

**Zeitschrift:** Bulletin für angewandte Geologie

**Band:** 8 (2003)

**Heft:** 2

**Artikel:** Durch den Wolkenbruch vom 6./7. Juni 2002 ausgelöste gravitative Prozesse am Sonnenberg bei Luzern : Ereignisse, Simulationen und Beurteilungen

**Autor:** Keller, Beat

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-224299>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 07.10.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Durch den Wolkenbruch vom 6./7. Juni 2002 ausgelöste gravitative Prozesse am Sonnenberg bei Luzern: Ereignisse, Simulationen und Beurteilungen Beat Keller<sup>1</sup>

**Keywords:** Rutschung Murgang Waldschäden Lothar Wolkenbruch Starkniederschlag Stabilitätsanalyse Risikoanalyse Gefahrenkarte Präventionsmassnahmen

## Zusammenfassung

In der Nacht vom 6./7. Juni 2002 ging westlich von Luzern ein Wolkenbruch nieder, der an der Nordabdachung des Sonnenbergs insgesamt 28 Rutschungen und Murgänge starker Intensität auslöste. Von den 28 aufgezeichneten gravitativen Sedimentbewegungen entsprangen  $\frac{3}{4}$  Windwurfflächen der Orkane Vivian und Lothar. In Zusammenhang mit der Gefahrenkartierung wurde der stabilitätsvermindernde Einfluss der Waldschäden untersucht und dessen relevante Bedeutung mit dem Stabilitätsmodell LISA (Level I Stability Analysis) nachgewiesen, dessen Methodik in seinen Grundzügen vorgestellt wird. Es wird gezeigt, dass stochastische Risikoanalysen bei ähnlicher Problematik wertvolle Grundlagen für Gefahrenkarten liefern können. Abschliessend werden wichtige risikominierende Massnahmen nach flächigem Windwurf diskutiert.

## Resumé

Dans la nuit du 6 au 7 juin 2002, un orage s'est déclaré à l'Ouest de Lucerne, provoquant sur le versant Nord du Sonnenberg 28 glissements et coulées boueuses de forte intensité. Sur ces 28 mouvements de terrain, les  $\frac{3}{4}$  se sont produits sur des surfaces forestières ravagées par les ouragans Viviane et Lothar. En liaison avec la cartographie et l'évaluation des dangers, l'influence défavorable des dégâts aux forêts a été intégrée dans le calcul de stabilité LISA (Level I Stability Analysis), appliqué pour ce cas. Il a pu être ainsi démontré que l'analyse stochastique de risques dans cette problématique peut apporter de précieuses données de base complémentaires pour l'établissement des cartes de danger. En conclusion, des mesures d'atténuation du risque sont proposées pour les surfaces de chablis.

## 1. Einleitung

Ausgelöst durch die Wolkenbrüche in der Nacht vom 6. auf den 7. Juni 2002 ereigneten sich an der Nordabdachung des Sonnenbergs westlich von Luzern insgesamt 28 Rutschungen und Murgänge starker Intensität, die teilweise die viel befahrene Kantonsstrasse Littau/Malters-Kriens überschütteten (Fig. 1). Die Schadenstellen der Hauptstrasse wurden repariert und der Hang im Einzugsgebiet der Strasse gesichert. Auffallend war, dass von den 28 aufgezeichneten gravitativen Massenbewegungen  $\frac{3}{4}$  Windwurfflächen entsprangen.

In Anbetracht der vorliegenden Risiken sowie der zu erarbeitenden Gefahrenkarte wurde nach Möglichkeiten einer genaueren Abschätzung des potentiellen Versagens des

Hanges gesucht, mit denen auch der stabilitätsmindernde Einfluss des geschädigten Waldes charakterisierbar ist.

Für diese Fragestellung bietet sich das Stabilitätsmodell LISA (Level I Stability Analysis) von Hammond et al. (1992) an, das vom amerikanischen Forstdienst USDA zur Risikoanalyse der Auswirkungen von Rodungen sowie zur forstlichen Planung entwickelt wurde (siehe Kap. 4.2).

Der vorliegende Artikel hat folgende Zielsetzung:

- Darstellung der Ereignisse und der getroffenen Sicherungs- und Sanierungsmassnahmen.
- Charakterisierung der Grunddisposition des Hanges und der auslösenden Wolkenbrüche.
- Vorstellung und Beurteilung des Stabilitätsmodells LISA an Hand einer Simulation für die Nordabdachung des Sonnenbergs.

<sup>1</sup> Mengis + Lorenz AG, Schlossstrasse 3, 6005 Luzern; beat.keller@mengis-lorenz.ch.

– Anwendbarkeit und Auswirkungen der Resultate für die Gefahrenkartierung.

– Hinweise zur Minderung von Risiken gravitativer Massenbewegungen aus windwurfgeschädigten Waldpartien.



Fig. 1: Düninflüssige Murgangablagerungen (Mure Nr. 1 im Vordergrund, Mure Nr. 2 im Hintergrund) mit viel Sturmholz auf der viel befahrenen Kantonsstrasse Littau/Malters-Kriens.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Geologisch-geomorphologische Verhältnisse

Die Rutschungen und Murgänge des Ereignisses vom 6./7. Juni 2002 ereigneten sich an der Nordabdachung des Sonnenbergs, dessen mittlere Hangneigung von West nach Ost von  $33^\circ$  bis auf  $39^\circ$  zunimmt. Das im oberen Hangbereich konvexe und im unteren Teil konkave Geländeprofil hat im Übergang konvex/konkav maximale Hangneigungen von  $45^\circ$  und am konkaven Hangfuss von  $36^\circ$  (Fig. 2).

Der **Felsuntergrund** wird der Oberen Meeresmolasse zugerechnet. Der anstehende Gesteinsverband besteht aus harten, feinkörnigen Sandsteinen mit wenigen Siltstein-Einschaltungen, die mehr oder weniger parallel zur Hügelkrete streichen und mit  $70^\circ$  bis  $80^\circ$  Neigung steil überkippt bergwärts einfallen. Die Verwitterungszone des Felsens ist geprägt von einer oberflächenparallelen Entlastungsklüftung, die Felsoberfläche selber ist oft glazial abgeschliffen und eben.

Die **Lockergesteinsbedeckung** ist meist zwischen 0,5 bis 2,5 m mächtig; lokal ist sie erodiert oder in Muldenbereichen auch mächtiger.

ger. Es handelt sich dabei um tonige, stark siltige Sande (USCS-Klassifikation SC-ML bis SM-ML, Fig. 3). Dieses Kolluvium entstand durch spätglaziale Solifluktion und nacheis-

zeitliches Bodenkriechen sowie Hangabspülungen – teils aus dem verwitterten Anstehenden, teils aus umgelagerter Grundmoräne.

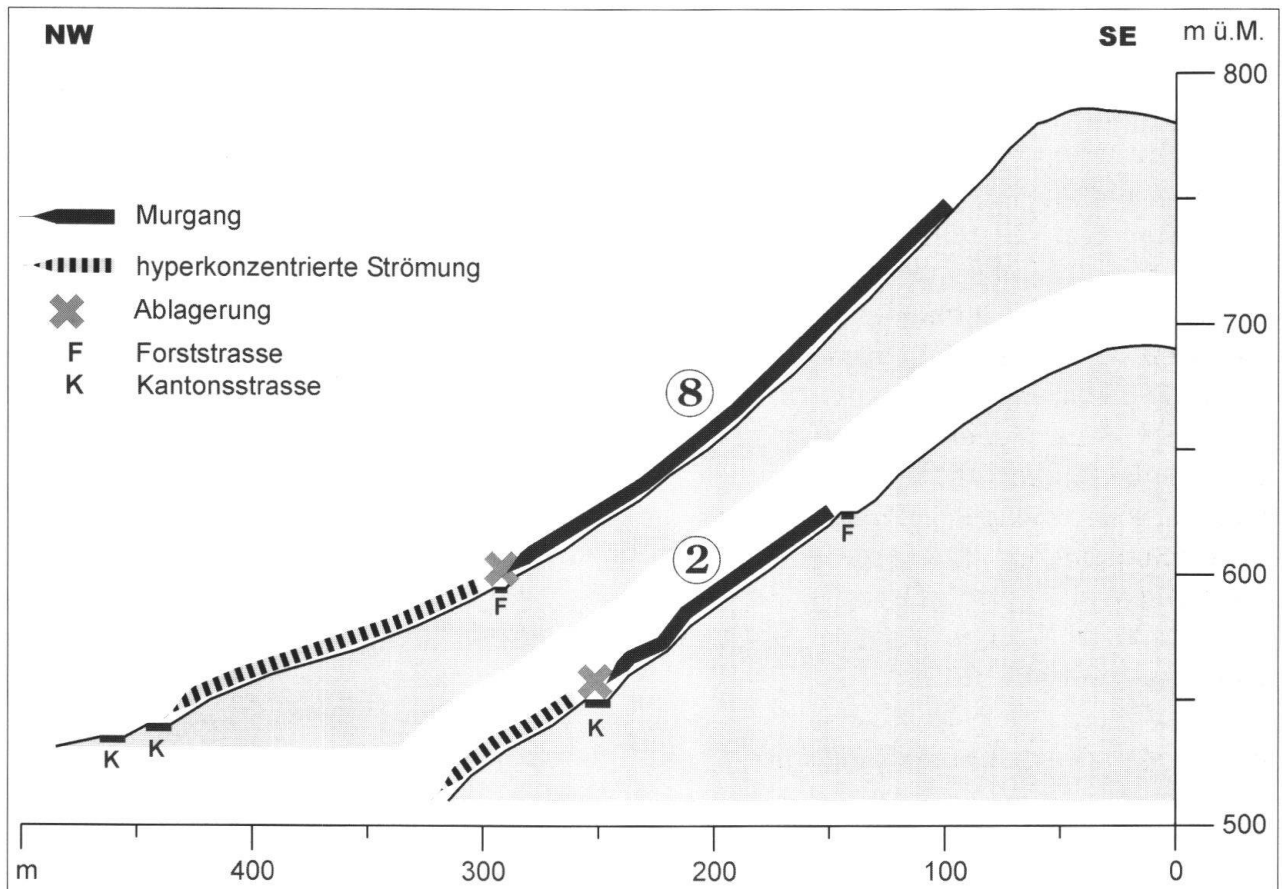


Fig. 2: Geländeprofile entlang der Muren Nr. 2 und Nr. 8. Bei den Geländeknicken der Strassen erfolgte meist eine teilweise Sedimentation, so dass sich der Rest als hyperkonzentrierte Strömung weiter talwärts ergoss.

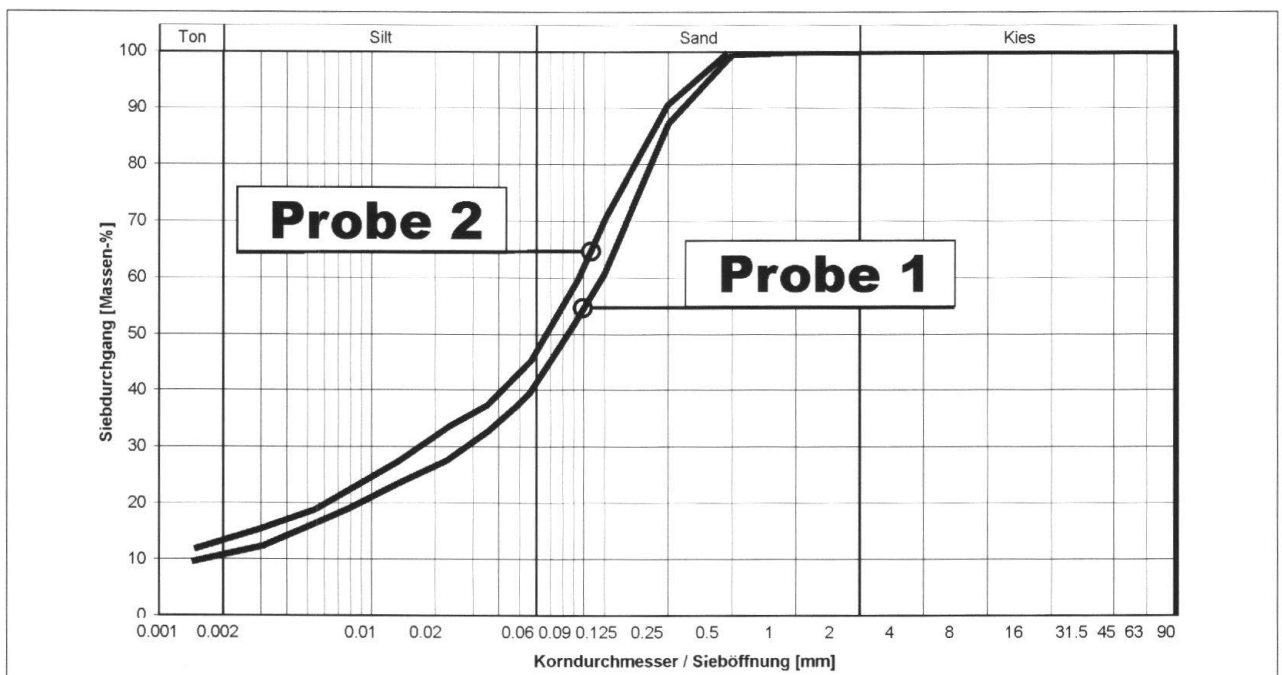


Fig. 3: Die Korngrößenanalysen belegen den hohen Feinanteil um rund 45% des sandigen Kolluviums. Probe 1 wurde dem Anrissgebiet von Mure Nr. 1 entnommen, Probe 2 bei Mure Nr. 2.



## 2.2 Hydrologie und Hydrogeologie

Der Sonnenberg erhebt sich bis knapp 800 m ü.M. und liegt im Frontalbereich der im Mittel 2'000 m ü.M. aufragenden Randkette des Pilatus. Morphologisch stellen sich diese Hügel und Berge den oft aus W bis NW herannahenden Niederschlagsfronten als erste deutliche Geländeerhebung am Südrand des Mittellandes in den Weg, wodurch häufig Stauregen entstehen. Dieser Umstand schlägt sich einerseits in einer gegenüber dem angrenzenden Mittelland (1'100 mm/a) **erhöhten jährlichen Niederschlagsmenge** von 1'300 mm am Sonnenberg und von 1'840 mm am Pilatus nieder. Andererseits wird dadurch die Bildung von Gewitterzellen und starken Niederschlägen gefördert.

Da der Sonnenberg einen langgestreckten, beidseitig abfallenden Hügelzug bildet, sind die hydrologischen Einzugsgebiete je Geländeabschnitt sehr klein.

Die Lockergesteine aus tonigem, stark siltigem Sand wirken mit berechneten Durchlässigkeitsbeiwerten von  $x \cdot 10^{-6}$  bis  $x \cdot 10^{-7}$  m/s als Grundwasserhemmer bis -stauer. Demgegenüber bildet die Verwitterungszone des Felsen mit ihrer Fissurationsporosität und Durchlässigkeitsbeiwerten von  $x \cdot 10^{-4}$  m/s einen Kluftgrundwasserleiter, der im wenig westlich gelegenen Ränggloch in Quelfassungen genutzt wird. Bei diesen Verhältnissen fliesst ein grosser Teil des nicht zurückgehaltenen oder versickerten Niederschlags als Oberflächenabfluss talwärts. Ein weiterer Teil des Niederschlags wird vom Waldboden und den hochporösen, feinkörnigen Lockergesteinen retendiert. Das dem Kluftgrundwasserleiter zugeführte Niederschlagswasser strömt talwärts und führt im Abhang der schlecht durchlässigen Lockergesteinsbedeckung wegen bei Kluftwasser aufstossen zu gespannten, bei Starkniederschlägen möglicherweise gar artesisch gespannten Grundwasserverhältnissen.

## 2.3 Boden und Vegetation

Das **Bodenprofil** ist geprägt durch lokale

Staunässe, eine grau-ockergelbe Marmorierung sowie das lokale Fehlen eines eigentlichen C-Horizontes und kann am ehesten als vergleyte Braunerde zusammengefasst werden.

Die dominierende Pflanzengesellschaft ist gemäss der Karte der natürlichen Waldgesellschaften der **Typische Waldhirschen-Buchenwald** (*Lilio-Fagetum typicum*), zum Teil in der Ausbildung mit Waldziest. Der vorhandene Wald ist weitgehend standortgerecht mit den erwünschten Baumarten Buche, Tanne, Fichte, Bergahorn, Esche, Ulme sowie weiteren Laubbaumarten. Der Nadelholzanteil übersteigt das tragbare Ausmass nicht. Der Bestand wird in grossen Teilen als altholzreich bezeichnet, wodurch nur schwache Eingriffe in den letzten Jahrzehnten angezeigt werden.

Bereits die Orkane Vivian und Wiebke vom 26. bis 28.02.1990 führten am Sonnenberg zu **gravierenden Sturmschäden** am Baumbestand. Das Zerstörungswerk wurde durch den Orkan Lothar vom 26.12.1999 fortgesetzt, so dass heute grossflächige Windwurfareale etwa  $\frac{2}{5}$  des ursprünglichen Waldbestandes an der Nord- und Westabdachung einnehmen (Fig. 4). Noch heute zeugen zahlreiche umgeklappte Wurzelstöcke und Fallholz von diesen Orkanen.

## 3. Ereignisse vom 6./7. Juni 2002

### 3.1 Ereignis

In der Nacht vom 6./7. Juni 2002 ereignete sich im Raum Luzern ein eigentlicher **Wolkenbruch** – damit wird die höchste Intensität von Starkniederschlägen bezeichnet – mit Niederschlagsspitzen von über 68 mm/h (Messstation Littau des Kant. Strasseninspektorats Luzern, Fig. 5), bei einem Tagesniederschlag von 111,8 mm am 6. Juni (d.h. von 7.30h am 6. Juni bis um 7.30h am 7. Juni) und von nur noch 3,4 mm am 7. Juni (Messstelle SMA Luzern).

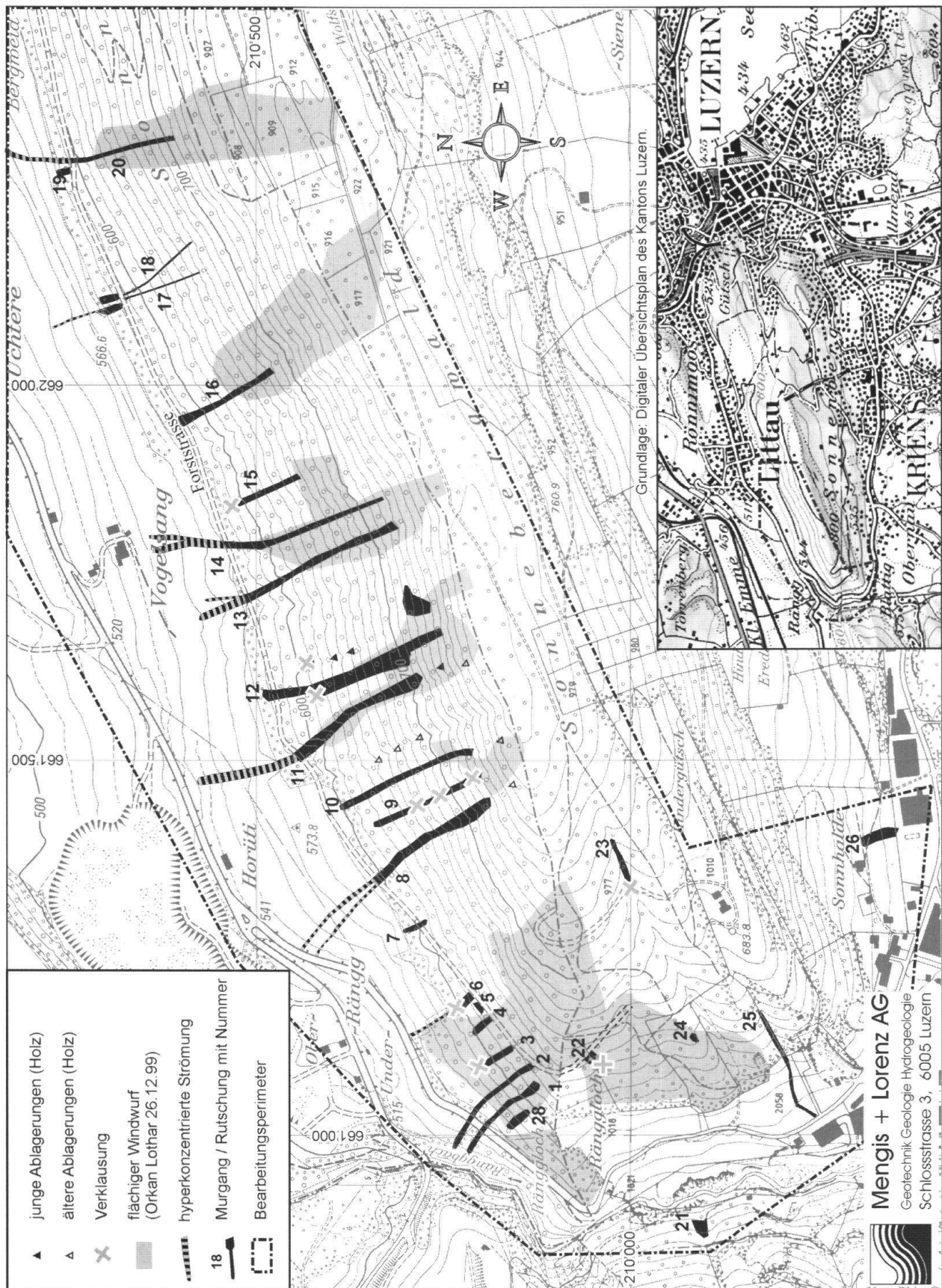
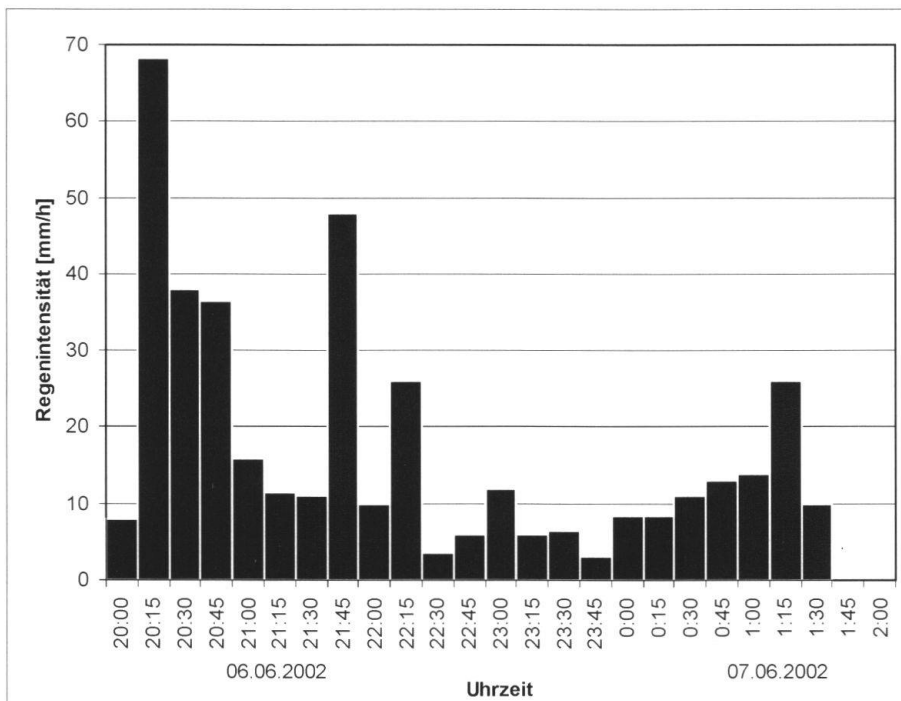


Fig. 4: Kartographische Darstellung der verschiedenen Phänomene des Ereignisses vom 6./7. Juni 2002. Rund  $\frac{3}{4}$  der gravitativen Sedimentumlagerungen ereigneten sich aus Windwurfflächen.

Diese aussergewöhnlichen Starkniederschläge lösten am westlichen Sonnenberg um Mitternacht zahlreiche gravitative Sedimentbewegungen aus. Bei der ersten Besichtigung in regnerischer Dunkelheit nachts um 2 Uhr war die Kantonsstrasse durch das Ränggloch an zwei Stellen durch abgestürzte Lockergesteinsmassen sowie querliegende Baumstämme unterbrochen. Da die Ursachen dieser Überschüttungen und die Risiken bei der ersten nächtlichen Besichtigung nicht geklärt werden konnten, beschlossen die Verantwortlichen die Schliessung der Strasse aufrecht zu halten und auf eine sofortige Räumung zu verzichten. Erst eine Begehung bei Tageslicht brachte das Ausmass des nächtlichen Geschehens

ans Licht: Am westlichen Sonnenberg ereigneten sich auf einem Gebiet von knapp 1 km<sup>2</sup> insgesamt **28 Rutschungen und Murgänge** (Fig. 4). Zwei davon überquerten die Kantonsstrasse (Fig. 6), vier erreichten knapp die Kantonsstrasse und die übrigen kamen im Abhang zum Stillstand. Die längsten Fahrböschungen der Murgänge betragen bis über 300 m. Diese Beobachtungen rechtfertigten im Nachhinein die vorsichtige Risikoeinschätzung und die prophylaktische Sperrung der Strasse.

Da sich bereits am 7. Juni wieder eine trockene Witterung einstellte, konnte unverzüglich mit den Sicherungs- und Aufräumarbeiten begonnen werden.



**Fig. 5:** Histogramm der viertelstündlich aufgezeichneten Regenintensitäten des Wolkenbruchs vom 6./7. Juni 2003 der Station Littau (Quelle Strasseninspektorat des Kantons Luzern).

## 3.2 Phänomene und Mechanismus der Sedimentbewegung

### 3.2.1. Phänomene

Das eingehendere Studium der zahlreichen gravitativen Sedimentumlagerungen offenbarte eine erstaunliche Vielfalt sedimentologischer Phänomene: Am häufigsten waren zahlreiche einfache **Translationsrutschungen** der Lockergesteinsbedeckung – sei es als isolierte Rutschungen mit geringer Dislo-

kation, sei es im Startraum der Sedimentströme.

Bei den gravitativen **Sedimentströmen** waren **zwei Haupttypen** unterscheidbar: Der eine, häufigere Typ erodierte im oberen Teil der Fahrböschung eine Rinne aus dem anstehenden Untergrund und schloss im Ablagerungsraum mit mächtigeren Lockergesteinsakkumulationen (meist bis 1 m, maximal 2 m) ab, wobei typische Ablagerungsloben praktisch fehlten. Dieser Typ





**Fig. 6:** Flugaufnahme der Muren Nr. 1, 2, 3, und 6 (von rechts W nach links O) vom 25.06.2003. Die Murgangrinnen sind bereits ausgeräumt und mit Kokosmatten befestigt.

geht grundsätzlich aus Rutschungen hervor. Bei Gefällsknicken – insbesondere im Bereich der Forststrasse – wurden Sediment und mitgeführtes Holz offensichtlich schlagartig wieder abgesetzt (Fig. 2).

Der zweite Typ bestand aus sehr dünnen, örtlich fast fehlenden Ablagerungen und ergoss sich ohne wesentliche Tiefenerosion über das Gelände. Auf den Weiden waren diese Sedimentströme vor allem an dem in Fließrichtung «gekämmten» Gras erkennbar. Sie waren gekennzeichnet durch hohe Anteile an mitgeschlepptem Baum- und Astmaterial – an einer Stelle wurden mehrere bis knapp 10 m lange Baumstämme mitten in eine Weide geschleudert (Fig. 7). Dieser Typ entsprang meist ersterem, im Bereich von Gefällsknicken, talseits der Ablagerungen.

Vereinzelt lagen die Quellen in durchbrochenen Verkläusungen episodischer Rinnen, wie sie die Nordabdachung des Sonnenbergs zahlreich durchfurchen.

Bei einzelnen Rutschungen waren die lokalen Auslöser noch erkennbar: In zwei Fällen (Nr. 22 und Nr. 4) lagen die Rutschungen am Überguss von Querentwässerungen der Forststrasse in den Hang. In einem anderen Fall (Nr. 2) verursachte ein eindeutig punktförmiger Quellaustritt aus der Verwitterungszone des Felsens eine Rutschung mit Sedimentstrom.

### 3.2.2. Prozessorientierte Interpretation

Ausgehend von den beschriebenen Phänomenen werden nachfolgend die sedimento-

logischen Prozesse erläutert und interpretiert:

- Die Rutschungen sind als einfache, **flach-bis mittelgründige Rutschungen** – vorab Translationsrutschungen – zu beschreiben. Sie bestehen aus kohäsiven, stark tonig-siltigen Sanden mit wenig Kies und Steinen (meist verwitterter Gesteinschutt, seltener Moränenmaterial). Die basale, ebene bis bucklige Gleitfläche liegt meist wenig über oder im Übergang zum Felsen. Auslöser können sowohl Kluftwasserausstritte als auch übermässiger Oberflächenzufluss sein.
- Der erste Typ gravitativer Sedimentströme mit seinen erosiven Rinnen und kaum ausgefächerten Ablagerungen aus Diamiktiten ist als **klassischer Murgang** (Mud-/Debris Flows) zu interpretieren. Die Murgänge entstanden überwiegend durch Sedimentverflüssigung (engl. liquefaction) wasser gesättigter Rutschmassen nach dem Überschreiten der Liquiditätsgrenze. Je nach Gefälle, Volumen und Grad der Wassersättigung sowie je nach Wasserzufuhr haben sie eine unterschiedlich lange Fahrböschung (z.B. Nr. 1, 2, 3, 4 in Fig. 2). Diesen zähflüssigen Sedimentströmen ist ein hoher Feststoffanteil von über 50% zuzuschreiben.
- Etwas schwieriger zu deuten ist der zweite Typ von gravitativen Sedimentströmen, der sich durch eine geringe Sedimentfracht auszeichnet. Dieser Typ muss jedoch eine recht hohe Energie besessen haben, wovon die weit ins Wiesland hinaus katapultierten Baumstämme zeugen (Fig. 7). Auf Grund des geringen Feststoffanteils von wohl < 25% sowie der hohen Energie kommt für diese gravitativen Sedimentströme eine Interpretation als **hyperkonzentrierte Strömungen** (hyperconcentrated flow) in Frage. Typischerweise entsprangen diese den Akkumulationen sedimentierender Murgänge im Bereich von Gefällsknicken – im östlichen Teil

betraf dies vor allem die Forststrasse (Nr. 8, 11, 13, 14, 18 und 20 in Fig. 2 und 5).

Die drei beobachteten Prozesse und deren Dynamik lassen sich am besten an Hand der Klassifikation gravitativer Massenbewegungen von Coussot & Meunier (1996) erklären (Fig. 8). Durch die starken Niederschläge verursacht lösten sich zahlreiche Rutschungen aus dem Hang. Eine weitere Wasserzufuhr in den gestörten Sedimentkörper führte teilweise zu einer Sedimentverflüssigung (engl. liquefaction), woraus sich eigentliche Muren, resp. Schlammströme mit Feststoffanteilen > 50% entwickelten. Diese Schlammströme liefen teilweise in flacheren Geländeabschnitten aus oder ergossen sich in den Ränggbach. Bei der Querung von Geländeknicken – vorab der hangquerenden Forststrasse – wurde ein Teil des mitgeführten Sediments schlagartig abgesetzt, und das freiwerdende Wasser sowie ein geringer Sedimentanteil – häufig Holz – schossen fortan mit erhöhter Geschwindigkeit als hyperkonzentrierte Ströme talwärts (Fig. 2 und 7). Im Auslaufbereich trennte sich der Einphasenfluss unter Energieabnahme in die zwei Phasen des Strömungstransports: Während sich die Feststoffe (Boden- und Suspensionsfracht) im Auslaufbereich ablagerten suchte sich das strömende Wasser seinen weiteren Weg in die nächste Vorflut oder ergoss sich auf das Wiesland oder die Strasse.

### 3.2.3. Ursachen der gravitativen Sedimentumlagerungen

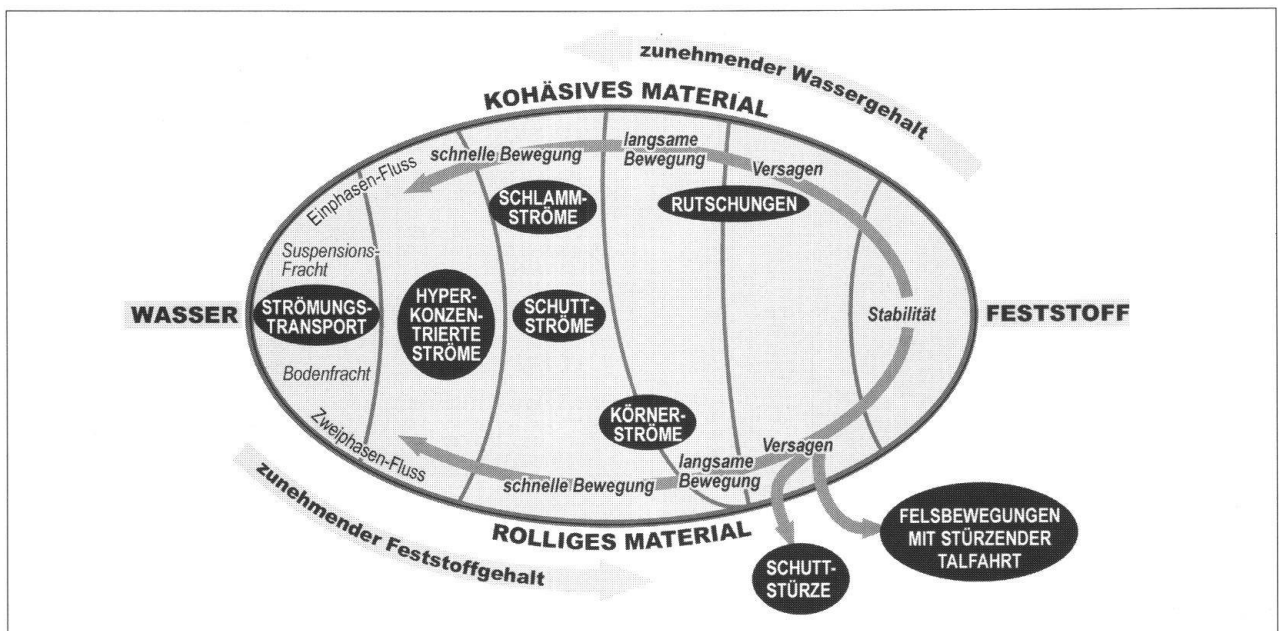
Die Nordabdachung des Sonnenbergs weist insgesamt eine ungünstige Disposition bezüglich gravitativer Massenbewegungen auf, wobei vor allem folgende stabilitätskritische Faktoren zu nennen sind:

- Die steile Hangneigung von 33° bis 45° (Kap. 2.1, Fig. 2),
- die Lockergesteinsbedeckung aus stark tonig-siltigem Sand (Fig. 3) mit Winkeln





**Fig. 7:** Die Ansicht der Fahrböschung der aus Murgang Nr. 11 gebildeten hyperkonzentrierten Strömung verdeutlicht die nur mehr geringe Sedimentfracht. Die hohe Energie, die diese hyperkonzentrierte Strömung gehabt haben muss, lässt sich auf Grund der auf das Wiesland katapultierten Baumstämme erahnen. Im Hintergrund ist die Kantonsstrasse sichtbar.



**Fig. 8:** Klassifikation gravitativer Massenbewegungen (nach COUSSOT & MEUNIER 1996). Ausgehend von der Stabilität (rechts) ereigneten sich in Folge der Wolkenbrüche in der kohäsiven Lockergesteinsbedeckung vorerst Rutschungen, die sich unter Wasseraufnahme zu Schlammströmen entwickelten. Bei Gefällsknicken erfolgte eine teilweise Sedimentation (Fig. 1), und der Rest schoss als hyperkonzentrierte Strömung talwärts (Fig. 2), die nach dem endgültigem Absetzen der Sedimentfracht als kleines Rinnsal mit einfachem Strömungstransport endete.

der inneren Reibung (25° bis 30°) kleiner als die Böschungswinkel,

- die Anfälligkeit des Lockermaterials auf Sedimentverflüssigung (hoher Porenanteil und hohes Wasseraufnahmevermögen, Scheinkohäsion).

Auch hydrogeologisch liegt eine ungünstige Disposition vor, in dem der durchlässige Kluftgrundwasserleiter der Verwitterungszone des Felsens von schwach durchlässigen, grundwasserhemmenden Lockergesteinen überlagert wird. In dieser Konfiguration entstehen in Hanglage rasch gespannte Hangwasserverhältnisse mit erhöhten Porenwasserspannungen. Sehr bedeutsam ist auch die Niederschlagsexposition mit ihrer Anfälligkeit für Starkniederschläge (Fig. 4).

Von den 28 beobachteten gravitativen Massenbewegungen entsprangen  $\frac{3}{4}$  Windwurf- flächen der Orkane Vivian und Lothar (Fig. 4). Diese Beobachtung kann als deutlicher Hinweis auf die verminderte Stabilität der Windwurf- flächen gedeutet werden; sie wird nachfolgend etwas eingehender untersucht und diskutiert.

Dass die Nordabdachung des Sonnenbergs von zahlreichen, in Fallrichtung des Hanges verlaufenden Runsen und episodischen Erosionsrinnen durchzogen ist, kann teilweise als Hinweis auf frühere Murgangereignisse und andere gravitative Massenbewegungen gedeutet werden.

### 3.3 Sicherung und Sanierung

- Nach den Ereignissen der Nacht vom 6./7. Juni verblieben in mehreren Murgangrinnen oberhalb der Kantonsstrasse labile Verkläusungen aus Sediment und verkeilten Baumteilen. Deshalb wurde beschlossen, die Schliessung der Strasse bis zur ersten Sicherung aufrecht zu halten.
- Bereits am 8. Juni wurde mit zwei Schreitbaggern begonnen, die labilen, wasserge-

sättigten Rutschmassen und Verkläusungen im Einzugsgebiet der Kantonsstrasse zu entfernen. In Anbetracht des weiträumigen Geländes und der grossen Kubaturen wurden die wassergesättigten Sedimente nach Möglichkeit als dünne Schicht auf angrenzende, stabile Hangbereiche verteilt. Wo dies nicht möglich war, erfolgte ein Abtransport auf eine Deponie. Auf eine Stabilisierung oder einen Wiedereinbau der umgelagerten, wassergesättigten Lockergesteine im Hang wurde wegen des zu grossen Aufwandes und der vorhersehbaren Schwierigkeiten verzichtet. Im Verlaufe dieser Arbeiten lösten sich verkläusete Murgangmassen aus den Muren Nr.1 und 6 und ergossen sich auf die Kantonsstrasse, wodurch die Sperrung der Strasse deutlich gerechtfertigt wurde.

- Die labilen Böschungsrinne und Erosionsflächen wurden anschliessend mit verankerten Kokosmatten gesichert (Fig. 6).
- Bei den bis auf die Kantonsstrasse reichenden Murgängen wurden bergseits der Strasse Auffangräume von 75 bis 100 m<sup>3</sup> Volumen geschaffen – grössere waren wegen der schwierigen Topographie nicht möglich. Bei den Muren Nr. 1 und 2 wurden zusätzliche, verankerte und mit Abspannungen gesicherte, permeable Schutzwände aus Stahlprofilen versetzt (Fig. 9). Die Schutzwände und Verankerungen wurden auf statische horizontale Ersatzlasten von 150 kN/m' bemessen, dies im Bewusstsein, dass mit diesen provisorischen Bauwerken die dynamischen Kräfte gleich grosser Ereignisse nicht voll aufgenommen werden könnten.
- Im Quellgebiet über der Strasse wurde der Fassung des Oberflächen- und des austretenden Hangwassers grösste Bedeutung beigemessen. Das gesammelte Wasser wurde in einer Rinne aus gerippten Stahlhalbschalen in Murgang Nr. 2 via einen neu errichteten Bachdurchlass unter der Kan-

- tonsstrasse dem talseitigen Ränggbach zugeführt.
- Ausserhalb des potentiellen Einflussbereichs der Kantonsstrasse wurden die auf der Forststrasse aufgehäuften Murgangsedimente und das Holz entfernt sowie lokal weitere Auffangräume geschaffen und instabile Bäume entfernt. Ansonsten wurde auf eine weiterführende Räumung und Sicherung verzichtet.
  - Nebst der Instandstellung der Kantonsstrasse wurde auch eine Planungsstudie über die im Bereich der Rutschungen Nr. 1 bis 6 stark beschädigten Forststrasse in Auftrag gegeben, mit besonderem Augenmerk auf die Entwässerungssituation.
  - Als Basis für allfällige weitere, über die Sofortmassnahmen hinausgehende Sicherungsarbeiten wird derzeit eine Gefahrenkarte ausgearbeitet.



**Fig. 9:** Flexible und permeable Schutzwände aus Stahlprofilen wurden als Schutzmassnahme zwischen Auffangraum und Strasse versetzt. Die etwa 1 m unter das Strassenniveau reichenden Schutzwände – hier bei Murgang Nr. 1 – sind ähnlich einem Steinschlagschutznetz an Stahlseilen rückverankert.

## 4. Analyse der Hangstabilität

### 4.1 Grundlagen

Da Rutschungen den Ausgangspunkt der Murgänge und hyperkonzentrierten Strömungen bildeten, stellt sich die Frage nach der Gesamtstabilität der Nordabdachung des Sonnenbergs. Die Standsicherheit  $F$

einer Böschung ist generell definiert durch:

$$F = \frac{\text{Rückhaltende Kräfte in Richtung der Gleitfläche}}{\text{Treibende Kräfte in Richtung der Gleitfläche}}$$

Im Kräftegleichgewicht ist  $F = 1$ ; mit  $F < 1$  kann der Hang versagen, bei  $F > 1$  ist er wahrscheinlich stabil.

Als klassische Methode der Stabilitätsbe-



rechnung einer unendlich langen Böschung mit ebener Gleitfläche – wie sie Translationsrutschungen zu Grunde liegt – gelangt üblicherweise die zweidimensionale Analyse der Standsicherheit nach Skempton & Delory (1957) zum Einsatz:

$$F = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w)z \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha} \quad [2]$$

mit:

- F Sicherheitsfaktor [-]
- c' Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]
- z Totale Mächtigkeit der Lockergesteinschicht über der Gleitfläche [m]
- m Verhältnis von z zur Mächtigkeit des wassergesättigten Lockergesteins [-]
- α Böschungsneigung [°]
- φ' effektiver Reibungswinkel [°]
- γ Feuchtraumgewicht des Lockergesteins [kN/m<sup>3</sup>]
- γ<sub>w</sub> Raumgewicht des Wassers [kN/m<sup>3</sup>]

Diese klassische ingenieurgeologische Berechnung ist deterministisch und liefert für einen Variablensatz ein Resultat, das bestenfalls durch eine Sensitivitätsanalyse mehrfach variiert wird.

#### 4.2 Stabilitätsmodell LISA

Das Problem bei der Beurteilung natürlicher Abhänge aber liegt in der grossen Variabilität der massgebenden Faktoren: So variieren beispielsweise die Böschungsneigungen, die Lockergesteinsmächtigkeiten und die Lage des Hangwasserspiegels sowie der möglichen Porenwasserspannungen örtlich oft so stark, dass eine flächendeckende deterministische Standsicherheitsanalyse mit angemessenem Rechenaufwand kaum verlässlich kalkulierbar ist. Darüber hinaus trägt die ingenieurgeologische Berechnung [2] dem stabilisierenden Einfluss der Vegeta-

tion nicht Rechnung.

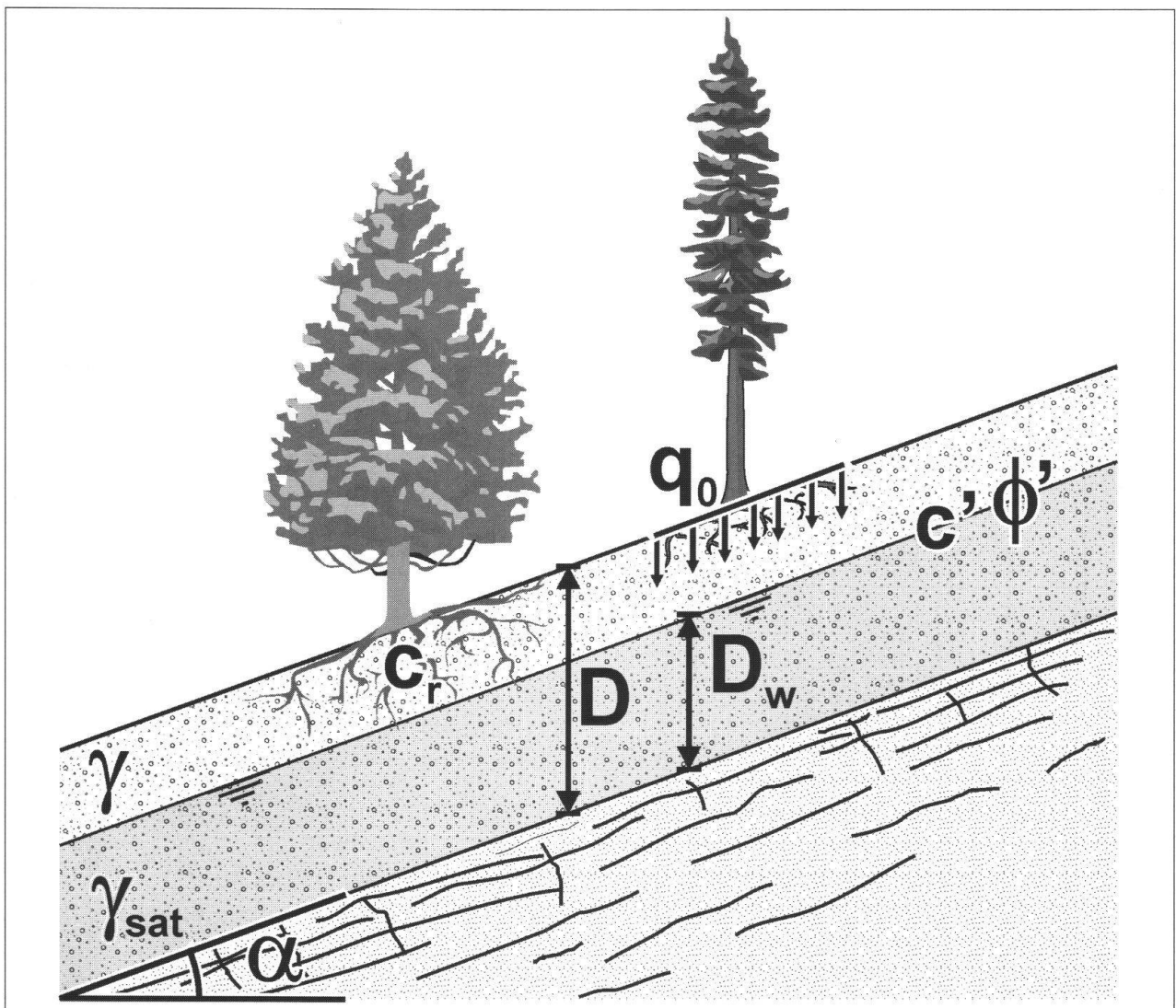
Diesen Unzulänglichkeiten versucht das **Stabilitätsmodell LISA** (Level I Stability Analysis) von Hammond et al. (1992) Rechnung zu tragen. Das Tool wurde vom amerikanischen Forstdienst USDA zur Risikoanalyse der Auswirkungen von Rodungen sowie zur forstlichen Planung entwickelt und ist präferentiell für flach- bis mittelgründige Instabilitäten aussagekräftig:

- LISA beruht auf einer **Wahrscheinlichkeitsrechnung für den Sicherheitsfaktor F**. Dazu wird jedem Eingangsparameter eine Wahrscheinlichkeitsverteilung (Probability Distribution Function PDF) zugeordnet. Durch eine Monte Carlo Simulation (stochastisches Prozedere, benannt nach der spielcasinoreichen Stadt am Mittelmeer) werden 1000 verschiedene Kombinationen der Parameter berechnet und die stochastisch kalkulierten Verteilungen der Sicherheitsfaktoren F als Histogramm dargestellt. Daraus wird die Wahrscheinlichkeit eines Versagens (F ≤ 1) errechnet.
- Für die Analyse natürlicher Abhänge besonders wertvoll ist die kalkulatorische Berücksichtigung der massgebenden Vegetation in LISA. Zum einen geschieht dies durch den stabilitätsfördernden Faktor der **Reissfestigkeit der Wurzeln**, ausgedrückt als Wurzelkohäsion c<sub>r</sub>. Zum anderen wird auch die **Last der Bäume** q<sub>0</sub> [kN/m<sup>2</sup>] als Einfluss der Baumlast I<sub>T</sub> = (q<sub>0</sub> cos α tan φ') / (q<sub>0</sub> sin α) berücksichtigt, die bis zu einer gewissen Hangneigung stabilitätsfördernd (I<sub>T</sub> > 1), dann aber mit zunehmender Steilheit stabilitätsmindernd wirkt (I<sub>T</sub> < 1). Diese Schwelle (I<sub>T</sub> = 1) liegt in dem Bereich, wo die Hangneigung dem Winkel der inneren Reibung der Lockergesteinsbedeckung entspricht.

Als Berechnungsgrundlage von LISA dient eine nach [2] modifizierte Stabilitätsformel für unendlich lange Böschungen mit ebener Gleitfläche (Hammond et al. 1992, Fig. 10):

$$F = \frac{c_r + c' + \cos^2 \alpha [q_0 + \gamma(D - D_w) + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w)D_w] \tan \phi'}{\sin \alpha \cos \alpha [q_0 + \gamma(D - D_w) + \gamma_{\text{sat}} D_w]} \quad [3]$$

F	Sicherheitsfaktor [-]	$\phi'$	effektiver Reibungswinkel [°]
D	Totale Mächtigkeit der Lockergesteins- schicht über der Gleitfläche [m] / [ft]	$\gamma$	Feuchtraumgewicht des Lockergesteins [kN/m <sup>3</sup> ] / [pcf]
$D_w$	Mächtigkeit des wassergesättigten Lockergesteins [m] / [ft]	$\gamma_{\text{sat}}$	Raumgewicht des wassergesättigten Lockergesteins [kN/m <sup>3</sup> ] / [pcf]
$c_r$	Reissfestigkeit der Wurzeln, ausge- drückt als Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ] / [psf]	$\gamma_w$	Raumgewicht des Wassers [kN/m <sup>3</sup> ] / [pcf]
$c'$	Kohäsion des Lockergesteins [kN/m <sup>2</sup> ] / [psf]		
$q_0$	Baumlast [kN/m <sup>2</sup> ] / [psf]		Einheiten: [metrische Einheiten] / [in LISA verwendete US-Einheiten]
$\alpha$	Böschungsneigung [°]		



**Fig. 10:** Schematische Darstellung der in der Stabilitätsformel für unendlich lange Böschung mit ebener Gleitfläche verwendeten Parameter (nach Hammond et al. 1992).



Nachfolgend werden die wichtigsten Parameter und Grundlagen kurz erläutert:

- Die totale Mächtigkeit der Lockergesteinsschicht  $D$  über der Gleitfläche umfasst oft die ganze Bodenabfolge; deren Basis liegt häufig im Bereich der Verwitterungszone des Felsens oder an dessen Oberfläche.
- Die Mächtigkeit des wassergesättigten Lockergesteins  $D_w$  ist stark niederschlagsabhängig und sollte gegebenenfalls durch Messungen des Hangwasserspiegels in Piezometern und am besten mit einem Datenlogger ermittelt werden. In Hochzonen eines Hanges liegt der Hangwasserspiegel generell tiefer als in Senken. Bei Hangwasseraustritten entspricht die Mächtigkeit des wassergesättigten Lockergesteins der totalen Mächtigkeit der Lockergesteinsschicht. Im Weiteren führen Kahlschlag und Windwurfflächen zu einer grösseren Niederschlagsinfiltration, woraus ein verstärkter unterirdischer Abfluss und höhere Hangwasserspiegel resultieren. Dieser Umstand wirkt sich deutlich stabilitätsvermindernd aus.
- Die Reissfestigkeit der Wurzeln  $c_r$  ist abhängig vom Untergrund und von der Pflanzenart und kann als erste Näherung der Literatur (z.B. O'Loughlin 1974, Waldorn 1977, Hammond et al. 1992) entnommen werden:

Art	$c_r$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Nadelbäume (Moräne)	0.9 bis 4.4
Föhrenjungwuchs (Lehm)	5.0
Fichte (Kristallingestein)	4.2 bis 14
Birke (siltiger Lehm)	1.5 bis 9.0
Ahorn (siltiger Lehm)	3.8 bis 7.0
Pappel (siltiger Lehm)	2.0 bis 9.0
Erlen	2 bis 12
Erle / Jungwuchs	1.6 bis 11.5
Luzerne	4.9 bis 9.8
Klee	0.1 bis 2.0

**Tab 1:** Reissfestigkeit der Wurzeln verschiedener Pflanzenarten unter normalen Bedingungen.

Für die vorliegende Fragestellung bedeutsam ist, dass nach einer flächigen Rodung – je nach Klima und Vegetation – nach 3-5 Jahren bis 10-20 Jahren **minimale Reissfestigkeiten** der Wurzeln auftreten. Nach Waldbränden sind minimale Reissfestigkeiten bereits nach 0-3 Jahren möglich (Hammond et al. 1992). Windwurfflächen dürften wohl zwischen diesen beiden Waldvernichtungsarten liegen. Ebenso leiden Kuhtrittpfade unter fehlender Wurzelkohäsion der erodierten Grasnarbe (schätzungsweise 0,5 bis 5 kN/m<sup>2</sup>).

- Für die Baumlasten  $q_0$  können bei einem hochstämmigen Wald Werte von 0,5 bis 0,2 kN/m<sup>2</sup> angenommen werden.
- Die geotechnischen Kennwerte der Kohäsion  $c'$ , des Winkels der inneren Reibung  $\phi'$ , des Raumgewichts  $\gamma$  sowie des Wassergehalts lassen sich entweder durch Laboruntersuchungen oder durch den erfahrenen Geotechniker/Geologen an Hand von Probenbeschreibungen aus den einschlägigen Tabellenwerken (z.B. Schweizer Norm 1993) beibringen.
- Zur Charakterisierung der Variabilität der einzelnen Faktoren für die Monte Carlo Simulation stehen für LISA die verschiedensten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Verfügung: uniforme, bivariate und lognormale Verteilung, Dreiecks- und Betaverteilung, Normalverteilung und Histogramme. In Hammond et al. (1992) sind die Anwendungsbereiche dieser statistischen Verteilungen eingehend diskutiert.

## 5. Modellierung der Stabilitätsverhältnisse

### 5.1 Modellparameter

Die Stabilitätsbeurteilung der windwurfgeschädigten Nordabdachung des Sonnenbergs erfolgte durch Simulationen mit LISA. Um den stabilitätsmindernden Effekt des Windwurfs abzuschätzen, wurden Analysen des Aus-

Das Prinzip der **Monte Carlo-Methode** hat seinen Namen 1944 von den beiden Mathematikern Von Neumann und Ulam erhalten, welche im Rahmen des sogenannten "Manhattan-Projektes" an der Entwicklung der Atombombe arbeiteten. Ursprünglich sollte diese Methode das Verhalten der Neutronen in einem Atomreaktor oder einer -Bombe erklären. Man fand jedoch heraus, dass sie auch zur Lösung anderer Probleme führen kann. Eine der bekanntesten ist die Monte Carlo Integration zur Pi-Bestimmung.

Unter dem Monte-Carlo-Prinzip versteht man die Berechnung von physikalischen Experimenten über Zufallszahlen. Die Methode liess sich erst mit Hilfe des Computers entwickeln, da man sehr viele Zufallszahlen braucht. Je mehr Versuche durchgerechnet werden, umso genauer wird der am Ende ausgegebene Wert, da jeweils der Durchschnitt aus den Einzelversuchen zählt.

Der Name für die Methode lässt sich in Anlehnung an die statistische Simulation von Glücksspielen, auf das Casino-Paradies in Monte Carlo zurückführen, da es sich dort auch ständig um den Zufall dreht.

gangszustands sowie des heutigen Zustands mit Windwurf und reduzierter Wurzelkohäsion und verändertem Wasserhaushalt vorgenommen. Basierend auf der Korngrössenana-

lyse wurden die geotechnischen Parameter an Hand der Schweizer Norm (1993) abgeschätzt.

Parameter	statistische Funktion		Normalbedingungen		windwurfgeschädigt	
Bodenmächtigkeit D	Dreiecksverteilung	Min.	0.5 m	1.6 ft	0.5 m	1.6 ft
		Apex	2.0 m	6.6 ft	2.0 m	6.6 ft
		Max.	3.0 m	9.9 ft	3.0 m	9.9 ft
Hangneigung $\alpha$	Histogramm	10%	60% - 70% Neigung		60% - 70% Neigung	
		30%	70% - 80% Neigung		70% - 80% Neigung	
		30%	80% - 90% Neigung		80% - 90% Neigung	
		30%	90% - 100% Neigung		90% - 100% Neigung	
Baumlast <sup>1)</sup> $q_0$	uniforme Verteilung	Min.	0.10 kN/m <sup>2</sup>	2 psf	0.00 kN/m <sup>2</sup>	0 psf
		Max.	0.96 kN/m <sup>2</sup>	20 psf	0.48 kN/m <sup>2</sup>	10 psf
Wurzelkohäsion <sup>2)</sup> $c_r$	logarith. Verteilung	Mittel.	3.8 kN/m <sup>2</sup>	80 psf	1.0 kN/m <sup>2</sup>	20 psf
		Std.	2.4 kN/m <sup>2</sup>	50 psf	0.7 kN/m <sup>2</sup>	15 psf
Winkel der inneren Reibung $\phi$	Normalverteilung	Mittel.	28 °	28 °	28 °	28 °
		Std.	2 °	2 °	2 °	2 °
Kohäsion $c'$	Normalverteilung	Mittel.	5 kN/m <sup>2</sup>	105 psf	5 kN/m <sup>2</sup>	105 psf
		Std.	1.4 kN/m <sup>2</sup>	30 psf	1.4 kN/m <sup>2</sup>	30 psf
Trockenraumgewicht $\gamma_d$	Normalverteilung	Mittel.	17 kN/m <sup>3</sup>	106 pcf	17 kN/m <sup>3</sup>	106 pcf
		Std.	0.5 kN/m <sup>3</sup>	3 pcf	0.5 kN/m <sup>3</sup>	3 pcf
Wassergehalt %	Normalverteilung	Mittel.	20 %	20 %	20 %	20 %
		Std.	2.5 %	2.5 %	2.5 %	2.5 %
Kornwichte $G_w$	konstant (Quarz)		2.65 -	2.65 -	2.65 -	2.65 -
Anteil wassergesättigtes Lockergestein <sup>3)</sup> $D_w/D$	Dreiecksverteilung	Min.	0 -	0 -	0.1 -	0.1 -
		Apex	0.2 -	0.2 -	0.4 -	0.4 -
		Max.	0.6 -	0.6 -	0.9 -	0.9 -

<sup>1)</sup> Es wird angenommen, dass die Bäume nach Windwurf liegen bleiben, und so die Last grundsätzlich bleibt, aber besser verteilt wird.

<sup>2)</sup> Beim geschädigten Zustand werden nur noch Windwurfflächen beurteilt.

<sup>3)</sup> Durch den Windwurf steigt die Niederschlagsinfiltration und damit der Hangwasserspiegel ( $D_w/D$  erhöht).

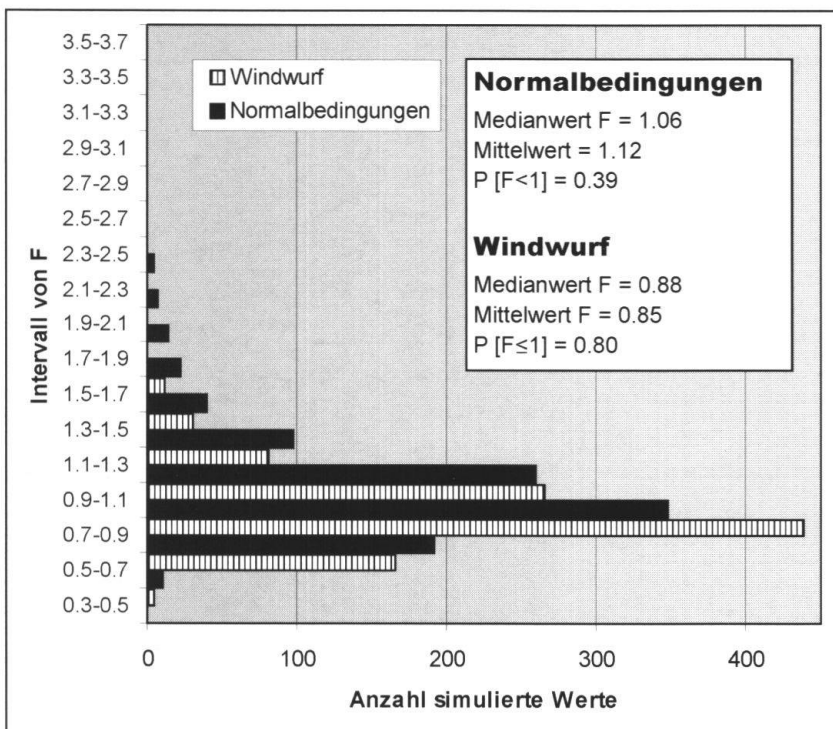
**Tab 2:** Spezifische Eingangs-Parameter für die Berechnungen am Sonnenberg mittels Stabilitätsprogramm LISA.

## 5.2 Resultate der Simulation LISA (Fig. 11)

- Unter Normalbedingungen mit einer gesunden Bestockung weist die Nordabdachung des Sonnenbergs wegen der ungünstigen Grunddisposition (Kap. 2) bereits eine geringe Sicherheit  $F$  um 1.1 auf; der Hang ist aber mehrheitlich stabil. Bei Starkniederschlägen können in exponierten, labilen Teilbereichen bereits Rutschungen ausgelöst werden. Die Wahrscheinlichkeit eines Versagens  $P[F < 1]$  ist 0,4.
- Im heutigen Zustand mit flächigem Windwurf, verminderter Wurzelkohäsion und ungünstigem Hangwasserhaushalt sinkt der Sicherheitsfaktor  $F$  auf knapp 0,9 ab. Der Hang kann bei Starkniederschlägen

flächenweise versagen, angezeigt durch die Wahrscheinlichkeit eines Versagens  $P[F < 1]$  von 0,8.

- Im Vergleich haben die Windwurfflächen ein etwa doppelt so grosses Risiko von Rutschungen. Dieses Resultat deckt sich mit den Beobachtungen, dass  $\frac{3}{4}$  der am Sonnenberg beobachteten gravitativen Massenbewegungen den Windwurfflächen der Orkane Vivian und Lothar entsprangen.
- Nach Hammond et al. (1992) bergen Hänge mit Wahrscheinlichkeiten eines Versagens  $P[F < 1] > 0,25$  sehr grosse Risiken und sind für flächenhafte Rodungen absolut ungeeignet – Voraussetzung wären Werte  $< 0,16$ .



**Fig. 11:**

Histogramm der mittels der Monte Carlo Simulation (vgl. Kasten) von LISA berechneten Sicherheitsfaktoren  $F$  und der daraus ermittelten Wahrscheinlichkeiten eines Versagens  $P[F \leq 1]$  der Nordabdachung des Sonnenbergs (Simulationsparameter vgl. Tabelle im Text).

## 5.3 Beurteilung der Methodik LISA

- Das vorgestellte Stabilitätsmodell LISA liefert bereits bei geringem Untersuchungsaufwand gute Resultate für die Beurteilung von natürlichen Hängen und des Einflusses der Bestockung. Die Simulationsergebnisse des Ausgangszustandes und der Windwurfflächen stehen in guter Übereinstimmung mit den beobachteten Verhältnissen.

- Für vertiefte und systematischere Simulationen wäre es wünschenswert, die bestehenden Daten über die stabilisierende Wirkung des Wurzelwerks als Berechnungsgrundlagen für schweizerische Verhältnisse zusammenzutragen und allenfalls durch Feldversuche zu ergänzen.

- Die durchgeführten Simulationen lassen sich mit gebührender Vorsicht auf vergleichbare Hänge übertragen. Insbesondere

re windwurfgeschädigte oder flächig gerodete, steile Waldpartien im Molassegebiet mit ähnlichen geologisch-hydrogeologischen Verhältnissen dürften eine vergleichbare Sensibilität gegenüber Starkniederschlägen aufweisen.

#### 5.4 Anwendbarkeit für Gefahrenkarten

Die Simulationen mit LISA berechnen stochastische Sicherheitsfaktoren  $F$  eines Hanges und daraus die Wahrscheinlichkeit eines Versagens ( $F \leq 1$ ). Da die Berechnungen als Grundlage für die Risikobeurteilung konzipiert sind (Hammond et al. 1992), ist ein Kommentar der Anwendbarkeit für die Erstellung von Gefahrenkarten (BUWAL et al. 1997) angezeigt.

- LISA berechnet keine Intensitäten. Da gemäss BUWAL et al. (1997) bei Rutschungen lediglich die Intensitäten für die Gefahrenbeurteilung ausschlaggebend sind, können die Simulationsresultate nicht direkt in die Erstellung von Gefahrenkarten einfließen.
- In anderen Ländern bildet die Wahrscheinlichkeit eines Versagens einen relevanten Faktor der Risikoanalyse, zumal Murgänge – für deren Beurteilung nach BUWAL et al. (1997) die Wahrscheinlichkeit wiederum relevant ist – häufig aus Rutschungen hervorgehen. Dieser wenig logische Umstand sollte vielleicht bei einer allfälligen Revision der BUWAL-Empfehlungen (1997) im Sinne von Egli (1999) revidiert werden: Dieser unterscheidet zwischen Spontanrutschungen mit zu berücksichtigender Wiederkehrperiode analog den Murgängen einerseits sowie permanenten Rutschungen ohne Wiederkehrperiode andererseits.
- Unter der Annahme, dass Rutschungen in liquefaktionsgefährdeten Lockergesteinen in Murgänge (Schutt-, Schlammströme) übergehen können, lässt sich zumindest deren Eintretenswahrscheinlichkeit mit LISA abschätzen. Aus der Formel der Eintretenswahrscheinlichkeit  $P = 1 - (1 - 1/T)^n$

(BUWAL et al. 1997) leitet sich die Wiederkehrperiode  $T = 1 / (1 - (1 - p)^{1/n})$  ab, wobei  $n$  für die Nutzungsperiode steht. Gehen wir für den vorliegenden Fall von Nutzungsperioden  $n$  von 30, 50 und 100 Jahren aus, so errechnen sich für den Wald an der Nordabdachung des Rängglochs im Normalzustand aus der Versagenswahrscheinlichkeit  $P[F < 1] = 0,4$  Wiederkehrperioden von Murgängen  $T$  von 60 (mittlere Wahrscheinlichkeit), 100 (mittlere/geringe Wahrscheinlichkeit), resp. 200 Jahren (geringe Wahrscheinlichkeit). Im Zustand mit Windwurfschäden mit einer Wahrscheinlichkeit eines Versagens  $P[F < 1]$  von 0,8 betragen die entsprechenden Wiederkehrperioden  $T$  20 (hohe Wahrscheinlichkeit), 30 (hohe/mittlere Wahrscheinlichkeit), resp. 60 Jahre (mittlere Wahrscheinlichkeit).

- Unter der Annahme mittlerer bis starker Intensitäten der Rutschungen, Murgänge und hyperkonzentrierten Strömungen würden wir aus dem Gefahrenstufendiagramm für den Normalzustand eine Gefahrenstufe blau vorsehen, für den zeitlich limitierten Zustand mit Windwurf ( $n$  ca. 30 Jahre) eine Gefahrenstufe rot. Diese Beurteilung impliziert automatisch eine Neubeurteilung der Gefahrenstufen, wenn in einem labilen, bewaldeten Hang eine flächige Schädigung des Waldes vorliegt. Es gibt keine Richtlinien, ob und wie diese zwei möglichen Zustände in der Gefahrenkartierung darzustellen sind. Möglich wäre beispielsweise eine Fläche blau mit rotem Linienmuster oder eine zusätzliche Erläuterungskarte.
- Nach Pfister (1999) sind in den letzten 500 Jahren durchschnittlich alle 15 Jahre schwere Winterstürme durch das Schweizer Mittelland gezogen. Seit 1600 ist in jedem Jahrhundert ein orkanartiger Sturm dokumentiert, der als Jahrhundertereignis bezeichnet werden kann. Die jüngste Klimageschichte zeigt jedoch, dass seit 1967 bereits drei Orkane das Schweizer Mittelland verwüstet haben: am 23. Februar 1967, am 27. Februar 1990 (Vivian und Wiebke) sowie am 26. Dezember 1999



(Lothar). Setzt sich diese Tendenz fort – wie dies in Anbetracht der mildereren Winter durchaus möglich ist –, so wäre für Gefahrenkarten wohl eher der Zustand mit Windwurf massgebend.

## 6. Schlussbemerkungen

Der vorliegende Artikel soll eine Anregung zu einer vertieften, über die übliche Gefahrenkartierung hinausgehende Analyse kritischer Hänge bieten. Es ist aber keinesfalls die Absicht, damit irgendwelche neuen Standards vorzugeben. Es gilt zu bedenken, dass auch Sensitivitätsanalysen mit LISA dem Gesetz «garbage in = garbage out» folgen (Zitat Hammond et al. 1992).

Die vorangehenden Erläuterungen zeigen, dass sich die Windwurfflächen von Vivian (1990) in den labilen Hängen des Sonnenbergs wegen der verminderten Wurzelkohäsion derzeit in einem kritischen Stabilitätszustand befinden. Diejenigen von Lothar (1999) werden den kritischsten Zustand wohl erst in einigen Jahren erreichen. Die vorgestellten Resultate und Simulationen mit LISA stehen in Einklang mit dem, auf einer breiten Basis reiner Beobachtungen beruhenden Befund von Rickli et al. (2002) über die Unwetter von Sachseln (15.08.1997). Diese stellten fest, dass die durch Borkenkäferbefall und Windwurf geschädigten Waldflächen besonders stark von Rutschungen betroffen waren. Da eine warme Atmosphäre auch eine turbulenterere und niederschlagsaktivere ist, wird diese Problematik auch künftig und andernorts von grösster Bedeutung sein, weshalb nachfolgend einige Gedanken zur Prävention formuliert sind (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

– Mit umgehenden Aufforstungen von Windwurfflächen ist die Problematik des Verlusts der Wurzelkohäsion (sensitiver Faktor  $c_r$ ) kaum zu beseitigen, da der Jungwuchs seine vollen Wurzelzugkräfte erst

nach mehreren Jahren erreicht; sie verkürzt aber die kritische Phase. Einer gut abgestuften, durchmischten und standortgerechten Bestockung wird aber ebenso eine präventive Wirkung zukommen, wie der minimalen Pflege der Wälder mit Schutzfunktion (BUWAL 1996) in labilen Hängen. Folgerichtig ist auch bei flächigen Rodungen in sensitiven Hängen grösste Vorsicht geboten.

- Unsere Erfahrungen zeigen, dass in Windwurfflächen steiler Abhänge mit labiler Lockergesteinsbedeckung das Zurückkippen der Wurzelstöcke gestürzter Bäume eine einfache, wirkungsvolle Präventionsmassnahme gegen beginnende Erosion und ungünstige Veränderungen des lokalen Wasserhaushalts (sensitiver Faktor  $D_W/D$ ) darstellen kann. Das Initialstadium Rutschung muss in murgangfähigen Lockergesteinen unbedingt verhindert werden.
- Von eminenter Bedeutung sind auch Veränderungen des sich über Jahrtausende eingespielten Wasserhaushalts (sensitiver Faktor  $D_W/D$ ) des Untergrundes. Künstliche Veränderungen durch Bauwerke, wie punktuell in den Hang eingeleitete Entwässerungen von Strassen, Forstwegen, Gebäuden oder lecke Entwässerungsleitungen etc. führen rasch einmal zu lokalen Rutschungen und müssen deshalb unbedingt vermieden werden.
- In sehr steilen, labilen Hängen (vgl. Kap. 4.2) könnte sich auch eine Entlastung durch die Entfernung schweren Windwurfholzes (bivalenter Faktor  $q_0$ ) stabilisierend auswirken.
- Nach flächigem Windwurf, Waldbränden oder -schäden in sensitiven Abhängen sind die Überprüfung der Gefahrenkarten und Stabilitätsberechnungen wie mit LISA angezeigt.



## Verdankungen

Für wertvolle Diskussionen, Anregungen und Beiträge danke ich R. Graf und S. Covi (Kantonsforstamt Luzern), Ch. Ley (Stadtforstamt Luzern, Angaben zum Waldbestand), Dr. O. Lateltin (BWG), J.-J. Thormann (Eidgen. Forstdirektion) sowie M. Achermann (Luzern, Angaben zur Pedologie). B. Limacher, S. Gautschi (beide Mengis + Lorenz AG, Luzern) und R. Graf (Kantonsforstamt Luzern) haben das Manuskript in verdankenswerter Weise kritisch geprüft. Frau C. Heldner (Hochschule für Technik und Architektur, Horw) sind die Korngrössenanalysen und A. Mathis (Strasseninspektor Kanton Luzern) die Regenmessdaten zu verdanken. Ein Teil der Kosten für die vorliegende Arbeit wurde durch das BUWAL (Rubrik 810.3129.007) und den Kanton Luzern übernommen.

## Literaturverzeichnis

- BUWAL, BWW & BRP 1997: Naturgefahren: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen, 42p.
- BUWAL 1998: Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion. - Wegleitung, Reihe Vollzug Umwelt, 40p.
- Coussot, M. & Meunier, M. 1996: Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Sci. Rev.* 40, 209-227.
- Egli, T. (1999): Richtlinie Objektschutz gegen Naturgefahren - Gebäudeversicherungsanstalt des Kt. St. Gallen, 110p.
- Hammond, C., Hall, D., Miller, S. & Swetik, P. 1992: Level I stability analysis (LISA). Documentation for Version 2. Gen. Techn. Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Res. Station, 121p.
- O'Loughlin, C. 1974: The effect of timber removal on the stability of forest soils. *Jour. Hydrology* 13, 121-134.
- Pfister, CH (1999): *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496-1995)* - Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 304p.
- Rickli, Ch., Zürcher, K., Frey, W. & Lüscher, P. 2002: Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. *Schweiz. Z. Forstwes.* 153/11, 437-445.
- Schweizer Norm 1993: Bodenkennziffern SN 670 010a. Ver. Schweiz. Strassenfachleute VSS, Zürich.
- Skempton, A.W. & DeLory, F.A. 1957: Stability of natural slopes in London Clay. *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* 2, 378-381.
- Waldron, L.J. 1977: The shear resistance of rootpermeated homogeneous and stratified soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.* 41, 843-849.

