von ca. 1 m entspricht einem Reibungsparameter ξ von ca. 400 ms^{-2} . Dies wiederum gleicht einem Reibungsparameter ξ wie er in dem Voellmy-Ansatz beispielsweise im Lawinensimulationsmodell RAMMS::Avalanche (Christen et al., 2010) implementiert ist.
- Kleine effektive Fließmächtigkeiten h^{eff} im gesamten untersuchten Wertebereich vom Reibungswiderstand c_{res} zu großen Werten für den Reibungsparameter ξ führen und demnach zu geringeren Reibungen.

Lawinensimulation: Testbeispiele und Parameterstudie

Die Analyse der Parameterstudie und die Erstellung der Plots wurden mit dem AvaFrame Analyse Modul ana3AIMEC durchgeführt, siehe Oesterle et al. (2022) für eine ausführliche Dokumentation und Begriffsdefinition.

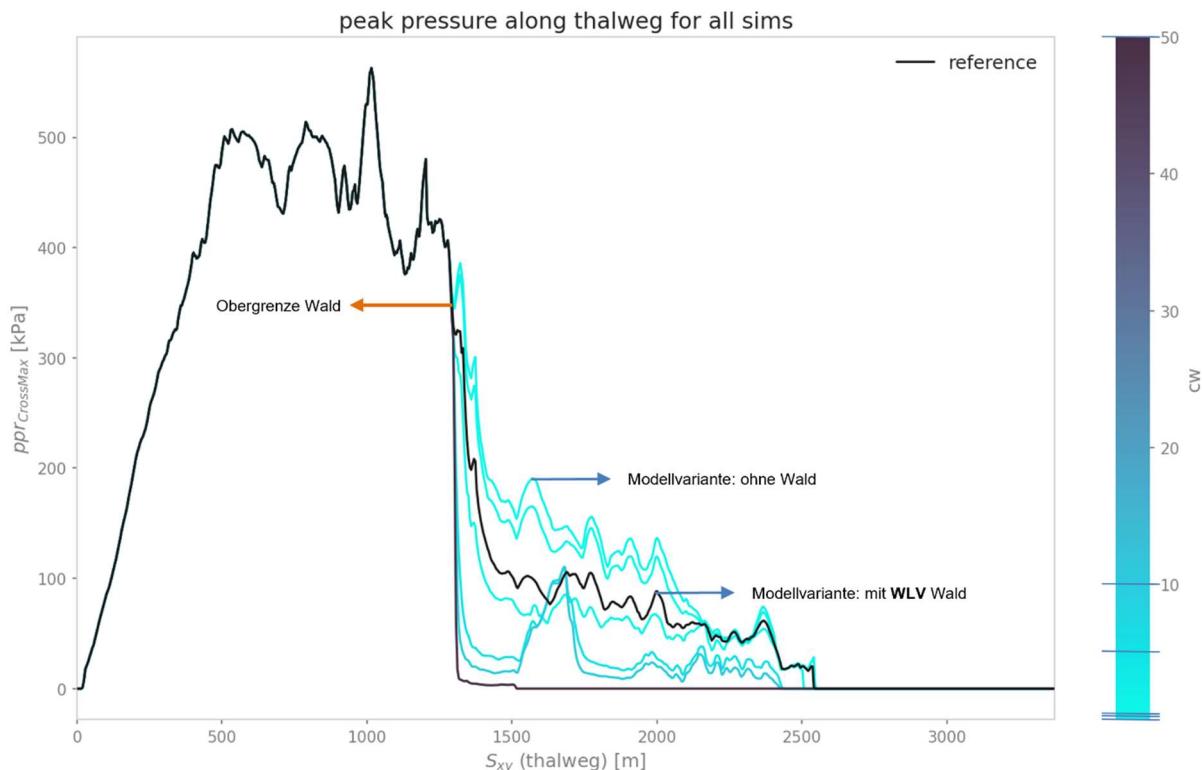


Abbildung 7: Darstellung der maximalen Druckwerte (peak pressure - $ppr_{CrossMax}$ [kPa]) der Parametervariation des Reibungskoeffizienten c_w entlang des Thalwegs (Thalweg Koordinate S_{xy} [m]) der AvaTestArzl Lawine.

Abbildung 7 zeigt eine Analyse der maximalen Druckwerte (peak pressure) entlang des manuell definierten Thalwegs der AvaTestArzl Lawine. Dargestellt ist die Thalweg Koordinate S_{xy} [m] und die auftretenden maximalen Drücke $ppr_{CrossMax}$ [kPa] normal zum Thalweg der Parametervariation des Reibungskoeffizienten c_w , sowie die Null-Variante (ohne Wald). Analog zu dem Vergleich zwischen Waldwiderstandskraft und turbulenter Reibung (Voellmy), wird die Range des Reibungswiderstandes c_{res} durch die Variation des Reibungskoeffizienten c_w erzeugt (Gleichung 4). Der untersuchte Wertebereich des Reibungswiderstandes c_{res} liegt in einem Bereich von 0,0006 bis 0,3, was Reibungskoeffizienten c_w von 0,1 bis 50 entspricht, wobei $c_{res} = 0,003$ ($c_w = 0,5$) durch die Standardparameter von SamosAT ergibt (Tabelle 2).

Aus den Simulationsergebnissen der Standardparametrisierung mit $c_{res} = 0,003$ ($c_w = 0,5$) ist ersichtlich, dass es zu geringeren Drücken $ppr_{CrossMax}$ [kPa] kommt, nicht aber zu einer nennenswerten Reduzierung des Auslaufes entlang des Thalwegs S_{xy} [m]. Erst ab einem $c_{res} = 0,03$ ($c_w = 5$) wird eine deutliche Reduzierung des Auslaufes entlang des Thalwegs S_{xy} [m] erzielt.

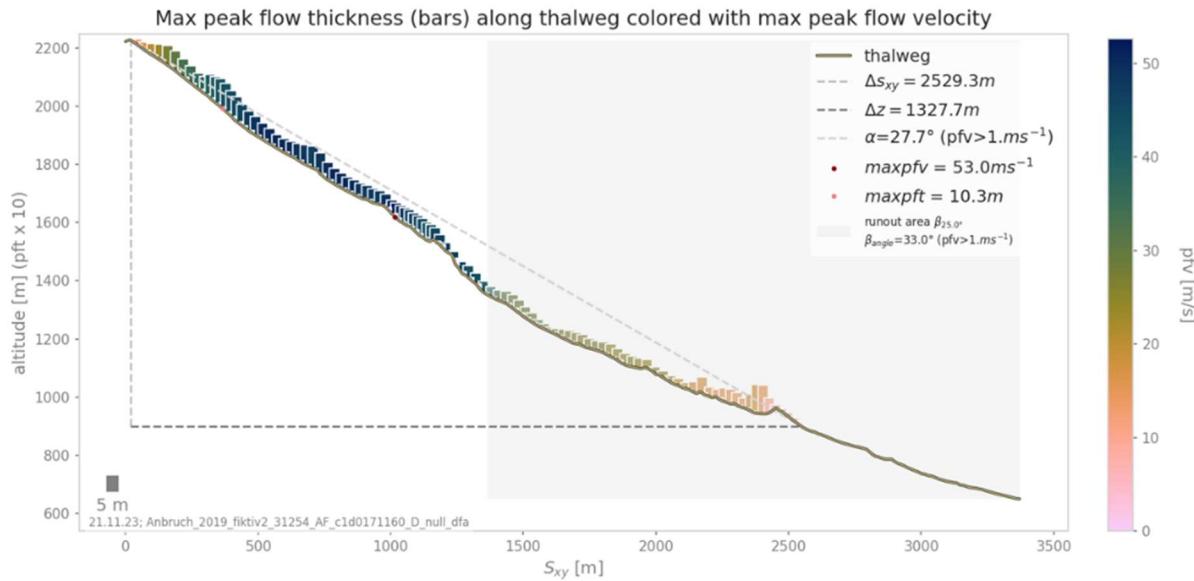


Abbildung 8: Darstellung des Thalweg-Altitude-Diagramms der Null-Variante mit maximaler Fließmächtigkeit entlang des Thalwegs S_{xy} [m] und der Höhe [m]. Die Höhe der Bar Plots gibt die Fließmächtigkeit wieder und die damit korrespondierenden Geschwindigkeiten pfv [ms^{-1}] wird in Farbe dargestellt.

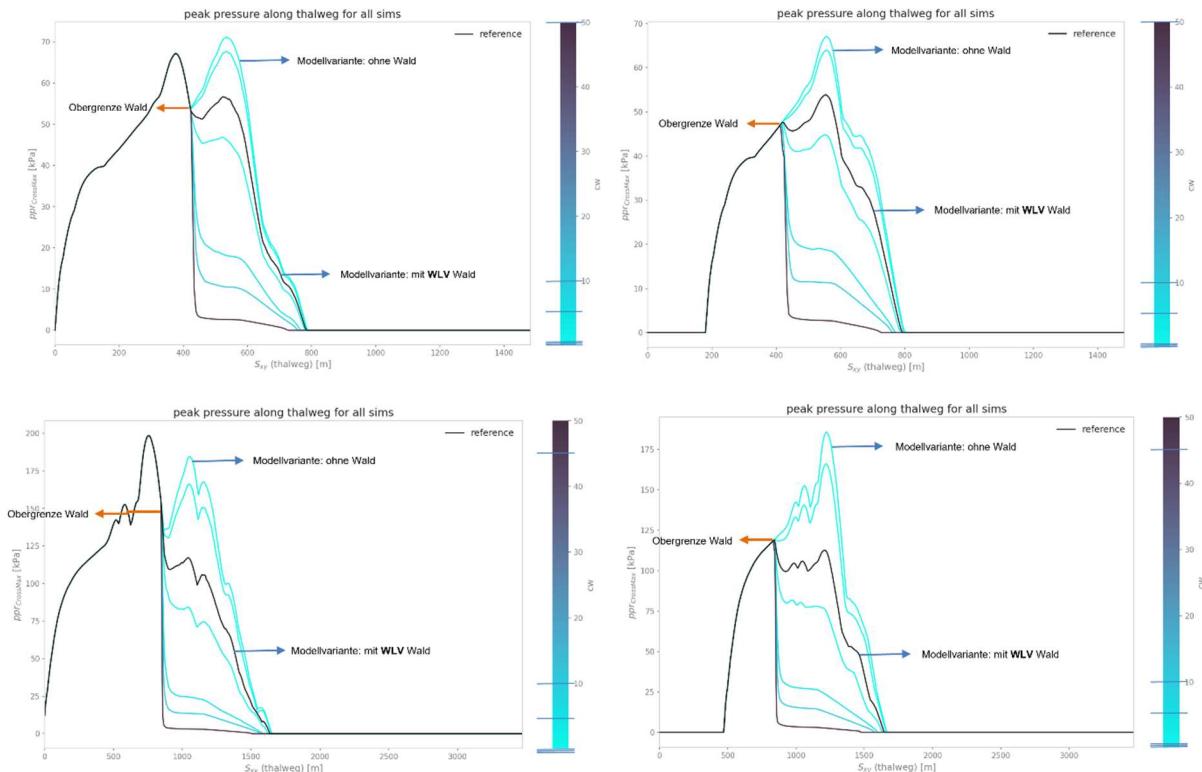


Abbildung 9: Darstellung der maximalen Druckwerte (peak pressure - $ppr_{CrossMax}$ [kPa]) der Parametervariation des Reibungskoeffizienten c_w entlang des Thalwegs (Thalweg Koordinate S_{xy} [m]) der generischen Beispiele: AvaTestGen500-1 (oben links), AvaTestGen500-2 (oben rechts), AvaTestGen1000-1 (unten links), AvaTestGen1000-2 (unten rechts)

Abbildung 8 zeigt das Thalweg-Altitude-Diagramm der Null-Variante mit maximaler Fließmächtigkeit entlang des Thalwegs S_{xy} [m] und der Höhe [m]. Die Höhe der Bar Plots gibt die Fließmächtigkeit wieder und die damit korrespondierenden Geschwindigkeiten pfv [ms^{-1}] wird in Farbe dargestellt. Aus der Legende lassen sich noch weitere Quantitäten ablesen. Für diese Analyse ist wichtig, dass die maximale Fließtiefe $maxpft = 10,3$ m bei ca. $S_{400,1980}$ auftritt und danach tendenziell abnimmt und im Schnitt <5 m bleibt, außer im Ablagerungsgebiet. Dadurch wird gezeigt, dass auch bei einer großen Lawine die Fließmächtigkeit h die Widerstandshöhe h_{res} zu großen Anteilen entlang des Thalwegs S_{xy} [m] nicht überschreitet und demnach bestimmt ist für die Berechnung der Widerstandskraft F_i^{res} .

Die Analyse der maximalen Druckwerte entlang des manuell definierten Thalwegs S_{xy} [m] in den generischen Beispielen (Abbildung 9), mit gleicher Parametrisierung des Reibungskoeffizienten c_w , zeigt eine analoge Verhaltensweise zu den Ergebnissen des AvaTestArzl-Beispiels. In allen vier Lawinenszenarien zeigt die Analyse, dass unter der Null-Variante die maximalen Drücke auftreten. Die Standardparametrisierung mit $c_{res}=0,003$ ($c_w=0,5$) führt zu geringeren Drücken [kPa], hat jedoch keine Auswirkung auf den Auflauf entlang des Thalwegs S_{xy} [m]. Erst ab einem $c_{res}=0,03$ ($c_w=5$) wird eine deutliche Reduzierung des Auflaufs entlang des Thalwegs S_{xy} [m] erzielt. Hervorgehoben werden kann des weiteren, dass die relative Lage zur Waldwiderstandsfläche, Auslösung oben und Auslösung unten, keinen nennenswerten Einfluss auf den Auflauf und die auftretenden maximalen Fließgeschwindigkeiten bzw. Drücke hat.

Zusammenfassung und Diskussion

Die theoretische Analyse und Aufbereitung der Waldwiderstands-Implementierung aus SamosAT in AvaFrame:com1DFA hat ergeben, dass die **Geschwindigkeit** und demnach auch der **Druck** in den gewählten Beispielen hauptsächlich von der effektiven Fließmächtigkeit h^{eff} und dem Reibungswiderstand c_{res} , welcher im Term der Waldwiderstandskraft F_i^{res} implementiert ist, abhängt. Zusammenfassend hat die analytische Analyse ergeben, dass:

- Die Fließmächtigkeit h in den meisten Fällen von der effektiven Fließmächtigkeit h^{eff} bestimmt wird, da $h^{eff} = \min(h, h_{res})$ ist.
- Bei kleinen effektiven Fließmächtigkeiten h^{eff} bzw. Fließmächtigkeit h der Effekt der Waldwiderstandskraft F_i^{res} nur sehr gering ist.
- Die Waldwiderstandskraft F_i^{res} proportional zur effektiven Fließmächtigkeit h^{eff} bzw. Fließmächtigkeit h ist.
- Die Waldwiderstandskraft F_i^{res} größer mit zunehmender Fließmächtigkeit h wird.
- Die Waldwiderstandskraft F_i^{res} hängt von der Fließgeschwindigkeit u^2 ab.

Der konzeptionelle Vergleich der Implementierung von Waldwirkung der zwei unterschiedlichen Ansätze (1) direkter Einfluss im Reibungsmodell innerhalb der turbulenten Reibung ξ des Voellmy-Ansatzes, wie beispielsweise im Lawinensimulationsmodell RAMMS::Avalanche (Christen et al., 2010) implementiert, und (2) der Implementierung der Waldwiderstandskraft F_i^{res} in den Bewegungsgleichungen (SamosAT/AvaFrame:com1DFA), hat ergeben, dass:

- In **RAMMS::Avalanche** die Waldwirkung durch die Änderung der beiden Reibungsparameter (Voellmy-Ansatz) implementiert ist. Hierbei wird:
 - $\xi = 400 \text{ ms}^{-2}$ global gesetzt und
 - $\Delta\mu = 0,02$ zu dem bestehenden μ addiert wird.
- In **SamosAT/AvaFrame:com1DFA** die Waldwirkung durch Addieren eines zusätzlichen Widerstandsterms der von der effektiven Fließmächtigkeit h^{eff} , der Fließgeschwindigkeit u^2 und dem Widerstandspараметer c_{res} abhängt, implementiert ist.

Durch die Gegenüberstellung der beiden turbulenten, geschwindigkeitsabhängigen Reibungsterme von ξ nach dem Voellmy-Ansatz und dem Reibungswiderstand c_{res} , konnte darauf geschlossen werden:

- Waldwiderstandskraft F_i^{res} ist sehr gering mit aktuellen Parametern insbesondere für kleine Lawinen bzw. kleine Fließtiefen h und kleinen Fließgeschwindigkeiten u .
- Im Vergleich zum Voellmy Reibungsmodell ist der Reibungswiderstand c_{res} eine Größenordnung kleiner als die Änderung der korrespondierenden turbulenten Reibung als Funktion von ξ . Eine Anpassung entsprechend der im Voellmy Model angepassten Coulomb Reibung findet sich in der Waldwiderstandskraft F_i^{res} nicht.

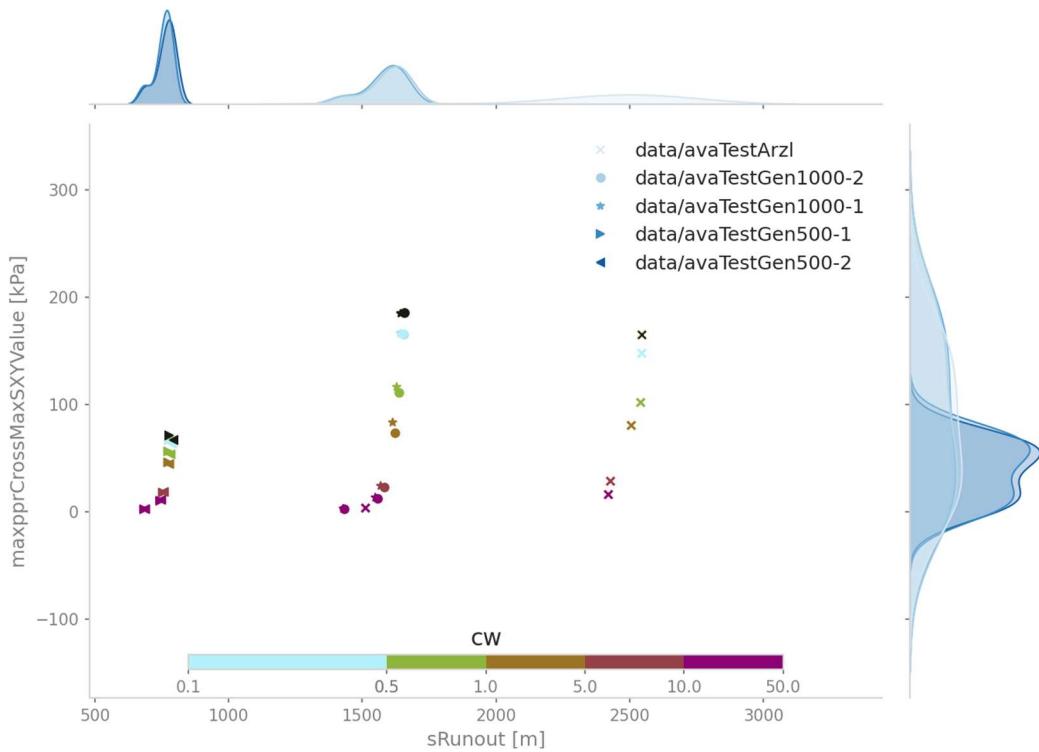


Abbildung 10: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für Auslaufängen entlang des manuellen Thalwegs (sRunout [m]) und die maximal auftretenden Drücke der generischen Beispiele sowie eine repräsentative Thalweg Koordinate S_{xy} [m] der AvaTestArzl innerhalb der Waldwiderstandsfläche. Die maximalen Drücken der jeweiligen Lawinen (schwarzer Marker) sind die Null-Variante.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Null-Variante und der SamosAT Parametrisierung (Tabelle 2) von Auslaufängen entlang des manuellen Thalwegs (sRunout s_{xy} [m]) und die maximal auftretenden Drücke der generischen Beispiele sowie eine repräsentative Thalweg Koordinate S_{xy} [m] der AvaTestArzl innerhalb der Waldwiderstandsfläche. Für die Bestimmung des Auslaufes wurde die 1 kPa Grenze gewählt.

Testszenario	Parameter	Max ppr [kPa] Wald		Auslauf [m] <1kPa	
		x (s_{xy})	y (ppr)	x (s_{xy})	y (ppr)
AvaGenTest500-1	Null-Variante SamosAT	533 533	71 56	783 778	1 1
AvaGenTest500-2	Null-Variante SamosAT	556 556	67 54	795 786	1 1
AvaGenTest1000-1	Null-Variante SamosAT	1053 1053	185 117	1648 1632	1 1
AvaGenTest1000-2	Null-Variante SamosAT	1224 1224	185 111	1661 1641	1 1

Tabelle 6: Prozentuale Gegenüberstellung der Null-Variante und der SamosAT Parametrisierung (Tabelle 2) von Auslaufängen entlang des manuellen Thalwegs ($sRunout$ sxy [m]) und die maximal auftretenden Drücke der generischen Beispiele sowie eine repräsentative Thalweg Koordinate S_{xy} [m] der AvaTestArzl innerhalb der Waldwiderstandsfläche. Für die Bestimmung des Auslaufes wurde die 1 kPa Grenze gewählt.

Testszenario	Parameter	Differenz ppr [kPa]	% ppr	Differenz sxy [m]	Auslauf [m] <1kPa
		x (sxy)	y (ppr)	x (sxy)	y (ppr)
AvaGenTest500-1	Null-Variante SamosAT	15	21,1	5	0,6
AvaGenTest500-2	Null-Variante SamosAT	13	19,4	9	1,1
AvaGenTest1000-1	Null-Variante SamosAT	68	36,8	16	1,0
AvaGenTest1000-2	Null-Variante SamosAT	74	40,0	20	1,2

Abbildung 10 fasst die Simulationsergebnisse zusammen. Dargestellt sind die Auslaufängen entlang des manuellen Thalwegs ($sRunout$ [m]) und die maximal auftretenden Drücke der generischen Beispiele sowie eine repräsentative Thalweg Koordinate S_{xy} [m] der AvaTestArzl innerhalb der Waldwiderstandsfläche. Tabelle 5 zeigt die absoluten Koordinaten und Tabelle 6 die Differenz sowie die prozentualen Abweichungen von der Null-Variante und der Standard SamosAT Parametrisierung von den generischen Beispielen. Es zeigt sich, dass die prozentuale Abnahme der auftretenden Drücke bei den kleinen Szenarien um 20%, bei den großen um die 40% liegt. Wobei die prozentuale Abnahme der Auslaufänge bei allen Simulationen um 1% verschwindend gering ist.

Die gegenwärtige Implementierung der Waldwiderstandskraft durch den zusätzlichen Term F_i^{res} wirkt sich nicht auf die Bodenschubspannung aus.

Die Analyse der Simulationsergebnisse zeigt weiterhin, dass die Parametervariation des Reibungswiderstands c_{res} bzw. Reibungskoeffizienten c_w , zwar einen Einfluss auf die Geschwindigkeiten und Drücke hat, der Einfluss auf den Auslauf aber lediglich gering oder im angewendeten Wertebereich bei einem Reibungswiderstand $c_{res} > 0,03$ bzw. Reibungskoeffizienten $c_w > 5$ vernachlässigbar ist.



Ausblick

Die aktuellen Möglichkeiten für Weiterentwicklungen umfassen potenzielle Anpassungen der Widerstandskraft, um eine verstärkte Beeinflussung von Aufpralldrücken, Fließgeschwindigkeiten und Auslaufängen zu erzielen.

Generell:

- Diskussion ob eventuell Vereinfachung auf einen *generellen* Parameter die weitere Entwicklung vereinfacht und transparenter macht.

Wirkung mit Fokus auf Aufpralldrücke & Fließgeschwindigkeiten:

- Parametrisierung des Widerstandsparameters c_{res} oder des Widerstandskoeffizienten c_w anpassen, um den Wertebereich zu modifizieren.
- Anpassung der Implementierung der Abhängigkeit von der effektiven Fließmächtigkeit h^{eff} .

Wirkung mit Fokus auf den Lawinenauslauf:

- Unabhängige Anpassung der Waldwiderstandskraft von geschwindigkeitsabhängigen Reibungstermen (z.b. Coulombreibung oder MinShear).
- Mögliche Anpassung der Fließmächtigkeiten durch Implementierung von Masseentnahme (Deposition bzw. Detrainment) in Abhängigkeit von Waldparametern (Waldtyp, Zustand, ...).

Literaturverzeichnis

- Bartelt, P., Bühler, Y., Christen, M., Deubelbeiss, Y., Salz, M., Schneider, M., & Schumacher, L. (2017). RAMMS: Avalanche User Manual. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF.
- Bebi, P., Bast, A., Helzel, K., Schmucki, G., Brozova, N., & Bühler, Y. (2022). Avalanche Protection Forest: From Process Knowledge to Interactive Maps. In M. Teich, C. Accastello, F. Perzl, & K. Kleemayr (Hrsg.), Protective Forests as Ecosystem-based Solution for Disaster Risk Reduction (Eco-DRR). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99514>
- Bebi, P., Kulakowski, D., & Rixen, C. (2009). Snow avalanche disturbances in forest ecosystems—State of research and implications for management. *Forest ecology and Management*, 257(9), 1883–1892.
- Brožová, N., Fischer, J.-T., Bühler, Y., Bartelt, P., & Bebi, P. (2020). Determining forest parameters for avalanche simulation using remote sensing data. *Cold Regions Science and Technology*, 172, 102976. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102976>
- Christen, M., Kowalski, J., & Bartelt, P. (2010). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1–2), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>
- D'Amboise, C. J. L., Neuhauser, M., Teich, M., Huber, A., Kofler, A., Perzl, F., Fromm, R., Kleemayr, K., & Fischer, J.-T. (2022). Flow-Py v1.0: A customizable, open-source simulation tool to estimate runout and intensity of gravitational mass flows. *Geoscientific Model Development*, 15(6), 2423–2439. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2423-2022>
- D'Amboise, C., Teich, M., Hormes, A., Steger, S., & Berger, F. (2021). Modeling Protective Forests for Gravitational Natural Hazards and How It Relates to Risk-Based Decision Support Tools. In M. Teich, C. Accastello, F. Perzl, & K. Kleemayr (Hrsg.), Protective Forests as Ecosystem-based Solution for Disaster Risk Reduction (Eco-DRR). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99510>
- Dreier, L., Bühler, Y., Steinkogler, W., Feistl, T., & Bartelt, P. (2014). Modelling small and frequent avalanches. *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, Banff, Canada, 29, 135–138.
- Feistl, T., Bebi, P., Christen, M., Margreth, S., Diefenbach, L., & Bartelt, P. (2015). Forest damage and snow avalanche flow regime. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1275–1288. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1275-2015>
- Feistl, T., Bebi, P., Teich, M., Bühler, Y., Christen, M., Thuro, K., & Bartelt, P. (2014). Observations and modeling of the braking effect of forests on small and medium avalanches. *Journal of Glaciology*, 60(219), 124–138. <https://doi.org/10.3189/2014JoG13J055>
- Fischer, J.-T., & Kofler, A. (2013). Samosat cosica. Technical Report. Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape, Innsbruck, Austria,.
- Fischer, J.-T., Kowalski, J., & Pudasaini, S. P. (2012). Topographic curvature effects in applied avalanche modeling. *Cold Regions Science and Technology*, 74–75, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.01.005>
- Gruber, U., & Bartelt, P. (2007). Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. *Environmental Modelling & Software*, 22(10), 1472–1481. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.01.001>

- Huber, A., Hainzer, E., Kofler, A., Fromm, R., & Fischer, J.-T. (2015). Projektbericht: Evaluierung von Gefahrenbeurteilungsmethoden und deren Implikationen für die forstliche Raumplanung—EVAMETH.
- Issler, D., Gisnås, K. G., Gauer, P., Glimsdal, S., Domaas, U., & Sverdrup-Thygeson, K. (2023). Naksin – a New Approach to Snow Avalanche Hazard Indication Mapping in Norway [Preprint]. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4530311>
- Jörg, P., & Granig, M. (2013). Entrainmentstudie SamosAT - 2013. Internal report—Stabstelle Schnee und Lawinen, Austrian Service for Torrent and Avalanche Control (WLV).
- Kofler, A. (2014). Zur Wahl einer passenden Zielwertfunktion für die Paramateroptimierung von Lawinensimulationen. Master's thesis, Universit“at Innsbruck.
- Nairz, P., Sauermoser, S., Kleemayer, K., Gabl, K., Stoffel, M., & Margreth, S. (2011). Lawinen: Entstehung und Wirkung. In Handbuch Technischer Lawinenschutz (S. 21–62). Wiley Online Library.
- Oesterle, F., Tonnel, M., Wirbel, A., & Fischer, J.-T. (2022). avaframe/AvaFrame: Version 1.3 (1.3) [Software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7189007>
- Salm, B. (2004). A short and personal history of snow avalanche dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, 39(2–3), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2004.06.004>
- Sampl, P. (2007). SamosAT—Modelltheorie und Numerik. AVL List GmbH, Graz.
- Takeuchi, Y., Nishimura, K., & Patra, A. (2018). Observations and numerical simulations of the braking effect of forests on large-scale avalanches. *Annals of Glaciology*, 59(77), 50–58. <https://doi.org/10.1017/aog.2018.22>
- Takeuchi, Y., Torita, H., Nishimura, K., & Hirashima, H. (2011). Study of a large-scale dry slab avalanche and the extent of damage to a cedar forest in the Makunosawa valley, Myoko, Japan. *Annals of Glaciology*, 52(58), 119–128. <https://doi.org/10.3189/172756411797252059>
- Teich, M., Accastello, C., Perzl, F., & Berger, F. (2022). Protective Forests for Ecosystem-based Disaster Risk Reduction (Eco-DRR) in the Alpine Space. In M. Teich, C. Accastello, F. Perzl, & K. Kleemayr (Hrsg.), Protective Forests as Ecosystem-based Solution for Disaster Risk Reduction (Eco-DRR). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99505>
- Teich, M., Fischer, J.-T., Feistl, T., Bebi, P., Christen, M., & Grêt-Regamey, A. (2014). Computational snow avalanche simulation in forested terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(8), 2233–2248. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2233-2014>
- Teich, M., Vasella, I., Bartelt, P., Bebi, P., Feistl, T., & Grêt-Regamey, A. (2012). Avalanche simulations in forested terrain: A framework towards a Bayesian probabilistic model calibration. *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, Anchorage, Alaska, 2012(628), 632.
- Tonnel, M., Wirbel, A., Oesterle, F., & Fischer, J.-T. (2023). AvaFrame com1DFA (v1.3): A thickness-integrated computational avalanche module – theory, numerics, and testing. *Geoscientific Model Development*, 16(23), 7013–7035. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-7013-2023>
- Védrine, L., Li, X., & Gaume, J. (2022). Detrainment and braking of snow avalanches interacting with forests. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(3), 1015–1028. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1015-2022>
- Voellmy, A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung* 73, 159–165.
- Zwinger, T. (2000). Dynamik einer Trockenschneelawine auf beliebig geformten Berghängen. Dissertation, Technische Universität Wien.

