Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse

Peter Bebi WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung, SLF (CH)*
Alexander Bast WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung, SLF (CH)
Christian Ginzler Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)
Christian Rickli WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung, SLF (CH)
Kevin Schöngrundner WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung, SLF (CH)
Frank Graf WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung, SLF (CH)

Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse

Durch kontinuierliche und abrupte Veränderungsprozesse im Wald und insbesondere in dessen Wurzelraum ändert sich auch die Disposition des Waldes gegenüber flachgründigen Rutschungen. Das Ziel dieses Artikels ist es, mithilfe von grossen räumlichen Datensätzen mehr über die Zusammenhänge zwischen langfristiger Walddynamik und Rutschgefahr zu erfahren. Dazu wurden aus dem Naturereigniskataster StorMe, dem Ereigniskataster des Kantons Obwalden und der WSL-Rutschungsdatenbank insgesamt 6670 flachgründige Rutschungen ausgewählt und mit GIS-Daten zur aktuellen und zur früheren Waldsituation (Siegfriedkarten von ca. 1880) sowie mit Windwurfflächen (Vivian und Lothar) überlagert. Flachgründige Rutschungen ereigneten sich bei Neigungen von weniger als 35° innerhalb des Waldes deutlich weniger häufig als ausserhalb. Innerhalb des Waldes waren im Nadel- und im Mischwald höhere Rutschungsdichten als im Laubwald zu verzeichnen. Ebenso war die Rutschungsdichte in nach 1880 entstandenen Wäldern höher als in Flächen, die schon früher bewaldet waren. Auf Windwurfflächen lösten sich während der ersten 3 bis 17 Jahre nach dem Windwurfereignis deutlich mehr flachgründige Rutschungen als im übrigen Wald, allerdings bei vergleichsweise grösseren Hangneigungen. Die Analysen zeigen, dass sich die Disposition des Waldes gegenüber flachgründigen Rutschungen innerhalb eines durch Hangneigung und Untergrund vorgegebenen Bereichs sehr stark durch Wiederbewaldungsprozesse und natürliche Störungen verändern kann. Waldbauliche Eingriffe können langfristig zu einer Verbesserung der Schutzwirkung beitragen, wenn sie entsprechend vorsichtig ausgeführt werden und darauf abzielen, die Anpassungsfähigkeit des Waldes gegenüber natürlichen Störungen zu erhöhen.

Keywords: shallow landslides, forest dynamics, windthrow, natural disturbances
doi: 10.3188/szf.2019.0318

* Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos, E-Mail peter.bebi@wsl.ch

Wälder leisten einen erheblichen Beitrag zum Schutz vor Bodenerosion und flachgründigen Rutschungen (Sidle et al 1985; Rickli & Graf 2009; Rickli et al 2019, dieses Heft). Flachgründige oder oberflächennahe Rutschungen sind hangabwärtsgerichtete, gleitende Bewegungen von Boden- oder Gesteinsmassen auf einer Gleitfläche von weniger als zwei Metern unter der Geländeoberfläche (BAFU 2016, Baumhauer 2013). Gerade innerhalb dieser zwei Meter mächtigen Zone verstärken Baumwurzeln den Zusammenhalt zwischen verschiedenen Bodenschichten und verbessern die Bodenaggregation. Bäume entziehen zudem dem Boden über die Wurzeln Wasser, und ihr Kronendach hält einen Teil des Niederschlags ab, was zur Dämpfung von Starkniederschlägen beiträgt (Sidle & Ochiai 2006). Sowohl statistische Analysen in Fallstudienregionen (z.B. Graf et al 2017, Moos et al 2016) als auch physikalische Modelle (Schwarz et al 2012) bestätigen, dass neben Bodenmechanik, Hangneigung und anderen Geländeeigenschaften insbesondere auch das Vorhandensein von Wald und dessen Eigenschaften einen wichtigen Einfluss auf die Bodenstabilität haben. Die Verstärkung des Bodens ist umso besser, je stärker die verschiedenen Bodenschichten durchwurzelt sind (Vergani et al 2014). Es konnte zudem nachgewiesen werden, dass die Anfälligkeit gegenüber flachgründigen Rutschungen ab einer bestimmten Lückengrösse steigt (Frehner et al 2005, Moos et al 2016). Wie im Beitrag von Rickli et al (2019, dieses Heft) gezeigt wird, haben der Wald und die Waldstruktur nicht nur eine Wirkung auf die Häufigkeit, sondern auch auf die Grösse der flachgründigen Rutschungen sowie auf die Hangneigung, bei der sie anbrechen.

Weil sich der Wald ständig wandelt, verändert sich auch dessen Disposition gegenüber flachgründigen Rutschungen im Laufe der Zeit. So konnte eine Erhöhung der Disposition für die ersten Jahre nach grossen Holzschlägen nachgewiesen werden (Ziemer 1981, Vergani et al 2014), und eine besonders deutliche Erhöhung der Rutschgefahr ist demnach auch nach natürlichen Störungen wie Windwurf (BAFU 2008, McDonald 2011), Insektenkalamitäten (Ammann et al 2009) oder Feuer (Vergani et al 2017) zu erwarten. Andererseits kann sich im Zuge der Wiederbewaldung nach natürlichen und anthropogenen Störungen die Bodenstabilität auch wieder verbessern (Basher 2013, Bast et al 2016, Graf et al 2017). Allerdings kann erst dann wieder mit der ursprünglichen Schutzwirkung gerechnet werden, wenn im oberflächennahen Untergrund die hydrologische Wirkung wie auch die Wurzelverstärkung der Vegetation den Ausgangszustand des ehemaligen Waldes erreicht haben.

Zusammenhänge zwischen Waldveränderungen und der Disposition gegenüber flachgründigen Rutschungen sind schwierig zu quantifizieren. Zum einen ist dies darin begründet, dass die Untersuchung von Eigenschaften und Prozessen im Wurzelraum, also in der für das Auge zunächst verdeckten Schicht, sehr aufwendig ist. Zum anderen haben sich mit der Rutschung sowohl die Waldstruktur als auch die Bodenverhältnisse stark verändert. Um trotzdem Zusammenhänge zwischen der Waldveränderung und der Gefahr von flachgründigen Rutschungen aufzeigen zu können, haben wir für den vorliegenden Beitrag das Auftreten von insgesamt 6670 flachgründigen Rutschungen mit räumlichen Daten zu Veränderungen und Störungen im Wald verschnitten. Diese räumliche Analyse erlaubte es uns, folgende Fragen anzugehen:

1. Wie haben sich verschiedene Waldtypen und Waldveränderungen in der Vergangenheit auf die Disposition des Waldes gegenüber flachgründigen Rutschungen ausgewirkt?
2. Welchen Einfluss haben natürliche Störungen wie Windwurf auf die Disposition des Waldes gegenüber flachgründigen Rutschungen?
3. Wie kann vor dem Hintergrund dieser Zusammenhänge die Schutzwirkung des Waldes gegenüber flachgründigen Rutschungen verbessert werden?

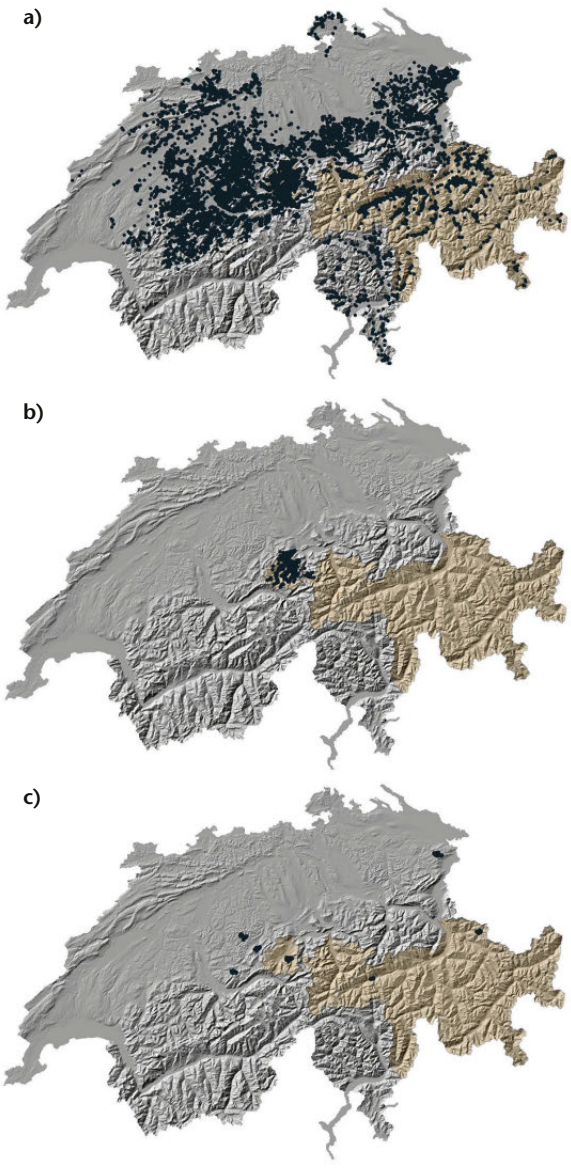

Abb 1 *Verwendete Daten von flachgründigen Rutschungen a) Naturereigniskataster StorMe, b) Kanton Obwalden, c) WSL-Rutschungsdatenbank. Hellbraun eingefärbt sind Kantone, für die historische Flächeninformationen aus den Siegfriedkarten von circa 1880 verfügbar waren.*

Datengrundlagen und Methoden

Daten von flachgründigen Rutschungen in der Schweiz liegen für verschiedene geografische Regionen und Zeiträume vor (Abbildung 1). In diesem Beitrag haben wir Informationen aus den folgenden drei Datensätzen aufgearbeitet und mit weiteren räumlichen Informationen in einem geografischen Informationssystem (GIS) überlagert:

1. Gesamtschweizerischer Naturereigniskataster StorMe, aus dem alle Ereignisse des Prozesses «Rutschung» mit einer maximalen Mächtigkeit von zwei Metern ausgewählt wurden, die zwischen 1881 und 2018 erfolgten.
2. Flachgründige Rutschungsereignisse im Kanton Obwalden aus den Jahren 1995 bis 2008.
3. Rutschungsdatenbank der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) mit flachgründigen Rutschungen und Hangmuren, die sich zwischen 1997 und 2012 ereigneten (siehe auch Rickli et al 2019, dieses Heft).

Um einen möglichst korrekten Flächenbezug herzustellen und die Wahrscheinlichkeit von nicht korrekt zugeordneten Koordinaten zu minimieren, wurden nur Rutschungen erfasst, die gemäss einem 25-m-Geländemodell in einem Neigungsbereich zwischen 15° und 50° und gemäss Ansatz von Paulsen & Körner (2001) unterhalb der regionalen potenziellen Waldgrenze erfolgten. Doppelzählungen wurden vermieden, indem alle Rutschungen mit übereinstimmendem Datum und übereinstimmenden Koordinaten nur einmal verwendet wurden.

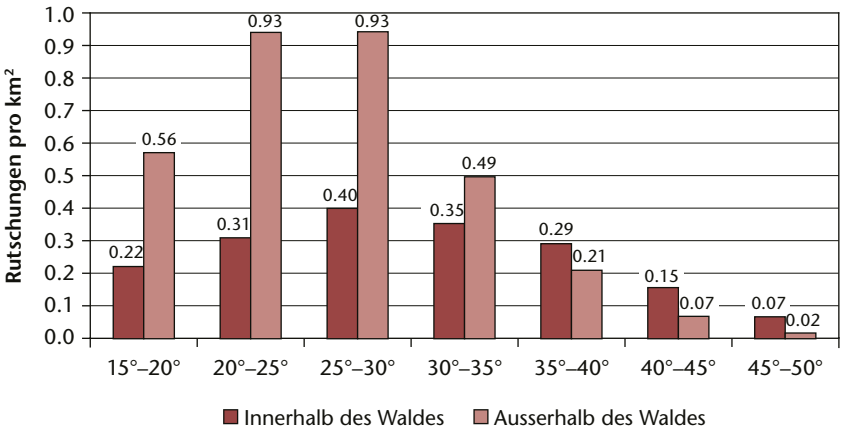

Abb 2 *Dichte von flachgründigen Rutschungen nach Neigungsklasse (von 15 bis 50° gemäss SwissALTI3D-Geländemodell) innerhalb (n = 2376) und ausserhalb des Waldes (Freiland; n = 4294) gemäss unserem Gesamtdatensatz von n = 6670 Rutschungen.*

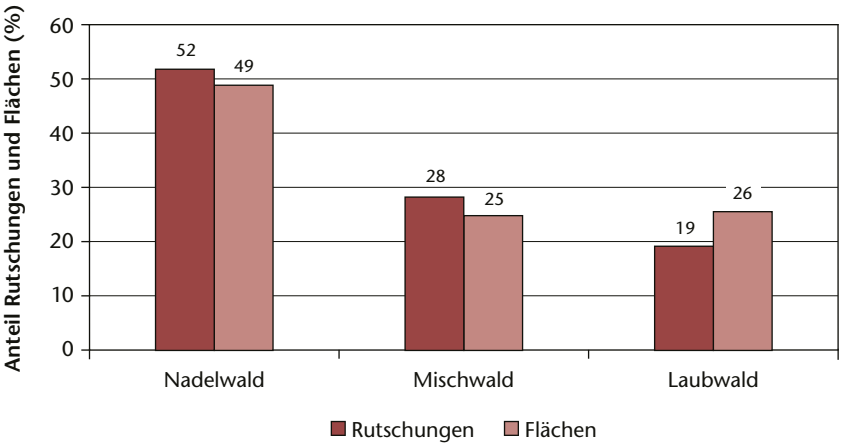

Abb 3 *Anteil flachgründiger Rutschungen nach Waldtyp (rot) und zugehöriger Flächenanteil des jeweiligen Waldtyps (rosa). Anzahl Rutschungen: Total = 2576, Nadelwald = 923, Mischwald = 503, Laubwald = 342, nicht bestimmbar = 608.*

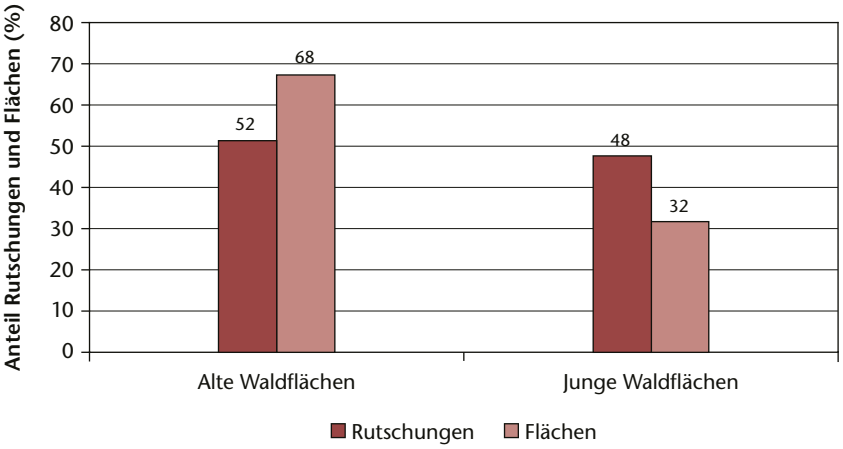

Abb 4 *Anteil flachgründiger Rutschungen in den Kantonen Graubünden, Uri und Obwalden in Abhängigkeit vom Waldalter gemäss Siegfriedkarten mit den zugehörigen Flächenanteilen. Anzahl Rutschungen: Total = 883, alte Waldflächen (vor 1880 bereits Wald) = 455, junge Waldflächen (erst nach 1880 Wald) = 428.*

Insgesamt ergab sich daraus ein Datensatz mit 6670 flachgründigen Rutschungen, von denen 4949 Rutschungen (in 16 Kantonen) dem StorMe-Datensatz, 1025 den zusätzlichen Rutschungsdaten des Kantons Obwalden und 734 der WSL-Rutschungsdatenbank zugeordnet sind (Abbildung 1).

Zu allen Rutschungen liegen räumliche Punktdaten vor. Diese Punktdaten wurden mittels GIS (ESRI ArcMap, Vers. 10.4.1) geoprozessiert. Die Geländeinformationen (Höhe über Meer und Neigung) wurden sowohl vom Geländemodell swissALTI3D von Swisstopo (Stand 2018, Auflösung 2 m) als auch von einem solchen von Arnet (2001; Auflösung 25 m) abgeleitet. Die Zuordnung von aktuellen Waldinformationen erfolgte aufgrund der Waldmaske des Landesforstinventars (Waser et al 2015). Der Waldmischungsgrad wurde von Waser & Ginzler (2018) übernommen, die Informationen zu den Flächenschäden der Stürme Vivian und Lothar von Usbeck et al (2012). Um Unsicherheiten im Randbereich von Windwürfen zu berücksichtigen, wurde zusätzlich ein Pufferstreifen von 25 m um die Windwurfflächen einbezogen. Für die Kantone Graubünden, Uri und Obwalden wurden die von Ginzler et al (2011) flächig aufbereiteten Waldinformationen aus den Erstaufnahmen der Siegfriedkarten (Jahre 1870–1896) mit den Punktinformationen der Rutschungen verschnitten.

Um den Anteil und die Häufigkeit der Rutschungen auf verschiedenen Bodenbedeckungstypen zu vergleichen, wurde die Anzahl der Rutschungen durch die Gesamtfläche des jeweiligen Bodenbedeckungs- bzw. Waldtyps geteilt. Anschliessend wurden die Rutschungen nach der Hangneigung in 5-Grad-Schritten klassiert (15–20°, >20–25°, >25–30°, >30–35°, >35–40°, >40–45°, >40–45°). Zusammenhänge zwischen kontinuierlichen Variablen wurden mit dem Wilcoxon-Mann-Whitney-Test, solche zwischen binären Variablen mit dem Pearsons's Chi-Quadrat-Test (mit Yates-Korrektur) überprüft (R Core Team 2017).

Resultate

Rutschungsdichte in Wald und Freiland

Von den insgesamt 6670 flachgründigen Rutschungen befinden sich 2376 (36%) im Wald und 4294 (64%) im Freiland. Innerhalb der betrachteten Fläche (unterhalb der potenziellen Waldgrenze und mit Hangneigungen von mehr als 15°) war damit die Rutschungsdichte im Waldareal (0.28 Rutschungen/km²) weniger als halb so gross wie ausserhalb des Waldes (0.6 Rutschungen/km²). Dieser Zusammenhang ist allerdings stark neigungsabhängig: Zwischen 15° und 35° war die Rutschungsdichte im Wald signifikant geringer, zwischen 35° und 50° aber signifikant höher als ausserhalb des Waldes (Abbildung 2).

Rutschungsdichte in Abhängigkeit von Waldtyp und Waldgeschichte

Die Disposition des Waldes gegenüber flachgründigen Rutschungen unterscheidet sich je nach Waldtyp und Waldgeschichte (Abbildungen 3 und 4).

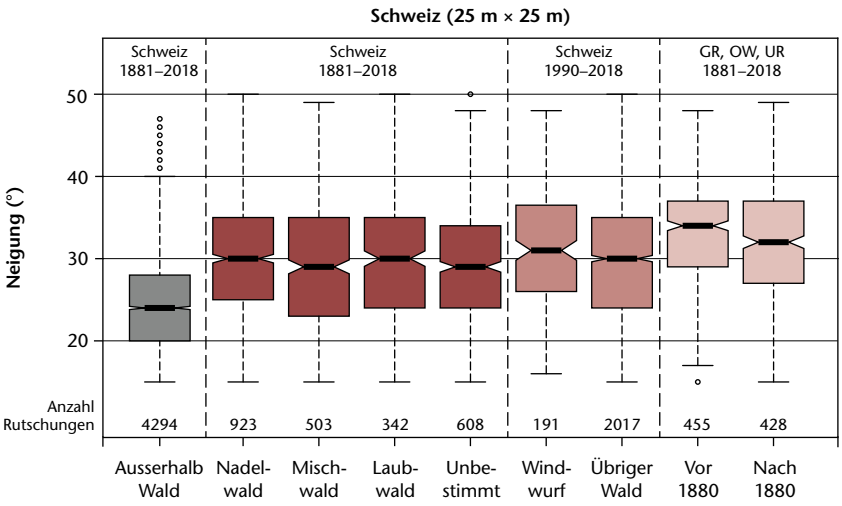

Abb 5 *Verteilung der Hangneigungen von flachgründigen Rutschungen in verschiedenen Waldtypen und ausserhalb des Waldes. Windwurf: Windwurfflächen durch Vivian (1990) und Lothar (1999), Vor 1880: in Siegfriedkarten von 1880 schon als Wald deklariert, nach 1880: in Siegfriedkarten von 1880 noch kein Wald. Wenn sich die Kerben zweier Boxplots nicht überschneiden, ist der Unterschied zwischen den beiden Medianen signifikant (p <0.05).*

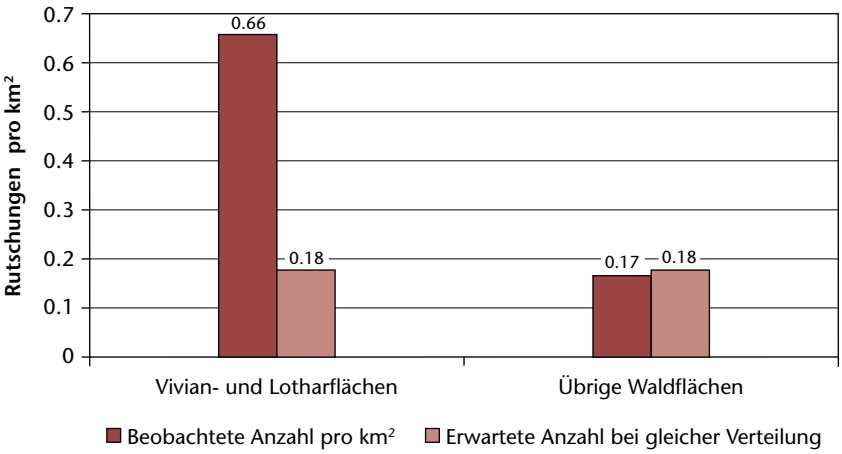

Abb 6 *Dichte von flachgründigen Rutschungen in Windwurfflächen (Vivian und Lothar, links) und im übrigen Wald (rechts), verglichen mit dem Erwartungswert der Rutschungsdichte über alle Waldflächen (innerhalb und ausserhalb von Windwurfflächen). Anzahl Rutschungen: Total = 2208, Vivian = 33, Lothar = 158, übriger Wald = 2017.*

Von allen Rutschungen im Wald ereigneten sich 52% im Nadelwald (Anteil Nadelbäume ≥20%), 28% im Mischwald und 19% im Laubwald (≥80% Laubbäume). Die Rutschungsdichte war damit im Laubwald signifikant geringer als im Nadel- und im Mischwald (p <0.005, Abbildung 3), wohingegen sich der Hangneigungsbereich, in dem sich die Rutschungen ereigneten, in den drei Waldtypen nicht wesentlich unterschied (Abbildung 5). In den Kantonen mit flächendeckender Waldinformation (Graubünden, Obwalden und Uri) sind im jungen Wald (seit 1880 eingewachsen oder aufgeforstet) rund doppelt so viele Rutschungen pro Quadratkilometer Wald entstanden als im alten Wald, der bereits 1880 in der Siegfriedkarte verzeichnet war. (Abbildung 4). Rutschungen im jungen Wald ereigneten sich bei signifikant geringeren Hangneigungen (p = 0.009; Abbildung 5).

Rutschungsdichte in Windwurfflächen

Insgesamt haben sich gemäss unserem Datensatz 191 flachgründige Rutschungen auf früheren Windwurfflächen der Stürme Vivian (im Jahr 1990, n=33) und Lothar (im Jahr 1999, n=158) ereignet. Damit war die Dichte von flachgründigen Rutschungen auf Windwurfflächen zwischen 1990 und 2018 mit 0.66 Rutschungen pro Quadratkilometer im Durchschnitt fast viermal höher als im übrigen Wald mit 0.17 Rutschungen pro Quadratkilometer (Abbildung 6). Die Rutschungen in Windwurfflächen ereigneten sich dabei bei höherer Hangneigung als die Rutschungen im übrigen Wald (Abbildung 5). Diese Unterschiede zeigen sich in beiden Geländemodellen, wobei die Unterschiede nur bei der Verwendung des 25-m-Geländemodells signifikant waren (p = 0.028) und im Mittel aus dem 2-m-Geländemodell etwas grössere Hangneigungen resultierten. Auf den Vivianflächen traten die Rutschungen zwischen 1990 und 2016 und auf den Lotharflächen zwischen 2000 und 2012 auf. Dabei kann ein beträchtlicher Teil der Rutschungen entweder dem von Starkniederschlägen geprägten Jahr 2005 oder den beiden Folgejahren zugeordnet werden (Abbildung 7).

Diskussion

Waldwirkung abhängig von Hangneigung

Unsere GIS-Analysen mit insgesamt 6670 untersuchten flachgründigen Rutschungen weisen eindrücklich auf die Bedeutung, aber auch auf Grenzen der Waldwirkung gegenüber flachgründigen Rutschungen hin. Insbesondere bei Hangneigungen zwischen 15° und etwa 35°, in welchen sich rund 95% aller Rutschungen im Freiland ereignen, ist die Rutschgefahr durch eine Waldbestockung offenbar generell stark reduziert (Abbildung 2). Dabei hängt die Schutzwirkung gegenüber flachgründigen Rutschungen massgeblich von den an einem bestimmten Standort vorkommenden bodenmechanischen und hydrologischen Eigenschaften sowie von der Waldstruktur ab. Basierend auf Feld- (Moos et al 2016, Mattli 2014) und Laboruntersuchungen (Yildiz et al 2018) sowie einem statistischen Ansatz (Graf & Grunder 2017) kann eine günstige Waldstruktur eine Differenz zwischen Hangneigung und Reibungswinkel des Bodenmaterials von rund 5° kompensieren – mit abnehmender Wahrscheinlichkeit auch darüber hinaus – und somit die Rutschungsanfälligkeit massgeblich reduzieren (Graf et al 2017). Wie auch Modellergebnisse zur Quantifizierung der Wurzelverstärkung zeigen, nimmt ab einer Hangneigung von circa 38° der mögliche Beitrag des Waldes zur Bodenstabilisierung und damit zur Vermeidung von flachgründigen Rutschungen immer mehr ab (vgl. Mattli 2014, Graf & Grunder 2017).

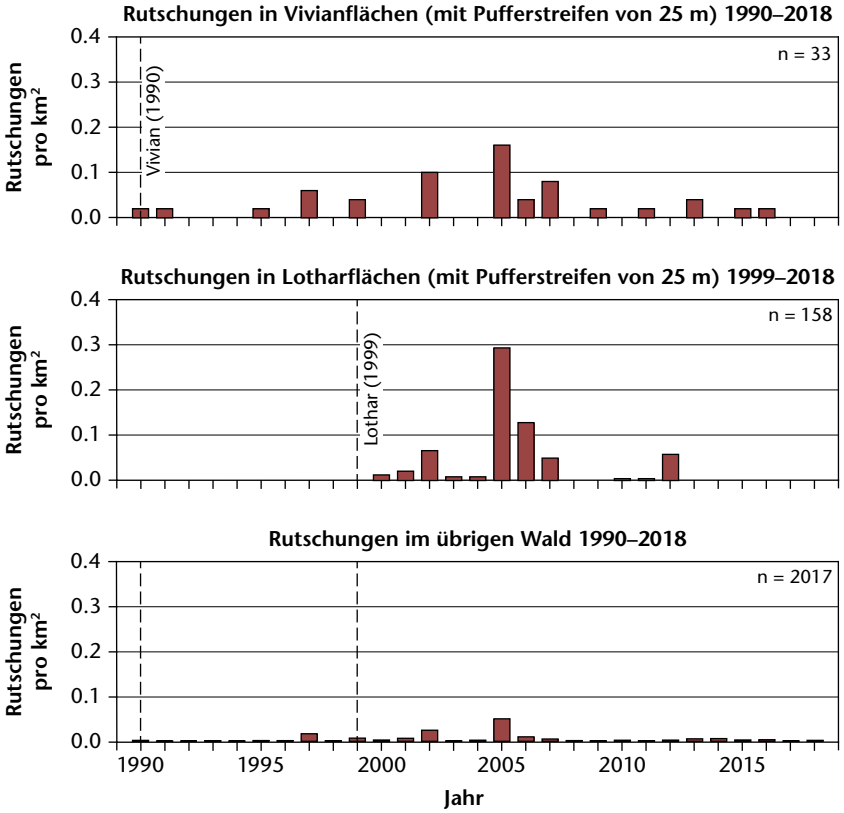

Abb 7 *Rutschungsdichten in Windwurfflächen von Vivian (1990, oben) und Lothar (1999, Mitte) im Vergleich zur Rutschungsdichte im übrigen Wald zwischen 1990 und 2018 (unten).*

Waldwirkung abhängig von Waldtyp und Waldgeschichte

Bei der Disposition gegenüber flachgründigen Rutschungen spielt nicht nur das Vorhandensein von Wald per se, sondern auch der Waldtyp beziehungsweise die Waldstruktur eine wichtige Rolle. Dies zeigt beispielsweise die Tatsache, dass nur rund 19% der flachgründigen Rutschungen in Laubwäldern stattfanden, obwohl Laubwälder 26% der Fläche in unserem Untersuchungsgebiet ausmachten. Die Anzahl Rutschungen in Nadel- und Mischwäldern lag hingegen anteilmässig höher, als aufgrund ihres Flächenanteils zu erwarten war. Die grössere Disposition von Nadelwäldern gegenüber flachgründigen Rutschungen wurde auch in anderen Studien festgestellt und ist wahrscheinlich in erster Linie auf die verhältnismässig wenig bodenstabilisierenden Eigenschaften der flachwurzelnden Fichte zurückzuführen (Meyer 2010). Nebst der Bedeutung verschiedener Baumarten erwarten wir, dass vor allem auch der Deckungsgrad der Bäume und die Grösse von Lücken eine wichtige Rolle spielen (Rickli et al 2019, dieses Heft). Dabei ist es sowohl im Hinblick auf die möglichst gute Wirkung in verschiedenen Bodenschichten als auch im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Wirkung vorteilhaft, wenn die vertikale Struktur eines Waldes möglichst vielfältig ist (Graf et al 2017).

Seit 1880 hat die Waldfläche schweizweit wieder um 21.6% zugenommen (Ginzler et al 2011). In steilen Gebieten des schweizerischen Alpenraums war die Waldzunahme mit 30 bis 40% noch deutlich höher (Bebi et al 2017). Damit nahm auch die Waldfläche mit einer Schutzfunktion gegenüber Rutschungen um etwa 30% zu (Bebi et al 2016). Dank dem natürlichen Einwuchs sowie den Investitionen in Aufforstungsprojekte zur Verbesserung der Schutzfunktion sind viele Hänge tatsächlich stabiler geworden. Unsere Auswertungen zeigen aber auch, dass sich im nach 1880 entstandenen Wald nicht nur deutlich mehr flachgründige Rutschungen ereigneten als im alten Wald, sondern sich diese auch bereits bei geringerer Hangneigung lösten. Dies könnte damit erklärt werden, dass die neuen Wälder zum Zeitpunkt der Rutschung entweder noch wenig entwickelt waren oder relativ homogene, einschichtige Strukturen aufwiesen (Bebi et al 2017). Zudem kann die Hypothese aufgestellt werden, dass das Wurzelwerk und die Mykorrhizapilze in diesen noch relativ jungen Wäldern wegen der jahrhundertelangen landwirtschaftlichen Nutzung noch zu wenig ausgebildet sind (Graf et al 2017, Bast et al 2016).

Rutschungsdichte in Windwurfflächen erhöht

Windwurfflächen sind gemäss unseren Analysen deutlich anfälliger gegenüber flachgründigen Rutschungen als die übrigen Wälder. Je nach Standort, Windwurfintensität und dem Verlauf der Wiederbewaldung ist in einem Zeitfenster von etwa 3 bis 20 Jahren mit reduzierter Schutzwirkung zu rechnen. Eine erhöhte Anfälligkeit wurde auch in anderen Studien nachgewiesen (Ziemer 1981, Rickli et al 2002, Ammann et al 2009, McDonald 2011) und ist plausibel erklärbar: Nach einem Windwurfereignis nimmt die hydrologische Wirkung des Waldes zunächst abrupt ab, was bis zur vollständigen Etablierung eines Nachfolgebestandes zu reduzierter Interzeption und Evapotranspiration führt (BAFU 2008). Zudem wird die Wurzelverstärkung nach Absterben von Fein- und Grobwurzeln schon in den ersten Jahren drastisch reduziert (Vergani et al 2016), wobei dieser Effekt bei Flächenschäden grösser ist als bei Streuschäden, bei denen ein höherer Wurzelanteil intakt bleibt (BAFU 2008).

Nach anderen grossflächigen Störungen sind ähnliche Effekte auf die Rutschgefahr wie bei Windwurf zu erwarten. Besonders gravierend kann sich dabei Waldbrand auswirken (Conedera et al 2003). Nach Waldbränden vergrössern nämlich die hydrophobe Bodenoberfläche, der stark ausgetrocknete Boden und die fehlende Interzeption der Kraut- und Baumvegetation die Gefahr von oberflächennaher Bodeninstabilität, was verstärkt zu Bodenerosion, flachgründigen Rutschungen und Murgängen führen kann (Conedera et al 2003). Insgesamt dürfte die Schutzwirkung des Waldes gegenüber flachgründigen Rutschungen nach Störungen stärker reduziert

Abb 8 *Flachgründige Rutschung in steilem Gelände nach einem Verjüngungsschlag.*
Foto: Peter Bebi

sein als gegenüber Steinschlag und Lawinen, da sich eine erhöhte Oberflächenrauigkeit durch liegende Baumstämme bei Rutschungen anders als bei Steinschlag und Lawinen nicht positiv auswirkt (Bebi et al 2017). Wie gravierend die Reduktion der Schutzwirkung nach Störungen ist, hängt nebst der Intensität des Ereignisses auch stark von der Struktur des Ausgangsbestandes ab.

Die hydrologische und mechanische Wirkung von Windwürfen ist in vieler Hinsicht vergleichbar mit derjenigen von grösseren Holzschlägen, wobei es je nach Art des Eingriffs und der Behandlung nach der Störung grosse Unterschiede geben kann. So wurden in Alaska in Kahlschlägen zwar etwas kleinere Rutschungsdichten als in Windwurfflächen gefunden, die Rutschungen ereigneten sich in den Kahlschlägen aber bereits in weniger steilen Hängen (McDonald 2011). Dies ist mit unseren Resultaten konsistent, gemäss denen die Rutschungsgefährdung nur in steilen Windwurfflächen erhöht ist (Abbildung 5). Eine mögliche Erklärung ist, dass aufgestellte Wurzelteller Angriffsstellen für Erosionsprozesse bilden, von denen aus sich in steilem Gelände Rutschungen entwickeln können. In weniger steilem Gelände tragen solche kleinflächig heterogenen Strukturen hingegen eher zu einer Stabilisierung des Systems bei. Um die Bedeutung von natürlichen Störungen und verschiedenen Eingriffsvarianten auf flachgründige Rutschungen besser zu verstehen, sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig. Es ist zudem wertvoll, noch mehr über die kritische Eingriffsstärke bei verschiedenen Hangneigungen zu erfahren, beispielsweise ob die kritische Lückenlänge von etwa 20 bis 25 m in der Falllinie, die auf Basis einer Studie im subalpinen Fichtenwald abgeleitet wurde (Moos et al 2016), verallgemeinert werden darf oder für unterschiedliche Waldtypen angepasst werden muss. Weiter gehende Analysen mit grossen Rutschungsdatensätzen und neu verfügbaren 3-D-Fernerkundungsdaten können hierfür einen wichtigen Beitrag leisten.

Grenzen der Untersuchungsmethode

Grossräumige Analysen mit Datensätzen unterschiedlicher Herkunft müssen immer kritisch betrachtet werden. So ist bei der Interpretation der verwendeten Daten beispielsweise zu berücksichtigen, dass nicht systematisch nach Rutschungen gesucht wurde und die Qualität der Daten stark vom Dokumentationsverhalten der zuständigen Stellen abhängt. Dank der sehr grossen Stichprobenzahl können aber diese Nachteile mindestens teilweise kompensiert werden. Für ein noch besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen Waldentwicklung und flachgründigen Rutschungen ist es zudem wichtig, dass solch grossflächige Analysen mit detaillierteren Untersuchungen ergänzt werden. Dafür sind sowohl hochaufgelöste Fernerkundungsdaten von Waldstrukturen und Rutschungsereignissen als auch den Wurzelraum berücksichtigende Feldarbeiten essenziell.

Folgerungen für Praxis und Forschung

Unsere Ergebnisse weisen zusammen mit solchen von anderen Studien (u.a. Rickli et al 2019, dieses Heft) darauf hin, dass nicht nur das Vorkommen von Wald, sondern auch die Waldgeschichte bzw. die Waldstruktur relevant für die Reduktion der Rutschgefahr ist. Zudem bestätigt sich, dass Öffnungen im Kronendach, etwa durch Windwurf, die Disposition für Rutschungen erhöhen. Um einerseits die langfristige Schutzwirkung vor Rutschungen zu verbessern und andererseits die Anpassungsfähigkeit (Resilienz) gegenüber den Effekten von Windwürfen und anderen natürlichen Störungen zu erhöhen, ist sowohl oberirdisch als auch unterirdisch eine möglichst grosse Vielfalt bezüglich Struktur und Artenzusammensetzung anzustreben. Dabei ist der Handlungsspielraum für mögliche Eingriffe sehr stark von der Hangneigung abhängig: Während bei Hangneigungen unterhalb des Reibungswinkels des Bodenmaterials (für die meisten Waldböden in der Schweiz im Bereich zwischen 27° und 35°) die Waldwirkung generell relativ hoch ist, wird die Art der Waldstruktur bei höheren Neigungen vermutlich immer entscheidender und der Spielraum für waldbauliche Massnahmen immer kleiner (Abbildung 8). Pflegeeingriffe in rutschgefährdeten Steilhängen oberhalb des Reibungswinkels des Bodenmaterials sollten nur dann durchgeführt werden, wenn sie – im Sinn des Idealprofils von NaiS (Frehner et al 2005) – vorsichtig und kleinflächig erfolgen und die

Anpassungsfähigkeit gegenüber grossflächigen Störungen erhöhen.

In Anbetracht der natürlichen Walddynamik dürfen wir nicht generell davon ausgehen, dass eine bestimmte, für die Schutzfunktion optimale Waldstruktur über einen langen Zeitraum hinweg erhalten bleibt. Störungen wie Windwurf, Insektenkalamitäten und Feuer sind grundsätzlich wichtige Bestandteile der natürlichen Dynamik. Sie werden in Zukunft weiter zunehmen. Verantwortlich dafür sind nicht nur die Folgen des Klimawandels, sondern auch die Demografie unserer heutigen Gebirgswälder mit einem Überhang an 100- bis 150-jährigen Beständen wegen des flächigen Waldeinwuchses ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Auch mit einer aufwendigen Schutzwaldpflege können natürliche Störungen und flachgründige Rutschungen nicht ganz vermieden werden. Durch ein angepasstes Waldmanagement kann aber sowohl die Resilienz der Wälder gegenüber Störungen als auch deren Schutzwirkung gegenüber flachgründigen Rutschungen erhöht werden. Konkrete Massnahmen sollten dabei insbesondere auf die Förderung der Vorverjüngung sowie die Erhöhung der ober- und unterirdischen Struktur- und Artenvielfalt hinzielen. In Fichtenbestockungen der montanen Stufe, in denen der natürliche Tannen- und Laubholzanteil in der Regel höher als heute wäre, ist dies allerdings häufig nur bei einer Verminderung der Verbissbelastung möglich. Wo welche Prioritäten bezüglich einer langfristigen Verbesserung der Schutzwirkung gegenüber flachgründigen Rutschungen gesetzt werden sollen, kann allein auf der Basis einer so grossflächigen Studie nicht abschliessend gesagt werden. Wir können aus unseren Ergebnissen aber ableiten, dass ein besonderes Augenmerk auf Bestände gelegt werden sollte, in denen aufgrund von Standort, Topografie und aktueller Waldstruktur durch forstliche Eingriffe auch tatsächlich eine Verbesserung der langfristigen Schutzwirkung und Resilienz erzielt werden kann. Dabei dürfen insbesondere rechtzeitige strukturverbessernde Massnahmen in relativ jungen, seit dem Ende des 19. Jahrhunderts eingewachsenen Schutzwäldern nicht vernachlässigt werden. ■

Eingereicht: 10. März 2019, akzeptiert (mit Review): 16. September 2019

Dank

Für die Bereitstellung von Rutschungsdaten danken wir Wolfgang Ruf (Bundesamt für Umwelt, StorMe-Daten) sowie der belop GmbH (Rutschungsdaten des Kantons Obwalden). Für die kritische Durchsicht und die hilfreichen Kommentare, die zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen haben, danken wir Marco Conedera, Massimilano Schwarz und Thomas Planzer.

Literatur

AMMANN M, BÖLL A, RICKLI C, SPECK T, HOLDENRIEDER O (2009) Significance of tree root decomposition for shallow landslides. For Snow Landsc Res 82: 79–94.

ARNET F (2001) Interpolation von DHM25 Level 2: Interpolation eines digitalen Höhenmodells aus Höhenkurven, Zwischenkurven, Seeufern, Bruchkanten, Gewässerlinien und Höhenkoten mittels Dreiecksvermaschung. Wabern: Bundesamt Landestopografie, Ber 18. 28 p.

BAFU (2008) Entscheidungshilfe bei Sturmschäden im Wald. Vollzugshilfe für die Wahl der Schadensbehandlung im Einzelbestand. Sturmschaden-Handbuch 2008, Teil 3. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Vollzug 0801. 132 p.

BAFU (2016) Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Vollzug 1608. 98 p.

BAUMHAUER R (2013) Physische Geographie 1: Geomorphologie. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 3 ed. 144 p.

BASHER LR (2013) Erosion processes and their control in New Zealand. In: Dymond JR, editor. Ecosystem services in New Zealand: Conditions and trends. Lincoln: Manaaki Whenua Press. pp. 363–374.

BAST A, WILCKE W, GRAF F, LÜSCHER P, GÄRTNER H (2016) Does mycorrhizal inoculation improve plant survival, aggregate stability, and fine root development on a coarse-grained soil in an alpine eco-engineering field experiment. J Geophys Res 121: 2158–2171.

BEBI P, BUGMANN H, LÜSCHER P, LANGE B, BRANG P (2016) Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bern: Haupt. pp. 269–285.

BEBI P, SEIDL R, MOTTA R, FUHR M, FIRM D ET AL (2017) Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. For Ecol Manage 388: 43–56.

CONEDERA M, PETER L, MARXER P, FORSTER F, RICKENMANN D ET AL (2003) Consequences of forest fires on the hydrogeological response of mountain catchments: A case study of the Riale Buffago, Ticino, Switzerland. Earth Surf Process Landf 28: 117–129.

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, BRÄNDLI UB, HÄGELI M (2011) Waldflächenentwicklung der letzten 120 Jahre in der Schweiz. Schweiz Z Forstwes 162: 337–343. doi: 10.3188/szf.2011.0337

GRAF F, GRUNDER K (2017) Shallow landslides: lessons from Sachseln (1997). Davos: WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung. 1 p. http://www.nfp68.ch/SiteCollectionDocuments/poster_egu17_graf_grunder.pdf (18.9.2019)

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.

MATTLI J (2014) Quantifizierung der Wurzelverstärkung im Schutzwald. Zollikofen: Hochschule Agrar- Forst- Lebensmittelwissenschaften, Bachelorarbeit. 79 p.

MEYER F (2010) Entwicklung eines Decision-Support-Systems zur Generierung einer zuverlässigen, lokalmasstäblichen Gefahrenbeurteilung potentieller Hangmurbereiche. München: Univ München, Dissertation. 159 p.

MOOS C, BEBI P, GRAF F, MATTLI J, RICKLI C ET AL (2016) How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides? Earth Surf Process Landf 41: 951–960.

MCDONALD JI (2011) The effects of timber harvesting and windthrow on landslide initiation, Southwestern Vancouver Island. Burnaby: Univ Fraser, Masterthesis. 172 p.

PAULSEN J, KÖRNER C (2001) GIS-analysis of tree-line elevation in the Swiss Alps suggests no exposure effect. J Veg Sci 12: 817–824.

R CORE TEAM (2017) R: A language and environment for statistical computing. https://www.R-project.org/.

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, GRAF F (2009) Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland. For Snow Landsc Res 82: 33–44.

RICKLI C, GRAF F, BEBI P, BAST A, LOUP B ET AL (2019) Schützt der Wald vor Rutschungen? Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank. Schweiz Z Forstwes 170: 310–317. doi: 10.3188/szf.2019.0310

SCHWARZ M, COHEN D, OR D (2012) Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study. Geomorphology 171: 190–200.

SCHWARZ M (2019) Wurzelverstärkung und Hangstabilitätsberechnungen: ein Überblick. Schweiz Z Forstwes 170: 292–302. doi: 10.3188/szf.2019.0292

SIDLE RC, PEARCE AJ, O'LOUGHLIN CL (1985) Hillslope stability and land use. Washington: American Geophysical Union, Water Resources Monograph 11. 140 p.

SIDLE RC, OCHIAI H (2013) Landslides: processes, prediction, and land use. Washington: American Geophysical Union, Water Resources Monograph 18. 312 p.

USBECK T, WALDER P, DOBBERTIN M, GINZLER C, HOFFMAN C ET AL (2012) Relating remotely sensed forest damage data to wind data: storms Lothar (1999) and Vivian (1990) in Switzerland. Theor Appl Climatol 108: 451–462.

VERGANI C, SCHWARZ M, COHEN D, THORMANN JJ, BISCHETTI GB (2014) Effects of root tensile force and diameter distribution variability on root reinforcement in the Swiss and Italian Alps. Can J For Res 44: 1426–1440.

VERGANI C, SCHWARZ M, SOLDATI M, CORDA A, GIADROSSICH F ET AL (2016) Root reinforcement dynamics in subalpine spruce forests following timber harvest: a case study in Canton Schwyz, Switzerland. Catena 143: 275–288.

VERGANI C, WERLEN M, CONEDERA M, COHEN D, SCHWARZ M (2017) Investigation of root reinforcement decay after a forest fire in a Scots pine *(Pinus sylvestris)* protection forest. For Ecol Manage 400: 339–352.

WASER L, FISCHER C, WANG ZY, GINZLER C (2015) Wall-to-wall forest mapping based on digital surface models from image-based point clouds and a NFI forest definition. Forests 6: 4510–4528.

WASER L, GINZLER C (2018) Forest Type NFI. National Forest Inventory (NFI). doi: 10.16904/1000001.3

YILDIZ A, GRAF F, RICKLI C, SPRINGMAN SM (2018) Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus. Catena 166: 98–113.

ZIEMER RR (1981) Roots and the stability of forested slopes. Hydrol Sci Pub 132: 343–361.

Dynamique forestière et glissements de terrain superficiels: une analyse SIG à grande échelle

Par des processus continus et brusques de changement dans la forêt et en particulier dans sa zone racinaire, sa disposition envers les glissements de terrain superficiels change également. Le but de cet article est d'utiliser de vastes bases de données spatiales pour en apprendre davantage sur les relations entre la dynamique forestière à long terme et le risque de glissement de terrain. Au total, 6670 glissements de terrain superficiels ont été sélectionnés à partir du registre des événements naturels StorMe, du registre des événements du canton d'Obwald et de la base de données du WSL sur les glissements de terrain et ont été superposés à des données SIG sur la situation forestière actuelle et passée (cartes Siegfried de 1880 environ) ainsi qu'à des zones de chablis (Vivian et Lothar). A des inclinaisons inférieures à 35°, les glissements de terrain superficiels sont moins fréquents en forêt qu'en dehors de la forêt. A l'intérieur de la forêt, on a enregistré des densités de glissements de terrain plus élevées dans les forêts de conifères et mixtes que dans les forêts de feuillus. De même, la densité des glissements de terrain dans les forêts créées après 1880 était plus élevée que dans les zones qui avaient déjà été boisées avant. Au cours des 3 à 17 premières années suivant le chablis, les glissements de terrain superficiels ont été beaucoup plus nombreux dans les zones de chablis que dans le reste de la forêt, quoique sur des pentes relativement plus raides. Les analyses montrent que la disposition de la forêt vers des glissements de terrain superficiels à l'intérieur d'une zone définie par l'inclinaison de la pente et le sous-sol peut changer considérablement en raison des processus de reboisement et des perturbations naturelles. Les interventions sylvicoles peuvent contribuer à l'amélioration de l'effet protecteur à long terme si elles sont menées avec soin et visent à accroître l'adaptabilité de la forêt aux perturbations naturelles.

Forest dynamics and shallow landslides: a large-scale GIS-analysis

Through continuous and abrupt changes in the forest and particularly in its root area, the disposition for shallow landslides also changes. The aim of this article is to learn more about the relationships between long-term forest dynamics and the risk of landslides with the help of large spatial data sets. A total of 6670 shallow landslides were selected from the natural event register StorMe, the event register of the Canton of Obwalden and the WSL database for shallow landslides and slope debris flows and overlaid with GIS data on the current and former forest situation (Siegfried maps of approx. 1880) and with windthrow areas (Vivian and Lothar). Shallow landslides occurred less frequently in the forest than outside of it at inclinations of less than 35 degrees. Higher landslide densities occurred in coniferous and mixed forests (compared to deciduous forests) and in relatively young forests (ingrown after 1880). Landslides in younger forests occurred on slopes less steep than in older forests. More shallow landslides occurred on former windthrow areas during the first 3 to 17 years after the event, however these landslides occurred on comparatively steep slopes. The analyses show that the disposition towards shallow landslides defined by slope inclination and subsoil can change strongly due to reforestation processes and natural disturbances. Silvicultural interventions may contribute to an improvement of the protective effect in the long term if they are carried out carefully and if they contribute to an increased adaptability to natural disturbances.