



BUNDES
FORSCHUNGS
ZENTRUM
FÜR WALD



ForestFrame II

Technischer Bericht – 2025

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

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



Zusammenfassung

Basierend auf den Ergebnissen aus *ForestFrame I* wird in *ForestFrame II* die Modellierung der Waldinteraktion im *AvaFrame*-Modul *com1DFA* weiterentwickelt. Ziel ist es, die bisher komplexe Struktur zu vereinfachen, die erforderlichen Eingabedaten zu reduzieren und die physikalische Plausibilität der Modellierung zu erhöhen.

Im Rahmen dieser Weiterentwicklung werden zunächst verschiedene Widerstandsmodelle implementiert und in Vergleichssimulationen analysiert. Dabei wird untersucht, wie sich die jeweiligen Modellvarianten auf die simulierte Auslauflänge, den Auslaufwinkel sowie auf die maximal auftretenden Fließdrücke und Fließgeschwindigkeiten auswirken. Ergänzend erfolgt eine Sensitivitätsanalyse zur Bewertung der Modellreaktion auf unterschiedliche Parameterwerte.

Zur Beurteilung der Modelle werden neben einem generischen Beispiel ausgewählte Lawinenereignisse mit relevanter Waldinteraktion herangezogen – darunter auch praxisnahe Testfälle der Wildbach- und Lawinenverbauung. Für diese Fälle werden systematische Vergleichssimulationen mit gezielten Parametervariationen durchgeführt. Neue automatisierte Auswertungstools ermöglichen dabei einen objektiven Vergleich sowohl zwischen den Modellansätzen als auch mit dokumentierten Beobachtungsdaten.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass hohe Widerstandswerte zu unrealistisch starken Bremswirkungen führen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein Modell, genannt F_{resH} , ausgewählt, bei dem die Waldwirkung durch einen einzigen, fließhöhenunabhängigen Parameter (c_{resH}) beschrieben wird. Zusätzlich werden plausible Parameterbereiche eingegrenzt. Aufbauend darauf wird eine adaptive Implementierung entwickelt, bei der die zusätzliche Widerstandskraft in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeit, Fließmächtigkeit und – sofern relevant – durch Massenentnahme (*Detrainment*) gesteuert wird. Diese bildet die Grundlage für eine überarbeitete, praxistaugliche Handlungsempfehlung.

Die im Rahmen von *ForestFrame II* erarbeitete Weiterentwicklung des Moduls *com1DFA* sowie die daraus abgeleitete Handlungsempfehlung sind vollständig im *AvaFrame*-Repository dokumentiert und technisch umgesetzt.

Diese Ergebnisse bilden eine fundierte Grundlage für die künftige Anwendung, Kalibrierung und Weiterentwicklung der Waldwirkungsmodellierung in *com1DFA*.

Inhaltsverzeichnis

Ausgangslage	3
Weiterentwicklung der Waldwirkungsmodellierung <i>ForestFrame II</i>	4
Testfälle für Lawinen mit Waldinteraktion	5
Auswahlkriterien für geeignete Testfälle	7
Vergleichstools für Beobachtungen und Simulationen	7
Implementierung unterschiedlicher Waldwiderstandsmodelle.....	8
Ergebnisse.....	10
Sensitivitätsanalyse und Einschränkung auf plausible Ergebnisse, Analyse der verschiedenen Modelle und Anwendbarkeit.....	10
Handlungsempfehlung	18
Festlegung von Waldflächen	18
Regelbasierte Anpassung der Widerstandskraft	18
Implikationen.....	19
Offene Punkte und Fragen.....	20
Simulationsergebnisse für Handlungsempfehlung.....	21
Literaturverzeichnis	27
Appendix.....	28

Ausgangslage

In *ForestFrame I* wurden folgende Punkte 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.

Die Grundlagen zur bisherigen Modellierung der Waldwirkung im *AvaFrame*-Modul *com1DFA* wurden im Rahmen des Projekts *ForestFrame I* erarbeitet. Detaillierte Beschreibungen des Modellansatzes in *SamosAT* sowie der zentralen Ergebnisse finden sich im entsprechenden Projektbericht von *ForestFrame I* (Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Naturgefahren, 2023). Im Folgenden wird auf diese Inhalte nicht erneut eingegangen; stattdessen bildet der *ForestFrame I* Bericht die fachliche Grundlage für die hier dargestellte Weiterentwicklung im Rahmen von *ForestFrame II*.



Weiterentwicklung der Waldwirkungsmodellierung *ForestFrame II*

Basierend auf den Ergebnissen aus *ForestFrame I* wird in *ForestFrame II* die Modellierung der Waldinteraktion im AvaFrame-Modul *com1DFA* weiterentwickelt. Ziel dieser Weiterentwicklung ist es, die bisher komplexe Struktur zu vereinfachen, die Eingabedaten zu reduzieren und die physikalische Plausibilität zu erhöhen, sowie die Erstellung weiterer Testfälle. Dafür wurden die folgenden Arbeitspakete bearbeitet:

Testfälle für Lawinen mit Waldinteraktion

- Auswahl geeigneter Lawinenereignisse mit relevanter Waldinteraktion als Grundlage für Modellvergleiche.
- Dokumentierte Übersicht der verwendeten Fälle zur transparenten Nachvollziehbarkeit und einfügen der Daten in das open-source Repository in der Organisation *AvaFrame* (<https://github.com/AvaFrame/AvaFrameData>).

Vergleichstools für dokumentierte Lawinen und Simulationsergebnisse

- Einführung neuer Tools zur automatisierten Auswertung und zum Vergleich von räumlichen Lawinendokumentationen und Simulationsergebnissen.
- Bewertung der Waldwirkung auf Auslaufänge, Geschwindigkeit und Fließfähigkeit

Implementierung unterschiedlicher Waldwiderstandsmodelle

- Technische Umsetzung verschiedener Ansätze zur zusätzlichen Reibung bzw. Massenentnahme durch den Wald im Modell.
- Durchführung von Sensitivitätsanalysen zur Eingrenzung plausibler Parameterbereiche.
- Analyse der Modellunterschiede hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis.

Zusammenfassung der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen

- Zusammenführung der zentralen Erkenntnisse zur Wirkung unterschiedlicher Modelle und Parameter.
- Ableitung regelbasierter Empfehlungen zur Anpassung der Widerstandskraft im Modell.

Handlungsempfehlungen und Implikationen

- Darstellung konkreter Umsetzungsvorschläge für die Modellanwendung in *com1DFA*.
- Diskussion der Implikationen für die Praxis und notwendiger Rahmenbedingungen.

Testfälle für Lawinen mit Waldinteraktion

Zur Untersuchung der verschiedenen Modelle zur Waldwiderstandsberücksichtigung wurden drei dokumentierte Lawinenereignisse mit nachgewiesener Waldinteraktion aufbereitet: *avaArzl*, *avaKleinerOetscherbach* und *avaPopeletzbach*. Diese Datensätze sind im *AvaFrame* Data Repository öffentlich verfügbar, unter: <https://github.com/AvaFrame/AvaFrameData>. Detaillierte Informationen zur Herkunft, Aufbereitung und den jeweiligen Ereignissen finden sich in den zugehörigen README-Dateien im Repository.

Ergänzend wurde ein generisches Testbeispiel (*avaGen1Slope*) erstellt, das typische Geländekonfigurationen mit Waldanteil simuliert. Darüber hinaus wurden vier praxisrelevante Anwendungsfälle von der Wildbach- und Lawinenverbauung zur Verfügung gestellt: *avaPillmahd*, *avaTumpner*, *avaLehnerrinner* und *avaUnterberg*. Diese Fallstudien sind nicht öffentlich zugänglich, wurden jedoch für gezielte Vergleichssimulationen im Rahmen der Modellentwicklung herangezogen.

Eine Übersicht aller verwendeten Testfälle ist in Tabelle 1 dargestellt.



Name	Typ	Datum	Verfügbare Daten	Quelle	Verfügbarkeit
<i>avaKleinerOetscherbach</i>	Dichte Strömung, trockener Schnee mit kleiner Pulverwolke	25.02.2009	Auslösegebiet, Referenzfläche, Waldflächen (≥ 10 m, alle Kronendichtheklassen)	Frank Perzl (BFW), basierend auf Funder (2014)	AvaFrame Data Repository
<i>avaArzl</i>	Trockene Lawine mit dichter Strömung und Staubwolke	14.01.2019	Auslösegebiet, Entrainmentfläche, Waldflächen (Schutz- /Wirtschaftswald)	Ereignisdokumentation Lawinen Jänner- Februar 2019 WLW	AvaFrame Data Repository
<i>avaPopelatzbach</i>	Nassschneelawine mit dichter Fließablagerung	07.04.2009	Auslösegebiet, Referenz- und Ablagerungsfläche, Waldflächen (≥ 10 m)	Frank Perzl (BFW)	AvaFrame Data Repository
<i>avaGen1Slope</i>	Generischer Testfall, steiler 35° Hang mit Auslaufzone (10°)	–	Generisch erzeugte Topographie	Intern erstellt	AvaFrame Data Repository
<i>avaPillmehd</i>	Reelles Beispiel mit mehreren Auslöse- und Entrainmentflächen	–	Auslöseflächen (PM1, PM2), Entrainmentfläche (ENT)	Wildbach- und Lawinenverbauung (WLW)	Nicht öffentlich
<i>avaTumpner</i>	Reelles Beispiel mit Auslöse- und Entrainmentfläche	–	Auslösefläche (TBL23), Entrainmentfläche (ENT)	Wildbach- und Lawinenverbauung (WLW)	Nicht öffentlich
<i>avaLehnerinner</i>	Reelles Beispiel mit mehreren Auslöseflächen	–	Auslösefläche (LR1, LR2)	Wildbach- und Lawinenverbauung (WLW)	Nicht öffentlich
<i>avaUnterberg</i>	Reelles Beispiel mit Auslöse- und Entrainmentfläche	–	Auslösefläche (UB12), Entrainmentfläche (ENT)	Wildbach- und Lawinenverbauung (WLW)	Nicht öffentlich

Tabelle 1: Übersicht der Testfälle für ForestFrame II

Auswahlkriterien für geeignete Testfälle

Basierend auf den Simulationen unterschiedlicher Topographien zeigt sich, dass die Auswahl geeigneter Testbeispiele gezielt an die jeweilige Fragestellung angepasst werden muss. Für die Bewertung der Waldwirkung anhand der Auslauflänge eignen sich insbesondere Szenarien, die keine markante topographische Veränderungen im Auslaufbereich – wie etwa Dämme oder Gegenhänge – aufweisen, da diese zu abrupten Bremswirkungen führen. Für eine reine Beurteilung der Waldwirkung auf das Geschwindigkeitsprofil entlang des *Thalwegs* ist dies weniger entscheidend.

Der Testfall *avaKleineOetscherbach* erweist sich dabei als besonders geeignet zur Analyse der Auslauflänge, da in diesem Szenario keine topographisch bedingte, abrupte Bremswirkung vorliegt. Da der reale Wald in diesem Testfall nur sehr lückenhaft ausgebildet ist und dadurch eine verlässliche Analyse der Maximalwerte von Fließgeschwindigkeit und -mächtigkeit erschwert wird (siehe Kapitel: Sensitivitätsanalyse und Einschränkung auf plausible Ergebnisse, Analyse der verschiedenen Modelle und Anwendbarkeit), wurde in diesem Fall eine idealisierte, großflächige Waldfläche angenommen.

Die Testfälle *avaPopeletzbach* und *avaArzl* sind aufgrund vom Auslauf im Gegenhang bzw. Stoppen im Damm ungeeignet zur Analyse der Auslauflänge, wurden jedoch zur Untersuchung der Waldwirkung auf die Geschwindigkeitsverteilung entlang des *Thalwegs* herangezogen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für das Rückrechnen von dokumentierten Lawinenereignissen mit Waldinteraktion ist, ob der Wald während des Ereignisses intakt blieb oder zerstört wurde. Dies ist wichtig, um zu beurteilen, wie und ob der Waldeffekt im Modell berücksichtigt wird. Im Rahmen von *ForestFrame II* wurde das noch nicht weiter berücksichtigt.

Das generische Testbeispiel *avaGen1Slope* dient der gezielten Analyse des Auslaufverhaltens in einer idealisierten Umgebung ohne abrupt wirkende topographische Bremsmechanismen. Im Unterschied zur in *ForestFrame I* genutzten Konfiguration wurde hier der Übergang vom Steilen in einen 10° geneigten Hang modelliert, um eine realistischere Auslaufdynamik zu simulieren.

Darüber hinaus wurden vier weitere praxisrelevante Testfälle – *avaPillmahd*, *avaTumpner*, *avaLehnerrinner* und *avaUnterberg* – durch die Wildbach- und Lawinenverbauung bereitgestellt, jedoch nicht im *AvaFrame* Data Repository veröffentlicht. Die Fallstudien wurden genutzt, um das Verhalten des Modells F_{resH} unter realitätsnahen Bedingungen zu testen. Die Parametervariation beschränkte sich dabei auf drei repräsentative Szenarien mit geringer, starker und sehr starker Waldwirkung, um die Auswirkungen auf Auslauflänge und Geschwindigkeitsverteilung zu veranschaulichen.

Vergleichstools für Beobachtungen und Simulationen

Zur Unterstützung der Analyse und Bewertung der Modellgüte werden die Funktionen der Module *AvaFrame:ana3AlMEC* und *AvaFrame:ana4Stats* sowie die Darstellungsoptionen für Simulationsergebnisse in den Modulen *AvaFrame:out1Peak* und *AvaFrame:out3Plots* gezielt erweitert.



Implementierung unterschiedlicher Waldwiderstandsmodelle

Die Parameter, die die Reibung im bestehenden Waldwiderstandsmodell bestimmen, empirischer Reibungskoeffizient c_w , Abstand zwischen Hindernissen (Bäumen) s_{res} , Höhe der Hindernisse (Bäumen) h_{res} und Durchmesser von Hindernissen (Bäumen) \bar{d} werden zu einem Parameter c_{res} zusammengefasst.

Damit ergibt sich die vereinfachte Form der bisherigen Waldwiderstandskraft F_{res} :

Modell: F_{res}

$$F_{res} = -c_{res} \rho_0 A h^{eff} \bar{u}^2 \frac{u_i}{\|u\|}, \quad (5)$$

mit der effektiven Fließhöhe h^{eff} , definiert als $\min(h, h_{res})$, der Dichte ρ_0 , Reibungs-Fläche A und der Geschwindigkeit u .

Modell: F_{resH}

Eine weitere Vereinfachung, bei der es keine Abhängigkeit des modellierten Waldwiderstands von der Fließmächtigkeit mehr gibt, wird abhängig von einem Widerstands-Parameter c_{resH} wie folgt definiert:

$$F_{resH} = -c_{resH} \rho_0 A \bar{u}^2 \frac{u_i}{\|u\|}. \quad (6)$$

Modell: $F_{resCoulomb}$

Das ursprüngliche Waldwiderstandsmodell addiert mit einen Coulomb-Term, mit der Schubspannung an der Bodenoberfläche $\tau^{(b)}$ und einem Reibungsparameter μ_{Forest} :

$$F_{resCoulomb} = -c_{res} \rho_0 A h^{eff} \bar{u}^2 \frac{u_i}{\|u\|} + \tau^{(b)} \mu_{Forest}. \quad (7)$$

Modell: $F_{resHCoulomb}$

Das Waldwiderstandsmodell unabhängig von h^{eff} addiert mit dem Coulomb-Term:

$$F_{resHCoulomb} = -c_{resH} \rho_0 A \bar{u}^2 \frac{u_i}{\|u\|} + \tau^{(b)} \mu_{Forest}. \quad (8)$$

*Modell: $F_{resHDet}$*

Das Modell $F_{resHDet}$ kombiniert das Waldwiderstandsmodell F_{resH} (unabhängig von h^{eff}) mit einer Massenentnahme (*Detrainment* M_{det}) bei Hindernissen (z.B. an Bäumen). Die Massenentnahme wird in der Massenerhaltungsgleichung (s. Gleichung 9) berücksichtigt und ist abhängig von einem *Detrainment*-Parameter $detK$, diese Implementierung basiert auf Feistl et al. (2014). Allerdings, bei der hier verwendeten Implementierung wird Massenentnahme aktiv, wenn Fließmächtigkeit (*FT*) oder Fließgeschwindigkeit (*FV*) unter definierte minimale Grenzwerte (*FT* 0.6 m, *FV* 6 m/s) fallen, wenn diese Grenzwerte überschritten sind, kommt es zu erhöhter Reibung (F_{resH}) und wenn einer der maximalen Grenzwerte (*FT* 10 m, *FV* 40 m/s) überschritten wird, hat der Wald keinen Einfluss mehr auf die Lawine.

$$F_{resH} = - c_{resH} \rho_0 A \bar{u}^2 \frac{u_i}{||u||}, \quad (6 \text{ Wdh})$$

$$\oint_{\partial V(t)} \dot{q}^{det} dA = \frac{dM_{det}(t)}{dt} = - detK \frac{u_i}{||u||}. \quad (9)$$

Ergebnisse

Sensitivitätsanalyse und Einschränkung auf plausible Ergebnisse, Analyse der verschiedenen Modelle und Anwendbarkeit

Die getesteten Widerstandsmodelle (siehe Kapitel: Implementierung unterschiedlicher Waldwiderstandsmodelle) sowie der betrachtete Parameterbereich sind in Tabelle 2 dargestellt. Anhand dieser Simulationen wird untersucht, wie sich die unterschiedlichen Waldwiderstandsmodelle auf die simulierte Auslauflänge, den Auslaufwinkel sowie auf die maximal auftretenden Fließdrücke und Fließgeschwindigkeiten auswirken. Zudem wird die Sensitivität gegenüber verschiedenen Parameterwerten analysiert. Diese Analyse wird für die Testfälle durchgeführt, bei denen es im Auslaufbereich keinen Damm bzw. Gegenhang gibt (*avaKleinerOetscherbach* und die generische Topographie - *avaGen1Slope*).

Zusätzlich wird ein Parameterbereich bestimmt, bei dem die Simulationsergebnisse als „plausibel“ eingestuft werden. Diese „Plausibilität“ wird auf Grundlage der Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Waldflächen beurteilt.

- **Plausibel** sind Simulationen, bei denen die räumliche Struktur der Geschwindigkeit erhalten bleibt, ohne dass sehr starke Gradienten auftreten, und die Geschwindigkeit im Waldgebiet nur moderat reduziert wird.
- Als **unplausibel** werden Simulationen eingestuft, bei denen die Geschwindigkeit in den Waldgebieten abrupt oder extrem stark sinkt.

	c_{res} [m ⁻¹]	c_{resH} [-]	μ_{Forest} [-]	$detK$ [Pa]
F_{res}	0.003 - 0.01			
F_{resH}		0.003 - 0.01		
$F_{resCoulomb}$	0.003 - 0.01		0.01 - 0.03	
$F_{resHCoulomb}$		0.003 - 0.01	0.01 - 0.03	
$F_{resHDet}$		0.003 - 0.01		5 - 20

Tabelle 2: Parametervariation für die getesteten Waldwiderstandsmodelle

Quantitative Auswertung der Modelle

Abbildung 1 zeigt für den Testfall *avaKleinerOetscherbach* die Auslauflänge, den Auslaufwinkel (bestimmt bei $pfv = 1$ m/s) sowie die maximalen Fließgeschwindigkeiten und Fließmächtigkeiten aller Modelle und Parameterkombinationen aus Tabelle 2. Die Analyse für das generische Beispiel ist im Appendix zu finden.

Der zusätzliche Coulomb-Reibungsterm in den Modellen $F_{resHCoulomb}$ und $F_{resCoulomb}$ reduziert sowohl Auslauflänge als auch Geschwindigkeit innerhalb des Waldbereichs. Die Unterschiede zu den Basisvarianten sind jedoch gering, weshalb die erhöhte Modellkomplexität als unnötig bewertet und diese Varianten in der weiteren Analyse ausgeschlossen werden.

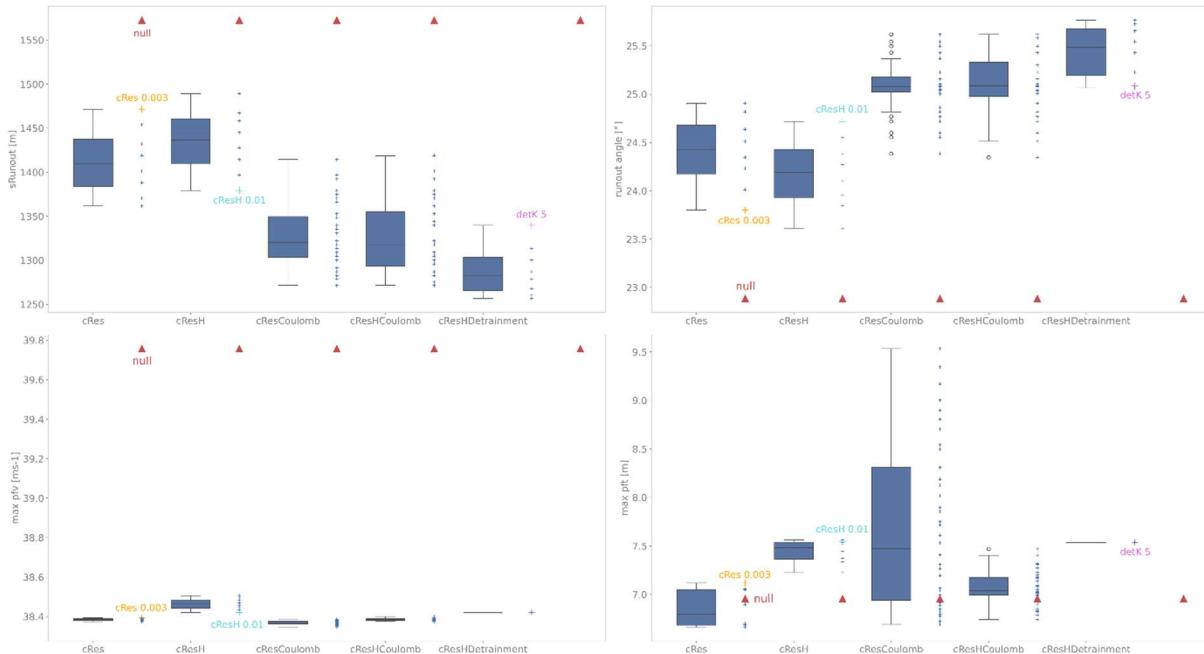


Abbildung 1: Quantitative Analyse der Widerstandsmodelle und deren Parameter für den Testfall *avaKleinerOetscherbach*. Auslauflänge und Auslaufwinkel (basierend auf $pfv = 1 \text{ m/s}$) sowie maximale pfv und pft für alle Widerstandsmodelle und Parametervariationen. Rote Dreiecke kennzeichnen das Ergebnis der Null-Simulation, orange Kreuze das Ergebnis der alten Standardimplementierung (F_{resH} mit $c_{res} = 0.003 \text{ m}^{-1}$), türkisfarbene Kreuze das Ergebnis von F_{resH} mit $c_{resH} = 0.01$ und lilafarbene Kreuze die Simulationen mit F_{resH}^{Detr} , wobei $F_{resH} = 0.01$ und für $FV < 6 \text{ m/s}$ oder $FT < 0.6 \text{ m}$ ein Detrainment mit $detK = 5$ angewendet wurde.

Vergleich mit RAMMS::Avalanche Simulationen

Für *avaGen1Slope* und *avaKleinerOetscherbach* werden zusätzlich in *RAMMS::Avalanche* Vergleichssimulationen basierend auf den *RAMMS*-Spezifischen μ -, ξ -Feldern Simulationen mit Waldwirkung durchgeführt. Durch die Waldwirkung werden die beiden Reibungsparameter (Voellmy-Ansatz) adaptiert:

- $\xi = 400 \text{ ms}^{-2}$ wird global gesetzt und
- $\Delta\mu = 0.02$ zu dem bestehenden μ addiert.

Hier lässt sich festhalten, dass ein direkter Vergleich mit dem Simulationsergebnissen von *RAMMS::Avalanche* sich schwierig gestaltet, da sich bereits ohne aktivierte Waldwirkung (Null-Variante) die Modellresultate von *RAMMS::Avalanche* und *com1DFA* deutlich voneinander unterscheiden.

Fokussierung auf das Modell F_{resH}

In weiterer Folge wird das vereinfachte Widerstandsmodell F_{resH} , das unabhängig von der Fließmächtigkeit arbeitet analysiert und hinsichtlich seiner physikalischen Plausibilität bewertet. Der definierte Wertebereich ist in Tabelle 2 gelistet. Auf Basis dieser Analyse werden anschließend relevante Parameterwerte für c_{resH} identifiziert und mit der ursprünglichen Waldwiderstandsmodellierung aus *SamosAT* sowie der *Detrainment*-Variante von F_{resH} verglichen (Abbildung 2).

In Abbildung 2 sind die maximalen Fließdrücke (Panels a und c) sowie die maximalen Fließgeschwindigkeiten (Panels b und d) über das Querprofil entlang des Thalwegs dargestellt.

Die Analyse des Parameterbereichs in Abbildung 2 Panel a & b von c_{resH} (0.003 bis 0.03) im Modell F_{resH} zeigt deutliche Unterschiede im Strömungsverhalten innerhalb des Waldgebiets:

- Für c_{resH} -Werte über 0.01 setzt etwa bei $S_{XY} = 540$ m, dem Eintrittspunkt in den Wald, eine abrupte und sehr stark ausgeprägte Reduktion der Fließgeschwindigkeit ein.
- Bei c_{resH} -Werten unter 0.01 erfolgt die Bremswirkung zwar ebenfalls, jedoch bleibt die Form der Geschwindigkeitsverteilung entlang des Talwegs weitgehend erhalten.
→ c_{resH} -Werte über 0.01 werden daher aufgrund der überproportionalen Bremswirkung und der daraus resultierenden plötzlichen Geschwindigkeitsabnahme als physikalisch nicht plausibel eingestuft.

Die zusammenfassenden Abbildungen aller Testfälle sind im Appendix zu finden.

Zusammenfassende Interpretation der eingegrenzten Parameter für c_{resH} :

- $c_{resH} = 0.03$ → unrealistisch hohe Wirkung, von Seitens des BFWs als unplausibel eingestuft
- $c_{resH} = 0.01$ → höchster noch als plausibel bewerteter Wert für eine starke Waldwirkung
- $c_{resH} = 0.008$ → starke Wirkung
- $c_{resH} = 0.003$ → geringe Wirkung (bisheriger Standardwert für c_{res})

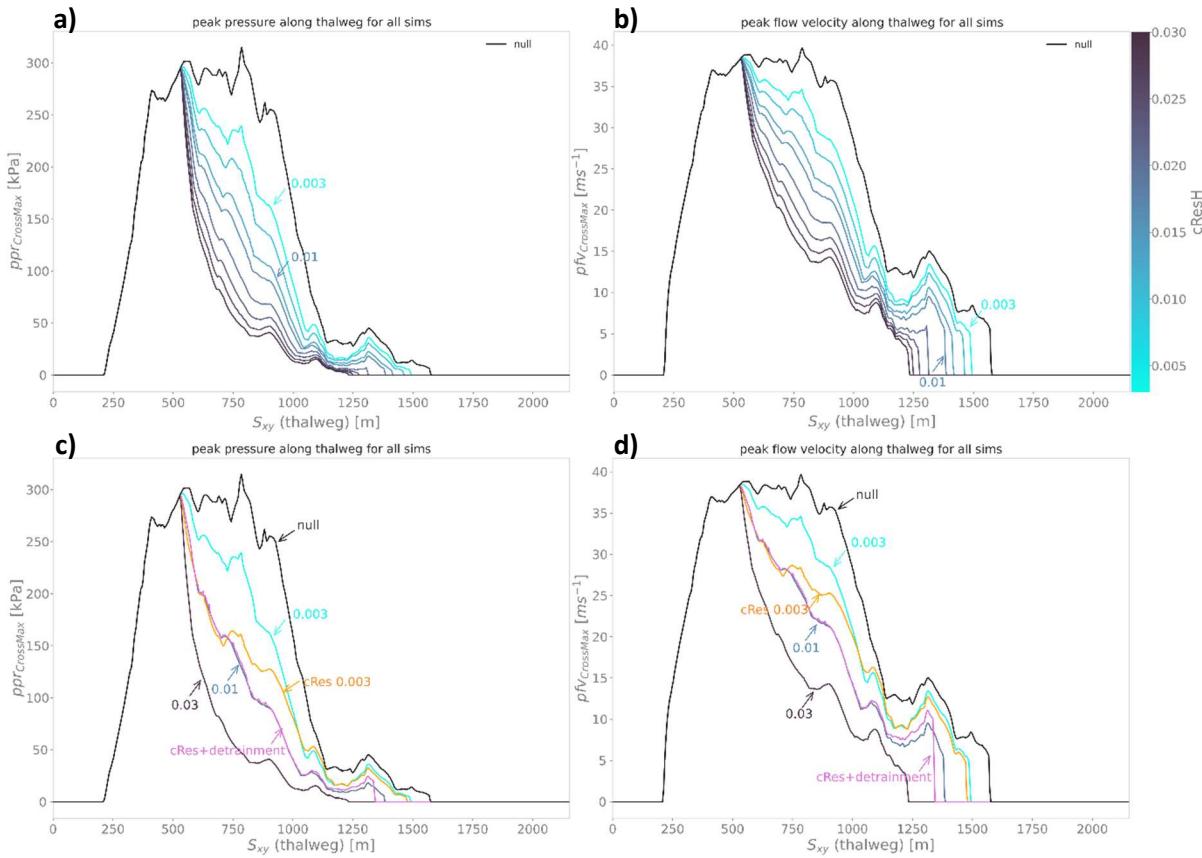


Abbildung 2: Thalweg Querprofile für das Widerstandsmodell F_{resH} für den Testfall *avaKleinerOetscherbach*. Maximaler Druck über das Querprofil für jeden Punkt entlang des Thalwegs bei Variation von $c_{resH} = 0.003, 0.005, 0.008, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03$ in a) und die Fließgeschwindigkeiten in b). Zusätzlich wird die Null-Simulation in schwarz dargestellt. In c) und d) ist auch die Standard-Implementierung aus SamosAT abgebildet (entspricht Widerstandsmodell F_{res} mit $c_{resH} = 0.003$; hier wird die Abhängigkeit von der Fließmächtigkeit durch h_{eff} noch berücksichtigt), sowie die neue Implementierung ($F_{resHDet}$), bei der für $FV < 6 \text{ m/s}$ oder $FT < 0.6 \text{ m}$ Detrainment stattfindet ($detK = 5$).

Vergleich ausgewählter Modellvarianten

Aufbauend auf der Eingrenzung des plausiblen Wertebereichs von c_{resH} wird im nächsten Schritt ein Vergleich ausgewählter Modellvarianten durchgeführt. Ziel ist es, die Auswirkungen unterschiedlicher c_{resH} -Werte auf Fließgeschwindigkeiten und -drücke entlang des Thalwegs systematisch darzustellen. Dabei werden die Ergebnisse sowohl mit der ursprünglichen Implementierung (F_{res} mit $c_{res} = 0.003 \text{ m}^{-1}$) als auch mit der Detrainment-Variante verglichen (siehe Abbildung 2, Panels c und d).

- F_{res} mit $c_{res} = 0.003 \text{ m}^{-1}$ (ursprüngliche Implementierung aus SamosAT)
- F_{resH} mit $c_{resH} = 0.003$ (ohne Abhängigkeit von der Fließmächtigkeit)
- F_{resH} mit $c_{resH} = 0.03$ (als nicht mehr plausibel eingestuft)
- F_{resH} mit $c_{resH} = 0.01$ (höchster noch als plausibel bewerteter Wert)
- F_{resH} mit $c_{resH} = 0.003$ und aktiver Detrainment-Funktion (wirksam bei Fließgeschwindigkeiten $< 6 \text{ m/s}$ oder Fließmächtigkeit $< 0.6 \text{ m}$; $detK = 5 \text{ Pa}$)

Die Analyse zeigt, durch die Vereinfachung von F_{res} zu F_{resH} wird der Waldwiderstand unabhängig von der Fließmächtigkeit simuliert. Im Vergleich zum vorherigen Setup führt diese Unabhängigkeit dazu, dass der Waldwiderstand bei geringen Fließmächtigkeiten (< 1 m) stärker und bei höheren Fließmächtigkeiten (> 1 m) schwächer ausgeprägt ist als zuvor. Diese Anpassung wird als vorteilhaft angesehen, da der physikalische Zusammenhang zwischen Fließmächtigkeit und Waldwiderstand noch nicht ausreichend bestimmt werden kann.

Bei der Verwendung von F_{resH} mit zusätzlichem *Detrainment* zeigt sich, dass im Vergleich zur reinen F_{resH} -Variante die Auslauflänge nochmals reduziert wird – allerdings ohne eine deutliche Abnahme der Fließgeschwindigkeit über das gesamte Waldgebiet hinweg. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das *Detrainment* nur dann aktiviert wird, wenn die Fließmächtigkeit unter 0.6 m oder die Fließgeschwindigkeit unter 6 m/s liegt. Dadurch wirkt sich Massenentnahme selektiv aus.

Zur weiteren Veranschaulichung und Einordnung der Größenordnung des Waldeffekts zeigt Abbildung 3 Abbildung 3 die in Abbildung 2 dargestellten Modellvarianten sowie eine Referenzsimulation ohne Waldwiderstand in der Draufsicht.

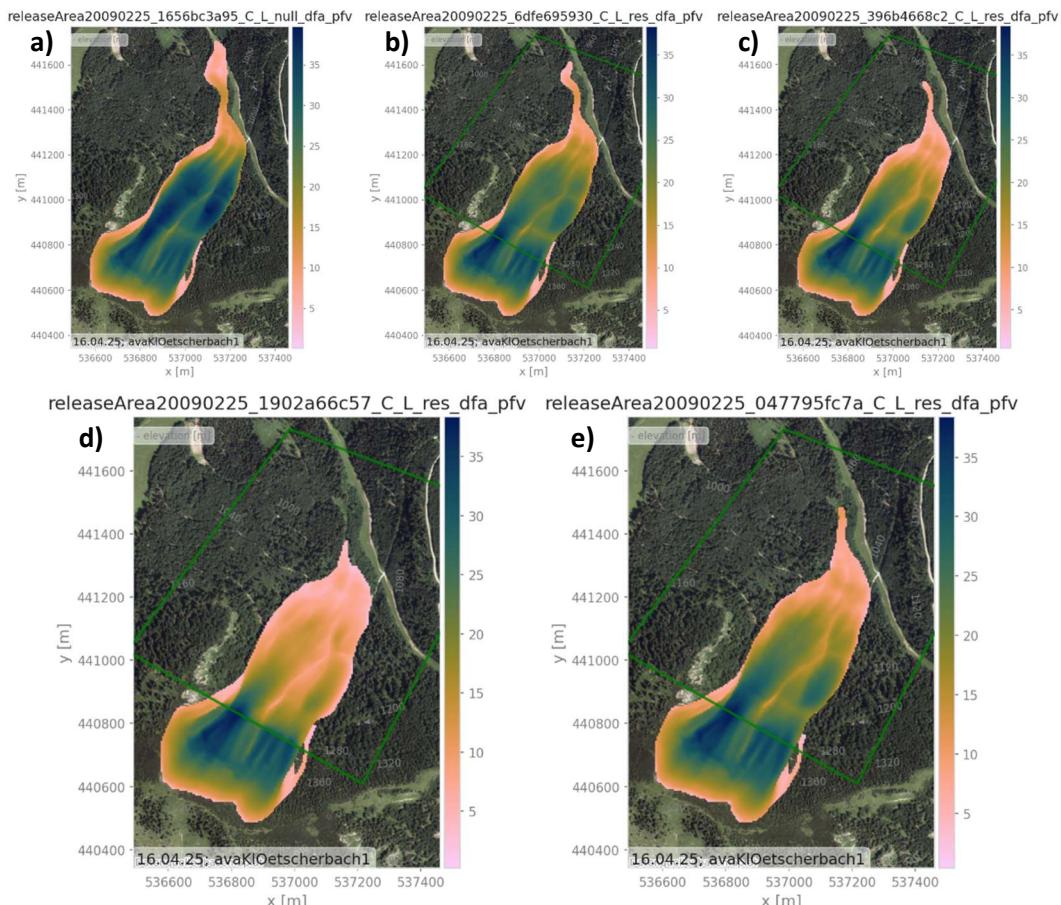


Abbildung 3: Gegenüberstellung von der maximalen Fließgeschwindigkeit für den Testfall *avaKleinerOetscherbach* von: a) Null-Simulation, b) F_{resH} mit $c_{resH} = 0.003$, c) F_{resH} mit $c_{resH} = 0.01$, d) F_{resH} mit $c_{resH} = 0.03$ und e) $F_{resHDet}$ mit $c_{resH} = 0.01$ und $detK = 5 \text{ Pa}$

Detaillierte Analyse des Testfalls *avaKleinerOetscherbach*

Zur vertieften Analyse werden die Simulationsergebnisse für den Testfall *avaKleinerOetscherbach* betrachtet. Abbildung 4 zeigt die Null-Variante ohne Berücksichtigung eines Waldwiderstands. Dem gegenüber steht Abbildung 5 mit einer Simulation, bei der Waldwirkung berücksichtigt wurde. Stellvertretend für alle getesteten Varianten mit Waldwiderstand wird hier die Modellvariante F_{resH} mit dem Parameterwert $c_{resH} = 0.01$ dargestellt.

Für die Simulation wurde angenommen, dass das Waldgebiet im relevanten Bereich vollständig bewaldet ist. Dies weicht bewusst vom realen Ereignis ab, da dort der Wald nur kleinräumig vorhanden war und die höchsten Fließgeschwindigkeiten außerhalb der bewaldeten Fläche auftraten. Das simulierte Waldgebiet beginnt bei einer Entfernung von etwa $S_{XY} = 540$ m entlang des Talwegs.

Abbildung 4Abbildung 5Generell zeigen Abbildung 4 und Abbildung 5 drei verschiedenen Darstellungsvarianten der Simulationsergebnisse mit unterschiedlichem Fokus:

Panel a): Zeigt die maximale Fließgeschwindigkeit in genordeter Draufsicht mit einem untergelegten Orthophoto.

Panel b): Stellt das Thalweg-Zeit-Diagramm dar und zeigt somit die zeitliche Entwicklung der maximalen Fließgeschwindigkeit entlang des *Thalwegs*.

Panel c): Visualisiert die maximale Fließmächtigkeit entlang des *Thalwegs* über das Querprofil an jedem Punkt in Form von Balken. Die Farbe der Balken repräsentiert die maximale Fließgeschwindigkeit. Die jeweiligen Maxima über den gesamten Thalweg sind zusätzlich durch Punkte hervorgehoben. Und zusätzlich sind die auf pfv 1 m/s basierende Auslauflänge sowie Auslaufwinkel angeführt.

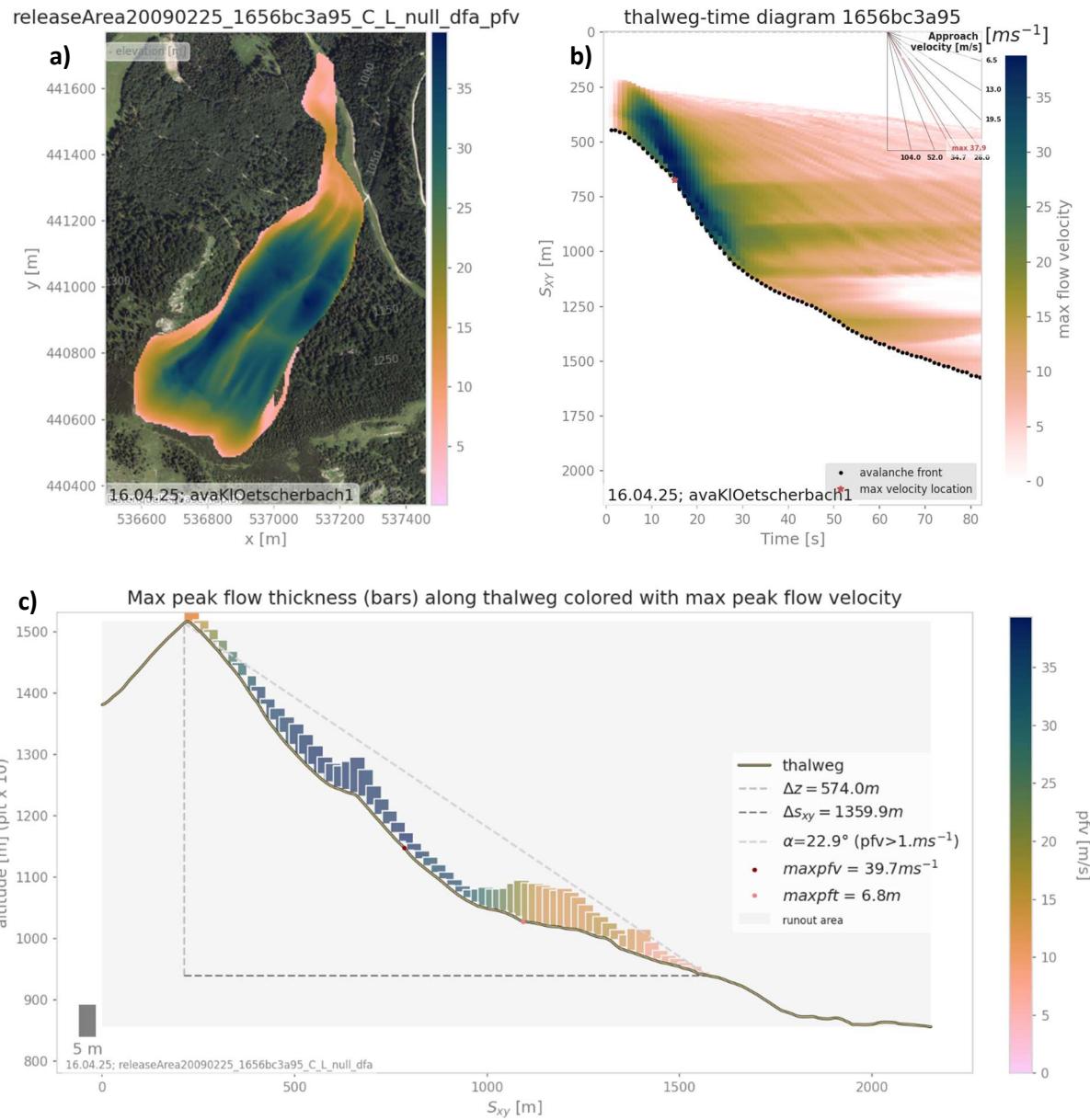


Abbildung 4: **Null-Simulation** für den Testfall *avaKleinerOetscherbach*: Panel a) zeigt das maximale Fließgeschwindigkeitsfeld, Panel b) stellt das Thalweg-Zeit-Diagramm für die maximale Fließgeschwindigkeit über das Querprofil dar und Panel c) visualisiert das Thalweg-Höhen-Diagramm, das eine Zusammenfassung der Strömungsentwicklung entlang des *Thalwegs* zeigt, sowie die abgeleitete projizierte Auslaufflänge (ΔS_{xy}) und den Auslaufwinkel (α), basierend auf einem Schwellenwert der maximalen Fließgeschwindigkeit (pfv) von 1 m/s.

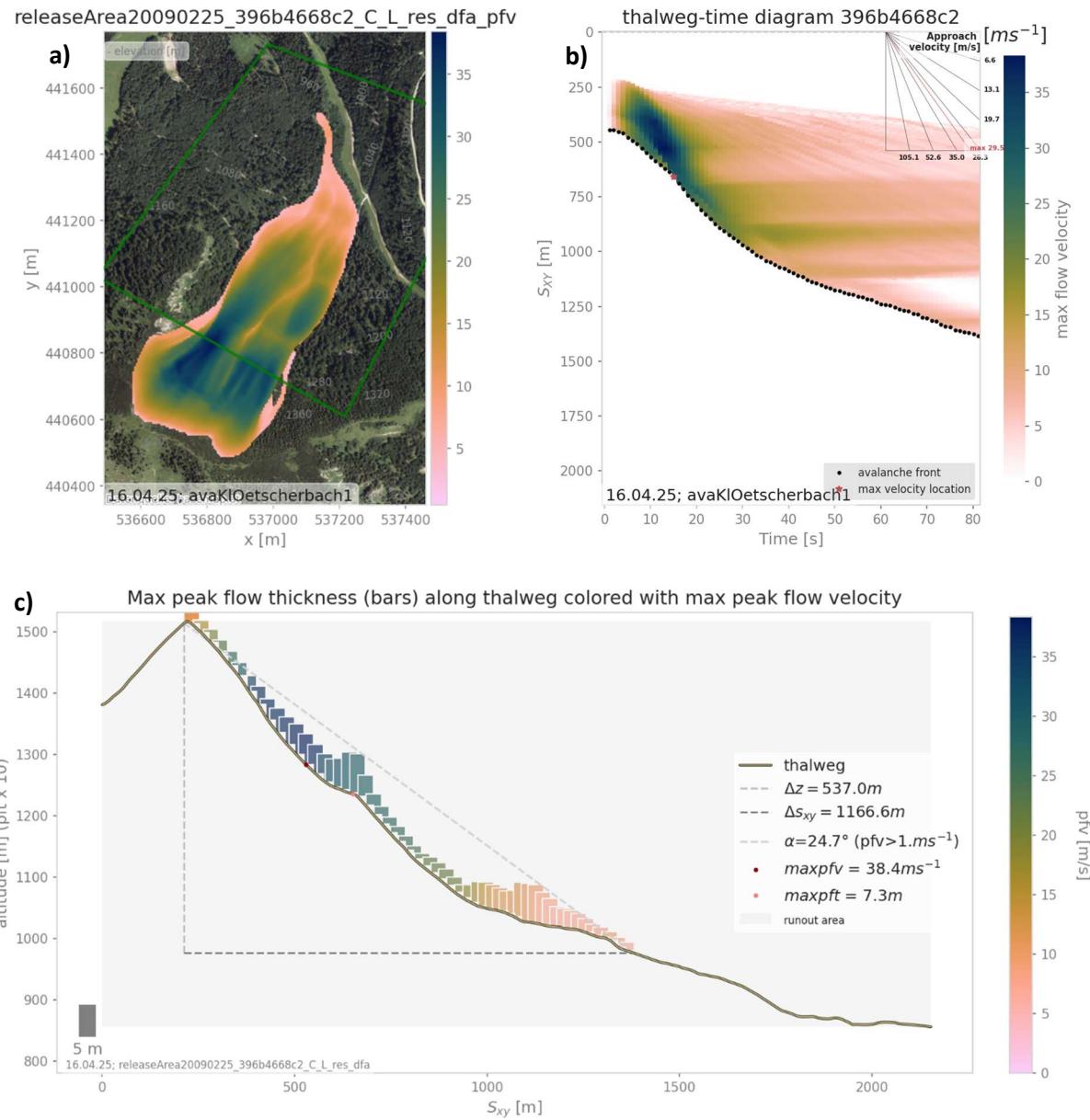


Abbildung 5: Simulationsergebnisse für avaKleinerOetscherbach. Widerstandsmodell F_{resH} mit $c_{resH} = 0.01$: a) Feld der maximalen Fließgeschwindigkeit, b) Thalweg-Zeit-Diagramm für die maximale Fließgeschwindigkeit entlang des Querprofils und c) Thalweg-Höhenprofil, das die Fließentwicklung zusammenfasst und die abgeleitete projizierte Auslauflänge (ΔS_{xy}) sowie den Auslaufwinkel basierend auf einem Schwellenwert für die maximale Fließgeschwindigkeit (pfv) von 1 m/s zeigt.

Der Vergleich zeigt, dass bei der Widerstandsvariante F_{resH} mit $c_{resH} = 0.01$ die maximale Fließgeschwindigkeit deutlich früher auftritt als in der Null-Simulation – nämlich direkt beim Eintritt in das Waldgebiet. Dort führt der erhöhte Widerstand zu einer spürbaren Reduktion der Fließgeschwindigkeit sowie zu einer Zunahme der Fließmächtigkeit infolge der verstärkten Bremswirkung. Insgesamt ergibt sich daraus eine deutlich verkürzte Auslauflänge im Vergleich zu Varianten ohne oder mit geringerem Waldwiderstand. Diese Parametrisierung wird im Rahmen der Analyse als Variante mit starker Waldwirkung eingeordnet.

Anwendung in Praxisbeispielen der Wildbach- und Lawinenverbauung

Auf Basis der vorangegangenen Modelleingrenzung wurde das Modell F_{resH} für weiterführende Vergleichssimulationen eingesetzt. Die Parametervariationen konzentrieren sich auf praxisrelevante Werte für geringe und starke Waldwiderstände, um deren Einfluss auf Auslaufänge und Strömungscharakteristik systematisch zu untersuchen.

Im Testfall *avaTumpner* entwickeln sich Seitenarme mit sehr geringer Mächtigkeit, selbst bei unrealistisch hohen c_{resH} -Werten aus, was zu schwer interpretierbaren Resultaten führt und von Seitens der Wildbach- und Lawinenverbauung als nicht plausibel eingestuft. Aufgrund dieser Problematik wird eine adaptive Widerstandskraft entwickelt, die sowohl von der Fließgeschwindigkeit als auch von der Fließmächtigkeit abhängig ist und zusätzlich die Effekte der Massenentnahme (*Detrainment*) berücksichtigt, siehe

Modell: $F_{resHDet}$.

Handlungsempfehlung

Festlegung von Waldflächen

Eine praktikable, flächenhaft automatisierbare Methode zur zuverlässigen Identifikation von Waldflächen im Sinne der Modellierung konnte nicht entwickelt werden. Daher wurde der bisherige methodische Ansatz beibehalten: Die Abgrenzung erfolgt gutachterlich anhand von der Differenz von digitalen Oberflächenmodell zu Geländemodell in Kombination mit Orthofotos. Vegetationshöhen (Differenzen) unter 10–15 m werden dabei nicht als wirksamer Wald berücksichtigt. Die Festlegung von Waldflächen als Widerstandsgebiete ist explizit als gutachterliche Entscheidung zu verstehen.

Regelbasierte Anpassung der Widerstandskraft

Festlegung von Referenzwerten für die Waldwiderstandskraft:

- **Starke Waldwirkung: $c_{resH} = 0.01$**

→ Dieser Wert liefert eine deutliche Reduktion der Geschwindigkeit, ohne unplausible Effekte wie abrupte Flussabbrüche.

Zusätzlich wird ausgehend von den Ergebnissen der Sensitivitätsanalysen eine neue, adaptive Implementierung für die Berücksichtigung der Widerstandskraft ($F_{resHDet}$) in den Widerstandsgebieten (Wald) empfohlen. Diese besteht aus erhöhter Reibung und *Detrainment* in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Fließmächtigkeit. Ziel ist es, die physikalische Plausibilität in Bereichen mit geringer Fließmächtigkeit und Geschwindigkeit zu erhöhen – insbesondere dort, wo sich

Seitenarme mit sehr geringer Fließmächtigkeit unrealistisch weit im Widerstandsgebiet ausbreiten können.

Die Anpassung erfolgt abhängig von der lokalen Fließmächtigkeit (FT) und Fließgeschwindigkeit (FV) innerhalb der Widerstandsfläche.

Anmerkung: Werte sind zusammen mit MG und CT bestimmt worden und stellen einen First Guess dar.

- **Detrainment**, wenn:
 $FV < 6 \text{ m/s}$ oder $FT < 0.6 \text{ m}$ und mit $detK = 5 \text{ Pa}$
→ Die Lawine verliert Masse (Schnee lagert sich ab), da die Energie nicht ausreicht, um das Hindernis zu zerstören.
- **Stark erhöhte Reibung innerhalb des Widerstandgebiets (Wald)**, wenn:
 $FV \geq 6 \text{ m/s}$ und $FT \geq 0.6 \text{ m}$
→ Setzen von $c_{resH} = 0.01$ zur Modellierung eines starken Widerstandseffekts.
- **Keine erhöhte Reibung bzw. Detrainment**, wenn:
 $FV > vMax$ oder $FT > thMax$
→ Annahme, dass die Lawine in diesem Bereich den Wald zerstört; die Widerstandsfläche wird nicht mehr berücksichtigt.
→ Die konkrete Wirkung und Parametrisierung erfordert jedoch gezielte Tests und Validierung.

Implikationen

Diese Regelung hat direkte Auswirkungen auf die Simulation:

- Wenn die Lawinenfront mit FT oder FV über den Maximalwerten ($vMax$ oder $thMax$) durch einen Waldabschnitt fließt, wird dieser Bereich auch für nachfolgende Partikel nicht mehr als Widerstandsfläche gewertet.
- Dies bildet die Zerstörung des Waldes durch die Front realitätsnah ab. Bei hinteren Teilen der Lawine wird dann die (Wald-) Widerstandswirkung (trotz niedriger Energie) nicht mehr berücksichtigt
- Mit dem aktuellen Default/ vorgeschlagenen Parameter wird nur mehr starke Waldwirkung abgebildet

Offene Punkte und Fragen

- Überarbeitung des Abbruchkriteriums (*stopCrit*) könnte notwendig sein:
- Durch *Detrainment* nimmt die Lawinenmasse ab, wodurch der Schwellenwert von 1 % der maximalen kinetischen Energie früh erreicht wird – auch wenn sich die Front noch bewegt. (Abbildung 6)
- Die vorgeschlagenen Grenzwerte (*vMin*, *thMin*, *vMax*, *thMax*, *detK*) sind bisher nicht kalibriert oder validiert. Eine detaillierte Analyse zur Parameterauswahl ist erforderlich.

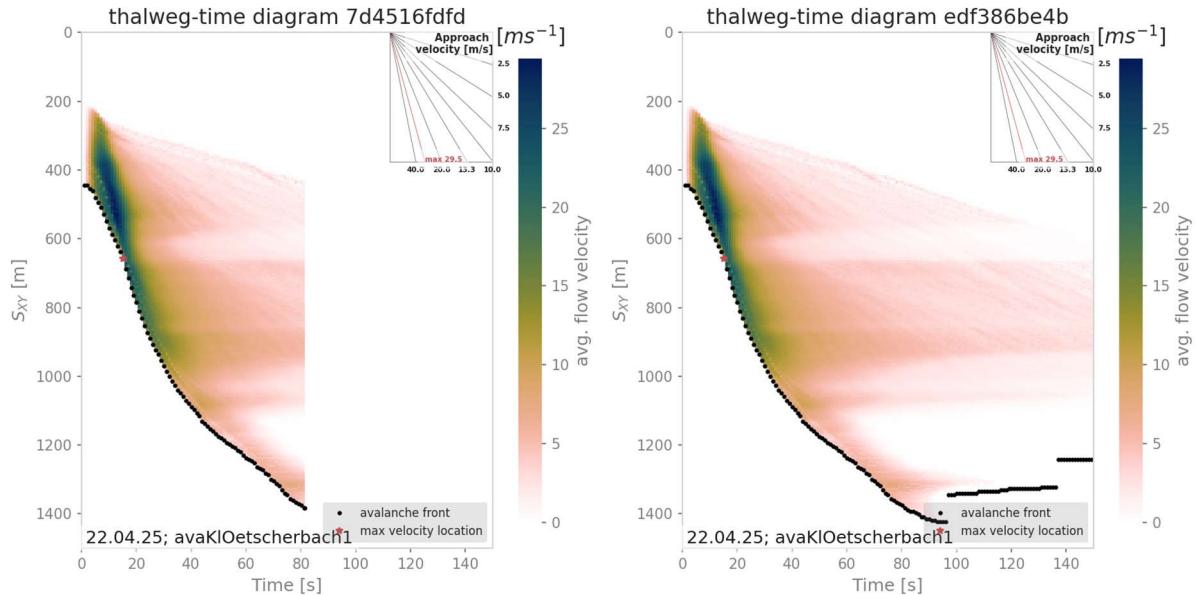


Abbildung 6: Thalweg-Zeit-Diagramm für Simulationen mit dem Widerstandsmodell F_{resH} und einem Parameterwert von $c_{resH} = 0.01$. Vergleich zwischen der Verwendung des Abbruchkriteriums $stopCrit = 0.01$ (links) und einer festen Simulationsdauer von $tEnd = 400$ s (rechts). Die maximale Distanz entlang des Thalwegs beträgt dabei $S_{xy} = 1384$ m bzw. $S_{xy} = 1430$ m

Simulationsergebnisse für Handlungsempfehlung

Unter Berücksichtigung der offenen Punkte und Fragestellungen wird im Folgenden die in der Handlungsempfehlung beschriebene Modellvariante mit Waldwirkung und entsprechender Parametrisierung der Null-Variante ohne Waldwiderstand gegenübergestellt. Simulationen mit Waldwirkung sind mit *res_dfa_pfv bezeichnet; die Waldwiderstandsflächen sind als grüne Polygone dargestellt. Die unteren beiden Panels zeigen die Differenz zwischen der Null- und der Waldvariante.

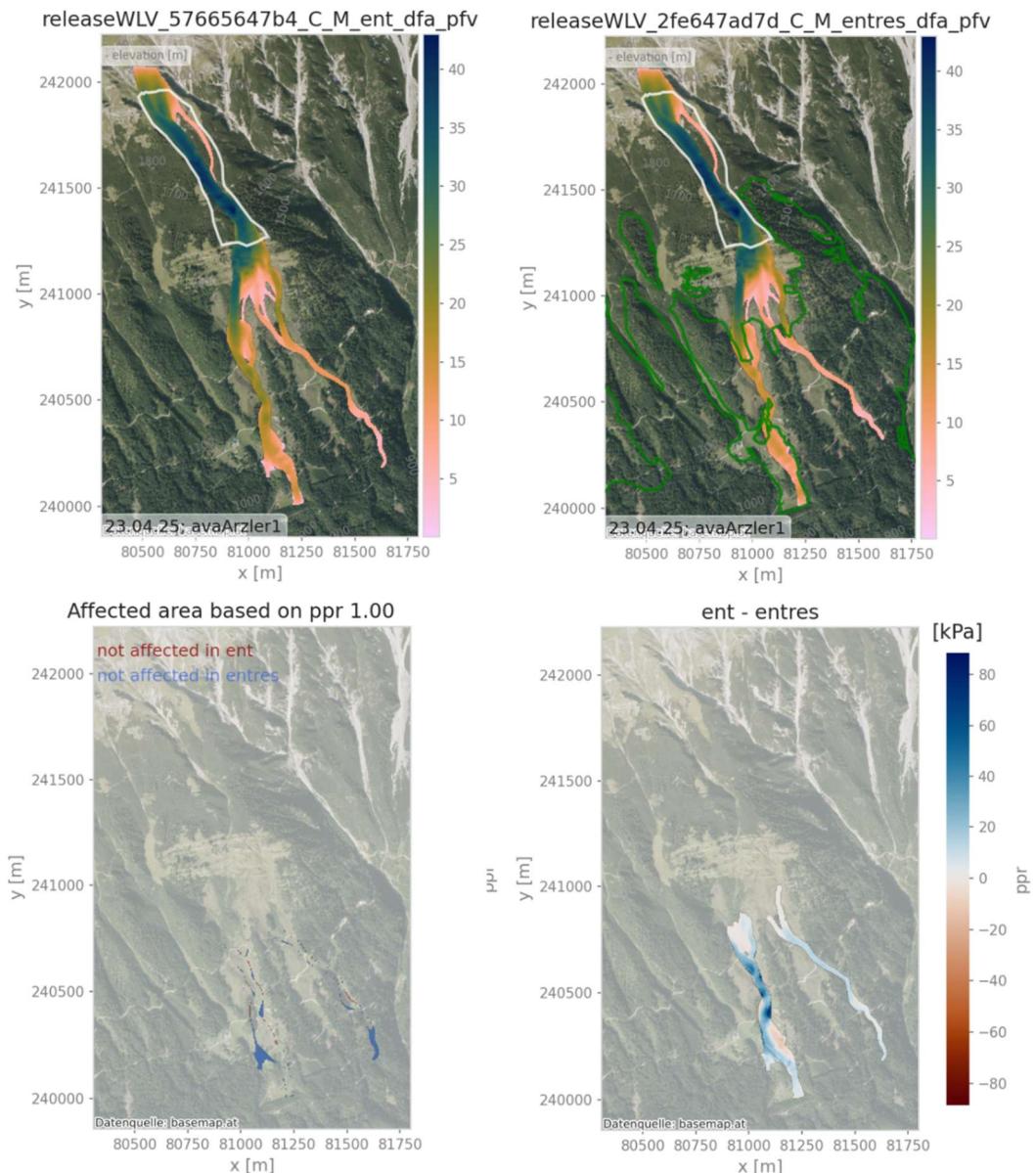


Abbildung 7: Parametrisierung der Handlungsempfehlung im Vergleich zur Null-Variante für den Testfall: *avaArzl*.

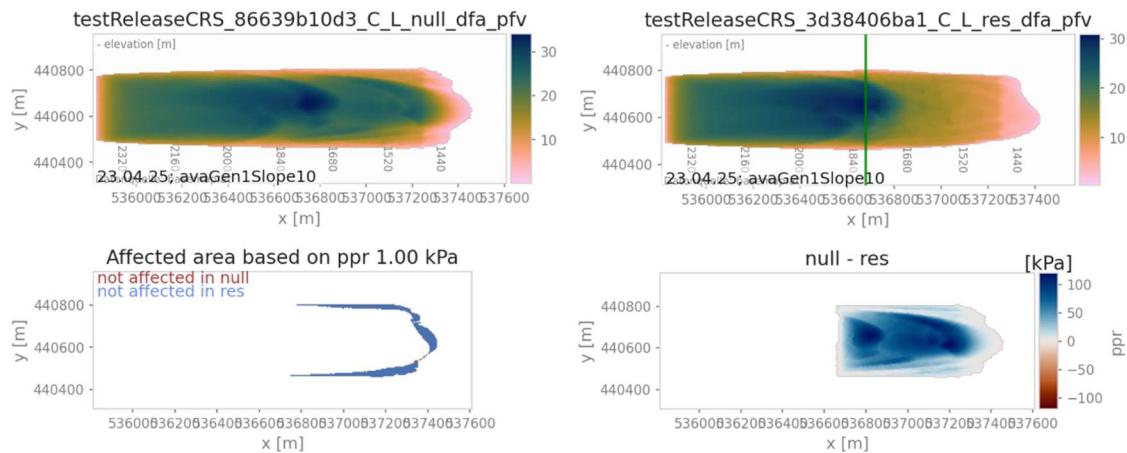


Abbildung 8: Parametrisierung der Handlungsempfehlung im Vergleich zur Null-Variante für den Testfall: *avaGen1Slope*.

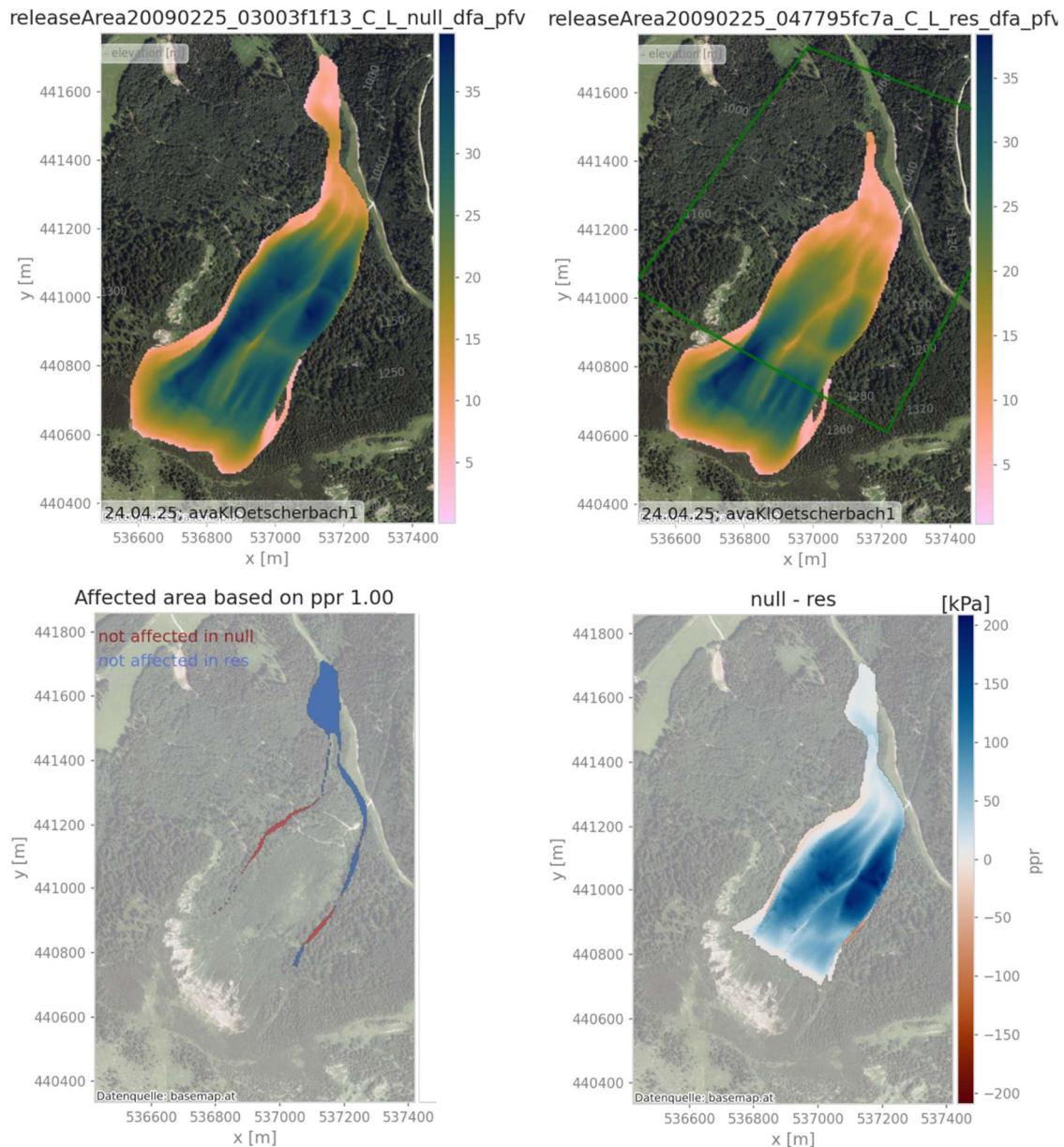


Abbildung 9: Parametrisierung der Handlungsempfehlung im Vergleich zur Null-Variante für den Testfall: *avaKleinerOetscherbach*.

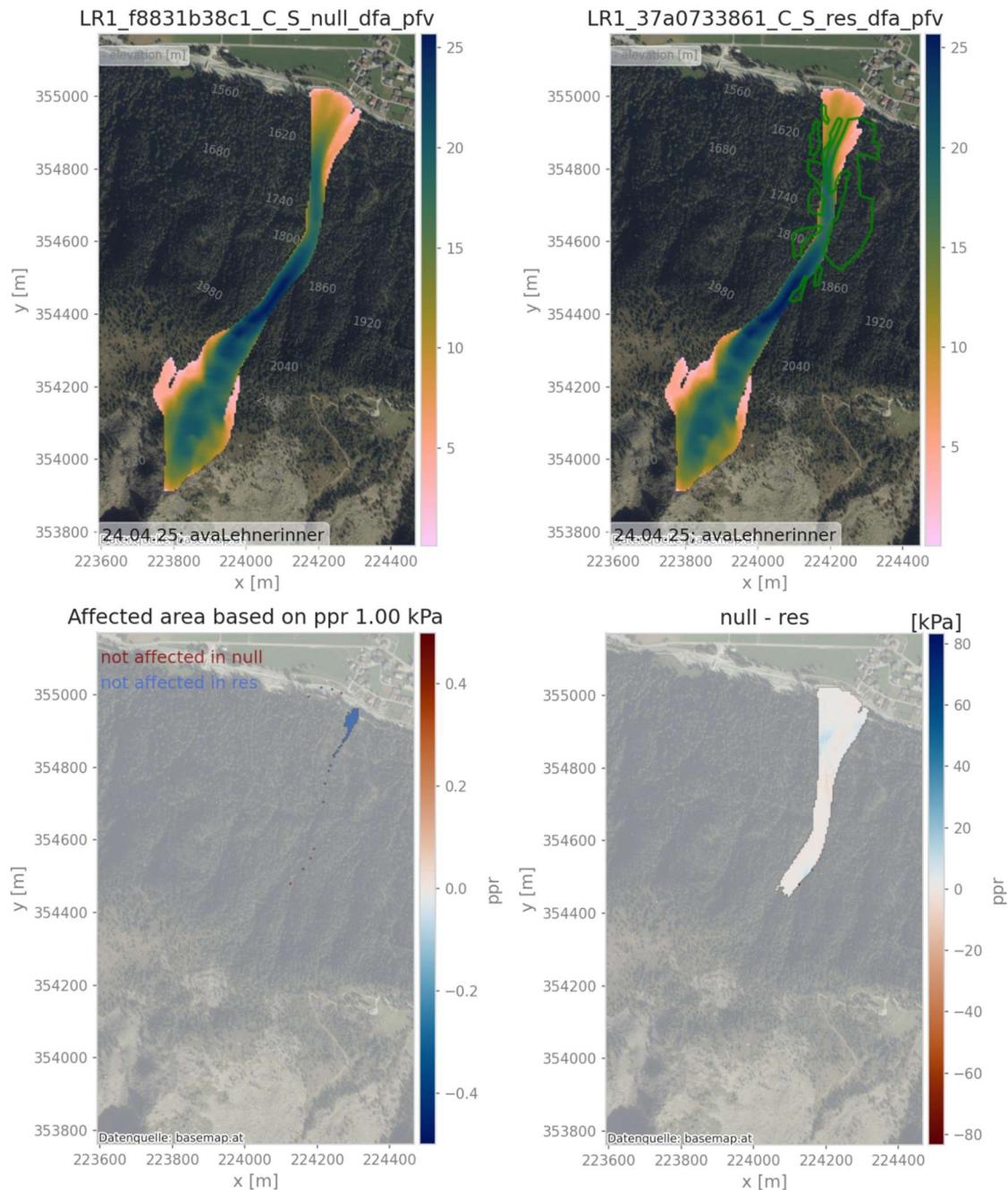


Abbildung 10: Parametrisierung der Handlungsempfehlung im Vergleich zur Null-Variante für den Testfall: *Lehnerinner*.

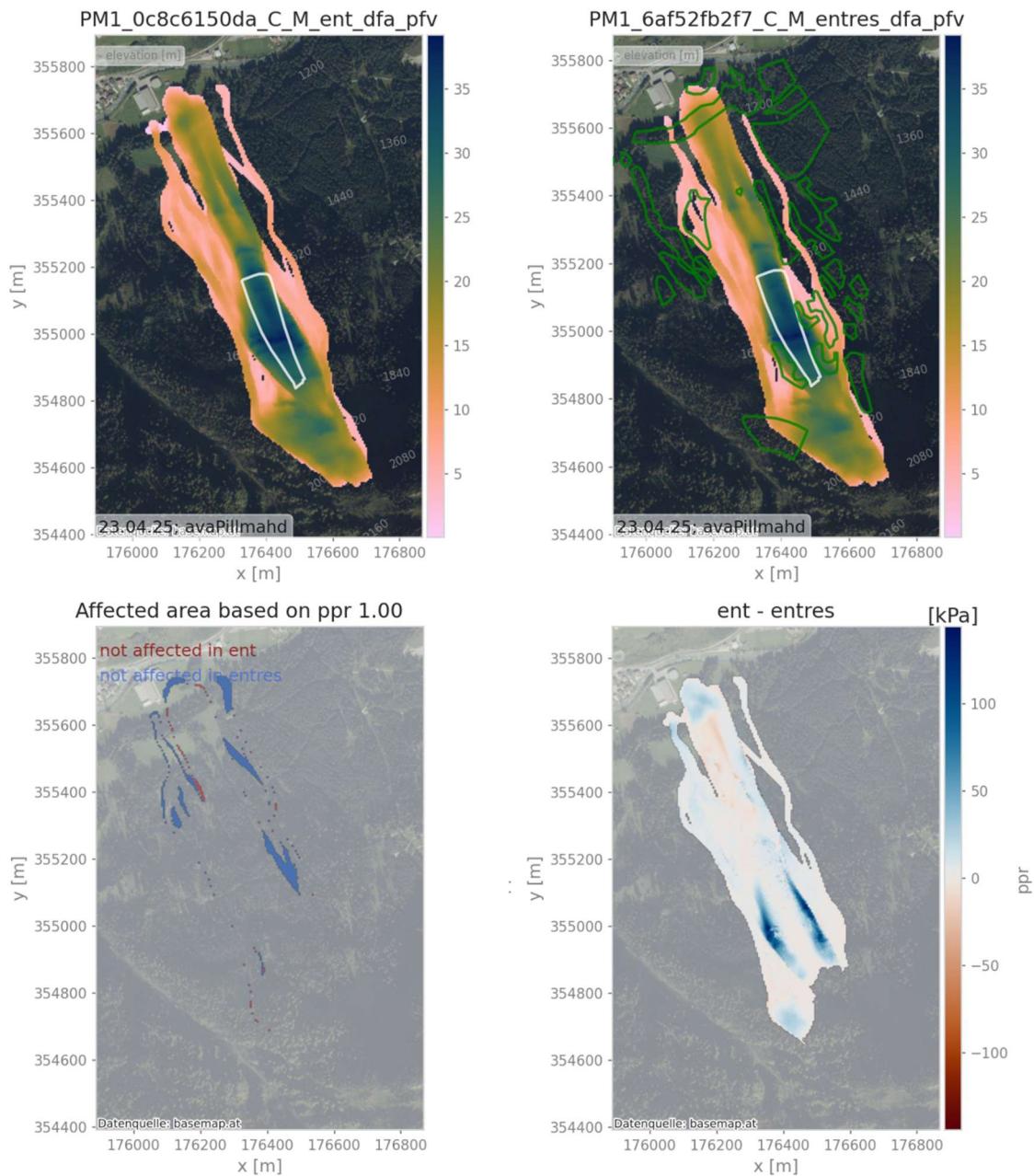


Abbildung 11: Parametrisierung der Handlungsempfehlung im Vergleich zur Null-Variante für den Testfall: AvaPillmahd.

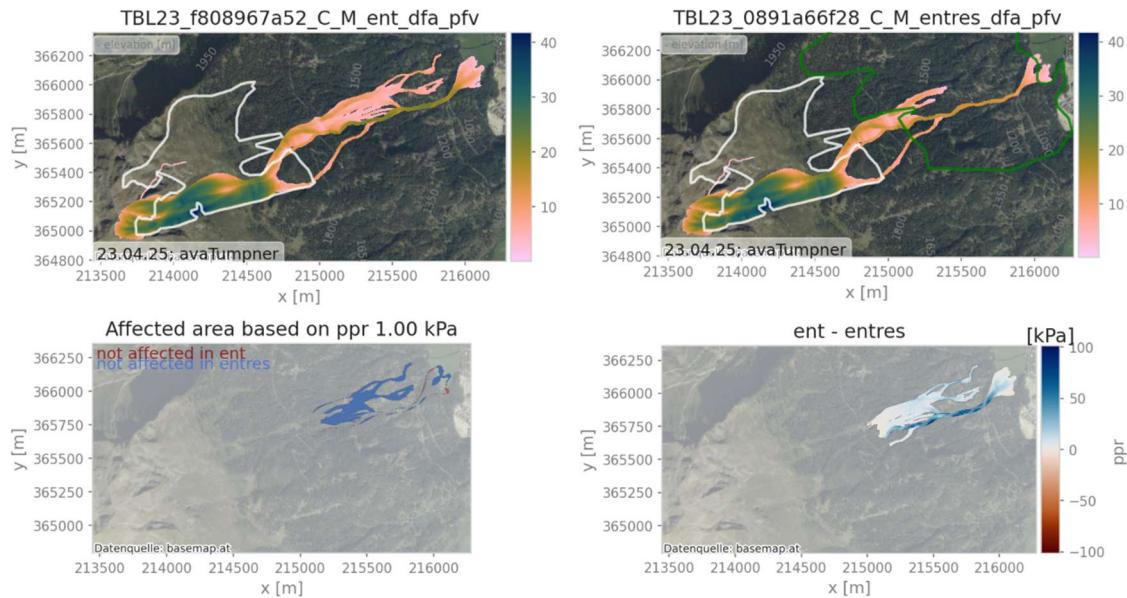


Abbildung 12: Parametrisierung der Handlungsempfehlung im Vergleich zur Null-Variante für den Testfall: AvaTumpner.

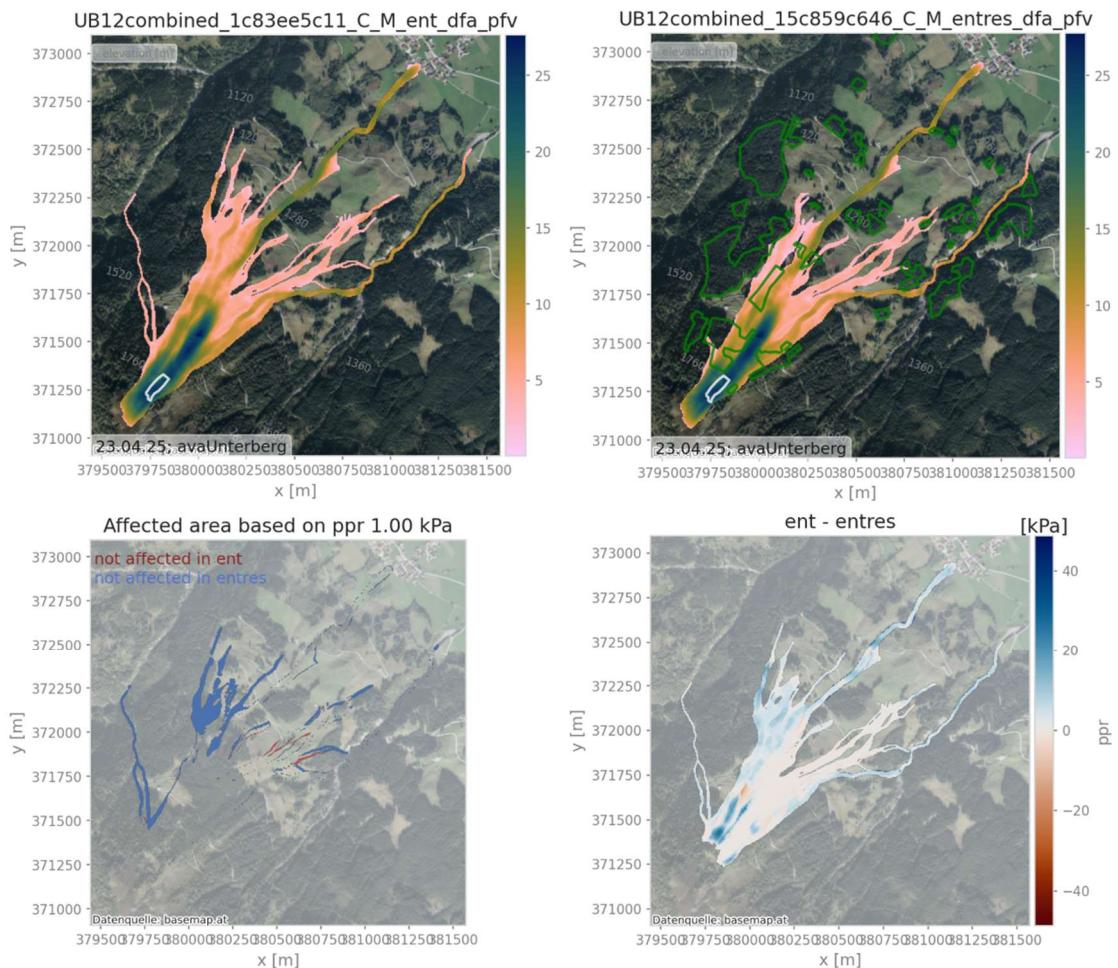


Abbildung 13: Parametrisierung der Handlungsempfehlung im Vergleich zur Null-Variante für den Testfall: AvaUnterberg.

Literaturverzeichnis

Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Naturgefahren. (2023). *ForestFrame I - Projektbericht*. Innsbruck.

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>

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>

Funder, M. 2014: Simulation der kleinen Ötscherbach Lawine, Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.

Huber, A., Hainzer, E., Kofler, A., Fromm, R., & Fischer, J.-T. (2015). Projektbericht: Evaluierung von Gefahrenbeurteilungsmethoden und deren Implikationen für die forstliche Raumplanung—EVAMETH.

Jörg, P., & Granig, M. (2013). Entrainmentstudie SamosAT - 2013. Internal report—Stabstelle Schnee und Lawinen, Austrian Service for Torrent and Avalanche Control (WLV).

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.

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>

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.

Appendix

Abbildung 14 bis Abbildung 22 zeigen jeweils eine Übersicht der Simulationsergebnisse mit und ohne Berücksichtigung von Waldeinfluss für das Widerstandsmodell F_{resH}

Die obere Reihe zeigt die Übersichtskarte mit den pink dargestellten Auslöseflächen, dem rosa markierten *Entrainment*-Gebiet (falls vorhanden), dem rot eingezeichneten *Thalweg* sowie den grün dargestellten Waldflächen. Für die AIMEC-Analyse ist der ausgewählte Bereich zur Transformation in ein *Thalweg*-bezogenes Koordinatensystem ebenfalls eingezeichnet. Daneben folgt die Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die *Entrainment*-Simulation (falls vorhanden) ohne Waldeinfluss im *Thalweg*-Altitude-Diagramm.

Die Reihen 2 bis 4 zeigen jeweils die Felder für die maximale Fließmächtigkeit, maximale Fließgeschwindigkeit und den maximalen Fließdruck (*peak pressure*) für:

- die *Entrainment*-Simulation (falls vorhanden) ohne Wald (erste Spalte),
- die Simulation mit Wald und $c_{resH} = 0.003$ (zweite Spalte, geringe Wirkung),
- die Simulation mit Wald und $c_{resH} = 0.008$ (dritte Spalte, starke Wirkung).

Die unterste Reihe stellt den Anteil der Simulationen dar, in denen eine Gitterzelle einen *peak pressure* $> 1 \text{ kPa}$ erreicht hat, dargestellt als Bruchteil von 1 (0 = 0 %, 1 = 100 %).

Die zweite Abbildung zeigt einen Zoom auf das Auslaufgebiet. Die dritte Abbildung stellt die maximalen Fließgeschwindigkeiten entlang des *Thalwegs* für die verschiedenen Simulationen dar. In der Legende ist zusätzlich die jeweilige Abweichung der Auslauflänge zur Referenzsimulation ohne Wald angegeben.

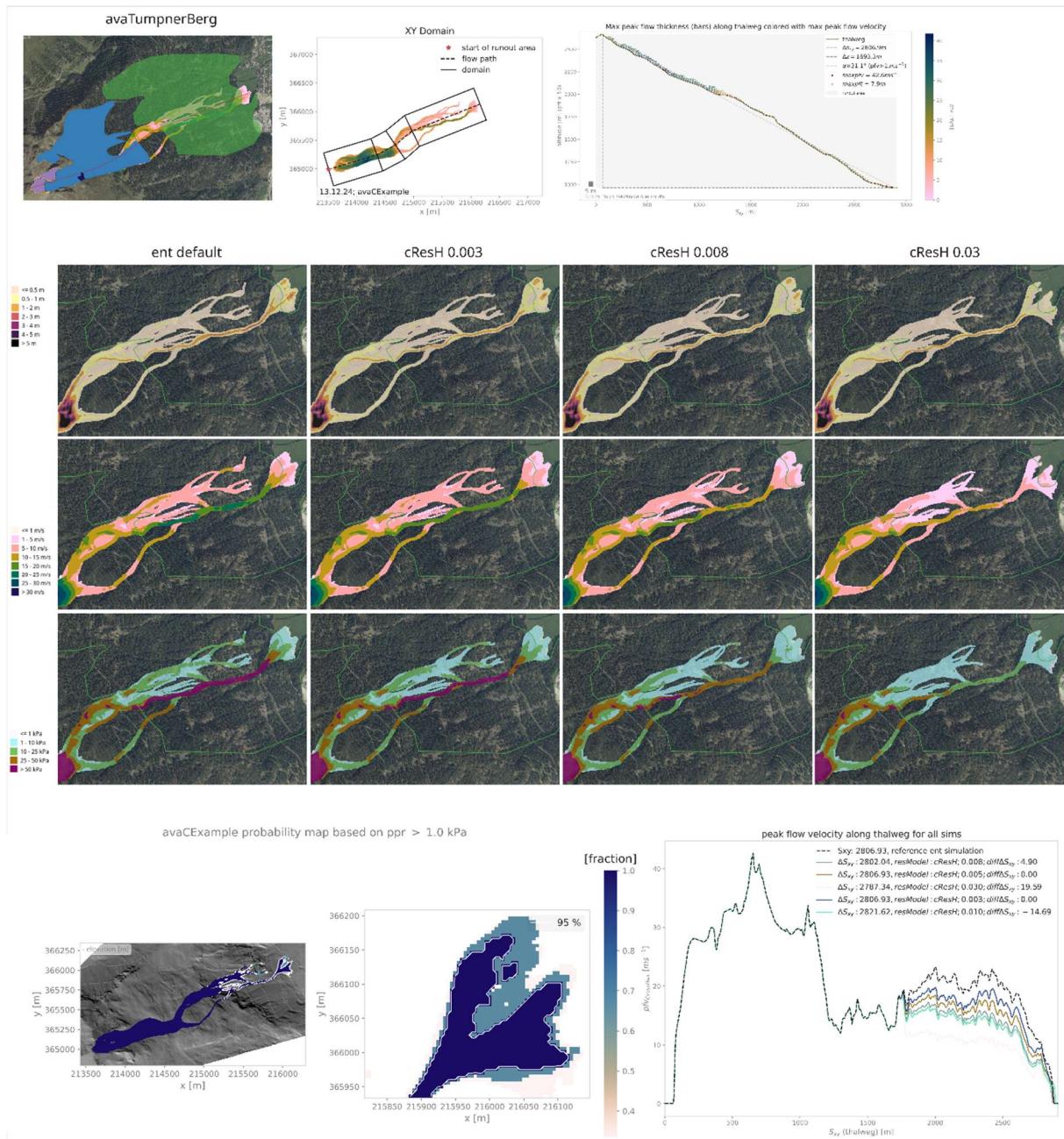


Abbildung 14: Übersicht über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Waldeinfluss für das Widerstandsmodell F_{resH} für den Testfall avaTumpner

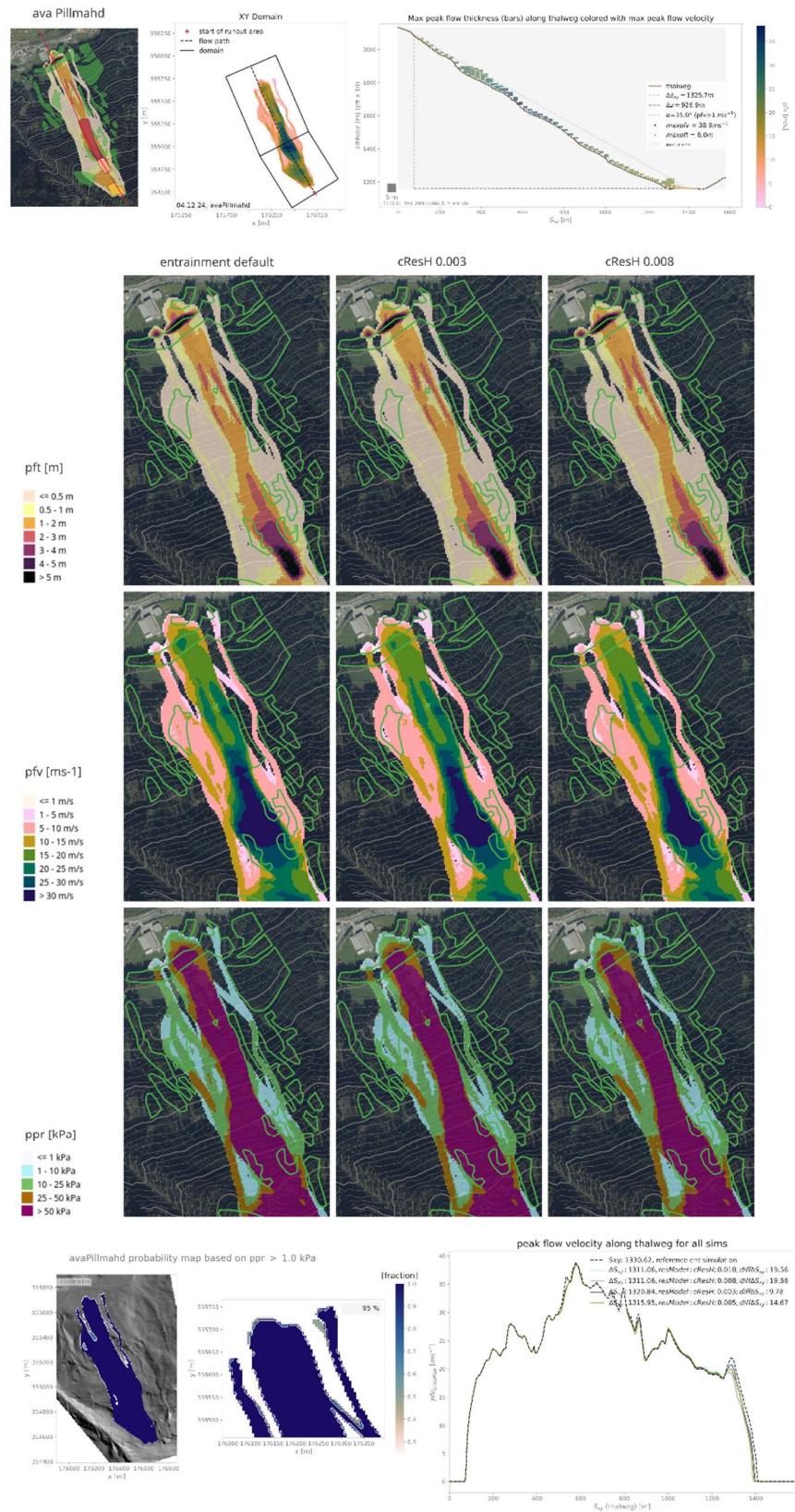


Abbildung 15: Übersicht über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Waldeinfluss für das Widerstandsmodell F_{resH} für den Testfall *avaPillmahd*

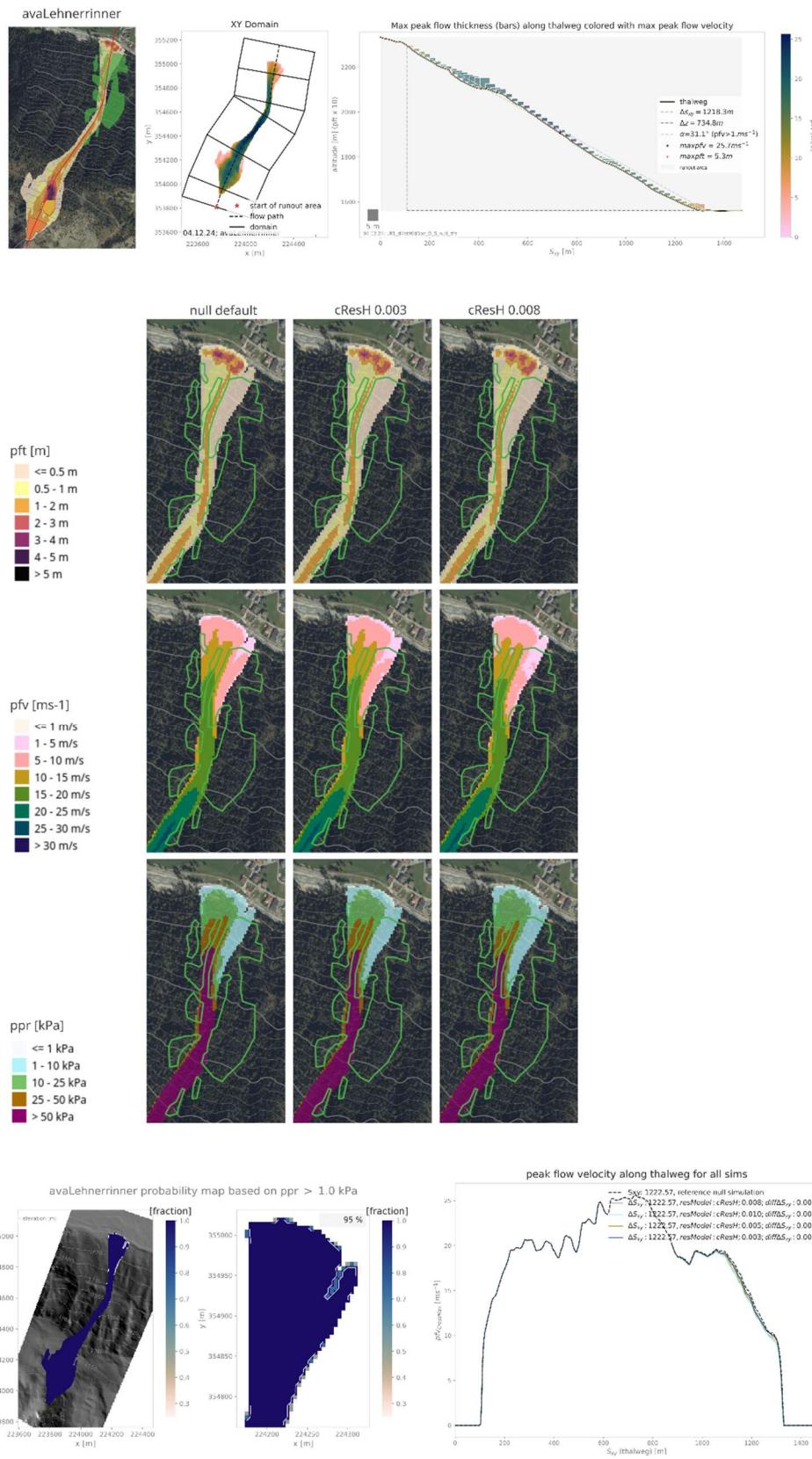


Abbildung 16: Übersicht über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Waldeinfluss für das Widerstandsmodell F_{resH} für den Testfall *avaLehnerrinner*

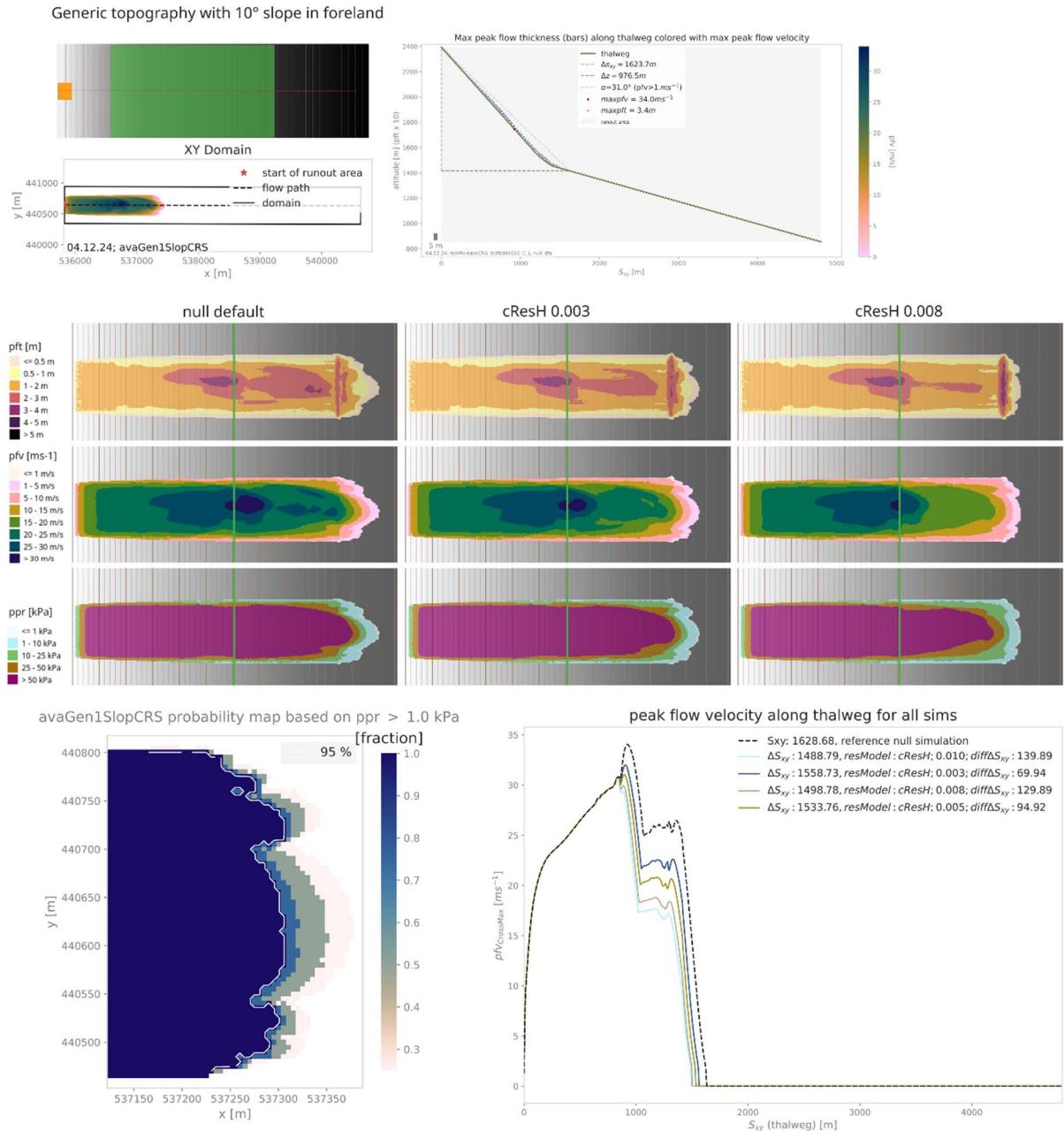


Abbildung 17: Übersicht über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Waldeinfluss für das Widerstandsmodell F_{resH} für den Testfall *avaGen1Slope*

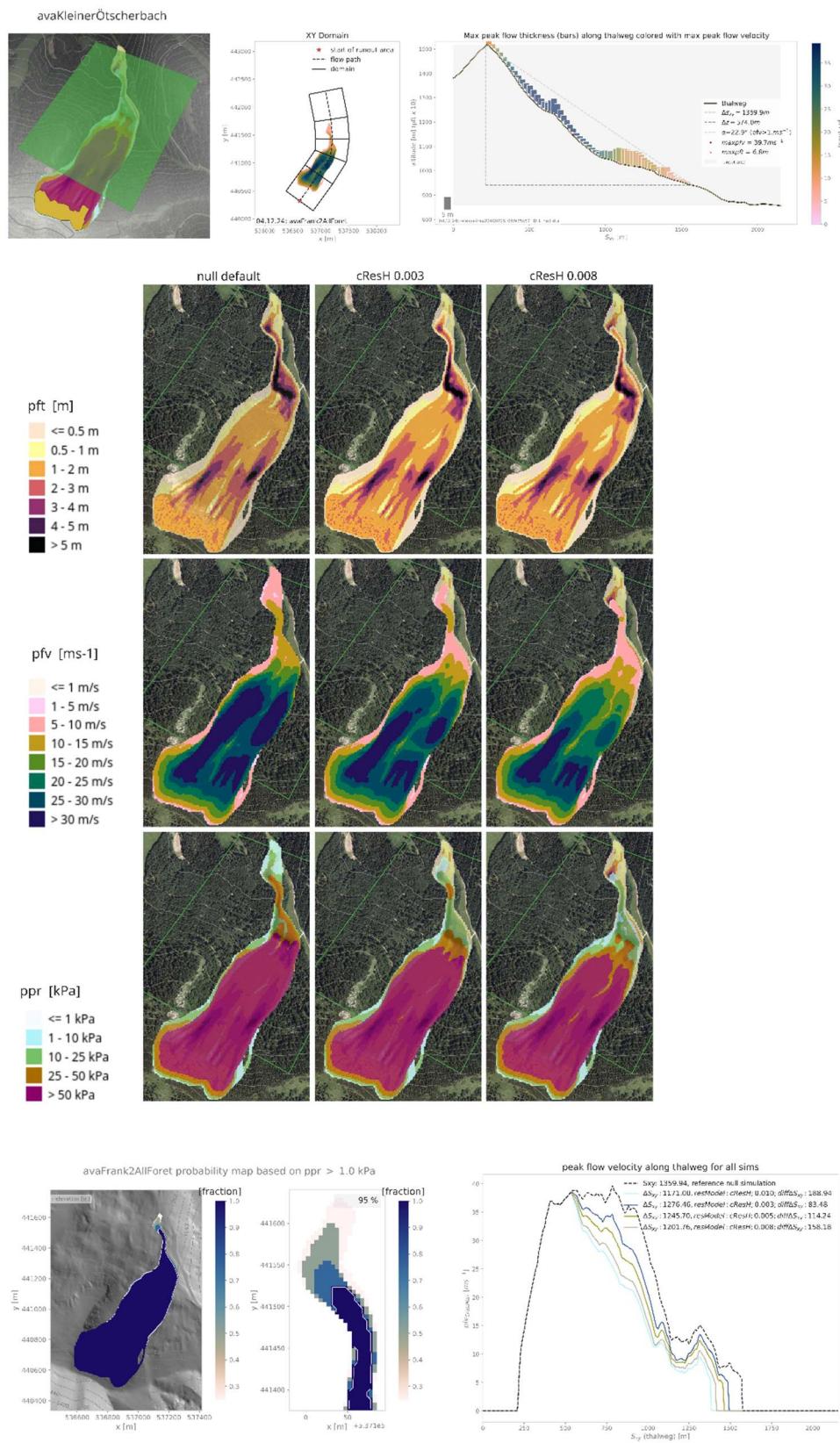


Abbildung 18: Übersicht über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Waldeinfluss für das Widerstandsmodell F_{resH} für den Testfall *avaKleinerOetscherbach* mit großflächigem generischem Waldgebiet

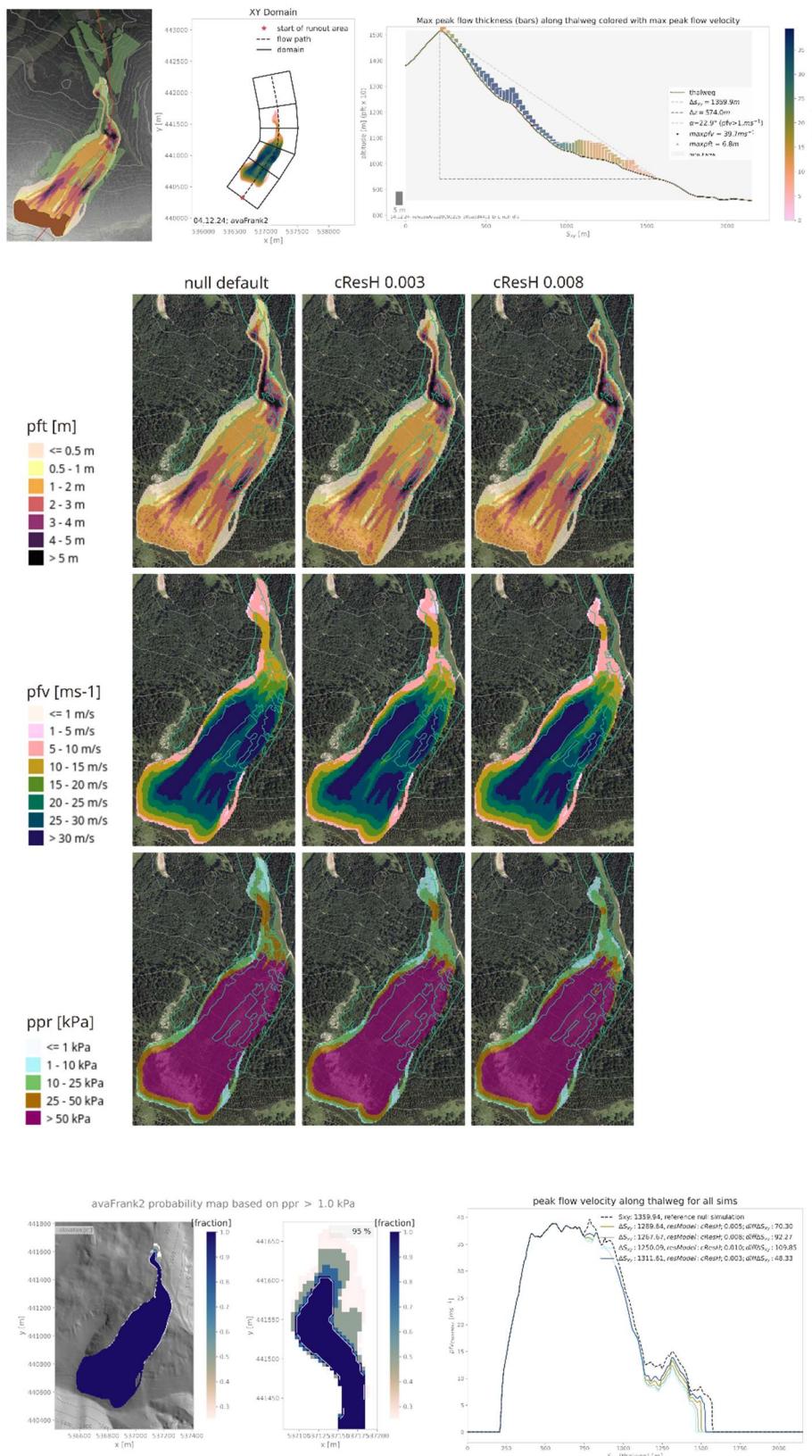


Abbildung 19: Übersicht über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Waldeinfluss für das Widerstandsmodell F_{resH} für den Testfall *avaKleinerOetscherbach* mit realem Waldgebiet

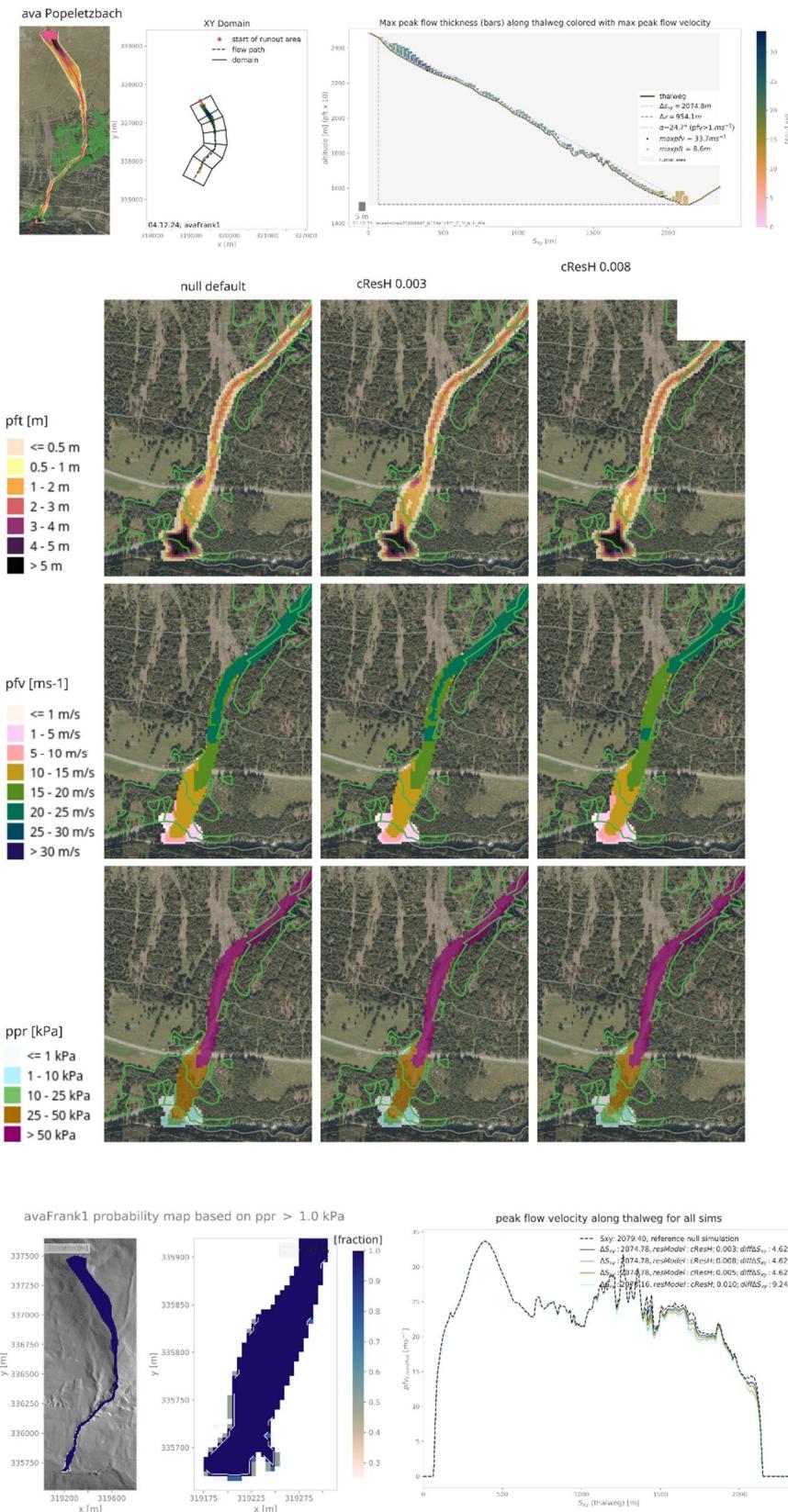


Abbildung 20: Übersicht über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Waldeinfluss für das Widerstandsmodell F_{resH} für den Testfall *avaPopeletzbach*

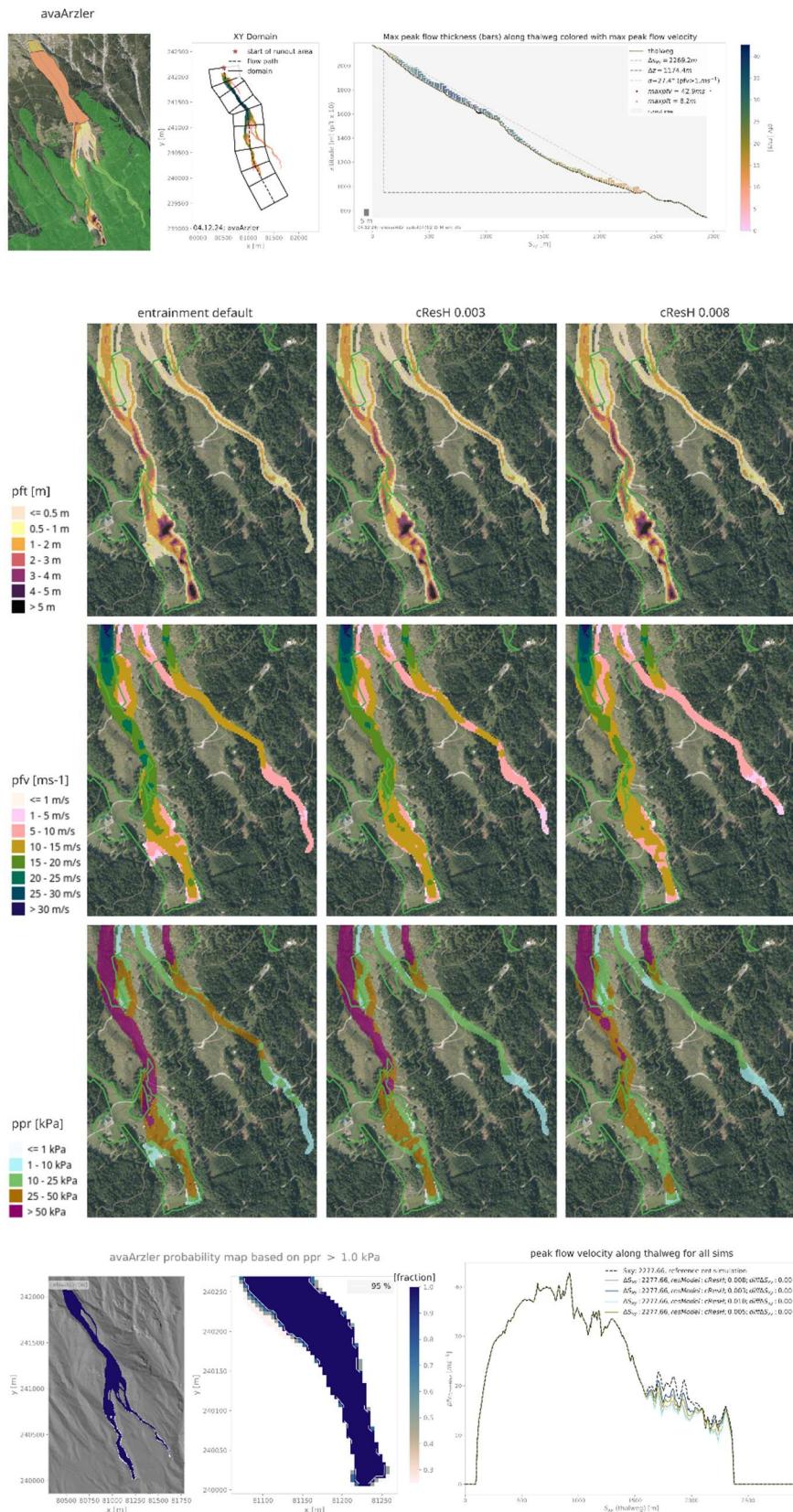


Abbildung 21: Übersicht über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Waldeinfluss für das Widerstandsmodell F_{resH} für den Testfall *avaArzler*

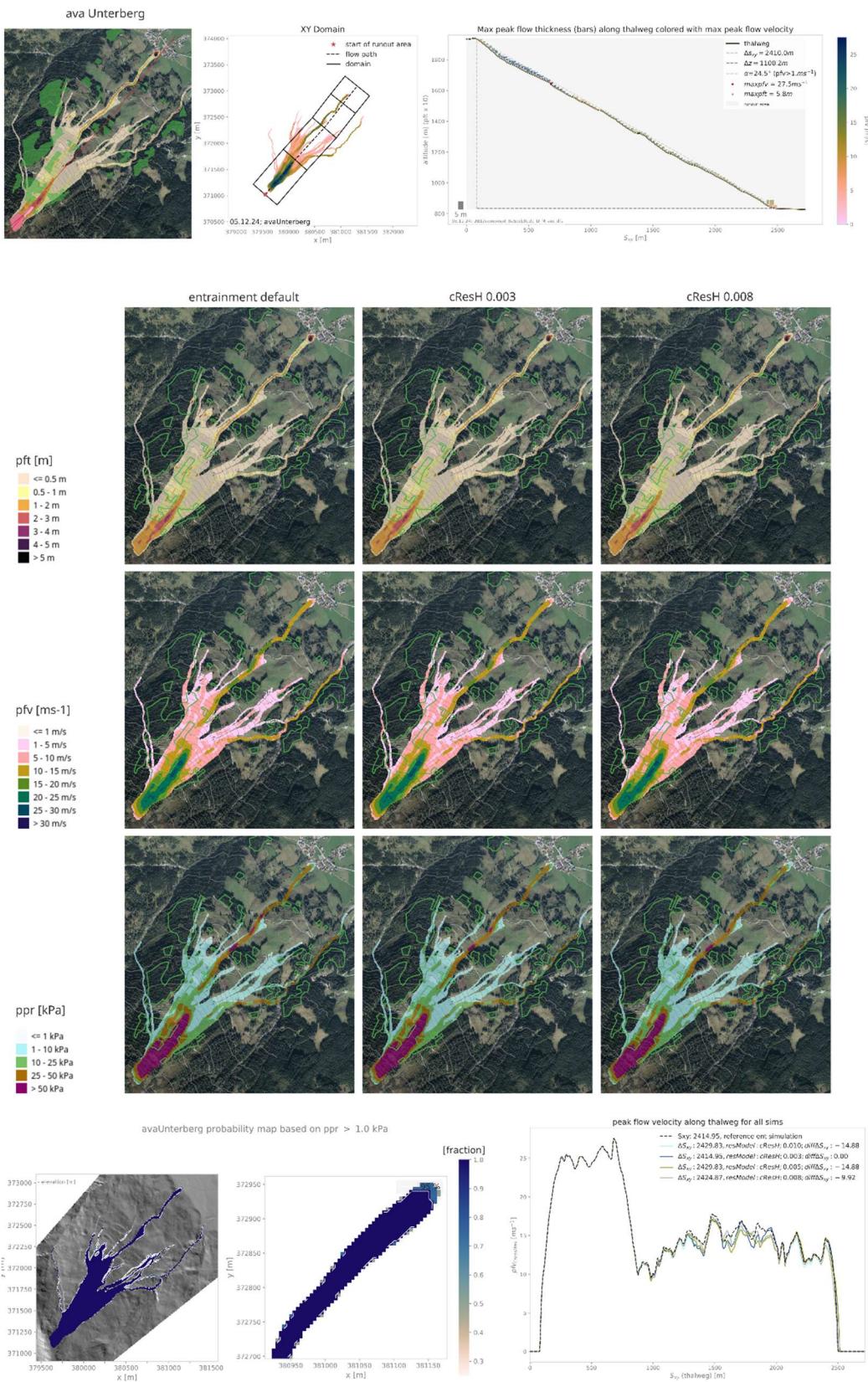


Abbildung 22: Übersicht über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Waldeinfluss für das Widerstandsmodell F_{resH} für den Testfall *avaUnterberg*