

Schützt der Wald vor Rutschungen?

Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank

Christian Rickli	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)*
Frank Graf	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF (CH)
Peter Bebi	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF (CH)
Alexander Bast	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF (CH)
Bernard Loup	Bundesamt für Umwelt, BAFU (CH)
Brian McARDell	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

Schützt der Wald vor Rutschungen? Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank

Während Starkregenereignissen kommt es immer wieder zu flachgründigen Rutschungen und Hangmuren mit zum Teil erheblichen Schäden. Unwetteranalysen zeigen, dass im Wald pro Fläche meist weniger Rutschungen als im Freiland ausgelöst werden, was die allgemein anerkannten positiven Wirkungen des Waldes auf die Hangstabilität untermauert. Diese Wirkungen sind jedoch abhängig vom jeweiligen Zustand der Bestockung, und ihre Quantifizierung ist schwierig. Ereignisdokumentationen tragen zu einem besseren Verständnis der massgebenden Prozesse bei. Die dabei gewonnenen Informationen sind nicht nur für die Erstellung von Gefahrenkarten wichtig, sondern leisten auch wertvolle Dienste bei der Bewertung der Schutzwirksamkeit des Waldes. Für den vorliegenden Beitrag wurden Daten aus der Rutschungsdatenbank der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) hinsichtlich der Wirkung des Waldes auf die Hangstabilität ausgewertet. Aktuell enthält die Datenbank Angaben zu 734 Rutschungen. Von diesen wurden 661 in die Auswertung einbezogen – 356 Rutschungen im Freiland und 305 im Wald. Es zeigt sich, dass in Gebieten mit Neigungen bis 38° im Freiland pro Fläche mehr Rutschungen entstanden sind als im Wald. In noch steileren Gebieten ist eine stabilisierende Waldwirkung nicht mehr erkennbar. Gemäss den statistischen Auswertungen sind die Rutschungen im Wald kleiner als im Freiland und brechen in steileren Lagen an. Allgemein werden die Rutschungen mit zunehmender Hangneigung kleiner. Multivariate Auswertungen weisen auf positive Waldwirkungen beziehungsweise verhältnismässig kleine Rutschungen in älteren und stufigen Bestockungen hin. Negative Effekte zeigen sich insbesondere in unbestockten Flächen und sehr dichten Wäldern. Neben der Bedeutung des Waldzustandes für die Hangstabilität wird im Beitrag auch diskutiert, wie dieser beschrieben werden kann.

Keywords: shallow landslides, statistical analysis, forest condition, database, protection forest
doi: 10.3188/szf.2019.0310

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail christian.rickli@wsl.ch

Als spontane Rutschung wird eine Lockergesteinsmasse bezeichnet, die aufgrund eines plötzlichen Verlustes der Scherfestigkeit des Bodens unter Ausbildung einer Gleitfläche schnell abgleitet (AGN 2004). Flachgründige Rutschungen sind gemäss BAFU (2016) weniger als 2 m tief. Bei starker Verflüssigung der Rutschmasse kann das Gemisch aus Lockergestein und Wasser weite Strecken über den Hang als sogenannte Hangmure abfließen; dies im Gegensatz zu Murgängen, die topografisch an ein Gerinne gebunden sind. Neben dem Verlust der Scherfestigkeit kann auch hydraulischer Grundbruch zu Hangmuren führen. Bei Unwetterereignissen entstehen oft zahlreiche flachgründige Rutschungen und Hangmuren mit zum Teil erheblichen

Schadenfolgen (Hilker et al 2009, Rickli et al 2008). Im Hinblick auf die Hangstabilität wird Wald generell positiv beurteilt (z.B. Barik et al 2017, Bathurst et al 2010; Gray 1995; Sidle & Ochiai 2006; Schmaltz et al 2017; Schwarz 2019, dieses Heft). Ereignisdokumentationen in der Schweiz stützen diese Aussage, wurden doch im Wald meist weniger Rutschungen beobachtet als im Freiland, wobei gebietsabhängig auch Ausnahmen existieren (Rickli & Graf 2009). Die Wirkung des Waldes kann in hydrologische (Sättigungsverhältnisse im Boden) und mechanische Einflüsse (Verstärkung durch Wurzeln) unterteilt werden. Für eine gute Bodenstabilität ist dabei eine hohe Diversität in Bezug auf das Alter der Bäume, die Baumarten sowie die horizontale und vertikale



Abb 1 Flachgründige Rutschung in einer lückigen Bestockung in St. Antönien (GR; Unwetter August 2005). Foto: Hansueli Bucher

Bestandesstruktur besonders wichtig (Graf et al 2017). Damit möglichst wenig Rutschungen entstehen, sollten zudem Waldlücken in der Hangfalllinie nicht länger als 20 bis 25 m sein (Moos et al 2016). Insgesamt ist jedoch die Quantifizierung der Schutzwirkung des Waldes schwierig, und es besteht grosser Forschungsbedarf.

Daten und Informationen zu Rutschungen sind äusserst wertvoll, sei es allgemein für ein besseres Verständnis der Rutschprozesse oder für die Beantwortung spezifischer Fragen, zum Beispiel die Bewertung der Waldwirkungen. Zu diesem Zweck wurden im Verlauf der letzten Jahrzehnte in der Schweiz und im benachbarten Alpenraum zahlreiche Rutschungsinventare erstellt (z.B. Damm & Klose 2015, Guzzetti et al 2004, Markart et al 2007, Rickli & Graf 2009). Der Fokus des vorliegenden Artikels richtet sich auf Fragen zur Bedeutung von Zustand und Struktur des Waldes in Bezug auf seine Schutzwirkung gegenüber Rutschungen. Zudem wird untersucht, inwiefern sich

aus den in der Rutschungsdatenbank der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) erfassten Inventaren Erkenntnisse hinsichtlich einer bezüglich Hangstabilität optimierten Waldpflege ableiten lassen.

Daten und Methoden

Die in der WSL-Datenbank enthaltenen Rutschungen wurden meist ereignisbezogen erfasst. Dies beinhaltet, dass nach einem Unwetter in einer besonders stark betroffenen Region Untersuchungsgebiete ausgeschieden und darin alle Rutschungen mit einem Volumen über einem bestimmten Schwellenwert (meist 30 m³) im Feld dokumentiert werden (Abbildung 1). Zu den standardmässig erfassten Parametern gehören die Abmessungen (z.B. Länge, Breite, Fläche, Tiefe, Volumen), die Topografie, die Standortverhältnisse sowie Angaben zur Vegetation bzw. Landnutzung, zum Rutschmechanismus sowie zum Auslauf der Hangmure. In Bezug auf den Wald werden insbesondere die Schichtung, die Entwicklungsstufe, die Baumartenmischung und der Deckungsgrad der Bestockung (Verhältnis der durch die Kronen überschirmten Fläche zur Gesamtfläche; max. 100%) beurteilt.

Die Bestimmung des Vorkommens (Anzahl Rutschungen pro Fläche) im Wald und im Freiland basiert einerseits auf der Zuordnung der Rutschungen zu Wald oder Freiland aufgrund des Anrisses und andererseits auf der Waldfläche im Untersuchungsgebiet, ermittelt anhand der Waldsignatur auf der Landeskarte 1:25 000. Dabei werden mit Bäumen bestandene Flächen mit einer Oberhöhe von mehr als 3 m (Ausnahme Holzschläge, Schadenflächen und Aufforstungen) mit einem Deckungsgrad von mehr als 60% und Lückengrössen von bis zu 800 m² als Wald taxiert. Alle Flächen ausserhalb des Waldes – also meist landwirtschaftlich oder nicht genutzte Flächen (Siedlungen und Strassen machen in unseren Unter-

Erhebung / Gebiet	Kanton	Gemeinde	Datum Ereignis	Auslösender Niederschlag (mm)	Niederschlagsdauer (h)	Anzahl Rutschungen	Untersuchungsgebiet (km ²)
Sachslen	OW	Sachslen	15.8.1997	150	2	280	8.2
Appenzell	AR	Trogen, Wald und Rehetobel	31.8.–1.9.2002	120	9	100	10.2
Napf	BE	Trub	15.–16.7.2002	60	3	64	2.5
Surselva	GR	Sumvitg	14.–16.11.2002	252	63	34	3.2
Entlebuch	LU	Flühli	18.–23.8.2005	269	72	91	5.1
St. Antönien	GR	St. Antönien	18.–23.8.2005	185	72	69	4.7
Napf	BE	Trub	18.–23.8.2005	241	72	58	1.6
Eriz	BE	Horrenbach-Buchen	4.7.2012	80	2	38	9.5
Total						734	45.0

Tab 1 Derzeitiger Datenumfang der WSL-Rutschungsdatenbank und ausgewählte Informationen zu den entsprechenden Erhebungen. Von den 734 in der Datenbank erfassten Rutschungen konnten 661 für die Vergleiche zwischen Waldrutschungen (305) und Freilandrutschungen (356) und 252 Waldrutschungen für die Analyse des Waldzustands verwendet werden.

Schichtung		Entwicklungsstufe		Mischung		Deckungsgrad (DG)	
0xxx	unbestockt	x0xx	unbestockt	xx0x	unbestockt	xxx0	unbestockt
1xxx	einschichtig	x1xx	Jungwuchs / Dichtung	xx1x	>80% Nadelholz	xxx1	gedrängt (DG ca. 90%)
2xxx	mehrschichtig	x2xx	Stangenholz	xx2x	Mischbestand	xxx2	normal (DG ca. 80%)
3xxx	stufig	x3xx	Baumholz I (BHD 20–35 cm)	xx3x	>80% Laubholz	xxx3	locker (DG ca. 60%)
		x4xx	Baumholz II (BHD 35–50 cm)			xxx4	lückig (DG ca. 40%)
		x5xx	Baumholz III (BHD >50 cm)			xxx5	aufgelöst (DG ca. 20%)
		x6xx	stufiger Bestand				

Tab 2 Bestandescharakteristika: Informationen des vierstelligen Bestandescodes. BHD: Brusthöhendurchmesser.

suchungsbieten schätzungsweise nur wenige Prozent aus) – werden dem Freiland zugewiesen.

Alle Informationen zu den Rutschungen sind in einer Datenbank abgelegt, die gemeinsam mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) erarbeitet wurde. Zur Datenbank existiert eine Web-Applikation,¹ auf der die Angaben eingesehen werden können und die den Export ausgewählter Informationen erlaubt. Für eine nachvollziehbare Beurteilung und Erfassung der Daten im Feld existiert eine Anleitung (WSL & BAFU 2018).

Die WSL-Rutschungsdatenbank umfasst derzeit Informationen zu insgesamt 734 flachgründigen Rutschungen und Hangmuren, die sich während acht Ereignissen in verschiedenen Gebieten der Schweiz ereigneten (Tabelle 1). Die Daten der verschiedenen Erhebungen unterscheiden sich nicht nur in Bezug auf die Geologie und die Topografie, sondern auch hinsichtlich des auslösenden Niederschlages.

Im vorliegenden Artikel werden Ergebnisse erster Auswertungen der Datenbank vorgestellt. Dazu gehört auch ein Vergleich zwischen Wald- und Freilandrutschungen in Bezug auf Hangneigung, Höhenlage und Abmessungen mithilfe des Wilcoxon-Rangsummentests. Der Einfluss von Hangneigung und Höhenlage auf die Abmessungen der Rutschungen wird mithilfe robuster linearer Regression

mit Transformation der Zielvariablen (Logarithmus, Quadratwurzel) evaluiert. Für die Überprüfung des Einflusses der Bestandesmerkmale Schichtung, Entwicklungsstufe, Mischung und Deckungsgrad sowie der verschiedenen Ereignisse auf die Grösse der Rutschungen wird der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Im Weiteren werden die Daten mithilfe multipler Faktorenanalyse (MFA) ausgewertet (z.B. Husson et al 2017). Diese Methode der Hauptkomponentenanalyse erlaubt, die Gruppenstruktur von Datensätzen mit numerischen und kategoriellen Variablen in der Auswertung zu berücksichtigen. Im vorliegenden Artikel sind dies die Gruppe der numerischen Variablen ausgewählter Rutschungscharakteristiken (Höhenlage, Hangneigung, Rutschungsfläche und -volumen) und jene der kategoriellen Variablen des Bestandescodes (Schichtung, Entwicklung, Mischung, Deckungsgrad; Tabelle 2) sowie der Unwetterereignisse. Alle Analysen erfolgten mit dem Softwarepaket R 3.5.2 (R Core Team 2018).

Ergebnisse

Vorkommen

Rutschungen wurden in Gebieten mit Neigungen von 19 bis 54° ausgelöst. Im Freiland liegt das maximale Vorkommen (Anzahl Rutschungen pro Fläche) bei 34 bis 36° und im Wald bei 38 bis 40° (Abbildung 2). In Gebieten mit Neigungen bis 38° wurden im Freiland mehr Rutschungen pro km² beobachtet als im Wald, in steileren Gebieten ereigneten sich im Wald mehr Rutschungen als im Freiland.

Eigenschaften der Rutschungen

Der Vergleich zwischen den Wald- und Freilandrutschungen (n = 661, davon 305 im Wald und 356 im Freiland) ergab, dass Rutschungen im Wald in tieferen Lagen und in steilerem Gelände auftraten als im Freiland. Bei beiden Vergleichen unterscheiden sich Mittelwerte und Median signifikant (Tabelle 3). Die Differenzen (Δ Median) waren mit 113 m bezüglich Höhenlage und 4° bezüglich Neigung beträchtlich. Waldrutschungen waren zudem weniger breit und kleinvolumiger als Freilandrutschungen.

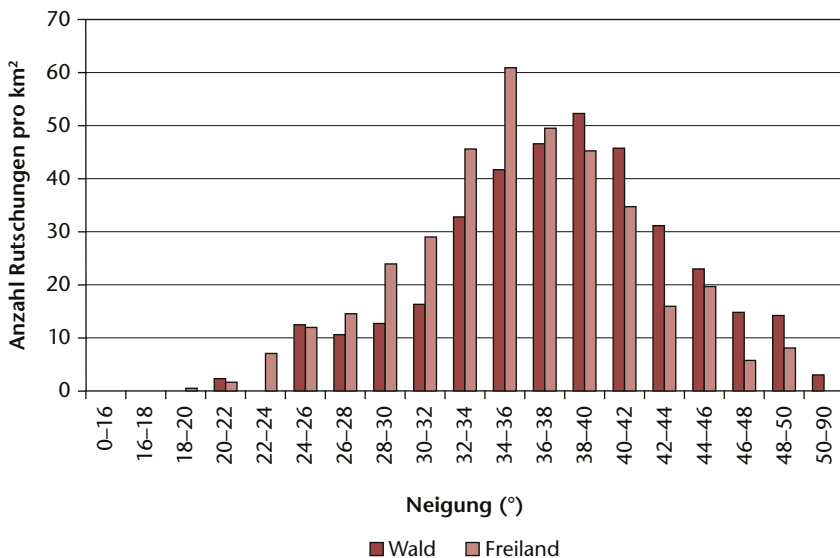


Abb 2 Vorkommen von Rutschungen im Wald und im Freiland pro Fläche in Abhängigkeit der Hangneigung in den untersuchten Gebieten (Tabelle 1).

1 <https://hangmuren.wsl.ch/> (28.8.2019)

Variable	p-Wert	Vergleich	Δ Median
Höhe (m ü.M.)	0.0019	W < F	113
Länge (m)	0.7964	–	0.2
Breite (m)	0.0053	W < F	0.5
Tiefe (m)	0.0558	W < F	0
Fläche (m ²)	0.2099	–	12
Volumen (m ³)	0.0149	W < F	14
Neigung (°)	0.0000	W > F	4

Tab 3 Vergleich verschiedener Variablen der Rutschungen im Wald (W) und im Freiland (F); n = 661, Wilcoxon-Rangsummentest. p-Wert fett = signifikanter Unterschied, kursiv = Trend (0.1 > p-Wert > 0.05), in normaler Schrift = nicht signifikant und kein Trend.

Sie waren tendenziell auch weniger tief. Werden die verschiedenen Ereignisse und Gebiete in die Analyse einbezogen, ergeben sich allerdings teilweise davon abweichende Resultate. Während Breite, Fläche und Volumen bei den meisten Erhebungen (Tabelle 1) im Wald kleiner waren als im Freiland, wurden zum Beispiel für die Tiefe und das Volumen der Waldrutschungen in Sachseln signifikant grössere Werte gemessen. Bei den Inventaren in den Gemeinden Trogen, Sumvitg und St. Antönien ergab sich kein Neigungsunterschied zwischen Wald- und Freilandrutschungen. Und schliesslich lagen die Waldrutschungen bei den Inventaren Trub 2002 und St. Antönien in höheren Lagen als die Freilandrutschungen.

Einfluss von Neigung und Höhenlage auf die Abmessungen der Rutschungen

Zwischen der Neigung und den Abmessungen ergab sich sowohl bei den Rutschungen im Wald (n = 305) als auch im Freiland (n = 356) ein signifikanter negativer Zusammenhang (p-Wert < 0.05). Mit zunehmender Neigung nahm beispielsweise das Vo-

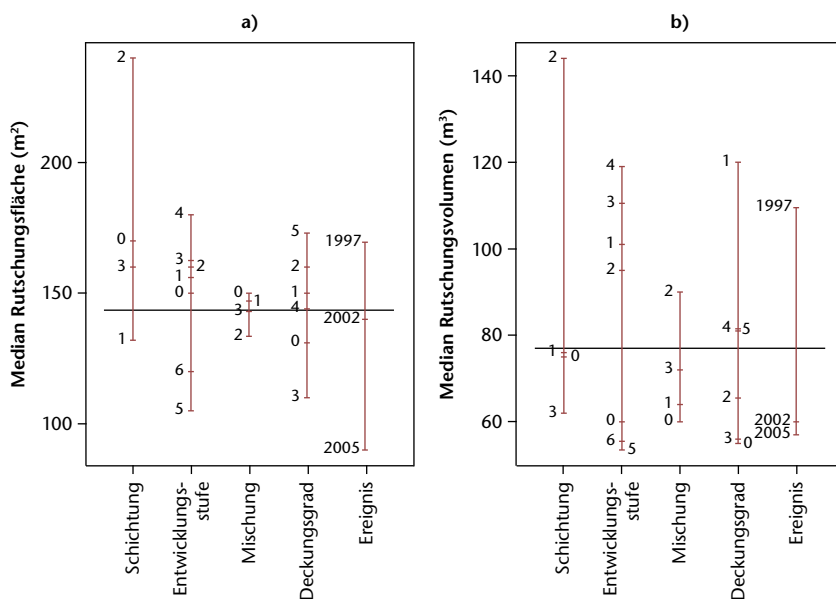


Abb 3 Darstellung von univariaten Zusammenhängen zwischen den Bestandescharakteristika (siehe Tabelle 2) Schichtung, Entwicklungsstufe, Mischung und Deckungsgrad sowie dem Ereignis (n = 252) und dem Median der Rutschungsfläche (a) bzw. dem Rutschungsvolumen (b). Horizontale Linie: Median der verschiedenen Einflussgrössen.

lumen der Rutschmasse ab. Bezüglich der Tiefe ergab sich bei den Waldrutschungen nur ein negativer Trend (0.1 > p-Wert > 0.05), bei den Freilandrutschungen war der negative Zusammenhang (je steiler desto flachgründiger) jedoch signifikant (p-Wert < 0.05). Im Gegensatz dazu konnte zwischen der Höhenlage und den Abmessungen der Rutschungen kein Zusammenhang nachgewiesen werden. Weiter ergab sich zwischen der Höhenlage und der Neigung der Freilandrutschungen ein signifikant positiver Zusammenhang (die Neigung nahm mit zunehmender Höhenlage zu), bei den Waldrutschungen konnte diesbezüglich kein Einfluss festgestellt werden.

Einfluss von Waldstruktur und Ereignis

In Abbildung 3 sind beispielhaft einige Ergebnisse zu den Auswirkungen der kategoriellen Variablen Waldstruktur und Ereignis auf die Rutschungsflächen und -volumina dargestellt. Bei kleinen Abmessungen kann vermutet werden, dass sich entsprechende Faktor positiv auf die Stabilität auswirkt. Verhältnismässig kleine Rutschungsflächen (Abbildung 3a) ergaben sich bei einschichtigen Beständen (Schichtung 1; Codes siehe Tabelle 2), Bestockungen mit grossen Bruthöhendurchmessern und stufiger Struktur (Entwicklungsstufen 5 und 6) sowie bei gemischten Wäldern und Laubwäldern (Mischungen 2 und 3) mit lockerem Kronenschluss (Deckungsgrad 3). In Bezug auf das Rutschungsvolumen (Abbildung 3b) ergaben sich ähnliche Zusammenhänge für Schichtung und Entwicklungsstufe, jedoch unterschiedliche in Bezug auf die Mischung, indem in gemischten Bestockungen Rutschungen mit vergleichsweise grossen Volumen entstanden. Besonders grosse Rutschungen entstanden beim Ereignis 1997 in Sachseln. Die vergleichsweise kleinen Volumina bei unbestockten Flächen stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen der multivariaten Auswertungen (siehe Abbildung 4 und Bemerkungen in der Diskussion).

Multivariate Auswertung

Mit der multiplen Faktorenanalyse konnte ein sehr hoher Anteil von insgesamt 76% der Streuung in den Daten durch die erste (49%) und die zweite Hauptkomponente (27%) erklärt werden (Abbildung 4). In Richtung der ersten Hauptkomponente, die den Zusammenhang der kategoriellen Variablen mit der Fläche und dem Volumen der Rutschung verdeutlicht, zeigte sich, dass Rutschungen in unbestockten Gebieten (Code 0 bei allen Waldstrukturparametern) die grössten Flächen und Volumen aufwiesen. Zudem waren die Abmessungen von Rutschungen in jüngeren Bestockungen grösser als in älteren (Entwicklungsstufen 5 und 6). Grössere Rutschungsflächen und -volumen fanden sich zudem auch in gedrängten Beständen mit Deckungsgrad 1, während die Rutschungen in Beständen mit den

Downloaded from <http://meridian.allenpress.com/swf/article-pdf/170/6/310/2571410/swf-2019-0310.pdf> by guest on 02 February 2023

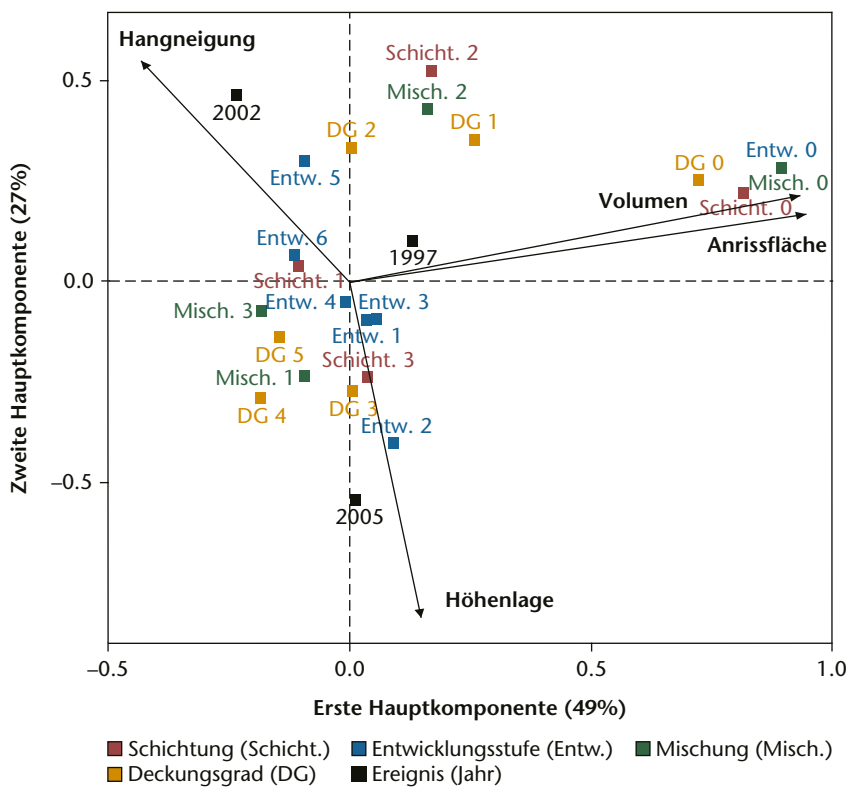


Abb 4 Erste und zweite Hauptkomponente der multiplen Faktorenanalyse von Wald-rutschungen mit den numerischen Variablen Volumen, Fläche, Höhenlage und Hangneigung, den Waldstrukturparametern (Tabelle 2) sowie dem Faktor Ereignis ($n = 252$).

«vorteilhaften» Deckungsgraden 2 und 3 verhältnismässig klein waren. Rutschungen in lückigen und aufgelösten Beständen mit Deckungsgrad 4 und 5 trennten sich noch besser von solchen in unbestockten und gedrängten Flächen (Deckungsgrad 0 und 1) ab und umfassten entsprechend noch kleinere Rutschungsflächen und -volumen. Letzteres Ergebnis kann jedoch auch darauf zurückgeführt werden, dass diese Stufen im Vergleich zu den «vorteilhaften» Stufen (normaler und lockerer Deckungsgrad) eine hohe Korrelation zu Rutschungen in steilen Hochlagen haben, wo die Bodenmächtigkeit geringer ist. Schliesslich wiesen die Rutschungen der Ereignisse 1997 und 2005 vergleichsweise grosse Abmessungen auf.

In Richtung der zweiten Hauptkomponente, welche die Verhältnisse in Bezug auf die Höhenlage widerspiegelt, zeigte sich, dass Rutschungen in lockeren bis aufgelösten Beständen (Deckungsgrad 3, 4, 5) erst in höheren Lagen auftraten, während Wälder mit dichterem Baumbestand (Deckungsgrad 1 und 2) bereits in tieferen Lagen rutsch anfällig waren. Stufige Bestockungen (Schichtung 3) und auch Nadelholzbestände (Mischung 1) waren vor allem in höheren Lagen, wo sie vorherrschen, anfällig auf Rutschungen. Dagegen waren Mischbestände (Mischung 2), die eher in tieferen Lagen vorkommen, sowie ältere Bestände (Entwicklungsstufen 5 und 6) in höheren Lagen weniger stark von Rutschungen betroffen. Schliesslich waren jüngere Bestände (Entwicklungsstufen 1 bis 3) insbesondere in höheren Lagen rutsch-

anfällig. Die Rutschungen der Ereignisse 2005 lagen in vergleichsweise höheren Lagen. Allgemein ist festzustellen, dass sich die Ereignisse 1997, 2002 und 2005 in Bezug auf die Abmessungen, Höhenlage und Hangneigung deutlich unterscheiden.

Diskussion

Ereignisdokumentation und Vorkommen von Rutschungen

Unsere Erhebungen zeigen, dass Rutschungen sowohl im Wald als auch im Freiland entstehen. Die geringere Anzahl Rutschungen im Wald verglichen mit dem Freiland in flacheren Lagen kann mit einer intensiveren Durchwurzelung sowie der höheren Vielfalt bezüglich Wurzelmorphologie und vertikaler Wurzelverteilung begründet werden. Bei Neigungen von mehr als 38° werden jedoch gemäss den vorliegenden Resultaten die Grenzen der stabilisierenden Waldwirkung erkennbar: An sehr steilen Hängen ereignen sich pro Fläche sogar mehr Rutschungen im Wald als im Freiland. Dieser Zusammenhang wurde bereits beim Ereignis von Sachseln erkannt (Rickli 2001) und wird nun bei Einbezug der weiteren Inventare bestätigt. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch die Tatsache, dass der Wald in steilen und damit rutsch anfälligeren Lagen meist stärker vertreten ist als das Freiland, da sich dort die landwirtschaftliche Nutzung weniger lohnt. Zudem werden die Wälder an sehr steilen Hängen aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit meist weniger gepflegt, und sie befinden sich oft auch in höheren und unwirtschaftlichen Gebieten, wo auch die flachwurzelnde und störungsanfällige Fichte (Windwurf, Borkenkäfer) besonders stark vertreten ist.

Die Ergebnisse in Abbildung 2 erlauben per se keine Aussagen zum Einfluss des Waldzustandes auf die Hangstabilität. Bei den Untersuchungen der Rutschungen in Sachseln wurden zu diesem Zweck ausgewählte Kriterien der Wegleitung Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS; Frehner et al 2005) beigezogen und der Waldzustand flächendeckend mithilfe von Luftbildern beurteilt. Damit war es möglich, das Vorkommen von Rutschungen in verschiedenen Zustandskategorien zu ermitteln (Rickli 2001). Für die anderen Perimeter war das leider nicht möglich. Eine Option für eine flächenhafte Zuordnung des Waldzustandes bei künftigen Analysen besteht in der Verwendung und Interpretation von Vegetationshöhenmodellen (Planzer 2018, Ginzler & Hobi 2016).

Unterschiede zwischen Rutschungen im Wald und im Freiland

Die Tatsache, dass Waldrutschungen kleiner waren als Rutschungen im Freiland, kann als stabilisierender Effekt einer intensiveren und tiefergrei-

fenden Durchwurzelung im Wald interpretiert werden. Diese Wirkung zeigt sich, obschon Rutschungen im Wald an steileren Hängen anbrachen als im Freiland, wo die Anbruchswahrscheinlichkeit aus bodenmechanischer Sicht eigentlich grösser wäre. Waldrutschungen entstanden im Vergleich zu Rutschungen im Freiland vermehrt in tieferen Lagen, die allgemein mit grösseren Bodenmächtigkeiten in Verbindung gebracht werden. Dies ist jedoch in den Ergebnissen zur Tiefe der Rutschungen nicht erkennbar. Waldrutschungen waren nämlich tendenziell weniger mächtig und umfassten signifikant weniger Volumen als Freilandrutschungen. Diese Unterschiede für den Gesamtdatensatz können sich allerdings bei Betrachtung der einzelnen Unwetterereignisse teilweise ins Gegenteil drehen. So wurden beispielsweise bei den Erhebungen von Sachseln im Wald grössere Rutschungsvolumen als im Freiland festgestellt (Rickli 2001). Mögliche Gründe dafür sind unterschiedliche Stichprobengrössen, andere Topografie und Geologie sowie insbesondere auch die spezifische Niederschlagsgeschichte (Menge, Dauer, Intensität, Vorgeschichte; Tabelle 1).

Einfluss von Neigung und Höhenlage auf die Abmessungen der Rutschungen

Zwischen der Neigung der Rutschfläche und den Abmessungen der Rutschung ergaben sich mehrheitlich signifikante Korrelationen: Je grösser die Neigung, desto kleiner waren die Abmessungen. Dies stimmt mit dem Ergebnis überein, dass sich Waldrutschungen eher in steilerem Gelände als Freilandrutschungen ereigneten, jedoch kleiner waren (Tabelle 3). Dass die Abmessungen mit zunehmender Hangneigung kleiner werden, ist auch in Andrecs et al (2002) dokumentiert und lässt sich unter anderem mit geringeren Mächtigkeiten der Böden, einem oberflächennaheren Felsverlauf und dem tendenziell grobkörnigeren Bodenmaterial der hier erfassten Gebiete in steilen Lagen erklären. Entgegen unseren Vermutungen konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Höhenlage und den Abmessungen festgestellt werden – möglicherweise aufgrund einer zu geringen Spannweite der betroffenen Höhenlagen. Zudem nahm die Neigung nur bei Freilandrutschungen mit zunehmender Höhenlage zu, nicht jedoch bei Waldrutschungen. Weiter ist zu bemerken, dass sich je nach Gebiet und Ereignis im Detail unterschiedliche Korrelationen ergaben. Wie bereits früher erwähnt, ist dieses Ergebnis höchstwahrscheinlich mit der Anzahl Rutschungen, den Niederschlagscharakteristika und der Topografie zu begründen.

Einfluss der Waldstruktur

Die verschiedenen statistischen Analysen ergaben mehrheitlich positive Effekte beziehungsweise kleinere Rutschungen bei älteren Beständen (starkes

Baumholz und stufige Bestockung). Dies entspricht den Empfehlungen von NaiS und wurde auch in Graf et al (2017) als günstig in Bezug auf die Hangstabilität erachtet. Negative Effekte ergaben sich insbesondere bei unbestockten Flächen oder bei zu hohem Deckungsgrad. Auch diese Aspekte werden in NaiS als nachteilig aufgeführt, denn eine ungünstige BHD-Streuung, kurze Kronen und ein hoher Schlankheitsgrad, die oft aufgrund von zu hohem Deckungsgrad beobachtet werden, sind gemäss den Empfehlungen möglichst zu vermeiden (vgl. auch Bebi et al 2019, dieses Heft). Andererseits sollen Bestandeslücken eine maximale Grösse von 6 a nicht überschreiten. Die Problematik von Bestandeslücken im Zusammenhang mit der Hangstabilität lässt sich unter anderem damit erklären, dass in Flächen ohne Baumbestand die verstärkende Wirkung durch das Wurzelwerk fehlt, was sich insbesondere in der Hangfalllinie negativ auswirkt (Moos et al 2016). Es existiert umfangreiche Literatur, wonach in Schadenflächen beziehungsweise einige Jahre nach natürlichen und anthropogenen Störungen wie Windwurf, Insektenkalamitäten oder Holzschlag vermehrt Rutschungen vorkommen (z.B. Bebi et al 2016, Rickli 2002, Watson et al 1999). Um die stabilisierende Wirkung des Waldes zu fördern, sollte mit geeigneten Pflegemassnahmen auf eine diverse Struktur mit ausreichend Stabilitätsträgern und verschiedenen Baumarten hingewirkt werden. Dadurch kann auch die Resilienz gegenüber Störungen erhöht werden. Besonders wichtig ist dabei die Verjüngung des Waldes, denn ausreichende und gesicherte Verjüngungsansätze unter dem Altbestand verkürzen bei Bestandesschäden die bezüglich Hangstabilität kritische Jungwaldphase deutlich.

Neben Aspekten, die mit den Empfehlungen in NaiS übereinstimmen, ergaben sich jedoch auch Unstimmigkeiten. So wurden beispielsweise in mehrschichtigen Bestockungen grössere Rutschungsvolumen und -flächen als in einschichtigen Bestockungen dokumentiert (Abbildung 3). Ebenso resultierten unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Auswirkungen auf Volumen oder Fläche, indem sich gemischte Bestockungen positiv bezüglich der Fläche, jedoch negativ auf das Volumen auswirkten. Fragen bestehen auch in Bezug auf die Reihenfolge der Stufen, indem beispielsweise die «benachbarten» Entwicklungsstufen Baumholz 2 und Baumholz 3 diametral andere Abmessungen ergaben, nämlich in Baumholz 2 die grössten und in Baumholz 3 die kleinsten. Weiter sind für Rutschungen in unbestockten Flächen in Abbildung 4 (multivariate Auswertung) jeweils die grössten Abmessungen verzeichnet, in Abbildung 3 (univariate Auswertung) jedoch nicht. Diese Ergebnisse weisen nicht nur auf Herausforderungen hinsichtlich Auswertemethodik hin, sondern auch auf die Frage, wie gut mit den vier Strukturparametern Schichtung, Entwicklungsstufe,

Mischung und Deckungsgrad der Zustand des Waldes hinsichtlich der Rutschungsanfälligkeit bewertet werden kann. Der Bestandscode (Tabelle 2) ist ein viel benutztes und einfaches Verfahren für die Charakterisierung eines Bestandes und kann vor Ort im Bestand oder vermehrt auch mittels Fernerkundung angewendet werden. Allerdings genügt er für die Beurteilung der Hangstabilität nicht vollends. Zu klären ist, welche Bestandescharakteristika entscheidend sind und wie diese im Bestand exakt angesprochen werden können. Zudem muss nach Wegen gesucht werden, um die hinsichtlich Durchwurzelungsdiversität wichtige Baumartenzusammensetzung besser in die Bewertung einbeziehen zu können. Eine weitere Ursache dafür, dass die Auswertungen betreffend Strukturparameter nicht durchwegs eindeutig und nach herkömmlichen Vorstellungen ausfielen, liegt vermutlich darin, dass neben dem Waldzustand auch andere Faktoren die Auslösung von Rutschungen entscheidend beeinflussen. Dazu zählen unter anderem Grundfaktoren wie die Topografie und die Geologie oder Förderfaktoren wie beispielsweise Vernässungen oder defekte Drainagen.

Schlussfolgerungen

Mit der WSL-Rutschungsdatenbank besteht eine Grundlage, mit der aus Rutschungsereignissen wichtige Erkenntnisse gewonnen werden können. Dank den im Gelände erfassten Informationen können nicht nur der Auslauf der Hangmuren, sondern auch Einflussfaktoren wie Geologie und Topografie auf die Auslösung flachgründiger Rutschungen oder – wie in diesem Beitrag gezeigt – die Wirkung des Waldes untersucht werden. Die dokumentierten Ereignisse weisen einerseits auf die stabilisierende Wirkung des Waldes an steilen Hängen hin, andererseits jedoch auch auf die grosse Bedeutung des Waldzustandes. Allerdings ist je nach Unwetterereignis und betroffener Region mit teilweise divergierenden Ergebnissen zu rechnen. Um die ablaufenden Prozesse und die Waldwirkungen noch besser ergründen zu können, sollte einerseits die Rutschungsdatenbank mit Daten künftiger Ereignisse ergänzt und andererseits untersucht werden, wie der Waldzustand angesprochen werden kann, um die Rutschungswahrscheinlichkeit präziser vorhersagen zu können. ■

Eingereicht: 8. März 2019, akzeptiert (mit Review): 28. August 2019

Dank

Wir danken Hansueli Bucher, Stefan Kamm und weiteren Personen für die Mitwirkung bei den Felderhebungen sowie Alexandre Badoux für wertvolle Hinweise zum Manuskript. Die Erstellung der

WSL-Rutschungsdatenbank wurde durch das Bundesamt für Umwelt unterstützt. Die statistischen Auswertungen erfolgten im Rahmen eines vom Wald- und Holzforschungsfonds finanzierten Projektes (WHFF 2017.19).

Literatur

- AGN (2004)** Gefahreinstufung Rutschungen i.w.S. Zürich: Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren der Schweizerischen Fachgruppe für Ingenieurgeologie, Arbeitsbericht im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie. 17 p.
- ANDRECS P, MARKART G, LANG E, HAGEN K, KOHL B ET AL (2002)** Untersuchung der Rutschungsprozesse im Mai 1999 im Laternertal (Vorarlberg). In: AndreCs P, Bauer W, Hagen K, Kohl E, Lang E et al, editors (2002) Beiträge zur Wildbachforschung. Wien: Bundesforschungszentrum Wald, Ber 127. pp. 55–87.
- BAFU (2016)** Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinerschlag und Hangmuren. Bern: Bundesamt Umwelt. 100 p.
- BATHURST JC, BOVOLO CI, CISNEROS F (2010)** Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale. *Ecol Eng* 36: 317–327.
- BARIK MG, ADAM JC, BARBER ME, MUHUNTHAN B (2017)** Improved landslide susceptibility prediction for sustainable forest management in an altered climate. *Eng Geol* 230: 104–117.
- BEBI P, SEIDL R, MOTTA R, FUHR M, FIRM F ET AL (2016)** Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. *For Ecol Manage* 388: 43–56.
- BEBI P, BAST A, GINZLER C, RICKLI C, SCHÖNGRUNDNER K ET AL (2019)** Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse. *Schweiz Z Forstwes* 170: 318–325. doi: 10.3188/szf.2019.0318
- DAMM B, KLOSE M (2015)** The landslide database for Germany: Closing the gap at national level. *Geomorphology* 249: 82–93.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Vollzug Umwelt. 564 p.
- GINZLER C, HOBI ML (2016)** Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. *Schweiz Z Forstwes* 167: 128–135. doi: 10.3188/szf.2016.0128
- GRAF F, BEBI P, BRASCHLER U, DE CESARE G, FREI M ET AL (2017)** Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL, Ber 56. 42 p.
- GRAY DH (1995)** Influence of vegetation on the stability of slopes. In: Barker DH, editor. *Vegetation and slopes: stabilisation, protection and ecology*. London: Telford. pp. 2–24.
- GUZZETTI F, CARDINALI M, REICHENBACH P, CIPOLLA F, SEBASTINI C ET AL (2004)** Landslides triggered by the 23 November 2000 rainfall event in the Imperia Provence, Western Liguria, Italy. *Eng Geol* 73: 229–245.
- HILKER N, BADOUX A, HEGG C (2009)** The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007. *Nat Haz Earth Syst Sci* 9: 913–925.
- HUSSON F, LÉ S, PAGÈS J (2017)** Exploratory multivariate analysis by example using R. London: Chapman & Hall, Computer Science and Data Analysis Series. 248 p.
- MARKART G, PERZL F, KOHL B, LUZIAN R, KLEEMAYR K ET AL (2007)** 22nd and 23rd august 2005 – analysis of flooding events and mass movements in selected communities of Vorarlberg. Wien: Bundesforschungszentrum für Wald, BFW-Dokumentation 5/2007. 45 p.
- MOOS C, BEBI P, GRAF F, MATTLI J, RICKLI C, SCHWARZ M (2016)** How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides? *Earth Surf Process Landf* 41: 951–960.

- PLANZER T (2018)** Vegetationshöhenmodelle in Gebieten von flachgründigen Rutschungen. Zollikofen: Hochschule Agrar-Forst- Lebensmittelwissenschaften, Bachelorarbeit. 66 p.
- R CORE TEAM (2018)** R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- RICKLI C (2001)** Vegetationswirkungen und Rutschungen. Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch. anstalt WSL. 97 p.
- RICKLI C, ZÜRCHER K, FREY W, LÜSCHER P (2002)** Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. Schweiz Z Forstwes 153: 437–445. doi: 10.3188/szf.2002.0437
- RICKLI C, RAETZO H, MCARDLELL B, PRESLER J (2008)** Hanginstabilitäten. In: Bezzola, GR, Hegg C, editors. Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bern: Bundesamt Umwelt. pp. 97–116.
- RICKLI C, GRAF F (2009)** Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland. For Snow Landsc Res 82 (1): 33–44.
- SCHMALTZ EM, STEGER S, GLADE T (2017)** The influence of forest cover on landslide occurrence explored with spatio-temporal information. Geomorphology 290: 250–264.
- SCHWARZ M (2019)** Wurzelverstärkung und Hangstabilitätsberechnungen: ein Überblick. Schweiz Z Forstwes 170: 292–302. doi: 10.3188/szf.2019.0292
- SIDLE RC, OCHIAI H (2006)** Landslides: processes, prediction, and land use. Washington DC: Amer Geophysical Union, Water Resources Monograph 18. 312 p.
- WATSON AJ, PHILLIPS CJ, MARDEN M (1999)** Root strength, growth and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability. Plant Soil 217: 39–47.
- WSL, BAFU (2018)** Dokumentation von Hangmuren und spontanen Rutschungen. Anleitung und Kommentar zum Aufnahmeformular. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch. anstalt WSL. 27 p.

La forêt protège-t-elle des glissements de terrain? Eclairages à partir de la banque de données des glissements de terrain du WSL

Pendant les épisodes de forte pluie, des glissements superficiels et des coulées de boue se produisent régulièrement, parfois avec des dégâts importants. Les analyses d'intempéries montrent que le nombre de glissements de terrain par unité de surface est généralement moindre en forêt qu'en dehors de la forêt, ce qui souligne l'influence positive de la forêt, généralement reconnue, sur la stabilité des versants. Cette influence est cependant dépendante de l'état des peuplements forestiers et est difficile à quantifier. Les documentations des événements contribuent à une meilleure compréhension des processus déterminants. Les informations qui en découlent sont importantes non seulement pour l'élaboration de cartes de danger, mais constituent aussi un avantage précieux pour l'évaluation de l'efficacité de l'effet protecteur de la forêt. Pour le présent article, les informations de la banque de données des glissements de terrain de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) ont été traitées pour évaluer l'influence de la forêt sur la stabilité des versants. Actuellement, la banque de données comprend des informations sur 734 glissements. Parmi ceux-ci, 661 ont été pris en compte pour l'évaluation, 356 hors forêt et 305 en forêt. Il apparaît que, sur les versants d'inclinaison inférieure à 38°, les glissements par unité de surface sont plus nombreux hors forêt qu'en forêt. Dans les pentes encore plus raides, il n'est plus possible de détecter une influence stabilisante de la forêt. Les évaluations statistiques indiquent toutefois que les glissements sont généralement plus petits en forêt qu'en dehors de la forêt, et ne se déclenchent que sur des pentes avec des inclinaisons supérieures. En général, les glissements sont de dimension moindre avec l'augmentation de la pente. Les analyses multivariées indiquent des effets forestiers positifs respectivement des glissements de terrain relativement petits dans les peuplements bien développés et étagés. Des effets négatifs sont par contre observés dans les zones temporairement non boisées et les forêts très denses. Au-delà de l'importance de l'état de la forêt pour la stabilité des versants, l'article se penche sur la façon dont ce dernier peut être décrit.

Does the forest provide protection from landslides? Evidence from the WSL Shallow Landslide Database

During strong rainfall events, shallow landslides and debris avalanches (hillslope debris flows, or open-slope debris flows) are triggered and sometimes lead to considerable damage. Analysis of damage-causing events show that there are fewer landslides in forested areas compared to non-forested areas, which indicates the generally positive influence of forest vegetation on slope stability. However, these effects depend on the condition of the forest stand and quantification of the effects is difficult. Event documentation contributes to a better understanding of the relevant processes. The information obtained is not only important for the preparation of hazard maps, but also provides valuable insight for assessing the hazard protection provided by the forest. Data from the landslide database of the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL) were used to evaluate the influence of the forest on slope stability. Currently, the database contains information on 734 landslides. Of these, 661 were included in the evaluation – 356 landslides in non-forested areas and 305 in forested areas. In areas with slope angles up to 38°, more landslides per unit area are observed in non-forested areas than in forested areas. In areas with steeper slope angles a stabilizing effect of the forest is no longer recognizable. Statistical analyses show that landslides in forested areas are smaller than in non-forested areas and are more frequent on steeper slopes. In general, the landslides become smaller with increasing slope. Multivariate analyses indicate a positive influence of the forest and also somewhat smaller landslides in well-developed forests. Negative effects are evident in non-forested areas and in areas with overly dense forests. In addition to illustrating the importance of the forest condition for slope stability, the paper also discusses how the forest condition can be described.