

Probabilistische Gefahrenmodellierung von Hangmuren

Michael Rinderer, Catherine Berger, Nils Hählen, Jan Kleinn, Adrian Peter, Dörte Aller, Corinne Singeisen, Martin Jordi

Zusammenfassung

Eine probabilistische Gefahrenmodellierung basiert auf tausenden Simulationen eines Naturgefahrenprozesses, die als Input eine Vielzahl an physikalisch plausiblen Kombinationen aus Auslöse- und Ablaufeigenschaften und deren Wahrscheinlichkeiten berücksichtigen. Aus der Vielzahl an modellierten Ereignissen können anschliessend mittels statistischer Analyse für jeden Standort die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Prozesskenngrössen wie z. B. Fliessgeschwindigkeit, Fliessentiefe oder Druck abgeleitet werden. Diese Informationen bilden die Grundlage, um an jeder Stelle im Untersuchungsgebiet durchgehende Intensitäts- und Schadenfrequenzkurven für einzelne Objekte und Objektgruppen erstellen zu können. Auch extreme Ereignisse werden berücksichtigt, aufgrund ihrer geringen Wahrscheinlichkeit aber nicht übergewichtet.

Während die probabilistische Modellierung für Erdbeben, Stürme und Hagel vor allem auch in der Versicherungsbranche etabliert ist, ist eine Anwendung auf gravitative Naturgefahrenprozesse in der Schweiz neu. In diesem Artikel beschreiben wir die entwickelte Methodik für Hangmuren und deren Anwendung am Beispiel eines Pilotgebiets in der Gemeinde Adelboden im Kanton Bern.

Eine grossflächige Anwendung auf einen ganzen Kanton ist zwar herausfordernd, aber technisch machbar. Die wahrheitsähnlichkeitsbasierte Herangehensweise bietet einen Mehrwert in der Gefahren- und Risikobeurteilung, bei der Planung von Präventionsmassnahmen und auch in der Kommunikation der Resultate.

Résumé

Une modélisation probabiliste des dangers se base sur des milliers de simulations d'un processus de danger naturel prenant en compte, comme données d'entrée, une multitude de combinaisons physiquement plausibles de caractéristiques de déclenchement et de déroulement ainsi que leurs probabilités. Sur la base de la multitude d'événements modélisés, une analyse statistique permet ensuite de déduire pour chaque site les probabilités d'apparition de certains paramètres du processus, comme la vitesse d'écoulement, la profondeur d'écoulement ou la pression. Ces informations constituent la base permettant d'établir, pour chaque emplacement de la surface étudiée, des courbes d'intensité et de fréquence des dommages pour des objets individuels et groupes d'objets. Les événements extrêmes sont aussi pris en compte, mais ne sont pas surpondérés en raison de leur faible probabilité.

Alors que la modélisation probabiliste des tremblements de terre, des tempêtes et de la grêle est déjà bien établie, notamment dans le secteur des assurances, son application aux processus naturels gravitationnels est nouvelle en Suisse. Dans cet article, nous décrivons la méthodologie développée pour les laves torrentielles et son application en prenant l'exemple d'une zone pilote dans la commune d'Adelboden, dans le canton de Berne.

Une application à grande échelle sur l'ensemble d'un canton est certes difficile, mais techniquement réalisable. L'approche probabiliste offre une valeur ajoutée dans l'évaluation des dangers et des risques, dans la planification des mesures de prévention et dans la communication des résultats.

Einleitung

In der heute etablierten Praxis der Gefahrenbeurteilung von Hangmuren werden in der Schweiz Prozesskennwerte wie Anrissmächtigkeit, Fliessentiefe, Fliessgeschwindigkeit und Druck für die Jährlichkeiten 30, 100 und 300 Jahre sowie i. d. R. auch für ein extremes Szenario betrachtet. Dabei wird die Jährlichkeit der Einwirkung im Auslaufbereich einer Hangmure der Jährlichkeit der Auslösung gleichgesetzt. Die Fachpersonen beurteilen die Situation vor Ort, berücksichtigen dokumentierte Ereignisse aus der Vergangenheit und berechnen oder simulieren die Prozesskennwerte, um daraus eine gutachterliche Gefahrenbeurteilung vorzunehmen.

Ein Instrument zur Berücksichtigung von Naturgefahren in der Raumplanung ist

die Gefahrenkarte. Die Gefahrenkarten wurden über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren erarbeitet. Zurzeit stehen vielerorts Gefahrenkartenrevisionen an. Im Zuge dessen und auch aufgrund gestiegener Bedürfnisse bei der Gefahrenbeurteilung werden für einen integralen risikobasierten Umgang mit Naturgefahren bessere und flächendeckende Grundlagen benötigt. Probabilistische Modellierungen leisten hierzu einen Beitrag und können ebenfalls für Gefahrenhinweiskarten, Risikoübersichten zur Portfolioanalyse und für die Entwicklung von Einsatzplänen verwendet werden.

Bei Erdbeben, Stürmen und Hagel wird die probabilistische Modellierung als zentrales Werkzeug der Gefahren- und Risikobeurteilung seit längerem verwendet. Die heutigen technischen Möglichkeiten bezüg-

lich Datenspeicherkapazität und Rechenleistung erlauben es, über grosse Untersuchungsperimeter tausende mögliche Ereignisse zu simulieren und probabilistisch auszuwerten. Darunter versteht man die Quantifizierung der Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten gewisser gefahren- und schadenrelevanter Prozesskenngrössen wie zum Beispiel Fliessentiefe, Fliessgeschwindigkeit und Druck (mehr Informationen siehe Infobox).

Für gravitative Naturgefahren wie zum Beispiel Hangmuren wird der probabilistische Ansatz in der Schweiz noch nicht eingesetzt. Zu gross erschienen bisher die nötigen Speicher- und Rechenanforderungen, zu schwierig die Quantifizierung der Ereigniswahrscheinlichkeiten. Die probabilistische Simulation von gravitativen Naturgefahren stellt jedoch eine Methode dar, welche den

Fachpersonen zusätzliche Informationen liefert, die bisher nicht verfügbar waren.

Die geo7 AG, das WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) und die Aller Risk Management GmbH haben im Auftrag der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen (KGV) und des Amts für Wald und Naturgefahren des Kantons Bern (AWN) Möglichkeiten für die Umsetzung einer probabilistischen Modellierung und einer darauf basierenden Datenauswertung für die gravitativen Naturgefahren Hangmuren, Fliesslawinen und Steinschlag ausgearbeitet. Die Übertragung auf Wasserprozesse erfolgte konzeptionell. Der Fokus des Pilotprojekts lag in der Abklärung der technischen Machbarkeit sowie der Abklärung der Anwendung dieser neuen Grundlagen.

Im vorliegenden Artikel wird die Methodik für die probabilistische Modellierung von Hangmuren beschrieben, welche an einem Pilotgebiet in der Gemeinde Adelboden (BE) getestet wurde. Zunächst wird auf die Vorgehensweise näher eingegangen. Im Anschluss werden konkrete Ergebnisse für einen Ausschnitt im Bereich «Im Trunig» südlich des Dorfs Adelboden gezeigt. Am Ende des Artikels wird auf Möglichkeiten zur Verbesserung des vorgestellten Ansatzes hingewiesen. Für die ebenfalls im Pilotprojekt erarbeiteten Ergebnisse für die Prozesse Fliesslawine und Steinschlag verweisen wir auf zwei Publikationen von Kleinn et al. (in Vorbereitung). Eine übergeordnete Projektdokumentation liefert der Projektendbericht (Aller et al., 2025).

1. Methodik

Die im Zuge des Pilotprojekts entwickelte Methodik der probabilistischen Simulation von Hangmuren gliedert sich in die nachfolgend beschriebenen Schritte.

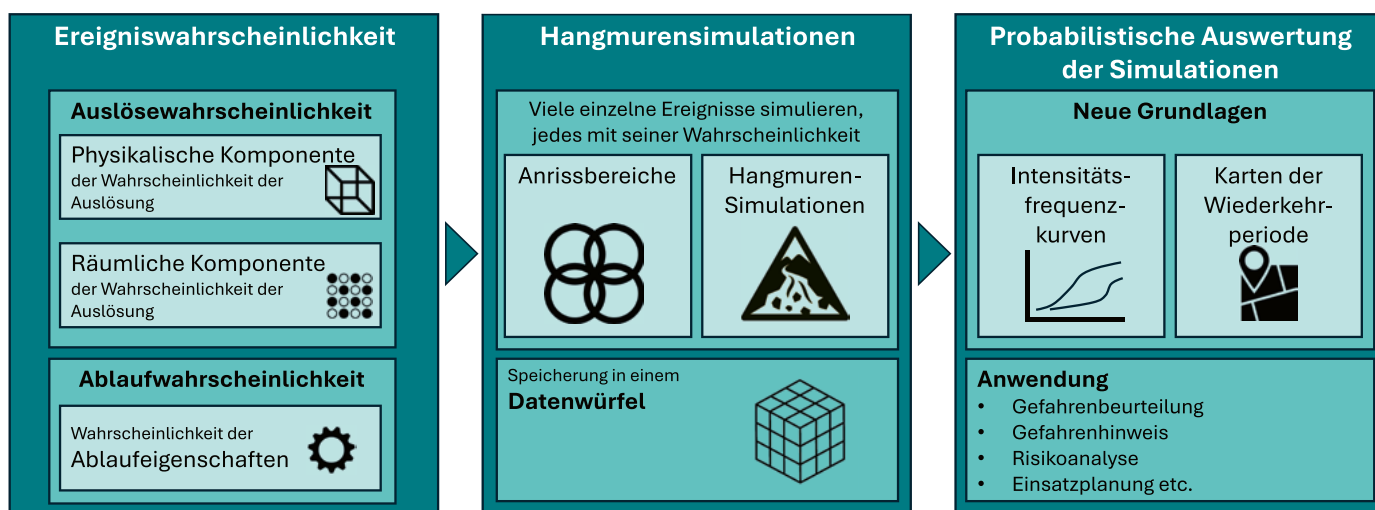


Bild 1: Teilschritte einer probabilistischen Modellierung von Naturgefahrenprozessen und deren wahrscheinlichkeitsbasierter Auswertung.

Probabilistische Modellierung

Eine probabilistische Modellierung eines Gefahrenprozesses wie zum Beispiel Hangmuren basiert auf einer grossen Anzahl simulierter Einzelereignisse unter Berücksichtigung der dazugehörigen Ereigniswahrscheinlichkeiten. Die Ereigniswahrscheinlichkeit setzt sich in unserem Fall aus der Auslösewahrscheinlichkeit und der Prozessablaufwahrscheinlichkeit (siehe Bild 1, links) zusammen. Beide Wahrscheinlichkeiten sind unterschiedlich, je nachdem welche Auslöse- und Prozessablaufeigenschaften bei der numerischen Simulation verwendet werden. Aus der Vielzahl an simulierten Hangmuren mit unterschiedlichen Auslöse- und Ablaufeigenschaften ergibt sich ein Spektrum an möglichen Ereignissen und deren dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten (siehe Bild 1, Mitte). Mittels statistischer Auswertung dieser simulierten Ereignisse und der dazugehörigen Ereigniswahrscheinlichkeiten kann für jede beliebige Überschreitenswahrscheinlichkeit der dazugehörige Erwartungswert einer Prozesskenngösse (z. B. Fliesstiefe) abgeleitet werden. Weiter können die Simulationen auch dazu verwendet werden, um die Wiederkehrperiode einer gewissen Kenngösse (z. B. 1 m Fliesstiefe) zu bestimmen. Ergebnis der statistischen Auswertungen ist eine durchgehende Intensitätsfrequenzkurve für jeden Standort im Untersuchungsgebiet (siehe Bild 1, rechts). Alle Ergebnisse aus den Intensitätsfrequenzkurven können auch räumlich als Karte dargestellt werden. Diese neuen Grundlagen liefern wichtige Informationen für verschiedene Anwendungsbereiche wie zum Beispiel für die Gefahrenbeurteilung, die Risikoanalyse oder für die Erarbeitung eines Einsatzplans.

Eine probabilistische Modellierung eines Gefahrenprozesses unterscheidet sich von einer Modellkalibrierung, bei der viele Parameterkombinationen durchgespielt werden, um ein möglichst gutes Simulationsergebnis im Vergleich zu Referenzwerten zu erzielen. Auch eine klassische Sensitivitätsanalyse ist keine probabilistische Modellierung, da sie nur die Veränderung einer Prozesskenngösse als Reaktion auf das Variieren eines oder mehrerer Modellparameter umfasst. Die probabilistische Modellierung und Auswertung ermöglicht es hingegen, aus einer Vielzahl an simulierten Einzelereignissen eines Gefahrenprozesses und deren dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten zu bestimmen, mit welcher Wahrscheinlichkeit bestimmte Intensitäten erreicht oder überschritten werden.

1.1 Prozessquellen

Zu Beginn der Bearbeitung wurde das Pilotgebiet in Prozessquellen mit einer Grösse von ca. 20 bis 90 ha unterteilt, die sich an hydrologischen Einzugsgebieten orientieren. Für diese Grösse der Prozessquellen wurde angenommen, dass die Niederschlagsverhältnisse, die Bodeneigenschaften und die

Geologie des Untergrunds in etwa homogen sind.

1.2 Ereigniswahrscheinlichkeit (P_{Ereignis})

Unter der Ereigniswahrscheinlichkeit wird in der probabilistischen Modellierung die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines einzelnen Ereignisses verstanden. Diese Wahr-

scheinlichkeit ist nicht mit der Jährlichkeit zu verwechseln, die sich aus der Überschreitungswahrscheinlichkeit eines bestimmten Schwellenwerts ableitet. Die Ereigniswahrscheinlichkeit wird hauptsächlich durch zwei Komponenten bestimmt:

- Auslösewahrscheinlichkeit ($P_{\text{Auslösung}}$) (vgl. Kap. 1.3): Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Hangmure (Ereignis) mit diesen Eigenschaften löst.
- Ablaufwahrscheinlichkeit (P_{Ablauf}) (vgl. Kap. 1.4): Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis im Ablauf (Zeitpunkt zwischen Anriss und Stillstand) bestimmte Eigenschaften aufweist.

Die Auslösewahrscheinlichkeit multipliziert mit der Ablaufwahrscheinlichkeit ergibt die Ereigniswahrscheinlichkeit:

$$P_{\text{Ereignis}} = P_{\text{Auslösung}} \cdot P_{\text{Ablauf}}$$

1.3 Auslösewahrscheinlichkeit ($P_{\text{Auslösung}}$)

In unseren Fall wird die Auslösewahrscheinlichkeit aus den folgenden Teilkomponenten zusammengesetzt (siehe Bild 1):

- Physikalische Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung (P_{phys}). Diese Komponente umfasst die Wahrscheinlichkeiten der Auslöseeigenschaften ($P_{\text{Eigenschaften}}$) (Anrissfläche und Anrissmächtigkeit) und die Häufigkeit von Hangmuren (P_{Hangmure}).
- Räumliche Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung ($P_{\text{räumlich}}$) Die Wahrscheinlichkeiten sind (weitgehend) unabhängig voneinander und werden für die Bestimmung der Auslösewahrscheinlichkeit multipliziert.

$$P_{\text{Auslösung}} = P_{\text{phys}} \cdot P_{\text{räumlich}}$$

Alle Komponenten werden im Folgenden näher beschrieben.

1.3.1 Physikalische Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung (P_{phys})

Die physikalische Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung (P_{phys}) umfasst die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis bei der Auslösung gewisse physikalische be-

ziehungsweise geometrische Ausprägungen hat ($P_{\text{Eigenschaften}}$) und die Wahrscheinlichkeit bzw. Häufigkeit, dass sich eine Hangmure löst (P_{Hangmure}).

Für die Bearbeitung des Pilotgebiets Adelboden wurden empirische Daten aus der Rutschungsdatenbank der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (2025) mit 665 dokumentierten Hangmurenereignissen und einem Datensatz des Amts für Wald und Naturgefahren (AWN) des Kantons Bern (Hählen, 2023) mit 1915 Anrissflächen von spontanen Rutschungen zusammengeführt und ausgewertet (siehe Bild 2).

Anhand dieser empirischen Häufigkeitsverteilungen wurden den Anrissflächen und Anrissmächtigkeiten Wahrscheinlichkeiten zugeordnet, die für die probabilistische Modellierung verwendet wurden (Tabelle 1). Häufigkeiten können in der probabilistischen Modellierung sinngemäss wie Wahrscheinlichkeiten verwendet werden. Die Ausprägungen der Materialeigenschaften wie Dichte, Kohäsion oder Wassergehalt wurden aufgrund fehlender empirischer Daten nicht variiert.

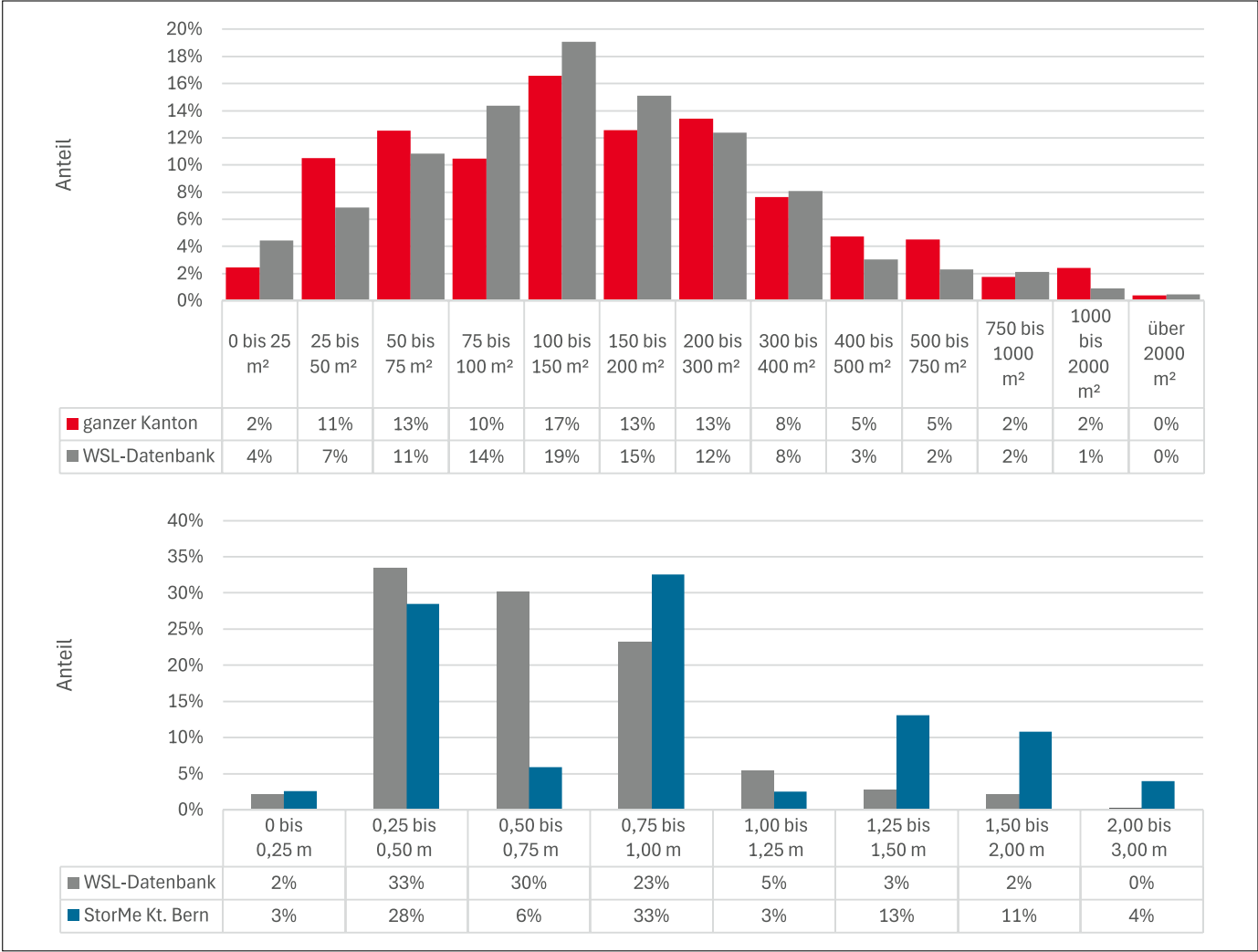


Bild 2: Häufigkeitsverteilung von Anrissflächen (links) und Anrissmächtigkeiten (rechts) von dokumentierten Hangmuren aus einem Datensatz der WSL (2025) mit 665 Ereignissen und der StorMe Datenbank (StorMe, 2025).

Die Häufigkeit von Hangmuren ($P_{\text{Hangmuren}}$) kann anhand der Anzahl bekannter Hangmurenanrisse innerhalb einer definierten Beobachtungsperiode ermittelt werden (z.B. 3 Hangmurenereignisse in 50 Jahren). Für das Pilotgebiet konnte die Häufigkeit von Hangmuren aus dem Datensatz des AWN (*Hählen, 2023*) abgeleitet werden. Es wurde der Einfachheit halber angenommen, dass der so bestimmte Wert über alle Anrissflächen innerhalb einer Prozessquelle gleich gross ist. Da vermutlich im Ereigniskataster und im Datensatz des AWN nicht alle Hangmurenereignisse dokumentiert sind, wird mit der so ermittelten Häufigkeit die tatsächliche / reale Häufigkeit tendenziell unterschätzt.

Weiter ist bei Anwendung dieses Ansatzes die Häufigkeit von Hangmuren in Prozessquellen mit bislang noch nicht dokumentierten Ereignissen null. Daher sollte in solchen Fällen die Häufigkeit von Hangmuren entweder von benachbarten oder gleichartigen Prozessquellen übertragen oder ein Wert zugewiesen werden, der kleiner ist als 1 Ereignis pro Beobachtungsperiode.

Der Ansatz könnte auch dahingehend verbessert werden, dass mittels multipler Regression die Häufigkeit von Hangmuren anhand mehrerer Prädiktoren für jeden Standort (auch innerhalb einer Prozessquelle) individuell bestimmt wird. Damit wäre auch eine regionale Differenzierung möglich.

1.3.2 Räumliche Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung ($P_{\text{räumlich}}$)

Die räumliche Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung ($P_{\text{räumlich}}$) gibt an, in welchem Geländeteil innerhalb einer Prozessquelle eine grössere oder kleinere Wahrscheinlichkeit für die Auslösung einer Hang-

mure besteht. Die räumliche Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung ist zum Beispiel von der Hangneigung, dem Bewuchs bzw. der Landnutzung, den geotechnischen Materialeigenschaften oder dem Bodenwassergehalt abhängig.

Im Pilotprojekt wurde die räumliche Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung primär basierend auf der Hangneigung bestimmt. Dabei wurden Hangbereiche mit einer Neigung $< 20^\circ$ und $> 45^\circ$ als zu flach bzw. zu steil für das Auftreten von Hangmuren erachtet (*Rickli, 2020*). Zusätzlich wurde in Anlehnung an die Wegleitung des Bundesamts für Umwelt (BAFU) für Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (*NaiS / Frehner et al., 2005*) der Bestandesaufbau bzw. Deckungsgrad des Waldes berücksichtigt. Für Freiland wurde die räumliche Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung basierend auf der kritischen Hangneigung aus dem Datensatz von *Hählen (2023)* bestimmt. Für bewaldete Flächen wurde zusätzlich der Deckungsgrad des FINT-CH Datensatzes berücksichtigt (*Dorren et al., 2021*). Die Unterscheidung zwischen offenen und bewaldeten Flächen stützt sich auf empirische Daten aus dem Prättigau, Appenzell, Sachseln, Entlebuch und Emmental, die zeigen, dass Hangmuren in bewaldetem Gebiet an ca. 2° bis 5° steileren Hängen ausgelöst werden als in offenem Gelände (*Rickli & Graf, 2009, Rickli et al., 2019*). Um eine je nach Waldzustand differenzierte Berücksichtigung der Waldwirkung zu bekommen, wurde die Korrektur der Hangneigung $Neig_{\text{kor}}$ im Wald in Abhängigkeit des Deckungsgrads (DG) wie folgt vorgenommen (siehe *Bild 3*):

$$Neig_{\text{kor}} = \begin{cases} DG < 20\%, & 0^\circ \\ 20\% \leq DG < 60\%, & 0,125 \cdot DG - 2,5 \\ DG \geq 60\%, & 5^\circ \end{cases} \quad (1)$$

Weil die Bezugsgrösse für die räumliche Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung die Prozessquelle ist, müssen die so bestimmten Wahrscheinlichkeitswerte innerhalb der Prozessquelle normiert werden, damit deren Summe 1 ergibt (für technische Details dazu siehe Projektendbericht).

Unter Zuhilfenahme weiterer erklärender Variablen, z.B. im Datensatz der WSL und des AWN, wäre es im Rahmen einer Verfeinerung der Methodik möglich, mittels multipler Regression den Ansatz zur Herleitung der räumlichen Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung zu verbessern und v.a. regional zu differenzieren.

1.4 Ablaufwahrscheinlichkeiten (P_{Ablauf})

Auch der Prozessablauf einer Hangmure wurde mit probabilistisch bestimmten Parameterkombinationen modelliert. In erster Linie beeinflussen die Reibung und der Wassergehalt die Bewegung und Reichweite einer Hangmure. Für das Pilotprojekt wurde der Reibungsansatz von Voellmy mit den Reibungsparametern μ für die trockene Coulomb-Reibung, ξ für die visko-turbulente Reibung und τ für die Kohäsion der Hangmure verwendet (*WLV & BFW, 2024*). Durch eine entsprechende Wahl der Reibungsparameter können granulare bis feinkörnige Hangmuren simuliert werden. Die Parameterausprägungen und deren Wahrscheinlichkeiten wurden anhand von Angaben in der Literatur (*Zimmermann, 2012; Loup et al., 2012; Bartelt et al., 2017; Zimmermann et al., 2020*) und Erfahrungen von AWN und geo7 festgelegt (siehe *Tabelle 1*) und bei der probabilistischen Hangmurensimulation variiert (für Informationen zur Parameterwahl und Parametersensitivität siehe nachfolgendes *Kapitel 2*).

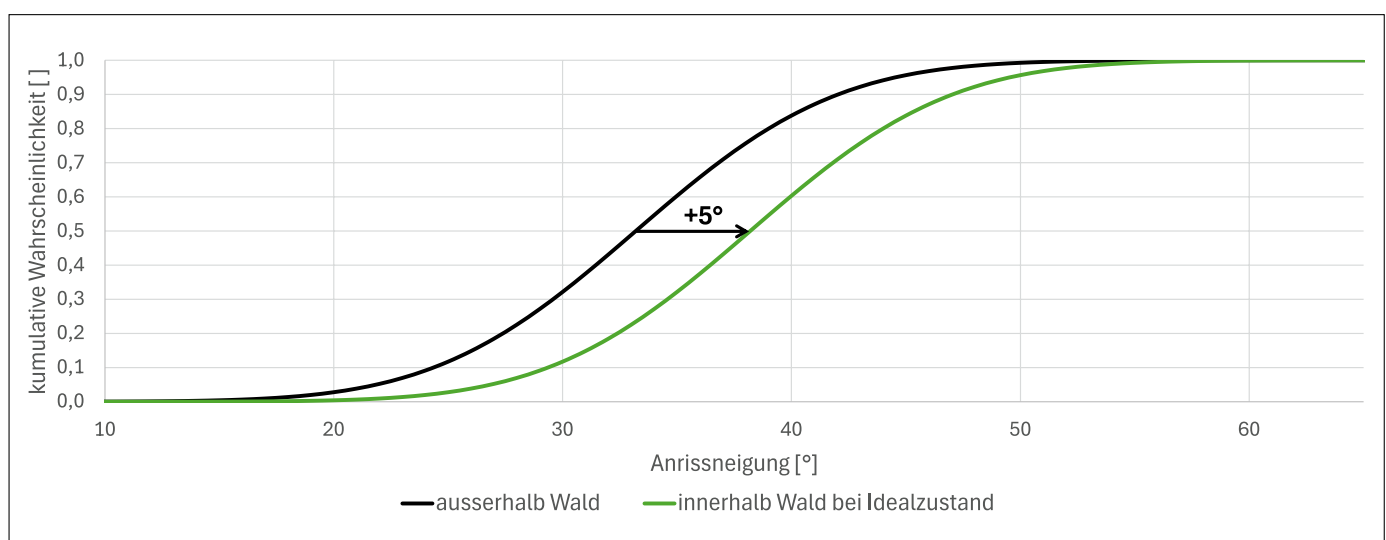


Bild 3: Kumulative Dichtefunktion der kritischen Hangneigung zur Auslösung von Hangmuren auf Freilandflächen (schwarze Linie) und auf bewaldeten Flächen bei einem idealen Deckungsgrad von mindestens 60 Prozent (grüne Linie) (Daten: *Hählen, 2023*).

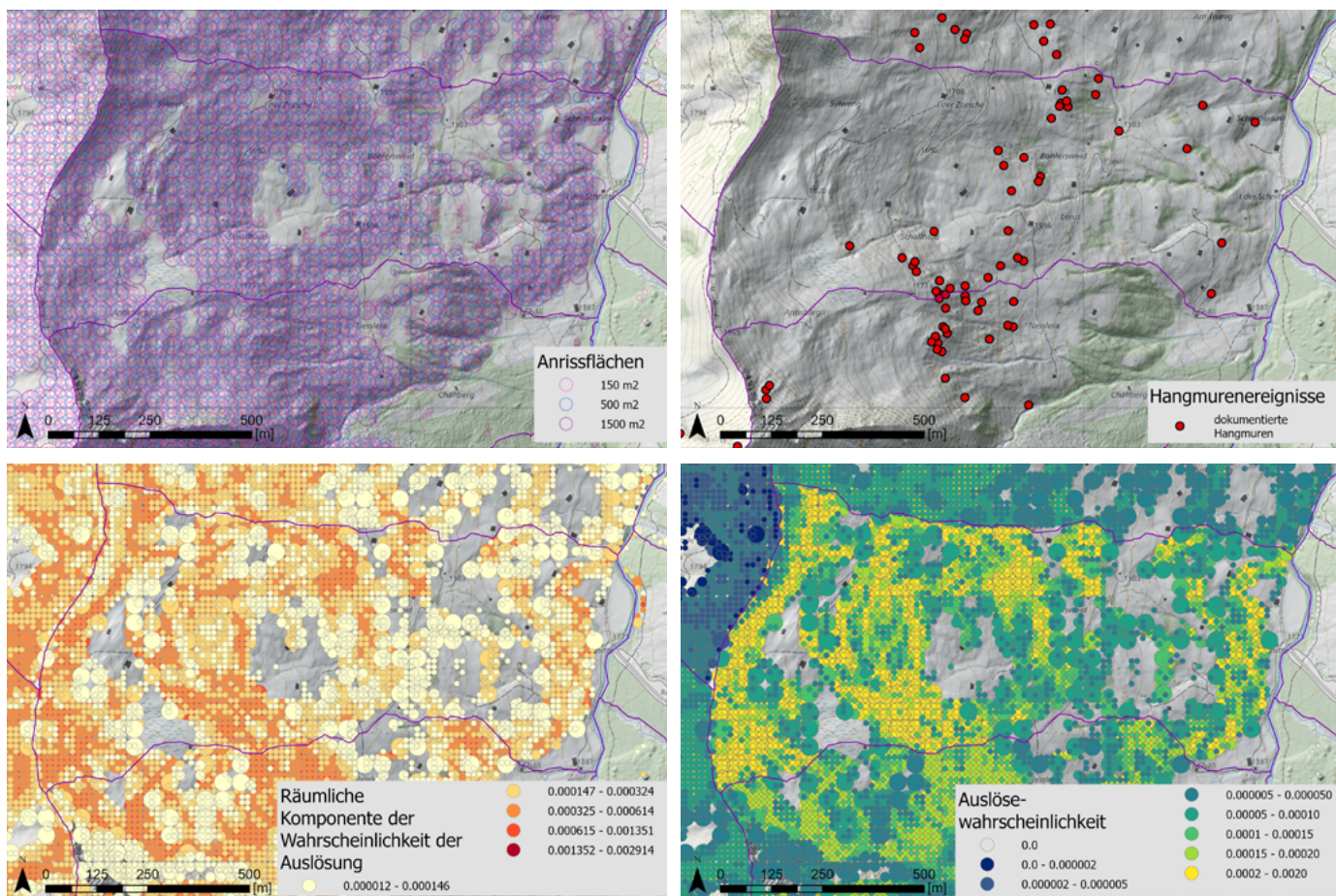


Bild 4: Links oben: sich überlagernde Anrissflächen mit drei verschiedenen Flächengrössen; rechts oben: dokumentierte Hangmurenereignisse aus dem Datensatz des AWN (Hählen, 2023); links unten: räumliche Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung ($P_{\text{räumlich}}$) normiert auf die Prozessquelle; rechts unten: Auslösewahrscheinlichkeit ($P_{\text{Auslösung}}$) von Hangmuren als Produkt der physikalischen Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung (P_{phys}) und der räumlichen Komponente der Wahrscheinlichkeit der Auslösung ($P_{\text{räumlich}}$) (Berechnungen geo7, Hintergrundkarte: © swisstopo).

2. Probabilistische Modellierung

Im Pilotprojekt wurde die Software AvaFrame (WLV & BFW, 2024) verwendet. Ursprünglich wurde das Modell für die Simulation von Lawinen entwickelt, kann aber bei entsprechender Wahl der Reibungsparameter auch für Hangmuren eingesetzt werden. AvaFrame ist eine Open Source Software und eignet sich daher sehr gut für die Einbindung in einen selbst programmierten Arbeitsablauf. Im Zuge der probabilistischen Modellierung wurden die Anrissfläche, die Anrissmächtigkeit (Auslöseeigenschaften) und die Reibungsparameter μ , ξ und τ (Prozess-Ablaufeigenschaften) variiert. Aus Performancegründen wurde die Anzahl der Ausprägungen für die Anrissfläche, Anrissmächtigkeit μ , ξ auf je drei und diejenige für τ auf zwei Ausprägungen beschränkt (siehe Tabelle 1). Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde sichergestellt, dass die Auswahl der verwendeten Parameter und die Limitierung auf drei bzw. zwei Parameterausprägungen keinen signifikanten Einfluss auf die Intensitätsfrequenzkurven haben, welche sich aus einer Vielzahl an Simulationen ableiten.

Die Anrissflächen wurden als kreisförmige Polygone mit einer Fläche von 150 m², 500 m² und 1500 m² definiert. Diese Kreisflächen wurden in einem regelmässigen Gitter über das gesamte Pilotgebiet positioniert, wobei sich die Polygone der drei Flächengrössen überlagerten (siehe Bild 4, links oben). Die Auswahl der Werte und deren Wahrscheinlichkeit basiert auf den empirischen Daten von WSL (2025) und AWN (Hählen, 2023) (siehe Kapitel 1.2).

Für jede dieser Anrissflächen wurde die mittlere Hangneigung basierend auf dem Höhenmodell swissAlti3D mit einer Rasterauflösung von 5x5 m berechnet. Anrissflächen mit einer mittleren Hangneigung < 20° und > 45° wurden gelöscht, da sie als zu flach bzw. zu steil für Hangmuren erachtet werden (Rickli, 2020). So verblieben im Pilotgebiet Adelboden insgesamt ca. 128 000 Anrissflächen von 3 verschiedenen Grössen, für die mit jeweils 3 Kombinationen der An-

Parameter	Ausprägung 1 (Wahrscheinlichkeit)	Ausprägung 2 (Wahrscheinlichkeit)	Ausprägung 3 (Wahrscheinlichkeit)
Anrissmächtigkeit (m) [m]	0,5 (0,35)	1 (0,53)	2 (0,12)
Anrissfläche (A) [m ²]	150 (0,53)	500 (0,38)	1500 (0,09)
Trockene Coulomb-Reibung (μ) [°]	0,05 (0,03)	0,25 (0,50)	0,375 (0,47)
Visko-turbulente Reibung (ξ) [m/s ²]	200 (0,47)	600 (0,43)	1250 (0,10)
Kohäsion (τ) [Pa]	500 (0,20)	1500 (0,80)	

Tabelle 1: Verschiedene Ausprägungen der Auslöse- und Ablaufeigenschaften und deren Wahrscheinlichkeiten (in Klammern angegeben) für die probabilistische Hangmurensimulation mit AvaFrame, wie sie im Rahmen des Pilotgebiets in Adelboden verwendet wurden. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten je Zeile ergibt 1; simuliert wurde mit allen möglichen Kombinationen.

rissmächtigkeit sowie 18 Kombinationen der 3 Reibungsparameter (siehe *Tabelle 1*) Hangmurensimulationen mit AvaFrame durchgeführt wurden.

Der Rechenaufwand für die insgesamt 6,9 Mio. Simulationen betrug auf einem Computer mit 20 Rechenkernen à 2,4 GHz und 64 GB RAM ca. 3 Monate. Das Datenaufkommen der AvaFrame-Simulationen betrug 560 GB an Speichervolumen. Für das Datenhandling und die Auswertung der Simulationsergebnisse wurden die Simulationen in einen eigens dafür entwickelten, speicher-effizienten «Datenwürfel» aggregiert, der ein Speichervolumen von 3,8 GB aufweist. Für eine Erstellung von Schadenfrequenzkurven benötigt man jedoch den vollen Ereignisdatensatz.

3. Ergebnisse

Aus den simulierten Einzelereignissen und deren zugehörigen Wahrscheinlichkeit lassen sich verschiedene Produkte ableiten, die bei der Gefahrenbeurteilung zusätzliche Informationen liefern können. So sind zum

Beispiel in *Bild 5* Intensitätsfrequenzkurven für neun Standorte am Hang «Im Trunig» für die Fliesstiefe von simulierten Hangmuren dargestellt. Um eine Intensitätsfrequenzkurve für einen Standort zu generieren, werden alle Fliesstiefen der Simulationen, die einen bestimmten Standort betreffen, aus dem Gesamtdatensatz herausgesucht, nach absteigender Grösse sortiert und entsprechend ihrer Überschreitungswahrscheinlichkeit ins Diagramm eingetragen. Berücksichtigt man neben der Prozessintensität auch den verursachten Schaden, so können anhand der probabilistischen Modellierungen auch durchgehende Schadenfrequenzkurven für einzelne Objekte und Objektgruppen generiert werden.

Aus einer Intensitätsfrequenzkurve bzw. Schadenfrequenzkurve kann abgelesen werden, mit welcher Überschreitenswahrscheinlichkeit mit bestimmten Intensitäten bzw. Schäden an diesem Standort gerechnet werden muss oder bei welchen Wiederkehrperioden mit welcher Intensität bzw. Schäden zu rechnen ist. Der Verlauf der Intensitäts- oder Schadenfrequenzkurven ist für ver-

schiedene Standorte unterschiedlich und lässt zum Beispiel erkennen, ob sich eine Prozesskenngrösse (z.B. Fliesstiefe) bzw. der zu erwartende Schaden in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode eher graduell ändert oder ob es Sprünge gibt.

Eine andere Art der Auswertung der probabilistischen Simulationen sind Karten der Wiederkehrperioden definierter Fliesstiefen (*Bild 6*). Die Karten basieren auf der Darstellung der Intensitätsfrequenzkurven pro Rastergitterpunkt. Die Karte in *Bild 6* zeigt, mit welcher Wiederkehrperiode bzw. jährlichen Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Fliesstiefe (z.B. 0,5 m) an einem bestimmten Standort erreicht oder überschritten wird. Während geringe Fliesstiefen (z.B. 0,1 m) im gezeigten Beispiel noch vergleichsweise geringe Wiederkehrperioden von < 50 Jahren aufweisen, sind die Wiederkehrperioden grosser Fliesstiefen (z.B. 1 m) sehr hoch (> 500 Jahre). Ein bestimmter Kennwert kann also an vielen Stellen am Hang auftreten, jedoch variiert die zugehörige Überschreitenswahrscheinlichkeit räumlich unter Umständen stark.

Umgekehrt können auch Karten der Intensität (z.B. Fliesstiefe) einer gewissen Jährlichkeit generiert werden. Diese Karten können dann von einer Fachperson als eine von mehreren Grundlagen verwendet werden, um Gefahrenkarten-Klassen abzuleiten.

Die mit der probabilistischen Modellierung berechneten Wahrscheinlichkeiten bzw. Wiederkehrperioden sind nicht direkt vergleichbar mit jenen in den heutigen Gefahrenkarten. Bei letzteren wird einem simulierten Prozesskennwert, wie zum Beispiel einer bestimmten Fliesstiefe, die Wahrscheinlichkeit der Auslösung zugeordnet. Bei Hochwasser zum Beispiel ist das in der Regel die Wiederkehrperiode des Niederschlags oder des Abflusses im Gerinne. Bei der probabilistischen Modellierung aber wird die Überschreitenswahrscheinlichkeit oder Wiederkehrperiode am Ort der Einwirkung basierend auf der Wahrscheinlichkeit der Auslöse- und Ablaufeigenschaften bestimmt. So lässt sich erklären, warum die Überschreitenswahrscheinlichkeiten von probabilistischen Modellierungen häufig nicht den Jährlichkeiten der heutigen Herangehensweise entsprechen. Dies muss bei der Verwendung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

4. Möglichkeiten und Grenzen der probabilistischen Modellierung

Eine probabilistische Gefahrenmodellierung liefert Grundlagen für eine risikobasierte Planung und Entscheidungsfindung. Dies entspricht dem neuen Bundesgesetz über den

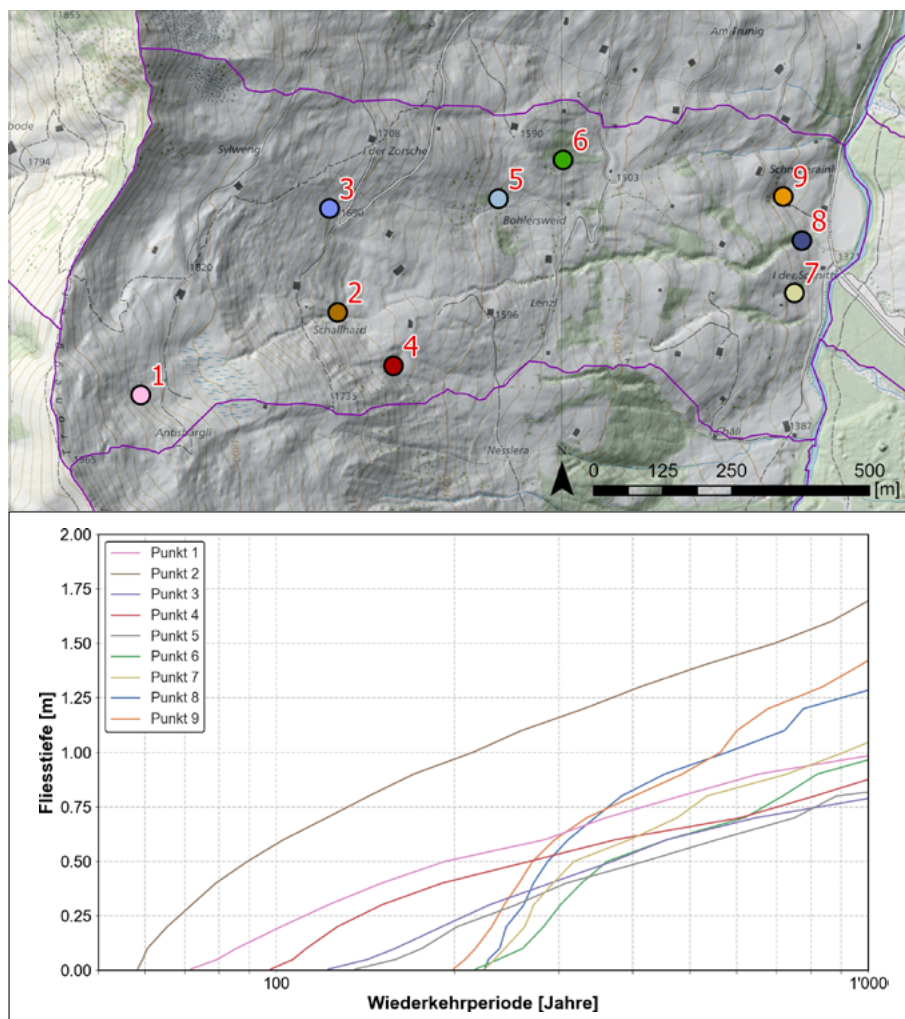


Bild 5: Intensitätsfrequenzkurven für die Fliesstiefe von simulierten Hangmuren für neun ausgewählte Standorte am Hang «Im Trunig», Gemeinde Adelboden (Berechnungen geo7, Hintergrundkarte: © swisstopo).

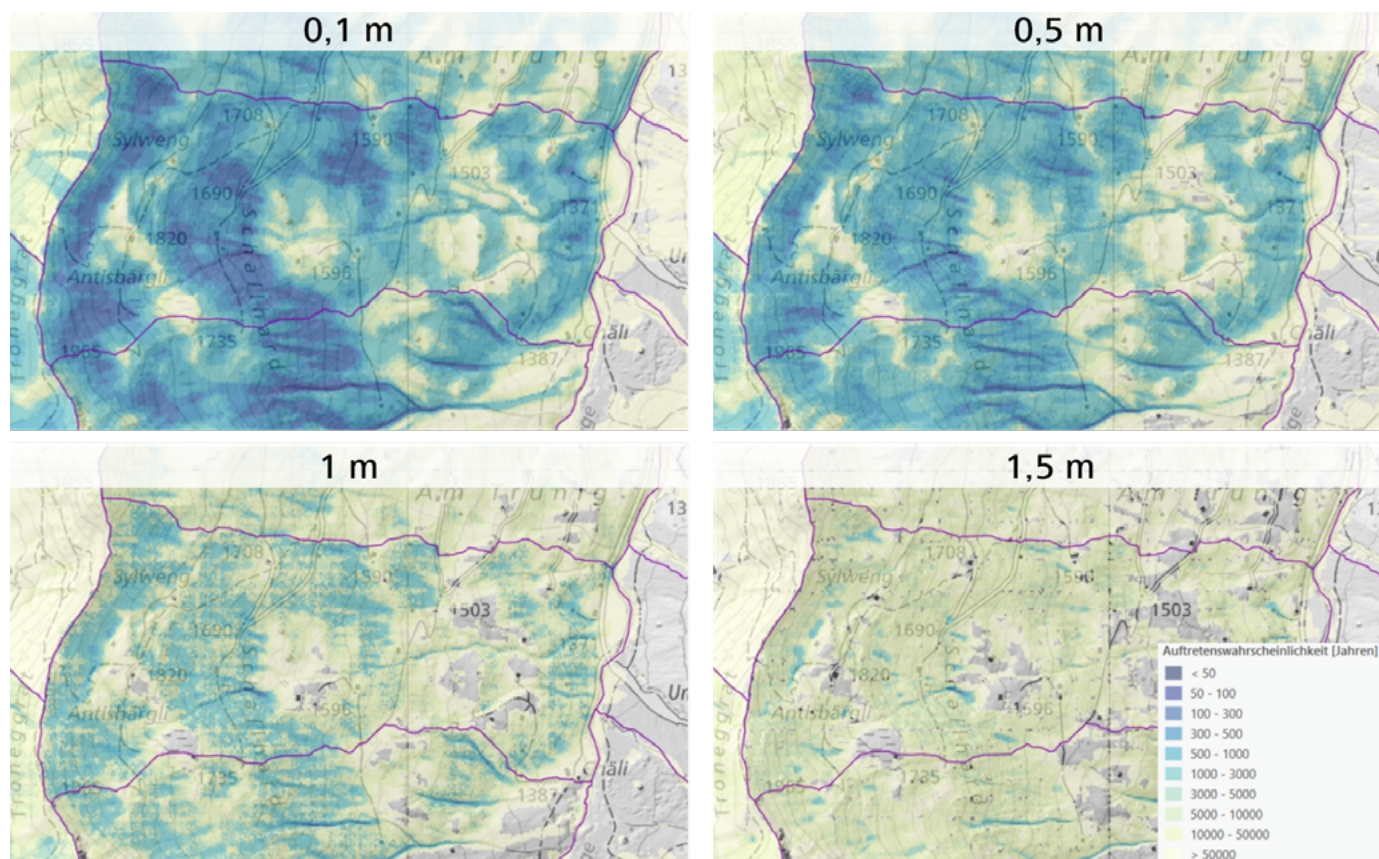


Bild 6: Karten der Wiederkehrperioden ausgewählter Fliesstiefen für Hangmurenereignisse einer Prozessquelle «Im Trunig», Gemeinde Adelboden (Berechnungen geo7, Hintergrundkarte: © swisstopo).

Wasserbau (WBG, 2023), das einen Wandel weg von der reinen Gefahrenabwehr hin zu einem integralen Risikomanagement fordert.

Demzufolge können probabilistische Gefahrenmodellierungen durch einen Verschnitt mit den Werten und deren Verletzlichkeit eine Grundlage für die Priorisierung von finanziellen Mitteln liefern, speziell, wenn mit der Methode grosse Gebiete, wie zum Beispiel ein ganzer Kanton, einheitlich bearbeitet werden.

Ein entscheidender Mehrwert probabilistischer Modellierungen ist, dass die Überschreitungswahrscheinlichkeit eines bestimmten Kennwerts räumlich differenziert abgebildet werden kann. Durch die grosse Zahl an Simulationen mit physikalisch plausiblen Eigenschaften können zudem auch sehr seltene Ereignisse in der Gefahrenbeurteilung mitberücksichtigt werden. Die geringe Überschreitungswahrscheinlichkeit eines seltenen Ereignisses bzw. einer seltenen Kombination aus Auslöse- und Abflaufeigenschaften sorgt dafür, dass diese seltenen Ereignisse im Endergebnis kein zu grosses Gewicht erhalten. Vorteil bei einer probabilistischen Modellierung ist jedoch, dass die sehr seltenen Ereignisse nicht völlig ausgeblendet werden und dadurch im Folgenden bei der gutachterlichen Gefahrenbeurteilung als Worst-Case-Szenario mitgedacht werden können.

Aus der Vielzahl an simulierten Ereignissen können mögliche Ereignisse herausgegriffen, im Detail betrachtet und z.B. als Basis für eine gutachterliche Gefahrenbeurteilung oder für die Entwicklung von Einsatzplänen verwendet werden. Diese Auswahl von Einzelereignissen kann einerseits basierend auf bestimmten Kombinationen von Auslöse- und Abflaufeigenschaften oder andererseits basierend auf der Überschreitungswahrscheinlichkeit erfolgen. Für den Objektschutz stellen die Intensitätsfrequenzkurven und Schadenfrequenzkurven eine wichtige Entscheidungsgrundlage bei der Massnahmenplanung und Optimierung von Massnahmenkombinationen dar.

Grundsätzlich können aus den probabilistischen Simulationen sowohl Intensitäts- als auch Gefahrenkarten, basierend auf den heute verwendeten Abgrenzungskriterien generiert werden. Wie eingangs erwähnt, erfordert jedoch die Gefahrenbeurteilung im Allgemeinen und die Erstellung einer Gefahrenkarte im Speziellen immer die Einschätzung einer Fachperson, welche zusätzlich auch ihr Prozessverständnis, die Situation vor Ort, Einträge über vergangene Ereignisse im Ereigniskataster, Aussagen von Anrainern etc. berücksichtigt.

Auch die Wahl der probabilistisch variierten Modellparameter muss durch eine Fachperson mit Prozesskenntnissen erfol-

gen. Selbst wenn bei Millionen von Simulationen nicht mehr jede einzelne Simulation gesichtet werden kann, ist es wichtig, stichprobenartig die Plausibilität der Modellierungen zu prüfen. Dies kann u.a. durch einen Vergleich von simulierten Ereignissen mit historischen Ereignissen mit einer vergleichbaren Auslöseintensität, durch eine Beurteilung der Trefferwahrscheinlichkeit bzw. Nichttrefferwahrscheinlichkeit oder durch eine Kontrolle des Verlaufs der Intensitätsfrequenzkurven auf unerklärliche Sprünge erfolgen.

Für manche Auslöse- und Abflaufeigenschaften ist es herausfordernd, die verwendeten Parameterausprägungen und zugewiesenen Wahrscheinlichkeiten aus empirischen Häufigkeitsverteilungen abzuleiten. Hier kann eine Sensitivitätsanalyse zeigen, wie viel oder wie wenig Einfluss die Wahl der Parameterausprägungen und die zugewiesenen Wahrscheinlichkeiten auf die letztlich relevanten Intensitätsfrequenzkurven haben. Sollte sich bei gleichbleibenden Parameterausprägungen nur die Wahrscheinlichkeit der Parameterausprägungen oder die Häufigkeit von Hangmuren ändern, so können die Intensitätsfrequenzkurven ohne Neusimulation der Hangmurenereignisse aktualisiert werden. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn sich mit dem Klimawandel die Häufigkeit von Hangmuren ändert, nicht

aber die Reibungsparameter der Hangmuren-simulation.

Wie bei jeder Modellierung werden die komplexen Prozesse vereinfacht abgebildet. Daher beziehen sich die ausgewiesenen Unsicherheiten auf die im Modell abgebildeten Unsicherheiten. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse ebenfalls berücksichtigt werden. Die Wahl der Parameterausprägungen und deren Wahrscheinlichkeit stützen sich jedoch bei der vorgestellten Methodik auf empirische Daten wie zum Beispiel die Datenbank der WSL (2025) und des AWN (Hählen, 2023).

5. Fazit und Ausblick

Im Zuge dieses Pilotprojekts wurde eine neue Methodik zur probabilistischen Modellierung von Hangmuren entwickelt, an einem Fallbeispiel in Adelboden angewendet und die technische Machbarkeit aufgezeigt. Es konnte dargelegt werden, wie die probabilistisch variierten Auslöse- und Ab-laufeigenschaften und deren Wahrscheinlichkeiten basierend auf empirischen Daten von dokumentierten Hangmurenereignissen möglichst objektiv festgelegt werden können. Für eine grossflächige Anwendung der Methode empfiehlt sich eine regionale Differenzierung der Parameterausprägungen und deren Wahrscheinlichkeiten, basierend auf den vorhandenen Datensätzen wie z. B. der WSL (2025) und des AWN (Hählen,

2023). Damit einher gehen auch eine erneute Sensitivitätsanalyse und kritische Prüfung einzelner Simulationsergebnisse anhand dokumentierter Ereignisse. Hierbei empfiehlt sich ein Split Sampling Test, um die Unabhängigkeit der Daten zur Kalibrierung und Validierung zu gewährleisten. Dabei wird der eine Teil des Datensatzes für die Sensitivitätsanalyse und der andere Teil für die Validierung verwendet.

Weiter besteht das Potenzial zur Verbesserung bei der Berechnung der Auslösewahrscheinlichkeit ($P_{\text{Auslösung}}$) mittels eines geostatistischen Ansatzes und bei der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ($P_{\text{räumlich}}$) durch einen mehr physikalisch basierten Hangstabilitätsansatz (z. B. *Montgomery & Dietrich, 1994; Kissling, 2024*). Auch der Niederschlag sollte als erklärende Variable berücksichtigt werden, um so in weiterer Konsequenz auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Auslösewahrscheinlichkeit ($P_{\text{Auslösung}}$) quantifizieren zu können. Leider fehlen aber bereits bei den heute dokumentierten Hangmurenereignissen grossteils Informationen zu den auslösenden Niederschlägen. Umso wichtiger ist eine Ergänzung und Weiterführung der langjährigen Ereignisdokumentation.

Rechenzeit und Speicherbedarf für die Vielzahl an probabilistischen Simulationen sind zurzeit zwar noch herausfordernd und eine Anwendung der Methode auf einen ganzen Kanton bedarf einer Cloud-Computing-

Infrastruktur. Die resultierenden Intensitätsfrequenzkurven und Karten der Wiederkehrperiode bestimmter Prozesskennwerte, wie zum Beispiel der Fliesstiefe, bieten aber als zusätzliche und detaillierte Datengrundlage einen grossen Mehrwert für die Gefahrenbeurteilung und können in die heute etablierte Praxis integriert werden. Auch ergeben sich mit dem Ansatz der probabilistischen Gefahrenmodellierungen und den daraus erzielten Resultaten die Möglichkeit für verbesserte Analysen im Rahmen des integralen Risikomanagements.

Danksagung

Wir danken *Ursin Caduff* und *Rainer Gardeweg* von geo7 für die programmiertechnische Umsetzung des Arbeitsablaufs und der statistischen Datenauswertung sowie *Maike Schneider* für das Lektorat. Wir danken *Felix Österle* vom Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) für die Beantwortung technischer Fragen zu AvaFrame und den Mitgliedern der Begleitgruppe des Pilotprojekts für die konstruktiven Diskussionen.

Quellen:

Aller D., Berger C., Hählen N., Jordi M., Kleinn J., Peter A., Rinderer M. (2025): Pro-Mo: probabilistische Gefahren- und Risikomodellierung. Methodik-Bericht für Interessierte und Anwenderinnen (Stand 8. August 2025). Bern.
Bartelt P., Bieler C., Buehler Y., Christen M., Deubelbeiss Y., Graf C., McArdell B.W., Salz M. & Schneider M. (2017): User Manual v1.7 – Debris Flow. A numerical model for debris flows in research and practice. Tech. rept. v1.7. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Birmensdorf. 109 S.
Dorren L., Bebi P., Dumollard, G., Erbach A., Fischer C., Ginzler C., Horneber, H., May, D., Rosset C., Schaller C., Waser L., Weber D. (2021): FINT-CH Grossflächige Erfassung von Waldstrukturen und dazugehörigen Kennzahlen mittels Waldstrukturabgrenzung und Einzelbaumdetektion basierend auf luftgestützten Fernerkundungsdaten. Projekt-Schlussbericht BFH-HAFL Zollikofen, WSL Birmensdorf/Davos, 56 S. + Anhang.
Frehner, M.; Wasser, B.; Schwitler, R. (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.
Hählen N. (2023): Kenngrössen zu spontanen Rutschungen basierend auf der Digitalisierung von Ereignissen ab Orthofotos. Hrsg. Amt für Wald und Naturgefahren (AWN), 18 S.
Kissling E. (2024): Proof-of-Concept einer probabilistischen Gefahrenbeurteilung von Hangmuren in Adelboden mit STEP-TRAMM und RAMMS. Masterarbeit am Departement der Systemwissenschaften ETH Zürich.

Kleinn J., Bühler Y., Glaus J., Aller D., Peter A., Hählen N. (2025, in Vorbereitung): Probabilistic modelling of mass movements for avalanche hazard and risk assessment.
Kleinn J., Borner J., Aller D., Peter A., Hählen N. (2025, in Vorbereitung): Probabilistic modelling for rockfall hazard and risk assessment.
Loup B., Egli T., Stucki M., Bartelt P., McArdell B., Baumann R. (2012): Impact pressure of hillslope debris flows. Back-calculation and simulation (RAMMS). INTERPRAEVENT 21012, Grenoble. S. 225-236.
Montgomery D., Dietrich W. (1994): A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. Water Resources Research 30, S. 1153-1171.
Rickli C. (2020): Dokumentation von spontanen flachgründigen Rutschungen und Hangmuren. Ingenierbiologie 3, S. 44-50.
Rickli C., Graf F. (2009): Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland. In: Forest, Snow and Landscape Research 82 (1), S. 33-44.
Rickli C., Graf F., Bebi P., Bast A., Loup B., McArdell B. (2019): Schützt der Wald vor Rutschungen? Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank. In: Schweizer Zeitschrift für Forstwesen 170 (6), S. 310-317.
StorMe (2025): Naturereigniskataster Bundesamt für Umwelt BAFU.
WGB (2023): Bundesgesetz über den Wasserbau vom 10. März 2023. Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft.
WLW Wildbach- und Lawinenverbauung, BFW Institut für Naturgefahren des Bundesforschungszentrums für Wald (2024): AvaFrame The Open Avalanche Framework (<https://docs.avaframe.org/en/latest/index.html>) Zugriff 25.09.2024).
WSL Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (2025): Datenbank flachgründige Rutschungen und

Hangmuren, <https://hangmuren.wsl.ch/>, letzter Zugriff am 11. April 2025

Zimmermann F. (2012): Modellierung von Hangmuren mit RAMMS unter Verwendung einer mittels GEOLEP-Methode bestimmten Kohäsion. Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien. 102 S.
Zimmermann F., McArdell B., Rickli C., Scheidl C. (2020): 2D Runout Modelling of Hillslope Debris Flows, Based in Well-Documented Events in Switzerland. Geosciences 10, S. 70–87.

Autorinnen und Autoren

Michael Rinderer, Catherine Berger, geo7 AG geowissenschaftliches Büro, Neufeldstrasse 5 – 9, 3012 Bern, michael.rinderer@geo7.ch, catherine.berger@geo7.ch
Nils Hählen, Adrian Peter, Amt für Wald und Naturgefahren, Kanton Bern, Schloss 2, 3800 Interlaken, nils.haehlen@be.ch, adrian.peter@be.ch
Jan Kleinn, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Flüelastrasse 11, 7260 Davos Dorf, jan.kleinn@slf.ch
Dörte Aller, Aller Risk Management, Ausserdorfstrasse 16, 8052 Zürich, aller@aller-risk.ch
Corinne Singeisen, Martin Jordi, Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen, Bundesgasse 20, Postfach, 3001 Bern, martin.jordi@vkg.ch