

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	PROTECTED
Langtitel:	The effect of natural disturbances on the risk from hydrogeomorphic hazards under climate change.
Zitiervorschlag:	Die Auswirkung kleinflächiger natürlicher Störungen im Schutzwald.
Programm inkl. Jahr:	9. ACRP Ausschreibung 2016
Dauer:	01.05.2017 bis 30.04.2019
KoordinatorIn / ProjekteinreicherIn:	Universität für Bodenkultur Wien
Kontaktperson Name:	Christian Scheidl
Kontaktperson Adresse:	Peter-Jordan-Straße 82 1190-Wien
Kontaktperson Telefon:	+43/1/47654/87116
Kontaktperson E-Mail:	christian.scheidl@boku.ac.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) Inst. für Naturgefahren – Innsbruck (Tirol-AUT)
Schlagwörter:	Naturgefahren, Schutzwald, Störungen, Hydrologie
Projektgesamtkosten:	249.995 €
Fördersumme:	249.995 €
Klimafonds-Nr:	KR16AC0K13167
Erstellt am:	30.09.2019

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Die jüngsten Sturmereignisse in Österreich zeigen einmal mehr, wie Hochwasser, Sedimenttransportprozesse und Murgänge eine große Bedrohung in alpinen Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte und zunehmender räumlicher Entwicklung darstellen. Da Schutzwälder eine wichtige Kontrollfunktion gegen Abfluss und Erosion haben, beeinflussen sie direkt das Risiko solcher hydrogeomorpher Prozesse. Die Erforschung der zukünftigen Klimabedingungen wirft jedoch eine Reihe offener Fragen nach einem nachhaltigen und verbesserten Gefahrenmanagement in Bergwäldern auf. So ist z.B. in europäischen Wäldern eine klimabedingte Zunahme von Störungen wie Waldbrand, Wind und Insektenausbrüchen in den kommenden Jahrzehnten sehr wahrscheinlich. Insbesondere im Schutzwald bleiben Zukunftsszenarien solcher Störungen und deren Auswirkungen auf die Schutzwirkung ein ungelöstes Thema.

Die zukünftige Entwicklung von klimabeeinflussten Störungsregimen in alpinen und bewaldeten Einzugsgebieten und dessen Auswirkungen auf die Entstehung des Spitzenabflusses als auch auf die Disposition von flachgründigen Rutschungen standen daher in PROTECTED im Fokus der Untersuchungen. Durch die Kombination von Methoden aus der Forstwirtschaft, dem Alpinen Einzugsgebietsmanagement und der sozialpsychologischen Forschung verfolgt das Projekt einen ganzheitlichen Ansatz.

Mit dem individualbasierten Waldlandschafts- und Störungsmodell (iLand) wurde ein Ensemble von Waldlandschaftssimulationen durchgeführt und die Auswirkungen zukünftiger Veränderungen der natürlichen Störungsregime in zwei Untersuchungsgebieten (Stubaital und Bucklige Welt) bewertet. Zur Bestimmung der Spitzenabflüsse wurden hydrologische Simulationen einerseits mit dem konzeptionellen hydrologischen Modell ZEMOKOST sowie andererseits mit dem deterministischen Modell GEOTop, durchgeführt. Die Analyse der Auswirkungen von Waldstörungen auf Erosionsprozesse in Hanglagen basierte auf einem modifiziertem Coulomb-Rutschungsmodell. Dieses neu angepasste Hangstabilitätsmodell besitzt eine direkte Schnittstelle zu den Ergebnissen aus dem Waldlandschaftsmodell iLand und schätzt den Sicherheitsfaktor in verschiedenen Bodentiefen bzw. berücksichtigt die Wurzelkohäsion (Bindung), die in jeder Bodenschicht wirken kann, sowie den zusätzlichen Druck durch das Gewicht der Vegetation. Interviews mit Forstakteuren vervollständigen den Arbeitsplan des Projekts. Sie werden durchgeführt, um die Bereitschaft der Forstmanager zu bewerten, sich mit dem Management von Naturgefahren zu befassen -- im Gegensatz zu den Rollen ihres sozialen Netzwerks und den Rollen der Vertreter von Politik und Verwaltung.

Die Simulation der Waldlandschaften in beiden Untersuchungsgebieten wurde jeweils mit einem moderaten (ichec4,5), einem warmen (ichec8,5), einem warm und feuchten (ipsl8,5) und einem warm und trockenen (mohc8,5)

Klimawandelszenario betrieben. Mit Ausnahme des warmen und trockenen Klimaszenarios (mohc8.5) zeigten die klimateinduzierten Landschaftssimulationen, einen Anstieg des Waldbestandes und eine Erhöhung der Hanginstabilitäten bei Berücksichtigung einer stochastisch simulierten zukünftigen Störungsentwicklung. Eine Ausnahme bildet das Klimaszenario mohc8,5, welches eine Zunahme der Lufttemperatur in Kombination mit geringeren Niederschlagsmengen prognostiziert. Hier zeigten Simulationen mit aktiver Forstwirtschaft einen Kompromiss zwischen Ernten und Störungen. Weiters stellte sich eine Verringerung der Bereitschaft von flachgründigen Rutschungen mit Zunahme des Störungsregimes ein. Die Modellierung der Hangstabilität konzentrierte sich dabei auf die beiden Einzugsgebiete mit der höchsten Reliefenergie (Stubaital). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Hangstabilität in bewaldeten steilen Wildbacheinzugsgebieten, unter der Voraussetzung eines zukünftigen warmen und trockenen Klimas, durch das Auftreten von Störungen erhöht wird. Grund dafür dürfte ein schnellerer Wechsel der natürlichen Baumartenabfolge sein - insbesondere, wenn Klimaänderung zu einem Wechsel zu Baumarten mit einer höheren Wurzelkohäsionsfähigkeit führt. Es ist offensichtlich, dass Waldbestände in flachen Regionen kaum einen Einfluss auf die Hangstabilität haben können. Trotzdem können wir diese Aussage für das heißeste und trockenste Klimaprognoseszenario mohc8,5 nicht ausschließen.

Keine signifikante Auswirkung von Störungen konnte auf die Entwicklung des Spitzenabflusses festgestellt werden.

2 Executive Summary

Recent storm events in Austria show once more how floods, sediment transport processes and debris flows constitute a major threat in alpine regions with a high density of population and an increasing spatial development. As protection forests have a major control function on runoff and erosion, they directly affect the risk from such hydrogeomorphic processes. However, research on future climate conditions raises several open questions for a sustainable and improved hazard management in mountain forests. For Europe, for instance, a climate-induced increase in forest disturbances like wildfire, wind, and insect's outbreaks is highly likely for the coming decades. Especially in protection forests, future scenarios of such climate induced natural disturbances and their impact on the protective effect remain an unresolved issue.

The future development of climate-influenced disturbance regimes in alpine and forested catchment areas and its effects on the generation of peak runoff as well as on the disposition of shallow landslides were therefore the focus of the investigations in PROTECTED. By combining methods from forestry, Alpine catchment management and social psychological research, the project pursues a holistic approach.

With the individual-based forest landscape and disturbance model (iLand) an ensemble of forest landscape simulations was carried out and the effects of future

changes in natural disturbance regimes in two study areas (Stubaital and Bucklige Welt) were evaluated. To determine the peak runoff, hydrological simulations were carried out using the conceptual hydrological model ZEMOKOST on the one hand and the deterministic model GEOtop on the other hand. The analysis of the effects of forest disturbances on erosion processes on hillslopes was based on a modified Coulomb landslide model. This newly adapted slope stability model has a direct interface to the results from the forest landscape model iLand and estimates the safety factor at different soil depths, takes into account the root cohesion (binding) that can act in any soil layer and accounts for the additional pressure due to the weight of vegetation. Interviews with forest stakeholders complete the work plan of the project. They are conducted to assess the willingness of forest managers to deal with natural hazard management -- as opposed to the roles of their social network and the roles of political and administrative representatives.

The simulation of the forest landscapes in both study areas was carried out with a moderate (ichec4.5), a warm (ichec8.5), a warm and humid (ipsl8.5) and a warm and dry (mohc8.5) climate change scenario. Except for climate scenario mohc8.5 an increase in forest cover and an increase in slope instabilities were shown, considering a stochastically simulated future disturbance development. Climate scenario mohc8.5 predicts an increase in air temperature in combination with lower precipitation. Here, simulations with active forestry showed a compromise between harvests and disturbances. Furthermore, a decrease in the disposition of shallow landslides with an increase in the disturbance regime was observed. The modelling of slope stability concentrated on the two catchment areas with the highest relief energy (Stubaital). These results indicate that slope stability in steep forested torrent catchments is increased by the occurrence of disturbances, assuming a future warm and dry climate. The reason for this is probably a faster change in the natural tree species sequence - especially if climate change leads to a change to tree species with a higher root cohesion capacity. It is obvious that forest stands in flat regions can hardly have an influence on slope stability. Nevertheless, we cannot exclude this statement for the hottest and driest climate prediction scenario mohc8.5. However, no significant effect of disturbances could be detected on the development of peak runoff.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Naturgefahren stellen seit jeher eine große Bedrohung für Alpine Siedlungen und Infrastrukturen mit oft schwerwiegenden Folgen dar. So führten unlängst Geschiebetransportprozessen bzw. Murenabgänge zu hohen wirtschaftlichen Schäden in Wohngebieten sowie tagelangen Sperren von Bahnverbindungen und Straßen aufgrund von (Tiroler Tageszeitung 30. Oktober 2018). Solche Wildbachprozesse sind neben einem raschen und heftigen Anstieg des Abflussverhaltens in der Lage eine beträchtliche Menge an Sedimenten zu verlagern. Für solche hydrogeomorphologischen Prozesse sind daher Wiederkehrwahrscheinlichkeit sowie Ausmaß im Wesentlichen eine Funktion von Abfluss und Erosion – und somit direkt mit Schutzwirkung der Vegetation

gekoppelt - insbesondere in bewaldeten Landschaften. Dabei resultiert der positive Effekt von Wäldern auf das Abflussregime aus ihrer Interzeptions- und Evapotranspirationsleistung sowie aus einem besseren Infiltrationsvermögen von Wasser in Waldböden. Neben ihrer hydrologischen Wirkung haben Bäume auch eine effiziente Schutzfunktion gegen Erosionen (Rutschungen) ^{1,2}. Generell muss betont werden, dass Schutzwälder ein wesentlicher Faktor sind, um das Risiko von Naturgefahren über lange Zeiträume auf großen potenziellen Einzugsgebieten zu reduzieren. Dies gilt auch für Wälder mit derzeit nur indirekten Schutzwirkungen - wo ihre allgemeine Rolle darin besteht, die Bodenerosion zu reduzieren oder den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet und die Luftqualität zu verbessern ("Standortschutzwald" nach dem Österreichischen Forstgesetz 1975). Direkte Schutzwirkungen des Waldes schützen Menschen oder Infrastrukturen wie Gebäude oder Versorgungskorridore ("Objektschutzwald" nach dem Österreichischen Forstgesetz 1975).

Heutzutage werden etwa 30% der Waldfläche in Österreich eine Schutzfunktion zur Vermeidung von schwerwiegenden Naturgefahren zugesprochen ³. Bestandsdaten zeigen jedoch, dass nur die Hälfte solcher klassifizierten Schutzwälder eine mehr oder weniger stabile Struktur aufweisen. Der Grund dafür liegt in einer signifikanten Überalterung und einem Mangel an Baumartenvielfalt, der zu übermäßigem Wilddruck, aber auch zu natürlichen Störungen führen kann.

Die Erforschung der zukünftigen Klimabedingungen mit einem erwarteten Anstieg der globalen durchschnittlichen Oberflächentemperatur von 3-5°C bis 2100 im Vergleich zum ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts wirft dabei mehrere offene Fragen für ein nachhaltiges und verbessertes Gefahrenmanagement in Bergwäldern auf. Für Europa zum Beispiel ist eine klimabedingte Zunahme von Waldstörungen wie Waldbrand, Wind und Insektenausbrüchen in den kommenden Jahrzehnten sehr wahrscheinlich. Insbesondere im Schutzwald bleiben Zukunftsszenarien solcher klimabedingter Naturstörungen und deren Auswirkungen auf die Schutzwirkung ein ungelöstes Thema. Der Klimawandel kann die Häufigkeit, Intensität, Dauer und den Zeitpunkt solcher natürlichen Störfaktoren verändern ⁴. Obwohl erhebliche Anstrengungen unternommen wurden, um Naturgefahren in Bergwäldern durch waldbauliche Eingriffe zu verhindern ⁵, sind die Auswirkungen klimabedingter Naturstörungen auf die Schutzfunktion solcher Wälder jedoch weder berücksichtigt noch gut verstanden.

Die Ziele von PROTECTED sind: (i) Simulation der Häufigkeit, des Ausmaßes und der Intensität von natürlichen Störungen unter dem Einfluss des Klimawandels für Wälder ausgewählter Wildbacheinzugsgebiete; (ii) Analyse der Folgen von natürlichen Störungen auf den Abfluss und die Hangstabilität (mobilisiertes Volumen) für verschiedene Waldentwicklungsszenarien innerhalb der ausgewählten Einzugsgebiete; (iii) Erstellung von Bewertungen der Risikowahrnehmung und potenzieller Hindernisse für die Umsetzung alternativer Bewirtschaftungsstrategien, die dem Schutz vor Naturgefahren dienen können.

Hauptaufgaben von PROTECTED sind daher:

- Analyse der Folgen von natürlichen Störungen unter dem Einfluss des Klimawandels auf die
 - o Abflussentstehung und
 - o Sedimentmobilisierung,
 für verschiedene Waldentwicklungsszenarien.
- Durchführung von Bewertungen der Risikowahrnehmung über den Einfluss von natürlichen Störungen auf hydrogeologische Prozesse und Aufklärung potenzieller Barrieren bei der Umsetzung von Managementstrategien.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

PROTECTED kombiniert Methoden aus der Forstwirtschaft, dem Alpinen Einzugsgebietsmanagement und der sozialpsychologischen Forschung, und verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz, um mögliche Auswirkungen von Naturstörungen auf hydrogeomorphe Gefahren im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen im Schutzwald zu bewerten.

Die Untersuchungsgebiete von PROTECTED liegen in zwei verschiedenen Waldökoregionen im Westen und Osten Österreichs (Abbildung 1).

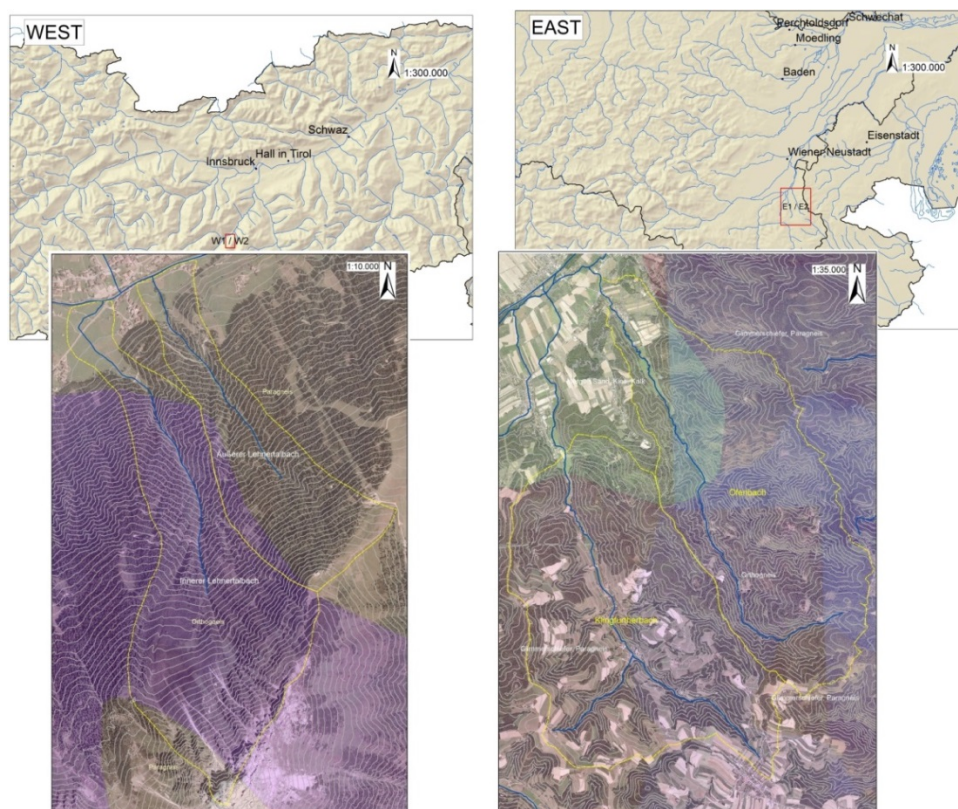


Abbildung 1: Untersuchungsgebiete von PROTECTED. Links Stubaital (West-Österreich); Rechts: „Bucklige Welt“ (Ost-Österreich).

Das westliche Untersuchungsgebiet liegt im Stubaital in Tirol. Hier sind W1) der "Innere Lehnertalbach" und W2) der "Äußere Lehnertalbach" zwei typische Wildbacheinzugsgebiete mit hoher Reliefenergie (Melton-Verhältnis für W1 = 1,3; Melton-Verhältnis für W2 = 1,2). Beide Einzugsgebiete liegen in der Ökoregion 1.2 (Subkontinentale Innenalpen-West) und werden von metamorphen Lithologien

(hauptsächlich Gneis) dominiert. Sie sind ein typisches Beispiel für die Bergwaldökosysteme der Zentralalpen, dominiert von Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), europäischer Lärche (*Larix decidua* L.) und Zirbelkiefer (*Pinus cembra* L.).

Das östliche Untersuchungsgebiet befindet sich in der "Buckligen Welt", Niederösterreich mit den beiden Testgebieten E1) dem "Klingfurtherbach" und E2) dem "Ofenbach". Beide östlichen Einzugsgebiete werden ebenfalls vom Gneis dominiert, weisen aber deutlich geringere Reliefenergien auf (Melton-Verhältnisse für E1 und E2 $\sim 0,1$). Sowohl E1 als auch E2 liegen in der Ökoregion 5.2 (Bucklige Welt). Die natürliche Vegetationszusammensetzung besteht aus Mischwäldern von Fichte, Weißtanne (*Abies alba* L.) und Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.), von denen die Fichte durch die bisherige Bewirtschaftungspraxis bevorzugt wurde. Die Waldfläche ist in E1 deutlich geringer.

4.1 Waldlandschaftssimulationen und Klimaszenarien (WP1)

Grundlage für alle Abfluss- und Simulationen der Hangstabilität ist das Ergebnis des Waldlandschafts- und Störungsmodells (iLand). iLand liefert die zukünftig zu erwarteten Waldstrukturen und dessen Verteilung in den ausgewählten Einzugsgebieten, die sich aus dem Spektrum der Störungswahrscheinlichkeiten ergeben. Die zu erwartenden Störungen hängen dabei von den gewählten Klimaszenarien (siehe Kapitel 6.1) und unter Berücksichtigung oder Nicht-Berücksichtigung einer Waldbewirtschaftung ab (siehe Tabelle 1). Um die Stochastik in den Störmodulen zu berücksichtigen, haben wir jede Konfiguration 20 Mal repliziert.

Tabelle 1: Merkmale der beiden Untersuchungsgebiete und des Simulationsaufbaus.

	Stubaital	Bucklige Welt
Management; Ja/Nein	Ja: Die gesamte Landschaft wird bewirtschaftet, einschließlich Aufarbeitung gemäß der Empfehlung der Walddtypisierung Tirol. (Amt der Tiroler Landesregierung, 2013). Das Management basiert auf einem Seilbahn-System. Nein: Keine aktive Waldbewirtschaftung, keine Aufarbeitung.	Ja: Die gesamte Landschaft wird nach einem „Business as usual“ Management verwaltet, dass auf der Forstwirtschaft der Altersklasse und dem Kleinbesitz basiert. Aufarbeitung inklusive. Nein: Keine aktive Waldbewirtschaftung, keine Aufarbeitung.
Störungen: Ja/Nein	Ja: Störungsmodule für Wind- und Borkenkäfer aktiv. Informationen zu Windereignissen aus den Klimaszenarien.	Ja: Störungsmodule für Wind- und Borkenkäfer aktiv. Informationen zu Windereignissen aus den Klimaszenarien.

	Nein: Keine Störungen simuliert	Nein: Keine Störungen simuliert
Climate	Fünf Szenarien (Tabelle 2)	Fünf Szenarien (Tabelle 2)
Fläche (bewaldet)	4.811 ha	6.700 ha
Hauptbaumart	Fichte, Zirbe, Lärche	Fichte, Buche, Tanne
Höhenstufe [ü.Ad.]	900 – 2000m	270 – 735m

Jede Simulation lief bis zum Jahr 2200 und der detaillierte Waldzustand wurde zu vier bestimmten Zeitpunkten gespeichert (Jahre 50, 100, 150 und 200 der Simulation, siehe Tabelle 5). Die Ausgabedaten umfassten hochauflösende Daten für GEOTop (Einzelbäume, 10m Karten der Blattfläche, Kronendecke und Zeit seit der letzten Störung) und mittelaufösende Daten für ZEMOKOST (100m Karten mit Bestandseigenschaften (Alter, Basalfläche, Artenanteile der Hauptarten pro Region, Kronen- und Bodendecker) und wasserbezogene Ergebnisse (durchschnittlicher Bodenwassergehalt).

Für das Stubaital zeigten die Simulationen für die meisten Klimawandelszenarien gemischte Auswirkungen auf den wachsenden Bestand im Vergleich zu den Referenzsimulationen mit historischem Klima, aber einen starken Rückgang für das mohc8,5 Szenario mit reduziertem Niederschlag (Abbildung 2). Die Störungen nahmen mit zunehmender Temperatur zu, und Simulationen mit aktiver Forstwirtschaft zeigten einen Kompromiss zwischen Ernte und Störungen (Abbildung 3).

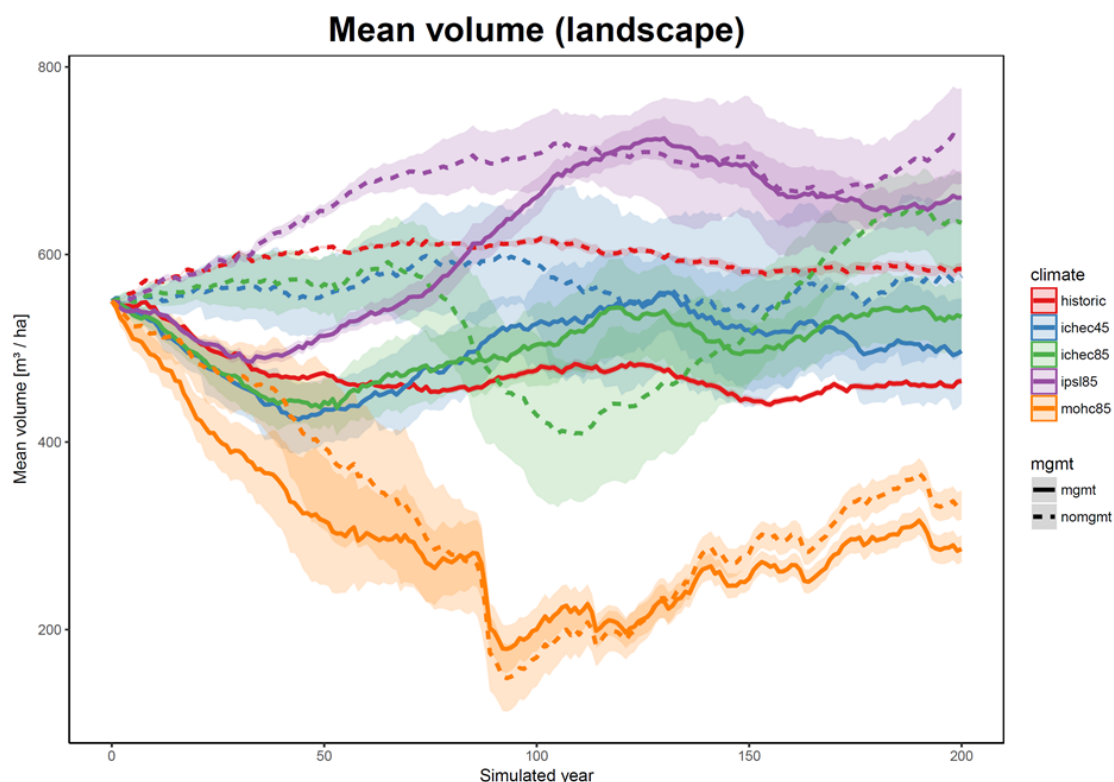


Abbildung 2: Mittleres Volumen über die Zeit für fünf Klimaszenarien sowie für gemanagte und nicht gemanagte Simulationen im Stubaital.

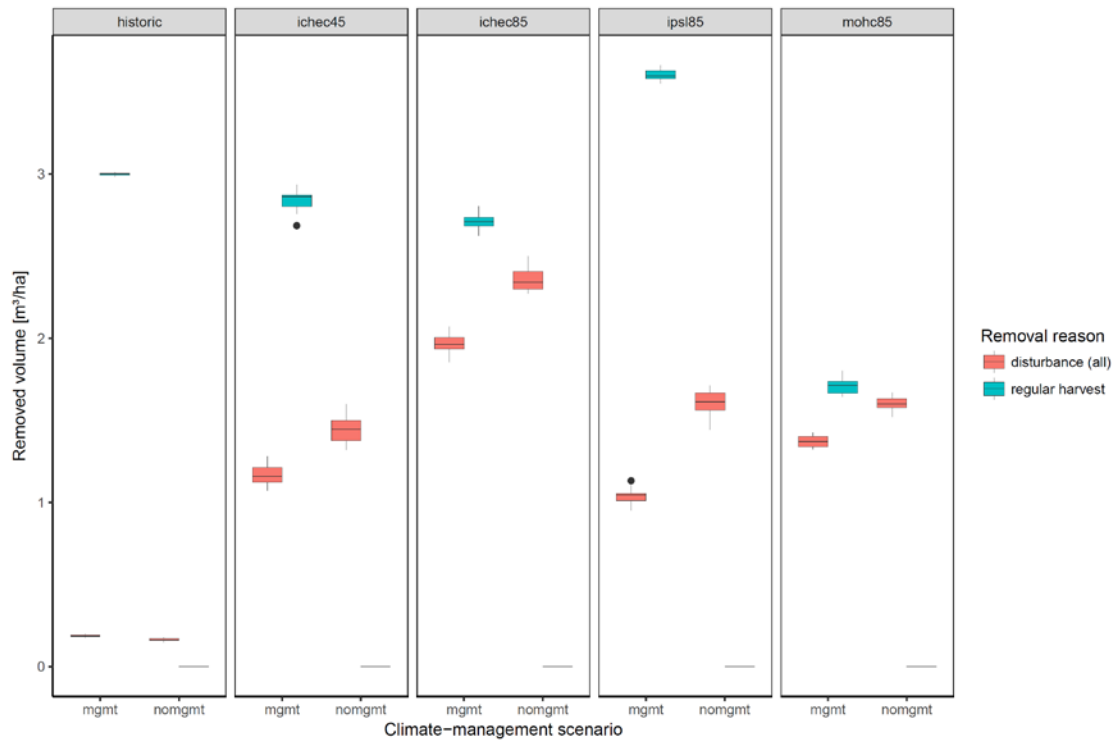


Abbildung 3: Störungen und Ernten für das Stubaital. Gezeigt wird das entnommene Volumen für verwaltete (mgmt.) und nicht verwaltete (nomgmt.) Simulationen für die fünf Klimaszenarien.

Die Simulationen im Untersuchungsgebiet mit niedriger Reliefenergie "Bucklige Welt" zeigten meist eine positive Reaktion auf den Klimawandel in Bezug auf das Volumen. Allerdings zeigte das warme und trockene Szenario mohc8,5, ähnlich dem Stubaital, eine starke negative Reaktion (Abbildung 4). Das Ausmaß der Störungen war unter historischen Klimabedingungen bereits recht hoch, stieg aber mit höheren Temperaturen weiter an (Abbildung 5).

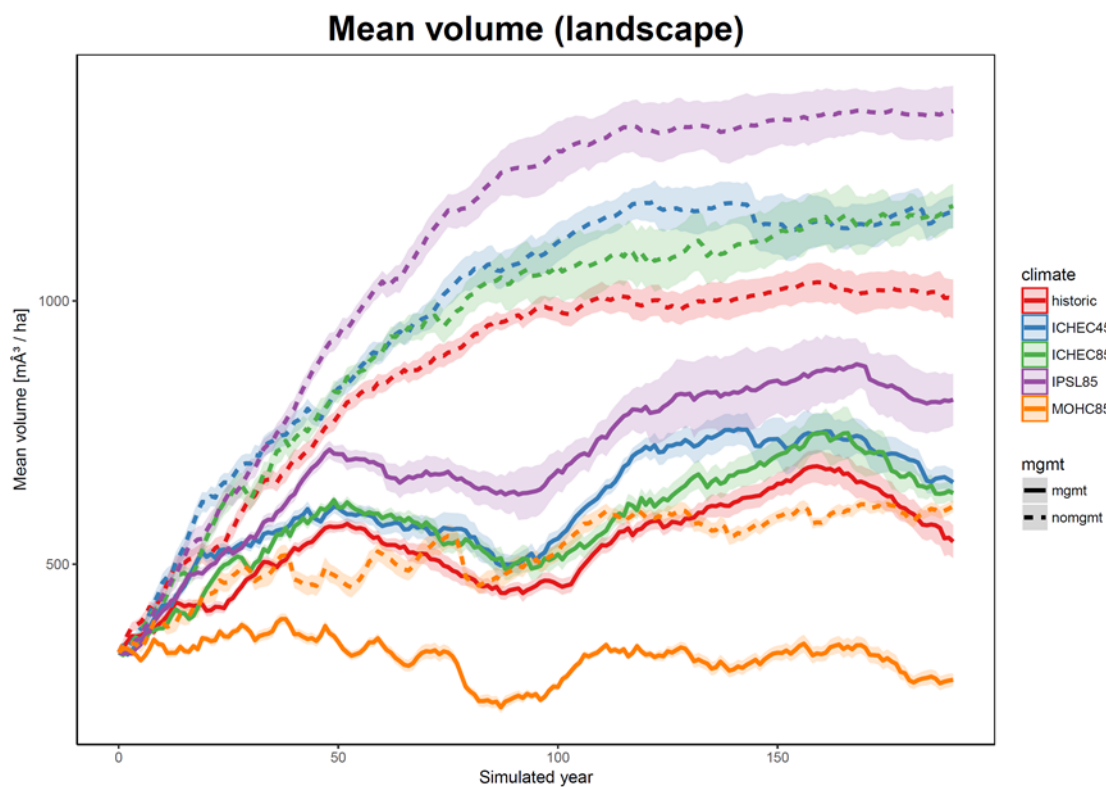


Abbildung 4: Mittleres Volumen über die Zeit für fünf Klimaszenarien sowie für gemanagte und nicht gemanagte Simulationen in der „Buckligen Welt“.

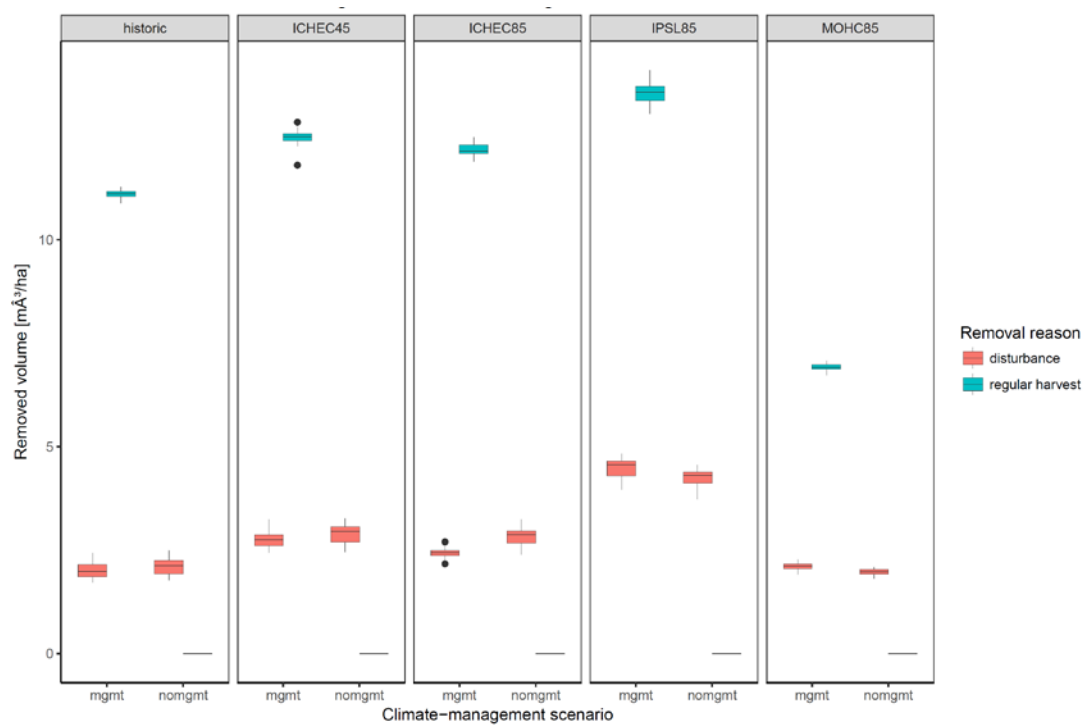


Abbildung 5: Störungen und Ernten in der „Buckligen Welt“. Gezeigt wird das entnommene Volumen für verwaltete (mgmt.) und nicht verwaltete (nomgmt.) Simulationen für die fünf Klimaszenarien.

4.2 Hydrologische Modellierung (WP 2)

Für eine Gefahrenanalyse von Wildbachprozessen ist die Rückrechnung oder Abschätzung der Abflussmenge über die Zeit aus einem Niederschlagsabflussereignis ($Q(t)$) unerlässlich. Zwei gängige Parameter definieren die Größe eines solchen Abflusses: i) Verzögerungszeit und ii) Spitzenabfluss. Der Letztere wird entweder über sein Maximum (HHQ), über einen bestimmten Maximalwert (HQ) oder über ein bestimmtes Wiederholungsintervall (HQT) definiert.

Hydrologische Modelle können als verteilte oder verteilte Modelle mit dazwischen liegenden Spezifikationen klassifiziert werden. Im Gegensatz zu sogenannte „lumped“ Modelle welche das gesamte Einzugsgebiet als homogen betrachten, versuchen andere Modelle, Abflüsse aus einzelnen Bereichen oder Teileinzugsgebieten zu berechnen, die in sich homogen behandelt werden. Vollverteilte Modelle diskretisieren das gesamte Einzugsgebiet in elementare Kontinua, wobei die Abflüsse von einem Kontinuum zum anderen transferiert werden.

Für jede Kombination der Simulationsmatrix (Tabelle 4) wurden Abfluss-Ganglinien erstellt. Für die weitere Betrachtung wurden nur Ergebnisse mit einem Wiederholungsintervall von 100 Jahren verwendet. Die folgende Vorgehensweise wurde für Management- und Nicht-Management-Szenarien durchgeführt.

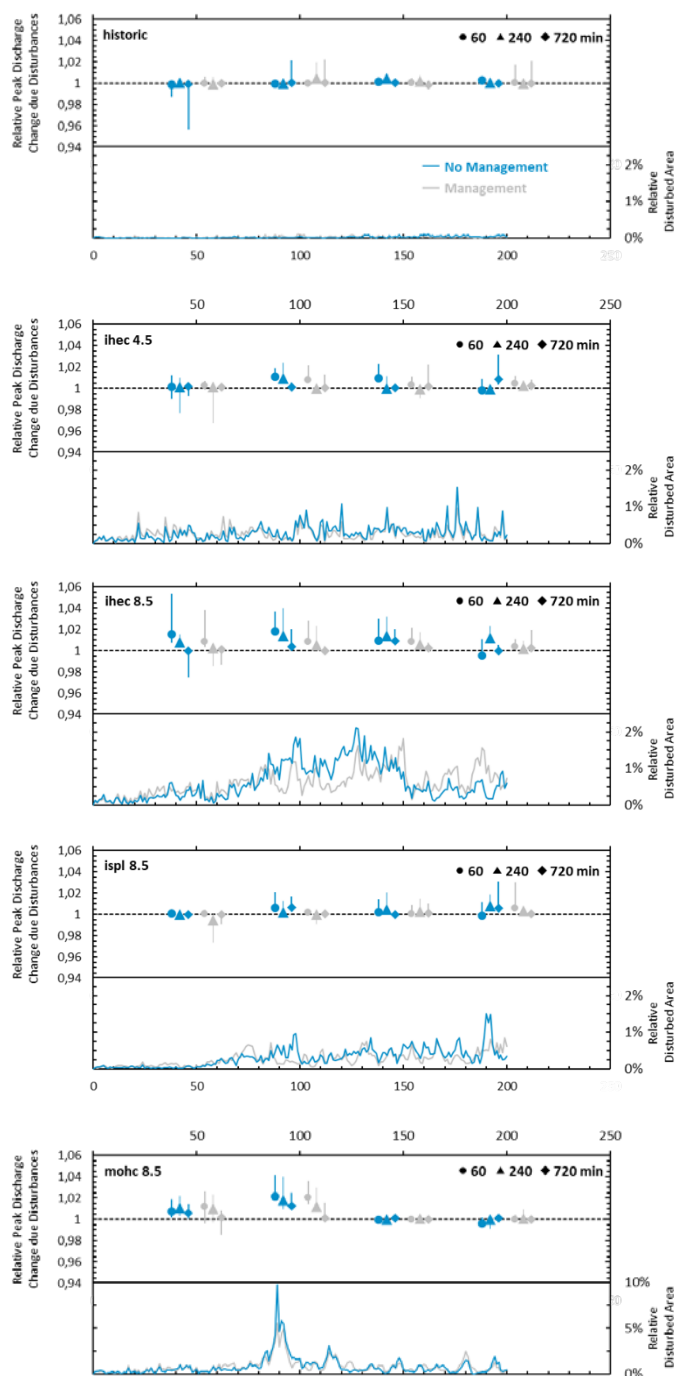
Die Variabilität der Spitzenabflüsse, die sich aus dem Vorhandensein natürlicher Störungen innerhalb des Waldgebietes ergibt, lässt sich aus der relativen Spitzenabflussänderung $\Delta Q_j(t, d)$ für jedes Klimaszenario j , mit spezifischer Niederschlagsdauer d und zum Zeitpunkt t bestimmen. Unter Berücksichtigung von Störeffekten pro angewandtes Klimaszenario wird $\Delta Q_{j,i}(t, d)$ basierend auf dem Verhältnis zwischen dem Spitzenabfluss des i -ten Replikaten des Klimaszenarios j unter Berücksichtigung von Störeffekten $Q_{j,i}^1(t, d)$, mit dem Spitzenabfluss des Klimaszenarios j ohne Berücksichtigung von Störeffekten $Q_j^0(t, d)$, für jede Niederschlagsdauer und zu jedem Zeitpunkt geschätzt.

$$\Delta Q_{j,i}(t, d) = \frac{Q_{j,i}^1(t, d)}{Q_j^0(t, d)} \quad (1)$$

Aus den 20 relativen Beobachtungen der Spitzenabflussänderung pro Klimaszenario, Niederschlagsdauer und Zeitpunkten wird der Median $\Delta \tilde{Q}_j(t, d)$ abgeleitet, und das 95 % Konfidenzintervall, basierend auf 2.500 Bootstrap-Stichproben, geschätzt. Um der epistemischen Unsicherheit Rechnung zu tragen, basieren die Werte von $\Delta Q_{j,i}(t, d)$ auf den gepoolten Modellergebnissen (ZEMOKOST und GEOTop).

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen die relative Spitzenabflussänderung für 50, 100, 150 und 200 Jahre nach Simulationsbeginn - getrennt nach Untersuchungsgebieten, Klimaszenarien, und Management.

Äußerer Lehnertalbach



Innerer-Lehnertalbach

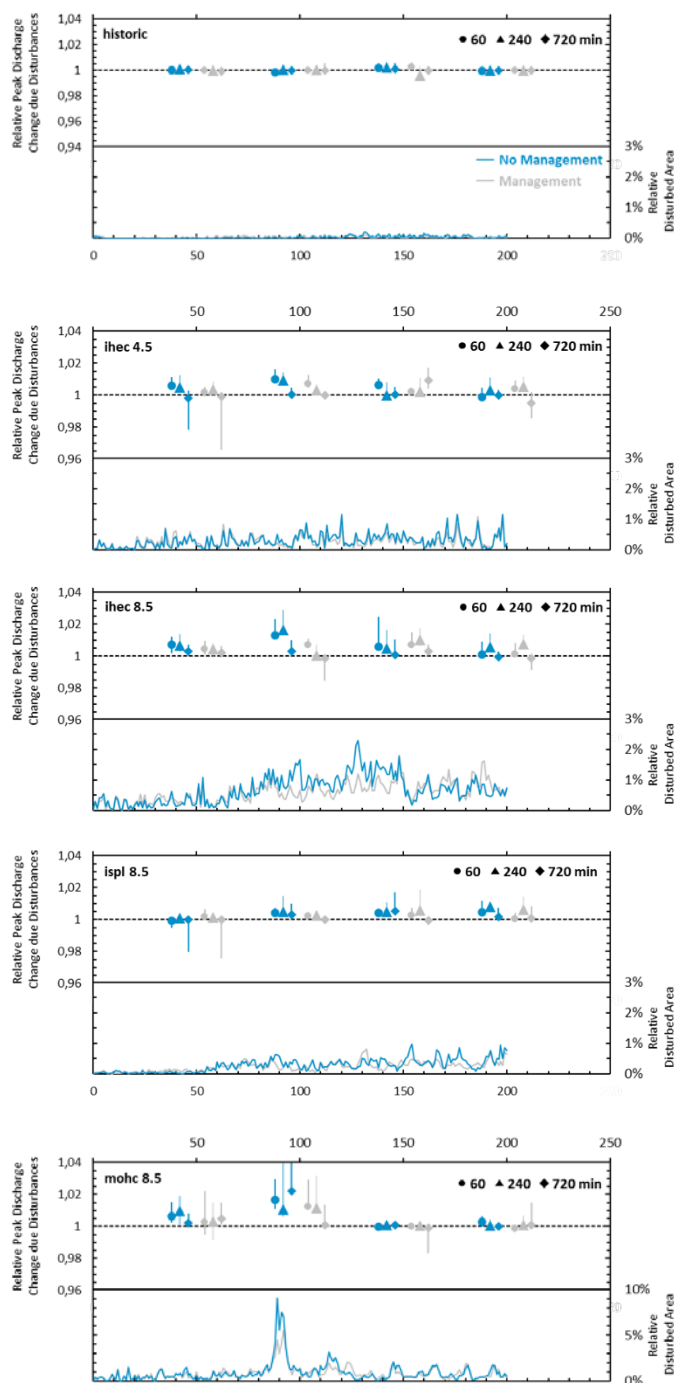
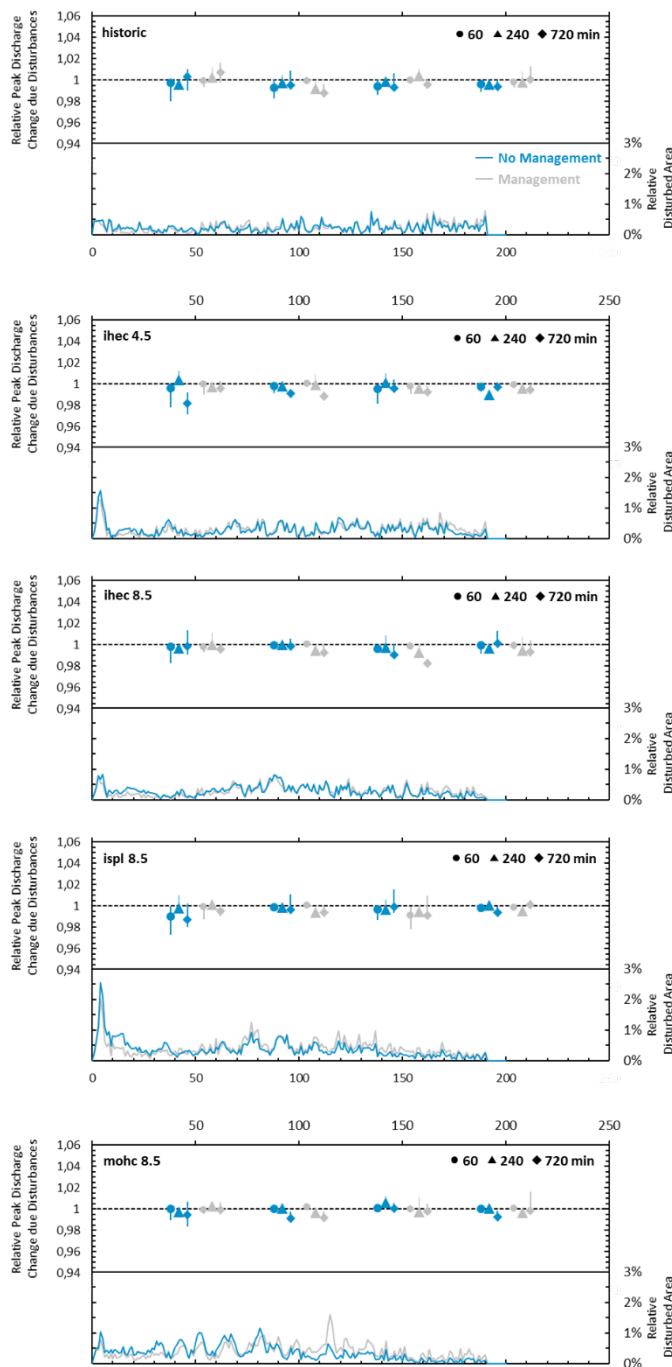


Abbildung 6: Der obere Teil jeder Abbildung zeigt die Veränderung des Spitzenabflusses im Vergleich zum Spitzenabfluss ohne Störungen – für Management und Kein-Management sowie 50, 100, 150 und 200 Jahre nach Beginn der Simulation. Das Symbol beschreibt den Wert des Medians, während das untere und obere Ende des Balkens das 25. und 75. Perzentil darstellt, das aus 20 Wiederholungen geschätzt wird. Der untere Bereich der Abbildung zeigt die gestörte Fläche im Verhältnis zur Gesamtfläche des Waldes pro Jahr.

Klingfurterbach



Ofenbach

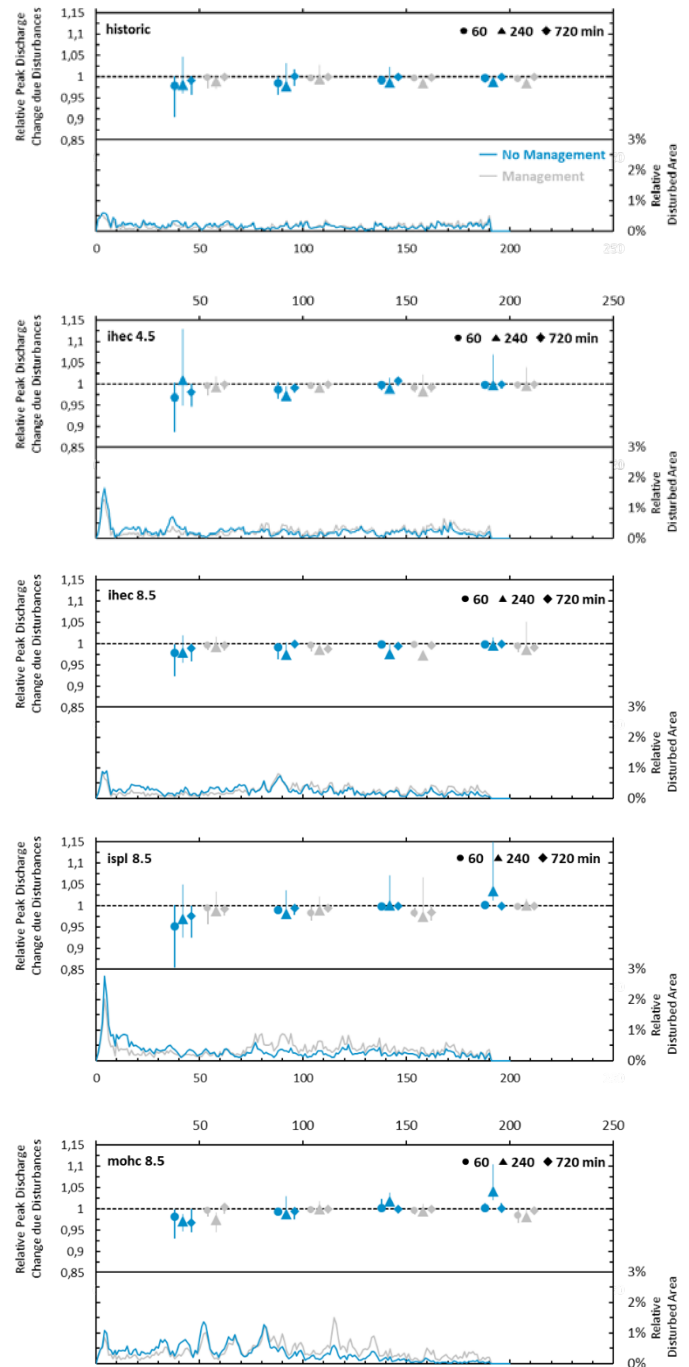


Abbildung 7: Der obere Teil jeder Abbildung zeigt die Veränderung des Spitzenabflusses im Vergleich zum Spitzenabfluss ohne Störungen – für Management und Kein-Management sowie 50, 100, 150 und 200 Jahre nach Beginn der Simulation. Das Symbol beschreibt den Wert des Medians, während das untere und obere Ende des Balkens das 25. und 75. Perzentil darstellt, das aus 20 Wiederholungen geschätzt wird. Der untere Bereich der Abbildung zeigt die gestörte Fläche im Verhältnis zur Gesamtfläche des Waldes pro Jahr.

Unsere Ergebnisse zeigen keinen signifikanten Einfluss von natürlichen Störungen auf das Abflussverhalten in Wildbach-Einzugsgebieten. Positive Trends, die eine Zunahme der Abflüsse durch eine Zunahme der gestörten Waldfläche beschreiben, können jedoch optisch nicht vollständig ausgeschlossen werden - wobei sich die Frage ergibt ob diese visuelle Einschätzung nur dem Zufall unterliegt.

Zu diesem Zweck haben wir den Einfluss der Störungen auf das Abflussverhalten für die Perioden 50-100, 100-150 und 150-200 Jahre getrennt betrachtet. Dabei berücksichtigen wir nur positive Korrelationen, d.h. eine Zunahme der relativ gestörten Fläche führt zu einer Zunahme der relativen Spitzenabflüssen. Mit diesem Konzept lassen sich vier verschiedene Muster von Korrelationen unterscheiden:

Muster 0: Es kann keine positive Korrelation zwischen Störung und Abfluss für eine der drei Perioden festgestellt werden (bzw. die Korrelationen sind widersprüchlich).

Muster 1: Eine positive Korrelation findet sich nur in einer der drei Perioden.

Muster 2: Eine positive Korrelation findet sich in zwei der drei Perioden.

Muster 3: In allen drei Perioden besteht ein positiver Zusammenhang zwischen Störungen und Spitzenabfluss.

Abbildungen 8 und 9 veranschaulichen das Konzept der klassifizierten Muster.

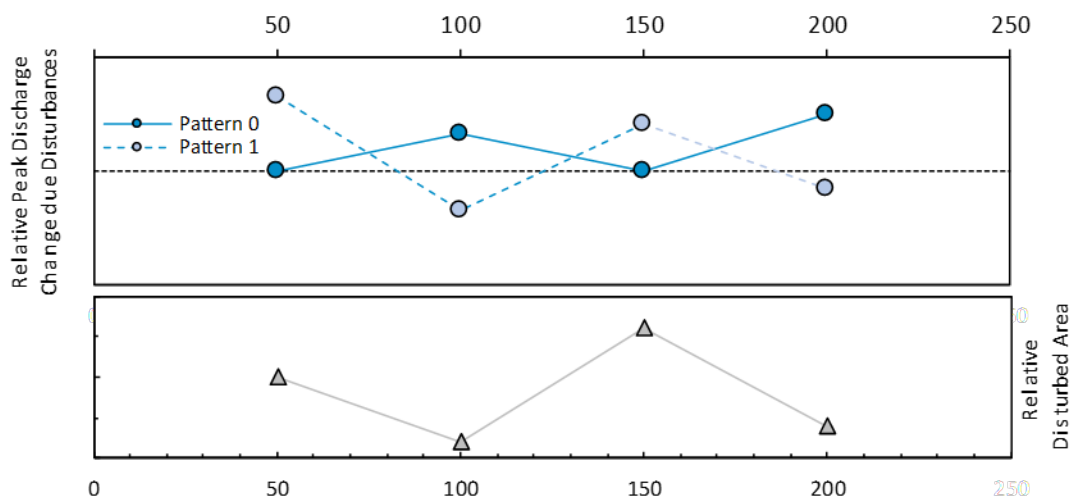


Abbildung 8: Gemäß der Entwicklung der relativ gestörten Fläche, schematisch im unteren Bereich der Abbildung dargestellt, zeigt Muster 0 keine Korrelation, während Muster 1 eine positive Korrelation für den Zeitraum von 100-150 Jahren aufweist (wie im oberen Bereich der Abbildung visualisiert).

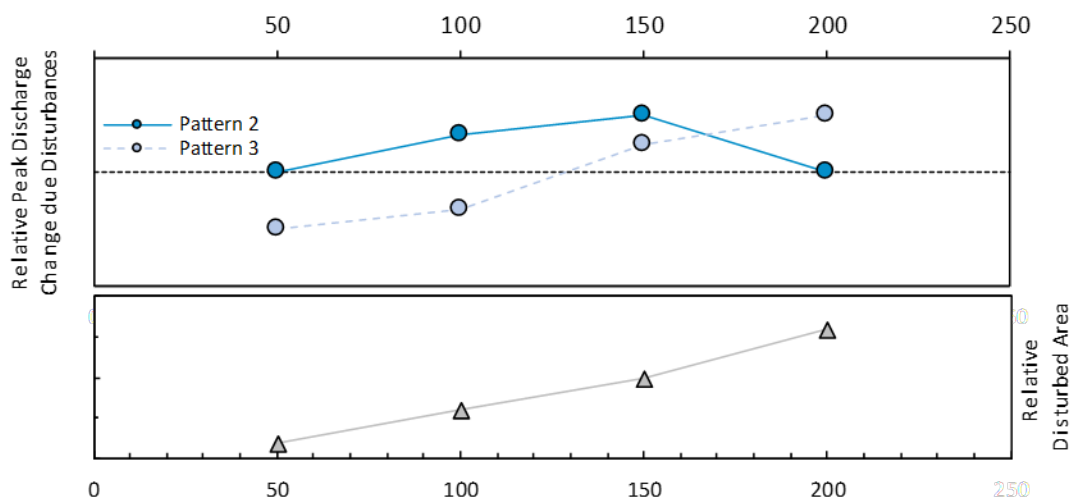


Abbildung 9: Gemäß der Entwicklung der relativ gestörten Fläche, dargestellt im unteren Bereich der Abbildung, zeigt das Muster 2 eine positive Korrelation für die Perioden 50-100-150 Jahre, während für das Muster 3 eine positive Korrelation zwischen Störungen und Spitzenabfluss für alle betrachteten Perioden aufweist. Die verschiedenen Muster werden im oberen Bereich der Abbildung visualisiert.

In einem nächsten Schritt wurde berechnet wie oft diese "Muster" auftreten würden wenn die positive Korrelation zwischen Störung und Spitzenabfluss zufällig wäre und vergleichen diese Zufallswerte mit der beobachteten (resultierenden) Anzahl von "Mustern". Anschließend wurde mittels χ^2 Test überprüft, ob unsere beobachteten (visuell vermuteten) Zusammenhänge zwischen Störungen und Spitzenabflüssen rein zufällig sind.

Abbildung 10 vergleicht die zufällig erwartete Häufigkeitsverteilung der vier "Muster" mit der aus den Simulationsergebnissen resultierenden "Musterverteilung".

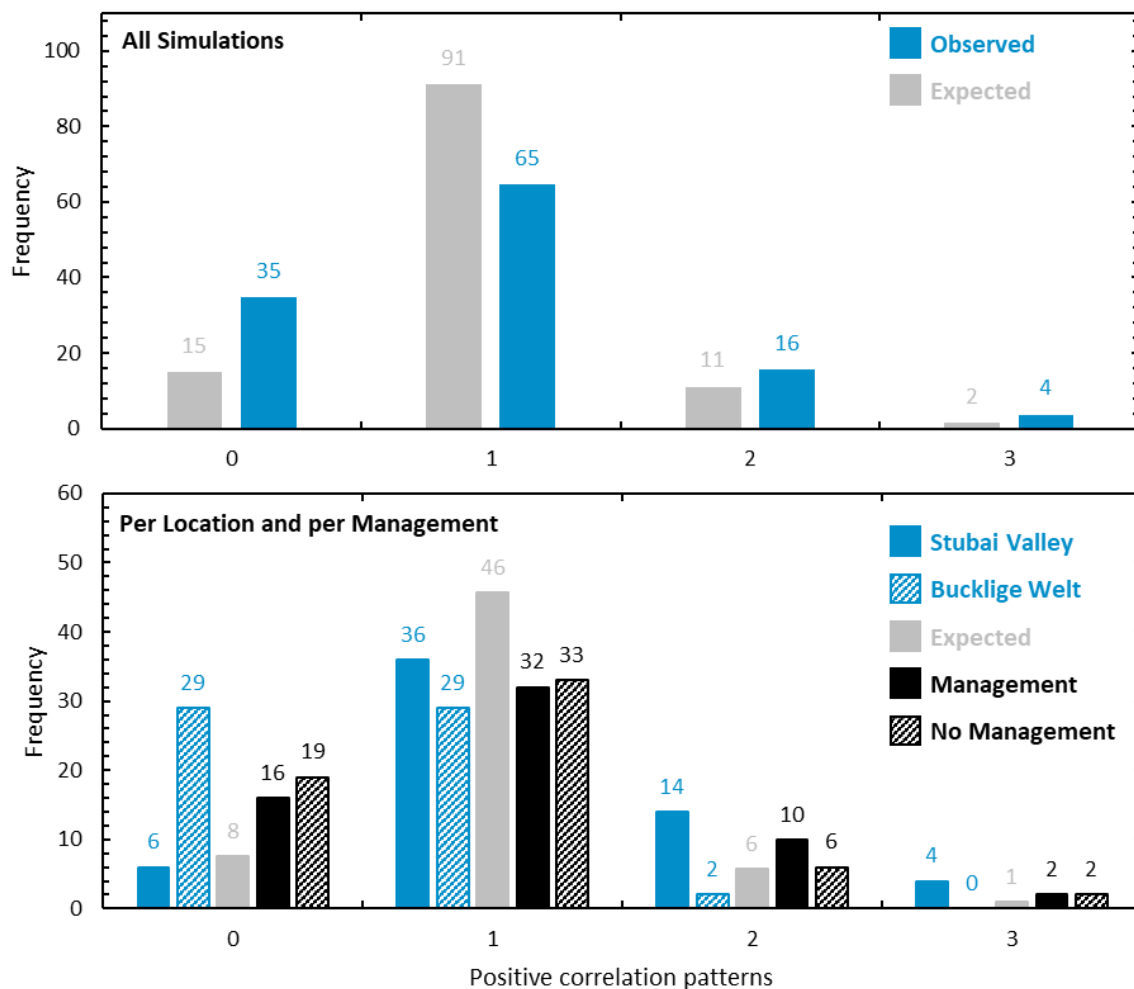


Abbildung 10: Vergleich der beobachteten positiven Korrelationsmuster für verschiedene Faktorisierungen mit der erwarteten Anzahl paralleler Steigerungen unter reiner Zufälligkeit. Der Gesamtvergleich sowie alle untersuchten Gruppierungen führten zu einer signifikanten Abweichung von der erwarteten Verteilung gemäß eines χ^2 Goodness of Fit Tests.

Die Qualität des statistischen Tests zeigt eine signifikante Abweichung der beobachteten Verteilung von der zufällig erwarteten Verteilung und deutet daher auf einen positiven Zusammenhang zwischen natürlichen Störungen und Abflussverhalten hin.

Hinweis: Für die Einzugsgebiete von "BUWELA-Bucklige Welt" gilt auch, dass die beobachteten Störungseinflüsse nicht zufällig angenommen werden können, aber der hohe Anteil des Musters 0 zeigt ein deutlich gegenteiliges Verhältnis zwischen Störung und Abfluss - d.h. ein Anstieg der Störungen folgt auf einen Rückgang der Abflüsse und umgekehrt. Wir haben dafür keine rationale Erklärung, sondern gehen davon aus, dass die hydrologischen Simulationen den Einfluss von natürlichen Störungen aufgrund der Größe der Einzugsgebiete der "Buckligen Welt" kaum widerspiegeln können. Zumindest für die GEOTop-Simulationen kann dies angenommen werden, da wir für das Untersuchungsgebiet der Buckligen Welt von einer 10x10 m Auflösung (des DGM) auf eine 100x100 m Auflösung wechseln

mussten, um die Anzahl der Simulationen in einem vernünftigen Zeitrahmen zu halten.

4.3 Modellierung der Hangstabilität (WP 3)

Simulationen zur Bestimmung der Auswirkungen von Waldstörungen auf die Erosionsprozesse in Hanglagen basieren auf den Ergebnissen der Waldentwicklungssimulationen von iLand (WP 1) und der hydrologischen Modellierung mittels GEOtop (WP 2) in Kombination mit einer erweiterten Version des Mohr-Coulomb'schen Bodenstabilitätsmodells. Diese neu entwickelte Erweiterung schätzt den Sicherheitsfaktor in verschiedenen Bodentiefen und berücksichtigt die scheinbare Kohäsion aufgrund der Wurzelarmierung, die in jeder Bodenschicht wirken kann, sowie den zusätzlichen Druck durch das Gewicht der Vegetation. Die Modellierung der Hangstabilität wurde ausschließlich für die Untersuchungsgebiete im Stubaital - für den "Äußeren Lehnertalbach" sowie für den "Inneren Lehnertalbach" - durchgeführt. Der Grund dafür liegt hauptsächlich in der hydrologischen Simulation von GEOtop, die nicht mit zufriedenstellender Auflösung für die Untersuchungsgebiete in der Buckligen Welt durchgeführt werden konnte (100x100m statt 10x10m). (Für weitere Informationen siehe Kapitel 2.2.5).

Die Ergebnisse zeigen das mobilisierte Volumen, d.h. die Anzahl der Zellen mit einem Sicherheitsfaktor der Bodenstabilität unter eins und unter Berücksichtigung der zugehörigen Bodentiefe, für alle Klimaszenarien. Sie basieren auf einer Dauerstufe von 240 Minuten und eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren. Nicht gezeigt werden alle anderen Dauerstufen und Jährlichkeiten, Die allgemeinen Aussagen bleiben jedoch erhalten, wenn die Dauer von 240 Minuten auf 60 oder 720 Minuten geändert wird, mit dem einzigen Unterschied, dass für das 60-Minuten-Szenario weniger Volumen und für das 720-Minuten-Szenario mehr Volumen mobilisiert wird als für das 240-Minuten-Szenario.

Äußerer Lehnertalbach

Das potenziell mobilisierte Volumen mit und ohne Berücksichtigung von Störungen für den Äußeren Lehnertalbach mit und ohne Management ist in den Abbildungen 11 und 12 dargestellt.

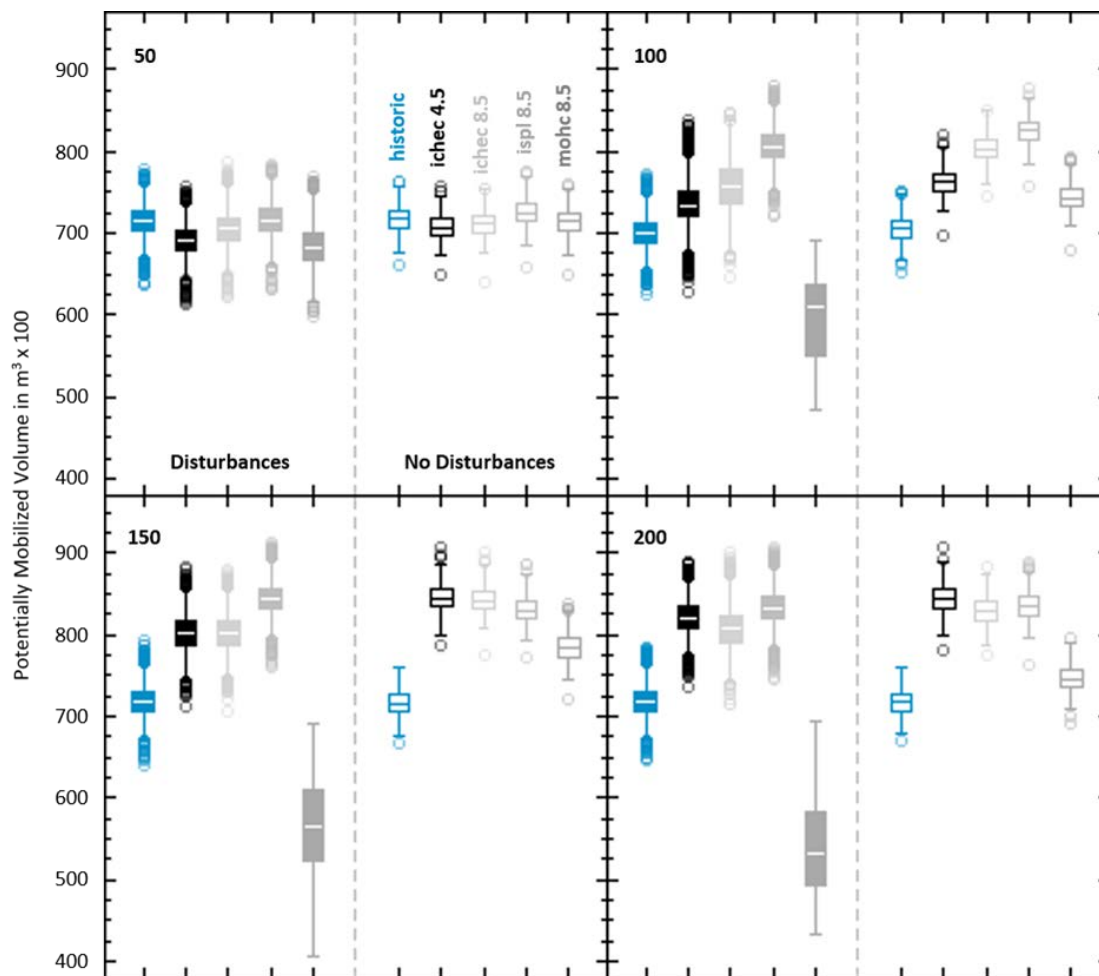


Abbildung 11: Äußerer Lehnertalbach; Potenziell mobilisierte Volumina für 50, 100, 150 und 200 Jahre nach Simulationsstart, unter Berücksichtigung historischer, ihec4.5, ihec8.5, ipsl8.5 und mohc8.5 Klimaszenarien und **kein Management** mit und ohne Störungen.

Während das mobilisierte Volumen unter historischen Bedingungen ohne Berücksichtigung des Managements nahezu konstant ist, steigt das Volumen von ihec4,5, ihec8,5 auf ipsl8,5 und zeigt für das Klimaszenario mohc8,5 einen deutlichen Rückgang. Neben diesen Trends ist das mobilisierte Volumen für fast alle Klimaszenarien und Zeiträume für Wälder mit natürlichen Störungen konstant geringer als für solche ohne Störungen. Diese Muster bleiben auch erhalten, wenn die Dauer von 240 Minuten auf 60 oder 720 Minuten geändert wird, mit dem einzigen Unterschied, dass für das 60-Minuten-Szenario weniger Volumen und für das 720-Minuten-Szenario mehr Volumen mobilisiert wird als für das 240-Minuten-Szenario.

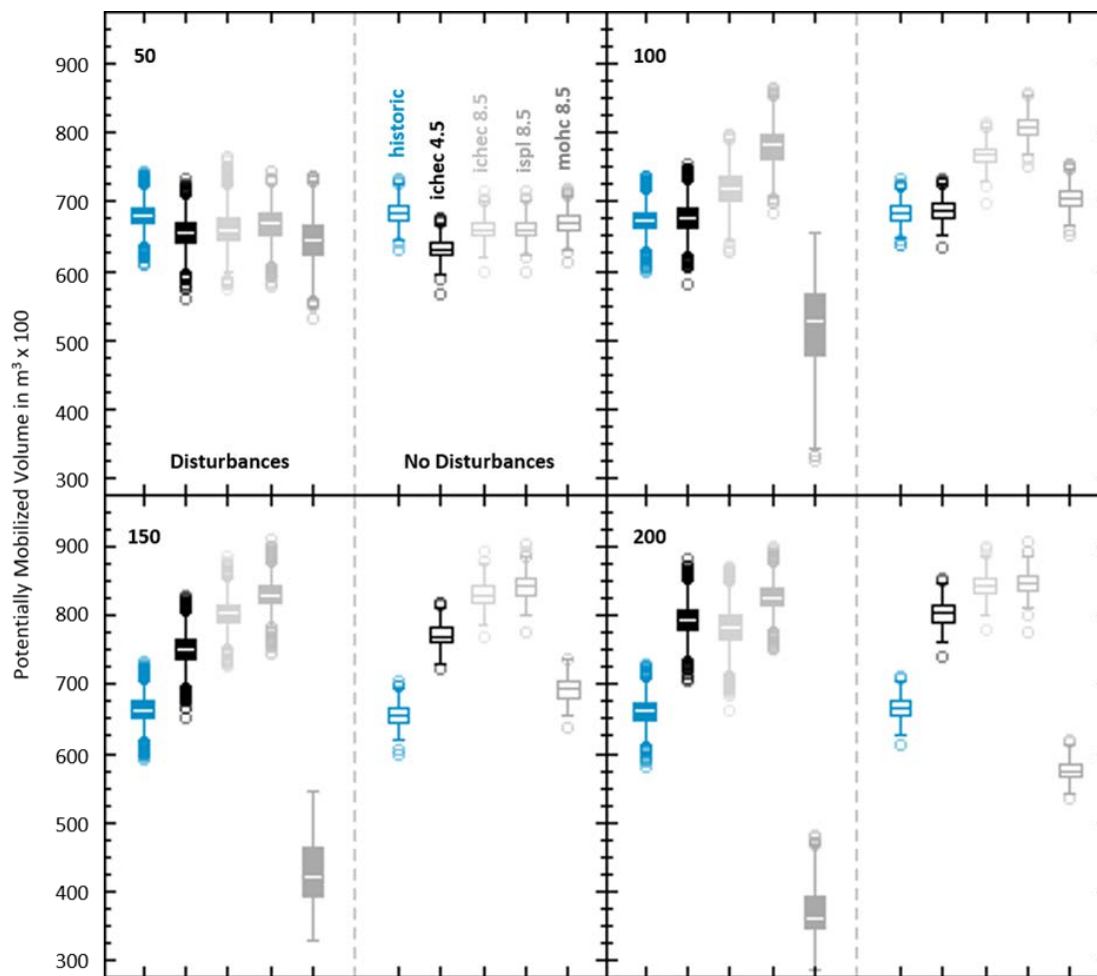


Abbildung 12: Äußerer Lehnertalbach; Potenziell mobilisierte Volumina für 50, 100, 150 und 200 Jahre nach Simulationsstart, unter Berücksichtigung historischer, ihec4.5, ihec8.5, ipsl8.5 und mohc8.5 Klimaszenarien und **mit Management** mit und ohne Störungen.

In Bezug auf das Management (Abbildung 12) sind die allgemeinen Trends identisch mit denen in Abbildung 11, aber weniger Volumen wird im Allgemeinen unter Managementbedingungen mobilisiert.

Der negative Einfluss der Störungen auf die Hangrutschveranlagung mag zunächst kontraintuitiv sein, lässt sich aber durch eine genauere Betrachtung des Strukturwandels der Waldbestände erklären. Abbildung 13 zeigt den relativen Anteil der Bäume mit Senk-, Herz- und Pfahlwurzelsystem für alle Klimaszenarien. Unabhängig vom Klimaszenario und dem Zeitpunkt ist der Anteil der Herz- und Pfahlwurzelsysteme bei Waldbeständen mit natürlichen Störungen höher. Während bei den Klimaszenarien ihec4,5, ihec8,5 und ipsl8,5 der Anteil der Bäume mit Senkwurzeln im Laufe der Zeit zunimmt, sinkt der Anteil der Bäume mit Senkwurzler im mohc8,5 Szenario und erhöht damit die Stabilität der Hänge durch eine höhere Wurzelkohäsion.

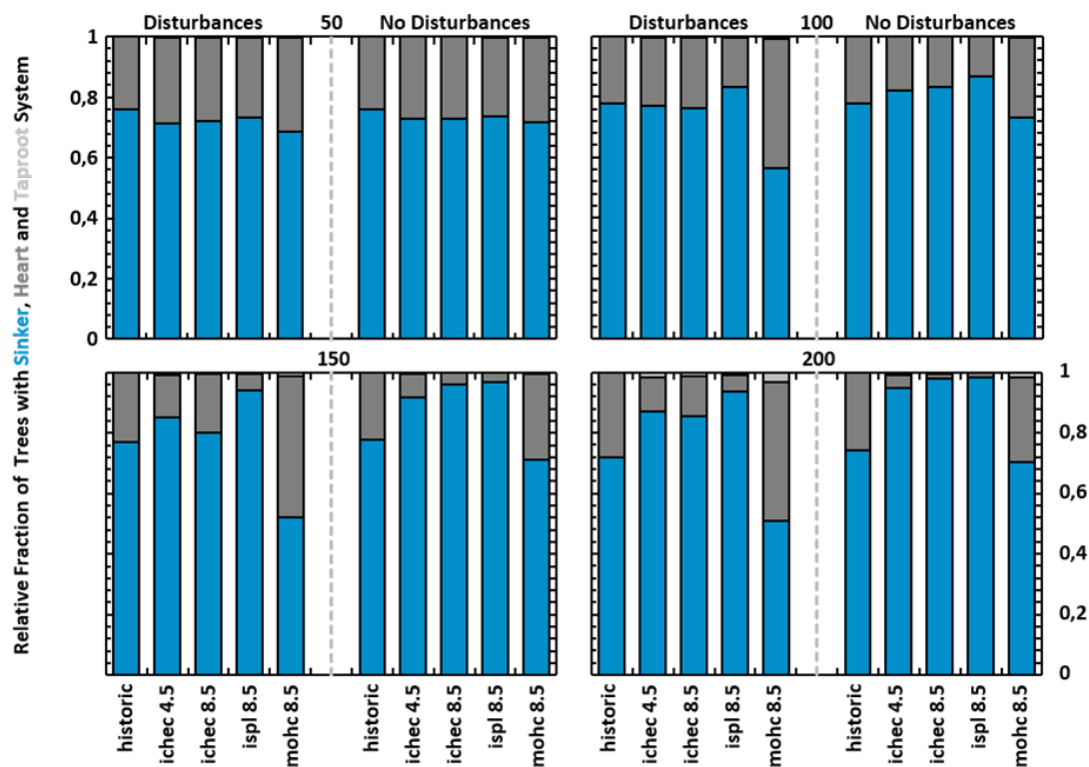


Abbildung 13: Äußere Lehnertalbach: Relativer Baumanteil mit Senkwurzeln (*Picea abies* und *Pinus cembra*), Herzwurzeln (*Acer Platanoides*, *Fagus sylvatica* und *Sorbus aucuparia*) und Pfahlwurzeln (*Abies alba* und *Pinus sylvestris*) für alle Klimaszenarien, kein Management, mit und ohne natürliche Störungen für alle vier Zeitpunkte.

Innerer Lehnertalbach

Das potenziell mobilisierte Volumen mit und ohne Berücksichtigung von Störungen für den Inneren Lehnertalbach mit und ohne Management ist in den Abbildungen 14 und 15 dargestellt.

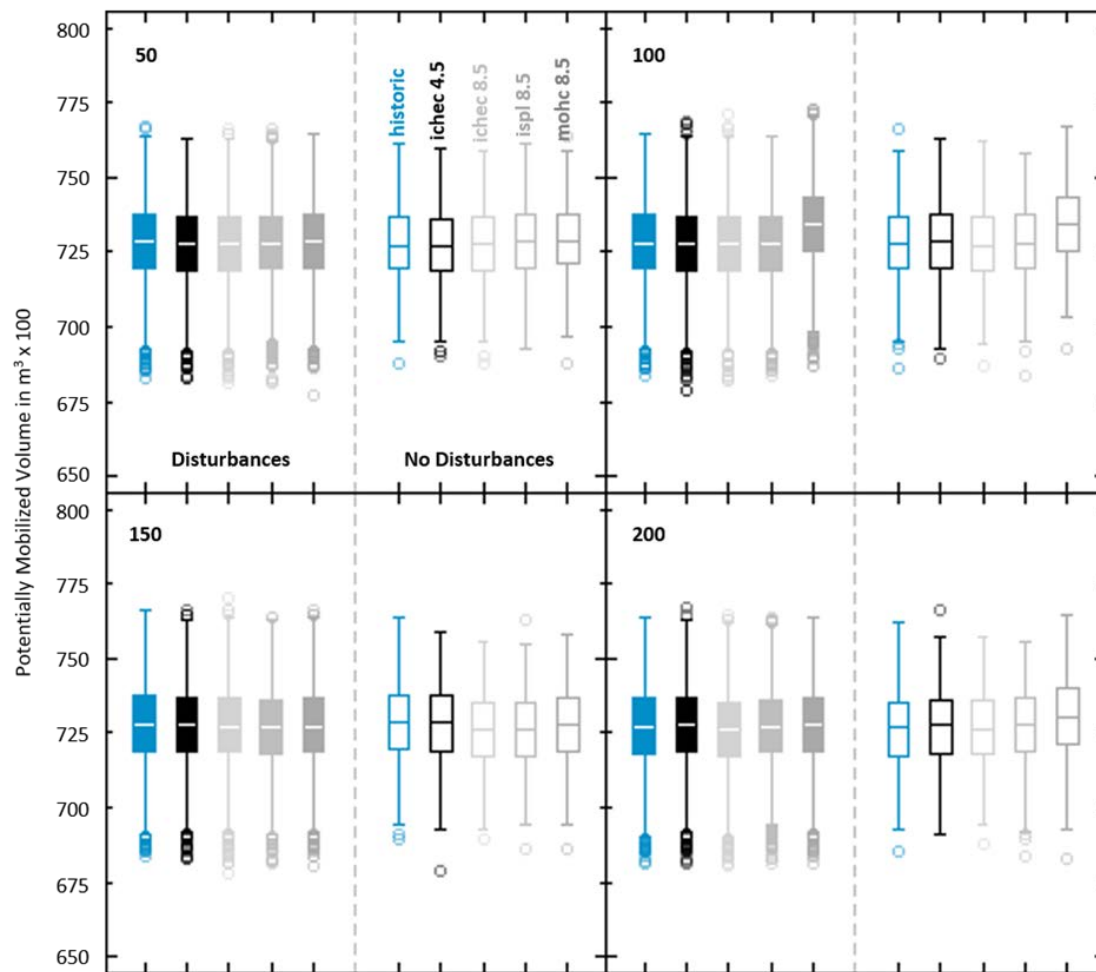


Abbildung 14: Innerer Lehnertalbach; Potenziell mobilisierte Volumina für 50, 100, 150 und 200 Jahre nach Simulationsstart, unter Berücksichtigung historischer, ihc4.5, ihc8.5, ipl8.5 und mohc8.5 Klimaszenarien und **kein Management** mit und ohne Störungen.

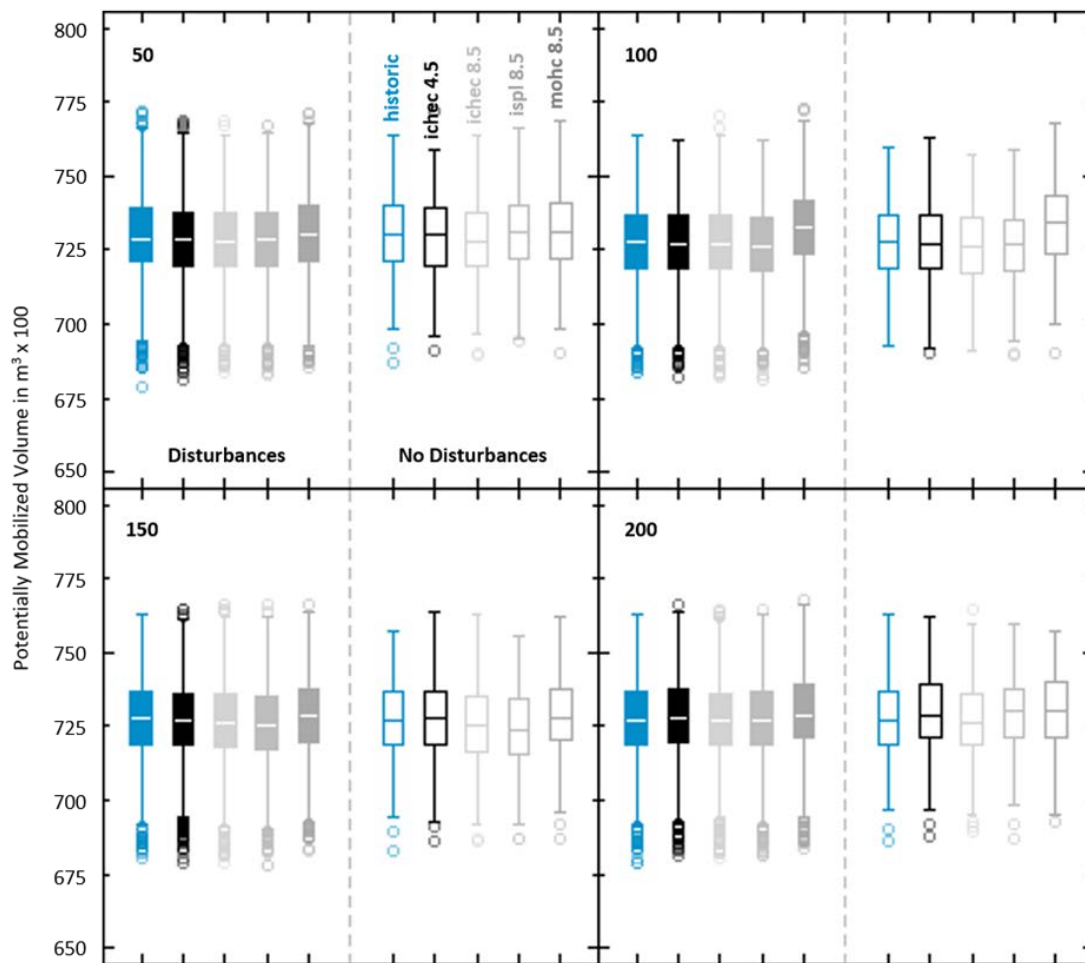


Abbildung 15: Äußerer Lehnertalbach; Potenziell mobilisierte Volumina für 50, 100, 150 und 200 Jahre nach Simulationsstart, unter Berücksichtigung historischer, ihec4.5, ihec8.5, ipsl8.5 und mohc8.5 Klimaszenarien und **mit Management** mit und ohne Störungen.

Für fast alle Klimaszenarien zeigt das mobilisierte Volumen im Zeitablauf keine bemerkenswerte Entwicklung, mit Ausnahme des mohc8,5 Szenarios, wo in den Jahren 100 und 200 etwas mehr Volumen mobilisiert wird. Das median mobilisierte Volumen für alle Klimaszenarien und Perioden für Wälder mit natürlichen Störungen liegt zufällig unter oder über dem Median für Wälder ohne Störungen. Daher ist für den Inneren Lehnertalbach kein signifikanter Einfluss auf das mobilisierte Volumen des Klimaszenarios und natürliche Störungen des mobilisierten Volumens sichtbar. Dies mag überraschen, denn die Dynamik der Baumartenverteilung ist die gleiche wie beim Äußerer Lehnertalbach (vgl. Abbildung 13). Die Ergebnisse für den Innerer Lehnertalbach sind jedoch unter Berücksichtigung der folgenden Unterschiede zum Äußerer Lehnertalbach zu betrachten, die für die Erosionsdisposition im Allgemeinen wesentlich sind:

- Die Waldfläche des Inneren Lehnertalbachs ist im Vergleich zum Äußerer Lehnertalbach viel kleiner. Nur etwa 30% des gesamten Einzugsgebietes sind bewaldet.
- Die meisten Steillagen des Inneren Lehnertalbachs liegen in nicht bestockten Gebieten des Einzugsgebietes, der Einfluss eines Waldes auf die mögliche

Hangstabilität ist daher im Vergleich zu den Äußeren Lehnertalbachs naturgemäß viel geringer.

4.4 Bewertung der Risikowahrnehmung von Störungen auf geomorphologische Prozesse (WP 4)

Die Stichproben bestätigen, dass bei den politischen Entscheidungsträgern ein hohes Bewusstsein für die Auswirkungen von Waldstörungen auf die Berggefahren besteht. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse ein hohes Bewusstsein für die Wahrscheinlichkeiten zukünftiger Störungen in Waldökosystemen in den nächsten 10 Jahren. Dennoch erwarten die meisten Experten in den nächsten Jahren einen Anstieg von geringen Verlusten an Schutzwald aufgrund von Waldstörungen. Insgesamt spielen Waldstörungen eine Rolle bei der aktuellen Entwicklung der Gefahrenanalyse. Die Daten zeigen, dass die Haupttypen von Störungen Borkenkäfer, Wind, Schnee und Lawinenstörungen und hauptsächlich vernachlässigte andere Störungsregime sind. Dieses Ergebnis ist vor allem auf folgende Faktoren zurückzuführen: (1) verschiedene und vielfältige politische Kampagnen der öffentlichen Verwaltung und verschiedene veröffentlichte politische Dokumente und Rahmenbedingungen in den letzten zwei Jahrzehnten in der Forstwirtschaft (politisch motiviert). (2) Große Schnee- und Lawinenereignisse im Wintersemester 2018-19 in Österreich und der Schweiz (gefahrbringend). Kontroverielle Ergebnisse zeigen, dass nur wenige Befragte vorbeugende Maßnahmen ergreifen. Auch hier liegen die Schwerpunkte auf Borkenkäfer, Wind und Schnee sowie Lawinenstörungen. Die Ergebnisse zeigten weiters, dass es verschiedene Barrieren gibt, die eine erfolgreiche Initiierung, Unterstützung und Umsetzung von Präventivmaßnahmen behindern. Die größten Herausforderungen spiegeln den Mangel an Ressourcen (finanzielle Unterstützung, Zeit, Wissen) wider, aber auch die mangelnde politische Koordinierung zwischen Naturgefahren und Forstwirtschaft. Dennoch haben die Ergebnisse deutlich gemacht, dass künftige Klima- und Landnutzungsänderungen im Rahmen des derzeitigen Naturgefahrenmanagements besser berücksichtigt werden müssen, auch im Hinblick auf die rechtlichen Rahmenbedingungen und Leitfäden für das Naturgefahrenmanagement.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

PROTECTED ist ein Pilotprojekt, das erstmals ein komplexes Landschaftsentwicklungsmodell zur Parametrisierung hydrologischer und geotechnischer Modelle unter großem Aufwand einsetzt. Es fokussiert und kombinierte das Wissen verschiedener wissenschaftlicher Gruppen auf ein Thema, was dazu führte, dass zunächst geplante Methoden und Hypothesen im Laufe des Projekts überarbeitet und neu ausgerichtet werden mussten. Dennoch wurden wichtige Schritte unternommen, um die zukünftige Forschung an der Schnittstelle von Schutzwaldwirtschaft, Naturgefahren, Landnutzung und Klimawandel vorzubereiten. Diese Schritte bestehen nicht nur aus einer erweiterten technischen

und methodischen Wissensbasis, sondern auch aus einer erweiterten Kooperationsbasis.

Die Ergebnisse der Befragung über die Rolle von Störungen im Naturgefahrenmanagement haben deutlich gezeigt, dass unter Störungen, die einen möglichen Einfluss auf Naturgefahrenprozesse haben, vor allem großräumige Störungen verstanden werden, d.h. Störungen die zu großflächiger Entwaldung führen. Nach solchen großflächigen Störungen werden sehr oft technische Schutzvorrichtungen im Sinne von Sofortmaßnahmen zum Ausgleich des Verlustes der Schutzwirkung installiert. In diesem Projekt haben wir uns jedoch gefragt, wie und inwieweit regelmäßige natürliche Störungen die Schutzwirkung des Waldes im Laufe der Zeit verändern. Diese häufig wiederkehrenden Störungen sind im Vergleich zu "katastrophalen" Großstörungen oft viel kleiner und damit weniger im Bewusstsein der Naturgefahrenexperten, sondern sehr viel mehr im Interesse der Forstexperten – und werden grundsätzlich in den Bewirtschaftungsstrategien von Waldexperten berücksichtigt. Da solche eher kleinräumigen Störungen klimagesteuert sind, wollten wir herausfinden, ob sie zu einer Systemänderung des Abflussverhaltens und der Erosionsleistung in typischen Wildbacheinzugsgebieten führen können, und sich somit auch möglicherweise auf zukünftige Naturgefahrenanalysen auswirken.

Obwohl unsere Ergebnisse keine eindeutigen quantifizierbaren Aussagen zulassen, kann man feststellen, dass in steilen und kleinen Wildbacheinzugsgebieten eine kritische Größe einer natürlichen Störung erreicht werden kann, insbesondere bei der Vorhersage eines veränderten Abflussverhaltens. Die visuelle Beurteilung zeigt, dass natürliche Störungen das Abflussverhalten positiv beeinflussen können, d.h.: Zeiten mit einer hohen Anzahl von Störungen (und damit insgesamt auch einer größeren gestörten Fläche) führen offenbar bei starken Niederschlägen zu einer Zunahme des Abflussverhaltens. Basierend auf unseren Ergebnissen konnten wir zeigen, dass diese Beobachtungen nicht dem Zufall entsprechen. Im Zusammenhang mit einem Klimawechsel, der die Häufigkeit und Größe von natürlichen Störungen in einem Schutzwald erhöht, ist eine Zunahme des Abflussverhaltens bei Starkregenereignissen nicht auszuschließen. Zu diesem Zweck ist jedoch zu beachten, dass eine solche kritische Störgröße eher in sehr kleinen, steilen Waldeinzugsgebieten erreicht wird.

Die Analyse des Einflusses kleinflächiger Störungen auf die Hangstabilität zeigte in einem ersten Moment kontraintuitive Ergebnisse, insbesondere für das kleinste und am dichtesten bewaldete Untersuchungsgebiet. Hier haben wir eine Zunahme der Hangstabilität mit einer Zunahme des Anteils der gestörten Fläche festgestellt, signifikant für das Klimaszenario welche hohen Temperaturen mit wenig Niederschlag kombiniert (mohc8,5). Da Bäume aufgrund ihrer Wurzeln eine Art Kohäsion auf die Bodenschicht ausüben, spielt die Bildung des Wurzelsystems eine wichtige Rolle für die Hangstabilität. Die Form des Wurzelsystems hängt jedoch hauptsächlich von der Baumart und dem Alter ab. Beide unterliegen durch den Einfluss des Klimas und das Auftreten von natürlichen Störungen erheblichen Veränderungen und beeinflussen so die Stabilität an steilen bewaldeten Hängen.

Zukünftige Forschungen sollten versuchen, die kritische Größe und Art der natürlichen Störungen zu bestimmen, die zu einer Systemänderung des Abflussverhaltens und der Hangstabilität eines Wildbacheinzugsgebietes führen. Darüber hinaus ist zu analysieren, ob diese kritischen Störgrößen als konstant, z.B. in Bezug auf die Einzugsgebietsfläche, angenommen werden können oder ob sie, was wahrscheinlicher ist, eine Funktion der unterschiedlichen natürlichen Bedingungen sind. Schließlich wäre auch ein Einfluss kleiner, aber häufiger Störungen auf andere Schutzfunktionen, wie z.B. die Auslösung von Lawinen oder von Steinschlagereignissen, von Interesse.

Ein wichtiges Ergebnis ist, dass sowohl Experten für Naturgefahrenmanagement als auch für Forstwirtschaft die Bedeutung kleinerer Störungen in kleinen steilen Wildbacheinzugsgebieten verstehen. Auch wenn die Reaktion eines Schutzwaldes auf den Klimawandel langsam erscheint, können solche relativ häufigen kleinräumigen Störungen eine Veränderung der Waldstruktur und damit eine Veränderung des Ausmaßes oder sogar der Jährlichkeit von Naturgefahrenprozessen bewirken. Die Ergebnisse dieses Projekts richten sich jedoch in erster Linie an weitere Forschungsprojekte oder -gruppen.

C) Projektdetails

6 Methodik

6.1 Waldlandschaftssimulationen (WP 1)

Für die Waldlandschaftssimulationen in PROTECTED wurden vier repräsentative Klimaprognosen ausgewählt. Sie basieren auf globalen Modellen des Irish Center for High-End Computing (ichec), des Pierre Simon-Laplace-Institute (ipsl) und des MetOffice Hadley Center (mohc).

Grundsätzlich werden Klimamodelle durch Treibhausgaskonzentrationsszenarien angetrieben, die als repräsentative Konzentrationspfade (RCP-Szenarien) definiert sind. Die Benennung der RCP-Szenarien basiert auf dem Unterschied des anthropogenen Strahlungsantriebs am Ende des Jahrhunderts im Vergleich zum Jahr 1850, ausgedrückt in W/m^2 . Die Szenarien lassen sich in Bezug auf geringem ($2,6 W/m^2$), mittlerem ($4,5 W/m^2$), hohem ($6,0 W/m^2$) und sehr hohem ($8,5 W/m^2$) Energiegewinn einteilen.

Alle drei globalen Modelle (ichec, ipsl, mohc) werden mit dem RCP 8.5 Szenario betrieben - unter der Annahme eines sehr hohen Energiegewinns durch den zukünftigen Klimawandel. Das Modell ichec wurde zusätzlich mit einer moderaten, RCP 4.5, Klimaperspektive betrieben. Die Temperatur- und Niederschlagsdifferenzen des Eur-11-Datensatzes für den Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zu 1981-2010 sind in Abbildung 16 dargestellt. Die vier ausgefüllten und farbigen Datenpunkte beziehen sich dabei auf die verwendeten Klimaprognosen.

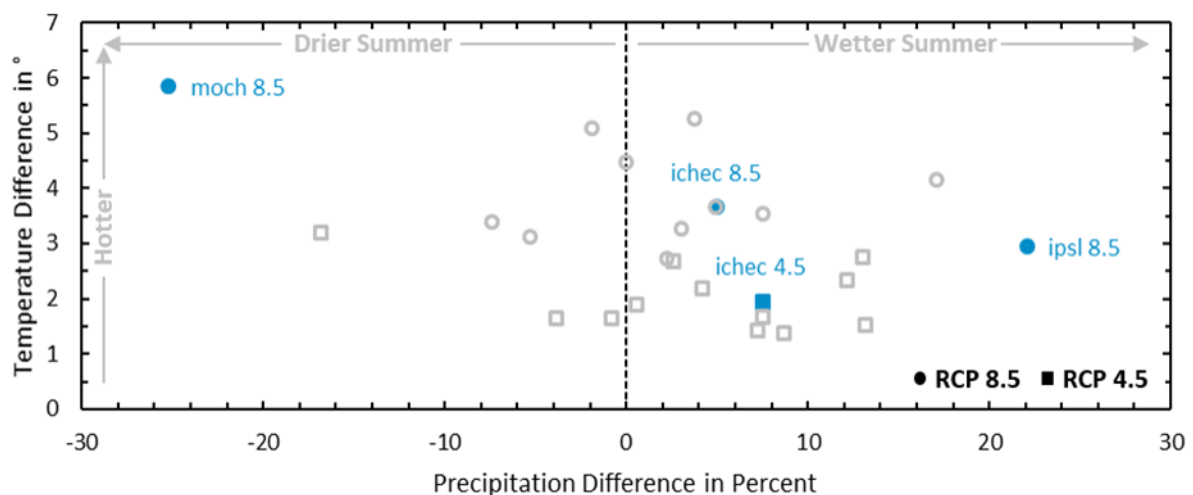


Abbildung 16: Verwendete Klimavorhersagen (beschriftet und gefüllt) des EUR-11-Datensatzes (blank) als durchschnittliche Temperatur- und Niederschlagsdifferenz des Zeitraums 2071-2100 im Vergleich zu 1981-2010 (Sommer).

Alle Temperaturen steigen im Vergleich zu 1981-2010. Von den verwendeten Klimavorhersagemodellen zeigt nur mohc8,5 sinkende Niederschlagstrends. Neben den Szenarien zur Klimaprognose werden die iLand Simulationen auch

mittels einer an historischen Klimadaten orientierten zukünftigen Klimaentwicklung angetrieben. Dieses Klimaszenario wird als historisch bezeichnet (Tabelle 2) und ergibt sich für den Zeitraum 1961 bis 2015 aus den kombinierten 1x1 km INCA und SPARTACUS Daten des Zentralinstituts für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) in Kombination mit Beobachtungsreihen von ZAMG-Wetterstationen sowie lokal installierten Messstationen.

Tabelle 2: Überblick über die angewandten Klimaprognosen mit den zugrunde liegenden globalen und regionalen Modellen sowie über die Treibhauseffekt-Szenarien und den Zeitraum des simulierten Klimawandels.

Bezeichnung	Globales Modell	Regionales Modell	Szenario	Zeitraum	Trend
ichec4.5	EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	RCP4.5	2001-2100	moderat
ichec8.5	EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	RCP8.5	2001-2100	warm
ipsl8.5	IPSL-CM5A-MR	IPSL-INERIS-WRF331F	RCP8.5	2001-2100	warm und feucht
mohc8.5	HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	RCP8.5	2001-2099	warm und trocken
historic	Basierend auf realen historischen Klimadaten			2001-2100	kein Trend

Die Waldentwicklung innerhalb der ausgewählten Wildbach-Einzugsgebiete wird für jedes der Klimaszenarien (Tabelle 2) 200 Jahre lang simuliert. 20-Mal unter Berücksichtigung von Störungen und einmal ohne Berücksichtigung von Störeinflüssen. Darüber hinaus wurden alle iLand-Simulationen zusätzlich mit und ohne Berücksichtigung einer Waldbewirtschaftung durchgeführt. So wurden insgesamt 210 Simulationen für das westliche Untersuchungsgebiet und 210 Simulationen für das östliche Untersuchungsgebiet durchgeführt.

6.2 Hydrologische Modellierung (WP 2)

Um die Folgen klimabedingter natürlicher Störungen auf das Abfluss- und Sedimentmobilisierung zu analysieren, würden verteilte hydrologische Modelle grundsätzlich größtmögliche Informationen liefern. So wurden mit dem physikalisch basierten, hydrologischen Programm GEOtop 2.1 Simulationen durchgeführt. GEOtop ermöglicht die Berechnung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessen der Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und Lithosphäre. Das Programm wurde entwickelt, um Niederschlagsabflüsse und Energieflüsse insbesondere in kleinen alpinen Einzugsgebieten vorherzusagen. Meteorologische, topographische und geologische Daten beschreiben die Situation und den Zustand der Untersuchungsgebiete und bilden die Eingangsparameter für GEOtop. Der Wasserkreislauf wird durch die Lösung der Massen- und Energiegleichung berechnet. Die Ergebnisse können Abflussganglinien am Auslauf oder hydrologische Kenngrößen für einen definierten Zeitschritt sein.

Für die ausgewählten Einzugsgebiete, wie für fast 96 % aller Wildbacheinzugsgebiete in Österreich, liegen keine Informationen über vergangene Niederschlags-Abfluss Beziehungen vor. Dies liegt vor allem daran, dass es keine kontinuierlichen Abflussmessgeräte (Wasserstandsmessgeräte) gibt. Aus diesem Grund wurde die hydrologische Modellierung sowie die Validierung von GEOTop mit dem Niederschlags-/Abflussmodells ZEMOKOST⁶⁻⁸ durchgeführt - einem einfach anzuwendenden ereignisbasierten Konzeptmodell, das speziell für den Einsatz in kleinen bis mittleren (< 100 km²) unbeobachteten Einzugsgebieten entwickelt wurde. Das Modell basiert auf dem Konzept der Oberflächenabflusskoeffizienten zur Beschreibung der Abflussbildung und auf einem Abflusszeitverfahren. Die Oberflächenabflusszeit wird nach Izzard und Hicks (1947)⁹ berechnet, die Gerinne Hydraulik wird nach dem Ansatz von Rickenmann (1996)¹⁰ umgesetzt. Das semi-verteilte Modell basiert auf einem zweistufigen Konzept mit einem oberirdischen und einem unterirdischen Abflussmodul. ZEMOKOST benötigt die Anteile der Oberflächenabflussklassen (ψ_{const}) und der Oberflächenrauigkeitsklassen (c) für jedes Teilgebiet.

Parametrisierung und Kalibrierung der verwendeten hydrologischen Modelle

Für hydrologische Simulationen von Spitzenabflüssen werden die Untersuchungsgebiete durch meteorologische, topographische, landnutzungsbezogene (Vegetation) und pedologisch/geologische Parameter beschrieben.

Unter Berücksichtigung meteorologischer Eingangsparameter konzentrierte sich PROTECTED auf Wildbachprozesse wie Geschiebetransportprozesse oder Murgänge, die eine schnelle Zunahme der Abflüsse aufweisen - wodurch die Spitzenabflüsse die Kapazität des Gerinnes überschreiten - und in der Lage sind, eine beträchtliche Menge an Sedimenten zu verlagern. Solche Prozesse werden durch Niederschlagsereignisse mit hoher Intensität ausgelöst. Aus diesem Grund wurden sechs Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Dauer (60 min, 240 min und 720 min) und Wiederholungsintervalle (10 Jahre und 100 Jahre) definiert, die ein breites Spektrum an Informationen über die hydrologische Reaktion von Störungen im Wald abdecken. Die Bemessungsniederschlagsereignisse resultieren aus den flächendurchschnittlichen, maximierten Niederschlägen (MaxModN, eHYD) von Messpunkten in der Nähe der ausgewählten Einzugsgebiete (Tabelle 3). MaxModN gibt Niederschlagswerte an, die in der Regel höher sind als die beobachteten.

Tabelle 3: eHYD Bemessungsniederschlagswerte für die ausgewählten Einzugsgebiete

Jährlichkeit [years]	Dauerstufe [min]	Bemessungsniederschlag [mm]			
		Klingfurtherbach	Ofenbach	Äußerer- Lehnertalbach	Innerer- Lehnertalbach
10	60	52.88	51.95	57.02	53.69
	240	74.90	74.00	83.71	79.16
	720	97.99	92.45	113.31	111.93
100	60	85.88	83.99	94.65	88.85
	240	118.17	116.42	138.39	130.10
	720	150.68	149.61	180.26	178.56

Die oben aufgeführten Bemessungsniederschlagswerte wurden für die hydrologische Modellierung mit ZEMOKOST sowie mit GEOTop verwendet.

Topographische Informationen über den Ist-Zustand der ausgewählten Einzugsgebiete basieren auf Ableitungen von digitalen Höhenmodellen (DEM) mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden (Tabelle 3), die auf die unterschiedlichen Einzugsgrößen (Umfang) und die Komplexität der angewandten hydrologischen Modellierungsansätze zurückzuführen sind.

Tabelle 4: Verschiedene Rastergrößen des verwendeten digitalen Höhenmodells für die hydrologischen Simulationen.

Modell	Auflösung DHM [m]			
	Klingfurtherbach	Ofenbach	Äußerer- Lehnertalbach	Innerer- Lehnertalbach
ZEMOKOST	10	10	10	10
GEOTop	100	100	10	10

Die Berücksichtigung der Landnutzung (Vegetation) sowie der pedologisch/geologischen Bedingungen der Untersuchungsgebiete folgt in ZEMOKOST und GEOTop unterschiedlichen Ansätzen.

Die wichtigsten Eingangsparameter von ZEMOKOST, Abflusskoeffizient und Oberflächenrauigkeit, wurden nach dem von Markart et al. (2011)¹¹ entwickelten Konzept bestimmt. Um eine realistische Beurteilung der Abflusseigenschaften zu gewährleisten wurden die tatsächlichen Standortmerkmale (Vegetation, Boden) im Feld kartiert. Regensimulationsexperimente mit einer transportablen Beregnungsanlage für große Parzellen (50-100 m²) wurden auf repräsentativen Boden-/Vegetationskomplexen durchgeführt. Damit konnte ZEMOKOST kalibriert und auf Plausibilität für die vier Testeinzugsgebiete geprüft werden, wobei sich die

verwendeten Daten der Niederschlags- und Abflusszeitreihen auf historische Ereignisse begründen.

In GEOTop setzt sich die Landnutzung aus Vegetationsklassen zusammen, die aus unterschiedlich bewaldeten Gruppen bestehen. Die einzelnen Gruppen repräsentieren keine bestimmten Baumarten, sondern resultieren aus Einheiten mit ähnlicher Vegetationshöhe, Rauheit, Blattflächenindex, Kronenabdeckung und Wurzeltiefe, die direkt durch iLand-Simulationen bestimmt werden. Der Oberflächenabfluss im Gerinne und entlang der Hänge wird durch den empirischen hydraulischen Ansatz von Manning bestimmt. Die Wechselwirkung mit der Lithosphäre wird durch bodenphysikalische Parameter beschrieben. Zusätzlich zu den topographischen Daten ergänzen pedologische Daten die Tiefenunterschiede, die sogenannten Horizonte. Jede Bodenart besteht aus verschiedenen Bodenhorizonten. Jeder Bodenhorizont ist durch seine physikalischen Eigenschaften (Bodentexturdaten) gekennzeichnet.

Aus Gründen der Vereinfachung geht die hydrologische Simulationsstudie von isotropen Böden aus, so dass die hydraulische Leitfähigkeit in horizontaler und vertikaler Richtung identisch ist. Die Leitfähigkeit in der ungesättigten Bodenmatrix wird durch van Genuchten-Werte berechnet (α , n). Diese Werte können nach Carsel & Parrish (1988)¹² bestimmt werden. Die Klassifizierung der Horizonte ergibt sich nach dem USDA-Texturdreieck aus ihren Anteilen an Sand, Schluff und Ton.

Schließlich wurden die GEOTop-Abfluss-Ergebnisse mit den von ZEMOKOST vorgeschlagenen Abfluss-Ergebnissen validiert. Abbildung 17 zeigt ein Kalibrierbeispiel des Äußeren-Lehnertalbachs für GEOTop-Simulationen, basierend auf Sensitivitätsanalysen unterschiedlicher hydraulischer Rauheitsparameter (40 Simulationen), im Vergleich zu ZEMOKOST-Simulationen für ein 100-jähriges Niederschlagsereignis der Dauerstufen 60, 240 und 720 min. Die durchgezogene Linie entspricht der kalibrierten GEOTop-Simulation.

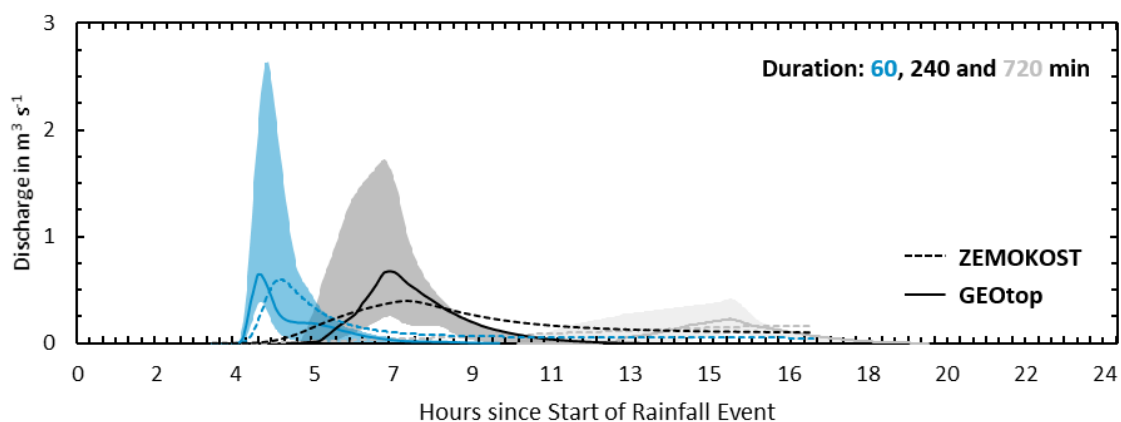


Abbildung 17: Validierung von GEOTop auf Basis von ZEMOKOST-Simulationen für ein 100-jähriges Niederschlagsereignis der Dauerstufen 60, 240 und 720 min am Äußeren-Lehnertalbach. Während der schattierte Bereich alle simulierten Ganglinien enthält, stellt die durchgezogene Linie die Ganglinie des kalibrierten Modells dar.

Zukünftige Abflussvorhersage-Szenarien

Für zukünftige Abflussvorhersagen von Spitzenabflüssen, die mit beiden hydrologischen Modellen simuliert wurden, wurden unterschiedliche Landnutzungsbedingungen durch die vorab durchgeführte Anzahl von iLand-Simulationen der ausgewählten Einzugsgebiete bereitgestellt - was zu mehreren Abflusssimulationsszenarien führte. Einen Überblick über die Szenario-Konfiguration gibt Tabelle 5.

Tabelle 5: Konfigurationstabelle für die Abflusssimulationen

Landnutzung (21 ⁺ Wiederholungen der iLand Simulationen)			Bemessungsniederschlag	
Klimaszenario	Zeitpunkt	Management	Jährlichkeit [#]	Dauer
historic	50	with	(10)	60
ichec4.5	100	without	100	240
ichec8.5	150			720
ipsl8.5	200			
mohc8.5				

⁺ 20 Wiederholungen unter Berücksichtigung von Störungen und eine Wiederholung ohne Berücksichtigung von Störungen.

[#] Für weitere Analysen wurde nur der Bemessungsniederschlag basierend auf einem 100-jährigen Intervall berücksichtigt.

Für jedes Untersuchungsgebiet wurden 5.040 hydrologische Simulationen pro hydrologisches Modell durchgeführt basierend auf vier Klimaszenarien, drei Zeitschritten, zwei Managementszenarien und sechs mögliche Niederschlagsszenarien mit 21 Waldlandschaftssimulationen. Aufgrund des Zeitaufwandes für eine Simulation wurden jedoch nur Niederschlagsereignisse mit einem jährlichen Wiederholungsintervall von 100 Jahren für weitere Analysen berücksichtigt. Dennoch wurden während des gesamten Projekts mehr als 30.000 Simulationen durchgeführt.

Für zukünftige ZEMOKOST-Simulationen werden die Eingangsparameter direkt aus iLand-Ergebnissen berechnet.

6.3 Modellierung der Hangstabilität (WP 3)

Die Stabilität jeder Bodensäule - 1 m tief mit einer Fläche von 100 m² - d.h. jede Rasterzelle im Untersuchungsgebiet - wurde anschließend für jede Bodenschicht l zur Simulation i für den Zeitpunkt t nach Gleichung (1) geschätzt.

$$FS_i(l, t) = \frac{B + \left(A - \sum_{k=1}^l h(k) * m_i(k, t) \right) * \frac{\tan(\phi(l))}{\tan(\beta)}}{A} \quad (2)$$

wobei $FS_i(l, t)$ der Sicherheitsfaktor für eine bestimmte Bodensäule im Untersuchungsgebiet für Simulation i und Bodenschicht l ist, mit Werten unter 1, die anzeigen, dass die Bodensäule mit der Tiefe $h(k)$ und zum Zeitpunkt t instabil ist. $h(k)$ ist die gesamte Tiefe, und $m_i(k, t)$ beschreibt, wie durch Gleichung (3) angegeben, die Sättigung der Schicht k zum Zeitpunkt t . Der Parameter $\phi(l)$ beschreibt den innere Reibungswinkel und β ist der Neigungswinkel der Bodensäule in Radianten.

Der Term A in Gleichung (1), entspricht der Normalspannung, und ergibt sich aus dem durch den Porenwasserdruck reduzierten Boden- und Pflanzengewicht. Sie berechnet sich mittels Gleichung (2),

$$A = \gamma_w^{-1} * \left(q_i + \sum_{k=1}^l h(k) * [m_i(k, t) * (\gamma_{sat}(k) - \gamma(k)) + \gamma(k)] \right) \quad (3)$$

mit γ_w der spezifischen Wichte von Wasser und q_i dem zusätzlichen Druck aufgrund des Gewichtes der Vegetation. Die Sättigung für jede Bodenschicht und Simulation zum Zeitpunkt t ergibt sich aus dem Quotienten der tatsächlichen Sättigung in der Bodenschicht mit dem maximal möglichen Wassergehalt des gesättigten Bodens:

$$m_i(k, t) = \frac{\theta_i(k, t)}{\theta_{sat}(k)} \quad (4)$$

Die Kohäsionskomponente B der Widerstandskräfte wurde nach Gleichung (4) bestimmt.

$$B = \frac{2 * (C_s(l) + C_{r,i}(l))}{\gamma_w \sin(2\beta)} \quad (5)$$

In Gleichung (4) entspricht $C_s(l)$ der Bodenkohäsion pro Bodenschicht und $C_{r,i}(l)$ der scheinbaren Wurzelkohäsion für jede Simulation und Bodenschicht.

Geotechnische Parametrisierung

Die geotechnischen Eigenschaften der Bodensäule wurden aus typischen Werten entsprechend der Beschaffenheit der Schicht abgeleitet (siehe Tabelle 5).

Um die Unsicherheit in den Parametern zu berücksichtigen, wurde mittels Monte-Carlo-Methode zufällig Werte für die Kohäsion, den inneren Reibungswinkel, das spezifische trockene und das spezifische gesättigte Gewicht des Bodens aus unabhängigen gleichmäßigen Verteilungen ausgewählt. Der Bereich der gleichmäßigen Verteilungen ist in Tabelle 5 angegeben. Um die Rechenzeit angemessen zu halten, wurden 500 Wiederholungen durchgeführt, nachdem die Konvergenz mit einer größeren Anzahl von Wiederholungen kontrolliert wurde.

Tabelle 6: Geotechnische Parameter der Böden und ihr Parameterbereich für die Monte-Carlo-Wiederholungen

Textur ¹	C_s [Pa]		ϕ [°]		γ [kNm ⁻³]		γ_{sat} [kNm ⁻³]		θ_{sat}
	min	max	min	max	min	max	min	max	
L	4000	5000	29.56	35.08	14715	15500	18168	17383	0.40
SCL	4000	5000	32.69	36.32	15009	15696	18392	17705	0.41
Si	4000	5000	27.27	34.78	15206	15794	18014	17426	0.71
SiL	4000	5000	25.75	33.55	14126	15598	17895	16423	0.66
SL	4000	5000	31.12	35.72	15304	15598	18280	17986	0.56

¹Bodentextur nach NRCS wobei L (Lehm), SCL (sandiger toniger Lehm), Si (Schluff), SiL (schluffiger Lehm) und SL (sandiger Lehm) entspricht

Parametrisierung der Wurzelkohäsion

Das Wurzelsystem der Bäume erhöht den Widerstand der Böden gegen flachgründige Rutschungen. Es gibt Konzepte unterschiedlicher Komplexität, die von der Zusammenfassung der zusätzlichen Bodenfestigkeit durch additive Erhöhung der Bodenbindung bis hin zu komplexen Modellen auf Basis der Faserbündeltheorie reichen.

Um die zusätzliche Kohäsion durch das Wurzelsystem zu modellieren, wurden typische Werte der Wurzelkohäsion aus wissenschaftlichen Publikationen gesammelt. Da veröffentlichte Daten zu einzelnen Baumarten rar waren, wurden die Arten nach der Topologie ihres Wurzelsystems in Pfahlwurzler, Herzwurzler und Senkwurzler eingeteilt.

Für jede der drei Gruppen wurde angenommen, dass die Variabilität der Wurzelkohäsion durch eine Normalverteilung angenähert werden kann. Die Annahme, dass die Wurzelkohäsion eines einzelnen Baumes durch viele Faktoren wie die eigentliche Wurzeltopologie gesteuert wird, die von Bodeneigenschaften wie Wassergehalt, Verdichtung, Anteil grober Partikel, Dicke der einzelnen Wurzeln oder Winkel zwischen Wurzel und Boden abhängt, um nur einige zu nennen, basiert unter Berücksichtigung des zentralen Grenzwertsatzes zutreffen und definiert somit die Wurzelkohäsion als ein Durchschnittswert all dieser Faktoren.

In ähnlicher Weise wurde die Wurzeltiefe und damit die Tiefe, auf die sich die Wurzelkohäsion bezieht, geschätzt. Basierend auf typischen Werten der Wurzeltiefe und nach dem gleichen Grundprinzip wie für die Wurzelkohäsion wurden Normalverteilungen der Wurzeltiefe für Pfahlwurzel, Herzwurzel und Senkwurzel konstruiert. Die vorhandene Wurzelkohäsion für jede Bodenschicht, Simulation und jede Zelle wurde durch Quantil Abgleich mit der Wurzelmassenverteilung für jede potentielle Baumart in den

untersuchungsgebieten unabhängig vom Klimaszenario und Zeitrahmen geschätzt. Dann wurde für jeden Baum seine Wurzelmasse mit der Wurzelmassenverteilung verglichen und die entsprechende Wahrscheinlichkeit der scheinbaren Wurzelmasse geschätzt. Die endgültige Wurzelkohäsion und die Tiefe, in der die Wurzelkohäsion für jede Zelle angewendet wird, wurde dann durch Mittelung über alle Bäume in der jeweiligen Rasterzelle festgelegt.

6.4 Bewertung der Risikowahrnehmung von Störungen auf geomorphologische Prozesse (WP 4)

Neben prozessbasierten Simulationen legen wir auch Wert darauf, die Risikowahrnehmung und die Anpassungsfähigkeit zu identifizieren, um einen wahrscheinlichen Verlust von Schutzfunktionen im Wald zu mildern. Aus diesem Grund wurde eine postalische Umfrage unter Forstakteuren durchgeführt, um die Bedenken und die Bereitschaft der Forstmanager, sich mit dem Management von Naturgefahren zu befassen, im Gegensatz zu den Rollen ihres sozialen Netzwerks und den Rollen der politisch-administrativen Vertreter zu bewerten. Wir haben eine qualitative Online-Umfrage unter politischen Entscheidungsträgern mit der Umfrageanwendung LimeSurvey© durchgeführt. Insgesamt haben wir 96 politische Entscheidungsträger auf nationaler und regionaler Ebene in Österreich, Deutschland, der Schweiz und Italien befragt. Der Auswahlprozess konzentrierte sich auf die beteiligten wichtigen Entscheidungsträger (nationale, regionale und lokale Ebene) aus den Fallstudien. Deshalb haben wir eine Schneeballstichprobe verwendet, um Experten zu diesem Thema zu befragen. Die zielgerichtete Stichprobe der befragten Teilnehmer spiegelt nicht die tatsächliche Prävalenz der jeweiligen Interessengruppen wider, sondern es wurden Informanten eingeladen, die Schlüsselrollen im nationalen, regionalen und lokalen Management von Naturgefahren innehaben (Harris 2008)¹³. Mit einer Kombination aus geschlossenen und offenen Fragen untersuchte die Online-Befragung folgende Themen: Zusammenhänge zwischen dem individuellen Bewusstsein für das Störregime in Naturgefahrenprozessen, Zusammenhänge zwischen Waldstörung und Berggefahrenprozessen, aktuelle Managementstrategien sowie Barrieren bei der Umsetzung von Anpassungsstrategien. Die gesammelten Daten wurden mittels thematischer Analyse analysiert. Die thematische Analyse hilft, auf der Grundlage der Literaturrecherche aufkommende Themen aus der Diskussion zu identifizieren. Darüber hinaus haben wir eine Policy-Diskursanalyse durchgeführt, um veröffentlichte Strategie- und Leitfäden zu aktuellen Forst- und Naturgefahrenmanagementstrategien bei Waldunruhen in den ausgewählten Ländern zu bewerten.

7 Arbeits- und Zeitplan

PROTECTED	Project period 01.05.2017 - 30.04.2019												Cost-neutral project extension		
	Year 1						Year 2								
	5.-6. 2017	7.-8. 2017	9.-10. 2017	11.-12. 2017	1.-2. 2018	3.-4. 2018	5.-6. 2018	7.-8. 2018	9.-10. 2018	11.-12. 2018	1.-2. 2019	3.-4. 2019	5.-6. 2019	7.-8. 2019	9. 2019
WP 1: Forest modelling															
Setup and conduction of iLand simulations															
M 1.1: Simulation model successfully evaluated for all four catchments			M												
M 1.2: Effects of climate scenarios on disturbance frequency, severity, and size simulated					M										
M 1.3: Forest indicators of hydrogeomorphic hazard risk analysed						M									
WP 2: Hydrological modelling															
Rain simulation experiments															
M 2.1: Rain simulation experiments and supplementary field investigations finished				M											
ZEMOKOST setup and actual state simulation						M									
M 2.2: ZEMOKOST-setup and calculations for the actual state finished															
ZEMOKOST modelling of different scenarios															
M 2.3: ZEMOKOST-analyses for the different hazard scenarios developed in WP1 are finished									M						
WP 3: Erosion modelling															
Soil mapping															
M 3.1: Soil mapping finished			M												
Setup (and adaption if necessary) of DHSVM and HYDROlisthis															
M 3.2: Setup and, if necessary, adaption of erosion models finished					M										
Calibration of hydro-module															
M 3.3: Erosion models successfully calibrated							M								
Modelling erosion rate of different scenarios															
M 3.4: Erosion simulations accomplished										M					
WP 4: Identification of risk perception and adaptive capacity to mitigate natura risks															
Questionnaire design and distribution															
M 4.1: Planning of questionnaire design and distribution finalised								M							
Questionnaire data analyses and evaluation															
M 4.2: Data collection accomplished (n=100-250 forest managers) analysed and evaluated											M				
WP 5: Project management and dissemination															
Project management															
M 5.1: Kick-off meeting of PROTECTED partners.	M														
M 5.2: Progress meetings and regular telephone conferences			M		M		M		M				M		
M 5.3: Participation in the ACRP workshops and specialized sessions during international conferences				M			M		M				M		
Dissemination															
M 5.4: Meeting for panel discussion											M				
M 5.5: Publications and summary for policy makers										M					
	2017				2018						2019		2019		

Aufgrund technischer Probleme bei der Modellierung der Hangstabilität (Datenverlust beim Kopieren machte einen Neustart einiger Simulationsszenarien erforderlich) musste eine Verlängerung der Projektlaufzeit beantragt werden. Der Abschlussbericht konnte erst nach Vorlage aller Ergebnisse fertiggestellt werden. Diese Gründe führten zu einer Verschiebung des geplanten Projektendes.

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

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

Bis Projektende konnten folgende Publikationen durchgeführt werden:

Scheidl, C; Heiser, M; Kamper, S; Seidl, R; Rammer, W; Thaler, T; Kleebinder, K; Nagl, F; Lechner, V; Markart, G (accepted): The influence of climate change and canopy disturbances on landslide susceptibility in steep forested headwater catchments. Science of the Total Environment

Scheidl, C; Heiser, M; Kleebinder, K; Lechner, V; Markart, G; Rammer, W; Seidl, R; Thaler, T (2017): PROTECED oder die Auswirkung natürlicher Störungen im Schutzwald unter Berücksichtigung zukünftiger Klimaszenarien. Wildbach- und Lawinenverbau, 180, 296-298; ISSN 978-3-9504159-4-0

Scheidl, C; Thaler, T; Seidl, R; Rammer, W; Kohl, B; Markart, G (2017): The effect of natural disturbances on the risk from hydrogeomorphic hazards under climate change. [Poster] [EGU General Assembly 2017, Vienna, AUSTRIA, APR 23-28, 2017] In: EGU General Assembly 2017 (Eds.), Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, EGU2017-11697

Scheidl, C; Heiser, M; Kleebinder, K; Lechner, V; Markart, G; Rammer, W; Seidl, R; Thaler, T (2017): PROTECED oder die Auswirkung natürlicher Störungen im Schutzwald unter Berücksichtigung zukünftiger Klimaszenarien. Wildbach- und Lawinenverbau, 180, 296-298; ISSN 978-3-9504159-4-0

Sebald, J; Senf, C; Heiser, M; Scheidl, C; Pflugmacher, D; Seidl, R (2019): Are forested landscapes protecting against torrential hazards? Empirical large scale evidence from the Alps. [International Association for Landscape Ecology - World congress, Milano, ITALY, JUL 1-5; 2019] In: IALE World Congress 2019, Nature and society facing the Anthropocene challenges and perspectives for landscape ecology - Book of Abstracts

Sebald, J; Senf, C; Heiser, M; Scheidl, C; Pflugmacher, D; Seidl, R (2019): The effects of forest cover and disturbance on torrential hazards: Large-scale evidence from the Eastern Alps. Environmental Research Letter (accepted). Article reference: ERL-106899.R1

Seidl, R; Albrich, K; Erb, K; Formayer, H; Leidinger, D; Leitinger, G; Tappeiner, U; Tasser, E; Rammer, W. (2019): What drives the future supply of regulating ecosystem services in a mountain forest landscape? FOREST ECOL MANAG. 2019; 445: 37-47.

9 Referenzen

1. Schwarz, M., Thormann, J. J., Zürcher, K. & Feller, K. Quantifying root reinforcement in protection forests: Implications for slope stability and forest management. in *Proceedings of the Interpraevent* (2012).
2. Schwarz, M., Preti, F., Giadrossich, F., Lehmann, P. & Or, D. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy). *Ecol. Eng.* **36**, 285–291 (2010).
3. *Nachhaltige Waldwirtschaft in Österreich, Österreichischer Waldbericht 2015.* (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015).
4. Dale, V. H. et al. Climate Change and Forest Disturbances: Climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. *BioScience* **51**, 723–734 (2001).
5. Frehner, M., Wasser, B. & Schwitter, R. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. *Wegleitung Für Pflegemassnahmen Wäld. Mit Schutzfunktion Bundesamt Für Umw. Wald Landsch. Bern* 564 (2005).
6. Kohl, B. Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST: Entwicklung eines praktikablen Modells zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten. (Universität Innsbruck, 2011).
7. Kohl, B., Markart, G., Klebinder, K. & Sotier, B. A practicable approach for evaluating runoff changes in ungauged basins. in *Proceedings of 13th biennial conference ERB* 49–52 (2010).

8. Stepanek, L., Kohl, B. & Markart, G. *Von der Starkregensimulation zum Spitzenabfluss*. (Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, 2004).
9. Izzard, C. F. & Hicks, W. I. HYDRAULICS OF RUNOFF FROM DEVELOPED SURFACES. *Highw. Res. Board Proc.* **26**, (1947).
10. Rickenmann, D. Fliessgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. *Wasser Energ. Luft* **88**, 298–304 (1996).
11. Markart, G. *et al.* *A Simple Code of Practice for the Assessment of Surface Runoff Coefficients for Alpine Soil-/Vegetation Units in Torrential Rain (Version 2.0)*. (2011).
12. Carsel, R. F. & Parrish, R. S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* **24**, 755–769 (1988).
13. Harris, A. & Spillane, J. Distributed leadership through the looking glass. *Manag. Educ.* **22**, 31–34 (2008).

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

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