

Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse

CHRISTIAN RICKLI, KASPAR ZÜRCHER, WERNER FREY und PETER LÜSCHER

Keywords: Shallow landslides; rainfall; effects of vegetation; land use; forest condition; forest management; natural hazards. FDK 116.1 : 116.2 : 424.1 : 494.121

Abstract: A very heavy thunderstorm in 1997 triggered a great number of shallow landslides near Sachseln in canton Obwalden. 280 of these were analysed in the field. The results show that, among other factors, the condition and structure of the forest considerably influence the stability of steep slopes.

Abstract: Im Feld analysiert wurden 280 oberflächennahe Rutschungen, die 1997 durch ein äusserst starkes Unwetter bei Sachseln, Kanton Obwalden, ausgelöst worden waren. Die Resultate zeigen unter anderem, dass der Zustand und die Struktur des Waldes die Stabilität von abschüssigen Hängen wesentlich beeinflussen.

1. Einleitung

Intensive Regenfälle können in besiedelten Gebieten zu grossen Schäden durch Hochwasser, Überschwemmungen und Ablagerungen von Geschiebe und Schwemmholz führen. In steilen Einzugsgebieten ereignen sich dabei auch Rutsch- und Erosionsprozesse, welche je nach den Verhältnissen zur Intensivierung der Geschiebeführung in den Wildbächen beitragen. Verschiedene Massnahmen dienen dazu, das Ausmass solcher Schäden zu verringern. Zum Beispiel können gefährliche Gebiete gemieden werden, indem die Raumplanung Gefahrenzonen ausscheidet. Da die Siedlungsfläche knapp ist, ist die entsprechende Umsetzung oft schwierig. Deshalb werden zur Gefahrenabwehr in vielen Fällen technische Verbauungen wie Schutzdämme, Geschiebesammler und Wildbachsperrungen geplant und ausgeführt. Weniger häufig setzt man sich mit Massnahmen in der Einzugsgebietsfläche auseinander. Kann beispielsweise die Auslösung von oberflächennahen Rutschungen durch unterschiedliche Wald- und Landnutzungsformen beeinflusst werden? Derartige Massnahmen in den Einzugsgebieten stehen oft im Hintergrund, weil sie im Gegensatz zu technischen Bauwerken wenig spektakulär sind, die Wirkung erst längerfristig erreicht werden kann und die Effizienz dieser Massnahmen bisher wissenschaftlich wenig dokumentiert ist.

Am 15. August 1997 fielen in der Umgebung von Sachseln im Kanton Obwalden extreme Gewitterniederschläge. Die Niederschlagsmenge wurde aufgrund von Radarmessungen im Kerngebiet auf maximal 120 bis 150 mm in zwei Stunden

geschätzt (BWW 1998), was einem Ereignis mit einer Wiederkehrdauer von deutlich über 100 Jahren entspricht. In den Einzugsgebieten der verschiedenen Bäche ereigneten sich auf einer Fläche von rund 20 km² gegen 500 oberflächennahe Rutschungen (Abbildung 1). Diese flossen grösstenteils in Form von Hangmuren bis in die wasserführenden Gerinne und führten dort zu intensivem Geschiebetransport. Die Rückhaltebecken am Kegelhalbs der verschiedenen Bäche waren zum Teil überlastet, und in den besiedelten Gebieten kam es zu verheerenden Geschiebe- und Schwemmholzablagerungen. Die Schadenssumme belief sich auf gegen 120 Millionen Franken (BWW 1999, RÖTHLISBERGER 1998).

Aufgrund der grossen Anzahl Rutschungen auf kleinem Raum bietet das Unwetter vom 15. August 1997 eine einmalige Gelegenheit, die Hangprozesse zu untersuchen und Erkenntnisse über die massgebenden Einflussgrössen zu erarbeiten. Im Frühjahr 1998 wurde an der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Forstdirektion, dem Kanton Obwalden sowie der Gemeinde und der Korporation Sachseln ein Forschungsprojekt in Angriff genommen. Das Ziel bestand in der

- Untersuchung der wichtigsten massgebenden Einflussgrössen auf die Hangstabilität im Falle von extremen Starkniederschlägen,
- der Untersuchung des Einflusses des Waldzustandes und der landwirtschaftlichen Nutzung auf die Rutschaktivität und
- der Evaluation von Massnahmen zur Reduktion der Rutschaktivität in steilen Einzugsgebieten.

Der vorliegende Aufsatz basiert auf dem entsprechenden Projektbericht (RICKLI 2001) und konzentriert sich auf die Ergebnisse zur Wirkung des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse.

2. Zur Rutschungsproblematik

In Sachseln kam es bereits verschiedentlich zu Rutschungen infolge Starkniederschlägen; so unter anderem auch am 10. und 11. August 1984 (HESS 1988). Auch in anderen Regionen der Schweiz ereigneten sich immer wieder Unwetterereignisse mit regional konzentrierten, oberflächennahen Rutschprozessen:

- 1984: Melchtal, Alptal und Gersau (VON WYL 1987, ZELLER & RÖTHLISBERGER 1985)
- 1987: Obergoms, Urserental, Bedretto und Rigi-Nordlehne (JAHN 1991, KIENHOLZ *et al.* 1988, ZELLER & RÖTHLISBERGER 1988)
- 1990: Moléson, Gantrisch und Ybrig (WEBER 1991, RÖTHLISBERGER 1991)
- 1999: verschiedene Regionen in der gesamten Schweiz (AGN 2000)
- 2002: Napf (15./16.7.2002) und Appenzell (31.8./1.9.2002)



Abbildung 1: Rutschungen und ihre Spuren im Gebiet der Alp Bitzlischwand (Sachseln) kurze Zeit nach dem Unwetter (Quelle: Oberforstamt OW).

Figure 1: Landslides and their traces in the mountain area of Bitzlischwand (Sachseln) shortly after the storm (source: Oberforstamt OW).

Im Gebiet der Alpen sind verschiedene Niederschlags-Rutschungsereignisse dokumentiert. Beispielhaft erwähnt seien die Ereignisse in Kärnten (AT) in den Jahren 1966 und 1975 (MOSER 1980), im mittleren Inntal (AT) 1985 (MOSER & SCHOGER 1989), im Veltlin (IT) in den Jahren 1983 und 1987 (POLLONI *et al.* 1991), in Slowenien im Jahr 1989 (FAZARINC & MIKOS 1992) sowie im Piemont (IT) im Jahr 1994 (ALEOTTI *et al.* 1996).

Auch in Zukunft ist mit Schäden durch oberflächennahe Rutschprozesse zu rechnen. Dabei stellt sich die Frage, ob nicht nur die Gefahrenabwehr durch technische Bauwerke im Bereich der Gerinne, sondern auch die Förderung der Vegetationswirkungen in den Einzugsgebieten – zum Beispiel durch forstliche Pflegemassnahmen – zur Reduktion der Schäden durch Hangprozesse beitragen können.

GREENWAY (1987) unterteilt die Wirkungen der Vegetation auf die Hangstabilität in hydrologische und mechanische Wirkungen. Als positive hydrologische Effekte führt er unter anderem die niedrigeren Ausgangsporenwasserdrücke unter Vegetation aufgrund der Interzeption und der Evapotranspiration auf. Negativ wertet er die erhöhte Infiltration aufgrund der in der Regel besseren Durchlässigkeit der Böden unter Vegetation. In Bezug auf die mechanischen Wirkungen weist er insbesondere auf die Armierung des Bodens durch Wurzeln hin. Als weiteren Faktor erwähnt er das Gewicht von Bäumen, das je nach Verhältnissen stabilisierend oder destabilisierend wirken kann. Für das Ausmass der armierenden Wirkung von Wurzeln ist die Art und Mächtigkeit der Bodenhorizonte von grosser Bedeutung. Nach TSUKAMOTO & KUSABA (1984) ist nur dort mit einer stabilitätsrelevanten Verstärkung durch das Wurzelwerk zu rechnen, wo dieses bis unter eine potenzielle Bruchfläche im Boden reicht. Dies ist beispielsweise bei flachgründigen Böden der Fall, wo die Wurzeln bis in den aufgelockerten Fels oder bis in eine tieferliegende, stabile Schicht mit grösserem Reibungswinkel reichen. Keine mechanische Armierung sondern höchstens hydrologische Wirkungen sind nach TSUKAMOTO & KUSABA (1984) dort zu erwarten, wo die Lockergesteinsschicht mächtiger als der Wurzelraum ist. Im Weiteren schützt eine intakte Vegetationsdecke vor Verwitterung des Bodenmaterials und dient der Erhaltung der Scherfestigkeit in tiefer gelegenen Schichten (BÖLL 1983).

In verschiedenen Arbeiten wird versucht, die Vegetationswirkungen zu quantifizieren (SELBY 1993, TSUKAMOTO 1990, HAWLEY & DYMOND 1988, ZIEMER 1981, PRANDINI *et al.* 1977). WU & SIDLE (1997), COLLISON & ANDERSON (1996) sowie SIDLE & TERRY (1992) entwickelten Ansätze, bei denen die Wirkung der Vegetation in die Berechnung der Hangstabilität einbezogen werden kann. Auf Schwierigkeiten bei der Bestimmung der bodenmechanischen Verstärkung durch Wurzeln wird in TOBIAS (1991) eingegangen. Weitere Hinweise in diesem Zusammenhang finden sich in BÖLL & GRAF (2001).

Namentlich in Nordamerika, Australien und Neuseeland wurden diverse Untersuchungen zum Unterschied zwischen der Wirkung der Freiland- und Waldvegetation auf die Hangstabilität durchgeführt. Daraus geht hervor, dass der Wald im Vergleich zum Freiland grundsätzlich einen positiven Einfluss auf die Hangstabilität ausübt (GRAY 1994, SIDLE *et al.* 1985). Die Verhältnisse im Alpenraum sind diesbezüglich schlecht dokumentiert. Ergebnisse aus der Untersuchung von Unweterschäden in Österreich durch MOSER (1980) zeigen, dass der Wald offenbar dazu beitrug, dass weniger kleine Rutschungen entstanden. Der Wald half jedoch nicht, grosse Rutschungen zu verhindern. MOSER & SCHOGER (1989) stellten in einer weiteren Untersuchung fest, dass im Wald eine geringere Anzahl Rutschungen losbrach als im Freiland, jedoch im Bezug auf die in Bewegung geratene Fläche kein nennenswerter Unterschied bestand. Die Erhebungen von Rutschprozessen im Piemont durch ALEOTTI *et al.* (1996) ergab, dass ungefähr

die Hälfte aller Anbrüche im Wald entstanden. Allerdings wird in dieser Publikation der Anteil Waldvegetation im Untersuchungsperimeter nicht berücksichtigt und deshalb ist eine Beurteilung des Waldeinflusses auf die Hangprozesse nicht möglich. FAZARINC & MIKOS (1992) zeigen, dass Waldflächen während extremen Niederschlägen in Slowenien weniger stark betroffen waren als Freilandflächen und zudem Waldrutschungen in vergleichsweise steileren Gebieten losbrachen.

Mit Ausnahme von Erhebungen zur Kahlschlagwirtschaft befassen sich nur wenige Untersuchungen mit dem Einfluss des Waldzustandes oder der Waldbewirtschaftung auf Rutschprozesse. Diese Untersuchungen sind für die vorliegende Arbeit deshalb von Bedeutung, weil in den untersuchten Einzugsgebieten von Sachseln durch Sturmereignisse und Borkenkäferkalamitäten vorgängig auf grossen Flächen Verhältnisse entstanden sind, die sich im weitesten Sinne mit jenen nach einem Kahlschlag vergleichen lassen. Die Untersuchungen von durch Starkregen ausgelösten Hangprozessen in Neuseeland durch O'LOUGHLIN *et al.* (1982) zeigen beispielsweise, dass in Einzugsgebieten mit intensiver Kahlschlagwirtschaft eine massiv erhöhte Rutschaktivität auftrat. JAKOB (2000) kommt für ein untersuchtes Gebiet auf Vancouver Island (Canada) auf ähnliche Ergebnisse. ZIEMER (1981) untersuchte die Entwicklung der Wurzeln und deren Beitrag zur Hangstabilität nach Kahlschlägen im Norden Kaliforniens. Dabei nahm durch die allmähliche Vermorschung der Wurzeln des geschlagenen Bestandes der Beitrag durch die Wurzelarmierung ab, während die aufkommende Verjüngung nach und nach einen grösseren Beitrag leisten konnte. Er zeigt, dass je nach den örtlichen Verhältnissen etwa 5 bis 30 Jahre nach einem Verlust des Altbestandes mit erheblich reduzierter Verstärkung durch Wurzelarmierung zu rechnen ist. Nach WATSON *et al.* (1994) ist das Ausmass der Wurzelverstärkung von der Baumart abhängig. Sie beobachteten in Neuseeland bei *Pinus radiata* und *Kunzia ericoides* deutlich unterschiedlich starkes Wurzelwachstum, unterschiedliche Zugfestigkeiten der Wurzeln und zudem nach Kahlschlag auch unterschiedliche Dauerhaftigkeit bzw. Abbauraten der Wurzeln.

Über den Einfluss der Bestandesstruktur und über die unterschiedliche Wirkung von in der Schweiz heimischen Baumarten auf die Hangstabilität ist bisher nur sehr wenig bekannt. In der Wegleitung «Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion» (BUWAL 1996) werden für jeden Waldstandort bezüglich Baumartenmischung, Gefüge, Stabilitätsträgern und Verjüngung Kriterien festgelegt, welche einen Waldzustand beschreiben, der eine nachhaltige Schutzwirkung erbringen kann. Aufgrund der nur spärlich verfügbaren wissenschaftlichen Untersuchungen orientieren sich die Kriterien an der Annahme, dass die beste Schutzwirkung dann entfaltet werden kann, wenn der Wald dem standortsgerechten Optimalzustand möglichst nahe kommt. Als zusätzliches Kriterium im Zusammenhang mit der Schutzwirkung vor oberflächennahen Rutschungen wurde die Grösse von Bestandeslücken eingeführt.

Für den schweizerischen Alpenraum sind keine Forschungsarbeiten bekannt, bei denen in einem klar abgegrenzten Untersuchungsperimeter alle massgebenden Einflussgrössen auf die Auslösung von oberflächennahen Rutschprozessen interdisziplinär untersucht wurden. Zudem sind allgemein wenige Kenntnisse vorhanden zum Einfluss von Waldzustand und Waldpflege auf die Auslösung von oberflächennahen Rutschungen.

Im vorliegenden Aufsatz werden Ergebnisse aus den Untersuchungen über die oberflächennahen Rutschprozesse von Sachseln dargestellt. Dabei stehen Methode, Resultate und Folgerungen zur Wirkung des Waldzustandes auf die Rutschaktivität im Vordergrund.

3. Untersuchungsgebiet und Vorgehen

3.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst vier hydrologische Einzugsgebiete südöstlich von Sachseln, Kanton Obwalden, über welchen sich am 15. August 1997 das Kerngebiet der Niederschläge befand. Das Gebiet umfasst eine Fläche von insgesamt 8,2 km² und ist zu 50% bewaldet. Es handelt sich um sehr steile Einzugsgebiete zwischen etwa 700 bis 2000 m ü.M. (Abbildung 2).

Das Untersuchungsgebiet befindet sich am nördlichen Alpenrand im Bereich der Helvetischen Decken. Mergelige Gesteine (Amdenermergel, Wildflysch) überwiegen; teilweise befinden sie sich in Wechsellagerung mit Kalkbänken (Drusbergschichten) oder in Verbindung mit Sandsteinen (Gault). Kalkige Einheiten (Seewerkalk, Kieselkalk) kommen dagegen nur spärlich vor. Das Festgestein ist meist von einer geringmächtigen (0,5 bis 2,0 m) quartären Lockergesteinsdecke überlagert und tritt erst ab einer Höhe von 1800 m ü.M. häufiger zutage.

Die Spannweite der Böden reicht von sehr flachgründigen Rendzinen bis zu tiefgründigen Braunerden. Am häufigsten sind flach- bis mittelgründige Rohböden mit einer Kalkgrenze in 20 bis 80 cm Tiefe (Regosole). Ein Viertel aller Bodenprofile ist verbraunt. Die Kalkgrenze, welche in etwas mehr als der Hälfte der Profile aufgeschlossen wurde, liegt in einer Tiefe von durchschnittlich 75 cm. Das Spektrum der Humusformen reicht vom typischen Mull bis zum mullartigen Moder. Grundsätzlich sind die untersuchten Böden bezüglich Wasserdurchlässigkeit im normalen bis leicht gehemmten Bereich einzuordnen (normal: 100 bis 1000 cm pro Tag, leicht gehemmt: 10 bis 100 cm pro Tag). Vereinzelt kommen auch Böden mit Stauwassereinfluss vor. Für eine mögliche baumartenspezifische

Durchwurzelung sind Verdichtungen oder mangelnde Durchlüftungsverhältnisse nur örtlich limitierend.

Wald und Freiland bedecken das Untersuchungsgebiet je ungefähr zur Hälfte. Der Wald stockt vor allem in mittlerer Höhenlage, oberhalb der besiedelten Gebiete und unterhalb der alpwirtschaftlich genutzten Flächen. Die flacheren Partien dieses mittleren Höhenbandes werden vorwiegend als Alpweiden genutzt, während die steilen Hänge sowie die Bachtoebel bewaldet sind. Laubholz- und Mischbestände gehen ab einer Höhe von rund 1100 m ü.M. in überwiegend reine Fichtenwälder über. Die Tanne ist nur schwach vertreten, insbesondere in der hochmontanen Stufe. Dadurch weisen ab der obermontanen Stufe nur wenige Bestände eine naturnahe Baumartenzusammensetzung auf.

Der Wald wurde in der Vergangenheit mehrmals stark in Mitleidenschaft gezogen. Bereits in den Siebzigerjahren entstanden Bestandeslücken, welche sich in der Folge durch Windwurf und Käferbefall zu ausgedehnten Schadenflächen ausweiteten. Durch den Sturm Vivian von 1990 und die nachfolgenden Käferprobleme ist die Lage nochmals verschärft worden. Der Sturm Lothar vom Dezember 1999 führte zu weiteren Schäden im Wald, welche jedoch in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt sind. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen umfassten die Schadenflächen rund 15% der Waldfläche im Untersuchungsgebiet. Sie präsentieren sich heute als Jungwüchse und Dickungen mit zumeist lockerem Schlussgrad. Auf den übrigen Waldflächen herrschen Bestände im älteren Baumholz vor; in den höheren Lagen sind häufig auch stufige Bestände zu finden.

Das nicht bewaldete Gebiet wird zum grössten Teil alpwirtschaftlich genutzt. Die Mehrzahl der Alpen wird mit Grossvieh bestossen. In den obersten Lagen werden teilweise auch Schafe gemässert. Die tiefer gelegenen und meist auch weniger stark geneigten Flächen werden als Mähwiesen genutzt.

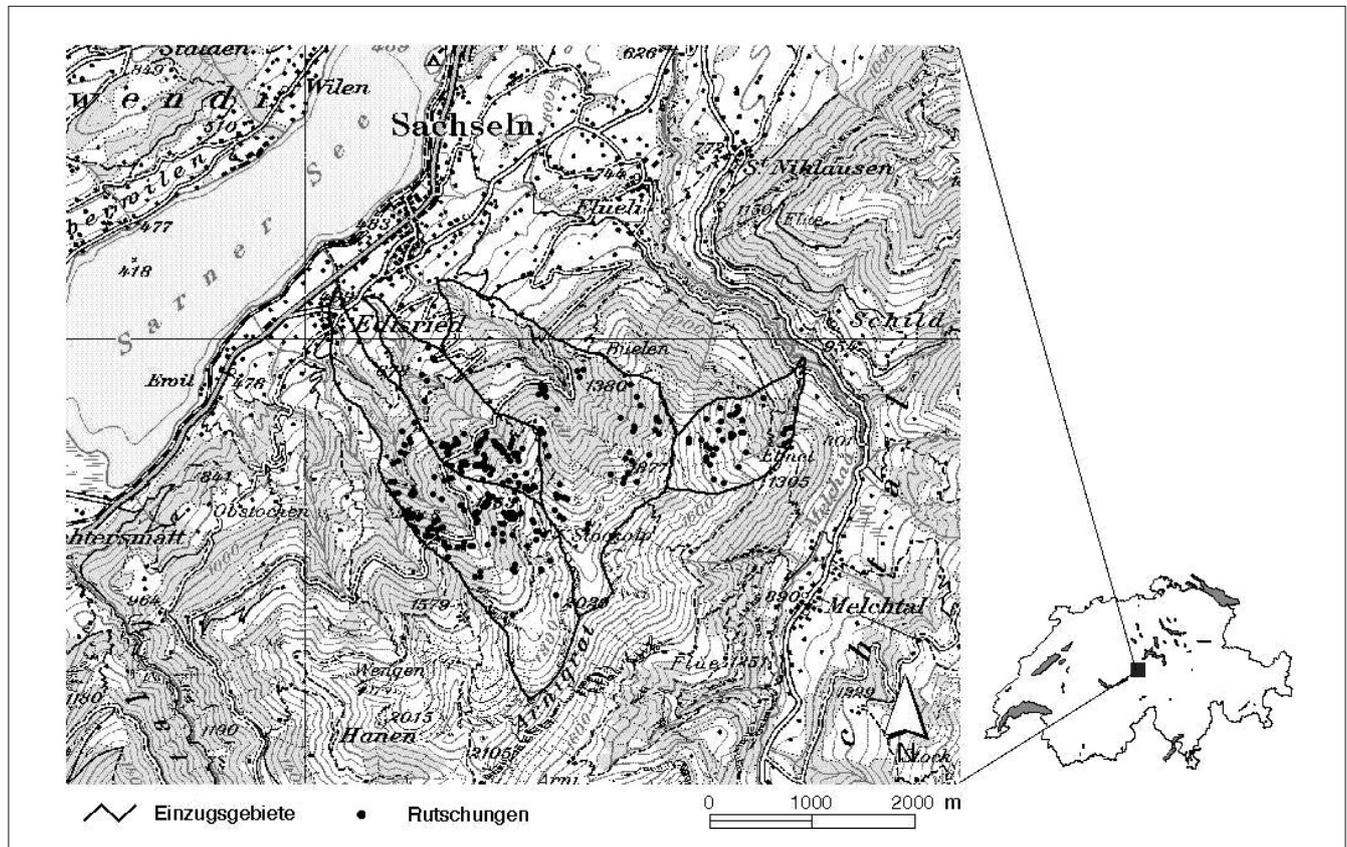


Abbildung 2: Das Untersuchungsgebiet, bestehend aus vier Einzugsgebieten. Die Punkte entsprechen den am 15. August 1997 entstandenen und im Rahmen des Projektes dokumentierten Rutschungen $\geq 20 \text{ m}^3$.

Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie (BA013233).

Figure 2: The investigated area, comprising 4 regions. The points indicate landslides of $\geq 20 \text{ m}^3$ which happened on 15th August 1997.

3.2 Datenerhebung

Innerhalb des klar abgegrenzten Untersuchungsgebietes (*Abbildung 2*) wurden einerseits Daten zu den am 15. August 1997 entstandenen Rutschungen und den dort herrschenden Standortsverhältnissen erfasst (Punktdaten) und andererseits wichtige räumliche Informationen zum gesamten Untersuchungsperimeter zusammengetragen und bearbeitet (Flächendaten). Der Einbezug von Spezialisten der Disziplinen Geologie, Bodenkunde/Standort, Bodenmechanik, Geomorphologie und Gebirgswaldbau bot Gewähr für eine gesamtheitliche Vorgehensweise bei der Datenerhebung und der Interpretation der Ergebnisse.

Punktdaten: Alle Rutschungen im Untersuchungsgebiet mit einem Rutschungsvolumen von mindestens 20 m³ wurden im Feld untersucht und dokumentiert. Da die Hangstabilität von einer Vielzahl von Einflussgrössen abhängt, mussten Daten zu sehr vielen Parametern erhoben werden. Dazu gehörten unter anderem der Zustand und die Bewirtschaftung der Pflanzendecke, die Eigenschaften des Bodens, des Locker- und Festgesteins, die Neigungsverhältnisse sowie Aspekte der Geomorphologie (RICKLI 2001). Diese Erhebungen wurden bei insgesamt 280 Rutschungen durchgeführt (*Abbildung 3*). Als Ergänzung und zur Überprüfung bzw. Eichung der Feldsprache diente die Entnahme und Analyse von Boden- und Lockergesteinsproben (pH, Dichte, Korngrößenverteilung, Plastizitätsgrenzen).

Flächendaten: Für das Untersuchungsgebiet wurden flächenhafte Grundlagen zusammengetragen und in einem geographischen Informationssystem bearbeitet. Zu erwähnen sind insbesondere die Bestandes- und Vegetationskarten, die geologisch-geotechnische Karte sowie das digitale Höhenmodell 10 mal 10 m. Im Weiteren erfolgte eine flächenhafte Beurteilung des Waldzustandes aufgrund von Luftbildern.

3.3 Waldzustandskategorien

Eine der zentralen Projektfragen war jene nach dem Einfluss des Waldzustandes auf die Entstehung der Rutschungen am 15. August 1997 in Sachseln. Zu diesem Zweck wurden unter Berücksichtigung der in *Tabelle 1* aufgeführten Kriterien sogenannte Waldzustandskategorien definiert. Die Definition der Waldzustandskategorien basierte auf verschiedenen Annahmen und Hypothesen. Im Zentrum der Überlegungen stand die Hypothese, dass ein Schutzwald seine Funktion



Abbildung 3: Arbeiten bei den Rutschflächen.

Unter anderem wurde am oberen Anrissrand in einem Profil das Bodenmaterial sowohl bodenkundlich als auch geologisch/geotechnisch beurteilt. Der Waldstandort, verschiedene Bestandescharakteristika und weitere Kriterien wurden auf einer Fläche von ca. 50 mal 50 m im Bereich des oberen Anrissrandes dokumentiert.

Figure 3: Work on the surfaces of the landslides.

gegenüber oberflächennahen Rutschungen dann nachhaltig erfüllen kann, wenn zu jeder Zeit ein gut strukturiertes, tiefgreifendes Wurzelwerk für die Bodenarmierung zur Verfügung steht. Als Voraussetzung dafür wurden in Anlehnung an BUWAL (1996) namentlich ein ausreichender Bestandesschluss, an den Standort angepasste Baumarten und Gefüge sowie eine grosse Bestandesstabilität gegenüber Windwurf und Borkenkäfer angenommen.

Tabelle 1: Auf die Rutschgefährdung bezogene Definition der Waldzustandskategorien «gut», «mässig» und «schlecht». Definition Bestandeslücke: Fläche mit einem Durchmesser grösser als eine halbe Baumhöhe des Altbestandes.

Table 1: Definition of categories of forest condition with regard to the probability of withstanding landslides «good», «medium» and «poor». Definition of stand gaps: an area with a diameter that is wider than half the height of old trees.

Waldzustandskategorie	Kriterien
«gut»	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere bis ältere oder stufige Bestände, d.h. keine Jungwüchse oder Dickungen • Baumarten und Gefüge standortsgemäss (nach <i>Tabelle 2</i>) • Bestandesschluss nicht «aufgelöst» • Anteil Bestandeslücken ≤ 20% der Bestandesfläche
«mässig»	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere bis ältere oder stufige Bestände, d.h. keine Jungwüchse oder Dickungen • aufgelöste Bestände, Anteil Bestandeslücken ≤ 70% der Bestandesfläche
«schlecht»	<ul style="list-style-type: none"> • Schadenflächen durch Windwurf oder Borkenkäfer • Entwicklungsstufe Jungwuchs oder Dichtung • aufgelöste Bestände, Anteil Lücken ≥ 70% der Bestandesfläche

Das Untersuchungsgebiet weist zahlreiche Schadenflächen auf, welche durch Windwurf oder Borkenkäfer entstanden sind. Der überwiegende Anteil der heute vorhandenen grösseren Jungwuchsflächen ist auf diese Ursachen zurückzuführen. Diese Schadenflächen wurden dem «schlechten» Waldzustand gemäss *Tabelle 1* zugeordnet. Zu dieser Klasse wurden neben eigentlichen Schadenflächen auch schwach bestockte Bestände gezählt, die aufgrund des Luftbildes zu mehr als 70% aus grossen Bestandeslücken bestehen. Es wurde davon ausgegangen, dass in ehemaligen Schadenflächen und schwach bestockten Beständen nur eine geringe Verstärkung des Bodens durch Wurzeln vorhanden ist.

Die Abgrenzung zwischen «gutem» und «mässigem» Waldzustand basiert auf den Grundsätzen der Wegleitung «Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion» (BUWAL 1996). Dort sind für jeden Waldstandort und bezüglich der verschiedenen Naturgefahren Kriterien festgelegt, welche den Waldzustand umschreiben, der eine nachhaltige Schutzwirkung erbringen kann. Für die Projektarbeiten mussten diese Kriterien jedoch wesentlich vereinfacht werden. Der Grund liegt darin, dass die Kriterien nicht nur bei jeder Rutschung, sondern auch fotogrammetrisch für das Waldareal des gesamten Untersuchungsgebietes angesprochen werden mussten, wobei anhand des Luftbildes nur die Kriterien Lückenanteil, Baumarten und Gefüge beurteilbar sind. In *Tabelle 2* sind die Anforderungen für die Einteilung in die Waldzustandskategorie «gut» aufgeführt. Sie betreffen die Kriterien Baumart und Bestandesgefüge in Abhängigkeit der Höhenstufe. Zusätzlich zu diesen Anforderungen wurde festgelegt, dass in allen Höhenstufen der Anteil an Lücken,

welche eine halbe Baumlänge übersteigen, nicht mehr als 20% der Bestandesfläche ausmachen darf. Bestände, die diese Bedingungen nicht erfüllen und keine Schadenflächen sind, werden der Zustandskategorie «mässig» zugeordnet. In Ermangelung einer detaillierten standortkundlichen Kartierung wurden die Kriterien nicht wie in BUWAL (1996) für die verschiedenen Vegetationseinheiten, sondern vereinfacht in Abhängigkeit der Höhenstufe formuliert.

Tabelle 2: Höhenstufenabhängige Anforderungen bezüglich Baumarten und Bestandesgefüge für die Einteilung in die Waldzustandskategorie «gut» (Lbh: Laubholz, Ta: Tanne).

Table 2: Tree level dependent requirements, with regard to species and composition of stands, for classification as «good» in forest condition categories (Lbh: deciduous trees, Ta: fir).

Höhenstufe	Baumarten	Bestandesgefüge
untermontan	> 30% Lbh	Einzelbäume oder Kleinkollektive
obermontan	> 40% (Lbh und Ta), > 20% Ta	Einzelbäume oder Kleinkollektive
hochmontan	> 10% Ta	Rotten bis Einzelbäume
subalpin	(keine Anforderungen)	Rotten oder Kleinkollektive

4. Ergebnisse

4.1 Niederschlag, Hangneigung, Volumen der Rutschungen

Die intensivsten Niederschläge fielen nach Auswertung von Radarbildern (BWW 1998) in den mittleren Höhenlagen der Einzugsgebiete. In diesen Gebieten wurde auch die stärkste Rutschaktivität festgestellt (Abbildung 2). Daraus kann ein Zusammenhang zwischen den Niederschlägen und der Auslösung von Rutschprozessen abgeleitet werden. Innerhalb eines etwa gleich stark beregneten Gebietes sind jedoch andere Faktoren dafür verantwortlich, dass an einem Ort eine Rutschung entstand und wenige Meter daneben nicht. Dafür kommen namentlich kleinräumige Unterschiede bezüglich der Neigungsverhältnisse, der Bodenstabilität und der Vegetationsbedeckung in Frage.

STAHR (1991) weist auf die Bedeutung bodenphysikalischer Kenngrößen in Bezug auf die Hangstabilität hin. Aus bodenmechanischen Überlegungen ist im Weiteren insbesondere die Hangneigung von zentraler Bedeutung. Dies zeigt sich auch für die im Untersuchungsgebiet erhobenen Daten. Rutschungen entstanden bei Hangneigungen zwischen 28° und 45° (Abbildung 4). Dieser Neigungsbereich deckt sich mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen (MOSER 1997). Das Fehlen von Rutschungen bei grösseren Neigungen kann zur Hauptsache auf die dort im Vergleich zur Rauigkeit der Felsoberfläche oft nur sehr geringmächtigen und nicht durchgehenden Lockergesteinsdecken ohne nennenswerten Feinanteil zurückgeführt werden. Bei geringeren Neigungen kommt es aufgrund der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Festigkeitseigenschaften nicht zur Rutschungsauslösung.

Die grösste Rutschung umfasst ein Volumen von rund 2500 m³. Ungefähr 80% der Rutschungen weisen ein Volumen von weniger als 200 m³ auf. Das Rutschvolumen und die Hangneigung sind negativ korreliert; d.h. in flacheren Gebieten (≤ 35°) sind signifikant grössere Rutschungen entstanden als in steilen Gebieten mit Neigungen ≥ 39° (Abbildung 5). Dies hängt namentlich damit zusammen, dass in steilen Hanglagen die Lockergesteinsdecken weniger mächtig sind und dort weniger Material abrutschen kann.

4.2 Rutschaktivität und Standortverhältnisse im Wald und im Freiland

Die Rutschaktivität liegt im Freiland bis zu einer Hangneigung von 39° über jener im Wald (Abbildung 4). In steileren Gebieten zeigt sich kein einheitlicher Trend. Das Ergebnis lässt darauf schliessen, dass der Wald in mässig steilen Lagen die Hangstabilität positiv zu beeinflussen vermag. Die Wirkung ist jedoch nicht unbegrenzt: in sehr steilen Gebieten (≥ 40°) unterscheidet sich die Waldwirkung nicht mehr von der Vegetationswirkung im Freiland.

Unterschiede zwischen Freiland- und Waldrutschungen bestehen auch bezüglich den Abmessungen: Waldrutschungen sind signifikant tiefgründiger und umfassen ein grösseres Volumen als Freilandrutschungen (Abbildung 5, Tabelle 3). Im Weiteren nimmt sowohl bei den Freiland- als auch bei den Waldrutschungen das mittlere Volumen mit zunehmender Hangneigung ab.

Im etwas mehr als zur Hälfte bewaldeten Untersuchungsgebiet entstanden im Wald und im Freiland ungefähr gleich viele Rutschungen. Bezogen auf die Fläche sind dies im Wald 0,33 Rutschungen pro Hektare und im Freiland 0,35 Rutschungen (Tabelle 3). Wird zusätzlich das Volumen der einzelnen Rut-

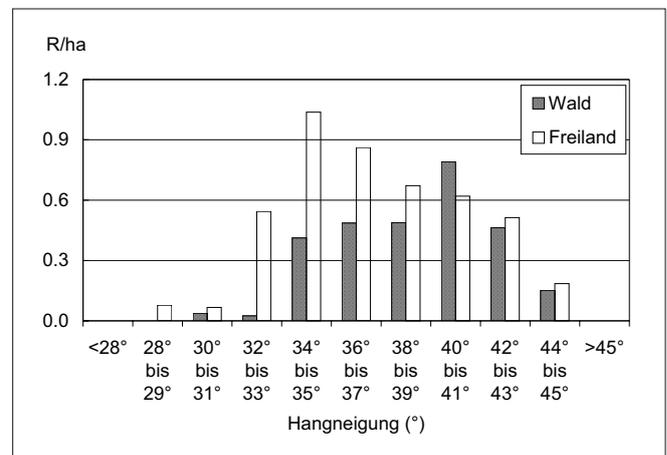


Abbildung 4: Einfluss der Hangneigung (°) auf die Rutschaktivität (R/ha), unterschieden nach Wald und Freiland.

Figure 4: Influence of slope inclination (°) on landslide activity (R/ha), differentiated according to forest or open country.

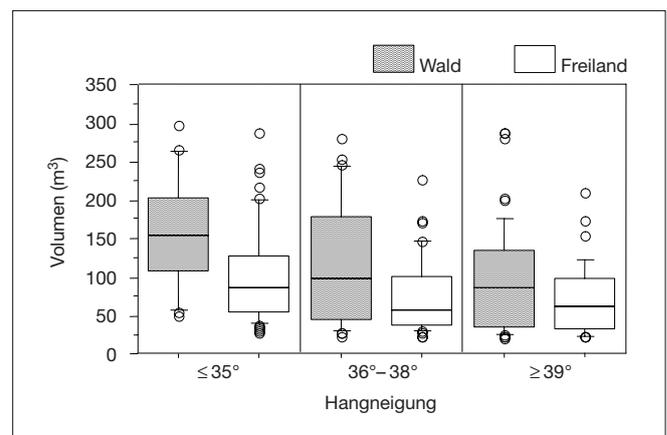


Abbildung 5: Einfluss der Hangneigung und der Vegetation auf das Rutschvolumen (für Rutschungen ≥ 20 m³ und ≤ 300 m³).

Perzentildarstellung: Der untere Rand des Rechtecks bezeichnet das 25-, der obere das 75-Perzentil. Der horizontale Strich dazwischen markiert den Median. Die beiden Balken erweitern den Bereich bis zum 10- bzw. 90-Perzentil. Darüber hinausgehende Werte sind als Kreise eingezeichnet.

Figure 5: Influence of slope inclination and vegetation on landslide volume (for landslides of ≥ 20 m³ and ≤ 300 m³).

Tabelle 3: Angaben zu den Rutschungen und den Verhältnissen im Wald und im Freiland des Untersuchungsgebietes. Für die Auswertungen Volumen pro Fläche wurden die beiden grössten Rutschungen (2000 m³ und 2500 m³, beide im Wald) nicht berücksichtigt.

Table 3: Data on landslides and the conditions of the forest and country in the investigated area. The two biggest landslides (2000 m³ and 2500 m³, both in the forest) were not taken into account in the final analysis.

	Wald	Freiland	Gesamt
Fläche (ha)	414	408	822
Neigung der Fläche, gewichtetes Mittel (°)	37	31	34
Anzahl Rutschungen R (-)	136	144	280
Rutschungen pro Fläche (R/ha)	0,33	0,35	0,34
Mächtigkeit der Rutschungen, Median (m)	1,1	1,0	1,1
Volumen pro Rutschung, Median (m ³)	96	72	86
Volumen pro Fläche, gesamtes Untersuchungsgebiet (m ³ /ha)	48	36	42
* Volumen pro Fläche, nur Hangneigungen 32°–39° (m ³ /ha)	59	86	70
* Volumen pro Fläche, nur Höhenlage 1200–1500 m ü.M. (m ³ /ha)	69	82	74

* Angaben, die zwecks Vergleichbarkeit der Standorte nur für Teile des Untersuchungsgebietes berechnet wurden.

sungen einbezogen, ergibt dies für den gesamten Untersuchungsperimeter eine in Bewegung geratene Rutschungskubatur von 48 m³/ha im Wald und 36 m³/ha im Freiland. Die Angaben in *Tabelle 3* zeigen jedoch, dass im Untersuchungsgebiet wesentliche Unterschiede in den für die Rutschaktivität grundlegenden Faktoren Hangneigung und Beregnung bestehen. Die durchschnittliche Hangneigung liegt im Wald um 6° über dem Wert des Freilandes. Zudem stockt der Wald schwerpunktmässig in mittleren Höhenlagen, wo gemäss Radarbild-Auswertung am meisten Regen fiel. Diese bezüglich wichtigen Standortfaktoren unterschiedlichen, den Wald benachteiligenden Verhältnisse müssen bei einem Vergleich der Rutschaktivität zwischen Wald und Freiland berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurden einerseits nur Gebiete in mittleren Höhenlagen zwischen 1200 und 1500 m ü.M. und andererseits nur Gebiete mit Hangneigungen zwischen 32° und 39° ausgewertet. Mit den diesbezüglich eingeschränkten Daten ergibt sich jeweils im Wald eine geringere Rutschaktivität als im Freiland (*Tabelle 3*), was als Hinweis für eine insgesamt positive Wirkung des Waldes auf die Hangstabilität gewertet werden kann.

Abgesehen von den bereits erwähnten Faktoren Hangneigung und Höhenlage unterscheiden sich die Standortverhältnisse zwischen Wald und Freiland nur unwesentlich. Die Untersuchungen der Böden zeigen, dass das Spektrum der Bodentypen im Wald ähnlich wie im Freiland ist, wobei dort etwas häufiger Rohböden zu finden sind als im Wald. Im Wald kommen etwas mehr Profile mit leicht gehemmter Durchlässigkeit vor, jedoch weniger Profile mit stark gehemmter Durchlässigkeit. Auch die geologischen Aufnahmen ergeben

grundsätzlich auf Wald- und Freilandstandorten ähnliche Verhältnisse. Somit wird die unterschiedliche Rutschaktivität in Wald und Freiland hauptsächlich auf die Faktoren Hangneigung, Höhenlage und Vegetationsbedeckung zurückgeführt.

4.3 Rutschungen und Standortverhältnisse in verschiedenen Waldzustandskategorien

Die in *Tabelle 1* definierten Waldzustandskategorien «gut», «mässig» und «schlecht» unterscheiden sich klar in Bezug auf die Häufigkeit von Rutschungen (*Abbildung 6*). In den Schadenflächen (insbesondere ehemalige Windwurf- und Käferflächen), welche dem «schlechten» Waldzustand zugeordnet wurden, sind im Vergleich zu den übrigen Waldbeständen markant mehr Rutschungen entstanden. Auch zwischen den Zustandskategorien «gut» und «mässig» besteht ein deutlicher Unterschied bezüglich der Rutschaktivität.

Um den Zusammenhang zwischen dem Waldzustand und der Rutschaktivität zu bewerten, sollen nachfolgend die Standortverhältnisse in den verschiedenen Waldzustandskategorien beleuchtet werden. Die mittleren Hangneigungen sind in allen Zustandsklassen vergleichsweise ähnlich bzw. unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (*Tabelle 4*). Die Auswertung von Niederschlags-Radarbildern gibt Hinweise darauf, dass in den mittleren Höhenlagen des Untersuchungsperimeters am meisten Regen fiel. Um diesbezügliche Unterschiede auszugleichen, wurde die Rutschaktivität in den verschiedenen Waldzustandskategorien in einem Höhenbereich zwischen 1200 und 1500 m ü.M. ausgerechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei vergleichbaren Niederschlagssummen wiederum in Beständen mit gutem Zustand am wenigsten und in Beständen mit schlechtem Zustand am meisten Rutschungen pro Fläche entstanden. Im Übrigen zeigen die entsprechenden Werte in *Tabelle 4*, dass die Rutschungen umso grösser sind, je besser der Waldzustand ist.

Der Zusammenhang zwischen der Rutschaktivität und dem Waldzustand ist also nicht auf Unterschiede in der Beregnung oder in den Hangneigungen zurückzuführen. Ebenso wenig dürften die geologischen Verhältnisse ausschlaggebend gewesen sein. Die Auswertungen zeigen nämlich, dass die Zustandskategorien ungefähr ähnliche Flächenanteile mit ungünstigen geologischen Verhältnissen aufweisen. Einzig die Tatsache, dass bei Rutschungen in gutem Waldzustand vergleichsweise wenig Böden mit gehemmter Durchlässigkeit gefunden wurden, könnte zu einer geringeren Rutschaktivität in dieser Kategorie beigetragen haben.

5. Diskussion und Folgerungen

Oft wird dem Wald eine günstige Wirkung auf die Bodenstabilität attestiert. Wissenschaftliche Untersuchungen zu dieser The-

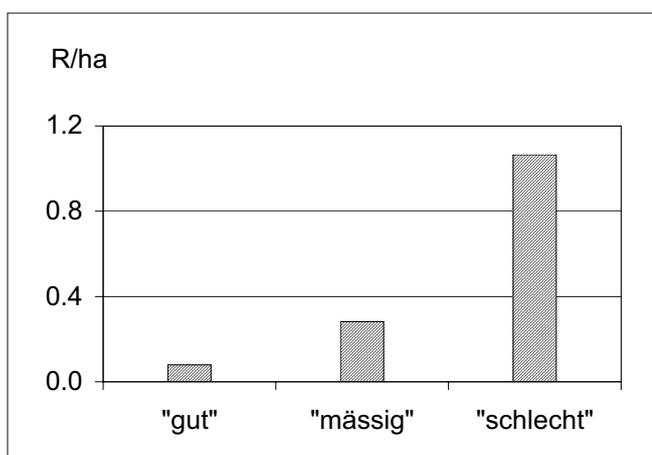


Abbildung 6: Einfluss des Waldzustandes auf die Rutschaktivität (R/ha); Waldzustandskategorien «gut», «mässig» und «schlecht» gemäss *Tabellen 1* und *2*.

Figure 6: Influence of the condition of the forest on landslide activity (R/ha); Categories of forest condition «good», «medium» and «poor» according to *Tables 1* and *2*.

Tabelle 4: Angaben zu den Verhältnissen in den verschiedenen Waldzustandskategorien «gut», «mässig», «schlecht».
Table 4: Data on the ratios in the forest condition categories «good», «medium», «poor».

	Waldzustandskategorien			gesamte Waldfläche
	«gut»	«mässig»	«schlecht»	
Fläche (ha)	163	184	67	414
Neigung der Fläche, gewichtetes Mittel (°)	35,9	37,2	36,7	36,6
Anzahl Rutschungen R (-)	13	52	71	136
Rutschungen pro Fläche (R/ha)	0,08	0,28	1,06	0,33
Mächtigkeit der Rutschungen, Median (m)	1,20	1,15	1,1	1,1
Volumen der Rutschungen, Median (m ³)	126	118	100	114
* Rutschungen pro Fläche, 1200–1500 m ü.M. (R/ha)	0,09	0,36	0,98	0,40
Rutschungen in ungünstiger Geologie** (%)	92	85	86	86
Rutschungen in Böden mit gehemmter Durchlässigkeit (%)	8	41	49	40

* Angaben, die zwecks Vergleichbarkeit der Standorte nur für Teile des Untersuchungsperimeters berechnet wurden.
 ** ungünstige Geologie: Drusbergschichten und Amdenermergel.

matik sind in der Schweiz jedoch kaum ausgeführt worden. Das Unwetter von Sachseln am 15. August 1997 stellte eine gute Gelegenheit dar, die Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse zu untersuchen. Das Untersuchungskonzept stützte darauf ab, eine möglichst grosse Anzahl Rutschungen zu untersuchen. Die Auswertungen der umfangreichen, interdisziplinär erhobenen Felddaten von Sachseln ergaben einige aufschlussreiche Resultate, die nachfolgend diskutiert werden.

Eine erste Auswertung ergab, dass im zur Hälfte bewaldeten Untersuchungsperimeter ungefähr gleich viele Rutschungen im Wald wie im Freiland entstanden. Zudem sind Waldrutschungen im Mittel grösser als Freilandrutschungen. Der Wald kommt jedoch im Untersuchungsgebiet von Sachseln in steileren und zudem stärker berechneten Gebieten vor als das Freiland. Da diese Parameter von grundlegender Bedeutung für die Rutschauslösung sind, muss ein Vergleich zwischen der Wirkung des Waldes auf die Hangstabilität und jener des Freilandes die erwähnten Unterschiede in den Standortverhältnissen berücksichtigen. Werden zu diesem Zweck nur Gebiete mit ähnlichen Hangneigungen und Niederschlagssummen in die Auswertung einbezogen, so ergibt sich im Wald trotz der grösseren Volumina pro Rutschung ein geringeres Rutschvolumen pro Flächeneinheit (Tabelle 3). Dieses Ergebnis wird als Hinweis auf eine positive Wirkung des Waldes auf die Hangstabilität im Fall von durch Starkniederschläge ausgelösten oberflächennahen Rutschungen interpretiert. Bekräftigt wird diese Interpretation dadurch, dass bis zu Hangneigungen von etwa 39° markant weniger Rutschungen im Wald als im Freiland entstanden sind (Abbildung 4). Allerdings weist die Tatsache, dass in noch steileren Lagen kein Unterschied zwischen der Rutschaktivität im Wald und im Freiland gefunden wurde, darauf hin, dass die positive Waldwirkung bei sehr steilen Hängen abnimmt.

Im Fall von Sachseln waren die Rutschungsvolumina auch unter Berücksichtigung der Neignungsverhältnisse im Wald grösser als im Freiland (Abbildung 5). Dieser Sachverhalt wurde auch bei ähnlichen Untersuchungen in anderen Gebieten festgestellt (CROZIER 1986, MOSER 1980). Im Übrigen sind gemäss den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung Rutschungen in Beständen mit «gutem» Zustand grösser als solche in Beständen in «schlechtem» Zustand. Die Ursachen dafür sind wissenschaftlich nicht untersucht. Man kann jedoch vermuten, dass durch eine intensivere Durchwurzelung und damit zunehmend stabilisierendem Effekt der Vegetation einerseits grössere Bodenpakete zusammengehalten werden und andererseits die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Bruches reduziert wird. So bleiben bei mässig starken Niederschlägen die Hänge unter Wald eher stabil als unter Freiland. Durch die selteneren Erosionsprozesse kann sich unter Wald langfristig mehr Material akkumulieren. Wird bei extremen Niederschlägen (wie z.B. in Sachseln) die Grenze der Waldwirkung überschritten, so geraten im Wald grössere Kubaturen «en bloc» ins Rutschen als im Freiland.

Der Zustand des Waldes wirkte sich nach den vorliegenden Ergebnissen deutlicher als erwartet sowie auch stärker als der Waldanteil auf die Rutschaktivität in den Einzugsgebieten aus. Besonders stark von Rutschungen betroffen sind durch Windwurf oder Borkenkäfer entstandene Schadenflächen, welche dem «schlechten» Waldzustand zugeteilt wurden (Abbildung 6). Stellt man den Aspekt der Bodenarmierung durch Wurzeln in das Zentrum der Diskussion, dürfte der Grund für dieses Ergebnis darin liegen, dass die Wurzeln des ehemaligen (geschädigten) Bestandes im Verlauf der Zeit vermorschen und der langsam aufkommende Jungwald erst nach einigen Jahren ein den Boden stabilisierendes Wurzelwerk ausbilden kann. Dieser Zusammenhang wurde für den Fall von Kahlschlägen auch von ZIEMER (1981) festgestellt. Daraus kann abgeleitet werden, dass sich einige Jahre nach Bestandeschäden in vielen Fällen eine für die Hangstabilität kritische Phase einstellt. Verschiedene Beobachtungen wie zum Beispiel auch die Entwicklung von Vivian-Sturmflächen (GERBER *et al.*, in Vorbereitung) stützen diese These. Auch zwischen «gutem» und «mässigem» Waldzustand sind Unterschiede bezüglich Rutschaktivität festgestellt worden. In Abhängigkeit der Klassierungskriterien für diese beiden Zustandskategorien bedeutet dies, dass sich die Schutzwirksamkeit gegenüber oberflächennahen Hangbewegungen verringert mit zunehmendem Anteil Bestandeslücken, mit zunehmendem Abweichen von einer standortgerechten Baumartenverteilung und einem standortgerechten Bestandesgefüge. Dies lässt sich einerseits dadurch begründen, dass in den Bestandeslücken die Bodenarmierung durch Baumwurzeln weniger ausgeprägt ist oder fehlt. Andererseits bedeutet eine standortgerechte Baumartenverteilung im untersuchten Gebiet ein auf Kosten der Fichte verstärktes Vorkommen von Laubholz und Tanne, welche ein tiefergreifendes Wurzelwerk ausbilden.

Die Ergebnisse aus der Untersuchung von Sachseln zeigen, dass der Wald gegenüber dem Freiland die Hangstabilität mehrheitlich verbessert. Als vorsorgliche Massnahme zur Reduktion von Schäden durch Rutschprozesse wird es in der Schweiz nur in seltenen Fällen um die Frage gehen, ob Freilandflächen aufgeforstet werden sollen. Denn grundsätzlich wird eine Vergrösserung der Waldfläche nicht angestrebt, und der Waldwirkung in sehr steilen Hanglagen sind Grenzen gesetzt. Zudem kann die angestrebte, stabilisierende Wirkung erst nach Jahrzehnten erreicht werden. Das zentrale und für die Praxis relevanteste Ergebnis der Untersuchung besteht darin, dass die Rutschaktivität umso geringer war, je besser der Zustand des Waldes beurteilt wurde. Dies weist auf die Bedeutung von waldbaulichen Massnahmen hin, welche die Entwicklung des Waldes gezielt lenken, um dessen Zustand zu verbessern. Dazu gehört einerseits die Wiederherstellung von Schadenflächen mit standortsgemässen Baumarten. Andererseits sind die nachhaltige Förderung der Stabilität der Bestän-

de gegenüber Sturmwürfen oder Borkenkäferkalamitäten sowie die laufende Verjüngung als Vorbeugung gegenüber den letztlich nicht vermeidbaren Bestandsschäden wichtig. Im Weiteren bewirkt – wo es vom Standort her möglich ist – die Förderung von Tanne und Laubholz eine intensivere Durchwurzelung. Zielvorstellung bei den pflegerischen Eingriffen ist der Idealzustand gemäss der Wegleitung «Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion» (BUWAL 1996).

Guter Waldzustand (gemäss *Tabelle 1*) bedeutet auch gut ausgebildetes Wurzelwerk und damit grösst mögliche Armierungswirkung durch die Durchwurzelung unter den gegebenen standörtlichen Voraussetzungen. Zudem ergeben sich durch die biologische Entwässerungswirkung – je nach Witterungsverlauf – im Rahmen der verfügbaren Wasserspeicherkapazitäten günstigere Ausgangswassergehalte. Nachhaltig kann dieser Zustand durch waldbauliches Handeln erhalten bleiben, wenn die Regulierung der Naturverjüngung kleinflächig gelingt. Die biologisch aktiven Humusformen des Untersuchungsgebietes bilden dafür günstige Voraussetzungen.

Letztlich muss jedoch auch auf die Grenzen der Vegetations- bzw. Waldwirkung hingewiesen werden. In sehr steilen Lagen zeigte sich kein Unterschied mehr bezüglich der Rutschaktivität in Wald und Freiland. Zudem ist offensichtlich, dass der Einfluss der Vegetation mit zunehmender Mächtigkeit der Rutschung abnimmt und somit der Wald bei den grossen Rutschungen, wo die Bruchfläche unterhalb des durchwurzelbaren Bodens liegt, seine Wirkung nicht entfalten kann. Bei Rutschungen mit Mächtigkeiten > 2 m beschränkt sich die Vegetationswirkung somit auf hydrologische Effekte, indem sich beispielsweise unter geeigneter Vegetation weniger schnell gefährliche Porenwasserdrücke aufbauen. Im Weiteren kann man davon ausgehen, dass die Auswirkungen der Vegetation mit zunehmender Intensität und Dauer der Niederschläge abnehmen. Bei starker Belastung durch sehr extreme Niederschläge kann auch eine die Stabilität fördernde Vegetation nur noch beschränkte Wirkung entfalten, und es wird immer wieder zu Rutschprozessen kommen. Schliesslich muss auf die bekannten Tatsachen hingewiesen werden, dass sich waldbauliche Massnahmen erst langfristig auswirken und dass Windwürfe und Borkenkäferkalamitäten langjährige Bemühungen zunichte machen können. Trotz all diesen Einschränkungen geben die vorliegenden Ergebnisse einen Hinweis darauf, dass mit waldbaulichen Pflegemassnahmen ein wesentlicher Beitrag zur Förderung der Sicherheit gegenüber oberflächennahen Rutschungen geleistet werden kann.

Zusammenfassung

Im Verlaufe eines Starkniederschlags ereigneten sich am 15. August 1997 in Sachseln, Kanton Obwalden, auf einer Fläche von ungefähr 20 km² gegen 500 oberflächennahe Rutschungen. Anhand dieses Unwetterereignisses wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL die Ursachen der Rutschauslösung und damit auch die Auswirkungen unterschiedlicher Wald- und Landnutzungsformen auf die Rutschaktivität untersucht. Zu diesem Zweck wurden 280 oberflächennahe Rutschungen nach einem einheitlichen Vorgehen im Feld analysiert. Sowohl geologisch-geotechnische Parameter als auch boden- und vegetationskundliche Aspekte wurden einbezogen. Der Aufsatz behandelt schwerpunktmässig die Wirkung des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. Die Auswertungen zeigen, dass bei bezüglich Hangneigung und Höhenlage vergleichbaren Standorten im Wald insgesamt geringere Volumina in Bewegung geraten sind. Zudem konnte ein deutlicher Einfluss des Waldzustandes auf die Rutschaktivität festgestellt werden. In Wäldern mit wenig Lücken, standortgemässen Baumarten

und einer vielfältigen Struktur entstanden kaum Rutschungen. Deutlich mehr Rutschungen pro Flächeneinheit ereigneten sich in Wäldern, die sich in schlechterem Zustand befanden, also beispielsweise viele Lücken aufwiesen. Sehr viele Rutschungen entstanden schliesslich in Wäldern, die durch Sturm oder Borkenkäfer stark geschädigt waren. Waldbauliche Massnahmen sollen deshalb Bestände mit nachhaltig möglichst stabilem Bestandesaufbau, standortsgemässer Baumartenverteilung sowie ausreichenden Verjüngungsansätzen fördern.

Summary

Effects of forest on landslides

On the 15th of August 1997 an extremely heavy thunderstorm triggered nearly 500 shallow landslides over an area of about 20 km² near Sachseln, Canton Obwalden. This event provided a unique opportunity to investigate the effects of different types of forest management and land use on landslide activity. In a research project of the Swiss Federal Research Institute WSL, 280 of these shallow landslides were analysed in the field following a standardised protocol. The investigation included geological and geotechnical parameters as well as specific aspects of soil and vegetation. This article focuses on the influence of the forest on shallow landslides. The results show that, on stands with comparable slope inclination and rainfall input, less soil material moved in the forest than in open country. In addition, the condition of the forest was found to have affected the landslide activity. Hardly any slides occurred on stands where the site had adapted tree species, few gaps and a diverse stand structure. Markedly more slides were triggered off on stands in less favourable condition, e.g. with a lot of gaps. Finally, a great number of slides occurred on stands damaged by windthrow or bark beetles. The findings indicate that silvicultural measures which promote a sustainable and stable stand structure, tree species adapted to the stand and sufficient regeneration can help to reduce the activity of shallow landslides.

Résumé

Influence de la forêt sur les glissements de terrain superficiels

Sous l'effet d'une intense pluie d'orage, près de 500 glissements de terrain se sont produits le 15 août 1997 à Sachseln, dans le canton d'Obwald, sur une surface d'environ 20 km². Cet événement a incité l'Institut fédéral de recherches WSL à mettre en œuvre un projet de recherche afin d'étudier les causes du déclenchement de glissements et donc les effets des diverses formes d'utilisation de la forêt et du territoire sur l'activité de glissement. L'étude porte sur 280 glissements superficiels analysés sur le terrain selon une méthode uniformisée. Tant les paramètres géologiques et géotechniques que les aspects pédologiques et phytosociologiques ont été pris en compte. Le présent article traite principalement de l'influence exercée par la forêt sur les processus du glissement superficiel. Les résultats montrent que pour des sites présentant une déclivité et une altitude comparables, des volumes globalement plus faibles se sont mis en mouvement dans les stations forestières. Il a également été constaté que l'état de la forêt exerce une influence notable sur l'activité de glissement. Dans les forêts peu ouvertes, très structurées et composées d'essences adaptées à la station, le terrain s'est rarement mis à glisser. Les glissements ont été plus fréquents dans des forêts en mauvais état, présentant par exemple de nombreux vides. Ils ont été les plus considérables dans des forêts gravement endommagées par les tempêtes ou les bostryches. Il en découle que les interventions sylvicoles doivent favoriser des structures assurant une stabilité durable des peuplements, les essences adaptées à la station ainsi que de la régénération en suffisance.

Literatur

- AGN (Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren) (2000): Ursachenanalyse der Hanginstabilitäten 1999. *Bull. Angew. Geol.* 5: 3–152.
- ALEOTTI, P., BALDELLI, P., POLLONI, G. (1996): Landsliding and flooding event triggered by heavy rains in the Tanaro basin (Italy). *Proc. Int. Symp. Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen, Vol. 1: 435–446.*
- BÖLL, A. (1983): Lebendverbau bei der Sanierung von steilen Hängen. *Schweiz. Z. Forstwes.* 134 (3): 167–177.
- BÖLL, A., GRAF, F. (2001): Nachweis von Vegetationswirkungen bei oberflächennahen Bodenbewegungen – Grundlagen eines neuen Ansatzes. *Schweiz. Z. Forstwes.*, 152 1: 1–11.
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (1996): Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion – Wegleitung. Reihe Vollzug Umwelt, 40 S. + Anh.
- BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft) (1998): Ereignisdokumentation Sachseln – Unwetter vom 15. August 1997. Studienbericht Nr. 8/1998, 48 S. + Anh.
- BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft) (1999): Schadenanalyse Sachseln - Ergänzungsbericht zur Ereignisdokumentation Sachseln. Unwetter vom 15. August 1997, 16 S. + Anh.
- COLLISON, A.J.C., ANDERSON, M.G. (1996): Using a combined slope hydrology/stability model to identify suitable conditions for landslide prevention by vegetation in the humid tropics. *Earth surface-processes and landforms, Vol. 21: 737–747.*
- CROZIER, M.J. (1986): *Landslides, Causes and Environment.* Croom Helm, London, 252 p.
- FAZARINC, R., MIKOS, M. (1992): Feststoffmobilisierung als Folge der extremen Niederschläge in Slowenien. *Proc. Int. Symp. Interpraevent 1992, Bern, Vol. 1: 377–388.*
- GERBER, W., RICKLI, C., GRAF, F. (in Vorbereitung): 10 years windthrow research after Vivian 1990. *For. Snow Landsc. Res.*
- GRAY, D.H. (1994): Influence of vegetation on the stability of slopes. In: *Vegetation and Slopes: Stabilisation, Protection and Ecology, International Conference.* Institution of Civil Engineers, London: 1–23.
- GREENWAY, D.R. (1987): Vegetation and slope stability. In: Anderson, M.G., Richards, K.S. (Eds.): *Slope Stability: geotechnical engineering and geomorphology.* Wiley, Chichester, 231–242.
- HAWLEY, J.G., DYMOND, J.R. (1988): How much do trees reduce landsliding? *J. of Soil and Water Conservation* 43 (6): 495–498.
- HESS, J. (1988): Sanierungskonzept Sachslers Wildbäche. Kanton Obwalden, Gemeinde Sachseln (unveröff.).
- JAHN, J. (1991): Ursachenanalyse Hochwasser, Teilprojekt Oberflächenerosion. Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft 4: 67–70.
- JAKOB, M. (2000): The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia. *Catena* 38: 279–300.
- KIENHOLZ, H., KLÄY, M., MANI, P. (1988): Naturgefahren an der Rigi-Nordlehne. *Mitteilungen der naturforschenden Gesellschaft Luzern* 30: 309–321.
- MOSER, M. (1980): Zur Analyse von Hangbewegungen in schwachbindigen bis rolligen Lockergesteinen im alpinen Raum anlässlich von Starkniederschlägen. *Proc. Int. Symp. Interpraevent 1980, Bad Ischl, Vol. 1: 121–148.*
- MOSER, M. (1997): Zur Prognose von Massenbewegungen. *Eclogae Geol. Helv.* 90: 381–391.
- MOSER, M., SCHOGER, H. (1989): Die Analyse der Hangbewegungen im mittleren Inntal anlässlich der Unwetterkatastrophe 1985. *Wildbach- und Lawinenverbau* 531(10): 1–22.
- O'LOUGHLIN, C.L., ROWE, L.K., PEARCE, A.J. (1982): Exceptional Storm Influences on Slope Erosion and Sediment Yield in Small Forest Catchments. North Westland, New Zealand. *Proc. First National Symp. on Forest Hydrology, Melbourne, 1982: 84–91.*
- POLLONI, G., CERIANI, C., LAUZI, S., PADOVAN, N., CROSTA, G. (1991): Rainfall and soil slipping events in Valtellina. *Proc. 6th Int. Symp. on Landslides* 1: 183–188.
- PRANDINI, L., GUIDICINI, G., BOTTURA, J.A., PONÇANO, W.L., SANTOS, A.R. (1977): Behaviour of the Vegetation in slope stability: a critical review. *Bull. Intern. Ass. of Engineering Geology* 16: 51–55.
- RÖTHLISBERGER, G. (1991): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1987. «wasser, energie, luft» 83 (3/4): 65–70.
- RÖTHLISBERGER, G. (1998): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1997. «wasser, energie, luft» 90 (1/2): 17–24.
- RICKLI, C. (Red.) (2001): *Vegetationswirkungen und Rutschungen – Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997.* Birmensdorf, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 97 S.
- SELBY, M.J. (1993): *Hillslope Materials and Processes.* Second edition, Oxford University Press, Oxford, 451 p.
- SIDLE, R.C., TERRY, P.K. (1992): *Shallow landslide analysis in terrain with managed vegetation.* IAHS-Publ. No. 209: 289–298.
- SIDLE, R.C., PEARCE, A.J., O'LOUGHLIN, C.L. (1985): *Hillslope Stability and Land Use.* American Geophysical Union. *Water Resources Monograph* 11, 140 p.
- STAHR, A. (1991): Bopdenphysikalische Ursachen von Waldanbrüchen im Zentralalpinen Raum. *Allg. Forst- Jagdztg.* 162 (8): 150–154.
- TOBIAS, S. (1991): Bautechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Boden und Wurzel. *Diss. ETH Zürich Nr. 9483, 135 S.*
- TSUKAMOTO, Y. (1990): Effect of vegetation on debris slide occurrences on steep forested slopes in Japan islands. *IAHS-Publ. No. 192: 183–191.*
- TSUKAMOTO, Y., KUSABA, O. (1984): Vegetative Influences on debris slide occurrences on steep slopes in Japan. *Proc. Symp. on effect of forest land use on erosion and slope stability in Honolulu, Hawaii, USA, May 1984: 63–72.*
- VON WYL, B. (1987): Beitrag naturnaher Nutzungsformen zur Stabilisierung von Ökosystemen im Berggebiet, insbesondere zur Verhinderung von Bodenerosion. *Schweiz. Landw. Forschung* 26 (4): 405–464.
- WATSON, A., MARDEN, M., ROWAN, D. (1994): Tree species performance and slope stability. In: *Vegetation and Slopes: Stabilisation, Protection and Ecology, International Conference.* Institution of Civil Engineers, London: 161–189.
- WEBER, B. (1991): Analyse de glissements, estimations des dangers et proposition d'assainissements sur certaines surfaces de la région du Moléson, canton de Fribourg. *Diplomarbeit an der Professur Forstliches Ingenieurwesen der ETH-Zürich (unveröff.).*
- WU, W., SIDLE, R.C. (1997): Application of a distributed shallow landslide analysis model (dSLAM) to managed forested slopes in Oregon, USA. *IAHS-Publ. No. 245: 213–221.*
- ZELLER, J., RÖTHLISBERGER, G. (1985): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1984. «wasser, energie, luft» 77 (3/4): 65–70.
- ZELLER, J., RÖTHLISBERGER, G. (1988): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1987. «wasser, energie, luft» 80 (1/2): 29–42.
- ZIEMER, R.R. (1981): Roots and the stability of forested slopes. *Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands.* IAHS Publ. No. 132: 343–361.

Dank

Die Untersuchungen wurden unterstützt durch ein Projektteam, welches sich neben den Autoren zusammensetzte aus W. Ammann, A. Böll, C. Hegg, D. Rickenmann, P. Thalparan und P. Zimmerli (alle WSL) sowie R. Wyss (Büro Dr. H. Jäckli AG). Wichtige Grundlagen stellte die kantonale Verwaltung Obwalden zur Verfügung. Ein Teil der Projektkosten wurde durch Beiträge des Buwal, des Kantons Obwalden sowie der Gemeinde und der Korporation Sachseln getragen.

Autoren

CHRISTIAN RICKLI, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf. E-Mail: christian.rickli@wsl.ch.
 KASPAR ZÜRCHER, IMPULS Forstingenieure ETH/SIA und Umweltfachleute SVU, Seestrasse 2, 3600 Thun. E-Mail: zuercher@impulsthun.ch.
 WERNER FREY, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Flüelastrasse 11, 7260 Davos-Dorf. E-Mail: frey@slf.ch.
 Dr. PETER LÜSCHER, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf. E-Mail: peter.luescher@wsl.ch.