

---

**Bericht Nr. 1425072.1**

---

**Amt für Wald und Naturgefahren (AWN), Interlaken**

## **Kanton Bern, Auslösewahrscheinlichkeit Hangmuren**

**Technischer Bericht**

**12. März 2026**

Autor(en)	Bearbeitete Themen
Corinne Singeisen	Gesamter Bericht
Marta Siebel	Aufbereitung Grundlagendaten, Multiple Logistische Regression
Supervision	Visierte Inhalte
Rachel Riner	Gesamter Bericht
Emanuel Huber	Statistische Auswertungen
Hinweise	

GEOTEST AG



Rachel Riner



Corinne Singeisen

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	5
2.	Vorhandene Grundlagen und Datensätze.....	5
3.	Konzept der Auslösewahrscheinlichkeit.....	6
4.	Wahrscheinlichkeit der Anrissflächen ( <b>PA</b> ).....	8
4.1	Methodik.....	8
4.2	Resultate.....	10
4.2.1	Globale Anrissflächenverteilung.....	10
4.2.2	Häufigkeitsverteilung der Anrissflächen in repräsentativen Regionen.....	11
4.3	Diskussion.....	13
4.4	Produkte.....	13
5.	Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ( <b>Präumlich</b> ).....	14
5.1	Ausscheidung von NoSlide-Gebieten.....	14
5.1.1	Methodik.....	14
5.1.2	Resultate.....	14
5.1.3	Diskussion.....	15
5.2	Modellierung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens in den Testgebieten.....	16
5.2.1	Methodik.....	16
5.2.2	Resultate.....	19
5.2.3	Diskussion.....	20
5.3	Modellierung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens für den Kanton Bern mittels multipler logistischer Regression.....	21
5.3.1	Verwendete Datensätze.....	21
5.3.2	Methodik.....	23
5.3.3	Korrektur pro Bezugsraum.....	26
5.3.4	Resultate.....	27
5.3.5	Diskussion.....	29
5.4	Produkte.....	30
6.	Anriss-Wahrscheinlichkeit ( <b>PHangmuren</b> ).....	32
6.1	Methodik.....	32
6.1.1	Herleitung des Korrekturfaktors Ereigniskataster $FK_{EK}$ .....	32
6.1.2	Herleitung des Korrekturfaktors Swissimage $FK_{SI}$ .....	33
6.1.3	Bezugsräume ohne bekannte Ereignisse.....	34
6.1.4	Herleitung der mittleren Wiederkehrperiode pro Bezugsraum.....	34
6.1.5	Herleitung der mittleren Wiederkehrperiode und Anriss-Wahrscheinlichkeit pro Rasterpixel.....	34
6.2	Resultate.....	35
6.2.1	Korrekturfaktor Ereigniskataster $FK_{EK}$ und Korrekturfaktor Swissimage $FK_{SI}$ ...	35
6.2.2	Mittlere Wiederkehrperioden und Anriss-Wahrscheinlichkeit.....	36

6.3	Diskussion .....	37
6.4	Produkte .....	38
7.	Zusammenfassung und Ausblick .....	40
8.	Referenzen .....	42

## 1. Einleitung

Für den gesamten Kanton Bern wird im Rahmen des Projektes ProBE eine flächige, wahrscheinlichkeitsbasierte Prozessmodellierung für spontane, flachgründige Rutschungen durchgeführt. Das Projekt ProBe baut dabei auf den Erkenntnissen aus dem Pilotprojekt Pro-Mo auf, welches die wahrscheinlichkeitsbasierte Prozessmodellierung für spontane, flachgründige Rutschungen im Pilotgebiet Adelboden getestet hat [5]. Das Projekt ProBe Hangmuren besteht aus drei Teilprojekten: 1) Ereigniswahrscheinlichkeit (bestehend aus der Auslösewahrscheinlichkeit und der Wahrscheinlichkeit des Prozessablaufs), 2) Erarbeitung Datensatz zu Ablaufparameter abgeleitet aus bekannten Ereignissen und 3) Prozessmodellierung, Datenprozessierung und Datenmanagement. Die Federführung des Projektes obliegt dem AWN, Abt. Naturgefahren des Kantons Bern.

Das von der GEOTEST AG bearbeitete Teilprojekt befasst sich mit der Auslösewahrscheinlichkeit von spontanen, flachgründigen Rutschungen über den gesamten Kanton Bern, welche Bestandteil der Ereigniswahrscheinlichkeiten sind. Die Herleitung der Auslösewahrscheinlichkeit von spontanen, flachgründigen Rutschungen wurde im Rahmen dieses Projekts (weiter)entwickelt und folgt drei Hauptarbeitsschritten, welche im Pflichtenheft [4] definiert sind (Abbildung 1).

## 2. Vorhandene Grundlagen und Datensätze

Für die Projektbearbeitung standen die folgenden zentralen Datensätze des AWN zur Verfügung:

- [1] Inventar von total 32'183 Anrisspunkten spontaner, flachgründiger Rutschungen, welche aus dem Ereigniskataster, sowie Kartierungen ab Swisimage, regionalen Orthophotos und der WSL-Hangmurendatenbank zusammengetragen wurden. Datensatz BE\_SL\_2025, Datenlieferung AWN vom 10. Juli 2025.
- [2] Inventar von total 11'750 Anrisspolygonen spontaner, flachgründiger Rutschungen, welche aus Kartierungen ab Swisimage stammen. Datenlieferung AWN vom 8. September 2025.
- [3] Prozessquellen für den Kanton Bern inkl. 500 m Puffer (total 5'032), Datenlieferung AWN vom 23. Dezember 2025.

Das Projekt basiert auf Basis der folgenden zentralen Grundlagen:

- [4] Kanton Bern (2025): Pflichtenheft Anriss-Wahrscheinlichkeit spontaner, flachgründiger Rutschungen für probabilistische Prozessmodellierungen.
- [5] Kleinn J., Berger C., Aller D., Rinderer M., Hählen N., Peter A., Singeisen C., Jordi M. (2025): Pro-Mo: probabilistische Gefahren- und Risikomodellierung für gravitative Naturgefahren. Schlussbericht zum Pilotprojekt. WSL Bericht 177, 109 S., [doi.org/10.55419/wsl:41550](https://doi.org/10.55419/wsl:41550)
- [6] Schaller, C., Cohen D., Dorren, L. (2025): Wahrscheinlichkeitsbasierte Kartierung Sturz- und Rutschgefahren - Pilot Adelboden (BE). Schlussbericht - BFH-HAFL - Zollikofen / CoSCI LLC, 48 S.

Weitere Literatur und im Projekt verwendete Datensätze sind in Kapitel 8 referenziert.

### 3. Konzept der Auslösewahrscheinlichkeit

Die Auslösewahrscheinlichkeit ( $P_{Auslösung}$ ) ist die spezifische Wahrscheinlichkeit, dass sich ein bestimmtes Ereignis an einem bestimmten Ort auslöst [5]. Diese setzt sich zusammen aus der Wahrscheinlichkeit der physikalischen Anrisseigenschaften ( $P_{phys}$ ), einer räumlichen Komponente der Auslösung ( $P_{räumlich}$ ) sowie der Anriss-Wahrscheinlichkeit ( $P_{Hangmuren}$ ), welche die Häufigkeit von Ereignissen abbildet [5], siehe Abbildung 1, Eq. 1.

$$P_{Auslösung} = P_{phys} \cdot P_{räumlich} \cdot P_{Hangmuren} \quad \text{Eq. 1}$$

Die Wahrscheinlichkeit der Anrisseigenschaften ( $P_{phys}$ ) beinhaltet die Wahrscheinlichkeit der Anrissflächen ( $P_A$ ) und -mächtigkeit ( $P_h$ ), sowie die Materialdichte ( $P_\rho$ ). In diesem Projekt wurde gemäss Pflichtenheft [4] für die Wahrscheinlichkeit der Anrisseigenschaften ( $P_{phys}$ ) nur die Wahrscheinlichkeit der Anrissflächen ( $P_A$ ) betrachtet. Die Wahrscheinlichkeit der Anrissmächtigkeit ( $P_h$ ), sowie die Wahrscheinlichkeit der Materialdichte werden im Rahmen anderer Teilprojekte hergeleitet [4][13].

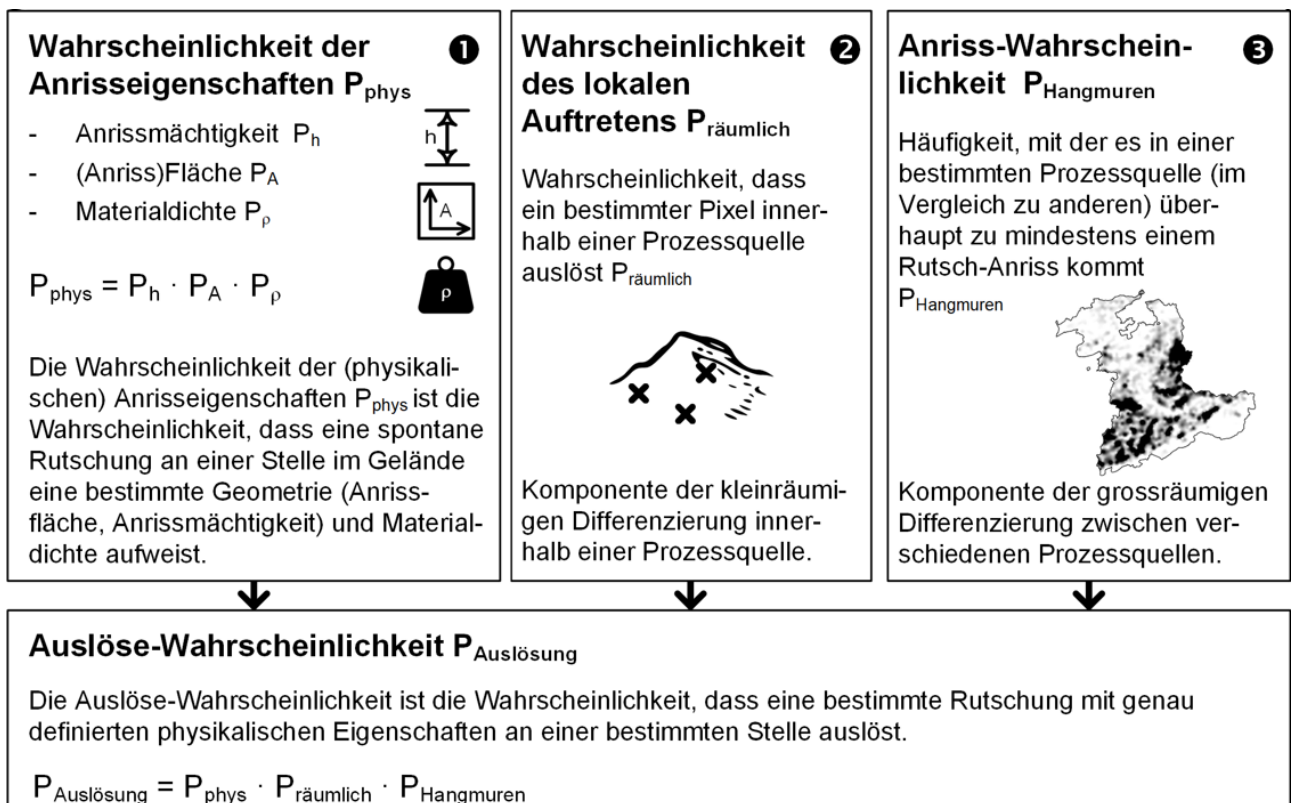


Abbildung 1 Konzept der Auslöse-Wahrscheinlichkeit. Abbildung: AWN.

Gemäss dem obigen Konzept der Auslöse-Wahrscheinlichkeit sind deren Komponenten weitgehend voneinander unabhängig und beziehen sich jeweils auf einen Raum im Gelände, den sogenannten Bezugsraum. Damit aus der Verrechnung der Teilwahrscheinlichkeiten die korrekte absolute Auslöse-Wahrscheinlichkeit

resultiert, muss die Summe der Wahrscheinlichkeit der Anrisseigenschaften ( $P_{phys}$ ), sowie der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ( $P_{räumlich}$ ) pro Bezugsraum je 1 ergeben.

Die folgenden Kapitel beschreiben die Methodik und Resultate der Wahrscheinlichkeit der Anrissfläche ( $P_A$ ) (**Kapitel 4**), der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ( $P_{räumlich}$ ) (**Kapitel 5**) und der Anriss-Wahrscheinlichkeit ( $P_{Hangmuren}$ ) (**Kapitel 6**).

## 4. Wahrscheinlichkeit der Anrissflächen ( $P_A$ )

### 4.1 Methodik

Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit von Anrissflächen wurden die Häufigkeitsverteilung der Anrissflächen in repräsentativen Regionen aus dem Inventar der Anrissflächen unterteilt [2]. Gemäss [4] sind 20 – 30 repräsentative Regionen zu bestimmen, welche die lokalen Gegebenheiten bestmöglich berücksichtigen und sich in Bezug auf Mittelwert und Standardabweichung der Anrissflächen unterscheiden. Die gleiche Region kann mehrere Polygone umfassen, die nicht aneinandergrenzen.

Folgende Auswertungen wurden durchgeführt:

- (1) **Definition der relevanten lokalen Gegebenheiten:** Es sind lokale Gegebenheiten zu berücksichtigen, welche die Anrissfläche von Hangmuren beeinflussen können. Anzahl und Auflösung der verwendeten Datensätze wurde bewusst tief gehalten, um eine zu kleinräumige Ausscheidung von Regionen zu verhindern. Zudem konnten nur Eigenschaften berücksichtigt werden, zu denen flächige Informationen vorliegen. Folgende Datensätze wurden berücksichtigt:
  - **Geologie – «litho»** (Lithologische Karte 1:500'000 – Lithologie aggregiert [11], Verwendung als Raster mit Auflösung 100 m): Dieser Datensatz berücksichtigt einen möglichen lithologisch-petrografischen Einfluss auf die Anrissflächen.
  - **Hangneigung/ Pauschalgefälle – «slope»** (swissALTI3D [20], Auflösung resampled auf 100 m): Die grobmassstäbliche Hangneigung ist ein Mass für das Pauschalgefälle von Hängen und kann die Häufigkeitsverteilung von Anrissflächen aufgrund der Ausdehnung von möglich anfälligen Gebieten beeinflussen.
  - **Höhenlage – «elevation»** (swissALTI3D [20], Auflösung resampled auf 100 m): Dieser Datensatz erfasst mit der Höhenlage variierende topographische und klimatische Bedingungen, welche die Anrissfläche beispielsweise durch sich verändernde Vegetationstypen und Bodenmächtigkeiten beeinflussen können.
  - **Hangorientierung, normiert – «aspect»** (swissALTI3D [20], Auflösung resampled auf 100 m): Die Hangexposition kann die Anrissflächengrösse aufgrund von variierender Niederschlagsintensität und Geologie beeinflussen. Um die Hangorientierung als kontinuierlichen Wert verwenden zu können, wurde folgende Formel zur Normierung verwendet:
$$aspect_{norm} = \frac{1 - \cos\left(\frac{aspect \cdot \pi}{180}\right)}{2}$$
Aufgrund dieser Normierung variieren die Werte zwischen 0 und 1, wobei Norden ( $0^\circ$  und  $360^\circ$ ) der Wert 0 und Süden ( $180^\circ$ ) der Wert 1 zugewiesen wird.
  - **Geografische Regionen – «region»** (gem. Lieferung AWN): Dieser Datensatz basiert auf einer geografischen Unterteilung des Kantons Bern in sieben Regionen und wurde als Proxy für die hydroklimatischen Bedingungen verwendet.
  - **Niederschlag – «precipitation»** (HADES, 100-jährlicher Extremniederschlag, 60 min Niederschlagsdauer [14]): Die Intensität von Niederschlag kann die Anrissfläche von

Hangmuren ebenfalls beeinflussen und wurde in der Form der Extremniederschlagskarte berücksichtigt.

- **Hydrogeologische Karte – «groundwater»** (Lithologische Karte 1:500'000 – Hydrogeologie [11], Verwendung als Raster mit Auflösung 100 m): Die hydrogeologischen Eigenschaften können die Anrissflächen von Hangmuren aufgrund der Verfügbarkeit von Wasser, beispielsweise durch im Hang anfallendes Schicht- oder Quellwasser, beeinflussen.

- (2) **Bestimmung von Regionen mit ähnlichen lokalen Gegebenheiten:** Mittels einer K-Means Clusteranalyse<sup>1</sup> wurden verschiedene Modelle hergeleitet, welche den Kanton in Regionen (d.h. Clusters) mit ähnlichen Gegebenheiten aufteilen. Zur Herleitung der verschiedenen Modelle wurden verschiedene Eingangsparameter gewählt. Es wurden Modelle mit 30 und 50 Regionen (d.h. Anzahl Clusters), sowie unterschiedlicher Kombinationen möglicher relevanter lokaler Gegebenheiten (d.h. Eingangsparameter) erstellt (siehe Tabelle 1). Daraus ergeben sich 60 Modelle, welche den Kanton in Regionen aufteilen und möglicherweise repräsentativ sind in Bezug auf die Häufigkeitsverteilung von Anrissflächen. In allen Modellen werden Cluster, die weniger als 100 Ereignisse (aus dem Datensatz der Anrisspolygone [2]) beinhalten, dem nächstähnlichen Cluster zugeordnet. Die resultierende Anzahl Regionen in den Modellen weicht deshalb von der eingangs definierten Anzahl Cluster ab.
- (3) **Herleitung der Häufigkeitsverteilung von Anrissflächen pro Region für alle erstellten Modelle:** Für jedes der Modelle wird pro Region eine Häufigkeitsverteilung und normierte kumulative Häufigkeitsverteilung der Anrissflächen [0...1] hergeleitet.
- (4) **Bestimmung der repräsentativen Regionen basierend auf der Häufigkeitsverteilung von Anrissflächen:** Das repräsentativste Modell von Regionen ist jenes, in welchem sich die Häufigkeitsverteilungen der Anrissflächen in den Regionen am stärksten voneinander unterscheiden. Zur Bestimmung des Modells mit den sich am stärksten unterscheidenden normierten kumulierten Häufigkeitsverteilungen, wurde die horizontale Distanz zwischen den Verteilungen mit der Wasserstein-Methode<sup>2</sup> ermittelt. Für jede Häufigkeitsverteilung in jedem Modell wurde die Wasserstein-Distanz zu allen übrigen Häufigkeitsverteilungen in diesem Modell berechnet. Daraus wird die mittlere Wasserstein-Distanz pro Modell errechnet. Das Modell mit der höchsten mittleren Wasserstein-Distanz entspricht somit den repräsentativsten Regionen.

---

<sup>1</sup> Die K-Means-Clusteranalyse ist ein statistisches Verfahren, das Daten anhand ähnlicher Eigenschaften automatisch in Gruppen einteilt, sodass innerhalb einer Gruppe möglichst ähnliche und zwischen den Gruppen möglichst unterschiedliche Eigenschaften vorliegen.

<sup>2</sup> Die Wasserstein-Methode ist ein mathematisches Verfahren zur Messung des Unterschieds zwischen zwei Verteilungen, indem sie bestimmt, wie stark eine Verteilung „verschoben“ werden müsste, um der anderen zu entsprechen.

Tabelle 1 Verwendete K-Means Cluster Modelle zur Bestimmung repräsentativer Regionen von Anrissflächenverteilungen. Für jede Kombination von Eingangsparametern wurde eine Anzahl Cluster von 30 und 50 getestet.

Eingangsparameter	Anzahl Cluster	30	50
litho, elevation, slope, region, aspect, precipitation, groundwater			
litho, elevation, region, groundwater			
litho, slope, region, groundwater			
litho, aspect, region, groundwater			
litho, precipitation, region, groundwater			
litho, elevation, slope			
litho, elevation, aspect			
litho, elevation, region			
litho, elevation, groundwater			
litho, slope, precipitation			
litho, slope, region			
litho, slope, groundwater			
litho, aspect, precipitation			
litho, aspect, region			
litho, aspect, groundwater			
litho, precipitation, region			
litho, precipitation, groundwater			
litho, region, groundwater			
litho, region, groundwater			
elevation, slope, region			
elevation, slope, groundwater			
elevation, aspect, region			
elevation, aspect, groundwater			
elevation, precipitation, region			
elevation, precipitation, groundwater			
elevation, region, groundwater			
slope, precipitation, region			
slope, precipitation, groundwater			
slope, precipitation, region			
aspect, precipitation, groundwater			

## 4.2 Resultate

### 4.2.1 Globale Anrissflächenverteilung

Werden alle Anrisspolygone [2] im Kanton betrachtet, beträgt der Mittelwert der Anrissflächen 183 m<sup>2</sup> mit einer Standardabweichung von 287 m<sup>2</sup> (Abbildung 2). Die maximale kartierte Anrissfläche beträgt ca. 9700 m<sup>2</sup>, wobei die häufigsten Hangmuren-Anrissflächen zwischen ca. 20 m<sup>2</sup> und ca. 400 m<sup>2</sup> gross sind.

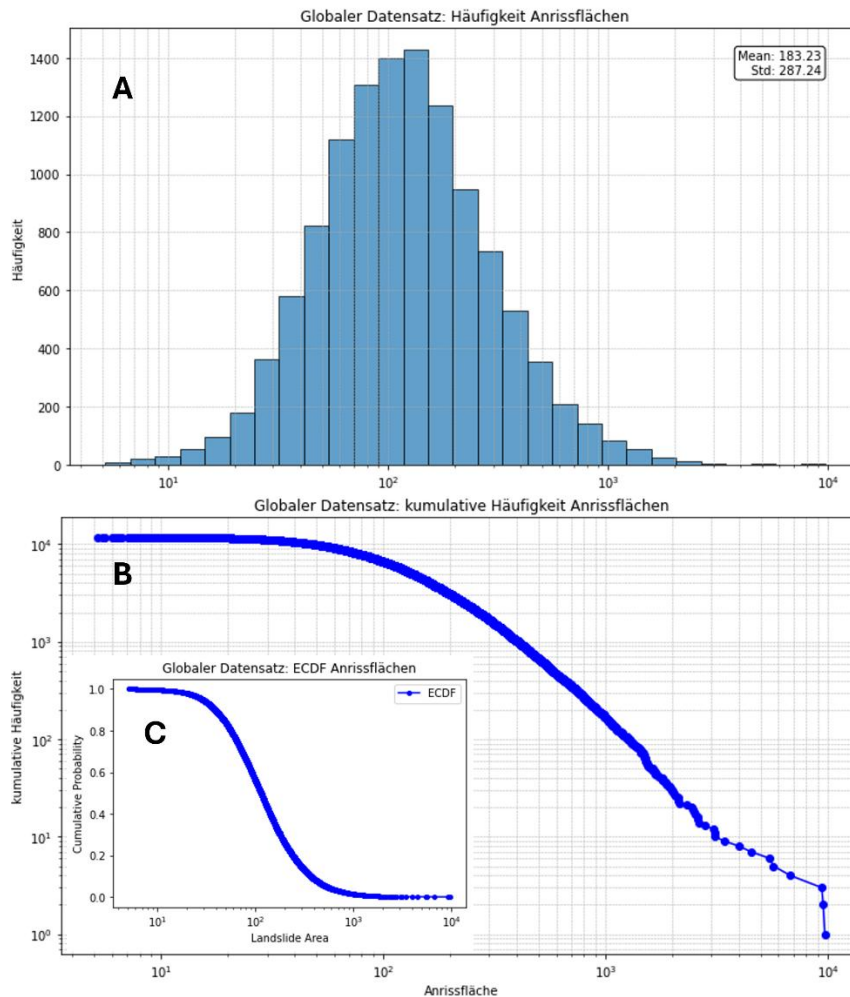


Abbildung 2 A) Häufigkeitsverteilung der Anrissflächen im Datensatz [2] B) Kumulierte Anzahl Hangmuren, nach Grösse absteigend. C) Empirische kumulierte Verteilungsfunktion der Hangmuren-Anrissflächen.

#### 4.2.2 Häufigkeitsverteilung der Anrissflächen in repräsentativen Regionen

Die Modelle der verschiedenen Regionen (siehe Tabelle 1) wurden aufgrund der mittleren Wasserstein-Distanz zwischen den empirisch kumulierten Verteilungsfunktionen der Anrissflächen bewertet (siehe 4.1). Abbildung 3 zeigt die Bewertung der Modelle. Als bestes Modell wurde jenes gewählt, welches 50 Cluster aus den Parametern Lithologie, Hangneigung (Pauschalgefälle) und Niederschlag berücksichtigt. Aufgrund des Kriteriums, dass jedes Cluster mindestens 100 Hangmuren enthalten muss, entstehen aus diesem Modell 26 Regionen mit unterschiedlicher Häufigkeitsverteilungen von Anrissflächen.

Die mittleren Anrissflächen und die Standardabweichung pro Region sind in Abbildung 4 räumlich dargestellt. Die mittleren Anrissflächen variieren zwischen 90 m<sup>2</sup> und 313 m<sup>2</sup>.



### 4.3 Diskussion

Die Resultate der Wahrscheinlichkeit der Anrissflächen zeigen, dass räumlich signifikante Unterschiede in den Anrissflächenverteilungen bestehen. So weichen die mittleren Anrissflächen der Regionen (kleinste mittlere Anrissfläche 90 m<sup>2</sup> und grösste 313 m<sup>2</sup>) teilweise deutlich von der globalen mittleren Anrissfläche von 183 m<sup>2</sup> ab. Die räumliche Verteilung der mittleren Anrissflächen zeigen, dass in den Gebieten Emmental und Schwarzenburg tendenziell kleinere Anrissflächen auftreten als im Jura und in den Alpen (Abbildung 4 links).

Die Standardabweichung der Anrissflächen ist sowohl für die globale Anrissflächenverteilung, sowie in den Regionen hoch (Abbildung 2 und Abbildung 4 rechts). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Anrissflächen naturgemäss nicht normalverteilt sind, sondern rechtsschief und durch einen Power-Law-Tail bei grossen Anrissflächen charakterisiert sind. Die Mittelwerte sowie Standardabweichung der Anrissflächenverteilungen werden somit von wenigen grossen Ereignissen stark beeinflusst. Räumlich ist insbesondere in Gebieten mit wenig bekannten Ereignissen eine erhöhte Standardabweichung erkennbar (Abbildung 4 rechts).

### 4.4 Produkte

Die Produkte in Tabelle 2 wurden zur Wahrscheinlichkeit der Anrissflächen ( $P_A$ ) geliefert. In Abbildung 4 ist eine Kartendarstellungen der Produkte ersichtlich.

Tabelle 2 Gelieferte Produkte zur Wahrscheinlichkeit der Anrissflächen ( $P_A$ )

Produkt	Format	Inhalt	Dateiname
Anrissfläche [m <sup>2</sup> ]	GeoTiff, 2 m	Mittelwert pro Region, 100 m Raster resampled auf 2 m	Mean_landslide_sizek50_litho_slope_precipitation_final.tif
Anrissfläche [m <sup>2</sup> ]	GeoTiff, 2 m	Standardabweichung pro Region, 100 m Raster resampled auf 2 m	Std_landslide_sizek50_litho_slope_precipitation_final.tif

## 5. Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ( $P_{räumlich}$ )

### 5.1 Ausscheidung von NoSlide-Gebieten

Um die Rechenzeit in diesem und nachfolgenden Teilprojekten zu verringern, wurden NoSlide-Gebiete ausgeschieden. In diesen Gebieten kann davon ausgegangen werden, dass keine Hangmuren-Auslösung stattfindet.

#### 5.1.1 Methodik

Folgende Kriterien wurden zur Ausscheidung von Gebieten, in welchen keine Hangmuren erwartet werden, (d.h. No Slide-Gebiete) verwendet. In diesen Bereichen wird die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens auf null gesetzt.

- **Flüsse, Gletscher, Seen:** aus GeoCover [10]
- **Felsoberfläche und Geröll:** aus SwissTLM3D [22]
- **Künstliche Auffüllungen:** aus GeoCover [10] – Unconsolidated Deposits (für folgende Kartenblätter nicht vorhanden: 60 Bieler See, 63 Murten, 26 Schwarzenburg, 36 Guggisberg, 21 Muensingen, 41 Lenk, 32 Gemmi, 82 Lötschental, 163 Sumiswald, 165 Langnau I. E., 75 Eggwil, 1189 Sörenberg, 6 Lauterbrunnen, 13 Grindelwald, 1249 Finsteraarhorn, 167 Inntertkirchen)
- **Sumpf:** aus GeoCover [10] – Unconsolidated Deposits
- **Bebaute Zonen:** 10 m Puffer um Gebäude aus SwissTLM3D [22] (überlappende Bereiche verschmolzen, dann wieder um 10 m zurückgepuffert, damit alle Gebäude inkl. Gebäudeabstand von weniger als 20 m als NoSlide Gebiete berücksichtigt werden)
- **Hangneigung:** Gebiete mit Hangneigung steiler, resp. flacher als das 2.5%- resp. 97.5%-Quantil aller Hangmuren im Inventar der Anrisspunkte: flacher als 18.6° und steiler als 47.9°
- **Kleinstböschungen (Bereinigung basierend auf Höhendifferenz, Grösse und Kompaktheit):** Gebiete mit Höhendifferenz geringer als 7 m, Gebiete mit Fläche kleiner als 200m<sup>2</sup>, Gebiete schmaler als 4 m und Gebiete mit Kompaktheit (Fläche/Umfang) geringer als das 10%-Quantil aller Hangmuren im Inventar der Anrisspolygone ( $< 1,5339$ ) [2].<sup>3</sup>

#### 5.1.2 Resultate

Die räumliche Ausscheidung der NoSlide-Gebiete ist in Abbildung 5 dargestellt. Ein flächenmässiger Anteil von total 64.7% des Kantons Bern wurde als NoSlide-Gebiete ausgeschieden.

---

<sup>3</sup> In den Lieferprodukten wird das Raster der NoSlide-Gebiete inkl. dieses Kriteriums separat geliefert, da dieses Kriterium nachträglich hinzugefügt wurde. Alle übrigen Raster, welche auf dem NoSlide-Raster basieren, werden ebenfalls zusätzlich geliefert (mit und ohne Kriterium Bereinigung von Kleinstböschungen). Die Abbildungen und Wertebereiche in diesem Bericht stammen von den Rastern ohne Bereinigung von Kleinstböschungen.

Das Kriterium der Hangneigung trägt flächenmässig am stärksten zur Ausscheidung der NoSlide-Gebiete bei, was in der räumlichen Verteilung der Gebiete gut erkennbar ist (z.B. grosser Anteil von NoSlide-Gebieten im Mittelland). Derselbe Effekt ist auch im Ausschnitt des Testgebiets Adelboden ersichtlich, in welchem insbesondere die flachen Gebiete im Tal, sowie die Siedlungen in der Aufteilung der Slide- und NoSlide-Gebiete hervortreten.

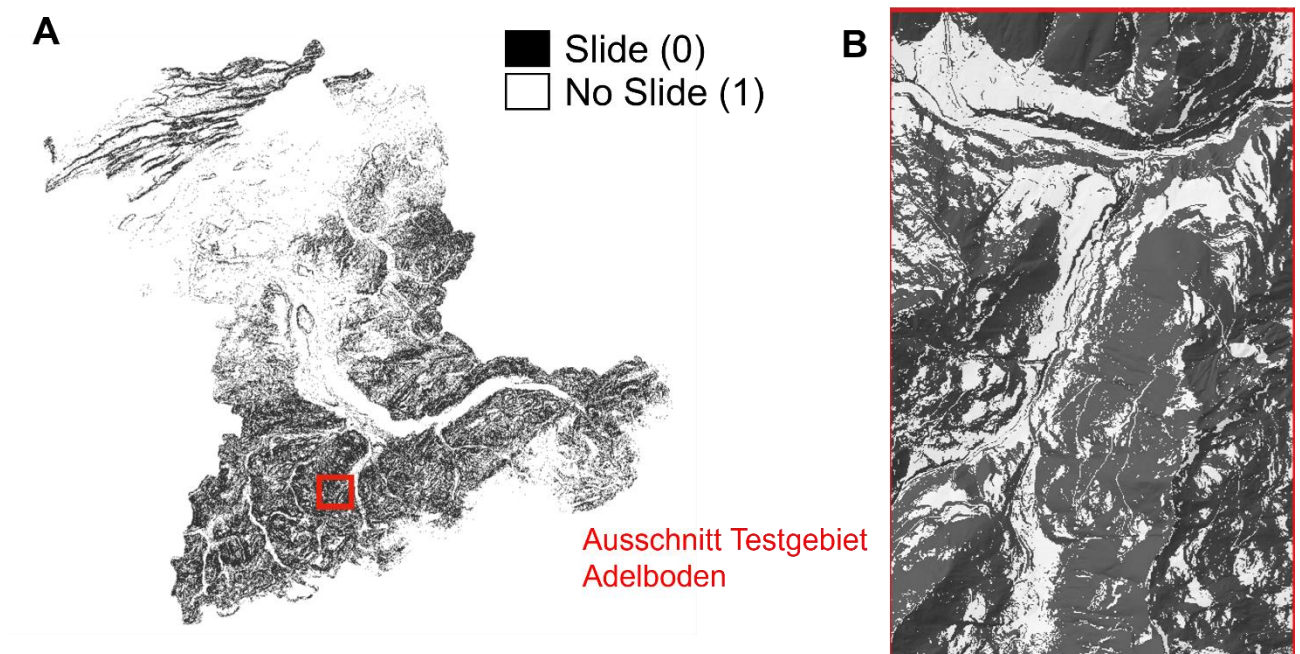


Abbildung 5 Ausscheidung der No-Slide Gebiete (d.h. Gebiete, in welchen die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens 0 beträgt) über den Kanton Bern.

### 5.1.3 Diskussion

Die NoSlide-Gebiet-Maske schliesst weiträumige Gebiete von der weiteren Modellierung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens aus, was die Datenmengen und Rechenzeiten für weitere Arbeitsschritte, sowie nachfolgende Teilprojekte positiv beeinflusst.

Es ist jedoch nicht komplett auszuschliessen, dass in den ausgeschiedenen NoSlide-Gebieten trotzdem Ereignisse auftreten können. Von den Ereignisdaten des Inventars [1] befinden sich von insgesamt 32'183 Ereignissen, 3'671 Ereignisse in den NoSlide-Gebieten. Dies kann zum Teil auf die ungenaue Lage der Ereignisdaten aus dem Ereigniskataster zurückgeführt werden. Bei 998 von Ereignissen in NoSlide-Gebieten wurde eine ungenaue Lage mit Quelle Ereigniskataster angegeben. Zum anderen wurde als Kriterium der Hangneigung das 2.5%- resp. 97.5%-Quantil der bekannten Ereignisse flächig über den gesamten Kanton verwendet. Dies führt dazu, dass Ereignisse in sehr flachen oder steilen Gebieten ebenfalls in die NoSlide-Gebiete fallen können. Änderungen in der Topographie im Zeitraum zwischen dem Auftreten des Ereignisses und dem verwendeten Höhenmodell können ebenfalls bewirken, dass bekannte Ereignisse in heute sehr flachen oder steilen Gebieten auftreten. Zudem ist bekannt, dass regionale Unterschiede in der maximalen

und minimalen Hangneigung, bei welcher Hangmuren auftreten, bestehen. Ein regional variierendes Hangneigungskriterium wurde getestet, lieferte jedoch keine robusten Ergebnisse. Das gewählte Hangneigungskriterium basiert auf einer grossen Anzahl Ereignisdaten und deckt die relevanten Gebiete möglicher zukünftiger Ereignisse grossmehrheitlich ab.

## 5.2 Modellierung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens in den Testgebieten

### 5.2.1 Methodik

Die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens wurde in 6 Testgebieten von je ca. 10 km<sup>2</sup> mit 3 verschiedenen Ansätzen modelliert. Folgende Testgebiete wurden im Hinblick auf eine möglichst gute räumliche, topographische und geologische Verteilung ausgewählt: Adelboden, Gadmertal, Gantrisch, Trub, Frieswil, La Heutte. Folgende methodische Ansätze wurden getestet:

- SlideforMap ist ein physikalischer Ansatz, welcher auf einem Infinite-Slope-Modell basiert [24]. Die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens wird dabei durch die Generierung hypothetischer Rutschungen an zufällig verteilten Koordinaten im Untersuchungsgebiet abgeleitet. Die Flächen dieser hypothetischen Rutschungen basieren auf einer Verteilungsfunktion, welche der Inverse Gamma Verteilung der Rutschungen im Inventar der Anrisspolygone [2] entspricht. Die Herleitung der Inverse Gamma Verteilung basiert auf der Methodik nach [15]. Für jede generierte hypothetische Rutschung wird ein Stabilitätsfaktor mittels Factor of Safety (FOS) berechnet. Die Bodenkennwerte wurden aufgrund von Anrissmächtigkeiten [13] und dem KOBO-Datensatz [18], welcher den Bodentyp mit einer Rasterauflösung von 90 m auf jeweils drei Tiefenstufen (0 – 30 cm, 30 – 60 cm, 60 – 120 cm) beschreibt, festgelegt. Die Modellparameter – wie Bodenmächtigkeit, Kohäsion und Durchlässigkeit – werden für jede hypothetische Rutschung aus lognormalverteilten Eingabewerten gezogen. Die Bodenfeuchtesättigung wird über einen stationären Flussansatz unter Einbezug des Topographischen Nässeindex berechnet. Die Berücksichtigung der Wurzelverstärkung erfolgt durch Einzelbaumdetektion (FINT-Datensatz [8]), wobei sowohl Wurzelverteilung als auch -festigkeit modelliert werden.

Tabelle 3 Verwendete Eingangsparameter für die Modellierung der Testgebiete mit SlideforMap

Parameter	Beschreibung, Quelle
Rainfall	24hr Niederschläge (HADES): 30, 100, 300J [14]
Rainfall Correction Factor	Berücksichtigt Anteil des Niederschlags, welcher nicht versickert, Werte gem. [6]
Soil Thickness Value Raster	Anrissmächtigkeiten ProBE Hangmuren, Datenlieferung AWN vom 15.10.2025 [13]
Soil Type Properties	Wertezuordnung zu Soil Type Raster gem. [6]

Soil Type Raster	Herleitung gem.[6], basierend auf KOBO-Bodenhinweiskarte [18] und Soil Thickness Value Raster
Landslide Area Distribution (Shape Factor, Scale Factor, S-Factor)	Inverse Gamma Distribution des Inventars der Anrisspolygone (AWN), Methodik gem. [15], separat hergeleitet für die geografischen Regionen im Kanton BE
Landslide Density	Anzahl hypothetische Hangmuren zur Berechnung der probability of failure, fix 1/m <sup>2</sup>
Max. Landslide Area	Basierend auf dem Inventar der Anrisspolygone (AWN) [2]: 3'000 m <sup>2</sup>
Tree File	FINT-CH ( <b>Spezies:</b> Picea abies – Fichte, Fagus Sylvatica - Rotbuche (La Heutte))

- **Pseudo-Fuzzy-Logic:** Bei diesem statistischen Ansatz wird aus der Verteilung von Parametern über eine Skalierung die Wahrscheinlichkeit hergeleitet, mit der eine bestimmte Parameter-Ausprägung zur Auslösung einer spontanen, flachgründigen Rutschung führt [4]. Jeder Parameter steht für eine Teildisposition. Die Gesamtdisposition ergibt sich durch die Kombination aller Parameter. Für die Bestimmung der Gesamt-Wahrscheinlichkeit  $P_{tot}$  über alle Parameter  $P_i$  wird die Wahrscheinlichkeit aus der Hangneigung  $P_{neig}$  als dominant behandelt und daher mit dem Mittelwert aus den übrigen Parametern multipliziert, Eq. 2 [4]. Die berücksichtigten Parameter sind in Tabelle 4 aufgeführt und beschrieben.

$$P_{tot} = P_{neig} \cdot \left( \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_i}{i} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

Folgende Parameterkombinationen und Formeln wurden getestet:

$$P_{tot} (1) = P_{slope\_corr\_forest} * (P_{dtm} + P_{flowaccum} + P_{flowingwater\_dist} + P_{roads\_dist} + P_{oberflaechenabfluss\_dist} + P_{plan\_curv} + P_{profile\_curv} + P_{geocover} + P_{Geo500})/9 \quad \text{Eq. 3}$$

$$P_{tot} (2) = P_{slope} * (P_{dtm} + P_{flowaccum} + P_{flowingwater\_dist} + P_{roads\_dist} + P_{oberflaechenabfluss\_dist} + P_{plan\_curv} + P_{profile\_curv} + P_{geocover} + P_{Geo500} + P_{forest\_dg})/10 \quad \text{Eq. 4}$$

Die Verteilungen der verschiedenen verwendeten Parameter weisen unterschiedliche Charakteristika auf. Basierend auf diesen Charakteristika wurden unterschiedliche Funktionen verwendet, um die Dichtefunktionen und somit die Teildispositionen der Parameter herzuleiten.

- **Unimodale Verteilung:** Die Häufigkeit der Parameter-Ausprägung ist normalverteilt und kann durch eine logistische Verteilungsfunktion approximiert werden. Die Teildisposition leitet sich ab aus der Normalisierung der Dichtefunktion. Jeder Wert der Dichtefunktion wird durch den Mittelwert (häufigste Ausprägung) der Dichtefunktion geteilt, sodass der Mittelwert die Teildisposition 1 erhält.
- **Multimodale Verteilung:** Verteilungen, die nicht durch eine Normalverteilung beschrieben werden können und mehrere Maxima aufweisen, werden mithilfe einer Kernel-Density-Estimation (KDE) approximiert. Diese Dichtefunktion wird zur Herleitung der Teildisposition [0 - 1] ebenfalls durch Division mit dem Maximalwert normalisiert.

- Monotone Verteilung: Wird für jene Parameter angenommen, bei welchen die Teildisposition stetig an- oder absteigt (Bsp. Distanz zur Strasse). Für jeden Wert  $x$  wird bestimmt, welche Anzahl der Werte kleiner ist als  $x$ . Die Verteilung wird dann normiert, sodass dem kleinsten Wert der Verteilung die höchste Teildisposition 1 zugewiesen wird.
- Kategoriale Variablen: Für kategoriale Variablen (Bsp. Geologie) wird die Teildisposition aufgrund der relativen Häufigkeit der Ereignisse pro Kategorie hergeleitet und normiert, sodass die häufigste Kategorie die Teildisposition 1 erhält.

Die Herleitung der Teildisposition direkt aus der Dichtefunktion der Parameter beruht auf der Annahme, dass diese Häufigkeitsverteilungen charakteristisch für die Auslösung von spontanen, flachgründigen Rutschungen sind. Die Häufigkeitsverteilung der Parameter in der Landschaft generell wird dabei jedoch nicht berücksichtigt. Es könnte somit sein, dass die Häufigkeitsverteilung eines Parameters nicht charakteristisch für die Auslösung von spontanen, flachgründigen Rutschungen ist, sondern lediglich die Häufigkeit der Parameterausprägungen in der Landschaft erfasst. Deshalb wurde zusätzlich eine auf die allgemeine Häufigkeitsverteilung der Parameter normierte Teildisposition hergeleitet, die «verhältnisbasierte Teildisposition». Dabei wurde die Häufigkeitsverteilung von bekannten Ereignissen aus [1] durch die Häufigkeitsverteilung von zufällig gewählten Punkten (sog. Nicht-Ereignisse), welche die allgemeine Häufigkeitsverteilung der Parameter in der Landschaft repräsentiert, geteilt.

- Multiple logistische Regression (MLR): Bei diesem statistischen Ansatz wird die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens in Abhängigkeit der in Tabelle 4 aufgeführten Parameter modelliert. Dabei wird die binäre Zielvariable (Ereignis  $Y = 1$  oder Nicht-Ereignis  $Y = 0$ ) mittels multipler logistischer Regression beschrieben. Der Zusammenhang zwischen der binären Zielvariable und den erklärenden Parametern wird dabei über den Logit der Wahrscheinlichkeit  $P(Y = 1)$  formuliert, siehe Eq. 5. Die Modellkoeffizienten quantifizieren den relativen Einfluss der einzelnen Parameter auf die Disposition von Hangmuren. Auf Basis eines solchen kalibrierten Modells kann anschliessend für jede Rasterzelle im Testgebiet die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens berechnet werden. Eine detaillierte Beschreibung dieses Ansatzes ist in Kapitel 5.3 verfügbar.

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + \exp(-(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n))}$$

Eq. 5

Die Auswertung der verschiedenen Ansätze in den Testgebieten erfolgte basierend auf einer Auswertung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens bei bekannten Ereignissen [1]. Ziel ist eine möglichst gute Unterscheidbarkeit von Ereignissen und Nicht-Ereignissen basierend auf den Werten der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens.

## 5.2.2 Resultate

Für jeden der beschriebenen Ansätze (SlideforMap, Pseudo-Fuzzy-Logic und MLR, siehe Kapitel 5.2.1) und für jedes Testgebiet wurde ein Raster der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens hergeleitet. Die Resultate für das Testgebiet Adelboden sind in Abbildung 6 dargestellt und zeigen beispielhaft die unterschiedlichen Resultate zwischen den verschiedenen Ansätzen auf. Abbildung 7 zeigt eine Auswertung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens bei bekannten Ereignissen [1] über alle Testgebiete.

In der Modellierung mittels SlideforMap weisen grosse Gebiete Dispositionswerte von null auf, in welchen sich auch bekannte Ereignisse befinden (Abbildung 6). Die Resultate zeigen ebenfalls, dass die Dispositionswerte in diesem Ansatz stark binär ausgeprägt sind (d.h. Werte 0 und 1 sind häufig). 50% der bekannten Ereignisse weisen eine Disposition kleiner als 0.25 auf (Abbildung 7).

Bei der Modellierung mit dem Pseudo-Fuzzy-Logic-Ansatz treten vor allem mittlere Dispositionswerte in den Testgebieten auf (Abbildung 6) und auch ein Grossteil der bekannten Ereignisse (ca. 65%) weist Dispositionswerte zwischen 0.3 und 0.6 auf. 50% der bekannten Ereignisse haben eine Disposition kleiner als 0.5 (Abbildung 7).

In der Modellierung mittels multipler logistischer Regression kann eine Differenzierung zwischen tiefen und hohen Dispositionswerten in den Testgebieten erreicht werden (Abbildung 6) und die bekannten Ereignisse befinden sich vermehrt in Bereichen mit hoher Disposition. 50% der bekannten Ereignisse haben eine Disposition kleiner als 0.62 (Abbildung 7).

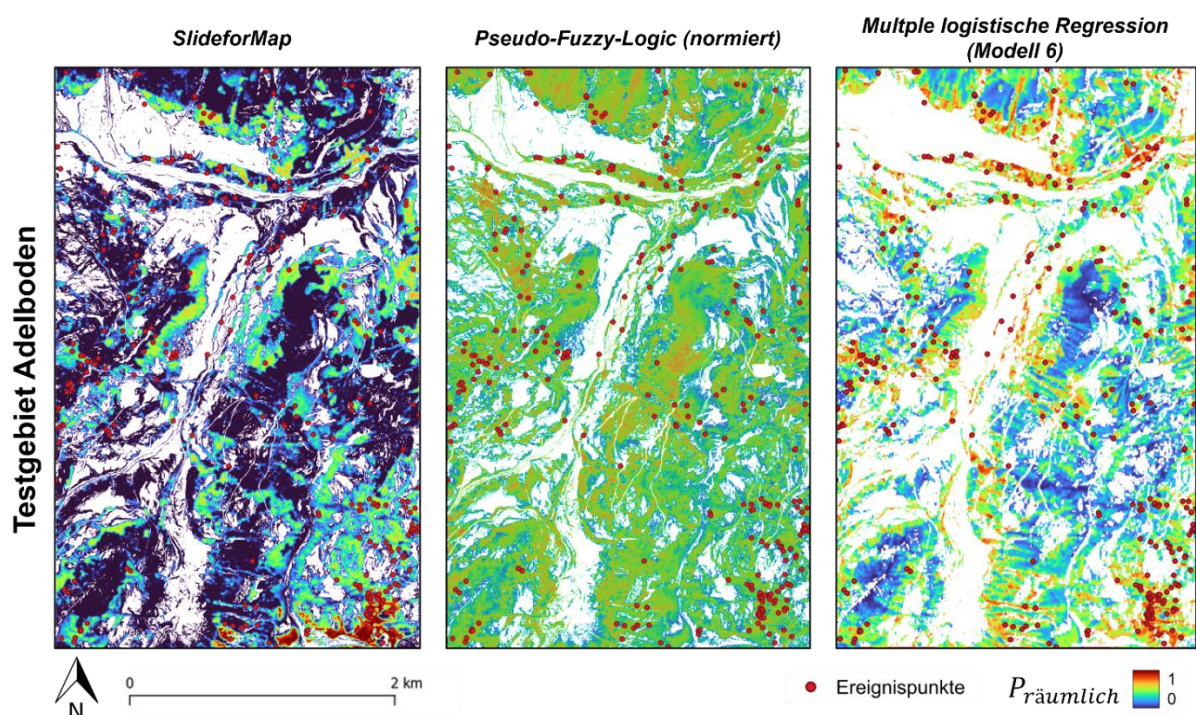


Abbildung 6 Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens [0...1] berechnet nach den drei verschiedenen Ansätzen im Testgebiet Adelboden.

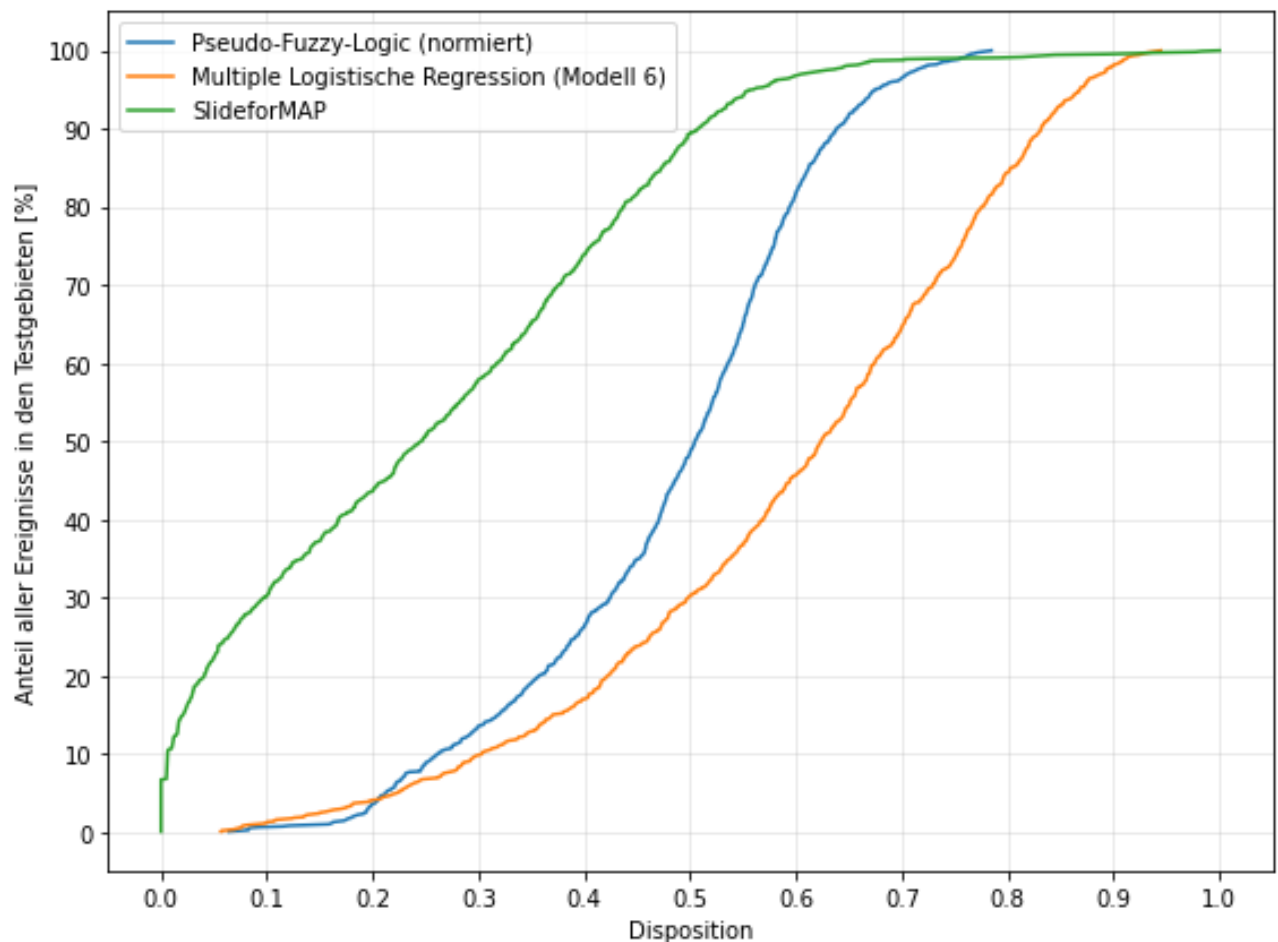


Abbildung 7 Auswertung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens (Disposition) bei bekannten Ereignissen [1]. Mit der Methodik SlideforMap haben 50% der bekannten Ereignisse eine Disposition kleiner als 0.25, mit Pseudo-Fuzzy-Logic kleiner als 0.5 und mit der multiplen logistischen Regression kleiner als 0.62.

### 5.2.3 Diskussion

Die Modellresultate der 3 verschiedenen Ansätze in den sechs Testgebieten zeigen deutlich, dass die Modellierung mittels multipler logistischer Regression die besten Resultate für die wahrscheinlichkeitsbasierte Prozessmodellierung liefert (Abbildung 7). Die stark binäre Ausprägung der Disposition mittels SlideforMap ist für die wahrscheinlichkeitsbasierte Betrachtung möglicher Hangmuren-Anrissgebiete nicht zielführend und der Pseudo-Fuzzy-Logic-Ansatz weist deutliche Schwächen in der Differenzierung zwischen tiefen und hohen Dispositionswerten auf. Das Dispositionsraaster über den gesamten Kanton wurde deshalb mittels multipler logistischer Regression berechnet. Dieser Ansatz wird detailliert im Kapitel 5.3 detailliert beschrieben und diskutiert.

### 5.3 Modellierung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens für den Kanton Bern mittels multipler logistischer Regression

#### 5.3.1 Verwendete Datensätze

Die statistische Modellierung wurde basierend auf dem Inventar der Anrisspunkte [1] durchgeführt, welches die Lokalität von bekannten Ereignissen im Kanton Bern enthält. Dabei wurden nur diejenigen Ereignisse berücksichtigt, welche über Orthophotos kartiert wurden. Die Ereignisse aus dem Ereigniskataster wurden für die Modellierung nicht verwendet, da diese ungenau lokalisiert sind. Diejenigen Ereignisse im Inventar, welche ausserhalb des Untersuchungsgebietes (Kanton Bern, inkl. 500 m Puffer) liegen, wurden ebenfalls nicht berücksichtigt, da nicht alle Grundlagendaten für diese Ereignisse zur Verfügung standen. Der im Modell verwendete Datensatz der Anrisspunkte umfasst somit 27'411 Ereignisse.

Die in der statistischen Modellierung mittels multipler logistischer Regression verwendeten Inputparameter wurden alle in Rasterformat mit einer Auflösung von 2 m hergeleitet. Die verwendeten Parameter, sowie deren Herleitung und Bezeichnung als Modellvariablen ist in Tabelle 4 ersichtlich. Die Korrelationsmatrix aller verwendeten Inputparameter wurde ausgewertet und ist in Anhang A ersichtlich.

Tabelle 4 In der Modellierung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens mittels statistischer Ansätze (Pseudo-Fuzzy-Logic und multiple logistische Regression) verwendete Inputparameter.

Parameter	Grundlage	Beschreibung	Bezeichnung
Höhenlage [m.ü.M.]	Prov. Höhenmodell Kanton BE [19] + SwissSurface3D [21]	Das prov. Höhenmodell Kt. BE bedeckt nicht die ganze Fläche des Projektperimeters (Kt. BE und 500 m Puffer). DTM aus LiDAR Rohdaten ergänzen den fehlenden Bereich. <b>Methode:</b> lidar_tin_gridding und fill_missing_data von Whitebox	dtm
Hangneigung [°]	Prov. Höhenmodell Kanton BE [19] + SwissSurface3D [21]	<b>Methode:</b> GDAL DEM Processing mode="slope"	slope
Hangneigung, korrigiert mit Deckungsgrad Wald [°]	Prov. Höhenmodell Kanton BE [19] + SwissSurface3D [21], Bestandeskarte Wald TbK 2024 [23] ( <b>innerhalb BE</b> )	Korrektur der Hangneigung basierend auf dem Wald Deckungsgrad (max. 5° weniger steil), gemäss [4]	slope_corr_forest
Hangorientierung/ Exposition [°]	Prov. Höhenmodell Kanton BE [19] + SwissSurface3D [21]	<b>Methode:</b> GDAL DEM Processing mode="aspect"	aspect
Flow Accumulation (Specific Contributing Area) [m]	Prov. Höhenmodell Kanton BE [19] + SwissSurface3D [21]	<b>Methode:</b> Whitebox FillDepressions + DInfFlowAccumulation (Tarboton, 1997) mit log Transformation	flow_accum_sca

Plankrümmung [m <sup>-1</sup> ]	Prov. Höhenmodell Kanton BE [19] + SwissSurface3D [21]	Krümmung eines Profils senkrecht zur Hangneigung. Positive Werte: konvex, negative Werte: konkav. Berechnung auf 10 m Auflösung zur Reduktion von Höhenrauschen, anschliessende Hochskalierung auf 2 m Auflösung mittels Bilinear-Algorithmus. <b>Methode:</b> Whitebox plan_curvature, GDAL Warp resampling_method='bilinear'	plan_curv
Profilkrümmung [m <sup>-1</sup> ]	Prov. Höhenmodell Kanton BE [19] + SwissSurface3D [21]	Krümmung eines Profils in Richtung der Hangneigung. Positive Werte: konvex, negative Werte: konkav. Berechnung auf 10 m Auflösung zur Reduktion von Höhenrauschen, anschliessende Hochskalierung auf 2 m Auflösung mittels Bilinear-Algorithmus. <b>Methode:</b> Whitebox profile_curvature, GDAL Warp resampling_method='bilinear'	profile_curv
Lithologie	GK 500 [11], PY_Basis_Flaechen.shp, Attribut: LITH_Pet	Die Lithologieklassen des Polygonlayers werden mit einem Code versehen und den Zellen des Rasters, die von einer Geometrie berührt werden, zugewiesen. Die Zuordnung von Codes und Lithologieklassen ist in Anhang B ersichtlich.	geo500_litho
Lithocodes	Geocover [10], unconsolidated_deposits	Erstellung des Rasters erfolgt gleich wie für die Lithologie. Die Zuordnung der LithoCodes zu den Beschreibungen der Lockergesteinsklassen im Geocover folgt der Methodik von [12] und ist in Anhang C ersichtlich.	geocover
Distanz zu fliessendem Wasser [m]	SwissTLM3D [22] Gewässer, Fliessgewässer	Alle von Fliessgewässern belegten Zellen haben den Wert 0. Die umliegenden Zellen enthalten die absolute euklidische Distanz vom jeweiligen Zellzentrum zum Zellzentrum der nächstgelegenen Zelle mit dem Wert 0. Layer gefiltert nach 'objektart' = 'Fliessgewaesser' um z.B. Seeachse oder Druckstollen auszuschliessen und nach 'verlauf' = 'Oberirdisch'.	flowingwater_dist

**Methode:** geopandas clip, rasterio features rasterize (fill=0, all\_touched=true), scipy ndimage distance\_transform\_edt (Ergebnis multipliziert mit Zellengrösse 2 für absolute Distanz)

Distanz zu Strassen [m]	SwissTLM3D [22] Strassen	Layer nach 'belag' = 'Hart' und 'stufe' = '0' (nicht Tunnel oder Brücken) gefiltert. Die Interpretation der Werte sowie die Berechnungsmethodik entsprechen jener der Distanz zu fliessendem Wasser.	roads_dist
Distanz zu Oberflächenabfluss [m]	Gefährdungskarte Oberflächenabfluss [9]	Die Daten zum Oberflächenabfluss des Kantons Bern wurden mit den entsprechenden Datensätzen der umliegenden Kantone zusammengeführt, um eine konsistente Grundlage für den 500-m-Puffer zu erhalten.  Die Interpretation der Werte sowie die Berechnungsmethodik entsprechen jener der Distanz zu fliessendem Wasser.	oberflaechenabfluss_dist
Wald-Deckungsgrad [%]	Bestandeskarte Wald TbK 2024 [23] (innerhalb BE)	Zur Erstellung einer konsistenten Datengrundlage für den 500-m-Puffer, wurde der Kartenlayer SwissTLM3D Bodenbedeckung ('objektart' = 'Wald' oder 'Wald offen') herangezogen. Für die als Wald identifizierten Flächen wurde der Mittelwert des Wald-Deckungsgrades des gesamten Kantonsgebietes verwendet.  <b>Methode:</b> rasterio features rasterized (all_touched=true, fill=0)	forest_dg

### 5.3.2 Methodik

Die multiple logistische Regressionsanalyse ist ein in der Literatur häufig verwendeter Ansatz für Dispositionsanalysen von Rutschungen [17][7]. Die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens wird aufgrund der Ereignisdaten und anhand von erklärenden Parametern, die die lokalen Gegebenheiten der Ereignisse beschreiben, hergeleitet (siehe Kapitel 5.2.1). Abbildung 8 zeigt die verschiedenen Arbeitsschritte, die für die multiple logistische Regressionsanalyse durchgeführt wurden.

**A1) Sampling der Nicht-Ereignispunkte:** Damit keine Überanpassung des Modells an inkomplette Ereignisdaten eintritt, muss eine ausgeglichene Anzahl Ereignisse (Eintreten,  $Y=1$ ) und Nicht-Ereignisse (Nicht-Eintreten,  $Y=0$ ) im Datensatz verfügbar sein. Dazu müssen «Nicht-Ereignisse» definiert werden. Die Generierung des «Nicht-Ereignis» Datensatzes erfolgte automatisch und randomisiert, mit einem Mindestabstand von 100 m von kartierten spontanen Rutschungen, sowie ausserhalb von NoSlide-Gebieten. Um sicherzustellen, dass Falsch-Negative Ereignisse die Resultate nicht verfälschen, wurden drei automatisch und randomisiert generierte «Nicht-Ereignis»-Datensätze verwendet [25]. Da die Unterschiede in den Resultaten nicht signifikant waren, kann davon ausgegangen werden, dass die «Nicht-Ereignisse» repräsentativ sind. Da Ereignisse und Nicht-Ereignisse auf die Gebiete ausserhalb der NoSlide-Gebiete gefiltert wurden, sind die Resultate der multiplen logistischen Regression nicht auf die NoSlide-Gebiete anwendbar.

**A2) Aufteilung der Daten in Trainings- und Testdaten:** Der Datensatz von Ereignissen und Nicht-Ereignissen muss in Trainings- und Testdaten aufgeteilt werden. Die Trainingsdaten werden dabei für die Anpassung des logistischen Regressionsmodells verwendet und die Performance des Modells wird anhand der Testdaten ausgewertet. Um räumliche Autokorrelation zu vermeiden, wurde ein Schachbrettmuster mit 10 km Gittergrösse über den Kanton verwendet. Dadurch wurde das Gebiet in gleich viele Trainings- und Testflächen unterteilt. Aufgrund der ungleichmässigen räumlichen Verteilung der Ereignis- und Nicht-Ereignispunkte ergab sich schliesslich ein effektiver Trainingsdatenanteil von 48 %.

**B) Wahl der Inputparameter:** Die vorgesehenen Inputparameter wurden basierend auf in der Literatur gängig verwendeten Variablen, sowie Erfahrungswerten gewählt. Verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Inputparametern wurden getestet (Tabelle 5). Die Berücksichtigung von Wald wurde 1) über den im Pflichtenheft [4] vorgeschlagenen Ansatz über die Anpassung der Hangneigung im bewaldeten Gebiet vorgenommen (Modell 2, siehe Tabelle 5) und 2) als diskrete Variable des Wald-Deckungsgrades (Modelle 3, 4, 6, siehe Tabelle 5). Es wurden Modelle mit und ohne Hangorientierung/ Exposition getestet, da diese Variable aufgrund der Kartierung einen Bias zu südexponierten Hängen beinhaltet. Zudem wurde ein Modell ohne Geologie getestet, da die Inputparameter nur in grober Auflösung zur Verfügung stehen und somit scharfe Übergänge verursachen, welche nicht der Realität entsprechen (geo500\_cat) oder Probleme der Datenharmonisierung beinhalten (geocover).

Tabelle 5 Getestete Modelle der multiplen logistischen Regression mit unterschiedlichen Kombinationen von Inputparametern.

Modelle	Verwendete Parameter	Kommentar
1) with_normal_slope	dtm, slope, plan_curv, profile_curv, aspect_sin, aspect_cos, geocover_cat, geo500_cat, flow_accum_sca, flowingwater_dist, roads_dist, oberflaechenabfluss_dist	Wald nicht berücksichtigt
2) with_slope_corr_forest	dtm, slope_corr_forest, plan_curv, profile_curv, aspect_sin, aspect_cos, geocover_cat, geo500_cat, flow_accum_sca, flowingwater_dist, roads_dist, oberflaechenabfluss_dist	Wald über korrigierte Hangneigung berücksichtigt
3) with_forest	dtm, slope, plan_curv, profile_curv, aspect_sin, aspect_cos, geocover_cat, geo500_cat, flow_accum_sca, flowingwater_dist, roads_dist, oberflaechenabfluss_dist, forest_dg	Wald über Deckungsgrad berücksichtigt
4) with_forest_without_aspect	dtm, slope, plan_curv, profile_curv, geocover_cat, geo500_cat, flow_accum_sca, flowingwater_dist, roads_dist, oberflaechenabfluss_dist, forest_dg	Wald über Deckungsgrad berücksichtigt, ohne Aspect/Exposition (aufgrund Bias)
5) without_forest_and_aspect	dtm, slope, plan_curv, profile_curv, geocover_cat, geo500_cat, flow_accum_sca, flowingwater_dist, roads_dist, oberflaechenabfluss_dist	Wald und Aspect/Exposition nicht berücksichtigt
6) with_forest_without_aspect_without_geology	dtm, slope, plan_curv, profile_curv, flow_accum_sca, flowingwater_dist, roads_dist, oberflaechenabfluss_dist, forest_dg	Wald über Deckungsgrad berücksichtigt, ohne Aspect/Exposition (aufgrund Bias) und ohne Geologie (aufgrund scharfer Übergänge)

**C) Multiples logistisches Regressionsmodell:** Das multiple logistische Regressionsmodell wird in diesem Schritt auf die Trainingsdaten angepasst. Damit die angepassten Koeffizienten aus dem Modell vergleichbar sind und anzeigen, welche Inputparameter einen besonders grossen Einfluss auf die Zielvariable haben, werden die Inputparameter skaliert. Die Skalierung erfolgt auf den Trainingsdaten, die Testdaten werden anschliessend mit denselben Parametern transformiert. Dies wurde mit `sklearn.preprocessing StandardScaler` für numerische Variablen vorgenommen, während kategoriale Variablen mittels `OneHotEncoder` kodiert wurden. Das Modell wurde mit der Funktion `sklearn.linear_model LogisticRegression` erstellt, wobei zur Optimierung des Modells ein systematisches Hyperparameter-Tuning mit `sklearn.model_selection GridSearchCV` durchgeführt wurde.

**D1) Statistische Auswertung der Performance bei den Testdaten:** Für die Auswertung der Performance bei den Testdaten wurden für alle Modelle eine Konfusionsmatrix (mit Grenzwert 0.5), sowie Receiver Operator Curve (ROC-Curve) und Area Under Curve (AUC) berechnet. Aus der Konfusionsmatrix wurden die Werte für Precision und Recall berechnet (Eq. 6 und Eq. 7).

$$Precision = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Positive} \quad \text{Eq. 6}$$

$$\text{Recall} = \text{True Positive} / (\text{True Positive} + \text{False Negatives}) \quad \text{Eq. 7}$$

**D2) Räumliche Validierung in den Testgebieten:** Die Modelle wurden auf die Raster der Testgebiete und im Falle des bevorzugten Modells auf das gesamte Kantonsgebiet Bern inkl. 500 m Puffer angewendet. Für jeden Gitterpunkt im Raster wird so die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens vorhergesagt.

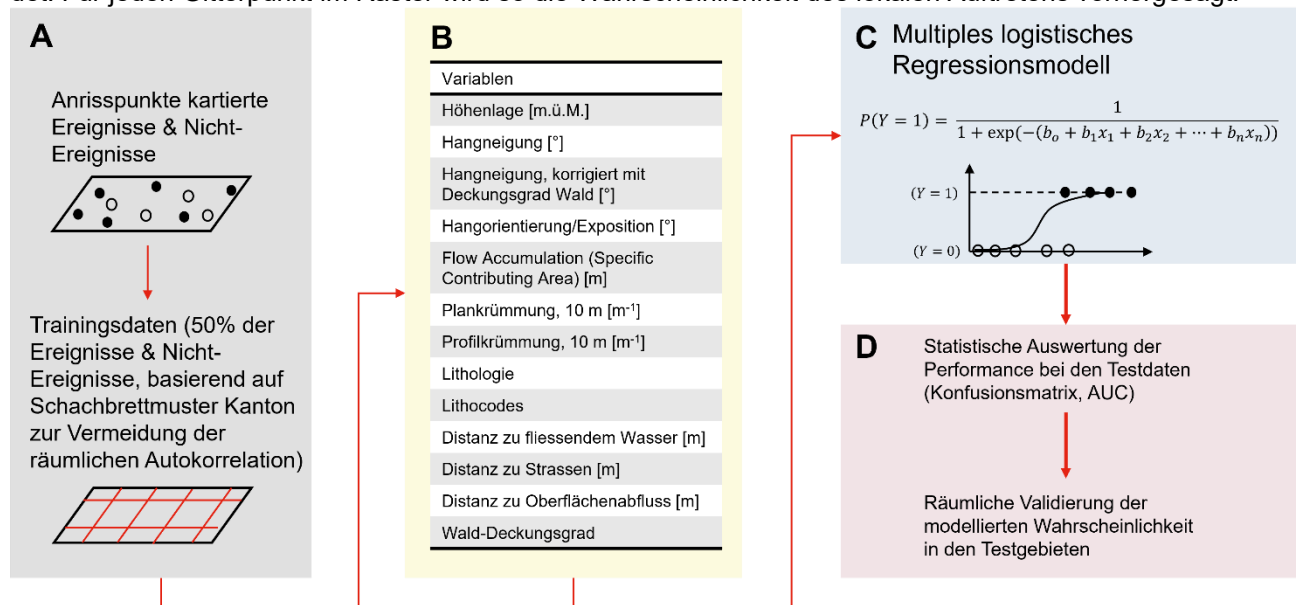


Abbildung 8 Schematische Methodik der multiplen logistischen Regression.

### 5.3.3 Korrektur pro Bezugsraum

Damit die korrekte absolute Wahrscheinlichkeit resultiert, müssen die Werte des kantonalen Dispositionsrasters durch die Summe der Disposition pro Bezugsraum geteilt werden (siehe Kapitel 3), Eq. 8. Somit resultiert nebst dem Dispositions raster, bei welchem die Werte über den ganzen Kanton zwischen 0 und 1 variieren [*Lieferprodukt*: Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens [0 ... 1]], ein normalisiertes Dispositions raster, in welchem die Summe der Dispositionswerte pro Bezugsraum 1 ergeben [*Lieferprodukt*: Normalisierte Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens [0 ... 1]]. Die Bezugsräume entsprechen dabei den für die Anriss-Wahrscheinlichkeiten verwendeten Bezugsräume, welche in Kapitel 6 detailliert beschrieben sind.

$$P_{\text{räumlich, i, korr}} = \frac{P_{\text{räumlich, i}}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{räumlich, i}}} \quad \text{Eq. 8}$$

### 5.3.4 Resultate

Die statistische Auswertung der Performance von den 6 getesteten Modellen (Tabelle 5) ist in Abbildung 9 ersichtlich. Die AUC-Werte<sup>4</sup> variieren zwischen 0.8 und 0.85, wobei Modelle 2 und 5 die niedrigsten Werte und Modell 3 den höchsten Wert aufweist. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei einem Vergleich der Precision- und Recall-Werte.

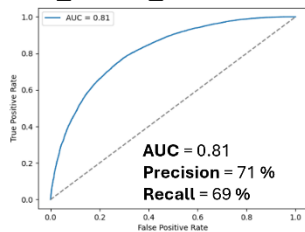
Aufgrund der räumlichen Validierung in den Testgebieten wurde das Modell 6 als bevorzugtes Modell gewählt. Dieses Modell berücksichtigt den Wald als kategoriale Variable, was die Performance gegenüber der Berücksichtigung des Waldes über die angepasste Hangneigung verbessert (Modell 2 versus Modell 3). Aufgrund von einem Bias in den Daten der Hangorientierung wird Modell 4 gegenüber Modell 3 bevorzugt. Obwohl eine leichte Einbusse in der Performance resultiert, ist Modell 4 zu bevorzugen, um keine Überanpassung des Modells zu bewirken. Im Modell 6 können zudem scharfe Übergänge in den Dispositionsrastern, welche die Realität nicht zufriedenstellend abbilden, vermieden werden. Dies wird durch das Weglassen der Geologie (geo500\_cat und geocover) als Inputparameter erzielt.

Die Koeffizienten der Inputparameter ändern sich leicht zwischen den Modellen, wobei die Parameter **Hangneigung** und **Distanz zu fliessendem Wasser** das Resultat konsistent am stärksten beeinflussen. In den Modellen, in welchen der Wald als kategoriale Variable über den Deckungsgrad berücksichtigt wird, erhält dieser Parameter ebenfalls ein hohes Gewicht (Abbildung 9).

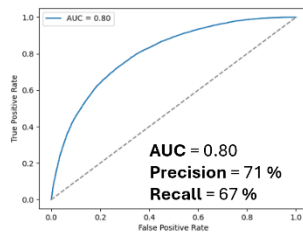
---

<sup>4</sup> Der Wert «Area Under Curve» (AUC) der «Receiver Operator Curve» (ROC) ist ein Mass dafür, wie gut die Vorhersage ist. In einem perfekten Modell beträgt der Wert 1, ein Wert von 0.5 stellt eine zufällige Vorhersage dar.

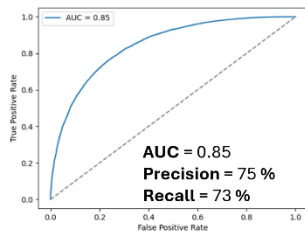
1) with\_normal\_slope



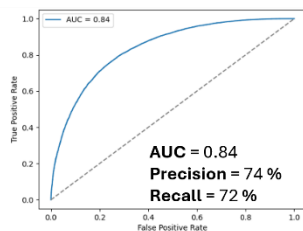
2) with\_slope\_corr\_forest



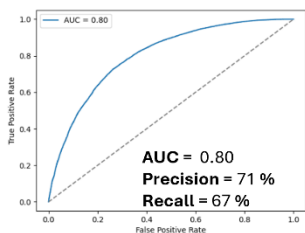
3) with\_forest



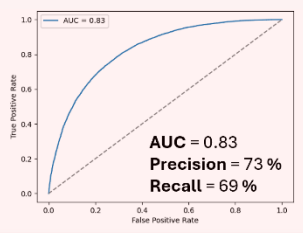
4) with\_forest\_without\_aspect



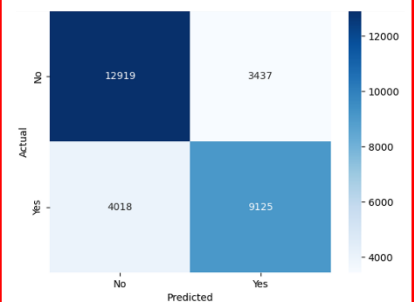
5) without\_forest\_and\_aspect



6) with\_forest\_without\_aspect\_without\_geology



6) with\_forest\_without\_aspect\_without\_geology



	Coefficient
dtm	-0.111649
slope	0.418640
plan_curv	-0.275700
profile_curv	0.121713
flow_accum_sca	0.311307
forest_dg	-0.574984
flowingwater_dist	-0.528464
roads_dist	-0.292112
oberflaechenabfluss_dist	-0.147757

Abbildung 9 Auswertung der Performance der getesteten Modelle mittels multipler logistischer Regression

Das Dispositions raster über den gesamten Kanton, welches mit Modell 6 gerechnet wurde, ist in Abbildung 10 links dargestellt. Das auf die Bezugsräume normalisierte Dispositions raster (Abbildung 10, rechts) weist dieselbe räumliche Struktur auf, die absoluten Werte sind jedoch bedeutend kleiner, da die Summe der Dispositionswerte in diesem Raster pro Bezugsraum 1 ergibt.

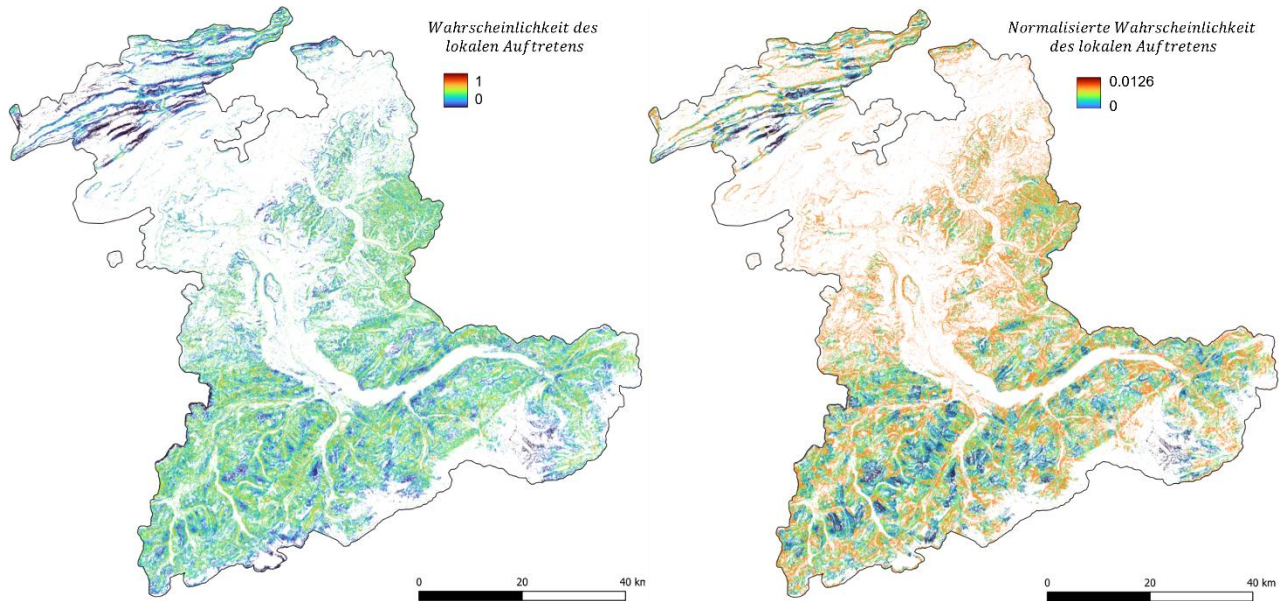


Abbildung 10 Links: Modellierter Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens (Disposition), rechts: auf Bezugsräume normalisierte modellierte Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens (Disposition)

### 5.3.5 Diskussion

Die Raster der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ( $P_{räumlich}$ ) bilden die räumliche Differenzierung unterschiedlicher Anfälligkeiten für Hangmuren-Anrisse ab. Die Interpretation des Rasters ist dabei nur in den Gebieten ausserhalb der NoSlide-Gebiete möglich, da das Modell nur Daten aus diesen Bereichen berücksichtigt.

Für die räumliche Differenzierung der Disposition wurden insbesondere topographische (z.B. Hangneigung, Krümmung) und geomorphologische Faktoren berücksichtigt (z.B. Distanz zu fließendem Wasser). Grossräumige Effekte, welche die Häufigkeit von Ereignissen beeinflussen (z.B. Geologie, Klima), werden im Dispositions raster nicht abgebildet. Diese Effekte werden über die Anriss-Wahrscheinlichkeit (Häufigkeit) berücksichtigt. Die Resultate zeigen, dass im Kanton Bern ähnliche Faktoren einen starken Einfluss auf die Disposition haben, wie dies in der internationalen Literatur beobachtet wird [7]. Die Hangneigung, wie auch die Distanz zu fließendem Wasser und Vegetation werden oft als wichtige Faktoren identifiziert [7][16]. Alle drei Faktoren bilden physikalische Prozesse ab. So beeinflusst die Hangneigung die treibenden Kräfte in einem Hang massgebend und die Distanz zu fließendem Wasser kann aufgrund anfälliger Uferböschungen und aufgrund Flusserosion instabiler Hänge die Disposition massgeblich beeinflussen. Die Vegetation beeinflusst die Kohäsion im Lockergestein, sowie die Durchlässigkeit und die Versickerung.

Zudem ist zu beachten, dass das Dispositions raster auch die Güte der Inputparameter widerspiegelt. So können beispielsweise scharfe Übergänge an Grenzen von unterschiedlichem Wald-Deckungsgrad auftreten, auch wenn dieser Unterschied in der Realität nicht so stark ausgeprägt ist.

## 5.4 Produkte

Die Produkte in Tabelle 6 wurden zur Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ( $P_{räumlich}$ ) geliefert. In Abbildung 5 und Abbildung 10 sind Kartendarstellungen der Resultate, welche über den ganzen Kanton zur Verfügung stehen, ersichtlich.

Tabelle 6 Gelieferte Produkte zur Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ( $P_{räumlich}$ )

Produkt	Format	Inhalt	Dateiname
NoSlide-Gebiete	GeoTiff, 2m	Gebiete, wo keine Hangmurenauflösung stattfindet.	No_Slide_2m.tif
Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens gem. Slidefor-Map	GeoTiff, 2m	Innerhalb der 6 Testgebiete	SlideforMap_probability_failure_[Testgebiet].tif
Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens gem. multipler logistischer Regression	GeoTiff, 2m	Innerhalb der 6 Testgebiete	MLR_Probability_Raster_[Testgebiet]_sample1_without_geology.tif
Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens gem. Pseudo-Fuzzy-Ansatz	GeoTiff, 2m	Innerhalb der 6 Testgebiete	PFL_P_tot_norm_[Testgebiet].tif
Verwendete Inputparameter des multiplen logistischen Regressionsmodells, welches über den ganzen Kanton angewendet wurde	GeoTiff, 2 m	Pro Parameter ein Raster über den gesamten Kanton	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DTM_LiDAR_2025_2m_combined.tif</li> <li>• DTM_LiDAR_2025_2m_combined_flow_accum_sca.tif</li> <li>• DTM_LiDAR_2025_2m_combined_slope.tif</li> <li>• DTM_LiDAR_2025_10m_combined_plan_curvature_2m.tif</li> <li>• DTM_LiDAR_2025_10m_combined_profile_curvature_2m.tif</li> <li>• Oberflaechenabfluss_distance.tif</li> <li>• TLM3D_hydrography_flow_water_distance.tif</li> <li>• TLM3D_transportation_road_distance.tif</li> <li>• TBk_Bestandeskarte_DG_2m_filled.tif</li> </ul>

---

Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens [0 ... 1]	GeoTiff, 2m	Multiple Logistische Regression über den gesamten Kanton	Predicted_Probabilities_Slide_Areas_sample1_with_forest_without_aspect_without_geology.tif
Normalisierte Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens [0 ... 1]	GeoTiff, 2m	Multiple Logistische Regression über den gesamten Kanton	Predicted_Probabilities_Slide_Areas_sample1_with_forest_without_aspect_without_geology_normalized.tif

---

## 6. Anriss-Wahrscheinlichkeit ( $P_{\text{Hangmuren}}$ )

### 6.1 Methodik

Die Herleitung der Anriss-Wahrscheinlichkeit basiert auf dem Inventar der Anrisspunkte [1]. Im Gegensatz zur Herleitung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens wurden alle Anrisspunkte innerhalb des Untersuchungsgebietes (Kt. Bern, inkl. 500 m Puffer) für die Auswertung verwendet, da die exakte Lokalität der Ereignisse in dieser Auswertung weniger wichtig ist. Somit konnten insgesamt 31'630 bekannte Ereignisse für die Herleitung der Anriss-Wahrscheinlichkeit berücksichtigt werden.

Die tatsächlich kartierten Ereignisse im Inventar der Anrisspunkte [1] können als Mindestanzahl von Ereignissen, welche im Beobachtungszeitraum aufgetreten sind, betrachtet werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass das Inventar nicht vollständig ist. Deshalb werden verschiedene Korrekturfaktoren angewendet, bevor die mittlere Wiederkehrperiode, sowie die Anriss-Wahrscheinlichkeit bestimmt werden.

Als Bezugsraum wurden Prozessquellen gewählt [3], welche hydrologischen Teileinzugsgebieten entsprechen. Die Grösse der Prozessquellen beträgt ca.  $0.2 \text{ km}^2 - 52 \text{ km}^2$ , wobei Prozessquellen grösser ca.  $20 \text{ km}^2$  im Hochgebirge liegen oder Seen umfassen. Die Wahl der Bezugsräume fiel auf Prozessquellen, da so scharfe räumliche Grenzen von Werten, welche in der Herleitung der Anriss-Wahrscheinlichkeit nicht vermieden werden können, entlang von Geländestrukturen verlaufen.

#### 6.1.1 Herleitung des Korrekturfaktors Ereigniskataster $FK_{EK}$

Auf die Ereignisse im Ereigniskataster wird ein Korrekturfaktor für fehlende Ereignisse ( $FK_{EK}$ ) angewendet, da der Ereigniskataster im Kanton Bern erst ab 2005 systematisch geführt wurde. Vor diesem Zeitpunkt kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle Ereignisse, welche im Ereigniskataster erfasst sein könnten, tatsächlich erfasst wurden. Um diese fehlenden Ereignisse zu korrigieren, wird der Faktor  $FK_{EK}$  angewendet. Dieser beruht auf der Annahme, dass das Verhältnis zwischen dem Anteil an Ereignissen im Ereigniskataster und auf Swissimage pro Region konstant und nach 2005 repräsentativ ist. Der Korrekturfaktor  $FK_{EK}$  entspricht dem Anteil an Ereignissen, die bei einem vollständigen Ereigniskataster (vor 2005) zusätzlich erfasst worden wären und wird pro Region aus der Anzahl Ereignissen ( $N$ ) wie folgt hergeleitet (Eq. 9 – 13).

- Anteil Ereignisse im Ereigniskataster ( $EK$ ) vor 2005:  
$$\text{Anteil}_{EK, \text{vor 2005}} = N_{EK, \text{vor 2005}} / N_{\text{Total Ereignisse, vor 2005}} \quad \text{Eq. 9}$$
- Anteil Ereignisse im Ereigniskataster ( $EK$ ) nach 2005:  
$$\text{Anteil}_{EK, \text{nach 2005}} = N_{EK, \text{nach 2005}} / N_{\text{Total Ereignisse, nach 2005}} \quad \text{Eq. 10}$$
- Falls der Anteil Ereignisse im Ereigniskataster vor 2005 niedriger ist als nach 2005, werden vor 2005 so viele hypothetische Ereignisse dem Ereigniskataster hinzugefügt, dass der Anteil Ereignisse im Ereigniskataster vor 2005 demjenigen nach 2005 entspricht.

- Korrigierte Anzahl Ereignisse vor 2005:  $N_{EK,vor\ 2005-korrigiert} = N_{andere,vor\ 2005} / (1 - Anteil_{EK,vor\ 2005}) \cdot Anteil_{EK,nach\ 2005}$  Eq. 11
- Zusätzliche hypothetische Ereignisse:  $N_{hyp.\ EK} = N_{EK,vor\ 2005-korrigiert} - N_{EK,vor\ 2005}$  Eq. 12
- Umrechnung in den Korrekturfaktor Ereigniskataster ( $FK_{EK}$ ), welcher der prozentualen Korrektur entspricht, die auf die Bezugsräume angewendet wird:
 
$$FK_{EK} = N_{hyp.\ EK} / (N_{Total\ Ereignisse,vor\ 2005} + N_{Total\ Ereignisse,nach\ 2005})$$
 Eq. 13

### 6.1.2 Herleitung des Korrekturfaktors Swissimage $FK_{SI}$

Auf die ab Orthophoto (Swissimage) kartierten Ereignisse wird ein Korrekturfaktor für fehlende Ereignisse ( $FK_{SI}$ ) angewendet. Dieser soll den Anteil der Ereignisse, welche bei der Kartierung ab Orthophoto verpasst wurden, korrigieren. In der Kartierung ab Orthophoto können Ereignisse aufgrund verschiedener Effekte fehlen. Dies beispielsweise aufgrund von schlechter Sichtbarkeit wegen Schattenwurf oder Vegetation, dem zeitlichen Abstand zwischen Orthophotos oder der Auflösung von Orthophotos, welche insbesondere das Kartieren von kleineren Ereignissen erschweren kann.

Der Korrekturfaktor  $FK_{SI}$  entspricht dem Anteil an Ereignissen, die bei vollständiger Erfassung der Swissimage-Bilder gemäss dem Verhältnis zu den Ereignissen im Ereigniskataster hätten erfasst werden sollen. Die Herleitung beruht dabei auf der Annahme, dass das Verhältnis zwischen dem Anteil an Ereignissen im Ereigniskataster und auf Swissimage pro Region konstant und nach 2005 repräsentativ ist. Der Faktor  $FK_{SI}$  wird pro Region und Zeitintervallen zwischen Orthophotos wie folgt hergeleitet:

- In jedem Zeitintervall ( $Int$ ), in welchem der Anteil Ereignisse im Ereigniskataster ( $Anteil_{EK,Int}$ ) über dem Anteil nach 2005 ( $Anteil_{EK,nach\ 2005}$ ) liegt, werden so viele hypothetische Ereignisse Swissimage ( $SI$ ) hinzugefügt, dass der Anteil Swissimage dem Verhältnis nach 2005 entspricht (Eq. 14 – 16).
  - Korrigierter Anteil Swissimage ( $SI$ ) Ereignisse pro Intervall ( $Int$ ):
 
$$Anteil_{SI,Int-korrigiert} = 1 - Anteil_{EK,nach\ 2005}$$
 Eq. 14
  - Korrigierte Anzahl Swissimage Ereignisse pro Intervall:
 
$$N_{SI,Int-korrigiert} = N_{EK,Int} / Anteil_{EK,nach\ 2005} \cdot Anteil_{SI,Int-korrigiert}$$
 Eq. 15
  - Zusätzliche hypothetische Ereignisse pro Intervall:
 
$$N_{hyp,SI,Int} = N_{SI,Int-korrigiert} - N_{SI,Int}$$
 Eq. 16

Ein Zeitintervall ist festgelegt als der Abstand zwischen 3 Orthophotos (z.B. DOP01 → DOP03, DOP03 → DOP05). Dies aus dem Grund, dass in einem Jahr Ereignisse im Ereigniskataster dokumentiert werden können, welche aufgrund späteren Aufnahmezeitpunktes des Orthophotos im selben Jahr erst im nachfolgenden Orthophoto erfasst werden. Mit einer Erweiterung des Zeitintervalls zwischen drei anstelle von zwei Orthophotos, kann dieser Effekt verringert werden.

- Für die Bestimmung des Faktors  $FK_{SI}$  ist die totale Anzahl hypothetische Ereignisse pro Region über alle Zeitintervalle ( $x$ ) relevant (Eq. 17).
 
$$N_{hyp,SI} = \sum_{Int=1}^x N_{hyp,SI,Int}$$
 Eq. 17
- Umrechnung in den Korrekturfaktor Swissimage ( $FK_{SI}$ ), welcher der prozentualen Korrektur entspricht, welche auf Bezugsräume angewendet wird (Eq. 18).
 
$$FK_{SI} = N_{hyp.\ SI} / (N_{Total\ Ereignisse,vor\ 2005} + N_{Total\ Ereignisse,nach\ 2005})$$
 Eq. 18

### 6.1.3 Bezugsräume ohne bekannte Ereignisse

In Bezugsräumen, in denen keine bekannten Ereignisse lokalisiert sind, müssen Annahmen getroffen werden, sodass eine mittlere Wiederkehrperiode, sowie Anriss-Wahrscheinlichkeit hergeleitet werden können. Die mittlere Wiederkehrperiode kann nicht hergeleitet werden, wenn die Anzahl Ereignisse im Bezugsraum Null beträgt (Eq. 21). Diesen Bezugsräumen wurde basierend auf einer Interpolation der Hangmurendichte gemäss untenstehendem Vorgehen eine hypothetische Anzahl Ereignisse zugewiesen ( $N_{Ereignisse,interp}$ ). Diese Ereignisse werden in der Herleitung der mittleren Wiederkehrperiode als bekannte Ereignisse betrachtet, um eine Division durch Null zu verhindern und die Korrekturfaktoren  $FK_{EK}$  und  $FK_{SI}$  gleichermassen auf alle Bezugsräume anwenden zu können.

- In einem Hexagon-Raster mit 2 km Abstand wird die Anzahl bekannter Ereignisse gezählt und die Fläche möglicher Anrissgebiete (d.h. Flächen ausserhalb von NoSlide-Gebieten) bestimmt.
- Berechnung der Ereignisdichte pro Hexagon [Ereignisse/ km<sup>2</sup> Anrissfläche]:  
$$Ereignisdichte = \frac{N_{Ereignisse}}{SlideArea} \cdot 10^6 \quad \text{Eq. 19}$$
- Die Zentrumspunkte der Hexagone werden interpoliert (Topo-zu-Raster-Algorithmus), wobei die Zentrumspunkte der Hexagone ohne Ereignisse nicht berücksichtigt werden.
- Das interpolierte Raster wird mit den Prozessquellen überlagert und die mittlere Ereignisdichte pro Prozessquelle wird ermittelt.
- Aus der mittleren Ereignisdichte und der Fläche möglicher Anrissgebiete innerhalb der Prozessquelle wird die Anzahl interpolierter Ereignisse pro Prozessquelle bestimmt.

$$N_{Ereignisse,interp} = \frac{Ereignisdichte \cdot SlideArea}{10^6} \quad \text{Eq. 20}$$

### 6.1.4 Herleitung der mittleren Wiederkehrperiode pro Bezugsraum

Die mittlere Wiederkehrperiode pro Bezugsraum ergibt sich aus der Anzahl Ereignisse pro Bezugsraum und der Beobachtungszeitperiode (Eq. 21). Die Bestimmung der korrigierten mittleren Wiederkehrperiode erfolgt analog mit der korrigierten Anzahl Ereignisse pro Bezugsraum (Eq. 23). Diese errechnet sich aus der Anwendung der Korrekturfaktoren  $FK_{EK}$  und  $FK_{SI}$  auf die Anzahl bekannter Ereignisse im Bezugsraum [1], Eq. 22.

$$WKP_{Bez} = \Delta T / N_{Bez} \quad \text{Eq. 21}$$

$$N_{Bez,korr} = N_{Bez} + FK_{EK} * N_{Bez} + FK_{SI} * N_{Bez} \quad \text{Eq. 22}$$

$$WKP_{korr,Bez} = \Delta T / N_{Bez,korr} \quad \text{Eq. 23}$$

### 6.1.5 Herleitung der mittleren Wiederkehrperiode und Anriss-Wahrscheinlichkeit pro Rasterpixel

Für die Verrechnung der Anriss-Wahrscheinlichkeit in die Auslöse-Wahrscheinlichkeit (siehe Kapitel 3), müssen die Werte pixelbasiert vorliegen. In der pixelbasierten Betrachtung verteilt sich die mittlere Wiederkehrperiode pro Bezugsraum (d.h. Prozessquelle) auf die Fläche möglicher Anrissgebiete (Eq. 24). Die Fläche

möglicher Anrissgebiete ist dabei gegeben durch die Anzahl Pixel ausserhalb von NoSlide-Gebieten ( $n$ ) (siehe Kapitel 5.1).

$$WKP_{korr,Pixel} = WKP_{korr,Bez} \cdot n \quad \text{Eq. 24}$$

$$P_{Anriss,Pixel} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{P_{Anriss,Beu}} \quad \text{Eq. 25}$$

## 6.2 Resultate

### 6.2.1 Korrekturfaktor Ereigniskataster $FK_{EK}$ und Korrekturfaktor Swissimage $FK_{SI}$

Die Anzahl der Ereignisse pro Bezugsraum wird mit den Korrekturfaktoren Ereigniskataster  $FK_{EK}$  und Swissimage  $FK_{SI}$  angepasst. Tabelle 7 zeigt die hergeleiteten Korrekturfaktoren, welche in den entsprechenden Regionen pro Bezugsraum angewendet werden. Der Korrekturfaktor  $FK_{EK}$  variiert zwischen 0% (Oberland Ost) und 16.48% (Jura) und der Korrekturfaktor  $FK_{SI}$  variiert zwischen 10.20% (Schwarzenburg) und 39.38% (Oberland Ost).

Tabelle 7 Korrekturfaktor Ereigniskataster  $FK_{EK}$  und Korrekturfaktor Swissimage  $FK_{SI}$

Name	Zusätzliche Ereignisse EK über gesamte Region	Faktor EK: Korrektur Anzahl Ereignisse in Prozent zur Anwendung über Bezugsräume	Zusätzliche Ereignisse SI über gesamte Region	Faktor SI: Korrektur Anzahl Ereignisse in Prozent zur Anwendung über Bezugsräume
Jura	148	16.48	111	12.36
Mittelland	154	11.24	301	21.97
Emmental	260	3.05	1757	20.63
Schwarzenburg	281	15.41	186	10.20
Oberland Nord	136	3.50	624	16.07
Oberland Ost	0	0	1149	39.36
Oberland West	715	5.60	2992	23.43

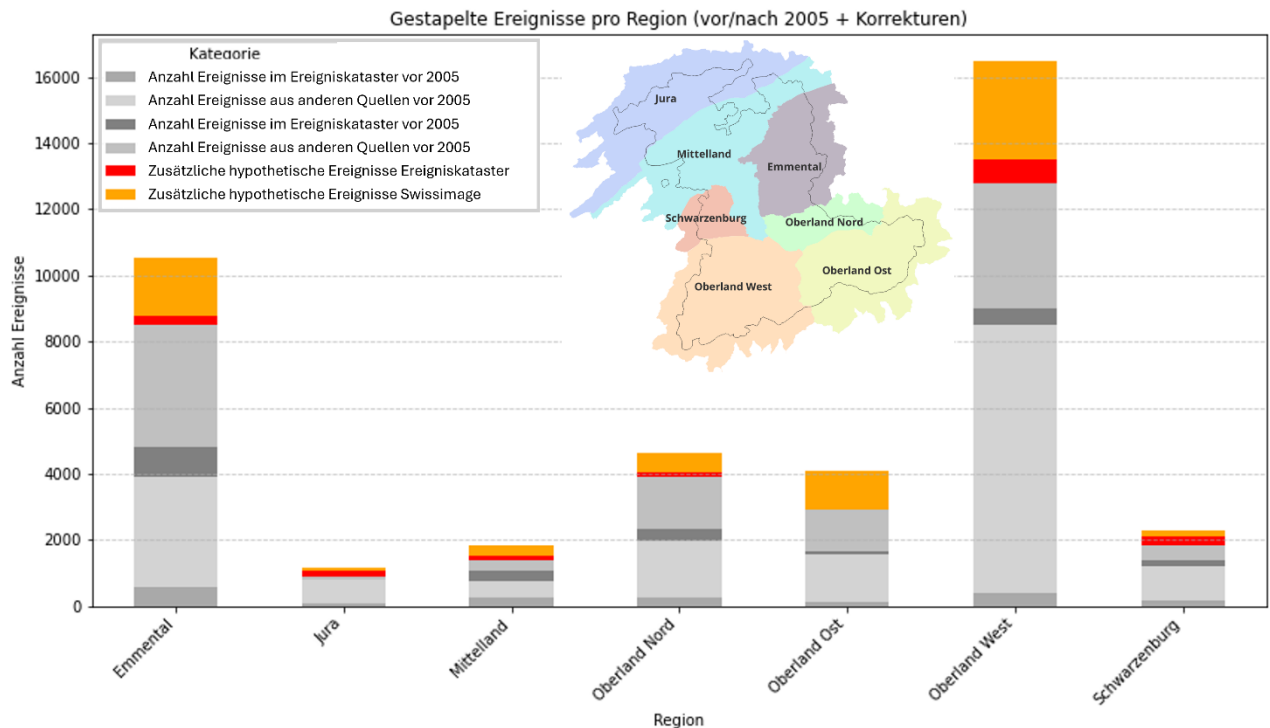


Abbildung 11 Zusätzliche hypothetische Ereignisse pro Region aufgrund der Korrekturfaktoren Ereigniskataster und Swisimage

## 6.2.2 Mittlere Wiederkehrperioden und Anriss-Wahrscheinlichkeit

Die mittleren Wiederkehrperioden von Hangmuren-Ereignissen wurden pro Prozessquelle berechnet und mit den Korrekturfaktoren Ereigniskataster  $FK_{EK}$  und Swisimage  $FK_{SI}$  korrigiert. Abbildung 12 links zeigt das räumliche Muster der korrigierten mittleren Wiederkehrperiode pro Prozessquelle. Die Werte variieren zwischen 0.4 Jahren und 300'000 Jahren. Prozessquellen mit korrigierter mittlerer Wiederkehrperiode von  $< 1$  Jahr sind insbesondere in den Gebieten Emmental, Gantrisch, Adelboden, Lenk und Grindelwald vorzufinden, die eine hohe bekannte Ereignisdichte haben. Prozessquellen mit sehr hohen Wiederkehrwerten ( $> 10'000$  Jahren) treten vor allem dort auf, wo wenige mögliche Anrissflächen vorhanden sind. Die korrigierte mittlere Wiederkehrperiode pro Pixel (Abbildung 12 rechts) berücksichtigt diesen Effekt und stellt die Wiederkehrwerte nur für die möglichen Anrissflächen dar. Pro 2 m x 2 m Pixel beträgt die korrigierte mittlere Wiederkehrperiode zwischen 25'100 Jahren und 57 Mio. Jahren. Das räumliche Muster zeigt, dass Ereignisse insbesondere in den Gebieten Emmental, Gantrisch, Entschligetal, Lenk und Grindelwald häufig sind. Zudem treten auch entlang von Flüssen im Mittelland häufige Wiederkehrperioden auf, da dort in Bezug auf die Fläche möglicher Anrissgebiete häufig Ereignisse auftreten. Der inverse Wert der korrigierten mittleren Wiederkehrperiode pro Pixel stellt die Anriss-Wahrscheinlichkeit  $P_{Hangmure}$  pro Pixel dar und kann für die Berechnung der Auslöse-Wahrscheinlichkeit direkt weiterverwendet werden.

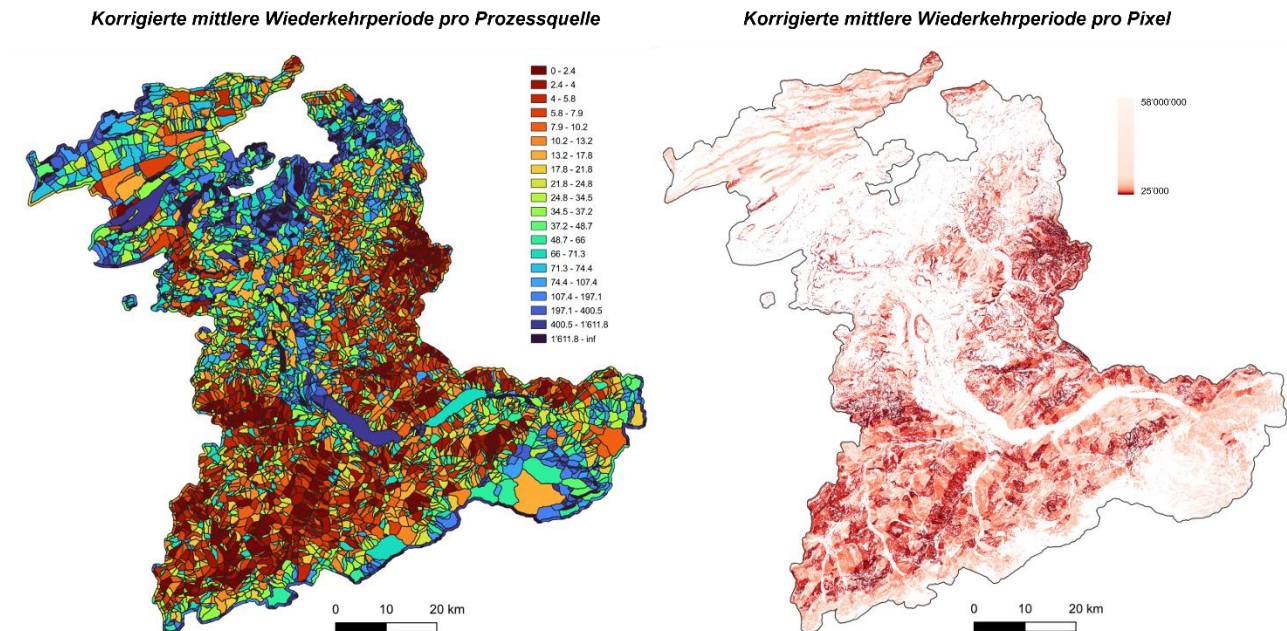


Abbildung 12 Links: Korrigierte mittlere Wiederkehrperiode in Jahren pro Prozessquelle, rechts: korrigierte mittlere Wiederkehrperiode in Jahren pro 2 m x 2 m Pixel in möglichen Anrissflächen über den gesamten Kanton Bern.

### 6.3 Diskussion

Die Resultate der Anriss-Wahrscheinlichkeit zeigen, wie stark sich die Häufigkeiten von Hangmuren-Ereignissen innerhalb des Kantons Bern unterscheiden. In Kombination mit der feinen räumlichen Differenzierung des Dispositionsrasters (Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens, siehe Kapitel 5) kann so ermittelt werden, wie wahrscheinlich das Auftreten von Hangmuren an einem beliebigen Punkt im Kanton ist.

Da als Bezugsraum für die Herleitung der Anriss-Wahrscheinlichkeit Prozessquellen gewählt wurden, bestimmt die Grösse der Prozessquellen die räumliche Auflösung der Resultate. Grossräumige Effekte, welche die Häufigkeit von Ereignissen beeinflussen (z.B. Geologie, Klima) können so abgebildet werden. Scharfe Übergänge zwischen Prozessquellen bilden jedoch nicht zwingend die Realität ab, sondern sind ein Resultat der Aggregation von bekannten Ereignissen basierend auf den Prozessquellen. Verschiedene Bezugsräume und Ansätze zum Vermeiden scharfer Grenzen wurden während der Projektausarbeitung getestet. Die Verwendung der Prozessquellen als Bezugsräume ist jedoch am besten eignet, da scharfe Grenzen auch in den anderen Ansätzen nicht eliminiert werden können und so sinnvollen Terrainstrukturen folgen.

Die verwendeten Korrekturfaktoren, sowie die Behandlung der Prozessquellen ohne bekannte Ereignisse beinhalten signifikante Unsicherheiten. Die Herleitung der Korrekturfaktoren beruht auf der Annahme, dass das Verhältnis zwischen den Ereignissen im Ereigniskataster, sowie in den ab Orthophoto kartierten Ereignissen grundsätzlich konstant bleibt. Der Ereigniskataster wurde jedoch erst ab 2005 systematisch geführt. Bei älteren Zeitständen kommt der Korrekturfaktor Swissimage somit nicht zum Tragen, da der Anteil der Ereignisse im Ereigniskataster aufgrund unvollständiger Erfassung tief ist. Die zeitlichen Abstände der Orthophotos sind im Beobachtungszeitraum ebenfalls nicht konstant und bei älteren Zeitständen länger. Mit

zunehmendem Abstand zwischen den Orthophotos ist es somit auch wahrscheinlicher, dass Ereignisse nicht kartiert wurden, da deren Spuren im nachfolgenden Orthophoto nicht mehr erkennbar sind. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte jedoch, dass sich die Resultate nicht signifikant ändern, wenn bis ins Jahr 2100 alle drei Jahre zusätzliche Zeitstände mit einer zufällig gewählten Anzahl Ereignisse (basierend auf den historischen Beobachtungen) hinzugefügt werden. Dies deutet darauf hin, dass die Beobachtungszeitperiode repräsentativ ist und sich die mittleren Wiederkehrperioden bei einer Verlängerung der Zeitreihe mit regelmässigen Orthophotos nicht markant verändern würde. Es wurde ebenfalls geprüft, ob ein zusätzlicher Korrekturfaktor aufgrund einer Kartierung der Phänomene innerhalb der Testgebiete, angewendet werden könnte. Diese Resultate zeigten jedoch, dass die Unsicherheiten darüber, in welcher Zeitperiode diese Ereignisse stattgefunden haben zu gross sind, um aus der Anzahl von Hangmuren-Anrissen im Digitalen Höhenmodell einen verlässlichen Korrekturfaktor herleiten zu können.

Die hergeleiteten mittleren Wiederkehrperioden und Anriss-Wahrscheinlichkeit sind als bestmögliche Approximation aufgrund der vorhandenen Datengrundlage zu interpretieren und weiterzuverwenden. Nach möglichen zukünftigen Grossereignissen, in welchen eine Vielzahl an Hangmuren beobachtet wird, oder nach einer Weiterführung der Beobachtungen über einen längeren Zeitraum (z.B. 10 Jahre zusätzliche Beobachtungen), könnte sich eine Wiederholung der Analyse empfehlen.

## 6.4 Produkte

Die Produkte in Tabelle 8 wurden zur Anriss-Wahrscheinlichkeit ( $P_{Hangmuren}$ ) geliefert. In Abbildung 12 sind Kartendarstellungen der Resultate, welche über den ganzen Kanton zur Verfügung stehen, ersichtlich.

Tabelle 8 Gelieferte Produkte zur Anriss-Wahrscheinlichkeit ( $P_{Hangmuren}$ )

Produkt	Format	Inhalt	Dateiname
Bezugsraum mit Attributen zu Korrekturfaktoren, mittlerer Wiederkehrperiode und korrigierter mittlerer Wiederkehrperiode pro Bezugsraum	Shapefile Polygon	Mittlere Wiederkehrperiode des Auftretens spontaner Rutschungen [Jahre], unkorrigiert aus Inventar [1]  Korrekturfaktoren $FK_{EK}$ und $FK_{SI}$  Mittlere Wiederkehrperiode des Auftretens spontaner Rutschungen [Jahre], korrigiert mit $FK_{EK}$ und $FK_{SI}$	Prozessquellen_WKP_withAttributes.shp
Korrigierte mittlere Wiederkehrperiode des Auftretens spontaner Rutschungen pro Pixel [Jahre]	GeoTiff, 2m	Deckt Flächen möglicher Anrissgebiete ab.	WKP_corr_norm_per_pixel.tif

---

Anriss-Wahrscheinlichkeit ( $P_{\text{Hangmuren}}$ ) des Auftretens spontaner Rutschungen pro Pixel [1/Jahre]	GeoTiff, 2m	Deckt Flächen möglicher Anrissgebiete ab.	P-Hang- muren_corr_norm_per_pixel.tif
--	-------------	---	--

---

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Auslösewahrscheinlichkeit von spontanen, flachgründigen Rutschungen setzt sich aus der Wahrscheinlichkeit der Anrisseigenschaften ( $P_{phys}$ ), der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ( $P_{räumlich}$ ), sowie der Anriss-Wahrscheinlichkeit ( $P_{Hangmuren}$ ) zusammen. Folgende Komponenten der Auslösewahrscheinlichkeit von spontanen, flachgründigen Rutschungen wurden in diesem Teilprojekt von ProBe über den gesamten Kanton Bern hergeleitet.

- **Wahrscheinlichkeit der Anrissflächen ( $P_A$ ):** Diese Komponente ist Teil der Wahrscheinlichkeit der Anrisseigenschaften. Mittelwert und Standardabweichung der Anrissflächen, welche an einem Standort erwartet werden können, wurden flächendeckend für den Kanton Bern hergeleitet. Der Kanton wurde dabei basierend auf den Standorteigenschaften Hangneigung, Geologie und Extremniederschläge in 26 nicht-zusammenhängende Regionen unterteilt, in welchen sich die Anrissflächenverteilungen unterscheiden. Der Mittelwert der Anrissflächen beträgt je nach Region zwischen 90 m<sup>2</sup> und 313 m<sup>2</sup>.
- **Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ( $P_{räumlich}$ ):** Die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens wurde mittels multipler logistischer Regression bestimmt und ist abhängig von allen im Modell verwendeten Inputparameter. Als Inputparameter wurden topographische und geomorphologische Faktoren berücksichtigt. Dabei fallen insbesondere die Faktoren Wald, Distanz zu fließendem Wasser und Hangneigung im Modell stark ins Gewicht. Die Resultate zeigen die kleinräumig unterschiedliche Disposition des Geländes in Bezug auf mögliche Anrisse von spontanen, flachgründigen Rutschungen.
- **Anriss-Wahrscheinlichkeit ( $P_{Hangmuren}$ ):** Die Anriss-Wahrscheinlichkeit enthält Informationen zur Häufigkeit von spontanen, flachgründigen Rutschungen innerhalb von Prozessquellen. Basierend auf dem historischen Datensatz von Hangmuren-Anrissen im Kanton Bern wurde die mittlere Wiederkehrperiode pro Prozessquelle hergeleitet. Verschiedene Korrekturfaktoren wurden verwendet, um fehlende Ereignisse in den Inventardaten zu kompensieren.

Die angewendete Methodik wurde für die zur Verfügung stehenden Datensätze entwickelt und weist einige Limitationen auf. Insbesondere wären umfassendere Aussagen in Bezug auf die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens, sowie der Anriss-Wahrscheinlichkeit möglich, wenn *Informationen zu den auslösenden Niederschlagsereignissen* im Inventardatensatz zur Verfügung stünden. Dies würde es erlauben, einen dynamischen Faktor der Auslösung (z.B. Niederschlagsintensität) in der Herleitung der Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens zu berücksichtigen. Zudem könnte die Wahrscheinlichkeit von Niederschlagsereignissen in der Herleitung der Anriss-Wahrscheinlichkeit berücksichtigt werden, was genauere Aussagen zur Häufigkeit von Ereignissen und eine Berücksichtigung des Klimawandels ermöglichen würde.

Der Einfluss des *Klimawandels* ist gemäss dem Pflichtenheft [4] in den durchgeführten Analysen und somit in den Lieferprodukten nicht berücksichtigt. Auswirkungen des Klimawandels sind insbesondere aufgrund häufiger erwarteten Starkniederschläge in Bezug auf die Anriss-Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Es bestehen jedoch grosse Unsicherheiten, da genaue Aussagen zur Auswirkung des Klimawandels auf spontane Rutschungen schwierig sind [16]. Da die Methodik zur Herleitung der Anriss-Wahrscheinlichkeit auf mittleren

Wiederkehrperioden basiert, welche aus historischen Daten abgeleitet wurden, müsste eine Berücksichtigung des Klimawandels über einen zusätzlichen Korrekturfaktor erfolgen. Die Herleitung eines solchen Korrekturfaktors basierend auf den historischen Daten und Klimaprognosen wäre äusserst komplex und unsicher, da 1) Rutschprozesse selten sind und somit statistisch über einen langen Zeitraum ausgewertet werden müssen, 2) sich innerhalb der Beobachtungszeiträume nicht nur das Klima, sondern auch die Abdeckung und Qualität der Orthophotos verändert hat und 3) die Auswirkungen des Klimawandels auf Rutschprozesse nicht genau bekannt sind [16].

Zusätzlich könnte der Klimawandel auch Auswirkungen auf die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens haben. Dies hätte dann Auswirkungen auf die Resultate, wenn sich die Inputparameter verändern. So könnte sich der Wald-Deckungsgrad mit dem Klimawandel verringern. Dies beispielsweise aufgrund von Waldbrand, Käferbefall, Ausfall von Baumarten oder Sturm. Weiter könnten sich aufgrund stärkerer Abflüsse auch die Daten zum Oberflächenabfluss, sowie Gerinne verändern. Diese Effekte könnten im multiplen logistischen Regressionsmodell grundsätzlich abgebildet werden, indem die neuen Daten für die Berechnung des Dispositionsrasters eingesetzt werden.

Inwiefern in Zukunft eine Neuberechnung/Aktualisierung notwendig ist, ist für die verschiedenen Lieferprodukte einzeln zu prüfen.

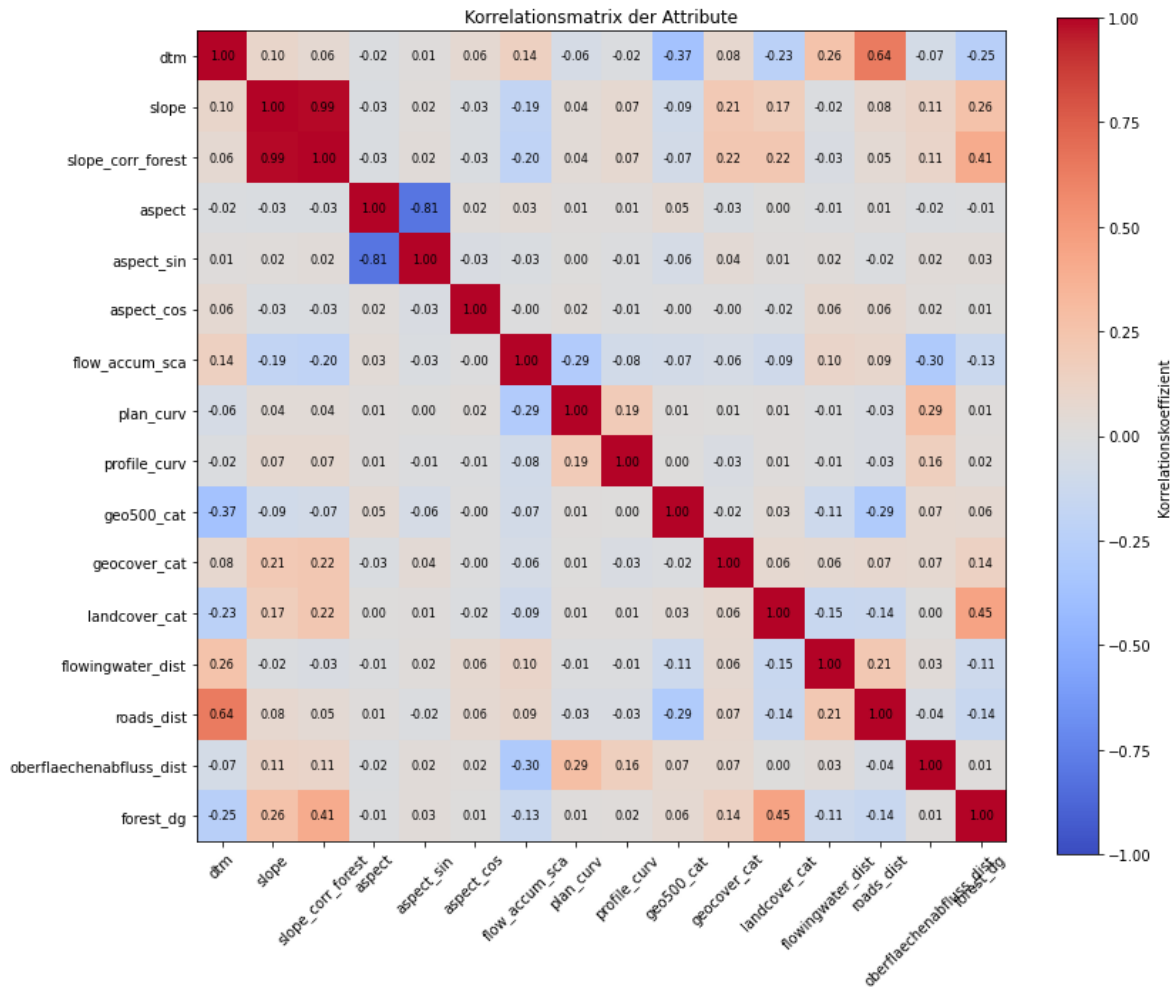
- Die Wahrscheinlichkeit der Anrissflächen ist abhängig vom Datensatz der Anrisspolygone [2], sowie der Geologie, Hangneigung und Niederschlag. Eine Aktualisierung könnte demnach sinnvoll sein, wenn entweder der Datensatz der Anrisspolygone signifikant ausgebaut wird oder neue Daten zu Niederschlagsextremen zur Verfügung stehen, welche in Bezug auf die räumliche Gliederung markante Unterschiede zu den heute verfügbaren Daten aufweisen.
- Die Wahrscheinlichkeit des lokalen Auftretens ist vom Datensatz der Anrisspunkte [1], vom Höhenmodell, sowie der Wald-Bestandeskarte, dem TLM und der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss abhängig. Die Modelle werden sich vermutlich nicht stark ändern, wenn in einigen Jahren mehr Ereignisse zur Verfügung stehen und sich das Höhenmodell minimal ändert. Eine Änderung in der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss wird ebenfalls kaum Auswirkungen auf die Resultate haben, da die Gewichtung dieses Inputparameters im Modell klein ist. Da in wenigen Jahren kaum markante Änderungen in der Distanz zu fliessendem Wasser zu erwarten sind, würde auch eine Aktualisierung des TLM die Resultate kaum merklich verändern. Möglicherweise könnte ein Mehrwert generiert werden, indem anstelle des Datensatzes „TLM-Fliessgewässer“ ein Datensatz verwendet würde, in welchem die Gerinne auf Basis des Höhenmodells berechnet werden. Der grösste Einfluss von einem Parameter, welcher sich in den nächsten Jahren signifikant ändern könnte, ist vom Wald-Deckungsgrad zu erwarten.
- Die Anriss-Wahrscheinlichkeit ist abhängig vom Datensatz der Anrisspunkte [1], sowie der Wahl der Bezugsräume. Eine Aktualisierung könnte somit in Betracht gezogen werden, wenn der Datensatz der Anrisspunkte signifikant mehr Ereignisse enthält, so beispielsweise nach einem Unwetter, welches eine Vielzahl an Hangmuren ausgelöst hat, oder nach einer Verlängerung der Beobachtungszeitperiode (z.B. in 10 Jahren).

## 8. Referenzen

- [7] Budimir, M.E.A., Atkinson, P.M. & Lewis, H.G. (2015). A systematic review of landslide probability mapping using logistic regression. *Landslides* 12, 419–436. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0550-5>
- [8] 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 (Find Individual Trees Schweiz) - Grossflächige Erfassung von Waldstrukturen und Kennzahlen mittels Waldstrukturabgrenzung und Einzelbaumdetektion basierend auf luftgestützten Fernerkundungsdaten. " Projekt-Schlussbericht BFH-HAFL Zollikofen, WSL Birmensdorf/Davos: 56 p.
- [9] Gefährdungskarte Oberflächenabfluss. 2018. Geo7. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Schweizerischer Versicherungsverband (SVV), Vereinigung Kantonalen Gebäudeversicherungen (VKG). <https://www.bafu.admin.ch/de/oberflaechenabfluss>
- [10] GeoCover. Geologisches 2D Modell. Aktueller Zeitstand Oktober 2025. Bundesamt für Landestopografie swisstopo. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geologisches-modell-2d-geocover>
- [11] Geologische / Hydrogeologische Karte der Schweiz, Ausgabejahr 2005 (Version 4). Vektordatensatz. Bundesamt für Landestopografie swisstopo. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geokarten-500-vektor>
- [12] GEOTEST AG (2021). OWARNA – Geotechnische Grundlagen für die Rutschmodellierung. Pilotgebiet Napf: Grundlagen, Methode, Ergebnisse. (Bericht 1420060.1)
- [13] Hählen, N. (2025). Bestimmung der Anrissmächtigkeit spontaner Rutschungen für probabilistische Modellierungen. Kurzbericht.
- [14] Hydrologischer Atlas der Schweiz. Extreme Punktniederschläge v3.0 (2025). [https://hydro-maps.ch/#de/8/46.830/8.193/bl\\_hds+](https://hydro-maps.ch/#de/8/46.830/8.193/bl_hds+)
- [15] Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F. and Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surf. Process. Landforms*, 29: 687- 711. <https://doi.org/10.1002/esp.1064>
- [16] Moser, M., Rohn, J., Hamberger, M., Schoger, H. (2025): Hangmuren: auslösende Ursachen, mittelbare Faktoren, Klassifikationssysteme zur Rutschungserkennung. Springer Spektrum Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-70285-7>
- [17] Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B.D., Mihir, M., Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180: 60 – 91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>.
- [18] Stumpf, F., Behrens, T., Schmidt, K. und Keller, A. (2023). Hinweiskarten für Bodeneigenschaften - Landesweit modellierte Karten für Bodeneigenschaften für drei Tiefenstufen. KOBO-Bericht Nr. 6, BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter [www.ccsols.ch](http://www.ccsols.ch)
- [19] swissALTI3D 2025, provisorisch. Datenlieferung AWN vom 13. August 2025.
- [20] swissALTI3D. das hochpräzise digitale Höhenmodell der Schweiz. Aktueller Zeitstand 2025. Bundesamt für Landestopographie swisstopo. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/hoehenmodell-swis-salti3d>

- [21] swissSURFACE3D. Die klassifizierte Punktwolke der Schweiz, Aktueller Zeitstand 2025. Bundesamt für Landestopografie swisstopo. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/hoehenmodell-swissurface3d>
- [22] swissTLM3D. Das grossmassstäbliche Topografische Landschaftsmodell der Schweiz, Version 2.3. Bundesamt für Landestopografie swisstopo. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/landschaftsmodell-swisstlm3d>
- [23] TBk Bestandeskarte Kanton Bern. 2024. Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL. Datenlieferung AWN vom 13. August 2025.
- [24] van Zadelhoff, F. B., Albaba, A., Cohen, D., Phillips, C., Schaepli, B., Dorren, L., and Schwarz, M. (2022). Introducing SlideforMAP: a probabilistic finite slope approach for modelling shallow-landslide probability in forested situations, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 22, 2611–2635, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2611-2022>.
- [25] Williams, F., McColl, S., Fuller, I., Massey, C., Smith, H., Neverman, A.: (2021): Intersection of fluvial incision and weak geologic structures cause divergence from a universal threshold slope model of landslide occurrence, Geomorphology, 389, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107795>.

**Anhang A – Korrelationsmatrix der verwendeten Datensätze für die statistischen Modellierungen (Pseudo-Fuzzy-Logic und multiple logistische Regression)**



**Anhang B** – Verwendete Lithologieklassen für den Parameter Lithologie (geo500\_litho) in den statistischen Ansätzen

<b>Code</b>	<b>Lithologiekategorie</b>
1	Quarzporphyr
2	Amphibolite mit Übergängen in Diorite und in hornblendeführende Gneise
3	Biotit- bis muskowitzreiche Gneise und Glimmerschiefer
4	Blockschutt und Gehängeschutt
5	Dolomit mit Gipslagen
6	Dolomite und Rauwacke
7	Dolomitgestein z.T. mit Kalklagen
8	Eisenschüssige Tone
9	Feste, kompakte Sandsteine mit Lagen von Mergelschiefern und Kalkphylliten
10	Gletscher
11	Gneise mit reichlich Feldspat
12	Gneise mit reichlich Feldspat, verschiefert unter Serizit-, Epidot- und Chloritbildung
13	Granit mit Serizit, Epidot und Chlorit
14	Granit mit Übergängen in Quarzdiorit und Quarzsyenit
15	Kalkbrekzie oder Kalkkonglomerat
16	Kalksteine allgemein, häufig mit mergeligen Zwischenlagen
17	Kalksteine mit Dolomitlagen
18	Kalksteine mit bedeutenden Lagen von Mergeln, Mergelschiefern und Mergelkalken
19	Kalksteine, oft etwas mergelig
20	Kiese und Sande
21	Kiese und Sande, z.T. mit tonigen oder siltigen Lagen
22	Kieselkalke
23	Konglomerate mit Sandstein- und Mergellagen
24	Mergel mit Lagen von muschelreichen Sandsteinen bis Muschelbrekzien
25	Mergel mit Lagen von stärker verfestigten Sandsteinen
26	Mergel mit schwach verfestigten Sandstein-, Konglomerat- oder Gerölllagen
27	Mergel und Schiefertone mit Kalk-, Dolomit-, Sandsteinbänken
28	Mergelschiefer bis Kalkphyllite mit Einlagerungen von Sandsteinen
29	Mergelschiefer bis Kalkphyllite mit Lagen von vulkanischen Tuffsandsteinen
30	Mischzone von Amphiboliten und Gneisen
31	Oberflächengewässer, Seen

- 32** Sande, Kiese, Steine und Blöcke
- 33** Sandkalke bis Kieselkalke mit Lagen von Mergelschiefern
- 34** Sandstein- und Mergellagen mit Lagen von schwach bis mittelstark verfestigten Konglomeraten
- 35** Sandsteine mit Mergellagen
- 36** Serizit-Chloritgneise bis -schiefer
- 37** Silte bis Sande, mit Kiesen, Steinen und Blöcken
- 38** Silte bis siltige Sande, oft tonig, meist kalkhaltig
- 39** Tonige Silte, bis Tone mit Sandlagen
- 40** Vorwiegend kalkhaltige, porenreiche Sandsteine mit Mergellagen

**Anhang C** – Verwendete LithoCodes für den Parameter Lithologie (geocover) in den statistischen Ansätzen, gemäss [12]

<b>Litho_Code</b>	<b>Bezeichnung</b>
1	Fels unter geringmächtiger Bedeckung
2	alte Schotter (prä-Eem)
3	junge Schotter (post-Eem)
4	alte Moräne (prä-Eem)
5	junge Moräne (post-Eem)
6	Hangschutt undifferenziert
7	Blockschutt
8	Hangschutt verlehmt
9	Gehängelehm
10	Bachschutt
11	künstliche Auffüllung
12	Sumpf/Ried
13	Sackungsmasse
14	Rutschmasse
15	Quelltuff
16	Gletscher
17	See
18	Fluss
90	Fels unter geringmächtiger Bedeckung