



Wald als Hangmurenbrecher

Quantifizierung der Wirkung verschiedener Waldstrukturen im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren als Grundlage für NaiS

Schlussbericht

AutorInnen: Luuk Dorren, Adel Albaba, Niels Hollard, Christine Moos
(BFH - Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften HAFL)

Auftraggeber: Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz (WHFF-CH)

Datum: 23.11.2022

Versionen

Version	Datum	Status	Bemerkung
0.1	19.10.2022	Entwurf	Erste Version
0.2	23.11.2022	Korrektur	Sprach- und inhaltliche Korrekturen

Danksagung

Unser Dank geht an Pietro Baragiola, Marco Conedera, Simon Cramer, Mario Krähenbühl, Dominik May, Massimiliano Schwarz und Kim von Wattenwyl für ihre Mitarbeit bei der Durchführung des Projekts sowie an Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz (WHFF-CH) und die Kantone BE, GL, NW, SG, TI, VS und Fürstentum Liechtenstein für ihre Unterstützung.

Zitierung

Dorren, L., Albaba, A., Hollard, N., Moos, C. (2022). Wald als Hangmurenbrecher - Quantifizierung der Wirkung verschiedener Waldstrukturen im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren als Grundlage für NAI-S. Schlussbericht Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz. *BFH - HAFL, Zollikofen*, 47 S.

Zusammenfassung

In der Schweiz verursachen flachgründige Rutschungen und Hangmuren jedes Jahr hohe Infrastrukturschäden, Sperrungen wichtiger Infrastruktur, Evakuationen und manchmal auch Todesfälle. Spätestens seit der Einführung des Kreislaufs des integralen Managements von Naturgefahrenrisiken ist der Schutzwald die wichtigste biologische Massnahme gegen flachgründige Rutschungen und Hangmuren. Dabei liegt der Fokus i.d.R. auf der Wirkung des Schutzwaldes im Anrissgebiet der Rutschungen. Nicht nur im Anrissgebiet, sondern auch im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren sind im Gelände aber häufig Beweise dafür zu finden, dass der Wald auch dort eine schützende Wirkung hat. Trotzdem wurde die Schutzwirkung des Waldes im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren bis jetzt nicht systematisch untersucht.

Damit Richtwerte zur Schutzwirkung des Waldes im Transit- und Ablagerungsgebiet entwickelt werden können, brauchen wir neue Daten und Kenntnisse. Die Ziele dieses Projektes waren darum erstens, den Einfluss der Waldstruktur auf die Schutzwirkung gegen Hangmuren und auf die negative Wirkung von mobilisierten Einzelbäumen im Transit- und Ablagerungsgebiet zu quantifizieren. Zweitens, die wichtigsten Waldstrukturparameter, die diese Schutzwirkung bestimmen, zu erfassen. Drittens, diese Parameter in Richtwerte für das zukünftige NaiS-Anforderungsprofil Rutschung (im Bereich Transit- und Ablagerungsgebiet) zu übertragen und viertens, die Schutzwirkung des Waldes gegen Hangmuren im Transit- und Ablagerungsgebiet mittels einer Risikoermittlung in zwei Fallbeispielen aufzuzeigen.

Mithilfe von Analysen historischer Hangmurenereignisse in Kombination mit Geländeaufnahmen im Wald konnte gezeigt werden, dass die Bremswirkung des Waldes hauptsächlich von der Stammzahl beeinflusst wird. Mit zunehmender Dichte des Waldes nimmt die Länge der Auslaufstrecke ab. Zudem konnte gezeigt werden, dass hinter dickeren Bäumen deutlich mehr Material abgelagert werden kann. Dies lässt darauf schliessen, dass ein gut strukturierter Bestand mit einer hohen Stammzahl, aber auch vereinzelt grossen Durchmessern idealen Schutz gegen Hangmuren im Transitgebiet bietet. Die Ergebnisse der Laborversuche deuten darauf hin, dass die Bremswirkung von verschiedenen Waldstrukturen (dicht, offen, mit Lücken) im Vergleich zu einer Situation ohne Wald immer gegeben ist und zwar bei niedrigeren (16%) und höheren (20%) Wassergehalten. Die negative Wirkung von Bäumen in der Transitstrecke von Hangmuren konnte in diesem Projekt leider nicht untersucht werden. Auslaufstrecken von historischen Hangmurenereignissen mit und ohne Wald in der Transitstrecke konnten aber sehr gut mit DEM-basierten Simulationen mit starren Zylindern mit BHD > 20 cm nachgebildet werden und erlaubten eine Berechnung und Monetarisierung der Schutzwirkung des Waldes in der Transitstrecke von Hangmuren. Das hat gezeigt, dass sich die risikoreduzierende Wirkung des Waldes im Transitgebiet einer Hangmure auf 6'500 CHF/Jahr für eine Autobahn ähnlich der Gotthardstrecke belaufen kann.

Basierend auf den Schlussfolgerungen dieses Forschungsprojekts hält dieser Bericht wichtige Aussagen betreffend der Schutzfunktion des Waldes im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren für das neue NaiS-Anforderungsprofil Rutschungen fest.

Résumé

Chaque année en Suisse, les glissements de terrain superficiels et les coulées de boue causent des dommages importants aux infrastructures, des fermetures d'infrastructures de première nécessité, des évacuations et parfois même des décès. Depuis l'introduction des éléments de la gestion intégrée des risques liés aux dangers naturels, la forêt de protection est la principale mesure biologique contre les glissements de terrain superficiels et les coulées de boue. L'accent est généralement mis sur l'effet de la forêt de protection dans la zone de déclenchement des glissements de terrain. Or, on trouve souvent sur le terrain des preuves que la forêt a également un effet protecteur non seulement dans la zone de déclenchement, mais aussi dans les zones de transit et de dépôt des coulées de boue. Pourtant, l'effet protecteur de la forêt dans ces zones n'a pas été étudié systématiquement jusqu'à présent.

Pour pouvoir développer des valeurs indicatives sur l'effet protecteur de la forêt dans les zones de transit et de dépôt, nous avons besoin de nouvelles données et connaissances. Les objectifs de ce projet étaient, premièrement, de quantifier l'influence de la structure forestière sur l'effet protecteur de la forêt contre les coulées de boue et sur l'effet négatif des arbres isolés mobilisés dans la zone de transit et de dépôt. Deuxièmement, de recenser les principaux paramètres de la structure forestière qui déterminent cet effet protecteur. Troisièmement, de transposer ces paramètres en valeurs indicatives pour le futur profil d'exigences NaiS en matière de glissements de terrain (dans la zone de transit et de dépôt) et quatrièmement de démontrer l'effet protecteur de la forêt contre les coulées de boue dans la zone de transit et de dépôt au moyen d'une détermination des risques dans deux cas d'étude.

A l'aide d'analyses d'événements historiques de coulées de boue en combinaison avec des relevés de terrain en forêt, il a été possible de montrer que l'effet de freinage de la forêt est principalement influencé par le nombre de tiges. Plus la densité de la forêt est élevée, plus la longueur de la distance d'écoulement diminue. En outre, il a pu être démontré que derrière des arbres plus épais, il est possible de déposer nettement plus de matériaux. Cela permet de conclure qu'un peuplement bien structuré avec un nombre élevé de tiges, mais aussi, de manière isolée, de grands diamètres, offre une protection idéale contre les coulées de boue de versant dans la zone de transit. Les résultats des essais en laboratoire indiquent que l'effet de barrière de différentes structures forestières (denses, ouvertes, avec des trouées) est toujours présent par rapport à une situation sans forêt, et ce pour des teneurs en eau relativement faibles (16%) et élevées (20%). L'effet négatif des arbres sur le trajet de transit des coulées de boue n'a malheureusement pas pu être étudié dans le cadre de ce projet. Cependant, des tronçons de sortie d'événements historiques de coulées de boue de versant avec et sans forêt dans le tronçon de transit ont pu être très bien reproduits avec des simulations basées sur DEM avec des cylindres rigides d'un DHP > 20 cm et ont permis de calculer et de monétariser l'effet protecteur de la forêt dans le tronçon de transit des coulées de boue de versant. Cela a montré que l'effet de réduction des risques de la forêt dans la zone de transit d'une coulée de boue de versant peut s'élever à 6'500 CHF/an pour une autoroute similaire à la section du Gothard.

Sur la base des conclusions de ce projet de recherche, le présent rapport contient finalement des informations importantes concernant la fonction protectrice de la forêt dans la zone de transit et de dépôt des coulées de boue pour le nouveau profil d'exigences NaiS relatif aux glissements de terrain.

Summary

In Switzerland, every year shallow landslides and resulting hillslope debris flows cause high infrastructure damage, closures of important infrastructure, evacuations and sometimes even casualties. At the latest since the introduction of the cycle of integrated management of natural hazard risks, the protection forest is the most important biological measure against such risks. Thereby, the focus is usually on the effect of the protection forest in the landslide release area. However, there is quite some field evidence that forests also have a protective effect in the transit and deposition areas of hillslope debris flows. Nevertheless, this was not yet systematically investigated.

To develop guideline values for the protective effect of forests in transit and deposition areas, we need new data and knowledge. The objectives of this project were therefore firstly to quantify the influence of forest structure on the protective effect against hillslope debris flows and on the negative effect of mobilised stems in the transit and deposition area. Secondly, to record the most important forest structure parameters that determine the protective effect. Thirdly, to transfer these parameters into guideline values for the future NaiS target profile for landslides and fourthly, to demonstrate the protective effect of the forest against hillslope debris flows in the transit and deposition area by means of a risk assessment in two case studies.

Based on analyses of historical hillslope debris flow events in combination with terrain surveys in the forest at the event location, it could be shown that the braking effect of the standing trees is mainly influenced by the stand density. As the density of the forest increases, the length of the runout zone decreases. In addition, it could be shown that significantly more material can be deposited behind thicker trees. This suggests that a well-structured stand with a high stem number, but also occasional large diameters, offers ideal protection against hillslope debris flows in the transit area. The results of the laboratory tests indicate that the braking effect of different forest structures (dense, open, with gaps) is always given in comparison to a situation without forest, and this for relatively low (16%) but also higher (20%) water contents. Unfortunately, the negative effect of trees in the transit route of hillslope debris flows could not be investigated in this project. However, runout of historical hillslope debris flow events with and without forest in the transit zone could be simulated very well with DEM-based simulations by inserting rigid cylinders with BHD > 20 cm in the model and allowed a calculation and monetisation of the protective effect of forest in the transit zone. This showed that the risk-reducing effect of forest in the transit area of a hillslope debris flow can amount to CHF 6,500/year for a highway similar to the Gotthard section.

Based on the conclusions of this research project, this report finally contains important statements regarding the protective function of the forest in the transit and deposition area of hillslope debris flows for the new NaiS target profile for landslides.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Résumé	ii
Summary	iii
1. Einleitung	1
1.1. Ziele des Forschungsprojektes	2
1.2. Bedeutung des Projektes für die Forschung und die Praxis	2
2. Material und Methoden	3
2.1. Feldaufnahmen und Ereignisanalysen	3
2.2. Hangmurenexperimente mit Wald im Labor	4
2.3. Risikobasierte Analyse der Waldwirkung	10
3. Ergebnisse	17
3.1. Analyse der Ereignisse aus der Hangmurendatenbank	17
3.2. Hangmurenexperimente im Labor	26
3.3. Auslauf Modellierung und Risikoermittlung	29
4. Diskussion	34
4.1. Ereignisanalysen	34
4.2. Laborexperimente	34
4.3. Auslaufmodellierung und Risikoermittlung	35
5. Schlussfolgerungen	37
5.1. Aussagen für das neue NaiS-Anforderungsprofil Rutschungen	37
Literaturverzeichnis	39
A. Anhang - Analyse Hangmurenereignisse	42
B. Glossar	51

1. Einleitung

Während des Unwetters im August 2005 haben Rutschungen und Hangmuren schweizweit innert 48 Stunden Schäden in einer Höhe von 150 Millionen Franken verursacht [1]. Nicht nur bei solchen Grossereignissen, sondern auch bei häufiger auftretenden Starkniederschlägen oder nach starker Schneeschmelze führen Hangmuren in der Schweiz fast jedes Jahr zu erheblichen Problemen. Beispiele sind die Todesfälle im Tessin im Jahre 2014 oder im Januar 2018 die Übermürung mit Auffahrunfall und anschliessender Sperrung der Gotthard-Autobahn, die Sperrung der BLS-Südrampe sowie die Entgleisung eines Regionalzuges in Solothurn.

Rutschungen und Hangmuren können ausserdem Schäden durch Hochwasser erhöhen, da der zusätzliche Transport von Geschiebe und Schwemmholtz in Gerinnen und Flüssen bei Brücken und Durchlässen zu Verkläuerungen führt. Zudem ist es nicht auszuschliessen, dass die Gefährdung durch Rutschungen und Hangmuren zunehmen wird, weil der Klimawandel die Häufigkeit und Intensität von extremen Unwetterereignissen erhöhen könnte [2].

Seit der Einführung des Kreislaufs des integralen Managements von Naturgefahrenrisiken wird nicht mehr nur auf Gefahrenabwehr mittels technischer Schutzbauten gesetzt. Risikoreduktion durch verbesserte Warnung, Gefahrenprävention durch Raumplanung sowie organisatorische und biologische Massnahmen sind ebenso wichtig [3, 4]. Schon seit 1991 ist die Wichtigkeit von biologischen Schutzmassnahmen in der Schweiz durch den Artikel 19 des Waldgesetzes festgehalten. Dadurch hat der Stellenwert der Schutzwirkung der Wälder erheblich zugenommen ([5, 6, 7]) und es konnten Massnahmen zur Förderung, Pflege und Erhaltung von Wäldern unterstützt werden, damit diese ihre wichtige Rolle beim Schutz vor Naturgefahren langfristig erfüllen können.

Auch im Bereich Hangmuren ist der Schutzwald die wichtigste biologische Massnahme. Die Bedeutung von Wäldern als Schutzmassnahme gegen Hangmuren wurde schon in Maria-Theresias (von Österreich) Wald- und Holzordnung von 1754 anerkannt [8]. Ein besonderes Augenmerk wird dabei i.d.R. auf seine stabilisierende Wirkung auf den Boden und die damit verbundene Vorbeugung von flachgründigen Rutschungen gelegt [9, 10, 6]. In der Schweiz machen Schutzwälder rund die Hälfte der gesamten Waldfläche aus [11] und davon schützen 27% gegen flachgründige Rutschungen und Hangmuren [12]. Im Idealfall verhindert der Schutzwald vollständig den Anriss von Hangmuren. Wenn dies nicht der Fall ist, reduziert der Schutzwald an vielen Stellen auch das Risiko, weil das Anrissvolumen in der Regel verringert wird.

Die Wegleitung „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald“ (NaiS; [13]) ist die Grundlage für Bund und Kantone bei der Pflege der Schutzwälder. Das Ziel ist dabei, die Walddynamik so zu beeinflussen, dass eine optimale und kontinuierliche Schutzwirkung sowie eine hohe Belastbarkeit der Wälder im Falle von Naturgefahren gewährleistet werden kann. Das NaiS-Anforderungsprofil für Wälder, die gegen Rutschungen schützen, basiert auf wissenschaftlichen, ökologischen Erkenntnissen und Expertenmeinungen, jedoch nicht auf quantitativen Erkenntnissen zu den Wechselwirkungen zwischen Wäldern und Gravitationsprozessen. Um die Schutzwirkung des Waldes gegen Rutschungen und Hangmuren quantifizieren zu können, wurden schon mehrere Arbeiten durchgeführt. Dabei liegt der Fokus i.d.R. auf der Wirkung des Schutzwaldes im Anrissgebiet der Rutschungen.

Nicht nur im Anrissgebiet, sondern auch im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren sind im Gelände häufig Beweise dafür zu finden, dass der Wald eine schützende Wirkung hat. Bei Hangmuren, die durch den Wald geflossen sind, wird ersichtlich, dass Material hinter den Einzelstämmen abgelagert wurde. Folglich ist anzunehmen, dass die Reichweite und Intensität von Hangmuren durch den Wald verringert werden, ähnlich wie bei Steinschlägen ([14] und Lawinen ([15, 16])). Die Ereignisanalyse 2005 von [17] hat gezeigt, dass bei Rutschungen im Freiland geringere Pauschalgefälle gemessen wurden als bei Waldrutschungen. Das heisst, dass im Freiland längere Auslaufstrecken auftreten als im Wald. Auch einige internationale Studien bestätigen dies ([18], [19] und [20]). Trotzdem wurde die Schutzwirkung des Waldes im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren bis jetzt nicht systematisch untersucht.

Damit Richtwerte zur Schutzwirkung des Waldes im Transit- und Ablagerungsgebiet entwickelt werden können, brauchen wir Daten zur „Gefahrenreduktion“ der Wälder (z.B. Prozentsatz der im Wald gestoppten Masse in

Vergleich zur Anrissmasse, die reduzierte Auslaufstrecke oder die Verringerung des Drucks). Zudem sollten die allfälligen negativen Auswirkungen des Schutzwaldes bei der Untersuchung ebenfalls berücksichtigt werden. Zum Beispiel kann die Mobilisierung von Bäumen durch Hangmuren (siehe [21], [22], [23]) zur Verkläusung von Flusswegen und Durchlässen führen [24].

Bevor die Waldwirkung im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren in einer Wegleitung wie NaiS berücksichtigt werden kann, müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie gross ist die positive und negative Wirkung verschiedener Waldstrukturen im Transit- und Ablagerungsgebiet auf die Reichweite und Intensität von Hangmuren?
- Welche Waldstrukturparameter sind relevant für die Quantifizierung dieser Waldwirkung?
- Welche weiteren Kenngrössen (Topographie, vom Rutsch-Prozess abhängige Variablen) spielen dabei eine Rolle?
- Lassen sich die Waldstrukturen, welche optimal gegen Hangmuren im Transit- und Ablagerungsgebiet schützen, mit denen im Anrissgebiet in Übereinstimmung bringen?

1.1. Ziele des Forschungsprojektes

Die Ziele dieses Projektes sind:

- Der Einfluss der Waldstruktur auf die Schutzwirkung gegen Hangmuren und auf die negative Wirkung von mobilisierten Einzelbäumen im Transit- und Ablagerungsgebiet zu quantifizieren.
- Die wichtigsten Waldstrukturparameter, die diese Wirkung bestimmen, zu erfassen.
- Die Übertragung dieser Parameter in Richtwerte, welche eine Basis für das zukünftige NaiS-Anforderungsprofil Rutschung (im Bereich Transit- und Ablagerungsgebiet) bilden.
- Die Schutzwirkung des Waldes gegen Hangmuren im Transit- und Ablagerungsgebiet mittels einer Risikoermittlung in zwei Fallbeispielen quantifizieren. Damit können wir aufzeigen, welchen Anteil an der gesamten Risikoreduktion die Waldwirkung im Transit- und Ablagerungsgebiet im Vergleich zum Anteil der Wirkung im Anrissgebiet hat.

1.2. Bedeutung des Projektes für die Forschung und die Praxis

Das wichtigste Produkt dieses Projekts sind Grundlagen für eine zukünftige Überarbeitung des NaiS-Anforderungsprofils Rutschung. Es beantwortet die Frage, ob und wie gross die Wirkung von verschiedenen Waldstrukturen im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren ist.

Diese Grundlagen umfassen Informationen zur Schutzwirkung des Waldes im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren mit Angaben zu den Bedingungen, unter denen ein Wald eine relevante Schutzwirkung haben kann. Diese Informationen werden als Richtwerten zu den wichtigsten Waldstrukturparametern (z.B. Zieldurchmessern und -stammzahl) gegeben.

Dieses Projekt zeigt zudem mittels Risikoermittlung an zwei Fallbeispielen auf, um wieviel der Wald das Risiko (in CHF pro Jahr) durch Hangmuren reduzieren kann. Dabei wird das Verhältnis zwischen der Risikoreduktion des Waldes im Anrissgebiet und im Transit-/Ablagerungsgebiet quantifiziert. Die monetarisierte Schutzwirkung stellt eine hilfreiche Grundlage für SchutzwaldpraktikerInnen bei strategischen/politischen Diskussionen über die Schutzwirkung des Waldes dar.

2. Material und Methoden

2.1. Feldaufnahmen und Ereignisanalysen

2.1.1. Daten und Feldaufnahmen

Die Wirkung des Waldes auf den Auslauf von Hangmuren wurde basierend auf historischen Ereignissen analysiert. Dazu wurde eine Datenbank mit gut auswertbaren Ereignissen im Wald sowie im Freiland für die Kantone Graubünden und Bern basierend auf den kantonalen Ereigniskatastern zusammengestellt. Es wurden nur Ereignisse mit einer Fläche von $\leq 10'000 \text{ m}^2$ sowie einem minimalen Abstand von 10 m zu Gewässern berücksichtigt, um Uferrutschungen und Murgänge auszuschliessen. Anschliessend wurden Hangmuren-Ereignisse im Wald und im Freiland visuell mit Hilfe des Luftbildes sowie basierend auf einer GIS-Analyse ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die Ereignisse entweder komplett innerhalb oder ausserhalb des Waldes befinden. Dies resultierte schliesslich in einem Datensatz von 45 Ereignissen im Wald und 82 im Freiland für den Kanton Graubünden sowie 54 Ereignissen im Wald und 184 im Freiland für den Kanton Bern. Die Auslaufstrecke der Hangmuren wurde mittels eines Algorithmus in GIS (Python) berechnet. Dabei wurden aus den Umhüllenden der Hangmuren Stützpunkte generiert, aus denen basierend auf dem Höhenmodell (swissALTI3D) der Anrisspunkt bestimmt werden konnte. In einem Bereich von 400 m um die Umhüllenden wurden schliesslich Konturlinien generiert. Die Auslaufstrecke wurde vom Anrisspunkt aus in der Falllinie jeweils senkrecht zu den Konturlinien bestimmt. Der Vorgang wurde so lange wiederholt, bis die Auslaufstrecke das untere Ende der Umhüllenden erreicht hat. Basierend auf der vertikalen und horizontalen Distanz zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt einer Hangmure wurde die mittlere Neigung (Pauschalgefälle) berechnet.

Für die 45 Wald-Hangmuren im Kanton Graubünden sowie 25 Wald-Hangmuren im Kanton Bern wurden Wald- sowie Gelände- und Rutschungsparameter im Feld aufgenommen (siehe Tab. 2.1). Die Waldeigenschaften wurden in ein bis zwei Stichprobenflächen im Ausflaubereich der Rutschungsereignisse sowie basierend auf Fernerkundungsdaten erhoben. Die Stichprobenflächen wurden jeweils so gewählt, dass sie das relevante Waldgebiet möglichst repräsentativ abbilden. Falls der Wald in der Prozessfläche stark zerstört oder seit dem Ereignis eingegriffen worden war, wurde die Aufnahme ausserhalb der Prozessfläche durchgeführt. Die Grösse einer Stichprobenfläche wurde abhängig vom Grad der Bestockung gewählt. Auf dicht bestockten Flächen hatten die Plots eine Grösse von $10 \times 10 \text{ m}^2$, auf weniger dichten Flächen von $20 \times 20 \text{ m}^2$. In den Stichprobenflächen wurden jeweils die Brusthöhendurchmesser (BHD) aller Bäume $\geq 8 \text{ cm}$ gemessen und der Laub- bzw. Nadelholzanteil sowie die Grundfläche mit einem Bitterlich-Plättchen erhoben. Anschliessend wurde die Stammzahl basierend auf der ermittelten Grundfläche bestimmt (Stammzahl Stichprobe; vgl. Tab. 2.1). Zusätzlich wurden für alle Ereignisse im Wald die Stammzahl und die BHD-Verteilung basierend auf Fernerkundungsdaten bestimmt (Einzelbaumerkennung mit Software FINT, siehe [25]). Dabei wurden alle detektierten Bäume im Bereich einer Hangmure inklusive einem Puffer von 10 m ausserhalb der Hangmure berücksichtigt.

Für alle Hangmuren-Ereignisse wurde zusätzlich die Anrissfläche ermittelt. Dabei wurde ein Zehntel der Auslaufstrecke als mögliche Anrisslänge angenommen. Basierend auf der berechneten Anrisslänge, Orthophotos und dem swissALTI3D Hillshade wurde schliesslich die Anrissfläche visuell bestimmt.

2.1.2. Materialablagerung hinter Bäumen

Wo möglich wurde das Volumen der Materialablagerung hinter Einzelbäumen während den Geländeaufnahmen im Kanton Graubünden bestimmt und in Bezug auf den BHD sowie die Hangneigung analysiert. Um das Volumen zu berechnen, wurde die Höhe, Breite und Länge der pyramidenförmigen Ablagerungen gemessen (Abb. 2.1). Insgesamt wurden die Ablagerungen bei 36 Bäumen gemessen.

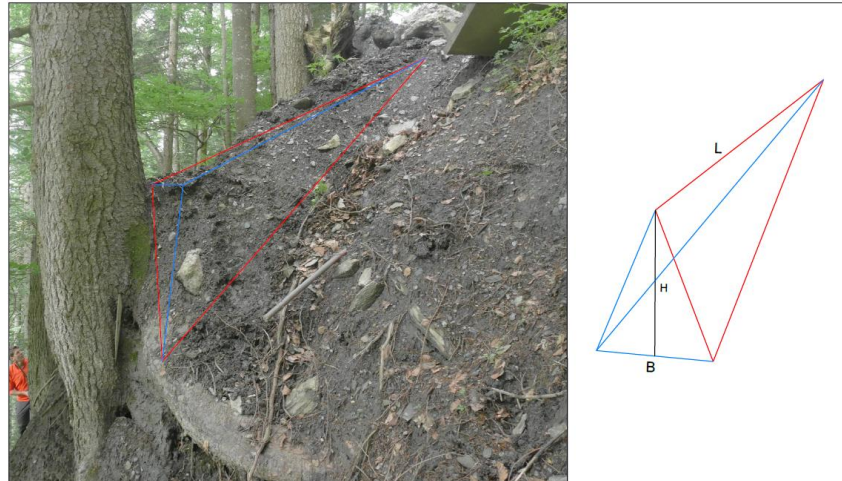


Abbildung 2.1.: Typische pyramidenförmige Ablagerung hinter Einzelbaum mit skizzierter Pyramide zur Berechnung des Ablagerungsvolumen.

2.1.3. Statistische Auswertung

Basierend auf dem gesamten Datensatz von Hangmuren-Ereignissen wurde mittels einer ANOVA sowie einem Wilcoxon-Rangsummen-Test analysiert, ob ein signifikanter Unterschied zwischen den Auslauflängen sowie den Anrissflächen im Wald und im Freiland besteht. Anschliessend wurde die Auslauflänge in Abhängigkeit der Bestockung (Wald vs. Freiland) sowie der Anrissfläche beziehungsweise des Anrissvolumens sowie der mittleren Neigung und unter Einbezug von Interaktionen zwischen den erklärenden Variablen in einem multivariaten linearen Modell analysiert. Für die Ereignisse im Wald wurde schliesslich der Einfluss verschiedener Waldparametern (Tab. 2.1) mittels einfacher linearer Regression sowie in Kombination mit Gelände- und Rutschungsparametern auf die Auslauflänge untersucht.

Tabelle 2.1.: Wald-, Rutschungs-, und Geländeparameter, die für die Hangmurenereignisse in den Kantonen Bern und Graubünden erhoben wurden.

Parameter	Quelle
Mittlerer BHD im Transitgebiet der Hangmure	- Vollkluppierung Stichprobe - Einzelbaumerkennung FINT
Stammzahl im Transitgebiet der Hangmure	- Berechnung basierend auf Bitterlich-Aufnahme und mittlerer BHD - Einzelbaumerkennung FINT
Grundfläche im Transitgebiet der Hangmure	- Bitterlich-Aufnahme - Vollkluppierung Stichprobe - Einzelbaumerkennung FINT
Mittl. Hangneigung im Transitgebiet der Hangmure	- SwissAlti3D Höhenmodell und Überprüfung im Feld
Anrissvolumen und -fläche	- Ereignisdatenbank (Hangmurendatenbank [26] / StorMe [27])

2.2. Hangmurenexperimente mit Wald im Labor

Im Labor der HAFL wurde eine Rutschbahn im Masstab 1:45 gebaut, auf der Hangmuren-Versuche durchgeführt wurden. Die Rutschbahn besteht aus einer Rutschfläche aus Sperrholz mit einer rauen Beschichtung, die die Rauigkeit natürlicher Böden nachahmt. Die Rutschfläche ist 5.20 m lang und 1.25 m breit und weist eine Neigung von 30° auf. Für jeden Versuch wurde das Bodenmaterial manuell auf die Rutschfläche geleert mithilfe eines Reservoirs, das sich oberhalb der Rutschbahn befindet.

2.2.1. Experimentaufbau und -durchführung

Für jeden Versuch wurde das Bodenmaterial mit dem gewünschten Wassergehalt in einen Behälter gegeben, der von Hand auf die Rutschfläche entleert werden konnte (siehe Abb. 2.2b). Der Behälter wurde so konstruiert, dass er Volumen von bis zu 20 Litern aufnehmen kann. In Richtung der Falllinie wurde eine aufklappbare Wand angebracht. Die Öffnungsklappe wird durch ein manuelles Schnursystem betätigt. Während des Füllvorgangs ist die Scharnierwand geschlossen. Sobald der Verschluss losgelassen wird, wird die Wand durch ein Zuggewicht am anderen Ende der Schnur geöffnet und das Material fließt nun ungehindert nach unten. Jeder Test wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (Chronos 1.4 - 1057 Aufnahmen pro Sekunde) aufgezeichnet, um das Verhalten des Materials und die Fließgeschwindigkeit festzuhalten. Eine Kamera zeichnete die gesamte schiefe Ebene auf, während eine zweite Kamera (Sony Cyber-Shot) sich auf die ersten 30-40 cm davon konzentrierte.



Abbildung 2.2.: Gesamtansicht der geneigten Ebene (a), Nahaufnahme der Füllbox (b).

Die Experimente wurden in verschiedenen Kombinationen von variierendem Wassergehalt der Bodenprobe und unterschiedlichen Waldzuständen durchgeführt (Tab. 2.2). Für jede Kombination wurden zwei (z.T. drei) Wiederholungen des Experiments durchgeführt.

Um einen Wald mit Bäumen mit einem BHD von 36 cm zu reproduzieren, haben wir den Wald mit starren zylindrischen Holzelementen mit einem Durchmesser von 0.8 cm, die auf der Rutschfläche befestigt wurden, nachgebildet (Abb. 2.3). Es wurden drei Situationen mit verschiedenen Waldstrukturen untersucht (vgl. Tab. 2.2):

- Ohne Wald: ohne Holzelemente
- Dichter Wald: ca. 300 Stämme/ha mit BHD 36 cm (Abb. 2.4)
- Lockerer Wald: ca. 150 Stämme/ha mit BHD 36 cm (Abb. 2.5b)
- Wald mit Lücke: dichter Wald (300 Stämme/ha) mit BHD 36 cm mit einer Lückenlänge von 90 cm (entspricht einer Distanz von ca. 40 m (Abb. 2.5a))

Tabelle 2.2.: Realisierte Experimente im Labor für verschiedene Waldzustände und variierenden Wassergehalt (m^3/m^3) im Hangmurenmaterial. Die Waldstrukturen sind : OW : „Ohne Wald“, WD : „Dichter Wald“, WL : „Lockerer Wald“, WLu : „Wald mit Lücke“

Name des Versuchs	Waldstruktur	Wassergehalt in %	Anzahl Wiederholungen
OW_20.3	Ohne Wald	20.3	1
OW_17.7	Ohne Wald	17.7	3
OW_16.3	Ohne Wald	17.7	3
OW_14.8	Ohne Wald	14.8	2
WD_20.2	Dichter Wald	20.2	2
WD_19.2	Dichter Wald	19.2	2
WD_18.5	Dichter Wald	18.5	2
WL_18.9	Lockerer Wald	18.9	2
WL_17.6	Lockerer Wald	17.6	2
WL_16.9	Lockerer Wald	16.9	1
WLu_20.6	Wald mit Lücke	20.6	2
WLu_18.5	Wald mit Lücke	18.5	1
WLu_17.5	Wald mit Lücke	17.5	2

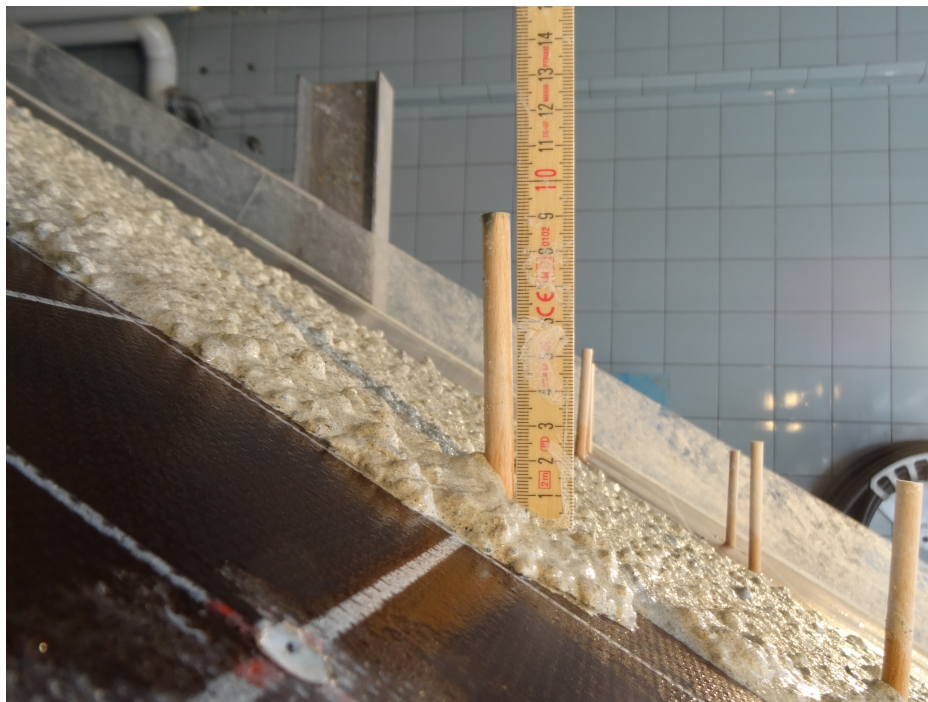


Abbildung 2.3.: Implementierung von Holzelementen, um den Einfluss des Waldes auf den Hangmurenauslauf nachzubilden.

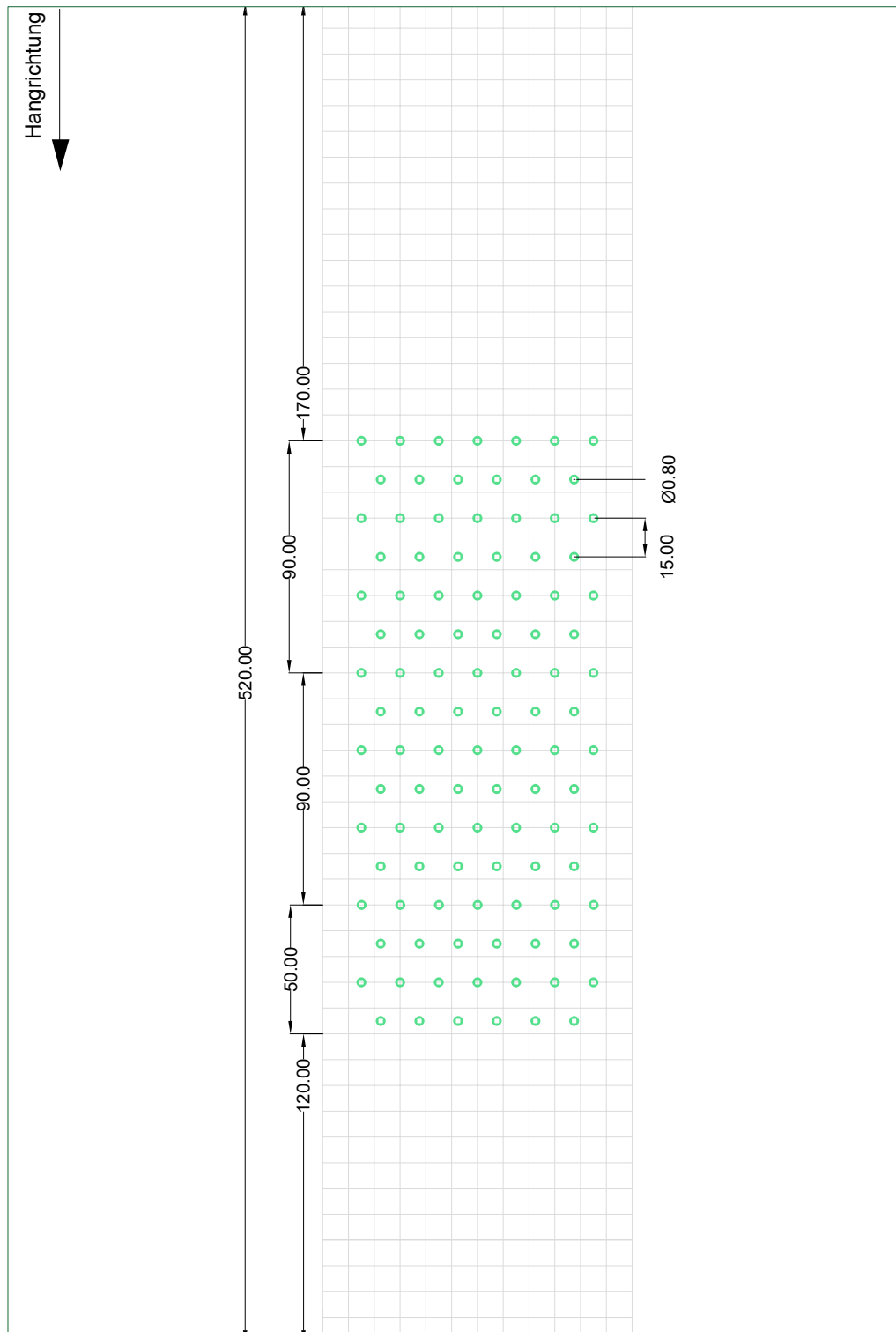
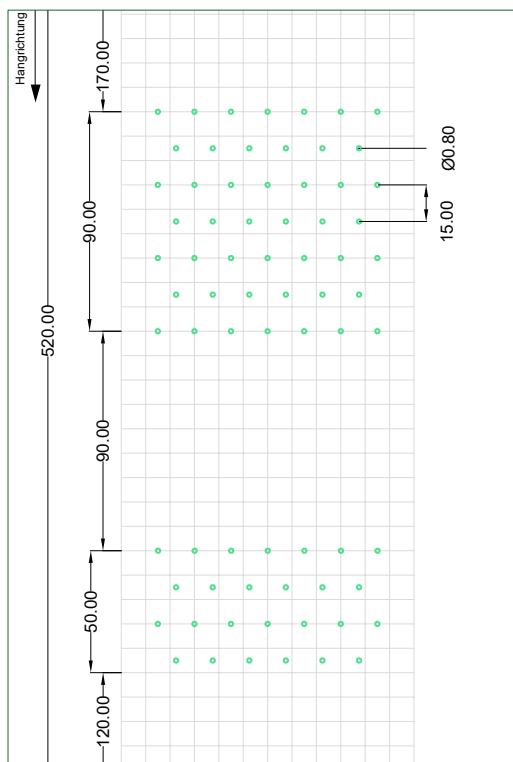
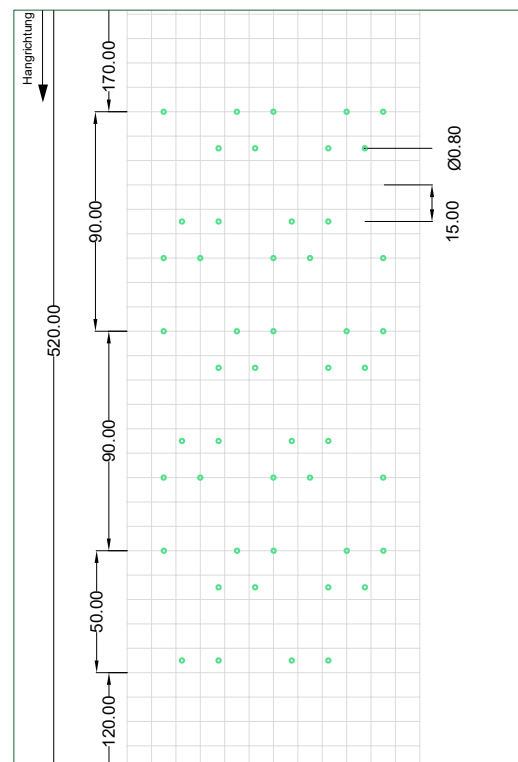


Abbildung 2.4.: Versuchsanordnung für den dichten Wald. Schema der ganzen Rutschbahn, welche in einem Massstab zur Realität von 1:45 gebaut ist (alle Grössenangaben und Distanzen sind in cm).



(a) Wald mit Lücken



(b) Lockerer Wald

Abbildung 2.5.: Zwei weitere Waldszenarien, die für die Laborexperimente verwendet wurden (alle Größenangaben und Distanzen sind in cm).

Im ersten Schritt haben wir Bodenmaterialien von 5 verschiedenen Hangmuren im Feld entnommen und analysiert (siehe Anhang A.0.3). Weiter haben wir ein Labormaterial erstellt, welches aus siltigem Sand mit Kies (sand with silty fines; SM gemäss USCS) bestand, weil dieses in vielen Anrissgebieten von Hangmuren beobachtet wurde. Dies wurde mit den auf dem Markt verfügbaren Bodenmaterialien (Fugensand, Rasensand, Splitt und Lehmputz) zusammengesetzt. Eine Probe wurde im Geotechnik-Labor an der AHB untersucht, um die Korngrössenverteilung sowie die Konsistenzgrenzen (auch Atterberg-Grenzen genannt) zu bestimmen und mit dem Hangmurenmaterial aus dem Feld zu vergleichen. Auslaufversuche mit dem Material aus Trub und Curio zeigten ähnliches Verhalten wie das Labormaterial. Weiter konnten die Ergebnisse der Studie von [28] sowohl mit dem Feld- als auch mit Labormaterial reproduziert werden. Weil es viel Aufwändiger ist, grosse Mengen an Versuchsmaterial aus dem Feld zu organisieren, haben wir alle weitere Auslaufversuche mit dem Labormaterial durchgeführt.

Nachdem das Labormaterial mit der gewünschten Menge Wasser in einem grossen Behälter (30 l) vermischt worden war, wurden 10 Liter dieser Mischung in einen separaten trockenen Behälter für das Auslaufexperiment gegossen. Unsere 10-l-Versuche entsprechen im Massstab 1:45 einem Anrissvolumen von ca. 900 m³. Parallel wurden drei kleine Materialproben (10 cl) aus dem grossen Behälter entnommen, um den genauen Wassergehalt und die Dichte vom Labormaterial zu bestimmen, damit die Eigenschaften vom verwendeten Material bei jedem einzelnen Experiment so gut wie möglich bekannt waren. Der Wassergehalt wurde ähnlich wie bei [28] als Verhältnis des Wassergewichts zum Gesamtgewicht berechnet. Vor jedem Test wurde die schiefe Ebene vor Beginn des Experiments befeuchtet, um vergleichbare Anfangsbedingungen wie nach starken Niederschlägen zu haben. Die Form der Ablagerung sowie die maximale Auslaufstrecke wurde mithilfe der Rasterkoordinaten gemessen. Ausserdem wurde die Position des Materialflusses in verschiedenen Zeitintervallen mit der Hochgeschwindigkeitskamera gemessen, um die Geschwindigkeit zu bestimmen. Die max. Auslaufstrecke, welche in unseren Analysen verwendet wurde, entspricht der Distanz, die das Material mit einer minimalen Geschwindigkeit von 2 cm/s zurückgelegt hat.

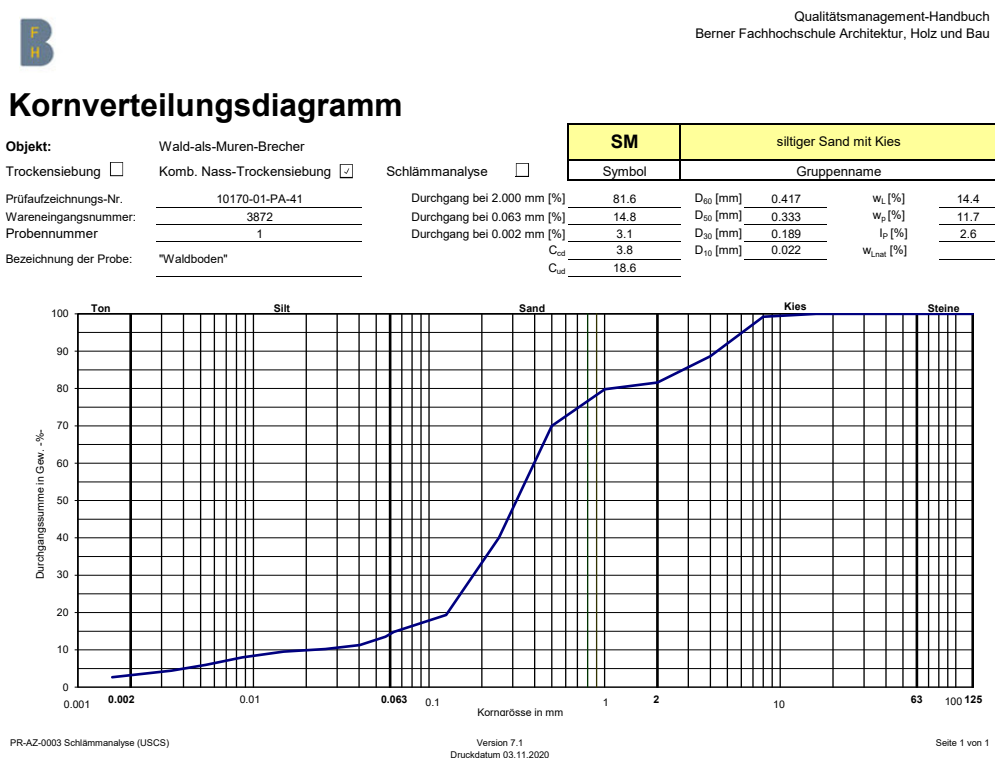


Abbildung 2.6.: Korngrössenverteilung für das verwendete Labormaterial

2.3. Risikobasierte Analyse der Waldwirkung

Um die Bremswirkung des Waldes auf den Auslauf von Hangmuren zu quantifizieren und zu monetarisieren, haben wir eine risikobasierte Analyse durchgeführt. Dazu wurde der Auslauf der Hangmuren mit einem Simulationsmodell basierend auf der Methode der diskreten Elemente (YADE genannt) berechnet. Ein solches Modell erlaubt die Bremswirkung von einzelnen Baumstämmen explizit als Hindernisse in der Simulation des Hangmurenauslaufs zu berücksichtigen. In zwei Fallbeispielen wurde die Risikoermittlung durchgeführt. Diese betreffen ein Hangmurenereignis in der Gemeinde Trub in Kanton Bern und eines in der Gemeinde Root in Kanton LU.

Das Ereignis in der Gemeinde Trub in BE (Lokalname: Loos) hat am 22. August 2005 stattgefunden. Die Koordinaten des Anrissgebiets lauten $X = 634'397$ und $Y = 200'551$ (Schweizer Landeskoordinaten y/x im System CH1903/LV03). Das im Wald gelegene Anrissgebiet hatte eine maximale Mächtigkeit von 0.9 m, war 12 m breit und 9 m lang und hatte eine Fläche von ca. 80 m². Beim ausgebrochenen Material handelt es sich um einen siltigen Sand (SM gemäss USCS) aus lehmig-sandigen Hangschuttablagerungen der Schüpferegg-Nagelfluh (Süsswassermolasse). Das mobilisierte Volumen wurde auf 54 m³ geschätzt. Gemäss Messungen nach dem Ereignis legte das mobilisierte Volumen eine Strecke von 112 Metern zurück, wobei die ersten 60 m bewaldet waren. Diese Auslaufstrecke konnte mit der Umhüllenden, welche im Ereigniskataster des Kantons Bern erfasst wurde, verifiziert werden (Abbildung 2). Die Wiederkehrdauer des Niederschlagsereignisses von Aug. 2005 in Trub wurde als > 100 jährig eingestuft. Darum haben wir entschieden, die Eintretenswahrscheinlichkeit des Ereignisses in der Risikoermittlung gleich 0.01 zu setzen.

Das Hangmuren-Ereignis in der Gemeinde Root in LU (Lokalname: Weesweide) fand am 7. Juni 2015 nach 1 Stunde Niederschlag mit einer Intensität von 35 mm/std statt. Der oberste Punkt des Anrissgebiets befindet sich in $X = 671'840$ und $Y = 217'099$. Das im Freiland gelegene Anrissgebiet hatte eine maximale Anrissmächtigkeit von 0.35 m, war 14 m breit und hatte eine Fläche von ca. 540 m². Die Analyse der Auslaufstrecke ergab, dass die Hangmure eine Strecke von 180 Metern zurücklegte (Abb. 2.7). Beim ausgebrochenen Material handelt es sich um einen siltigen Sand (SM gemäss USCS) aus einer Verwitterungsschicht des Sandsteins aus der oberen Meeresmolasse. Dieses Ereignis wurde als ein 10- bis 30-jähriges Ereignis eingestuft und in der Risikoermittlung mit einer Eintretenswahrscheinlichkeit von 0.033 berechnet.

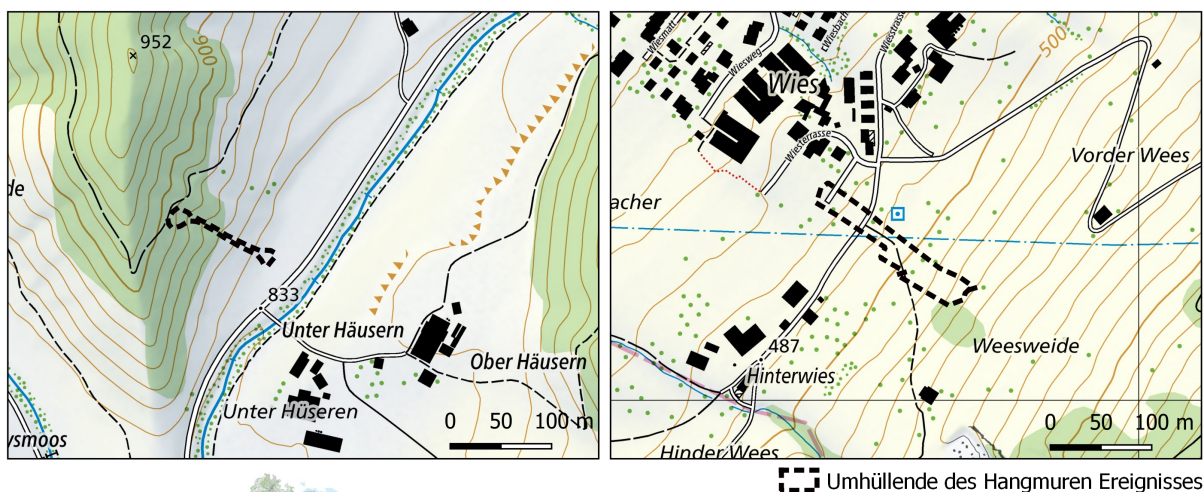


Abbildung 2.7.: Karte der Fallbeispiele in Trub (Kanton BE; links) und Root (Kanton LU; rechts).

Die risikobasierte Analyse umfasst folgende Arbeitsschritte:

1. Beschaffung und Aufbereitung der Grundlagendaten (Geländemodell, Anrisszone, Wald)
2. YADE-basierte Modellierung des Hangmurenauslaufs mit und ohne Wald
3. Bestimmung der risikorelevanten Variablen
4. Risikoermittlung für alle Szenarien mit verschiedenen Verkehrsvarianten (täglicher Verkehr und Geschwindigkeit).

2.3.1. Beschaffung und Aufbereitung der Grundlagendaten

Als Grundlage für die Geometrie/Topographie des Gelände in Trub (BE) und Root (LU) wurde das swissALTI3D digitale Geländemodell (DGM) verwendet. Dies ist ein sehr präzises digitales Höhenmodell, welches die Oberfläche der Schweiz ohne Bewuchs und Bebauung beschreibt. Das SwissALTI3D DGM mit einer Auflösung von 2×2 m wurde in ein STL-Gitter umgewandelt und anschliessend in YADE importiert, wo es als 3D-Dreiecke dargestellt wird, um die Geometrie des zu modellierenden Hangs nachzubilden. Die STL-Schnittstelle ist eine Standardschnittstelle vieler CAD-Systeme, die 1988 von 3D Systems in ihrer Stereolithographie (STL) Software eingeführt wurde. Das DGM, welches in der Simulation verwendet wurde, hatte einen Pufferbereich von mindestens 75 m rund um die Ereignisumhüllenden.

Die Grundlagen für beide Anrissgebiete wurden aus den bestehenden Umhüllenden der nationalen Ereignisdatenbank StorMe extrahiert und anschliessend im Gelände überprüft bzw. korrigiert und digitalisiert. In vielen Fällen sind die Ereignisumhüllenden in StorMe grösser als das tatsächlich betroffene Gebiet, v.a. in den Anrissgebieten. Dies war für Root (LU) auch der Fall. Die Abb. 3.15 und 3.16 zeigen die Anrissgebiete und Tab. 2.3 die Daten für die Anrissgebiete, welche schlussendlich in den Simulationen verwendet wurden.

Um die genauen Durchmesser und räumliche Verteilung von Bäumen in YADE zu berücksichtigen, wurden die genauen Stammdurchmesser (BHD) während einer Feldaufnahme im Transitgebiet in Trub (BE) durchgeführt. Die Baumpositionen wurden zuerst mittels Lufbilder sowie Daten vom FINT-CH Projekt erkundet und anschliessend wurden die Stammdurchmesser im Feld gemessen (Abb.2.8), Baumpositionen und fehlende Bäume überprüft und korrigiert und alle Bäume mit $BHD < 20$ cm aus dem Einzelbaum-Datensatz gelöscht.

Die Hangmuren-Auslauf-Simulation in YADE wurde auf dem Ereignis mit Einbezug der Bremswirkung des Waldes kalibriert und anschliessend wurde die Simulation ohne Wald durchgeführt. In Root (LU) wurde das umgekehrte gemacht. Weil die Hangmure dort über Freiland geflossen ist, wurde YADE ohne die Bremswirkung des Waldes kalibriert und anschliessend wurde eine Simulation mit Wald durchgeführt. Dazu haben wir Einzelbäume mit zufällige Positionen generiert, welche einen Wald mit 345 Stämmen/ha, einen mittleren BHD von 32 cm und einer Grundfläche von $28 \text{ m}^2/\text{ha}$ entspricht.

Tabelle 2.3.: Parameter der simulierten Szenarien: J. = Jährlichkeit des Ereignisses; A_{FI} = Anrissfläche der Hangmure; A_{Vol} = Anrissvolumen; A_m = max. Anrissmächtigkeit; WF = Waldfläche; N = Stammzahl, G = Grundfläche und BHDm = mittlerer Brusthöhendurchmesser in der Transitstrecke.

	J.	$A_{FI} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{Vol} \text{ (m}^3\text{)}$	$A_{m-max} \text{ (m)}$	WF (ha)	N (1/ha)	G (m^2/ha)	BHDm (m)
Trub	100	80	54	0.9	0	0	0	0
	100	80	54	0.9	0.01	454	28	0.28
Root	30	540	190	0.35	0	0	0	0
	30	540	190	0.35	0.3	345	28	0.32



Abbildung 2.8.: Messungen im Feld der Stammdurchmessers von Trub (BE)

2.3.2. YADE-basierte Modellierung des Hangmurenauslaufs

Die numerische Simulation des Hangmurenauslaufs wurde unter Verwendung der Methode der diskreten Elemente durchgeführt (*Discrete Element Method* - DEM). Diese Methode wird häufig zur Modellierung von granularen Medien verwendet [29, 30, 31]. Sie ist besonders effektiv bei der Simulation von granularen Partikeln, bei denen das Medium auf mikroskopischer Skala beschrieben werden kann. Die Methode basiert auf einem expliziten Finite-Differenzen-Schema, das von [32] vorgeschlagen wurde. Sie wird für einen Satz diskreter Körper angewendet, die miteinander interagieren und deren Interaktion durch ein Kontaktgesetz gesteuert wird. Verschiedene Kontaktkräfte können sowohl in der Normalrichtung als auch in der Tangentialrichtung betrachtet werden. Die Umsetzung ist eine abwechselnde Berechnung zwischen der Anwendung des zweiten Newtonschen Gesetzes auf die Bewegung der Teilchen und einem Kraft-Weg-Gesetz für die Wechselwirkung zwischen den Teilchen. Im Vergleich zur Finite-Elemente-Methode (FEM) ermöglicht die Diskrete-Elemente-Methode die Modellierung grosser Verschiebungen zwischen Elementen, ist kostengünstig in der Rechenzeit und eignet sich besonders für die Lösung diskontinuierlicher Probleme in körnigen Umgebungen.

YADE ist eine erweiterbare Open-Source-Umgebung für die diskrete numerische Modellierung von finiten Elementen [33]. Die Simulationsschleife in YADE beginnt mit der Erkennung von Kontakten zwischen Partikeln. Anschliessend wird das gewählte Kontaktgesetz angewendet, was zu einer Neuberechnung der Positionen und Geschwindigkeiten der Partikel führt. Die Simulationsschleife wird beendet, wenn die Partikel sich nicht mehr bewegen, oder wenn sie den Randbereich des DGMs erreicht haben.

Kontaktgesetz für Partikel

Bei den Simulationen, die im Rahmen dieses Projekts mit YADE für die Wechselwirkungen zwischen Partikeln durchgeführt werden, können verschiedene Arten von möglichen Wechselwirkungen auftreten. Die erste Art von Wechselwirkung ist die Partikel-Boden-Wechselwirkung, die den Kontakt zwischen einem Partikel in der Hangmure und der Bodenfläche beschreibt. Diese Art der Interaktion wird in dieser Studie durch ein viskoelastisches Kontaktgesetz geregelt [34], das in vielen früheren Studien über granulare Fließprozesse häufig verwendet wurde [35, 36, 37]. Der elastische Teil des Kontaktgesetzes wird durch eine Feder dargestellt, die parallel zu einem Kontaktpunkt geschaltet ist, der die viskose Dämpfung repräsentiert. Die Energiedissipation wird zum Teil durch die Kollision von Partikeln gesteuert und hängt mit dem Restitutionskoeffizienten des granularen Materials zusammen.

Die zweite Art der Interaktion findet im Partikel-Partikel-Kontakt statt, zwischen zwei kugelförmigen Objekten im granularen Fließprozess. Um diese Wechselwirkung zu beschreiben, haben wir ein adhäsiv-elastoplastisches

Kontaktgesetz in den Open-Source-Code von YADE implementiert. Diese Implementierung basiert auf der Arbeit von [38], um das Verhalten einer kohäsiven Strömung zu reproduzieren und legt den Einfluss einer hysterischen Kraft F_{hys} nahe, die die Interaktion zwischen zwei Partikeln steuert. Details dazu sind in [39] beschrieben.

Modellierung von Bäumen in YADE

Ein Modell des Aufpralls eines Partikels auf einen Baum auf der Grundlage der DEM wurde von [40] entwickelt, um die Beiträge der verschiedenen Baumkomponenten zum Aufprall zu berücksichtigen. Der Vorteil des Baumzylindermodells ist die Möglichkeit, verschiedene Waldstrukturen darzustellen, wobei das mechanische Verhalten von Einzelbäumen beim Aufprall, Zug und Druck (Entwurzeln, sowie das Biegen und Brechen des Stammes) durch die Kalibration der entsprechenden Modellparameter berücksichtigt werden kann. Die Partikel werden als starrer kugelförmiger Körper und der Baum als verformbarer Balken modelliert. Der Kontakt zwischen den Körpern wird durch die Anwendung von Kräften auf die beiden Körper in Abhängigkeit von ihrer Überlappung und ihren relativen Geschwindigkeiten berücksichtigt. Der Baumstamm wird durch einen flexiblen Kegel dargestellt, der Normal-, Scher-, Biege- und Torsionsbelastungen ausgesetzt ist ([41]). Die Baumkrone wird als zusätzliche Masse modelliert, die gleichmässig auf den oberen Teil des Stammes verteilt ist. Schliesslich wird der Beitrag des Wurzelsystems durch eine nichtlineare Rotationsfeder am unteren Ende des Baumes integriert (Abb. 2.9).

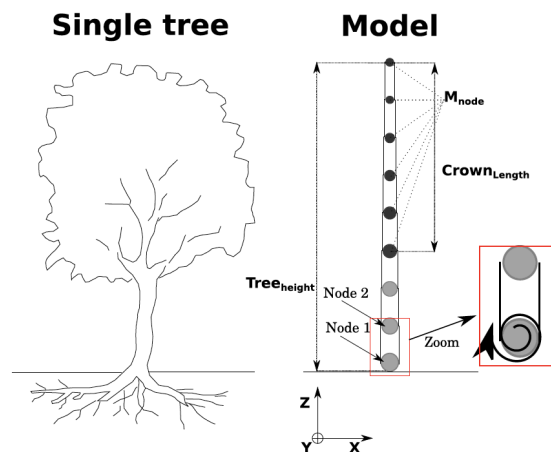


Abbildung 2.9.: Skizze des Baummodells in YADE. (Quelle: [40])

Die Masse der Krone wird entlang des Stammes verteilt und wirkt auf die entsprechenden Knoten, wobei von einem konischen Stamm ausgegangen wird. Die Interaktionskräfte zwischen den Knoten werden aus der klassischen Balkentheorie abgeleitet und in einem aktualisierten Lagrangeschen Formalismus ausgedrückt, wie er in ([41]) vorgestellt wurde. In diesem Rahmen werden Wechselwirkungskräfte und Drehmomente auf zusammenhängende Knoten entlang der Hauptachse des Stammes, der sogenannten z-Längsachse, und entlang zweier Achsen senkrecht zur Längsachse, den radialen x- und y-Achsen, angewendet. Die Wechselwirkungskräfte entlang der z-Achse beziehen sich auf Zugbelastungen, während die Kräfte entlang der anderen Achsen mit Scherbelastungen verbunden sind. Darüber hinaus sind die Wechselwirkungsmomente entlang der z-Achse mit Torsionsbelastungen verbunden, während die Momente entlang der y- und x-Achse mit Biegebelastungen verbunden sind.

In diesem Projekt wurden jedoch die zylindrischen Elemente, die die Bäume darstellen, als starre Körper modelliert (2.11). Infolgedessen wurden die Bäume durch die ankommende Strömung nicht beschädigt oder entwurzelt und somit auch nicht in der Hangmurenmasse weitertransportiert. Somit konnte die negative Wirkung von Bäumen, wegen der zunehmenden bewegenden Gesamtmasse, nicht analysiert werden. Diese Entscheidung wurde aufgrund der hohen Unsicherheit in Bezug auf die mechanischen Parameter der Bäume und deren Kalibrierung in YADE getroffen. Um diese YADE-Baum-Parameter so zu kalibrieren, dass ein realistisches Verhalten während Stammbrechen und Baumentwurzeln simuliert wird, braucht es ein eigenständiges Dissertations-Forschungsprojekt. Die Erwartung, dass die Vielzahl an benötigten Parameterwerte von bestehenden Studien ([42], [40], [43]) übernommen werden konnten, hat sich als falsch erwiesen. Feldbegehungen im Wald unterhalb von Hangmuren-Anrissgebieten in den Kantonen BE, GR und TI zeigten hingegen, dass

Bäume mit einem Durchmesser von mehr als 20 cm in der Regel nicht von Hangmuren in der Transitzone entwurzelt oder gebrochen wurden. Unsere Annahme ist, dass einer der erklärenden Faktoren dafür die relativ geringen Volumen von Hangmuren im Wald in der Schweiz sind (Median = 60 m³, Mittelwert = 139 m³; Datenquelle [26]).

Nachbearbeitung der YADE-Ergebnisse in GIS

Da die Simulationen in YADE auf der Interaktion zwischen diskreten Partikeln beruhen, war es notwendig, die YADE-Ergebnisse in GIS aufzubereiten, um Umhüllenden zu erstellen, die mit den Daten historischer Ereignisse vergleichbar sind (gemäss dem Prozess in Abb. 2.10). Dazu wurden die Positionen der Partikel während der Simulation in regelmässigen Abständen aus YADE abgerufen. Während des Vorbereitungsprozesses wurden zunächst die kohäsiven Massengruppen für jeden Zeitschritt identifiziert und ihre Umhüllenden generiert. Um die Massengruppen zu identifizieren, wurden die Positionen der Partikel pro Zeitschritt in einer 2 x 2 m grossen Zelle aggregiert. Dazu analysierten wir die Partikel-Positionen mithilfe von Voxeln (3D-Zellen) mit einer Kantenlänge von 20 cm. Zellen, die mehr als 0,05 % der Gesamtanzahl an Partikeln enthalten, sind potenzielle Kandidaten und werden mit benachbarten Kandidatenzellen zusammengefasst. Jede resultierende Gruppe mit mindestens 1 % der Gesamtpartikelzahl wird als zusammenhängende Massengruppe betrachtet, für die die konkave Hülle erzeugt wird. Diese Hülle wird mit Attributen wie Partikelanzahl, Masse, Ablagerungsmächtigkeit und Geschwindigkeit gespeichert. Durch Kombination (Funktion *Union* in GIS) der Umhüllenden aller vorherigen Zeitschritte wird die Umhüllende der simulierten Hangmure für den jeweiligen Zeitschritt generiert. Attribute wie die Überlappung mit der Umhüllenden des historischen Ereignisses (Anteil der Fläche der ursprünglichen Umhüllenden, die von der simulierten Umhüllenden abgedeckt wird), die Gesamtzahl der Partikel, die in der Umhüllenden enthaltene Masse und die Geschwindigkeit sowie die Ablagerungsmächtigkeit der grössten Partikelgruppe im letzten Zeitschritt werden ebenfalls gespeichert.

Kalibrierung von YADE

Für jede Fallstudie wurden mehrere Parameterkombinationen in YADE getestet, um die beste Übereinstimmung mit dem Auslauf der historischen Ereignissen zu finden. Der erste Parameter, der untersucht wurde, war der Reibungswinkel (μ) zwischen den fliessenden Partikeln und dem Untergrund. Dieser wurde von 10° bis 40° in Schritten von 5° variiert. In YADE wird der Wassergehalt über diesen Parameter gesteuert, während der Feinanteil und die damit gesteuerte Kohäsion im Material über den Parameter H_c gesteuert ist. Dieser entspricht das Verhältnis zwischen zwei definierten Steifigkeitsparametern (k_1 und k_2), die sich indirekt auf die Haftung zwischen den Partikeln auswirken. Der Parameter H_c wurde zwischen 0.3 (starke Haftung) und 0.45 (schwache Haftung) variiert. Diese Bandbreite von Werten basierte auf einer vorherigen detaillierten Sensitivitätsanalyse der Modellparameter, die von [39] durchgeführt und publiziert wurde.

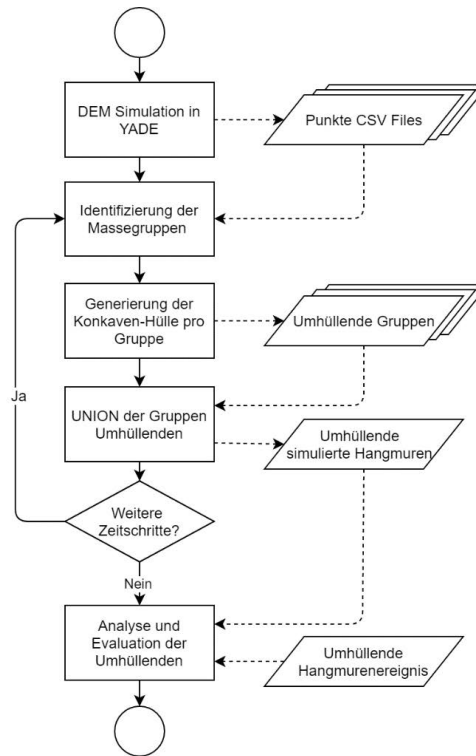


Abbildung 2.10.: Ablauf der GIS-Aufbereitung der Ergebnisse von YADE.

2.3.3. Bestimmung der risikorelevanten Variablen und Risikoberechnungen

Die massgebenden, risikorelevanten Variablen stammen aus vier simulierten Szenarien, welche in Tab. 2.3 dargestellt sind. Die Jährlichkeiten der Rutschungsanrisse wurden durch die Wiederkehrdauer der Niederschlagsereignisse gemäss HADES (Hydrologischer Atlas der Schweiz) definiert (Trub = 100 J. Ereignisse; Root = 30 J. Ereignis). Die generierten Anrissgebiete je Szenario dienten als Startgebiete für die Modellierung des Auslaufs mit dem YADE-Hangmurenauslaufmodell, womit die Hangmurendrucke und Wirkungsbreiten auf den betroffenen Strassen bestimmt wurden. In Fall von Root (LU) war beim Ereignis 2017 tatsächlich die darunter liegende Strasse betroffen, aber in Trub (BE) hat das Hangmuren-Ereignis 2005 die Strasse nicht erreicht. Darum haben wir die Strasse in Trub virtuell 60 m in Richtung WNW verlegt, damit sie in der Simulation vom Ereignis (sowohl mit als ohne Waldwirkung) übermurt wird.

Weil das betroffene Schadenspotenzial nur die Strassen in beiden Untersuchungsgebieten betraf, haben wir die Risikoberechnungsformeln von RoadRisk (<https://roadrisk.ch/>, siehe [44]), welche auf die Formeln von Econome (<https://econome.ch/>) basieren, für die Risikoberechnung verwendet. Hierbei wurden die Schadensbilder Direkttreffer, Auffahrunfall und Infrastrukturschäden berücksichtigt. Die Schadensbilder vorsorgliche Sperrung, sowie Sperrung nach Ereignis, welche üblicherweise in RoadRisk berechnet werden, wurden weggelassen, weil diese Sperrungskosten nur für Nationalstrassen vorliegen. Um die Intensität der Ereignisse festzulegen, welche der bestimmenden Faktor für die Letalität und die Schadenempfindlichkeit der Infrastruktur in der Risikoberechnung ist, wurden die vom BAFU definierten Intensitätskriterien (siehe [45]) verwendet. Diese definieren die Intensität auf der Grundlage der Werte der Mächtigkeit der mobilisierbaren Masse und die Ablagerungshöhe. Die dynamische Phase des fließenden Materials, welche zu grossen Schäden führen kann, ist jedoch damit nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund wurde zusätzlich die Richtlinie zur Definition der Intensität von Schneelawinen verwendet [46], die die Intensität allein auf der Grundlage des dynamischen Drucks definiert (schwache Intensität < 3 kPa; mittlere Intensität ≥ 3 kPa und ≤ 30 kPa; starke Intensität > 30 kPa). Um den Effekt der unterschiedlichen Intensitäten nachzuweisen, haben wir mit beiden Intensitätswerten (INT_{Am} = Intensität auf Basis von Ablagerungsmächtigkeit und INT_P = Intensität auf Basis von Druck) die Risikoberechnungen durchgeführt.

Um den Hangmurendruck zu ermitteln wurde die Berechnungsformel der SIA-Norm 261/1 [47] verwendet. Dabei ist der Druck P (in Pa) aus der dynamischen Beanspruchung abhängig von der Geschwindigkeit und

Fliesshöhe (welche sich aus den YADE Simulationen ergeben), der Dichte des Fliessmaterials sowie von einem empirischen Druckbeiwert. Die Formel lautet wie folgt:

$$P = \gamma_f \cdot c_\rho \cdot \rho \cdot v_f^2 \quad (2.1)$$

wobei,

γ_f = Fliesshöhe (m), c_ρ = Druckbeiwert (hierfür wurde einen Wert von 1 verwendet, welches feinkörnigem Material entspricht; ein Wert von 4 kann für sehr grobblöckiges Material verwendet werden), ρ ist die Dichte des Materials (1800 kg/m^3), v_f entspricht die Fliessgeschwindigkeit (m/s).

Um zudem den Effekt des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) zu analysieren, wurden mehrere DTV-Werte in der Risikoermittlung eingesetzt. Je stärker die Strasse befahren wird, desto höher das Schadenpotential, und desto höher das Risiko bei einem Ereignisfall. Das Variieren des DTV-Wertes erlaubt uns herauszufinden, bei welcher Strasse der Wald in den Fallbeispielen eine relevante Schutzwirkung im Transitgebiet von Hangmuren hat. Die für die Risikoberechnungen verwendeten Eingangsdaten (ausser die Intensitäten und die damit verbundene Letalitäts- und Schadenempfindlichkeitswerte) sind in Tab. 2.4 dargestellt.

Tabelle 2.4.: Eingangsdaten für die Varianten der Risikoberechnungen. P_j = Eintretenswahrscheinlichkeit; P_{Sperrung} = Wahrscheinlichkeit einer vorsorglichen Sperrung; DTV = durchschnittlicher täglicher Verkehr; V_{max} = max. signalisierte Geschwindigkeit; Wert = Basiswert Strasseninfrastruktur; P_{Auffahr} = Wahrscheinlichkeit Auffahrunfall.

Gemeinde	Variante	P_j (1/Jahr)	DTV (-)	V_{max} (km/Std.)	Wert (CHF/m)	P_{Auffahr} (-)
Trub	1	0.01	100	60	5'000	0.05
	2	0.01	1'000	60	5'000	0.05
	3	0.01	10'000	60	5'000	0.05
	4	0.01	10'000	80	9'500	0.15
Root	5	0.033	100	60	5'000	0.05
	6	0.033	1'000	60	5'000	0.05
	7	0.033	10'000	60	5'000	0.05
	8	0.033	10'000	80	9'500	0.15

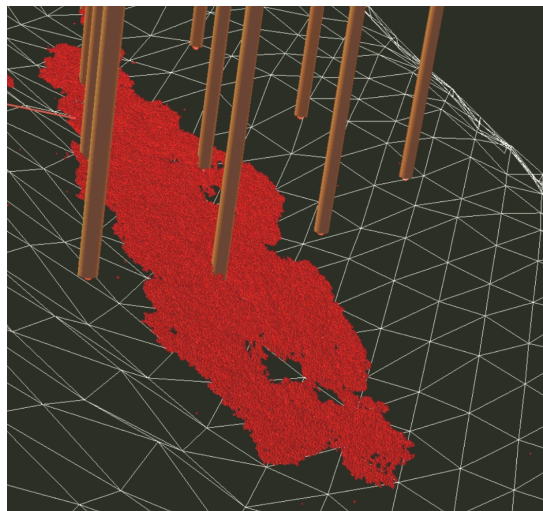


Abbildung 2.11.: 3D Visualisierung der starren Baumzylinder in YADE beim Ausgang des Waldes in Trub.

3. Ergebnisse

3.1. Analyse der Ereignisse aus der Hangmurendatenbank

Die Auslauflängen der untersuchten Hangmuren-Ereignisse im Kanton GR sind signifikant kürzer im Wald als im Freiland (Abb. 3.1). Im Kanton BE ist der Unterschied weniger deutlich und nur in der ANOVA, nicht aber im Wilcoxon-Rangsummen-Test signifikant. In GR haben die Hangmuren im Wald zudem eine signifikant kleinere Anrissfläche, wobei es auch hier im Kanton BE keinen signifikanten Unterschied gibt (Abb. A.0.1). Der Vergleich der Auslauflängen für verschiedene Anrissflächen-Klassen zeigt, dass insbesondere für kleinere Anrisse (Anrissfläche $< 300 \text{ m}^2$) der Wald einen Effekt auf die Auslauflänge zu haben scheint (Abb. 3.2 und 3.3). Des Weiteren hat im Kanton BE die Hangneigung lediglich auf die Ereignisse im Freiland einen signifikant negativen Einfluss (Abb. 3.4). Bei den Ereignissen im Wald gibt es keinen signifikanten Zusammenhang. Im Kanton GR nimmt die Auslauflänge ebenfalls tendenziell ab mit zunehmender Hangneigung, wobei der Zusammenhang weder im Freiland noch im Wald signifikant ist. Generell verfügen die Ereignisse im Kanton GR über längere Ausläufe und grössere Anrissflächen (Abb. 3.1 und A.0.1).

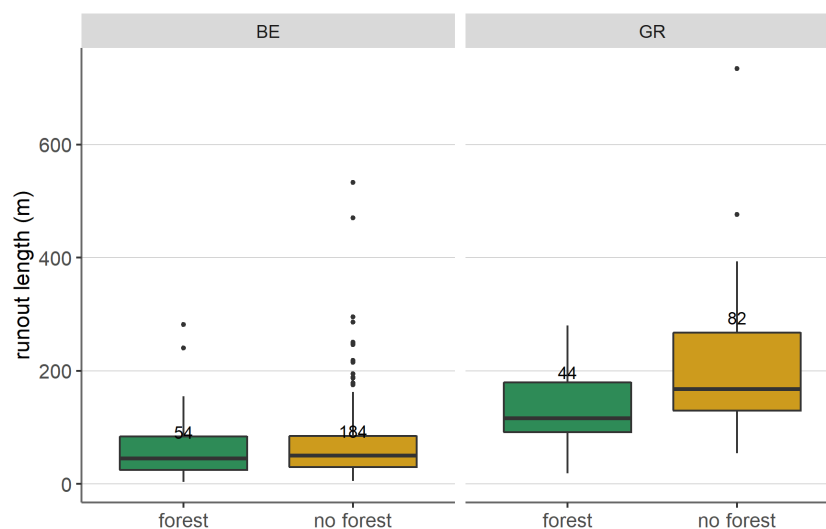


Abbildung 3.1.: Verteilung der Auslauflängen der untersuchten Hangmuren-Ereignisse im Wald (grün) und Freiland (gelb) in den Kantonen BE (links) und GR (rechts).

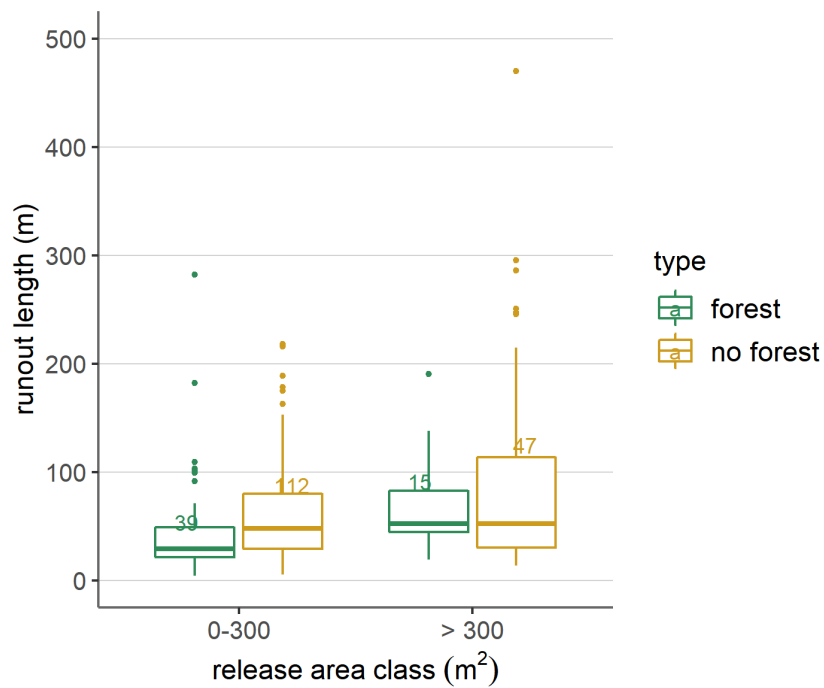


Abbildung 3.2.: Verteilung der Auslauflängen der untersuchten Hangmuren-Ereignisse im Wald und Freiland im Kanton **BE** in Abhängigkeit der Anrissfläche.

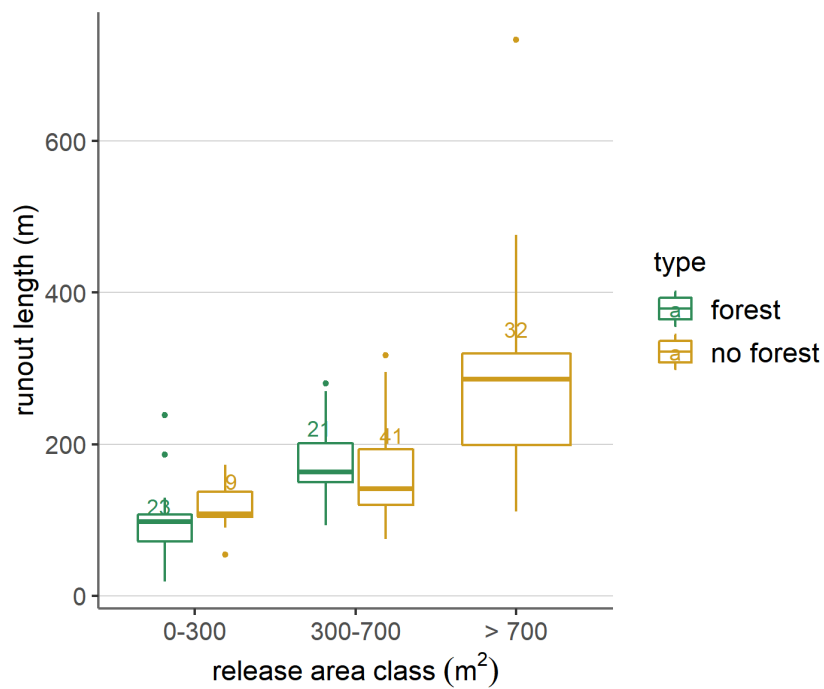


Abbildung 3.3.: Verteilung der Auslauflängen der untersuchten Hangmuren-Ereignisse im Wald und Freiland im Kanton **GR** in Abhängigkeit der Anrissfläche.

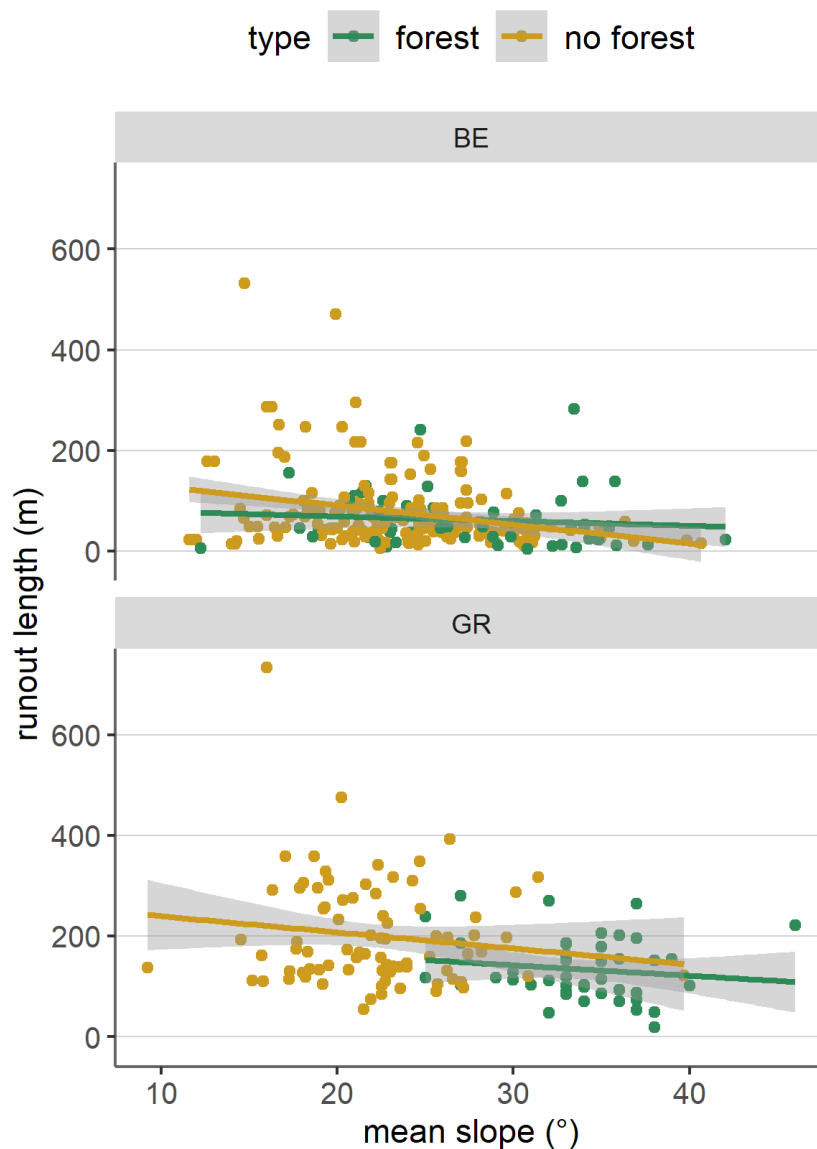


Abbildung 3.4.: Hangmuren-Auslaufstrecke (y-Achse) in Abhängigkeit der mittleren Hangneigung (x-Achse) im Wald und Freiland (oben: Kanton BE; unten: Kanton GR).

Im endgültigen linearen Regressionsmodell für die Auslaufstrecken im Kanton BE verbleiben das Anrissvolumen, die Vegetation (Wald/Freiland) sowie die Hangneigung (Tab. 3.1). Im Regressionsmodell für den Kanton GR hat lediglich das Anrissvolumen einen signifikanten Effekt (Tab. 3.2). In beiden Modellen waren Interaktionen zwischen den erklärenden Variablen nicht signifikant.

Tabelle 3.1.: Lineare Regression der Auslauflänge in Abhängigkeit der Vegetation (Wald, Freiland), des Anrissvolumens und der Hangneigung für den Kanton BE.

Parameter	Wert	Standardfehler	T-Wert	P-Wert	Sig.
Interzept	2.91	0.41	7.03	$2.19 \cdot 10^{-11}$	***
Freiland	0.27	0.14	1.99	0.05	*
$\log(V_{Anriss})$	0.25	0.05	4.8	$2.79 \cdot 10^{-6}$	***
Neigung	-0.02	0.009	-2.15	0.03	*
Korrigiertes R^2	0.13				
Standardfehler Residuen	0.79 (234 Freiheitsgrade)				

Tabelle 3.2.: Lineare Regression der Auslauflänge in Abhängigkeit der Vegetation (Wald, Freiland), des Anrissvolumens und der Hangneigung für den Kanton **GR**

Parameter	Wert	Standardfehler	T-Wert	P-Wert	Sig.
Interzept	1.69	0.38	4.43	$2.07 \cdot 10^{-5}$	***
Freiland	-0.06	0.10	-0.61	0.55	
$\log(V_{Anriss})$	0.55	0.05	12.06	$< 2.00 \cdot 10^{-16}$	***
Neigung	0.002	0.007	0.30	0.76	
Korrigiertes R^2	0.60				
Standardfehler Residuen	0.33 (122 Freiheitsgrade)				

Die Analyse der Ereignisse im Wald hat sowohl für BE wie auch für GR gezeigt, dass die Auslauflänge mit zunehmender Stammzahl (Abb. 3.5) sowie zunehmender Grundfläche (Abb. 3.7) tendenziell abnimmt. Der Effekt ist bei der mittels Einzelbaumerkennung bestimmter Stammzahl bzw. Grundfläche deutlicher als bei der im Feld erhobenen Daten und gemäss der linearen Regression nur für den Kanton BE signifikant (*Stammzahl FINT*; Tab. 3.3 und 3.4). Weiter nimmt die Auslauflänge mit zunehmendem BHD der Bäume zu (Abb. 3.6). Der Effekt ist ebenfalls nur für die Stichproben-Daten im Kanton BE signifikant und konnte mit dem mittels FINT erhobenem BHD nicht bestätigt werden (Tab. 3.3 und 3.4). Der Vergleich zwischen den beiden Kantonen zeigt, dass die Stammzahlen sowie die Grundflächen bei den Ereignissen im Kanton BE signifikant grösser sind als im Kanton GR (Abb. 3.8). Im finalen multiplen Regressionsmodell der Auslauflängen im Wald für den Kanton BE verblieb die *Stammzahl FINT* sowie das Anrissvolumen und die Hangneigung, wobei nur der Effekt der Stammzahl signifikant war. Das Modell erklärt 26% der Varianz in den Daten (3.3). Im Modell für die Wald-Hangmuren im Kanton GR war lediglich das Anrissvolumen signifikant. Es erklärt 70% der Varianz.

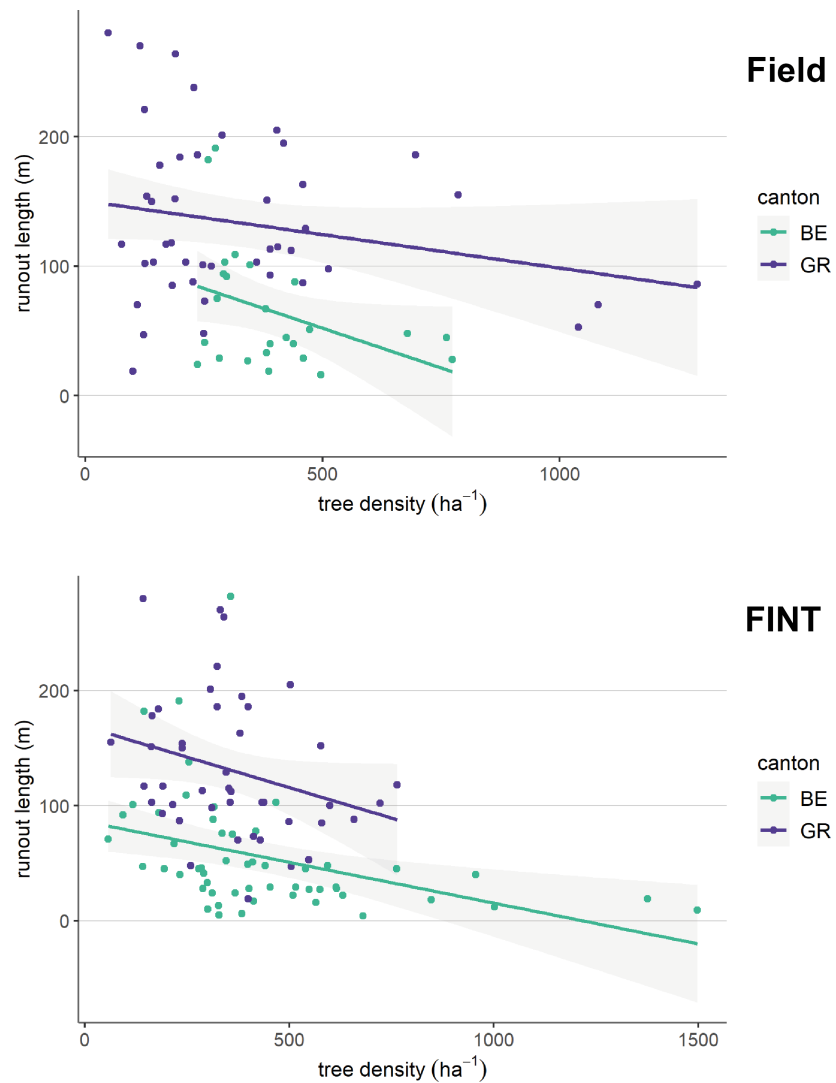


Abbildung 3.5.: Auslauflängen (y-Achse) der untersuchten Hangmuren-Ereignisse im Wald in Abhängigkeit der Stammzahl (x-Achse) ermittelt im Feld (oben) sowie berechnet basierend auf der Einzelbaumerkennungs-Software FINT (unten) für die Kantone GR (violett) und BE (grün).

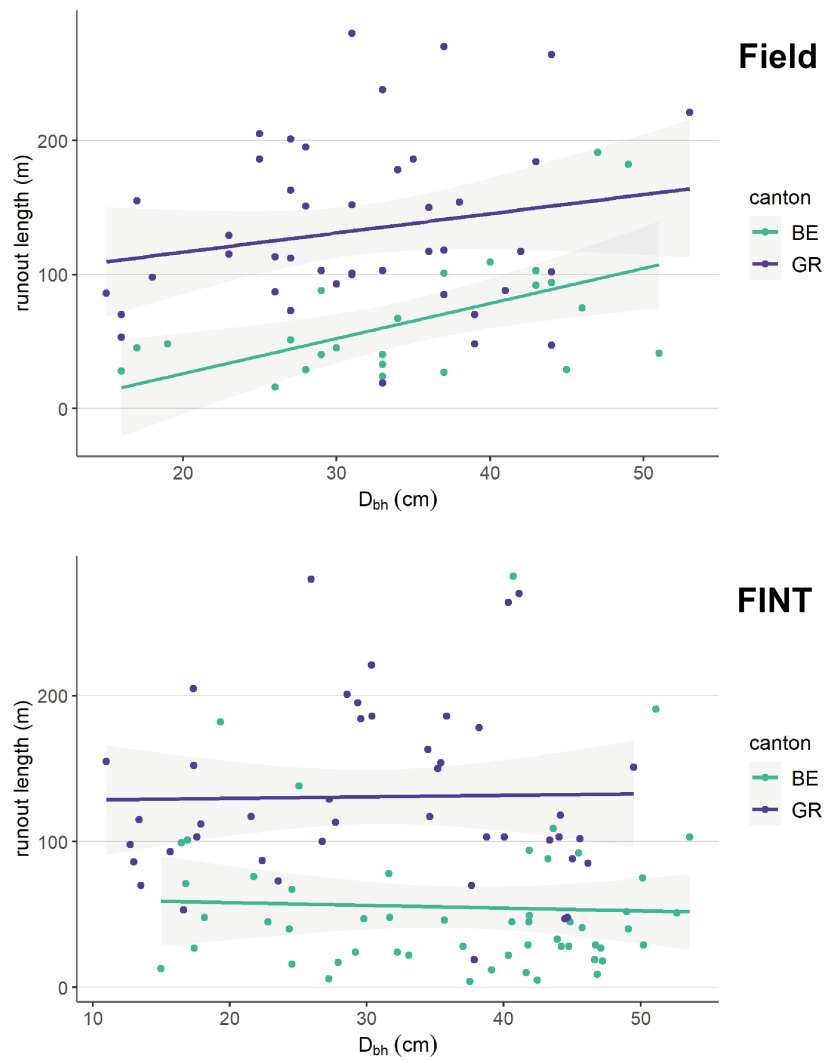


Abbildung 3.6.: Auslauflängen (y-Achse) der untersuchten Hangmuren-Ereignisse im Wald in Abhängigkeit des BHD (x-Achse) ermittelt im Feld (oben) sowie berechnet basierend auf der Einzelbaumerkennungs-Software FINT (unten) für die Kantone GR (violett) und BE (grün).

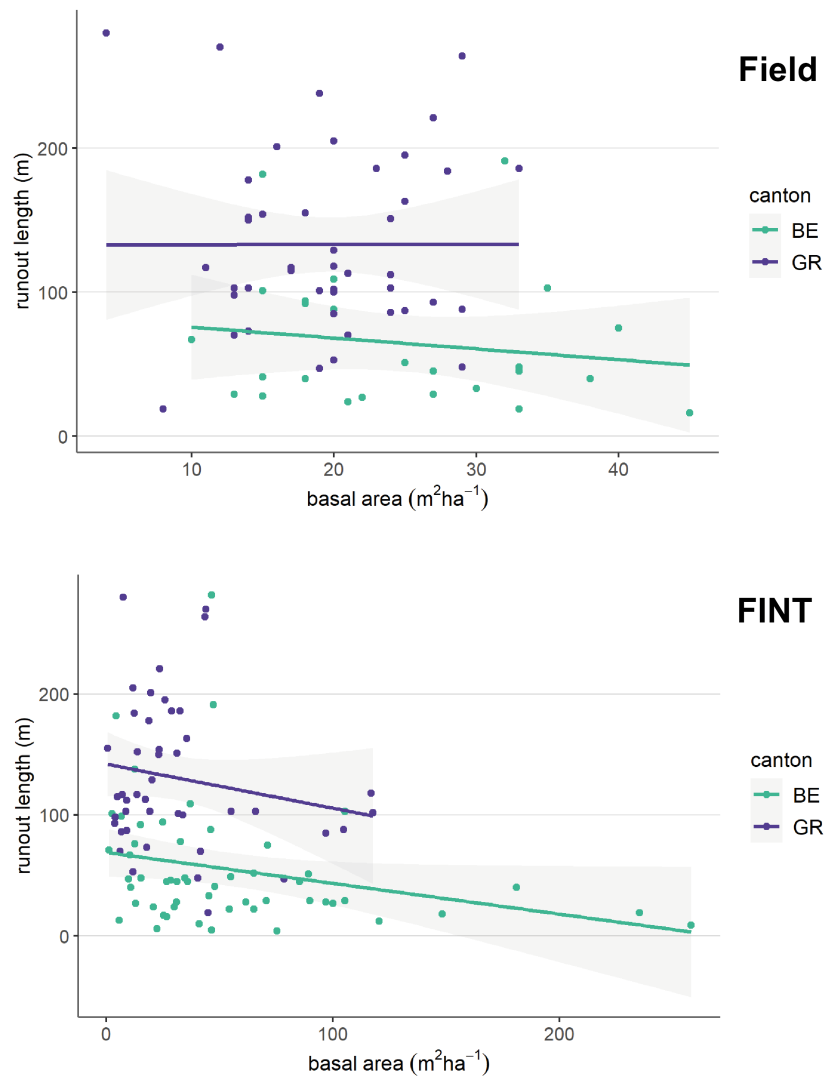


Abbildung 3.7.: Auslauflängen (y-Achse) der untersuchten Hangmuren-Ereignisse im Wald in Abhängigkeit der Grundfläche (x-Achse) ermittelt im Feld (oben) sowie berechnet basierend auf der Einzelbaumerkennungs-Software FINT (unten) für die Kantone GR (violett) und BE (grün).

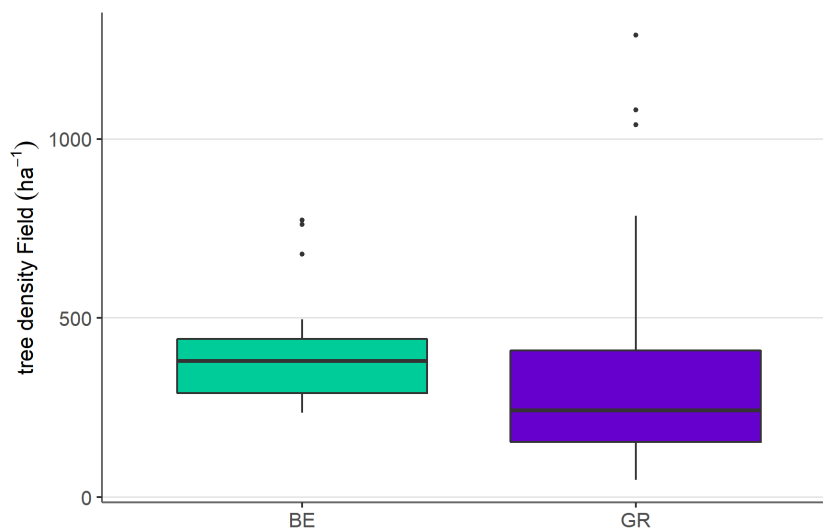


Abbildung 3.8.: Stammzahlen ermittelt im Feld (y-Achse) für die Hangmurenereignisse in den Kantonen BE (grün) und GR (violett).

Tabelle 3.3.: Lineare Regression der Auslaufstrecke in Abhängigkeit verschiedener Waldparameter (einfache lineare Regression) sowie multivariates Modell in Kombination mit der Hangneigung und dem Anrissvolumen für den Kanton **BE** ($\log(\text{Auslaufstrecke}) \sim x$). Signifikante P-Werte (< 0.05) sind fett gedruckt.

Parameter (x)	n	Koeffizienten	P-Wert	R^2
Stammzahl Stichprobe (log)	25	-0.33	0.21	0.03
Stammzahl Bitterlich (log)	25	-0.76	0.06	0.10
Stammzahl FINT (log)	54	-0.73	$1.9 \cdot 10^{-4}$	0.24
mittlere BHD-Stichprobe	25	0.04	0.009	0.23
mittlerer BHD FINT	54	-0.004	0.71	0.02
BA Bitterlich (log)	25	-0.35	0.32	0.0006
BA FINT (log)	54	-0.28	0.01	0.09
Interzept	54	6.13	0.0003	0.26
Stammzahl FINT (log)	54	-0.67	0.0005	
Anrissvolumen (log)	54	0.21	0.07	
Hangneigung (log)	54	0.32	0.54	

Tabelle 3.4.: Lineare Regression der Auslaufstrecke in Abhängigkeit verschiedener Waldparameter (einfache lineare Regression; oben) sowie multivariates Modell (unten) in Kombination mit der Hangneigung und der Anrissfläche für den Kanton **GR** ($\log(\text{Auslauflänge}) \sim x$). Signifikante P-Werte (< 0.05) sind fett gedruckt.

Waldparameter (x)	n	Koeffizienten	P-Wert	R^2
Stammzahl Stichprobe (log)	44	-0.02	0.93	0.02
Stammzahl Bitterlich (log)	44	-0.07	0.52	0.01
Stammzahl FINT (log)	45	-0.28	0.06	0.05
mittlere BHD-Stichprobe	44	0.25	0.36	0.003
mittlerer BHD FINT	45	0.008	0.96	0.02
BA Bitterlich	44	0.008	0.54	0.01
BA FINT (log)	45	-0.06	0.4	0.002
Interzept	45	0.21	0.83	
Stammzahl FINT (log)	43	0.13	0.17	
Anrissvolumen (log)	45	0.72	$7.6 \cdot 10^{-12}$	
Hangneigung	45	-0.004	0.68	
				0.70

3.1.1. Materialablagerung hinter Bäumen

Die Analyse der Materialablagerung hinter Bäumen im Kanton GR zeigt einen signifikant positiven Zusammenhang zwischen dem Ablagerungsvolumen von Hangmuren und dem BHD (Abb. 3.9; p-Wert der linearen Regression = $5.8 \cdot 10^{-11}$, $R^2 = 0.71$). Die Hangneigung im Bereich der Materialablagerungen hingegen hat keinen signifikanten Einfluss auf das Volumen (p-Wert > 0.05).

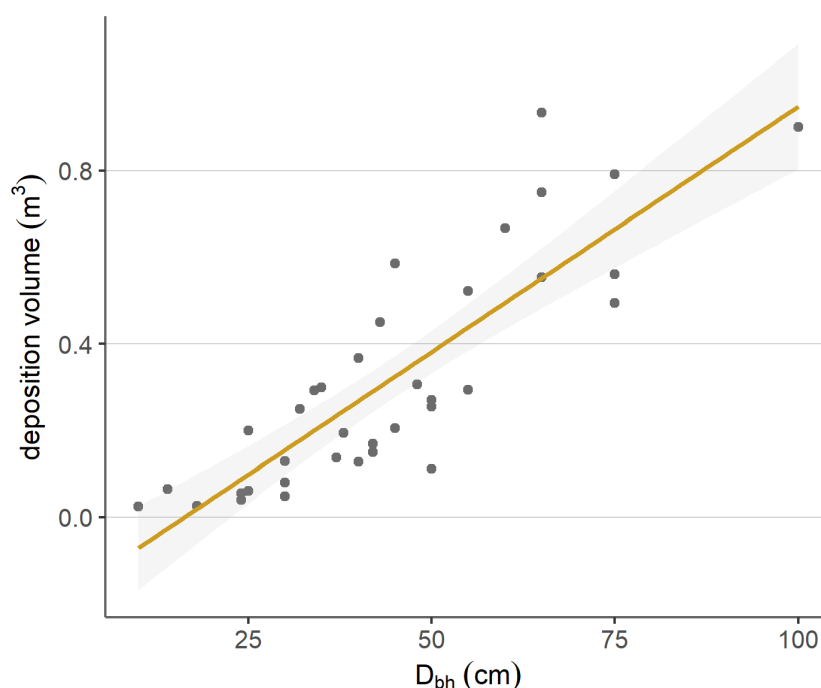


Abbildung 3.9.: Volumen der Ablagerungen (y-Achse) von Hangmurenereignissen gemessen hinter 36 Bäumen im Kanton GR in Abhängigkeit des BHD (x-Achse). P-Wert der linearen Regression = $5.8 \cdot 10^{-11}$, $R^2 = 0.71$.

3.2. Hangmurenexperimente im Labor

Die Resultate der Laborexperimente haben gezeigt (siehe Abb. 3.10 sowie die detaillierte Ergebnisse in Tab. 3.5), dass die Auslaufstrecke der Hangmuren durch einen dichten Wald kürzer ist als ohne Wald. Die maximale Auslaufstrecke wird bei allen Experimenten stark vom Wassergehalt bestimmt. Bei ähnlichen Wassergehalten zeigen die Resultate, dass die drei getesteten Waldsituationen eine Verkürzung der Auslaufstrecke im Vergleich zu der Situation ohne Wald zu Folge haben. Die einzige Ausnahme dazu ist der Versuch mit lockerem Wald WL_16.9, welcher leider nicht mehrfach wiederholt wurde und daher eher unsicher ist.

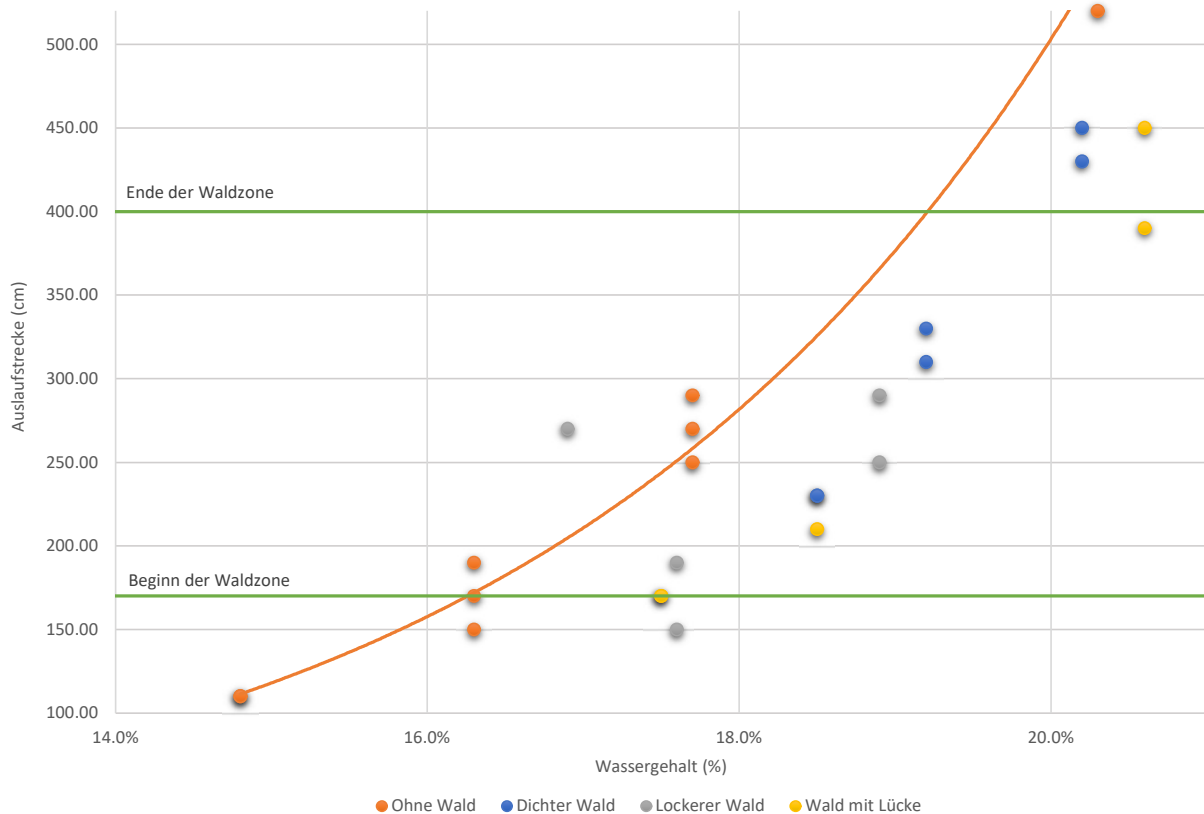


Abbildung 3.10.: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Auslaufstrecke für verschiedene Waldsituationen: ohne Wald, dichter Wald, lockerer Wald und Wald mit Lücke. Die orange Trendkurve dient als Referenz für die Situation ohne Wald.

Die Resultate zeigen weiter, dass die drei verschiedenen Waldsituationen (sprich Strukturen) keinen grossen Einfluss auf die Auslaufstrecke haben. Um den Verlauf der fließenden Massen über die Laborrutschbahn besser nachvollziehen zu können zeigen die Abbildungen 3.11, 3.12, 3.13 und 3.14 die Auslaufdistanz mit der Zeit jeweils für die Strukturen „Ohne Wald“, „Dichter Wald“, „Lockerer Wald“ und „Wald mit Lücke“. In diesen Abbildungen sind die obere und untere Grenze der Waldzone grün dargestellt.

Tabelle 3.5.: Max. Auslaufstrecke mit min. Geschwindigkeit von 2 cm/s. OW: „Ohne Wald“; WD: „Dichter Wald“; WL: „Lockerer Wald“; WLu: „Wald mit Lücke“

Name des Versuchs	Waldstruktur	Wassergehalt (%)	Auslaufstrecke (cm)
OW_20.3_1	OW	20.3%	520
OW_17.7_1	OW	17.7%	250
OW_17.7_2	OW	17.7%	290
OW_17.7_3	OW	17.7%	270
OW_16.3_1	OW	16.3%	170
OW_16.3_2	OW	16.3%	190
OW_16.3_3	OW	16.3%	150
OW_14.8_1	OW	14.8%	110
OW_14.8_3	OW	14.8%	110
WD_20.2_1	WD	20.2%	430
WD_20.2_2	WD	20.2%	450
WD_19.2_1	WD	19.2%	330
WD_19.2_2	WD	19.2%	310
WD_18.5_1	WD	18.5%	230
WD_18.5_2	WD	18.5%	230
WL_18.9_1	WL	18.9%	290
WL_18.9_2	WL	18.9%	250
WL_16.9_1	WL	16.9%	270
WL_17.6_1	WL	17.6%	190
WL_17.6_2	WL	17.6%	150
WLu_20.6_1	WLu	20.6%	450
WLu_20.6_2	WLu	20.6%	390
WLu_18.5_1	WLu	18.5%	210
WLu_17.5_1	WLu	17.5%	170
WLu_17.5_2	WLu	17.5%	170

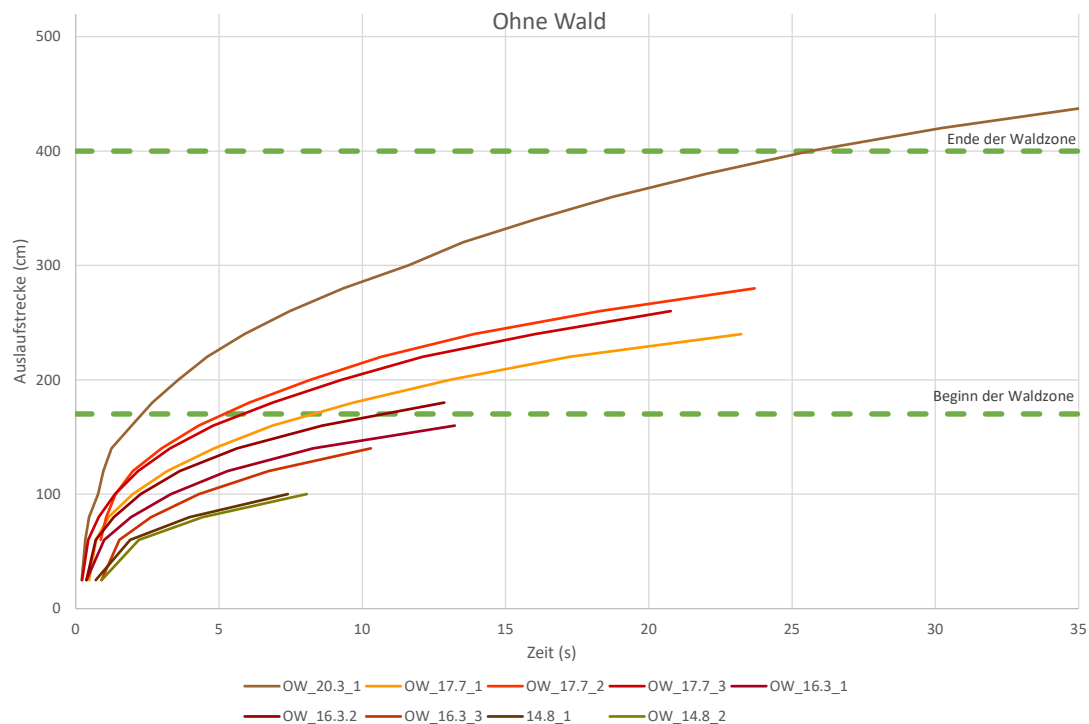


Abbildung 3.11.: Verlauf der Auslaufstrecke über die Zeit für die Laborversuche „Ohne Wald“

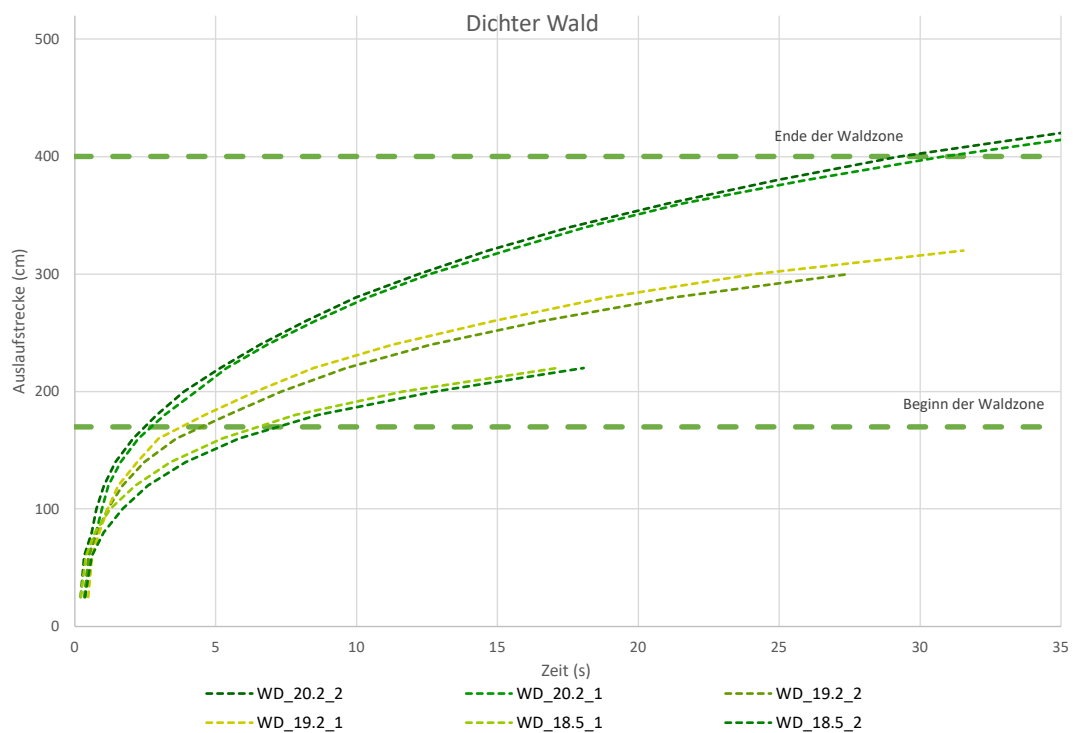


Abbildung 3.12.: Verlauf der Auslaufstrecke über die Zeit für die Laborversuche „Dichter Wald“

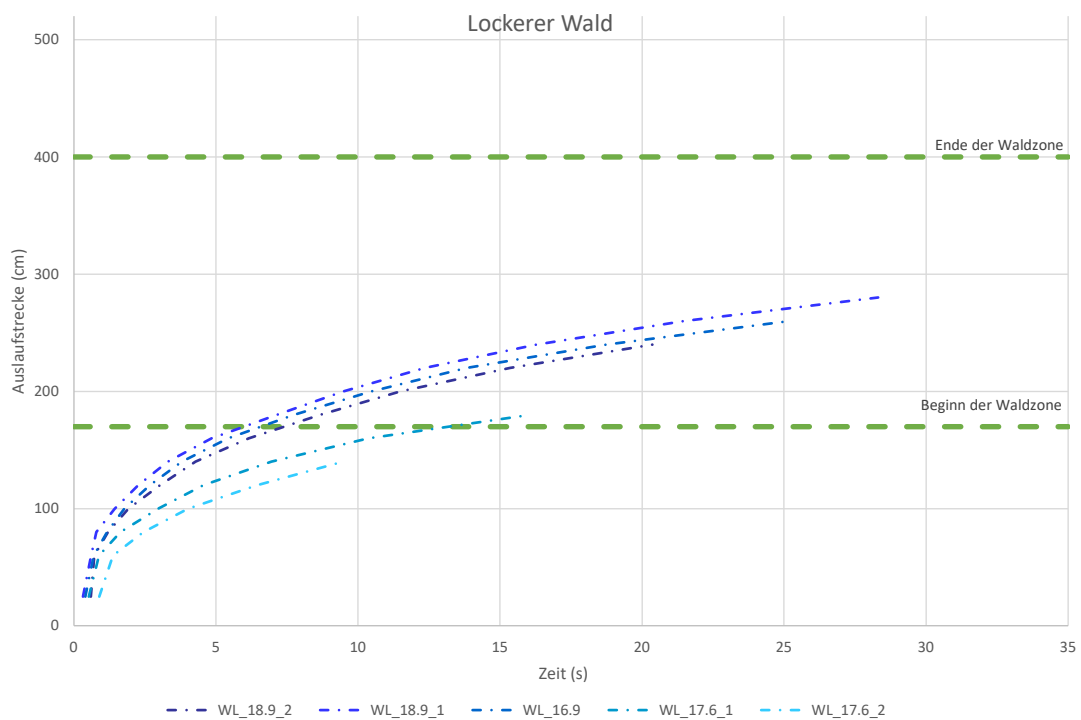


Abbildung 3.13.: Verlauf der Auslaufstrecke über die Zeit für die Laborversuche „Lockerer Wald“

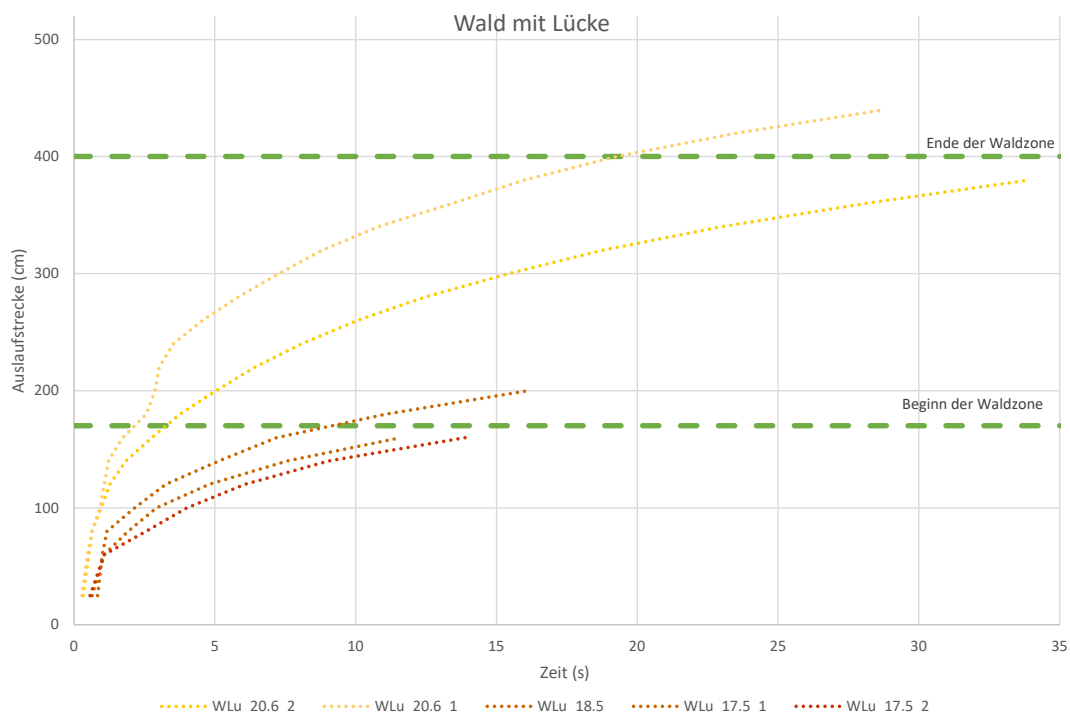


Abbildung 3.14.: Verlauf der Auslaufstrecke über die Zeit für die Laborversuche „Wald mit Lücke“

Die Resultate in den obenstehenden Abbildungen zeigen, dass der Wassergehalt nicht nur sehr bestimmend für die Auslaufstrecke, sondern auch für die Geschwindigkeit ist. Der Versuch WLu_20.6_1 (Abb. 3.14) mit einem Wassergehalt von 20.6% hatte die höchste Geschwindigkeit von allen Versuchen, ging aber nicht weiter als 450 cm. Dies in Vergleich zur Auslaufdistanz von 520 cm vom Versuch OW_20.3_1 mit niedrigere Geschwindigkeit. Gleichzeitig zeigt der Versuch WLu_20.6_2 eine viel niedrigere Geschwindigkeit mit einem gleichen Wassergehalt (und gleiche Waldsituation, gleiches Material). Zudem zeigt Abb. 3.11, dass Versuche mit Wassergehalten unter 17.7% auch ohne Bäume mitten in der „Waldzone“ stoppen. Der Verlauf des Versuchs WL_16.9 (Abb. 3.13), welcher sehr ähnlich ist wie WL_18.9_1 und WL_18.9_2, gibt einen Hinweis auf einen Fehler in der Bestimmung des Wassergehalts vom Versuch WL_16.9. Die Versuche mit dichtem Wald sowie Wald mit Lücke zeigen bei einem Wassergehalt von 18.5%, dass eine höhere Walddichte einen grösseren bremsenden Effekt hat. Dies wirkt sich sowohl auf die Reichweite als auch auf die Geschwindigkeit aus (vgl. Wassergehalt von 18.9% in Abb. 3.13). Den Vergleich zwischen OW_20.3_1 und OW_20.2_1/2 zeigt, dass die Reichweite mit ca. 20% reduziert wurde und die Geschwindigkeit mit ca. 11%.

3.3. Auslauf Modellierung und Risikoermittlung

Die Simulationen mit den verschiedenen YADE-Parameterkombinationen für die zwei Studienggebiete haben eine grosse Variation in den Auslaufstrecken ergeben. Dies entspricht dem Einfluss des Wassergehalts, was auch durch die Laborversuche aufgezeigt wurde. In YADE wird der Wassergehalt über den Parameter Reibungswinkel (μ) gesteuert, während der Feinanteil und die damit gesteuerte Kohäsion im Material über den Parameter H_c gesteuert ist. Die Ergebnisse der verschiedenen YADE-Parameterkombinationen zeigten, dass das Verhältnis zwischen der simulierten und der gemessenen Auslaufstrecke zwischen 10% und 185% variiert. Dies steht in direktem Zusammenhang mit dem Wert von μ : ein niedriger Wert führt zu langen Auslaufstrecken, während eine sehr hohe Reibung zur Folge hat, dass das Material überhaupt nicht fließt. Die optimale Parameterkombination, gemessen an einer optimalen Überlappung zwischen Sturme-Ereignishüllenden und simulierter Auslauffläche, war für Trub (BE) $\mu = 20^\circ$ und $H_c = 0.35$. Diese Parameterkombination wurde für die reale Situation (d.h., mit Wald) ermittelt und blieb für die Simulationen ohne Wald gleich. Für Root (LU) war $\mu = 15^\circ$ und $H_c = 0.30$. Diese Parameterkombination wurde für die Situation ohne Wald (die reale

Situation in Root) ermittelt und blieb auch hier für die Simulation mit Wald gleich. Die Abb. 3.15 und 3.16 zeigen die Übereinstimmung zwischen Sturme-Ereignisumhüllenden und simulierter Auslauffläche der optimalen Parametereinstellungen in beiden Gebieten, sowohl für die Simulationen mit als auch ohne Wald .

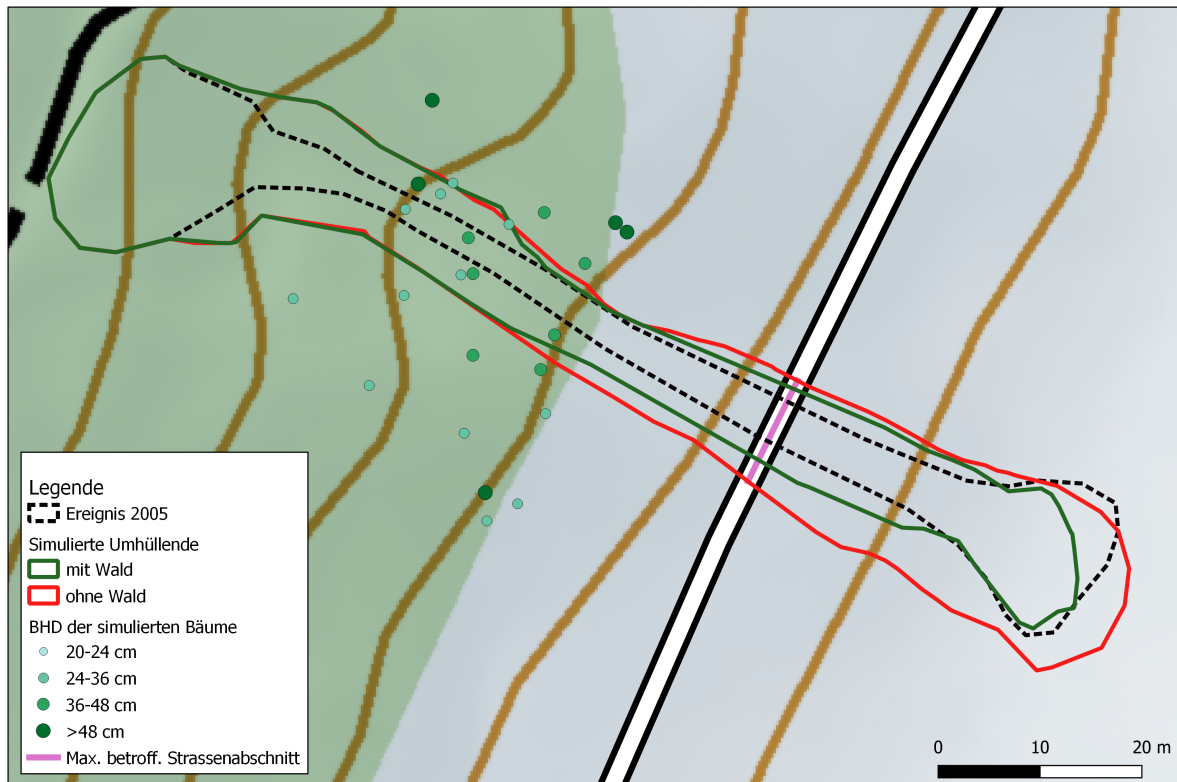


Abbildung 3.15.: Übereinstimmung zwischen der Sturme-Ereignisumhüllenden und der simulierten Auslauffläche der optimalen Parametereinstellungen, sowohl für die Simulationen mit als auch ohne Wald in Trub (BE).

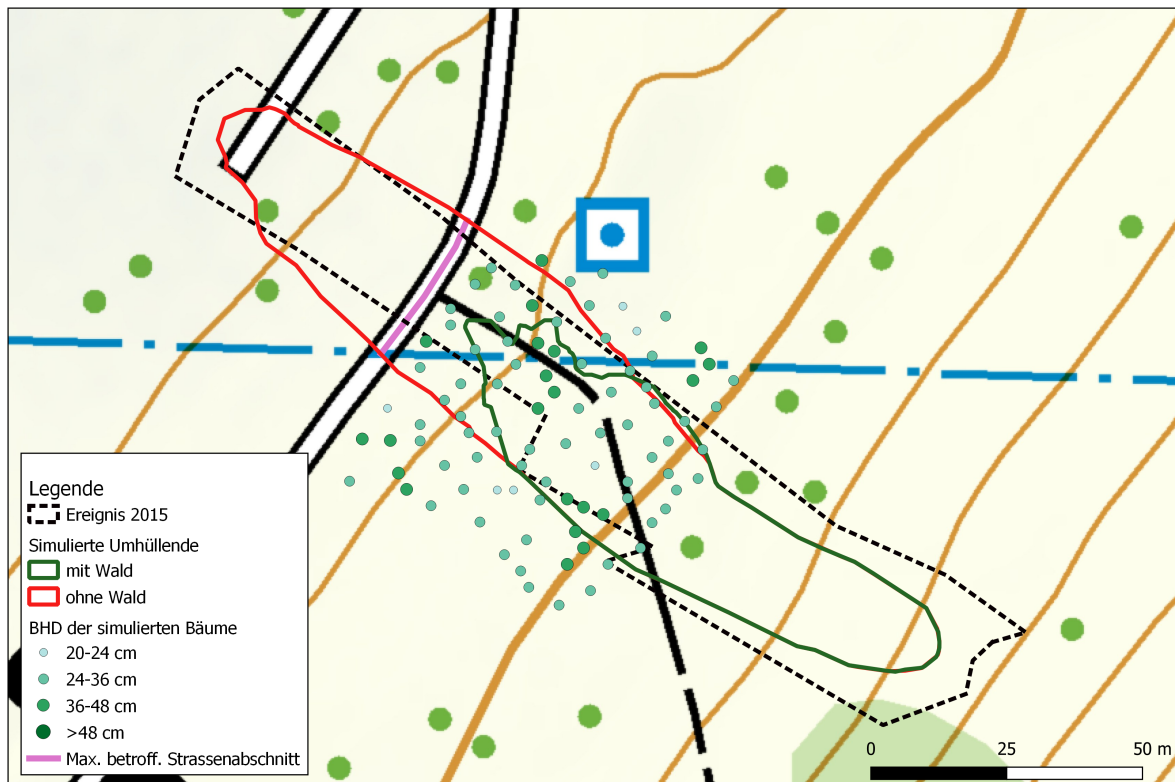


Abbildung 3.16.: Übereinstimmung zwischen der Sturme-Ereignisumhüllenden und der simulierten Auslauffläche der optimalen Parametereinstellungen, sowohl für die Simulationen mit als auch ohne Wald in Root (LU).

Die simulierten Ergebnisse (siehe Tab. 3.6 zeigen, dass der Wald im Fall von Trub (BE) auf dem Strassenabschnitt die Fließgeschwindigkeit (v_f) mit 26%, die Fließhöhe (γ_f) mit 32% und den Druck mit 63% reduziert. Die betroffene Abschnittslänge reduziert sich von 11 auf 8 m (27%) und die Reduktion der Masse, welche über die Strasse fliesst, beträgt 72%. Damit verringert sich die Intensität von stark auf mittel, falls diese auf Basis des Druckes festgelegt wird. Bei einer von der Ablagerungsmächtigkeit abhängigen Intensität ist keine Reduktion festzustellen. Im Fall vom Root (LU) verhindert der Wald das Erreichen der Strasse komplett und zeigt einer 100-prozentige Wirkung für alle risikorelevanten Variablen.

Tabelle 3.6.: Ergebnisse der Simulationen von Trub und Luzern mit und ohne Wald. A_m = max. Anrissmächtigkeit; γ_f = Fließhöhe auf dem Strassenabschnitt; v_f = Fließgeschwindigkeit dem Strassenabschnitt; P = Druck auf dem Strassenabschnitt; L = Länge des betroffenen Strassenabschnitts; INT_{Am} = Intensität auf dem Strassenabschnitt basierend auf der Anrissmächtigkeit (gemäss [45]); INT_P = Intensität auf dem Strassenabschnitt basierend auf dem Druck (analog zu den Intensitätskriterien von Lawinen gemäss [46])

	Szenario	A_m (m)	γ_f (m)	v_f (m/s)	P (kPa)	L (m)	INT_{Am}	INT_P
Trub	ohne Wald	0.9	0.63	6.6	50	11	mittel	stark
	mit Wald	0.9	0.43	4.9	18	8	mittel	mittel
Root	ohne Wald	0.35	0.26	3.7	6	29	schwach	mittel
	mit Wald	0.35	0	0	0	0	keine	keine

Tabelle 3.7.: Ausgangsdaten für die Varianten der Risikoberechnungen (zusammengefasst in Tab. 2.4) mit INT_P (Intensität auf Basis von Druck). Jährlichk. = Jährlichkeit des Ereignisses; λ = Letalität der Personen im Fahrzeug; SE = Schadenempfindlichkeit der Strasseninfrastruktur; R_{direkt} = Risiko Direkttreffer; R_{Auffahr} = Risiko Auffahrunfall; R_{Infra} = Schäden an der Infrastruktur; R_{Gesamt} = Gesamtrisiko; $R_{\text{ind-Todesfall}}$ = individuelles Todesfallrisiko. R_{Red} = Risikoreduktion (Gesamtrisiko ohne Wald - Gesamtrisiko mit Wald). Alle Risiken sowie die Risikoreduktion, ausser $R_{\text{ind-Todesfall}}$ sind in (CHF/Jahr) angegeben. Alle übrigen Variablen sind einheitslos.

Variante	Szenario	Jährlichk.	λ	SE	R_{direkt}	R_{Auffahr}	R_{Infra}	R_{Gesamt}	$R_{\text{ind-Todesfall}}$	R_{Red}
1 (Trub)	ohne Wald	100	0.3	0.3	20	29	165	214	2.2E-7	(47%)
1	mit Wald	100	0.1	0.2	5	29	80	114	1.5E-7	100
2 (Trub)	ohne Wald	100	0.3	0.3	202	29	165	396	1.0E-7	(60%)
2	mit Wald	100	0.1	0.2	49	29	80	158	3.5E-8	238
3 (Trub)	ohne Wald	100	0.3	0.3	2'017	29	165	2'211	9.3E-8	(73%)
3	mit Wald	100	0.1	0.2	489	29	80	598	2.4E-8	1'613
4 (Trub)	ohne Wald	100	0.3	0.3	1'513	87	314	1'913	7.3E-8	(68%)
4	mit Wald	100	0.1	0.2	367	87	152	606	2.1E-8	1'307
5 (Root)	ohne Wald	30	0.1	0.2	59	97	967	1'122	7.1E-7	(100%)
5	mit Wald	30	0	0	0	0	0	0	0	1'122
6 (Root)	ohne Wald	30	0.1	0.2	591	97	967	1'654	3.1E-7	(100%)
6	mit Wald	30	0	0	0	0	0	0	0	1'654
7 (Root)	ohne Wald	30	0.1	0.2	5'907	97	967	6'970	2.7E-7	(100%)
7	mit Wald	30	0	0	0	0	0	0	0	6'970
8 (Root)	ohne Wald	30	0.1	0.2	4'430	290	1'836	6'557	2.1E-7	(100%)
8	mit Wald	30	0	0	0	0	0	0	0	6'557

Tabelle 3.8.: Ausgangsdaten für die Varianten (siehe Tab. 2.4) der Risikoberechnungen mit INT_{Am} (Intensität auf Basis der Ablagerungsmächtigkeit). Die Variablen sind in Tab. 3.7 beschrieben.

Variante	Szenario	Jährlichk.	λ	SE	R_{direkt}	R_{Auffahr}	R_{Infra}	R_{Gesamt}	$R_{\text{ind-Todesfall}}$	R_{Red}
1 (Trub)	ohne Wald	100	0.1	0.2	7	29	110	146	1.6E-7	(22%)
1	mit Wald	100	0.1	0.2	5	29	80	114	1.5E-7	32
2 (Trub)	ohne Wald	100	0.1	0.2	67	29	110	206	4.4E-8	(23%)
2	mit Wald	100	0.1	0.2	49	29	80	158	3.5E-8	48
3 (Trub)	ohne Wald	100	0.1	0.2	672	29	110	811	3.2E-8	(26%)
3	mit Wald	100	0.1	0.2	489	29	80	598	2.4E-8	213
4 (Trub)	ohne Wald	100	0.1	0.2	504	87	209	800	2.7E-8	(24%)
4	mit Wald	100	0.1	0.2	637	87	152	606	2.1E-8	195
5 (Root)	ohne Wald	30	0.05	0.1	30	97	483	610	5.7E-7	(100%)
5	mit Wald	30	0	0	0	0	0	0	0	610
6 (Root)	ohne Wald	30	0.05	0.1	295	97	483	875	1.8E-7	(100%)
6	mit Wald	30	0	0	0	0	0	0	0	875
7 (Root)	ohne Wald	30	0.05	0.1	2'953	97	483	3'533	1.4E-7	(100%)
7	mit Wald	30	0	0	0	0	0	0	0	3'533
8 (Root)	ohne Wald	30	0.05	0.1	2'215	290	918	3'424	1.1E-7	(100%)
8	mit Wald	30	0	0	0	0	0	0	0	3'424

Die Risikoberechnung mit den zurzeit geltenden Intensitätskriterien (INT_{Am}) zeigt für das Fallbeispiel Root, dass sich die risikoreduzierende Wirkung des Waldes im Transitgebiet einer Hangmure (mit einem Anrissvolumen von rund 200 m³) zwischen 610 CHF/Jahr (für eine Gemeindestrasse mit einem DTV von 100) und 3'424 CHF/Jahr (für eine Autobahn ähnlich wie die Gotthardstrecke) bewegt, falls der Wald in der Lage ist, die Auslaufstrecke so zu reduzieren, dass die Hangmure das Schadenpotential nicht erreicht. Diese Risikoreduktion steigt auf 1'122 CHF/Jahr bzw. 6'557 CHF/Jahr, falls die Intensität auf Basis des Hangmurendrucks festgelegt wird. Falls die Hangmure trotz Waldwirkung das Schadenpotential erreicht, wird das Risiko noch immer zwischen 47% und 73% (abhängig von der Bedeutung der Strasse) wegen der Reduktion des Drucks sowie der Masse, der Geschwindigkeit und der Fliesshöhe, reduziert. Weil diese Elemente nicht in die zurzeit geltenden Intensitätskriterien einfließen, sinkt die Risikoreduktion auf 22% bzw. 26%.

4. Diskussion

4.1. Ereignisanalysen

Die Analyse der Hangmurenereignisse in den Kantonen Bern und Graubünden zeigt eine generelle Tendenz, dass insbesondere bei kleineren Ereignissen der Wald eine positive Wirkung auf die Auslauflänge von Hangmuren hat. Dies bestätigen auch die aufgenommenen Materialablagerungen, welche ein deutlich grösseres Ablagerungspotenzial hinter dicken Bäumen zeigen.

Das statistische Modell für die Ereignisse im Kanton Graubünden zeigt jedoch, dass die Anrissfläche beziehungsweise das Anrissvolumen der bestimmendere Faktor für die Auslauflänge zu sein scheint. Dies deutet darauf hin, dass die signifikant kürzeren Auslauflängen im Wald auf die geringeren Anrissvolumen im Wald und nicht die Bremswirkung der Bäume zurückzuführen sind. Der Wald hat somit primär einen Wirkung auf den Anriss von Hangmuren (durch Wurzelverstärkung / hydrologische Wirkung), aber weniger einen Effekt auf die Auslauflänge.

Im Kanton Bern sieht das Bild anders aus: Hier gibt es zwar keinen Unterschied in der Auslauflänge zwischen Wald und Offenland über alle Ereignisse hinweg, jedoch auch nicht für die Anrissfläche. Das multivariate Regressionsmodell hingegen zeigt deutlich, dass der Wald in Kombination mit dem Anrissvolumen und der Neigung einen Einfluss auf die Auslauflänge hat. So nimmt im Kanton Bern die Auslauflänge auch signifikant mit zunehmender Stammzahl ab. Generell sind die Stammzahlen im Kanton Bern höher als im Kanton Graubünden, was eine mögliche Erklärung für den deutlicheren Effekt des Waldes sein könnte. Hinzu kommt, dass die Ereignisse in Graubünden im Allgemeinen grösser (Anrissfläche und Auslauf) als in Bern, was darauf hindeutet, dass die Waldwirkung ab einer gewissen Hangmurengrösse ($> 300 \text{ m}^2$ Anrissfläche; sh. Abb. 3.2 und 3.3) limitiert ist.

Es ist jedoch auch zu erwähnen, dass die vorliegenden Resultate mit starken Unsicherheiten behaftet sind. Einerseits wurden teilweise unterschiedliche Effekte der mit verschiedenen Methoden aufgenommenen Waldparametern (Feldaufnahmen/FINT) festgestellt. So hat im multivariaten Modell für den Kanton Bern beispielsweise lediglich die mit FINT ermittelte Stammzahl, nicht aber die im Feld erhobene, einen signifikanten Einfluss auf die Auslauflänge. Dies erstaunt insbesondere, da in FINT in der Regel die Unterschicht unterschätzt wird, von dieser aber auch ein bremsender Effekt zu erwarten wäre. Ebenfalls bestehen Unsicherheiten bezüglich der ermittelten Anrissflächen sowie dem im Feld erhobenen Anrissvolumen. Auch ist zu erwarten, dass die mittels GIS-Analyse ermittelten Auslauflängen teilweise ungenau sind. Um die Resultate zu untermauern und breiter abzustützen, ist die Analyse von weiteren Ereignissen auch in anderen Gebieten nötig. Grundlage dafür sind möglichst detailliert und genau dokumentierte Auslauflängen sowie weitere Hangmurenparameter. Die zunehmende Verfügbarkeit und regelmässige Aktualisierung von Fernerkundungsdaten werden die Analyse künftiger Ereignisse weiter vereinfachen und es ermöglichen, effizient eine grosse Menge an genauen Daten zu sammeln.

4.2. Laborexperimente

Die Ergebnisse der Laborversuche deuten darauf hin, dass die Bremswirkung von verschiedenen Waldstrukturen (dicht, offen, mit Lücken) im Vergleich zu einer Situation ohne Wald immer gegeben ist und bestätigen damit die Ergebnisse von [48]. Sie fanden zusätzlich noch heraus, dass eine hohe Stammzahl vorteilhaft gegenüber einem höheren mittleren Stammdurchmesser ist. Weil wir nicht mit unterschiedlichen Durchmessern gearbeitet haben, können wir nur den Schluss ziehen, dass eine höhere Walddichte, wie zu erwarten, bei gleichen

Stammdurchmessern zu einer kürzeren Auslaufstrecke und einer niedrigeren Fließgeschwindigkeit führt und zwar bei niedrigeren (16%) und höheren (20%) Wassergehalten.

Die Unterschiede in Fließverhalten (Auslaufstrecke und Geschwindigkeit) bei gleichen Wassergehalten geben einerseits den Hinweis, dass kleine, nicht gemessene Unterschiede im Wassergehalt sehr bestimmend für das Fließverhalten sind. Andererseits entsprechen die Werte der Wassergehaltsproben wahrscheinlich nicht sehr genau den Wassergehalten des verwendeten Rutschmaterials, obwohl sie aus dem selben Behälter stammen. Nach dem Durchmischen setzten sich die Kies- und Sandpartikel sehr schnell ab, wodurch am Boden direkt eine höhere Dichte und ein niedrigerer Wassergehalt entstehen als an der Oberfläche, wo die Wassergehaltsproben genommen werden. Diese Unsicherheiten in Bezug auf den Wassergehalt führen zu Unsicherheiten beim Vergleich der Versuche.

Basierend auf dem ähnlichen Auslaufverhalten über die Zeit oberhalb vom Wald für die Versuche ohne Wald sowie mit dichtem Wald mit mehr als 20% Wassergehalt (sehr flüssig) kommen wir zum Schluss, dass die Unsicherheit bei den erhaltenen Werten gering sein muss. Diese Versuche erlauben uns zum Schluss zu kommen, dass die Reichweite wegen der Bremswirkung des Waldes mit ca. 20% reduziert wurde und die Geschwindigkeit mit ca. 11%. Auch [48] haben bei ihren Laborversuchen festgestellt, dass die Auslaufstrecke bei Vorhandensein von Vegetation (sowohl bei Hochwald als auch bei Niederwald) um durchschnittlich 20% kürzer wird.

4.3. Auslaufmodellierung und Risikoermittlung

Obwohl das Gesamtvolumen der Hangmure in Root fast vier mal grösser war als in Trub, konnte das Schadenpotential wegen der Bremswirkung des Waldes nicht erreicht werden. Dabei war der Wald weniger dicht als in Trub (345 statt 454 Stämme/ha), aber hatte dafür einen leicht grösseren mittleren BHD (32 statt 28 cm) und somit die gleiche Grundfläche (28 m²/ha). Ein wichtiger Grund, warum die Bremswirkung im Fallbeispiel Root besser funktioniert als im Fallbeispiel Trub, ist wahrscheinlich, dass die Hangneigung im Transitgebiet weniger als 30° steil ist, wohingegen die Hangneigung im Transitgebiet in Trub zwischen 30 und 35° liegt. Ein weiterer Grund liegt wahrscheinlich in der höheren Kohäsion des Murenmaterials (tieferer H_c -Wert), trotz des leicht höheren Wassergehalts (repräsentiert durch einen μ -Wert von 15° in Vergleich zu 20° im Trub).

In den beiden Fallbeispielen hat der Wald einen erheblichen bis sehr grossen Beitrag an der Risikoreduktion wegen der Bremswirkung im Transitgebiet. Auch wenn der Wald nicht verhindern kann, dass die Hangmure das Schadenpotential erreicht, kann von einer Reduktion der Geschwindigkeit und Fließhöhe und damit auch von tieferen Drücken ausgegangen werden. Die jetzigen vom BAFU definierten Kriterien legen die Intensität auf der Grundlage der Werte der Mächtigkeit der mobilisierbaren Masse und der Ablagerungsmächtigkeit fest. Weil die dynamische Phase des fließenden Materials damit nicht berücksichtigt wird, kommt die risikoreduzierende Wirkung des Waldes im Transitgebiet von Hangmuren nicht vollständig zur Geltung. Auch aus diesem Grund würden Intensitätskriterien für Hangmuren, welche ebenfalls den dynamischen Druck in Betracht ziehen, die Realität besser darstellen.

Die Risikoreduktion haben wir in CHF pro Jahr und nicht in CHF pro Jahr und ha dargestellt. Wenn pro ha nur eine Hangmure entsteht, stimmt die jetzt dargestellte Risikoreduktion und würde der Betrag auch für eine ha stimmen. Eine Hochrechnung von der tatsächlich betroffene Waldfläche auf 1 ha würde die wirkliche Risikoreduktion extrem überschätzen, weil der von der Hangmure durchlaufene Waldabschnitt relativ klein ist. An gewissen Orten in der Schweiz sind in 2005 mehrere Hangmuren pro ha losgegangen. Dort würde die Risikoreduktion pro Jahr und pro ha höher liegen. Weil diese Variabilität besteht haben wir in diesem Bericht nur die Risikoreduktion für die analysierte Hangmure und die dazugehörige Jährlichkeit dargestellt. Bei einem 300-Jährigen Ereignis könnten in beiden Fallbeispielen mehrere Hangmuren entstehen und der Wald somit eine höhere Risikoreduktion aufweisen. Wegen den grossen Unsicherheiten haben wir diese hypothetische Fälle nicht untersucht.

In diesem Projekt wurden die Bäume in YADE für die beiden Fallbeispiele leider nicht dynamisch simuliert. Obwohl es uns gelungen ist, dynamische Simulationen (mit Stammbruch oder Entwurzelung der Bäume) grundsätzlich durchzuführen (Abb.4.1), war die Unsicherheit in Bezug auf die mechanischen Parameter der Bäume und deren Kalibrierung zu hoch. Wir hatten leider keine Daten, welche uns erlaubten einzuschätzen, ob das Verhalten bei dynamischen Drücken auf kleinen und grossen Bäume realistisch modelliert wurde. Wie schon erwähnt, würde das Sammeln der benötigten Daten und das Kalibrieren der YADE-Baum-Parameter ein eigenständiges Disserstations-Forschungsprojekt beanspruchen. Die ursprüngliche Idee war, den Stammbruch

bzw. die Entwurzelung der Bäume und den Weitertransport der Stämme in YADE simulieren zu können. Somit hätte die negative Wirkung von Bäumen, wegen der Zunahme der bewegte Gesamtmasse, analysiert werden können. Die Resultate der Risikoermittlungen basieren auf der Annahme, dass alle Bäume, welche in der Simulation als starre Zylinder integriert wurden (alle mit BHD > 20 cm), nicht von den Hangmuren gebrochen oder entwurzelt werden konnten. Diese Annahme soll vertieft mit Felddaten über Waldschäden im Transitgebiet von Hangmuren untersucht werden.

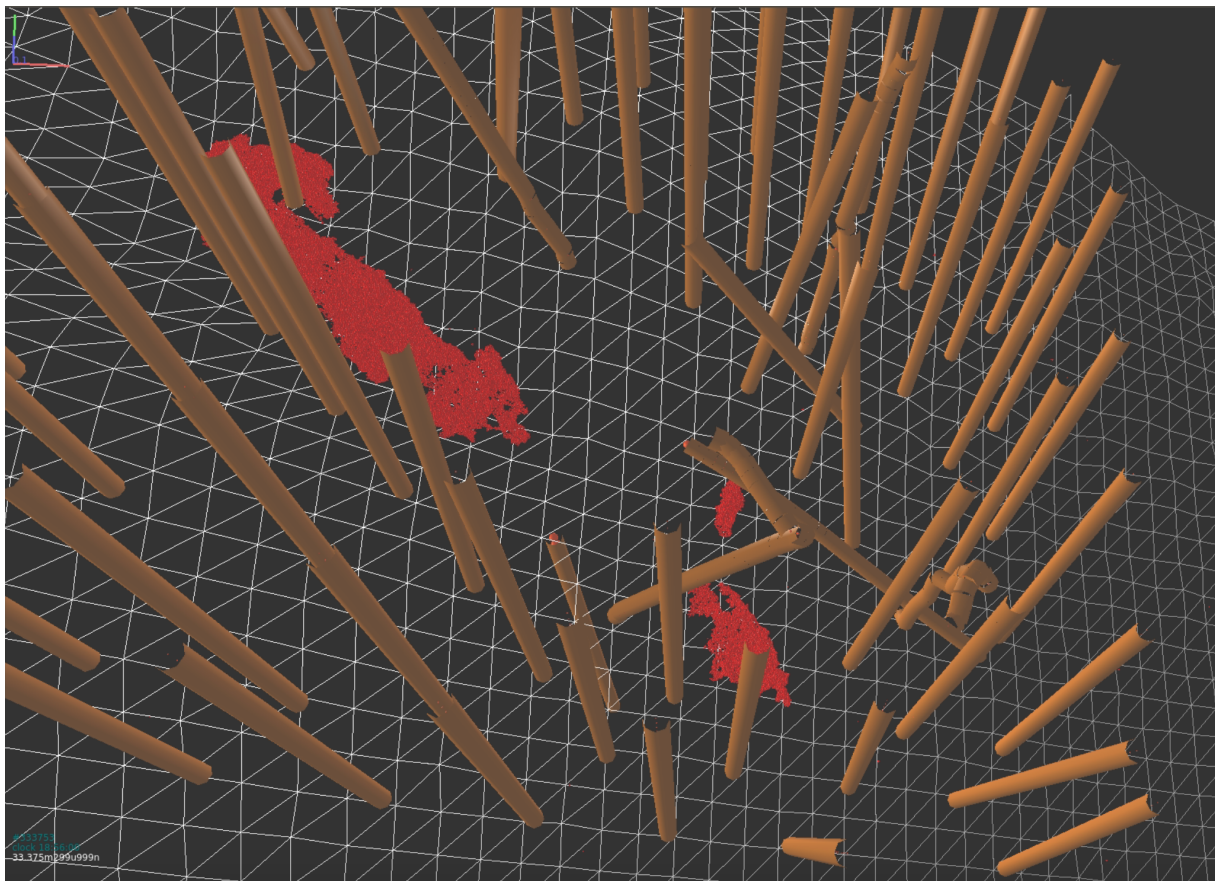


Abbildung 4.1.: 3D-Visualisation von Materialablagerung und Baumschäden im Wald nach Simulation des Durchgangs einer Hangmure in YADE.

5. Schlussfolgerungen

- Die Untersuchungen der historischen Ereignisse deuten darauf hin, dass der Wald insbesondere bei kleineren Hangmurenereignissen eine bremsende Wirkung auf die Auslaufstrecke hat, wobei starke Unterschiede zwischen den untersuchten Kantonen festgestellt wurden. Bei den untersuchten Ereignissen im Kanton Graubünden scheint der Einfluss des Waldes auf den Anriss von Hangmuren vorrangig zu sein.
- Die Bremswirkung des Waldes wird gemäss der analysierten Hangmurenereignisse hauptsächlich von der Stammzahl beeinflusst. Mit zunehmender Dichte des Waldes nimmt die Länge der Auslaufstrecke ab. Es konnte jedoch auch gezeigt werden, dass hinter dickeren Bäumen deutlich mehr Material abgelagert werden kann. Dies lässt darauf schliessen, dass ein gut strukturierter Bestand mit einer hohen Stammzahl, aber auch vereinzelt grossen Durchmessern idealer Schutz gegen Hangmuren im Transitgebiet bietet.
- Die Ergebnisse der Laborversuche deuten darauf hin, dass die Bremswirkung von verschiedenen Waldstrukturen (dicht, offen, mit Lücken) im Vergleich zu einer Situation ohne Wald immer gegeben ist und zwar bei niedrigeren (16%) und höheren (20%) Wassergehalten.
- Die Auslaufstrecke einer Hangmure mit einem Anrissvolumen von ca. 900 m³ kann durch die Bremswirkung eines Waldes mit 300 St/ha und einem mittleren BHD von ca. 36 cm um ca. 20% reduziert werden, und ihre Geschwindigkeit um ca. 11%.
- Die negative Wirkung von Bäumen in der Transitstrecke von Hangmuren konnte in diesem Projekt nicht untersucht werden, weil es nicht gelungen ist, dynamische Simulationen von Stammbruch oder Entwurzelung der Bäume mit genügend Sicherheit realitätsnah zu kalibrieren.
- Auslaufstrecken von historischen Hangmurenereignissen mit und ohne Wald in der Transitstrecke konnten sehr gut mit DEM- basierten Simulationen mit starren Zylindern mit BHD > 20 cm nachgebildet werden und erlaubten eine Berechnung und Monetarisierung der Schutzwirkung des Waldes in der Transitstrecke von Hangmuren.
- Neben der Kohäsion und dem Wassergehalt im Hangmurenmaterial spielt die Hangneigung sehr wahrscheinlich eine grosse Rolle bei der Schutzwirksamkeit des Waldes.
- Mit Intensitätskriterien für Hangmuren, welche ebenfalls den dynamischen Druck in Betracht ziehen, würde die risikoreduzierende Wirkung des Waldes im Transitgebiet von Hangmuren vollständig zur Geltung kommen und die Realität besser dargestellt werden.
- Die risikoreduzierende Wirkung des Waldes im Transitgebiet einer Hangmure mit einem Anrissvolumen von rund 200 m³ bewegt sich zwischen 1000 CHF/Jahr für eine Gemeindestrasse und 6'500 CHF/Jahr für eine Autobahn ähnlich wie die Gotthardstrecke.

5.1. Aussagen für das neue NaiS-Anforderungsprofil Rutschungen

Basierend auf den Schlussfolgerungen dieses Forschungsprojekts können für das neue NaiS-Anforderungsprofil Rutschungen die folgenden Aussagen betreffend der Schutzfunktion des Waldes im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren festgehalten werden:

1. Wald im Transit- und Ablagerungsgebiet hat in Abhängigkeit der Flüssigkeit der Hangmure eine kleine bis sehr grosse Wirkung auf die Reichweite und Intensität von Hangmuren.
2. Die negative Wirkung vom Wald im Transitgebiet einer Hangmure muss noch untersucht werden.

3. Die wichtigen Waldstrukturparameter, die relevant sind für die Waldwirkung im Transitgebiet von Hangmuren, sind Stammzahl und BHD. Dabei scheint eine Stammzahl von 300 Stämmen/ha mit BHD-Werten von mindestens 20 cm, idealerweise einem mittleren BHD > 36 cm, erstrebenswert zu sein. Die Arbeit von [20] schlägt einen mittleren Stammdurchmesser von mind. 35 cm vor.
4. Die Flüssigkeit (Wassergehalt), Kohäsion des Materials und Grösse des Anrissvolumens sowie die Steilheit des Transitgebietes spielen eine bedeutende Rolle bei der Schutzfunktion des Waldes im Transit- und Ablagerungsgebiet von Hangmuren.
5. Die Waldstrukturen, welche optimal gegen Hangmuren im Transit- und Ablagerungsgebiet schützen, lassen sich unserer Meinung nach gut mit denen im Anrissgebiet in Übereinstimmung bringen, weil auch im Anrissgebiet Stammzahl (indirekt über den Deckungsgrad) und BHD-Werte bestimmend sind. Zudem liegen die Werte, welche unter Punkt 3 erwähnt wurden, nicht weit weg von denen, welche im Anrissgebiet erforderlich sind. Zusätzlich haben grosse Lücken im Anriss- und Transitgebiet den gleichen negativen Effekt auf die Schutzwirkung.

Literaturverzeichnis

- [1] G.-R. Bezzola and C. Hegg, eds., *Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung*. Bundesamt für Umwelt, Bern, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 2007.
- [2] M. Beniston, D. Farinotti, M. Stoffel, L. M. Andreassen, E. Coppola, N. Eckert, A. Fantini, F. Giacona, C. Hauck, M. Huss, *et al.*, "The european mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges," *The Cryosphere*, vol. 12, no. 2, pp. 759–794, 2018.
- [3] M. Bründl, H. E. Romang, N. Bischof, and C. M. Rheinberger, "The risk concept and its application in natural hazard risk management in switzerland," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 9, no. 3, pp. 801–813, 2009.
- [4] PLANAT, *Strategie Naturgefahren Schweiz - Sicherheitsniveau für Naturgefahren*. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, Bundesamt für Umwelt BAFU, 2004.
- [5] M. Schwarz, P. Lehmann, and D. Or, "Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes—from a bundle of roots to tree stands," *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, vol. 35, no. 3, pp. 354–367, 2010.
- [6] C. Moos, P. Bebi, F. Graf, J. Mattli, C. Rickli, and M. Schwarz, "How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides?," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 41, pp. 951–960, 2016.
- [7] F. Graf, P. Bebi, U. Braschler, G. D. Cesare, M. Frei, P. Greminger, K. Grunder, N. Hählen, C. Rickli, C. Rixen, *et al.*, "Pflanzenwirkungen zum schutz vor flachgründigen rutschungen," *WSL Berichte*, vol. 56, 2017.
- [8] F. S. Wüurnitzer, *Versuch über die Waldkultur für gemeine Förster*. 1796.
- [9] C. Rickli and F. Graf, "Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland," *Forest Snow and Landscape Research*, vol. 44, pp. 33–44, 2009.
- [10] M. Schwarz, D. Cohen, and D. Or, "Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles," *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 115, no. F4, 2010.
- [11] S. Losey and A. Wehrli, *Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald*. Bern: Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2013.
- [12] L. Dorren and M. Schwarz, "Quantifying the stabilizing effect of forests on shallow landslide-prone slopes," in *Ecosystem-Based Disaster Risk Reduction and Adaptation in Practice*, pp. 255–270, Springer, 2016.
- [13] M. Frehner, B. Wasser, and R. Schwitter, "Gestion durable des forêts de protection. soins sylvicoles et contrôle des résultats: instructions pratiques. (l'environnement pratique)," *Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne*, p. 564, 2005.
- [14] L. Dorren, F. Berger, M. Frehner, M. Huber, K. Kühne, R. Métral, A. Sandri, R. Schwitter, J.-J. Thormann, and B. Wasser, "Das neue nais-anforderungsprofil steinschlag," *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, vol. 166, no. 1, pp. 16–23, 2015.
- [15] T. Feistl, P. Bebi, M. Teich, Y. Bühler, M. Christen, K. Thuro, and P. Bartelt, "Observations and modeling of the braking effect of forests on small and medium avalanches," *Journal of Glaciology*, vol. 60, no. 219, pp. 124–138, 2014.
- [16] T. Feistl, P. Bebi, M. Christen, S. Margreth, L. Diefenbach, and P. Bartelt, "Forest damage and snow avalanche flow regime," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 15, no. 6, pp. 1275–1288, 2015.

- [17] G.-R. Bezzola and C. Hegg, eds., *Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen*. Bundesamt für Umwelt, Bern, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 2008.
- [18] K. Abe, "Function of forest zone for suppression of debris movement. i. impact energy absorption action by trees," in *Proceedings of the Annual Meeting of the Japan Society of Erosion Control, Engineering*, 1987, pp. 242–245, 1987.
- [19] "debris flows through different forest age classes in the central oregon coast range,"
- [20] Y. Ishikawa, S. Kawakami, C. Morimoto, and K. Mizuhara, "Suppression of debris movement by forests and damage to forests by debris deposition," *Journal of Forest Research*, vol. 8, no. 1, pp. 0037–0047, 2003.
- [21] D. Rickenmann, "Schwemmholz und hochwasser," *Wasser Energie Luft*, vol. 89, no. 5/6, pp. 115–119, 1997.
- [22] D. Lange and G.-R. Bezzola, "Schwemmholz: Probleme und lösungsansätze," *VAW-Mitteilungen*, vol. 188, 2006.
- [23] C. Rickli, "Schwemmholz in wildbächen," *Fachleute Naturgefahren Schweiz, Herbstkurs*, 2009.
- [24] E. Gasser, M. Schwarz, A. Simon, P. Perona, C. Phillips, J. Hübl, and L. Dorren, "A review of modeling the effects of vegetation on large wood recruitment processes in mountain catchments," *Earth-Science Reviews*, vol. 194, pp. 350–373, 2019.
- [25] L. Dorren, P. Bebi, G. Dumollard, E. A., F. C., G. C., H. Horneber, D. May, R. C., S. C., W. L., and W. D., "FINT-CH (Find Individual Trees Schweiz)- Grossflächige Erfassung von Waldstrukturen und Kennzahlen mittels Waldstrukturabgrenzung und Einzelbaumdetektion basierend auf luftgestützten Fernerkundungsdaten," tech. rep., Projekt-Schlussbericht BFH-HAFL Zollikofen, WSL Birmensdorf/Davos, 2021.
- [26] "Hangmuren-Datenbank," *Eidg. Forschungsanstalt WSL, Forschungseinheit Gebirgshydrologie Massenbewegungen*, 2022.
- [27] "Naturereigniskataster StorMe - Webapplikation <https://storme.bafu.admin.ch/storme/web/private/>,"
- [28] M. Hürlimann, B. W. McArde, and C. Rickli, "Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in switzerland," *Geomorphology*, vol. 232, pp. 20–32, 2015.
- [29] R. Maurin, J. Chauchat, and P. Frey, "Dense granular flow rheology in turbulent bedload transport," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 804, pp. 490–512, 2016.
- [30] E. Papachristos, L. Scholtès, F. Donzé, and B. Chareyre, "Intensity and volumetric characterizations of hydraulically driven fractures by hydro-mechanical simulations," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 93, pp. 163–178, 2017.
- [31] T. Mede, G. Chambon, P. Hagenmuller, and F. Nicot, "A medial axis based method for irregular grain shape representation in dem simulations," *Granular Matter*, vol. 20, no. 1, p. 16, 2018.
- [32] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies," *Géotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47–65, 1979.
- [33] V. Šmilauer, E. Catalano, B. Chareyre, S. Dorofeenko, J. Duriez, A. Gladky, J. Kozicki, C. Modenese, L. Scholtès, L. Sibille, et al., "Yade documentation," *The Yade Project*, 2010.
- [34] T. Schwager and T. Poeschel, "Coefficient of restitution and linear dashpot model revisited," *Granular Matter*, vol. 9, no. 6, pp. 465–469, 2007.
- [35] H. Teufelsbauer, Y. Wang, S. P. Pudasaini, R. I. Borja, and W. Wu, "DEM simulation of impact force exerted by granular flow on rigid structures," *Acta Geotechnica*, vol. 6, no. 3, pp. 119–133, 2011.
- [36] A. Albaba, S. Lambert, F. Nicot, and B. Chareyre, "Relation between microstructure and loading applied by a granular flow to a rigid wall using DEM modeling," *Granular Matter*, vol. 17, no. 5, pp. 603–616, 2015.

- [37] A. Leonardi, F. K. Wittel, M. Mendoza, R. Vetter, and H. J. Herrmann, "Particle-Fluid-Structure Interaction for Debris Flow Impact on Flexible Barriers," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 31, no. 5, pp. 323–333, 2016.
- [38] S. Luding, "Cohesive, frictional powders: contact models for tension," *Granular matter*, vol. 10, no. 4, p. 235, 2008.
- [39] A. Albaba, M. Schwarz, C. Wendeler, B. Loup, and L. Dorren, "Numerical modeling using an elastoplastic-adhesive discrete element code for simulating hillslope debris flows and calibration against field experiments," *Natural Hazards & Earth System Sciences*, vol. 19, no. 11, 2019.
- [40] D. Toe, F. Bourrier, I. Olmedo, J.-M. Monnet, and F. Berger, "Analysis of the effect of trees on block propagation using a dem model: implications for rockfall modelling," *Landslides*, vol. 14, no. 5, pp. 1603–1614, 2017.
- [41] F. Bourrier, F. Kneib, B. Chareyre, and T. Fourcaud, "Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots," *Ecological Engineering*, vol. 61, pp. 646–657, 2013.
- [42] I. Olmedo, F. Bourrier, D. Bertrand, F. Berger, and A. Limam, "Discrete element model of the dynamic response of fresh wood stems to impact," *Engineering Structures*, vol. 120, pp. 13–22, 2016.
- [43] D. Toe, F. Bourrier, L. Dorren, and F. Berger, "A novel dem approach to simulate block propagation on forested slopes," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 51, no. 3, pp. 811–825, 2018.
- [44] B. Gogniat, M. Trocmé-Maillard, M. Huber, P. Arnold, U. Vollmer, U. Rieder, A. Sandri, H. Raetzo, L. Dorren, T. Egli, J. Eberli, R. Knuchel, H. Kienholz, M. Donzel, H.-H. Utelli, and B. Perren, *Naturgefahren auf Nationalstrassen: Risikokonzept. Methodik für eine risikobasierte Beurteilung, Prävention und Bewältigung von gravitativen Naturgefahren auf Nationalstrassen*. Bundesamt für Strassen ASTRA, Dokumentation 89001, 2012.
- [45] BAFU, *Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren*. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608, 2016.
- [46] Bundesamt für Forstwesen/SLF, *Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten*. Bundesamt für Forstwesen / Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 1984.
- [47] "SN 505261/1, Einwirkungen auf Tragwerke - Ergänzende Festlegungen," Norm, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, CH, 2020.
- [48] F. Bettella, T. Michelini, V. D'Agostino, and G. B. Bischetti, "The ability of tree stems to intercept debris flows in forested fan areas: A laboratory modelling study," *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 49, no. 1, pp. 42–51, 2018.

A. Anhang - Analyse Hangmurenereignisse

A.0.1. Anrissfläche in Abhängigkeit der Bodenbedeckung

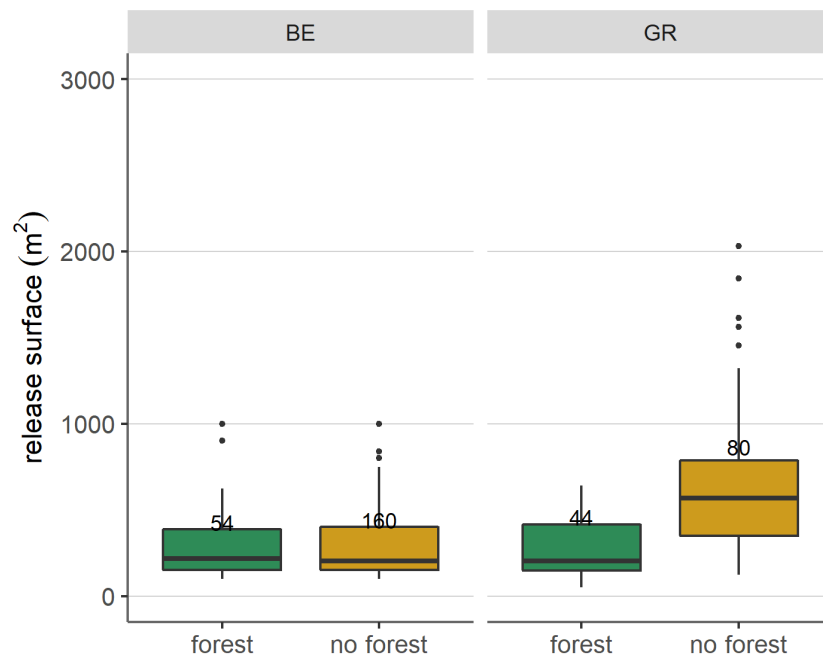


Abbildung A.1.: Verteilung der Anrissflächen der untersuchten Hangmuren-Ereignisse im Wald und Freiland in den Kantonen Bern (links) und Graubünden (rechts).

A.0.2. Modellplots der linearen Modelle

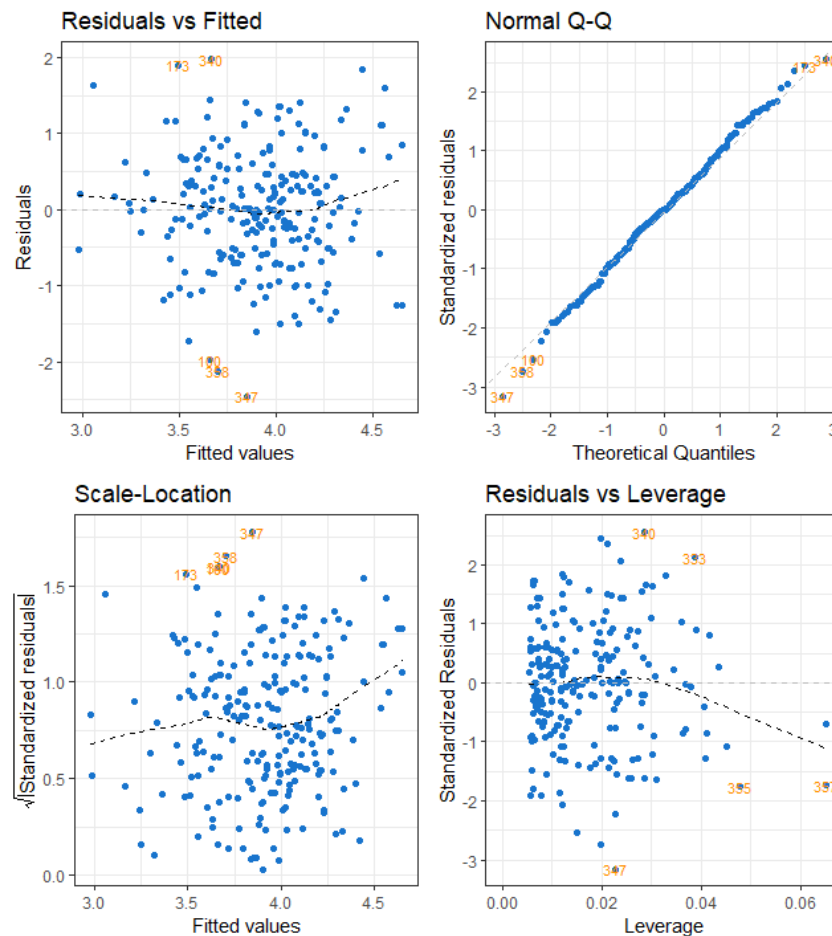


Abbildung A.2.: Vier Diagnose-Plots zur Überprüfung der Annahmen der linearen Regression für das Modell der Auslauflänge im Kanton **Bern** in Abhängigkeit der Bodenbedeckung, des Anrissvolumens und der Hangneigung (3.1). Oben links: Residuen vs. gefittete Werte; oben rechts: Q-Q-Plot; unten links: Scale-Location Plot zur Überprüfung der Homoskedastizität der Varianz; unten rechts: Residuen vs. Leverage.

Bemerkung: Die Residuen sind relativ zufällig verteilt (oben links in Abb. A.2), was darauf hindeutet, dass die Annahme einer linearen Beziehung plausibel ist. Dies bestätigt auch der Q-Q-Plot (Residuen folgen der Gerade oben rechts in Abb. A.2). Der Plot unten rechts hingegen deutet darauf hin, dass ein leichtes Heteroskedastizitäts-Problem (inhomogene Varianz der Residuen) im Modell besteht, was zu einer verzerrten Schätzung Regressionskoeffizienten führen kann. Der Leverage-Plot deutet darauf hin, dass es in den Daten einige Ausreisser-Werte (orange) gibt. Da es keine Hinweise auf Fehler in der Aufnahme für die entsprechenden Werte gab, wurden sie nicht vom Datensatz entfernt.

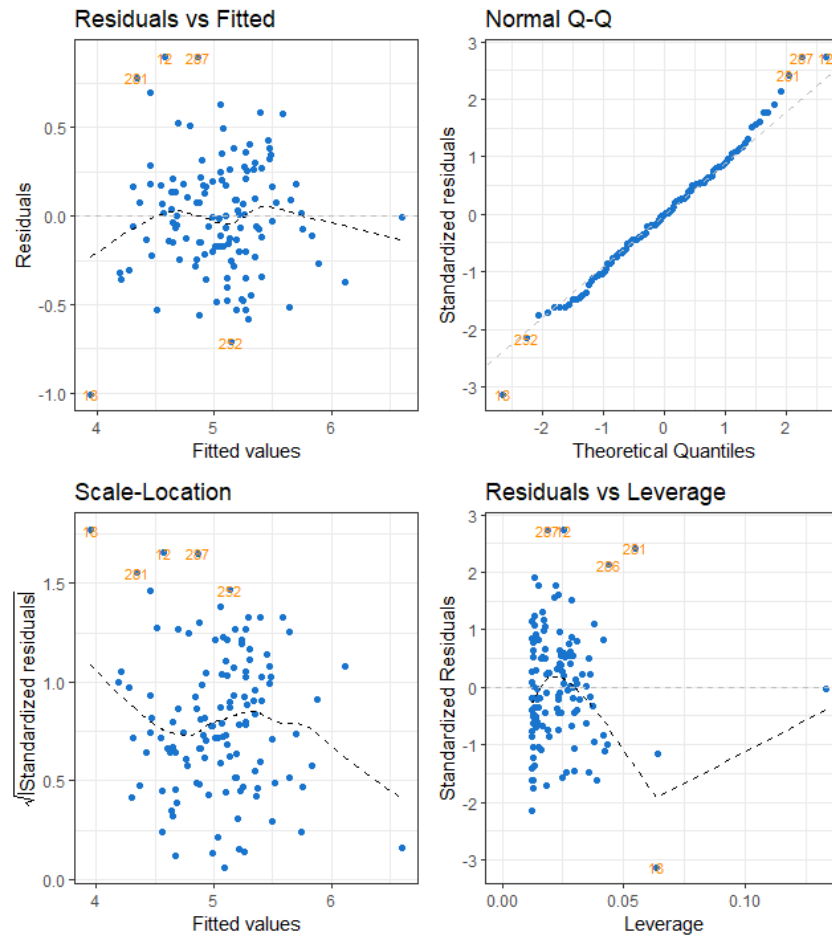


Abbildung A.3.: Vier Diagnose-Plots zur Überprüfung der Annahmen der linearen Regression für das Modell der Auslauflänge im Kanton **Graubünden** in Abhängigkeit der Bodenbedeckung, des Anrissvolumens und der Hangneigung (3.2). Oben links: Residuen vs. gefittete Werte; oben rechts: Q-Q-Plot; unten links: Scale-Location Plot zur Überprüfung der Homoskedastizität der Varianz; unten rechts: Residuen vs. Leverage.

Bemerkung: Auch im Modell für den Kanton Graubünden scheinen die Annahmen der linearen Regression relativ gut erfüllt zu sein, wobei es auch hier ein leichtes Heteroskedastizitäts-Problem (inhomogene Varianz der Residuen) sowie einige Ausreisser-Werte (orange) gibt. Auch hier wurden die Ausreisser nicht entfernt, da es keine Hinweise auf Aufnahmefehler gibt.

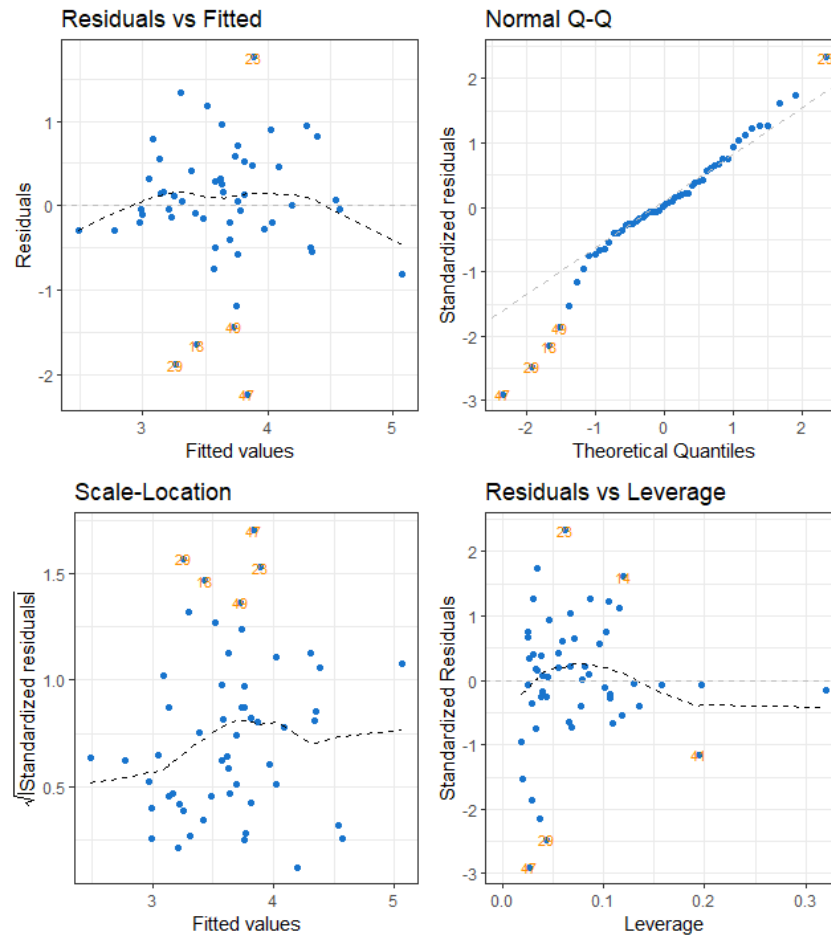


Abbildung A.4.: Vier Diagnose-Plots zur Überprüfung der Annahmen der linearen Regression für das Modell der Auslauflänge der Wald-Hangmuren im Kanton **Bern** (3.3). Oben links: Residuen vs. gefittete Werte; oben rechts: Q-Q-Plot; unten links: Scale-Location Plot zur Überprüfung der Homoskedastizität der Varianz; unten rechts: Residuen vs. Leverage.

Bemerkung: Der Q-Q-Plot sowie die etwas weniger schön zufällige Verteilung der Residuen deutet darauf hin, dass die Annahmen der Linearität in diesem Modell etwas weniger gut erfüllt sind. Auch scheint es gewisse Ausreisser sowie einen Datenpunkt mit extremen Werten in den erklärenden Variablen ("high leverage points") gibt. Da es keine Hinweise auf Fehler in der Aufnahme für die entsprechenden Werte gab, wurden sie nicht vom Datensatz entfernt.

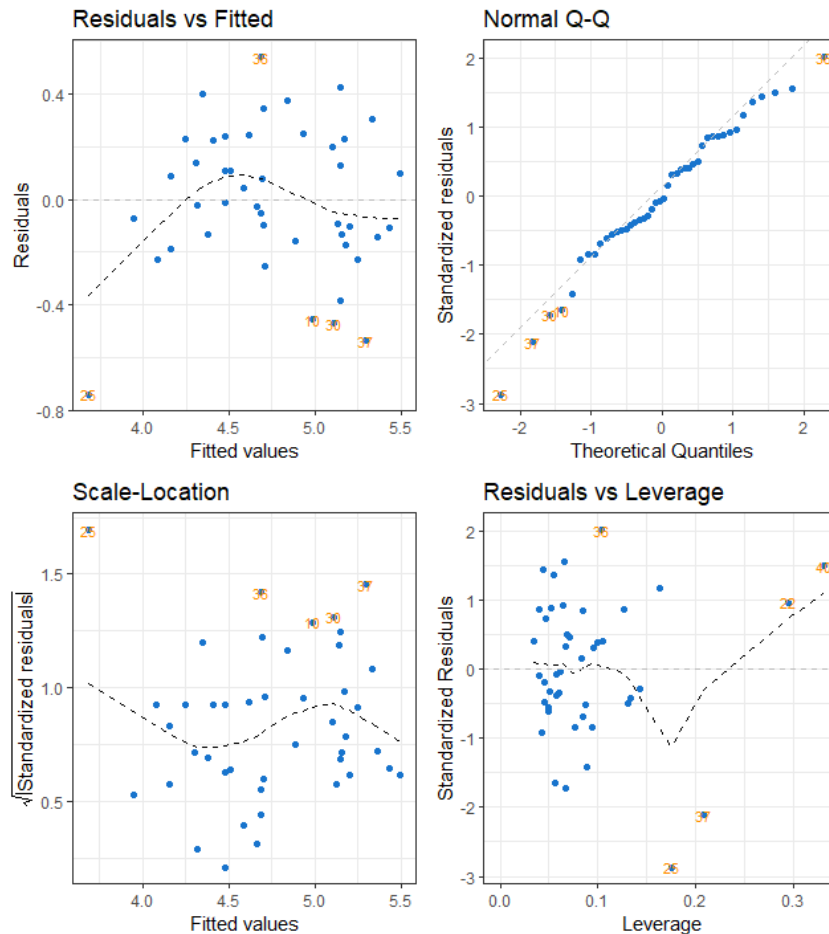


Abbildung A.5.: Vier Diagnose-Plots zur Überprüfung der Annahmen der linearen Regression für das Modell der Auslauflänge der Wald-Hangmuren im Kanton **Graubünden** (3.4). Oben links: Residuen vs. gefittete Werte; oben rechts: Q-Q-Plot; unten links: Scale-Location Plot zur Überprüfung der Homoskedastizität der Varianz; unten rechts: Residuen vs. Leverage.

Bemerkung: Das Bild sieht für den Kanton Graubünden ähnlich aus, wobei die Residuen besser einer Normalverteilung zu folgen scheinen (Q-Q-Plot). Auch hier gibt es einige Ausreisser sowie zwei Datenpunkte mit extremen Werten in den erklärenden Variablen ("high leverage points").

A.0.3. Geotechnische Analysen und Auslaufversuche mit Feldmaterial

Die Wahl der analysierten Hangmuren-Ereignisse beruhte grösstenteils auf Vorschlägen der verschiedenen Naturgefahrenspezialisten der Kantone BE, LU, SG, TI sowie des Fürstentums Liechtenstein (FL). An allen Hangmuren-Ereignisorten, wurden Bodenproben in der Mitte des Anrissgebietes entnommen, welche für das Rutschmaterial repräsentativ sein sollten. Diese Proben wurden im geotechnischen Labor der BFH - Hochschule für Architektur, Holz und Bau (AHB) in Burgdorf analysiert. Ziel war es, die Korngrössenverteilung dieser Proben zu bestimmen (siehe Abb. A.6 bis A.10 damit wir diese mit den verwendeten Labormaterial vergleichen zu können.

Ereignis in Curio (TI)

Das ausgewählte Hangmuren-Ereignis befindet sich in Bombinasco, das Teil der Gemeinde Curio im Kanton Tessin ist. Der Untersuchungsperimeter befindet sich in einem Waldstück oberhalb einer privaten Liegenschaft. Die analysierte Fläche ist Südost-exponiert, mit einer durchschnittlichen Hangneigung von 35° und liegt zwischen zwei Wildbächen, die südlich des Perimeters zusammenfliessen. Am 5.11.2014 hat das Hangmuren-Ereignis im Untersuchungsgebiet stattgefunden. Vom 4. bis zum 5. November 2014 sind im Untersuchungsgebiet mehr

als 250 mm Niederschlag gemessen worden. Am Abend des 5. Nov. hat man während zwei Stunden Spitzenwerte von 15 mm/Std gemessen. Auf Basis der Abschätzungen von MeteoSchweiz, wurde das Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von 20 – 50 Jahren eingestuft. Gemäss den bestehenden Gutachten hatte sich das Hangwasser aufgrund der undurchlässigen Grundmoränen-Schicht in der aufliegenden lehmig-sandigen Schicht gestaut. Durch die entstandenen Porenwasserdrucke kam das Erdmaterial ins Rutschen. Aufgrund des hohen Wassergehaltes wandelte sich die Rutschung in eine Hangmure und riss das untenstehende Haus mit. Dabei kamen 2 Menschen, welche sich im Gebäude befanden, ums Leben. Das Anrissgebiet liegt auf 638 m.ü.M. mit den Koordinaten X = 708'141 und Y = 096'957. Es war 18 m lang, 9 m breit und bis zu 2 m tief. Die Kubatur des mitgerissenen Materials beträgt 400 – 500 m³. Die Erosion der Basis führte zu einer Zunahme des Rutschvolumens, das im Bereich des Gefälles auf 850 m³ geschätzt wurde.

Ereignis in Mosnang (SG)

Am 01.09.2002 hat in der Gemeinde Mosnang in Kanton St. Gallen (Lokalname: Altzoggenburg) ein Hangmuren-Ereignis stattgefunden. Das im Freiland gelegene Anrissgebiet befindet sich bei X = 720'467 und Y = 246'108, war 17 m breit und hatte eine Gesamtfläche von 270 m². Die mittlere Neigung im Anrissgebiet war 24°. Der relativ flache Neigungswinkel des Hangs führte zu einer kurzen Auslaufstrecke von nur 60 m. Das gesamte Rutschvolumen wurde auf 200 m³ geschätzt. Das Rutschmaterial stammte aus den vorwiegend feinkörnigen, mergelreichen Öhninger Schichten (obere Süsswassermolasse).

Ereignis in Triesenberg (FL)

Nach dem Unwetter von 2005 hat im Fürstentum Lichtenstein ein Hangmuren-Ereignis in der Gemeinde Triesenberg (Lokalname: Winchel) stattgefunden. Die Koordinaten des Anrissgebiets lauten X = 760'450 und Y = 222'427. Das im Freiland gelegene Anrissgebiet hatte eine mittlere Mächtigkeit von 1 m, war 6 m breit und wies eine Fläche von 23 m² auf. Das geschätzte mobilisierte Volumen betrug 30 m³. Gemäss den Messungen nach dem Ereignis legte das mobilisierte Volumen eine Strecke von 177 m zurück. Beim ausgebrochenen Material handelt es sich um lehmig-sandigen Hangschutt, welcher Teil einer Sackungsmasse ist. Die umgebende Geologie ist bestimmt durch den Übergang von der Ostalpinen zur Penninischen Decke und zeigt darum eine grosse Heterogenität in den Felsschichten oberhalb vom Abrissgebiet. Direkt oberhalb des Abrissgebiets liegen aber Felswände bestehend aus Kalkstein (nördliche Kalkalpen aus dem Ostalpin).

Die Hangmurenereignisse von Trub (BE) und Root (LU) sind im Abschnitt 2.3 beschrieben.

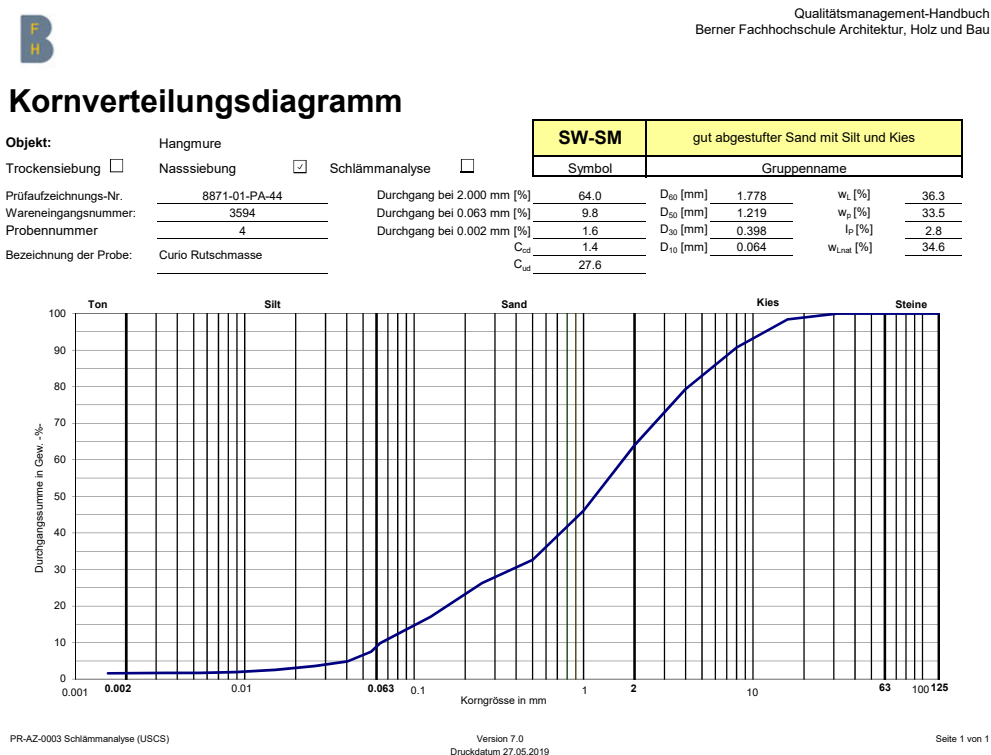


Abbildung A.6.: Korngrößenverteilung für das Material aus Curio (TI)

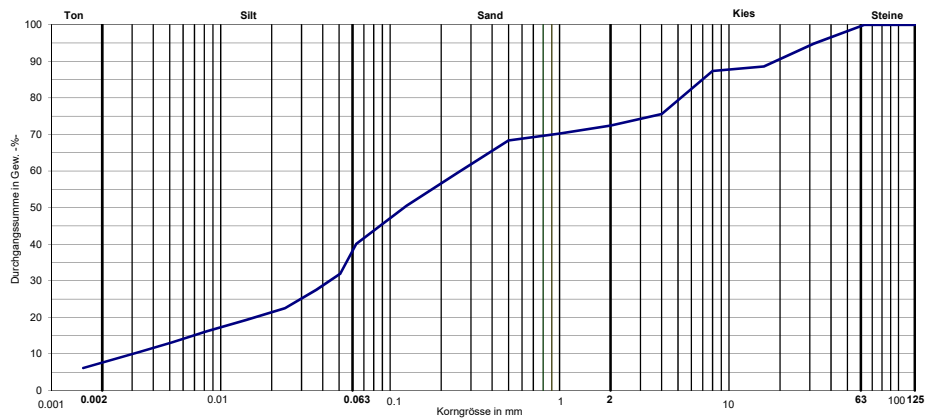
Kornverteilungsdiagramm

Objekt: Hangmure
Trockensiebung ☐ Nasssiebung ☒ Schlämmanalyse ☐

Prüfaufzeichnungs-Nr. 8871-01-PA-47
Wareneingangsnummer: 3615
Probennummer 7
Bezeichnung der Probe: Mosnang Wald

Durchgang bei 2.000 mm [%] 72.4
Durchgang bei 0.063 mm [%] 40.1
Durchgang bei 0.002 mm [%] 7.2
C_{ud}
C_{ul}

SM	Siltiger Sand mit Kies		
Symbol	Gruppenname		
D ₆₀ [mm]	0.263	w _L [%]	46.9
D ₅₀ [mm]	0.122	w _p [%]	29.6
D ₃₀ [mm]	0.045	I _p [%]	17.4
D ₁₀ [mm]	0.003	w _{L,nat} [%]	



PR-AZ-0003 Schlämmanalyse (USCS)

Version 7.0
Druckdatum 02.07.2019

Seite 1 von 1

Abbildung A.7.: Korngrössenverteilung für das Material aus Mosnang (SG)

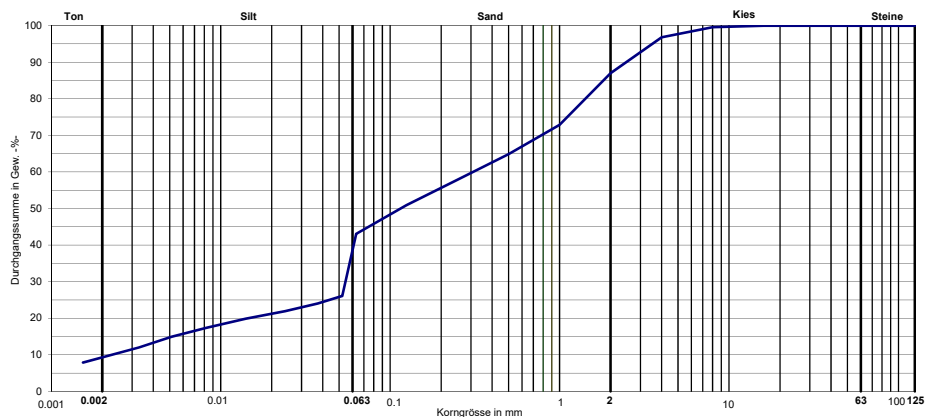
Kornverteilungsdiagramm

Objekt: Hangmure
Trockensiebung ☐ Nasssiebung ☒ Schlämmanalyse ☐

Prüfaufzeichnungs-Nr. 8871-01-PA-49
Wareneingangsnummer: 3633
Probennummer 9
Bezeichnung der Probe: Triesenberg

Durchgang bei 2.000 mm [%] 87.0
Durchgang bei 0.063 mm [%] 43.1
Durchgang bei 0.002 mm [%] 8.9
C_{ud} 3.8
C_{ul} 133.3

SM	siltiger Sand		
Symbol	Gruppenname		
D ₆₀ [mm]	0.326	w _L [%]	45.4
D ₅₀ [mm]	0.118	w _p [%]	27.1
D ₃₀ [mm]	0.055	I _p [%]	18.3
D ₁₀ [mm]	0.002	w _{L,nat} [%]	



PR-AZ-0003 Schlämmanalyse (USCS)

Version 7.1
Druckdatum 06.12.2019

Seite 1 von 1

Abbildung A.8.: Korngrössenverteilung für das Material aus Triesenberg (FL)

Kornverteilungsdiagramm

Objekt:

Trockensiebung ☐ Nasssiebung ☒ Schlämmanalyse ☐

Prüfaufzeichnungs-Nr. 8871-J-PA-4

Wareneingangsnummer: 3573

Probennummer

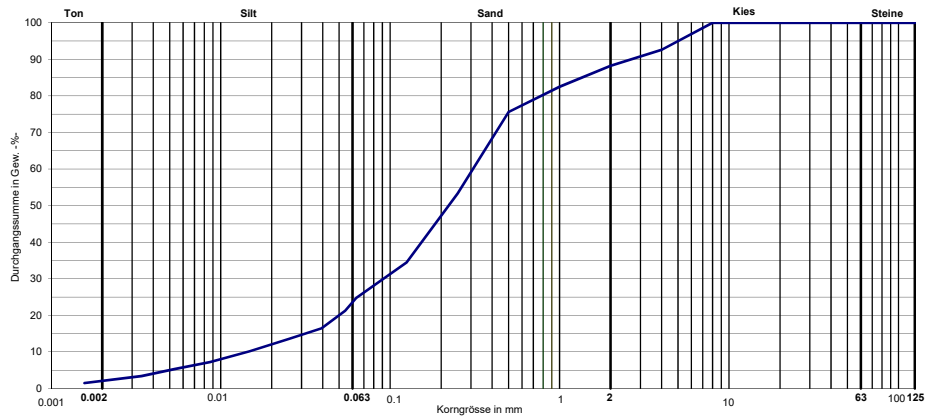
Bezeichnung der Probe: Hangmure

Durchgang bei 2.000 mm [%]

Durchgang bei 0.063 mm [%]

Durchgang bei 0.002 mm [%]

SM	siltiger Sand		
Symbol	Gruppenname		
88.2	D ₆₀ [mm]	0.325	w _L [%]
24.7	D ₅₀ [mm]	0.228	w _p [%]
1.9	D ₃₀ [mm]	0.097	I _p [%]
C _{ud}	D ₁₀ [mm]	0.015	w _{L,rel} [%]
C _{ud}			



PR-AZ-0003 Schlämmanalyse (USCS)

Version 7.0
Druckdatum 07.05.2019

Seite 1 von 1

Abbildung A.9.: Korngrössenverteilung für das Material aus Trub (BE)

Kornverteilungsdiagramm

Objekt:

Trockensiebung ☐ Nasssiebung ☒ Schlämmanalyse ☐

Prüfaufzeichnungs-Nr. 8871-01-PA-42

Wareneingangsnummer: 3583

Probennummer 2

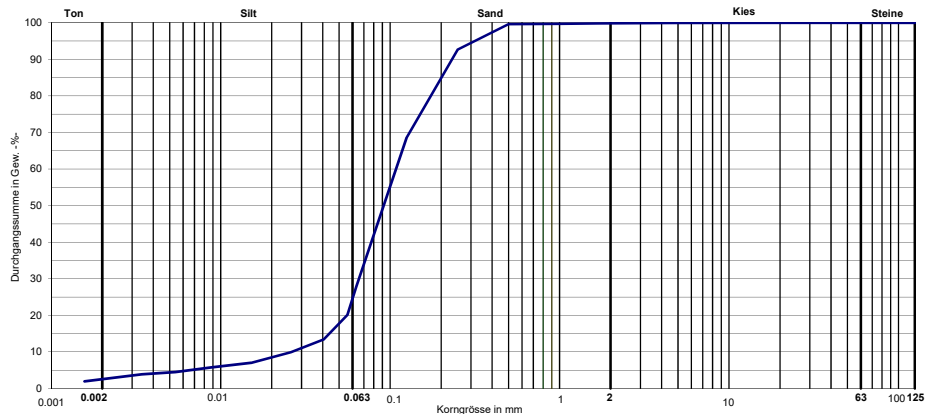
Bezeichnung der Probe: Root

Durchgang bei 2.000 mm [%]

Durchgang bei 0.063 mm [%]

Durchgang bei 0.002 mm [%]

SM	Siltiger Sand		
Symbol	Gruppenname		
99.8	D ₆₀ [mm]	0.112	w _L [%]
27.7	D ₅₀ [mm]	0.097	w _p [%]
2.4	D ₃₀ [mm]	0.066	I _p [%]
C _{ud}	D ₁₀ [mm]	0.026	w _{L,rel} [%]
C _{ud}			



PR-AZ-0003 Schlämmanalyse (USCS)

Version 7.0
Druckdatum 27.05.2019

Seite 1 von 1

Abbildung A.10.: Korngrössenverteilung für das Material aus Root (LU)

B. Glossar

Anrisszone - Herkunftsgebiet einer Rutschung, auch Anrissgebiet oder Ausbruchgebiet genannt.

DEM - Diskrete Elemente Methode; Numerische Berechnungsmethode, mit der die Bewegung einer großen Zahl von Teilchen berechnet werden kann.

DGM - Digitales Geländemodell; Datenbestand zur höhenmäßigen Beschreibung des Geländes.

flachgründige Rutschung - Rutschung welche sich auf einer Gleitfläche bewegt welche auf max. 2 m Tiefe liegt. Es handelt sich in der Regel um spontane Rutschungen, welche bei erhöhtem Porenwasserdruck im Boden unvermittelt als einmaliges Ereignis auf einer Gleitschicht losbrechen mit beschränkter bewegte Feststoffvolumen.

gravitative Massenbewegungen - Hangabwärts gerichtete, bruchlose und bruchhafte Verlagerungen von Fels- und/oder Lockergestein unter der Wirkung der Schwerkraft.

Hangmure - Gemisch aus Erde, Steinen und Wasser aus einer flachgründigen Rutschung welches ausserhalb eines Gerinnes den Hang runterfließt.

NaiS - Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald; Wegleitung für die Forstpraxis mit konkreten und verbindlichen Entscheidungshilfen für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion sowie eine Anleitung, wie Pflegemassnahmen auf ihre Schutzwirkung kontrolliert werden können.

Risiko - Die Möglichkeit, dass durch ein bestimmtes Ereignis Schäden auftreten können. Das Risiko setzt sich zusammen aus der Wahrscheinlichkeit, dass ein gefährliches Ereignis eintritt und dem möglichen Schaden. Das mögliche Schadenausmass ist abhängig von der Anzahl Personen und den Sachwerten, die dem Ereignis ausgesetzt sind (Exposition) sowie der Schadenempfindlichkeit der betroffenen Personen und Werte (Verletzlichkeit). Das Risiko infolge Naturgefahren wird i.d.R. in Form jährlicher Schadenerwartungswerte (CHF/Jahr) ausgedrückt.

Transitgebiet - Zone zwischen dem Anriss- und Ablagerungsgebiet einer gravitativen Massenbewegung.

Umhüllende - Perimeter der das Anriss-, Transit und Ablagerungsgebiet einer Massenbewegung begrenzt.

USCS - Unified Soil Classification System; ein Bodenklassifizierungssystem, das im Ingenieurwesen und in der Geologie zur Beschreibung der Textur und Korngröße eines Bodens verwendet wird.

Wassergehalt - Verhältnis des Wassergewichts zum Gesamtgewicht in einer Bodenprobe. Dieser sogenannten gravimetrischen Wassergehalt bezieht sich also auf den Massenanteil. Es gibt aber auch den volumetrischen Wassergehalt, der sich auf den Volumenanteil des Wassers in der Bodenprobe bezieht, aber diese wurde in diesem Projekt nicht verwendet.

YADE - Open-Source-Plattform für numerische Modelle mit einer starken Komponente die der Methode der diskreten Elemente (DEM) und der Korn-Fluid-Kopplung gewidmet ist.