Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT
Plate-forme nationale «Dangers naturels»
Piattaforma nazionale «Pericoli naturali»
National Platform for Natural Hazards

Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung

TEIL D: RUTSCHUNGEN

Daniel Bollinger, Christophe Bonnard, Hansruedi Keusen



Rutschung Feldweid, Gemeinde Entlebuch im August 2005 (Foto: Schweizer Luftwaffe)

Dieser Teilbericht ist integraler Bestandteil des Gesamtberichtes bestehend aus:
Teil A: Grundlagen und generelles Vorgehen
Teil B: Lawinen
Teil C: Sturzprozesse
Teil D: Rutschungen
Teil E: Wildbäche
Teil F: Flüsse

Inhalt

1. Charakteristik der Prozesse 1
   - 1.1 Übersicht 1
   - 1.2 Besonderheiten 1
   - 1.3 Notwendige Prozessangaben 3
2. Massnahmenübersicht 5
3. Grobbeurteilung 11
   - 3.1 Grundlagen/Informationen zu den Prozessen 11
   - 3.2 Grundlagen/Informationen zu den Massnahmen 11
   - 3.3 Negative Wirkungen 12
   - 3.4 Gesamtkonzept und Relevanz 12
4. Massnahmenbeurteilung 15
   - 4.1 Grundlagen/Informationen zu den Prozessen 15
   - 4.2 Grundlagen/Informationen zu den Massnahmen 15
   - 4.3 Gefährdungsbilder 17
   - 4.4 Tragsicherheit 17
   - 4.5 Gebrauchstauglichkeit 18
   - 4.6 Dauerhaftigkeit 18
   - 4.7 Zuverlässigkeit 19
   - 4.8 Hinweise zur Beurteilung der einzelnen Massnahmenkategorien 19
   - 4.9 Gesamtsystem Massnahmen 24
5. Wirkungsbeurteilung 27
   - 5.1 Permanente und spontane Rutschungen: Ansatz Stabilitätsberechnungen 27
   - 5.2 Alternativer Ansatz für permanente Rutschungen 30
   - 5.3 Methodischer Ansatz für Hangmuren 30
   - 5.4 Umsetzung in der Gefahrenkarte 31
6. Fallbeispiel Flamatt/Wünnewil 33
   - 6.1 Allgemeine Angaben 33
   - 6.2 Beurteilung der Massnahmen 35
   - 6.3 Wirkungsbeurteilung 37
7. Fallbeispiel „grosse Rutschung“ 38

Literatur 38

1. Charakteristik der Prozesse

1.1 Übersicht

Vielfältige und komplexe Abläufe

Rutschungen sind komplexe Phänomene, da sie – mehr als andere Naturgefahren – eine dritte Dimension aufweisen. Als dreidimensionale Körper sind sie in ihrem raum-zeitlichen Verhalten oft nur grob zu erfassen. Der Tiefgang der Rutschungen ist sehr unterschiedlich und es können sich verschiedene Bewegungen überlagern. Ebenso sind die Interaktionen zwischen Massnahme(n) und Prozess(en) vielfältig. Eine Quantifizierung der Kräfte und Bewegungen ist schwierig und setzt umfangreiche Sondierungen und Analysen, plausible geologisch-geotechnische Modelle sowie Modellrechnungen voraus, wozu Bonnard (2006) Ansätze liefert. Der Bearbeiter eines Rutschprozesses sieht sich oft mit verschiedenen Unsicherheiten konfrontiert.

Erfassung repräsentativer Daten schwierig

Mit Berechnungen oder Modellierungen (z.B. 2D, 3D) lassen sich zwar Resultate erzielen, die beim Ergreifen von Massnahmen rechnerisch eine Veränderung der Stabilität ergeben (∆ Zustand vor/Zustand nach Massnahmen). Die Berechnungen basieren aber auf Inputgrössen, welche in der Regel schwierig zu erheben und hinsichtlich ihrer effektiven Repräsentativität nicht einfach zu beurteilen sind. Generell ist die Erfassung repräsentativer Daten bei Rutschprozessen schwieriger als bei den anderen relevanten Naturgefahren. Im Umgang mit Naturgefahren wird immer wieder die Frage: „Wie sicher ist sicher?“ gestellt. Bei der Erhebung der Parameter für die Quantifizierung von Rutschprozessen muss sich auch gefragt werden: „Wie repräsentativ ist repräsentativ?“. Diese Unsicherheiten setzen voraus, dass bei Rutschungen vermehrt auf Sensitivitätsanalysen der verwendeten Parameter abzustützen ist. Zudem müssen vorhandene Unsicherheiten klar dargelegt werden.

Massnahmenwirkung schwierig zu quantifizieren

Auch die Wirkung einer Massnahme ist schwierig zu quantifizieren, sowohl bei rückhaltenden Massnahmen (Scherwiderstände etc.), als auch bei Massnahmen, welche den Wasserhaushalt und -druck beeinflussen. Bei Rutschungen können die Grundsätze zur Berücksichtigung von Schutzmassnahmen (Teil A, Kap. 2) möglicherweise nicht immer einwandfrei erfüllt werden. Besonders heikel ist der Grundsatz 2 (Unsicherheiten), denn „ist die Auswirkung der Massnahme auf den Prozess kleiner als die Unsicherheiten bei der Prozessbeurteilung, wird sie nicht berücksichtigt.“ Die nachfolgenden Ausführungen sind als Hilfsmittel zur Beurteilung der Massnahmenwirkung bei Rutschungen und Hangmuren zu betrachten. Dabei ist zu beachten, dass jeder konkrete Fall seine spezifischen Eigenheiten hat, welche in angemessener Weise in die Beurteilung einzufliessen haben.

1.2 Besonderheiten

Räumlich und zeitlich variable Bewegungsmuster

Rutschungen im weiteren Sinn umfassen ein breites Spektrum von Rutschtypen und -mechanismen, einschliesslich Kombinationen davon. Wie Abb. 1.1 und Abb. 1.2 zeigen, ist bei Rutschungen den räumlich und zeitlich variablen Bewegungsmustern Rechnung zu tragen. Die Bewegungen können sowohl vertikal als auch lateral graduell oder sprunghaft variieren.

Kontinuierliche und spontane Rutschungen

Wesentlich ist die Unterscheidung zwischen kontinuierlichen (permanenten) und spontanen Rutschprozessen. Letzteren werden auch die Hangmuren zugeordnet, deren Auslösung durch äusserst starke Durchnässung hervorgerufen wird. Dabei spielt Wasser als treibende Kraft eine entscheidende Rolle (z.B. Porenwasserüberdrücke, Sickerströmungen, innere Erosion). Bei Hangmuren fehlen dann auch oft eigentliche Gleitflächen. Hingegen bestehen Anzeichen zu Phänomenen, welche

mit einem hydraulischen Grundbruch vergleichbar sind. Bei Hangmuren sind mögliche Folgeereignisse wie Sturzprozesse oder Murgänge (bei Einmündung in ein Fliessgewässer) speziell zu beachten. Solche Sekundäreffekte werden hier nicht weiter behandelt.

Profundes Prozessverständnis notwendig

Die Planung von Massnahmen gegen Rutschungen setzt ein profundes Prozessverständnis voraus. Die von der AGN (Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN, 2004) realisierten Studien liefert in Ergänzung zu den Empfehlungen des Bundes (BRP et al., 1997) standardisierte Ansätze zur Berücksichtigung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Rutschtypen.

Flach-, mittel- und tiefgründige Rutschungen

Gestützt auf die Empfehlungen des Bundes wird bei den Rutschungen zwischen flach- (Gleitfläche bis 2 m u. T.), mittel- (2-10 m u. T.) und tiefgründigen (> 10 m u. T.) Rutschungen unterschieden. Hinsichtlich der Beurteilung von Schutzmassnahmen ist die Klasse tiefgründiger Rutschungen jedoch differenzierter zu betrachten. Eine Unterscheidung in tiefgründige (bis 20-30 m u. T.) und sehr tiefgründige (> 30 m u. T.) Rutschungen ist notwendig, weil die Einsatzmöglichkeiten baulich-technischer Massnahmen bei sehr tiefgründigen Rutschungen in vielen Fällen v.a. aus technischen und wirtschaftlichen Gründen stark eingeschränkt sind. Zudem kann die Beherrschbarkeit sehr tiefgründiger Rutschungen technisch äusserst anspruchsvoll werden.

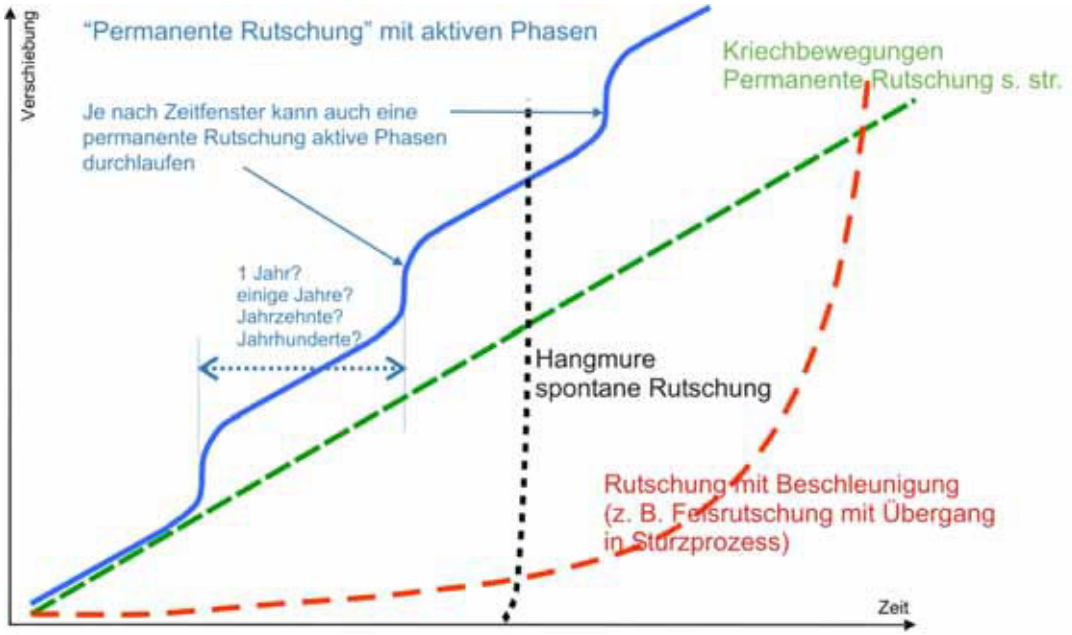


Abb. 1.1: Beispiele raum-zeitlichen Bewegungsverhaltens von Rutschungen (schematisch).

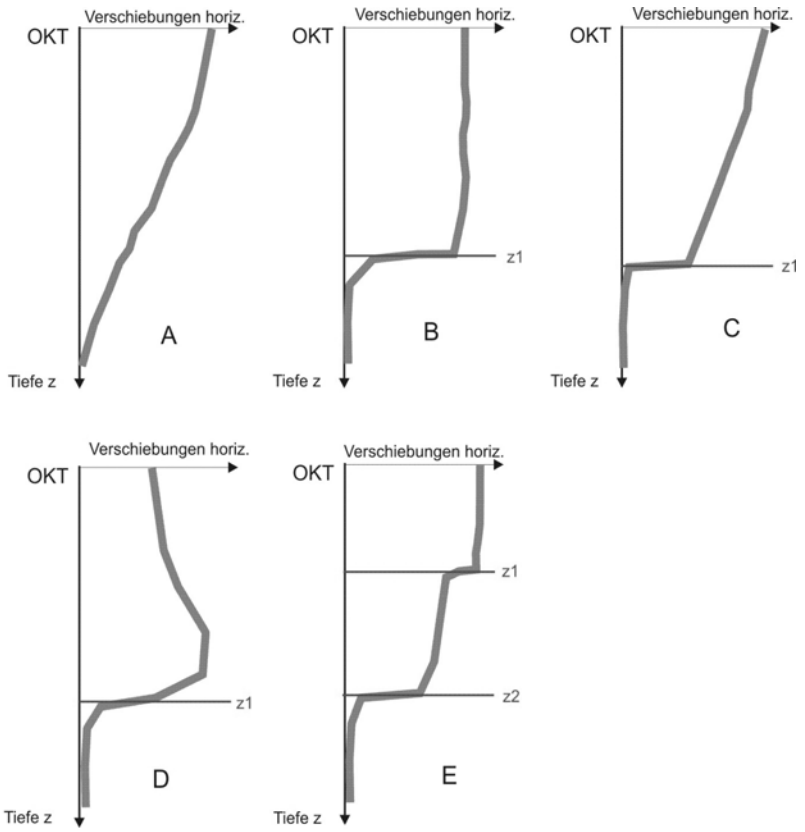


Abb. 1.2: Beispiele möglicher Bewegungsbilder in Vertikalschnitten instabiler Hänge:
A) gleichförmige Kriechbewegungen;
B) gleichmässige Bewegungen oberhalb deutlich ausgebildeter Gleitfläche in Tiefe z1;
C) wie B, aber überlagert durch Kriechbewegungen;
D) unregelmässige Bewegungen oberhalb einer Gleitfläche in Tiefe z1 mit Bewegungsmaxima unterhalb der Terrainoberfläche;
E) Rutschkörper mit zwei deutlich ausgebildeten Gleitflächen z1, z2;
(OKT = Oberkante Terrain).

1.3 Notwendige Prozessangaben

Zu erfassende Parameter

Ein Rutschkörper bzw. ein Rutschgebiet, das sich aus mehreren, sich unter Umständen mehr oder weniger individuell verhaltenden Rutschkörpern zusammensetzt, muss ausreichend genau erfasst sein, primär hinsichtlich folgender Punkte:

a. Lage der Gleitfläche (→ Gründigkeit, wie bestimmt? Bohrungen mit Inklinometern, Seismik, Profilkonstruktion oder nur Vermutung?);
b. Verlauf/Geometrie der Gleitfläche (→ Translation, Rotation, Mischformen; Verlauf auf der Felsoberfläche, im Lockergestein?);
c. Geologisches Modell mit den relevanten Bodenkennwerten der verschiedenen Schichten;
d. Teilkörperidentifikation (Teilrutschungen, Sekundärrutschungen, tiefe stabilisierte Zonen, überlagerte Prozesse);
e. Hangwasserverhältnisse (Lage Hangwasserspiegel; Porenwasserdruck bei normalen und ausserordentlichen Bedingungen [Krisen]; unterirdische Fliesswege; Zu- und Abflüsse, inkl. möglicher Zuflüsse aus anderen Einzugsgebieten, vgl. Campo Vallemaggia, Triesenberg);

f. Interaktionen mit anderen Prozessen (v. a. Bachprozesse → Erosion; Infiltration, Kollaps von Bachverbauungen möglich, in welchem Ausmass? Kann sich ein benachbartes Rutschgebiet auf das zur Diskussion stehende ausweiten? etc.);
g. Historie des Rutschverhaltens (→ Ereignisdokumentation, wodurch wurde das Rutschverhalten in der Vergangenheit bestimmt? → Niederschläge, Schneeschmelze, Erosion, Waldschäden, Erdbeben, anthropogene Faktoren (Bauten) etc.);
h. Frühere Bewegungen (→ Verschiebungsmessungen, Geodäsie, Photogrammetrie, Lidar und Satellitenbildanalysen, evtl. Radarinterferometrie);
i. Frühere Massnahmen (deren Wirkung, Funktionstüchtigkeit, Unterhalt, Kontrolle);
j. Historie der Landnutzung;
k. Möglichkeiten eines kurz- oder langfristigen Systemwechsels.

Umfassende Untersuchung notwendig

Diese Punkte müssen umfassender untersucht und erfasst sein, als dies bei der Ausarbeitung einer Gefahrenkarte in der Regel der Fall ist. Sie müssen ausreichend Informationen hinsichtlich der Erfassung von Intensität, Wahrscheinlichkeit und Szenarien liefern (→ Bandbreite möglicher Entwicklungen des Systems, inkl. Extremfall):

- Die Punkte a – e sind massgebend für den Aufbau eines plausiblen Modells, anhand dessen der Ist-Zustand und die Wirkung von Massnahmen berechnet/modelliert werden kann. Das System muss durch Variation der Parameter (z.B. Änderung der Gleitfläche, Bodenkennwerte, Lage des Hangwasserspiegels) hinsichtlich seiner Sensitivität ausgelotet werden.
- Die Punkte f – k liefern Hinweise für Szenarien und Wahrscheinlichkeiten. Hier sind auch Ereignisbaumanalysen denkbar, damit die Variabilität des Systems (inkl. Wahrscheinlichkeiten für das Zutreffen einer bestimmten Entwicklung) abgeschätzt werden kann. Bei Interaktionen mit Gerinneprozessen ist beispielsweise auch das Szenario eines Kollapses wasserbaulicher Massnahmen oder eines temporären Dammes in der Folge einer Rutschreaktivierung oder Rutschablagerungen im Gerinne in Betracht zu ziehen.

Die Berücksichtigung von Massnahmen kann erst dann abgeklärt werden, wenn diese Punkte ausreichend untersucht sind. Die Vorgehensweisen zur Klärung dieser Sachverhalte sind verschiedenartig.

2. Massnahmenübersicht

Charakterisierung Massnahmen

Mögliche Massnahmen zur Stabilisierung von Rutschungen können folgendermassen charakterisiert werden:

1. Massnahmen zielen auf die Veränderung des Verhältnisses zwischen treibenden und bremsenden Kräften. Diese sollen die Bewegungen während einer Krise signifikant reduzieren.
2. Es gibt verschiedene Massnahmen und Massnahmenkombinationen. Im Folgenden werden nur jene berücksichtigt, welche direkt Einfluss auf die Beschaffenheit der Rutschmasse haben.
3. Die wesentlichen Massnahmenkategorien sind: a) Veränderung der Hangwasserverhältnisse (Drainagetechniken s.l.); b) Einbringen von Kräften, welche der treibenden Kraft entgegen gesetzt sind (z.B. Scherwiderstand) und die Bewegungen reduzieren; c) Massenveränderungen (Änderungen in Profil und Materialien).
4. Prinzipiell lässt sich die Hangstabilität durch eine Massenveränderung grundlegend beeinflussen. Für eine Berücksichtigung muss die Wirkung der Massnahme rechnerisch geprüft sein (2D: an mindestens einem repräsentativen Hangprofil), unter Variation der Parameter und unter Beachtung von worst case-Szenarien.
5. Die Massnahmen werden oft kombiniert eingesetzt. Bei Massnahmenkombinationen bilden Entwässerungen fast immer einen Bestandteil davon.
6. Massnahmen können auch zeitlich gestaffelt erfolgen. Unter dem Aspekt der Optimierung kann es sinnvoll sein, im Rahmen eines Gesamtkonzeptes die Wirkung einer Massnahmen-Etappe abzuwarten, bevor eine weitere realisiert wird (z.B. Arveyes VD, drei Etappen).

Übersicht Massnahmen

Tab. 2.1 vermittelt eine Übersicht über die wichtigsten Massnahmen zur Stabilisierung von Rutschungen. Die verwendeten Kürzel stehen für folgende Massnahmenkategorien:

- H = Veränderungen der Hangwasserverhältnisse
- W = Einbringen von Kräften oder Widerständen, welche der treibenden Kraft entgegen gesetzt sind;
- M = Massenveränderungen
- V = Massnahmen, bei denen die Vegetation eine Wirkung ausübt.

Auswahl der hier behandelten Massnahmen

Massenveränderungen (Materialabtrag im treibenden Teil, Auflast im bremsenden Teil) werden hier nicht weiter im Detail behandelt. Nicht beurteilt werden die punktuell wirkenden Objektschutzmassnahmen. Massnahmen zur Stabilisierung/Sicherung künstlicher Böschungen werden hier nicht behandelt. Die Tabelle liefert eine Einschätzung, inwieweit die Massnahmen bei der Gefahrenbeurteilung berücksichtigt werden können. Sie ersetzt aber nicht die detaillierte Beurteilung. Die folgenden Ausführungen fokussieren sich prinzipiell auf die am häufigsten angewandten Massnahmenkategorien H1 und W1/W2.

Tab. 2.1: Übersicht wichtigste Massnahmenkategorien bei Rutschungen und Hangmuren. Oft werden Kombinationen davon angewendet.
Die Tabelle ist als eine stark verallgemeinernde Übersicht über die Eignung einer Massnahme zu betrachten. Bei jeder Massnahme sind indes Ausnahmen möglich, die im begründeten Einzelfall einer speziellen Prüfung unterzogen werden können (auch bei Massnahmen, deren Eignung hier verneint wird).

Massnahmen	**Berücksichtigung bei der Gefahren-beurteilung** [1]					**Bemerkungen**
	HM	RO	RM	RT	RXT	RO flachgründige Rutschung (bis 2 m u.T.) RM mittelgründige Rutschung (2-10 m u.T.) RT tiefgründige Rutschung (10-30 m u.T.) RXT sehr tiefgründige Rutschung (>30 m u.T.) HM Hangmure
H1a: Absenkung Hangwasserspiegel im Rutschgebiet						
freie Entwässerung in Drainagegräben (offen, geschlossen)						- mit/ohne Sohlenabdichtung - diverse Typen - anfällig auf differenzielle Bewegungen, aber Zustand visuell gut kontrollierbar - oft wichtige komplementäre Massnahme zu den meisten anderen Massnahmen
freie Entwässerung in überdeckten Drainagen unter der Terrainoberfläche („Tiefendrainage“)						- bei Tiefendrainagen oft nicht Gewähr, dass die relevanten Wasserfliesswege oder -horizonte erfasst werden - infolge Rutschbewegungen (diff. Bewegungen) können Undichtigkeiten entstehen - bei RO evtl. unverhältnismässig - bei HM nicht tiefer als potenzielle Ausbruchtiefe (Mächtigkeit mobilisierbare Schicht)
freie Entwässerung in subhorizontalen Bohrungen						- bei Aktivierungen können Bohrungen abgeschert werden - Versinterungsgefahr beachten - bei RO unverhältnismässig - bei HM unverhältnismässig; nicht tiefer als potenzielle Ausbruchtiefe
Entwässerung mittels Pumpen (aus Schächten, Schlitzen, Bohrungen, parois drainantes, drains siphons);						- bei Aktivierungen können Bohrungen abgeschert werden - v.a. bei Bohrungen Versinterungsgefahr beachten - bei RO evtl. unverhältnismässig - bei HM evtl. unverhältnismässig; nicht tiefer als potenzielle Ausbruchtiefe
Entwässerung durch Drainagestollen						- mit/ohne Entlastungsbohrungen - bei Aktivierungen können Bohrungen abgeschert werden - bei Bohrungen Versinterungsgefahr beachten - bei RO und HM unverhältnismässig

[1] Unter Wirkung sind hier nur stabilisierende Effekte gemeint. Vor allem die Massnahmen H1/H2 können Beeinträchtigungen mit sich bringen, in Form von Setzungen an der Oberfläche. In besiedelten Gebieten ist solchen Nebeneffekten Beachtung zu schenken.

Massnahmen	Berücksichtigung bei der Gefahrenbeurteilung [1]					Bemerkungen
	HM	RO	RM	RT	RXT	RO flachgründige Rutschung (bis 2 m u.T.) RM mittelgründige Rutschung (2-10 m u.T.) RT tiefgründige Rutschung (10-30 m u.T.) RXT sehr tiefgründige Rutschung (>30 m u.T.) HM Hangmure
H1b: Abbau Porenwasserdruck im Rutsch selbst oder unter der Gleitfläche						
Entlastungsbohrungen						- bei Aktivierungen können Bohrungen abgeschert werden - bei RO und HM unverhältnismässig
H2: Absenkung Hangwasserspiegel ausserhalb (oberhalb, seitlich) Rutschmasse						
Ableiten von zuströmendem Hangwasser (Drainagen, Drainagegräben)						- Einflüsse auf Rutschgebiet teils schwierig zu erfassen - oft notwendig oder sinnvoll als komplementäre Massnahme
Verhindern von Zuflüssen aus Oberflächenwasser (v.a. aus Bächen, stehenden Gewässern) durch Ableitung, Abdichtung						
W1: Einbringen von Scherwiderständen in der Gleitfläche						
Vernagelung, Pfähle, Mikropfähle, Schächte						- diverse Einsatzmöglichkeiten - langjährige praktische Erfahrungen - Normen beachten - bei RT und v.a. RXT stossen die Massnahmen an Grenzen (Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit) - in Kombination mit Materialabtrag können die Einsatzmöglichkeiten erhöht werden - bei HM enger Raster erforderlich oder Ergänzung mit Netzabdeckung
Injektionen in Gleitfläche, „claquage“						- Verfahren wenig erprobt - Wirkung sehr schwierig zu erfassen - keine Kontrollierbarkeit - bei Aktivierung Abscherungen und Versagen möglich
W2: Einbringen negativer treibender Kräfte unterhalb der Gleitfläche						
Anker, verankerte Stützkonstruktion						- diverse Typen und Konstruktionsweisen - langjährige praktische Erfahrungen - Normen beachten - bei RT und v.a. RXT stossen die Massnahmen an Grenzen (Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit) - in Kombination mit Materialabtrag können die Einsatzmöglichkeiten erhöht werden - bei HM evtl. Ergänzung mit Netzabdeckung erforderlich

Massnahmen	**Berücksichtigung bei der Gefahren-beurteilung** [1]					**Bemerkungen**
	HM	RO	RM	RT	RXT	RO flachgründige Rutschung (bis 2 m u.T.) RM mittelgründige Rutschung (2-10 m u.T.) RT tiefgründige Rutschung (10-30 m u.T.) RXT sehr tiefgründige Rutschung (>30 m u.T.) HM Hangmure
W3: Veränderung Materialeigenschaften						
Injektionen zur Verbesserung der Bodenkennwerte im bremsenden Teil						- wirkt auch als M1 - Verfahren wenig erprobt - Wirkung schwierig zu erfassen - schlechte Kontrollierbarkeit - keine sinnvolle Massnahme bei HM - allg. grosse Unsicherheiten
Injektionen zur Verbesserung der Bodenkennwerte angrenzend an eine Rutschmasse						- Präventive Massnahme zur Verhinderung einer Ausbreitung des Rutschgeschehens auf noch stabiles Gebiet - keine Fälle bekannt - keine sinnvolle Massnahme bei HM
Materialersatz (Bsp. Sickerbetongräben mit zusätzlicher Drainagewirkung H1a)						- wirkt auch als H1a - nur bei RO und (flachen) RM und HM sinnvoll
M1: Auflast bremsender Teil (Belastung am Rutschfuss)						
Schwergewichts-mauer , Stützmauer (wirken auch als W1)						- langjährige praktische Erfahrungen - Normen beachten - bei RT und v.a. RXT stossen die Massnahmen an Grenzen (Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit)
Aufschüttung Bodenmaterial (evtl. mit drainierendem Material)						- bei RT und v.a. RXT stossen die Massnahmen an Grenzen (Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit) - keine sinnvolle Massnahme bei HM
M2: Entlastung treibender Teil						
Materialabtrag im Rutschkopf						- bei RT und v.a. RXT stossen die Massnahmen an Grenzen (Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit) - keine sinnvolle Massnahme bei HM
M3: Schutz vor Entlastung am Rutschfuss infolge Erosion						
Sicherung des Rutschfusses durch offenen oder geschlossenen Bachverbau						- evtl. Anstieg Wasserspiegel am Hangfuss beachten (z.B. bei Sperrentreppe) - mögliche Interaktionen mit Bach- und Fluss-prozessen berücksichtigen - keine sinnvolle Massnahme bei HM
V1: Wald						
Beeinflussung Wasserhaushalt						- Beeinflussung Wasserhaushalt ist sehr schwierig zu quantifizieren - Bei RO und HM kann eine Berücksichtigung geprüft werden - Eine Rutschmasse kann durch Wald oder Nicht-wald ausserhalb des eigentlichen Rutsch-gebietes beeinflusst sein → Zuordnung rele-

Massnahmen	Berücksichtigung bei der Gefahren-beurteilung [1]					Bemerkungen
	HM	RO	RM	RT	RXT	RO flachgründige Rutschung (bis 2 m u.T.) RM mittelgründige Rutschung (2-10 m u.T.) RT tiefgründige Rutschung (10-30 m u.T.) RXT sehr tiefgründige Rutschung (>30 m u.T.) HM Hangmure
						vante Waldfläche zu Rutschfläche sehr schwierig
Armierung durch Wurzelwerk						- Nur bei RO und HM potenziell wirksam
V2: Ingenieurbiologische Massnahmen						
Beeinflussung Wasserhaushalt						- Beeinflussung Wasserhaushalt ist sehr schwierig zu quantifizieren - Bei RO und HM kann eine Berücksichtigung geprüft werden
Armierung, Erosionsschutz						- Nur bei RO und HM potenziell wirksam, eine Berücksichtigung kann dort geprüft werden
Legende:	nein		Differenzierte Betrachtung erforderlich			ja

Die Massnahmen W sind vorwiegend bei mittel- und flachgründigen Rutschungen wirtschaftlich, kommen aber auch bei tiefgründigen Rutschungen zum Einsatz. Bei tiefgründigen Rutschungen stehen die Massnahmen H im Vordergrund. Die Massnahmenkategorie M ist vorab bei mittel- und flachgründigen Rutschungen angezeigt, kann aber auch bei tiefgründigen Bedeutung haben.

Bei Massnahmen mit Bohrungen zur Absenkung des Porenwasserdrucks und/oder des Hangwasserspiegels ist bei der Beurteilung der Chemismus des Wassers zu beachten (Versinterungsgefahr). Die regelmässige Kontrolle der Massnahmen ist wichtig. Ebenso sind die Massnahmen so zu konzipieren, dass sie im Bedarfsfall gut saniert werden können.

Waldwirkung

Waldwirkung schwierig zu quantifizieren

Wald kann als Einzelmassnahme vor allem bei flachgründigen Rutschungen und Hangmuren eine wesentliche Wirkung entfalten, bedarf aber einer differenzierten Betrachtung. Bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen ist die Waldwirkung schwierig zu quantifizieren. Generell bildet der Wald eine wichtige komplementäre Massnahme zu den meisten anderen Massnahmenkategorien. Flachgründige Rutschungen und Hangmuren befinden sich im Einflussbereich des Wurzelraumes der Bäume. Hier kann der Wald seine stabilisierende Wirkung entfalten, einerseits dank Armierung des Bodens durch das Wurzelwerk, andererseits durch eine positive Beeinflussung des Untergrundes dank Interzeption, Transpiration und durch Verbesserung der Bodendurchlässigkeit. Besonders bei flachgründigen Rutschungen wirkt er auch als Last (treibend oder bremsend).

Unterirdische Wasserfliesswege schwer zu bestimmen

Besonders bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen kann ein Infiltrationsgebiet definiert werden. Dieses umfasst dasjenige Gebiet, in welchem das dem Rutschkörper unterirdisch zufliessende Wasser in den Untergrund versickert. Dieses Wasser wird teilweise durch die Wirkung des Waldes zurückgehalten. Oftmals ist es allerdings wegen fehlender Kenntnisse der unterirdischen Wasserfliesswege sehr schwierig, das Infiltrationsgebiet tatsächlich bestimmen zu können. Die diesbe-

züglichen Unsicherheiten sind in der Regel zu gross (Grundsatz 2), als dass der Wald bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen als Einzelmassnahme berücksichtigt werden könnte.

Wald kann durch Sturm oder Käfer beschädigt werden

Beim Wald als Massnahme ist ausserdem zu beachten, dass er infolge von Sturm oder Brand innert Stunden zerstört oder derart beschädigt werden kann, dass seine Wirkung stark beeinträchtigt wird (z.B. Wegfallen der Interzeption, etc.). Auch Käferbefall oder Krankheiten können ihn substanziell schwächen. Deshalb kann nicht von einer permanenten Verfügbarkeit des Waldes ausgegangen werden. Mit Ausnahme der flachgründigen Rutschungen und Flächen mit Disposition zur Entstehung von Hangmuren ebenfalls unberücksichtigt bleiben ingenieurbiologische Massnahmen, da deren Wirkung schwierig zu quantifizieren ist.

Weitere Einzelheiten zur Waldwirkung liefern Frehner et al. (2005).

3. Grobbeurteilung

Die Grobbeurteilung (Schritt 1) soll einen ersten Überblick über die Situation liefern, einerseits die Prozesskenntnisse, andererseits die Schutzmassnahmen betreffend (Tab. 3.1). Auf dieser Basis soll abgeschätzt werden können, ob von der Massnahme eine relevante Wirkung hinsichtlich der Gefahrensituation erwartet werden kann. Die Prozesskenntnisse müssen an dieser Stelle mindestens so weit erfasst sein, dass abgeschätzt werden kann, ob der Grundsatz 1 erfüllt ist.

3.1 Grundlagen/Informationen zu den Prozessen

Umfangreiche Grundlagenabklärungen nötig

Die üblicherweise vorhandenen Prozessgrundlagen wie Ereigniskataster, Gefahrenhinweiskarte und Gefahrenkarte sind für Rutschprozesse in der Regel nicht ausreichend, um Grundsatz 1 beantworten zu können. Auf der Basis dieser Standardgrundlagen kann keine Beurteilung der Massnahmenwirkung vorgenommen werden. Mittel- und vor allem tiefgründige Prozesse bedürfen wesentlich umfangreicherer Abklärungen. Grundlagen, die gewisse Mindestvoraussetzungen nicht erfüllen, sind zurückhaltend oder allenfalls auch nicht zu verwenden.

Notwendige Unterlagen

Aufgrund der Komplexität von Rutschungen sind auf Stufe der Grobbeurteilung bereits umfassende Abklärungen zum Prozessverständnis vorauszusetzen. Folgende Unterlagen müssen in ausreichender Qualität vorhanden sein:

- Karte der Phänomene (erweiterte Legende) oder vergleichbare Grundlage;
- Das Gesamtsystem ist mitsamt seiner Teilprozesse und möglichen Interaktionen erfasst;
- Das Spektrum möglicher Prozesswirkungen ist mittels Szenarien erfasst. Dabei ist auch das Extremereignis betrachtet worden;
- Geologisch-hydrogeologisches Modell, mit entsprechenden Hangprofilen;
- Gefahrenbeurteilung basierend auf den Empfehlungen des Bundes[2] und der AGN-Methode.

3.2 Grundlagen/Informationen zu den Massnahmen

Infos aus Schutzbautengrundlagen zum Gefahrenpotenzial

Die vorhandenen Schutzbautengrundlagen (v.a. Projektunterlagen, z.B. Daten über bestehende Anker) enthalten möglicherweise Angaben, welche über die üblichen Gefahrengrundlagen hinausgehen. So machen beispielsweise Verankerungen keinen Sinn, wenn nicht Angaben bzw. konkrete Vorstellungen über den Verlauf der Gleitfläche(n) bestehen. Ebenso setzt die räumliche Platzierung einer Massnahme ein räumliches Gesamtbild des Prozesses voraus. Hingegen setzt das Erstellen von Drainagegräben nicht zwangsläufig ein vertieftes Prozessverständnis voraus. Dank solcher Unterlagen kann auch das Gefahrenpotenzial besser eingegrenzt werden.

Projektdossier und Ausführungspläne bei verborgenen Teilen unabdingbar

Verschiedene Massnahmen zur Stabilisierung von Rutschungen beinhalten verborgene Teile oder sie entziehen sich einer direkten visuellen Kontrolle (gemäss Tab. 2.1 besonders: H1a ausser Oberflächendrainagen, H1b, W1, W2, z.T. W3). In diesen Fällen sind ein umfassendes Projektdossier und Ausführungspläne unabdingbar. Durch nachträgliche Feldbegehungen lassen sich die fehlenden Unterlagen in der Regel kaum mehr zweifelsfrei rekonstruieren.

[2] Die Empfehlungen des Bundes werden momentan überarbeitet. Teile der AGN-Methode werden integriert.

3.3 Negative Wirkungen

Bei negativer Wirkung Weiterbearbeitung

Wird bei einer Massnahme ein Mangel festgestellt oder vermutet, welcher eine gefahrenverschärfende Wirkung zur Folge haben kann, so ist die Massnahme weiter zu bearbeiten, unter speziellem Fokus auf mögliche Versagensszenarien (Wirkungsanalyse, Schritt 3).

Beispiel A: Nicht unterhaltene Drainagen haben einen verstärkten Wassereintrag in den Untergrund und eine Erhöhung des Hangwasserspiegels zur Folge. Es besteht die Gefahr einer Aktivierung der Rutschmasse.

Beispiel B: Eine nicht kontrollierte und nicht unterhaltene Ankerwand kann ihre Funktionstüchtigkeit verlieren und kollabieren. Vormals durch die Ankerwand zurück gehaltene Hangbereiche können in Bewegung geraten.

3.4 Gesamtkonzept und Relevanz

Massnahmen im Gesamtkonzept bewerten

Die **Wirkung von Massnahmen** kann nur im Gesamtkontext eines Gefahrenpotenzials beurteilt werden. Die Relevanz einer Massnahme ist deshalb im Gesamtkontext zu bewerten. Dabei stellen sich besonders folgende Fragen:

- Fokus der Massnahme, z.B. Stabilisierung einer Teilrutschung oder Gesamtlösung? Eine Teillösung – beispielsweise die Stabilisierung einer aktiven Sekundärrutschung innerhalb eines Rutschhanges – kann eine sinnvolle, risikoorientierte Lösung sein, auch wenn dadurch nicht der gesamte Hang stabilisiert wird (Abb. 3.1).

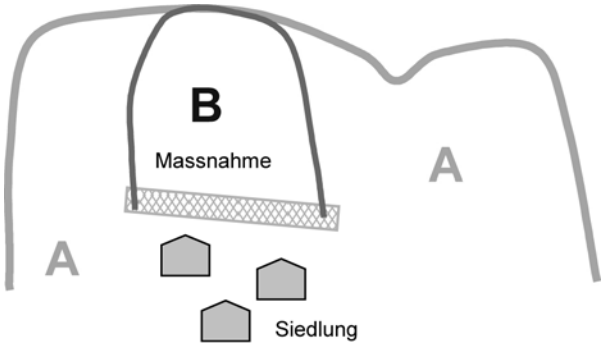


Abb. 3.1: Bezogen auf das Schadenpotenzial Siedlung kann die Stabilisierung einer Teilrutschung B innerhalb eines grösseren Rutschgebietes A zweckmässig sein. Die Wirkung der Massnahme ist dann bezogen auf die Teilrutschung und unter Beachtung möglicher Einflüsse aus dem Gesamtsystem A zu beurteilen.

- Wenn die Massnahme auf eine Gesamtlösung fokussiert: Wurde das Gefahrenpotenzial in seinem gesamten räumlichen Ausmass akkurat erfasst?
- Ist die Ausdehnung der Massnahme ausreichend gross, um der Gefährdung wirksam zu begegnen (z.B. nur lokale Entwässerungsgräben in einem Rutschhang lassen vermuten, dass die Wirkung lokal begrenzt ist)?
- Sind Interaktionen mit anderen Rutschungen und/oder anderen Prozessen (z.B. Hangfusserosion durch Wildbach) möglich?
- Kann sich die Wirkung der Massnahme im Laufe der Zeit verändern?
- Ist die Wirkung der Massnahme auf einen Prozess grösser als die Unsicherheiten bei der Beurteilung desselben (Grundsatz 2)?

Tab. 3.1: Ablauf der Grobbeurteilung (Minimalanforderungen). Nein = Abbruch (die Massnahme wird nicht berücksichtigt). ⬏ *= Die Beurteilung muss ergänzt und von vorne begonnen werden.*

	Anforderungen/Kriterien	**Ja**	**Nein**	**Bemerkungen**
Prozesskenntnisse, Gefahrensituation				
0	Es liegen folgende Unterlagen in ausreichender Qualität vor: - a. Karte der Phänomene (erweiterte Legende) oder vergleichbare Grundlagenkarte; - b. Das Gesamtsystem ist mitsamt seiner Teilprozesse und möglichen Interaktionen erfasst; - c. Das Spektrum möglicher Prozesswirkungen ist mittels Gefährdungsbildern (Szenarien) erfasst. Dabei ist auch das Extremereignis betrachtet worden; - d. Geologisch-hydrogeologisches Modell, mit entsprechenden Hangprofilen; - e. Gefahrenbeurteilung basierend auf den Empfehlungen des Bundes und der AGN-Methode.	→1	Abbruch ⬏	Nein = Abbruch oder: die Grundlagen müssen zuerst erarbeitet werden. ⬏ Abbruch auch dann, wenn die Prozessunsicherheiten zu gross sind. AGN-Methode bei neueren Gefahrenbeurteilungen (ab 2005).
Massnahme (Verfügbarkeit, Lebensdauer)				
1	Die Massnahme ist auf eine lange Lebensdauer ausgelegt (mindestens 50 Jahre).	→2	Abbruch +8	Ja = Grundsatz 5 erfüllt. Bei Abbruch spezielle Abklärungen auf negative Wirkung.
2	Kontrollen, Unterhalt und Reparaturen sind - langfristig geregelt. Es besteht eine Trägerschaft, vorteilhafterweise auch ein Grundbucheintrag. - können verbindlich und dauerhaft geregelt werden.	→3	Abbruch + 8	Bei Abbruch spezielle Abklärungen auf negative Wirkung.
Gesamtkonzept und Relevanz				
3	Der Fokus der Massnahme ist auf den gesamten Prozessraum ausgerichtet.	→4	→6 oder Abbruch	Nein = Die lokale Wirkung kann unter 6 weiter geprüft werden.
4	Die Massnahmenwirkung kann unter Berücksichtigung mindestens der folgenden Aspekte beurteilt werden: - a. Interaktionen bekannt; - b. Absicht der Massnahme bekannt/kann vermutet werden; - c. Massnahmenstandort wirksam; - d. Ausreichende Ausdehnung der Massnahme im Hinblick auf die Absicht der Massnahme; - e. Erfahrungen in ähnlichen Fällen.	→5	Abbruch oder ⬏	Nein = ist einer der Aspekte nicht bekannt, sind die entsprechenden Abklärungen nachzuholen. Andernfalls Abbruch.
5	Es besteht eine bestimmbare, relevante Wirkung oder eine solche kann mit guten Gründen vermutet werden.	→9	Abbruch + 8	Ja = Grundsätze 1 und 2 erfüllt. Weiter mit Schritt 2.
6	Der Fokus der Massnahme ist nur auf einen Teil des gesamten Prozessraumes ausgerichtet. Die örtliche Massnahmenwirkung kann analog Ziffer 4 und 5 beurteilt werden unter Berücksichtigung mindestens der folgenden Aspekte: - a. Interaktionen bekannt, speziell mit angrenzendem Prozessraum;	→7	Abbruch oder ⬏ Abbruch + 8	Teillösung kann lokal berücksichtigt werden, aber max. bis auf Gefahrenstufe des Gesamtprozesses. Voraussetzung: Das ganze Beurteilungsprozedere ergibt für die Teillösung ein positives

	Anforderungen/Kriterien	**Ja**	**Nein**	**Bemerkungen**
	- b. Absicht der Massnahme bekannt/kann vermutet werden; - c. Massnahmenstandort wirksam; - d. Ausreichende Ausdehnung der Massnahme im Hinblick auf die Absicht der Massnahme; - e. Erfahrungen in ähnlichen Fällen.			Resultat. Abbruch auch dann, wenn das Problem „falsch“/unzureichend erfasst wurde.
7	Es besteht eine bestimmbare, relevante Wirkung oder eine solche kann mit guten Gründen vermutet werden.	→9	Abbruch + 8	Ja = Grundsätze 1 und 2 lokal erfüllt. Weiter mit Schritt 2.
Negative Wirkung				
8	Es besteht die Möglichkeit einer negativen Wirkung, welche sich im Laufe der Zeit gefahren-verschärfend auswirken kann.	→vgl. Kap. 3.3	Abbruch	Ja = Spezielle Abklärungen (vgl. Kap. 3.3).

4. Massnahmenbeurteilung

Strenge Anforderungen an Datenbearbeitungsgrad

Beurteilt wird die Zuverlässigkeit der einzelnen Massnahme unter Berücksichtigung verschiedener Prozesswirkungen (Szenarien; Gefährdungsbilder). Hinsichtlich der Prozesswirkungen sind bei den Rutschungen aufgrund ihrer Komplexität (dreidimensionaler Charakter, Interaktionen, Teilrutschungen, Raum-Zeit-Verhalten) strenge Anforderungen an den Detaillierungsgrad der Bearbeitung zu stellen.

4.1 Grundlagen/Informationen zu den Prozessen

Szenarienbezogene Quantifizierung der Prozesse

Die Grundlage für die Massnahmenbeurteilung bildet die szenarienbezogene Quantifizierung der Prozesse. Es sind konkrete Angaben zu folgenden Punkten erforderlich:

- Geologisch-hydrogeologisches Modell (geotechnisches Modell), möglichst auf der Basis von Sondierungen (Bohrungen, Seismik, Geoelektrik, Sondierschlitze);
- Geologische Hangprofile (ohne/mit Massnahme[n]), möglichst auf der Basis von Sondierungen (wie oben);
- Quantifizierte Bodenparameter;
- Stabilitätsberechnungen mit Sensitivitätsanalysen (2D in diversen Schnitten oder 3D);
- Für bekannte Krisen (Phasen mit Potenzial zu einer Rutschaktivierung) liegt eine Ursachenanalyse vor;
- Ausreichend lange Messreihen (Geodäsie, Inklinometer, Extensometer);
- Die Geschichte der Rutschung ist bekannt bzw. rekonstruierbar.

Für neu entstandene, spontane Rutschungen und Hangmuren in zuvor nachweislich unverrutschtem Terrain sind die beiden letztgenannten Punkte irrelevant.

Bei zu grossen Unsicherheiten Abbruch

Verbleiben die Unsicherheiten auf dieser Bearbeitungsstufe zu gross, so ist die Beurteilung abzubrechen (Grundsatz 2). Die Massnahme kann nicht berücksichtigt werden.

4.2 Grundlagen/Informationen zu den Massnahmen

Angaben für 2D-/3D-Berechnungen notwendig

Für die Beurteilung der Massnahmenwirkung auf den Untergrund sind ausführliche Informationen erforderlich, speziell bei Massnahmen mit verborgenen Teilen. Die Mehrheit der in Tab. 2.1 aufgeführten Massnahmen wirkt aufgrund von Teilen, die verborgen und oft nicht direkt kontrollierbar sind. Nachstehende Massnahmenangaben sind unerlässlich. Es sind mindestens jene Angaben zu liefern, welche für 2D-/3D-Berechnungen nötig sind. Diese Angaben sind den Projekt- bzw. Ausführungsunterlagen zu entnehmen. Bei Oberflächen-Drainagen sind Feldaufnahmen zweckmässig, wobei gleichzeitig die Zustandsanalyse durchgeführt werden kann. Dasselbe gilt für Wald bzw. ingenieurbiologische Massnahmen. Injektionen W1, W3 werden als Einzelmassnahme nicht berücksichtigt (Tab. 2.1), sind aber allenfalls im Verbund mit anderen Massnahmen zu beachten. Die Informationen zu den Massnahmen sollten über folgende Eigenschaften Auskunft geben:

Unterirdische Ausdehnung (vertikal, horizontal) bei den Massnahmenkategorien:

- Tiefendrainagen (H1a)
- Drainagestollen (H1a
- Bohrungen (H1a, H1b)
- Pfähle, Schlitze, Schächte (H1a, W1)
- Anker (W2)
- Hangwasserentwässerung bei Stützkonstruktionen (W2, M1)

Tiefe (Fundationstiefe, Tiefe des Materialersatzes) bei den Massnahmenkategorien:

- Ankerwand, Stützkonstruktionen allg. (W2)
- Schwergewichtsmauern (M1)
- Materialersatz (W3)
- Auflasten, Schüttungen (M1)
- Schutz vor Entlastung am Rutschfuss (M3)

Verwendete Materialien, deren Eigenschaften und Dimensionen:

- Filterrohre aus PVC oder Stahl (H1a, H1b)
- Durchmesser Bohrungen, Filter, Schlitze, Schächte (H1a, H1b)
- Filtermaterial (H1a, H1b)
- Typus Scherwiderstand, Quantifizierung des Scherwiderstandes (W1)
- Ankertyp, Lastaufnahmefähigkeit (W2)
- Korrosionsschutz bei Komponenten aus Stahl (W1, W2)
- Armierungen (W2, M1)
- Raumgewicht bei Auflasten (M1)
- Raumgewicht bei Entlastungen (M2)

Angaben zu den Ausmassen betreffend:

- Anzahl Bohrungen, Drainagen, Schächte etc.
- Anzahl Anker, Scherwiderstände etc.
- Laufmeter Drainagegräben
- Volumen Materialersatz
- Volumen Entlastung, Auflast

Bei allen Massnahmen ist eine Zustandsanalyse durchzuführen. Dazu ist in der Regel eine Feldbegehung nötig (Ausnahme: ganz neue Massnahmen).

4.3 Gefährdungsbilder

Typische Gefährdungsbilder

Unter Gefährdungsbildern sind schleichende oder plötzliche Einwirkungen auf die Massnahme zu verstehen, welche zu einer Verringerung von deren Zuverlässigkeit führen können. In nachfolgender Tab. 4.1 sind einige typische Gefährdungsbilder und Einwirkungen aufgeführt, welche bei der Massnahmenbeurteilung zu beachten sind.

Tab. 4.1: Beispiele typischer Gefährdungsbilder (Liste nicht abschliessend).

Gefahrenbilder	**Einwirkungen**
Verstärkte Hangbewegungen, räumlich konzentrierte Differenzialbewegungen, Stabilitätsprobleme	- Abscheren von oberflächlichen Entwässerungsgräben → Infiltration von Oberflächenwasser - Undichtigkeiten bei Tiefendrainagen → Anstieg Hangwasserspiegel, Porenwasserdruck - Abscheren von Drainagebohrungen → Anstieg Hangwasserspiegel, Porenwasserdruck - Abscheren von Scherwiderständen → Verlust an Scherwiderstand - Überschreiten der Bruchlast von Ankern → Verlust an negativer treibender Kraft - Versagen von Stützkonstruktionen → Verlust an rückhaltenden Kräften
Chemisch-physikalische Einflüsse	- Versinterung oder Kolmatierung von Drainagerohren, Entwässerungsbohrungen → Anstieg Hangwasserspiegel, Porenwasserdruck - Korrosion von Stahlteilen bei Scherwiderständen, Ankern → Reduktion Materialeigenschaften bis hin zu Versagen, v.a. bei verstärkten Hangbewegungen
Einwirkung von Naturgefahrenprozessen	- Naturgefahrenprozesse können verschiedenartig auf vorhandene Massnahmen einwirken (Aufprall, Druckwirkung, Erosion). Solche Interaktionen sind szenarienbezogen im Gesamtsystem zu betrachten.

4.4 Tragsicherheit

Nur bei Massnahmen mit statischer Funktion

Der Begriff Tragsicherheit im engeren Sinne kann bei Schutzmassnahmen gegen Rutschungen nur bei Massnahmen mit einer statischen Funktion verwendet werden (Tab. 2.1: W1 ohne Injektionen, W2, M1 ohne Aufschüttung, M3). Bei Massnahmen zur Absenkung des Hangwasserspiegels ist die Verwendung des Begriffes Tragsicherheit im engeren Sinne weniger geeignet, obschon ein Hang als Ganzes betrachtet ein System darstellt, dessen Zustand im weitesten Sinn auch unter dem Aspekt der Tragsicherheit betrachtet werden kann. Dasselbe gilt für jene Massnahmen, bei denen durch Veränderungen der Geländeformen eine Verbesserung der Stabilität erzielt wird (Tab. 2.1: Aufschüttung unter M1, M2).

Funktionalität

Im Folgenden wird der Begriff Tragsicherheit im Sinne der SIA-Normen auf Massnahmen und Bestandteile von Massnahmen mit statischer Funktion angewendet. Für die anderen Massnahmen wird der Begriff „Funktionalität“ verwendet. Die Funktionalität ist die Fähigkeit einer Massnahme, für die anzunehmenden Einwirkungen eine ausreichende Stabilisierung zu erzielen.

Szenarienbezogene Berechnungen

Eine pauschale Beurteilung von Tragsicherheit und Funktionalität ist aufgrund der Komplexität von Rutschprozessen nicht angezeigt. Eine qualitative oder quantitative Beurteilung ist daher unabdingbar. Da auf Stufe der Massnahmenbeurteilung bei

den Unterlagen zu Rutschprozessen ohnehin Stabilitätsberechnungen erforderlich sind, wird die Festlegung der Funktionalität in den meisten Fällen durch szenarienbezogene Berechnungen (v.a. 2D) erfolgen. Die Funktionalität kann als gegeben betrachtet werden, wenn folgende Bedingung erfüllt ist[3]:

$$\frac{\Sigma\, bremsende\, Kraft}{\Sigma\, treibende\, Kraft} \geq 1.05...1.10 \qquad (1)$$

Bei einer ausschliesslich qualitativen Beurteilung muss die begründete Vermutung vorliegen, dass diese Bedingung gegeben ist.

4.5 Gebrauchstauglichkeit

Funktionstüchtigkeit gewährleisten

Die Gebrauchstauglichkeit ist die Fähigkeit einer Massnahme und ihrer Bauteile, die Funktionstüchtigkeit entsprechend den festgelegten Gebrauchsgrenzen zu gewährleisten. Bei Rutschungen können wegen der grossen Massnahmenpalette und den oft komplexen Verhältnissen diesbezüglich keine generellen Angaben gemacht werden. Hinweise zu den einzelnen Massnahmentypen (Tab. 2.1) liefert Kap. 4.8.

Auswertung visuell oder mit Messreihen

Die Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit erfolgt visuell oder durch Auswertung von Messreihen (z. B. kontinuierlich abnehmende Schüttung von Drainagen unabhängig vom Witterungsverlauf als Indikator für Versinterung, Verstopfung oder Undichtigkeit). Bei neuen Massnahmen kann sie als erfüllt betrachtet werden.

4.6 Dauerhaftigkeit

Unterhalten, erneuern, ersetzen

Die Dauerhaftigkeit einer Massnahme kann als gewährleistet betrachtet werden, wenn deren Nutzungsdauer im Rahmen eines „normalen“ Unterhalts von mindestens 50 Jahren erwartet werden kann (Grundsatz 5). Bei den Rutschungen werden hier unter Unterhalt explizit auch Erneuerungen und der Ersatz von Anlageteilen verstanden (z.B. Ersatz von Drainagebohrungen durch Austausch von Pumpen).

Dauerhaftigkeit nur bei kontrollierbaren Massnahmen

Sie kann bei allen Massnahmentypen bestimmt werden, bei denen eine Kontrollierbarkeit besteht. Dass Teile des Schutzwerkes oder gar das Ganze nicht sichtbar sind, ist manchmal erschwerend, schliesst eine Kontrolle aber nicht grundsätzlich aus. Die Kontrolle kann direkt visuell (z. B. Entwässerungsgräben, Ankerwand) oder indirekt (z.B. Messung an Kontrollankern, Hangwasserspiegelmessungen, Porenwasserdrücke, Sonden, Kameras) erfolgen. Die Massnahmen W3 sind hingegen kaum zuverlässig zu prüfen. Bei den biologischen Massnahmen (v.a. V1) kann nicht von einer gesicherten Dauerhaftigkeit ausgegangen werden, da sie innert kurzer Zeit ihre Wirkung verlieren können (z. B. Sturmschaden am Wald).

Angepasstes Kontrollsystem

Das Kontrollsystem muss für das geologisch-geotechnische Modell konfiguriert sein, damit die Prognosen über das Verhalten des Systems nach Massnahmen verifiziert werden können. Beispielsweise ist bei einem zur Absenkung des Hangwasserspiegels ausgelegten Massnahmenpaket die dauernde Kontrollierbarkeit des Hangwassers zwingend nötig.

[3] Für die Verwendung geotechnischer Kennwerte sind die Bestimmungen SIA 267, Kap. 5.3.2, zu den Partialfaktoren zu berücksichtigen.

4.7 Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit einer Massnahme wird durch die Verknüpfung von Tragsicherheit / Funktionalität, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit bestimmt (Abb. 5.2, Teil A).

Massnahmen häufig kombiniert

Eine Besonderheit bei Rutschungen ist, dass Massnahmen oft kombiniert eingesetzt werden (z.B. Verankerung kombiniert mit Drainagen). In welchem Ausmass ein einzelner Teil eines Massnahmenpaketes zur Stabilisierung beiträgt, ist nicht einfach zu beurteilen. Die Zuverlässigkeit des Gesamt-Schutzsystems hat durch Prüfung der einzelnen Massnahmen zu erfolgen.

Überlagerung verschiedener Prozesse möglich

Je grösser die Unsicherheiten des geologisch-geotechnischen Modells, umso kleiner ist die Zuverlässigkeit von Massnahmen einzustufen. Die Unsicherheiten müssen nicht zwangsläufig mit der Gründigkeit und dem involvierten Volumen des Prozesses zunehmen, denn ein homogener tiefgründiger Rutschkörper kann unter Umständen besser bestimmbar sein als eine heterogene mittelgründige Rutschung. Wesentlich ist, dass die Schutzmassnahme auf einem Modell basiert, das der möglichen Überlagerung verschiedener Teilprozesse Rechnung trägt (z.B. phänomenologisch deutlich feststellbare flach- oder mittelgründige Rutschungen, welche tiefgründige Bewegungen überlagern und verbergen, vgl. Abb. 1.2).

4.8 Hinweise zur Beurteilung der einzelnen Massnahmenkategorien

Keine Standardbeurteilung möglich

Zur Stabilisierung von Rutschungen gibt es keine Standardlösungen. Die Massnahmen müssen fallweise beurteilt werden. Die nachfolgenden Angaben liefern allgemeine Hinweise, die bei der Beurteilung der Massnahmen zu beachten sind. Dabei wird zwischen permanenten und spontanen Rutschprozessen unterschieden. Die Kriterien betreffend ist anzumerken, dass die Aufzählungen nicht abschliessend sind und die Bedeutung der Kriterien von Fall zu Fall verschieden sein kann.

4.8.1 Permanente Rutschungen

H1a/H1b: Absenkung Hangwasserspiegel/Abbau Porenwasserdruck

Funktionalität einigermassen bestimmbar

Der Massnahmentyp H1 zielt auf die Absenkung des Hangwasserspiegels und der Porenwasserdrücke innerhalb des Rutschkörpers. Ein Abbau der Porenwasserdrücke kann auch unterhalb der Gleitfläche als stabilisierende Massnahme wirkungsvoll sein. Die Funktionalität solcher Massnahmen ist in der Regel einigermassen bestimmbar. Bei Aussagen bezüglich der Porenwasserdrücke sind die Unsicherheiten etwas grösser.

Dauerhafte Überwachung nötig

Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit sind einigermassen bestimmbar, wenn Einrichtungen vorhanden sind, welche eine dauerhafte Überwachung der Hangwasserverhältnisse erlauben (Piezometer, Porenwasserdruckgeber, Schüttungsmessstellen). In heiklen Situationen können Überwachungen automatisiert und permanent verfügbar gemacht werden. Generell ist ein Kontroll-/Unterhaltsplan erforderlich. Vor allem in komplexeren Situationen kann es vorteilhaft sein, Kontrollen, Unterhalt und Auswertungen durch ein beauftragtes Büro vornehmen zu lassen. Augenmerk ist der Funktionstüchtigkeit der Messeinrichtungen zu schenken. So kann ein Piezometer beispielsweise abgeschert sein, die Resultate verfälschen und Anlass zu Fehlinterpretationen geben.

Ersatz von Massnahmenteilen

Für die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit muss ein möglicher Ersatz von Massnahmenteilen beachtet werden (z. B. Drainagebohrung).

Wichtigste Kriterien

Gebrauchstauglichkeit nicht/teilweise[4] erfüllt:

- Verstopfte Entwässerungsgräben oder -kännel (oft wegen mangelndem Unterhalt);
- Unterirdische Entwässerungsleitungen oder Drainagebohrungen sind versintert oder verstopft (H1);
- Pumpen in Entwässerungsbohrungen funktionieren nicht (H1).

Dauerhaftigkeit nicht/teilweise erfüllt:

- Keine geeigneten Einrichtungen zur Messung des Hangwasserspiegels vorhanden;
- Keine Ersatzmöglichkeiten von Entwässerungsmassnahmen;
- Es besteht kein geregelter Kontroll-/Unterhaltsplan mit klaren Zuständigkeiten/Verantwortlichkeiten.

H2: Absenkung Hangwasserspiegel ausserhalb Rutschmasse

Stabilisierende Wirkung zu erwarten

Die Absenkung des Hangwasserspiegels ausserhalb des zu sanierenden Rutschkörpers lässt eine stabilisierende Wirkung erwarten, die aber schwierig zu erfassen ist. Es gibt aber Fälle, wo die Massnahme eine hohe Wirkung erzielen kann. Als komplementäre Massnahme ist dieser Typ stets ins Auge zu fassen.

Funktionalität nur bei kontrollierbaren Massnahmen zu beurteilen

Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Massnahme sind im Allgemeinen bestimmbar. Für den einigermassen gesicherten Nachweis der Funktionalität müssten im Rutschkörper selbst Messeinrichtungen vorhanden sein, aufgrund welcher die Wirkung der Massname(n) beurteilt und kontrolliert werden kann. Ist dies nicht der Fall, muss die Funktionalität als nicht erfüllt betrachtet und von einer geringen Zuverlässigkeit ausgegangen werden.

Wichtigste Kriterien: analog H1a/H1b

W1/W2: Einbringen von Scherwiderständen/negativen treibenden Kräften

Gute Wirkung bei flach- und mittelgründigen Rutschungen

Das Einbringen von Scherwiderständen (W1) oder von negativen treibenden Kräften (W2) kann vor allem bei flach- und mittelgründigen Rutschungen als wirksame Massnahme betrachtet werden. Bei tiefgründigen und besonders sehr tiefgründigen Rutschungen kann die Wirtschaftlichkeit den Einsatz der Massnahme limitieren. Grundsätzlich ist es denkbar, durch Materialabtrag die Distanz zur Gleitfläche zu verringern, um somit Scherwiderstände oder negative treibende Kräfte besser einbringen zu können. Bei Materialabtrag ist zu prüfen, ob dadurch nicht neue Instabilitäten hervorgerufen werden können (Ausbildung neuer Gleitflächen). Zudem wirken auch hier Wirtschaftlichkeitsüberlegungen limitierend. Die Tragsicherheit ist quantitativ gut, qualitativ mit Einschränkungen (tiefgründige Rutschungen) bestimmbar. Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Massnahmen können erfüllt werden. Einschränkungen sind zu machen, wenn die Kontrollierbarkeit der Massnahme nicht gegeben ist.

[4] Das Ausmass der Nichterfüllung ist fallweise zu beurteilen

Wichtigste Kriterien

Gebrauchstauglichkeit nicht/teilweise erfüllt:

- Scherwiderstände oder Anker sind abgeschert;
- Anker sitzen nicht fest oder sind ausgerissen;
- Scherwiderstände (z.B. Nägel, Mikropfähle) sind stark korrodiert;
- Fehlender Verbund (z.B. Riegel, Longarine) zwischen den Köpfen von Ankern, Nägeln, Mikropfählen etc.

Dauerhaftigkeit nicht/teilweise erfüllt:

- Keine geeigneten Kontrollmöglichkeiten (visuell/messtechnisch) der wirkenden Lasten/Kräfte vorhanden;
- Keine Möglichkeiten für den Ersatz von Massnahmenteilen;
- Es besteht kein geregelter Kontroll-/Unterhaltsplan mit klaren Zuständigkeiten/Verantwortlichkeiten.

W3: Veränderung Materialeigenschaften

Wirkung bei flachgründigen Rutschungen

Die Veränderung der Materialeigenschaften, z.B. durch Materialersatz, kann bei flachgründigen und flachen mittelgründigen Rutschungen eine Wirkung entfalten.

Bei tiefgründigen Rutschungen zu grosse Unsicherheiten

Die Wirkung dieser Massnahmenkategorie ist allerdings schwierig zu erfassen bzw. die Funktionalität kaum zuverlässig zu quantifizieren. Bei tiefgründigen Rutschungen sind die Unsicherheiten dieser Massnahme zu gross. Wegen der schwierigen Erfassbarkeit der Massnahme ist die Zuverlässigkeit durchwegs als gering zu bezeichnen. Eine Ausnahme bei flach- und mittelgründigen Rutschungen können Sickerbetongräben bilden, welche zusätzlich auch eine Drainagewirkung entfalten (Kriterium Gebrauchstauglichkeit nicht/teilweise erfüllt: Sickerbetongräben sind wegen differenzieller Bewegungen in sich zerschert und/oder die Hohlräume kolmatiert).

M1/M2/M3: Auflast und Entlastung

Hohe Zuverlässigkeit möglich

Durch Veränderungen der Massenbilanz kann grundsätzlich eine hohe Zuverlässigkeit erzielt werden. Mit steigender Prozesstiefe kann die Wirtschaftlichkeit den Einsatz der Massnahme zunehmend limitieren. Die Funktionalität kann relativ gut quantifiziert werden. Eine qualitative Beurteilung beinhaltet zu grosse Unsicherheiten. Die Anforderungen bzgl. Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit sind in der Regel erfüllbar.

Der Schutz vor Entlastung des Rutschfusses durch Erosion (M3) ist primär bei flach- und mittelgründigen Rutschungen wirksam. Bei tiefgründigen Rutschungen sind dieser Massname eher Grenzen gesetzt.

Wichtigste Kriterien

Gebrauchstauglichkeit nicht/teilweise erfüllt:

- Eine als Fusslast wirkende Aufschüttung ist stark erodiert oder es besteht die Gefahr, dass sie erodiert werden kann (→ Massenverlust);
- Bei einem durch Materialabtrag entlasteten Rutschkopf ist durch nachrutschendes Material eine neue Zusatzlast entstanden.

Dauerhaftigkeit nicht/teilweise erfüllt:

- Es besteht kein geregelter Kontrollplan.

V1/V2: Wald und ingenieurbiologische Massnahmen

Nur bei flachgründigen Rutschungen zu berücksichtigen

Wald und ingenieurbiologische Massnahmen können lediglich bei flachgründigen Rutschungen als Massnahme berücksichtigt werden (siehe Kap. 2). Der Wald fliesst jedoch bei den in der Wirkungsanalyse verwendeten Szenarien ein. Beim Wald ist die Dauerhaftigkeit nicht gegeben, denn er kann infolge von Sturm, Brand oder gravitativen Naturprozessen innert Kürze zerstört oder derart stark beschädigt werden, dass seine Wirkung weitgehend entfällt. Auch Käferbefall oder Krankheiten können ihn substanziell schwächen. Deshalb kann nicht von einer permanenten Verfügbarkeit des Waldes ausgegangen werden (Grundsatz 3). Im Gegensatz beispielsweise zur Lawinengefahr, wo bei einem geschädigten Wald mittels temporärem Stützverbau eine Schutzwirkung erzielt werden kann, bestehen bei Rutschungen keine vergleichbaren Möglichkeiten.

Wald wirkt auch ausserhalb des Standortes stabilisierend

Beim Wald kommt erschwerend hinzu, dass er seine Wirkung hinsichtlich Rutschungen nicht einzig an seinem Standort selbst entfaltet. Dank seiner Regulierung der Hangwasserverhältnisse kann sich der Wald auch stabilisierend auf weiter hangabwärts liegende Bereiche auswirken.

4.8.2 Spontane Rutschungen (inkl. Hangmuren)

Häufig an substabilen Hängen

Spontane Rutschungen und Hangmuren ereignen sich vielfach an Stellen, an denen keine offensichtlichen Hanginstabilitäten in Form von aktiven Rutschungen vorhanden waren. Bei näherer Betrachtung zeigt es sich allerdings oft, dass die betroffenen Hänge Anzeichen geringfügiger Kriechbewegungen oder früherer Bewegungen aufweisen und der Rutschterminologie entsprechend als substabil zu bezeichnen wären. Spontane Rutschungen aus vollkommen stabilen Hängen oder Böschungen kommen seltener vor. Diesbezüglich häufiger sind Hangmuren, bei denen aber oft eine anthropogene Beeinflussung hinzukommt (siehe AGN, 2004).

Bei der Beurteilung der Massnahmenwirkung bei spontanen Rutschprozessen sind folgende Fälle zu unterscheiden:

Frontpartien oder steile Geländeabschnitte aktiver Rutschkomplexe

- Spontane Rutschungen und/oder Hangmuren aus Frontpartien oder steileren Geländeabschnitten aktiverer Rutschkomplexe: Deren Entstehung ist eine Folge der zunehmenden Versteilung von Hangpartien infolge permanenter Hangbewegungen. Je stärker die Bewegungsraten einer permanenten Rutschung mittels der erwähnten Massnahmen reduziert werden können, umso geringer wird in der Regel die Wahrscheinlichkeit solcher spontanen Folgeprozesse. Rutschbereiche, welche besonders zu spontanen Sekundärprozessen neigen, können durch gezielte Massnahmen entschärft werden (v.a. H1a/H1b). Im Wesentlichen gelten auch hier die unter Kap. 4.8.1 gemachten Hinweise.

Mutmasslich stabile Hänge

- Spontane Rutschungen und/oder Hangmuren aus mutmasslich stabilen Hängen oder Böschungen: Recht häufig sind solche Ereignisse anthropogen beeinflusst (siehe Förderfaktoren in AGN 2004). Deshalb geht es primär darum, anthropogene Förderfaktoren zu eliminieren, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses bereits reduziert werden kann. Erst in einem zweiten Schritt sind gezielte Schutzmassnahmen in Betracht zu ziehen. Hierzu sind die folgenden Hinweise zu beachten.

H1a/H1b: Absenkung Hangwasserspiegel/Abbau Porenwasserdruck

Grundsätzlich gefahrenmindernde Wirkung

Grundsätzlich lassen Entwässerungsmassnahmen eine gefahrenmindernde Wirkung vermuten, entscheidend ist aber deren Dimensionierung. Da Hangmuren

und spontane Rutschungen meist mit einer extremen Durchnässung des Bodens einhergehen, müssten die Entwässerungsmassnahmen auf solche Verhältnisse ausgelegt sein. Die Dimensionierung ist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, da oberirdische wie auch unterirdische Spitzenzuflüsse quantifiziert werden müssten. Wenn Entwässerungsmassnahmen versagen bzw. eine unzureichende Wirkung aufweisen, können sie selber zu einem Trigger werden, indem sie z. B. örtlich überlaufen, eventuell verbunden mit Erosion (v.a. offene Entwässerungskanal), zum Aufbau einer hohen Wassersättigung und/oder hoher Wasserdrücke beitragen oder eine Längsdrainage entlang von Leitungen begünstigen. Solche Versagensmöglichkeiten müssen szenarienbezogen abgeschätzt werden. Im Gegensatz zu permanenten Rutschungen, wo Entwässerungsmassnahmen direkt am Stand der Hangwasserspiegellage kontrolliert werden können, dürfte diese Kontrollmöglichkeit speziell bei Entwässerungsmassnahmen zur Verhinderung von Hangmuren meist fehlen, da sich ein hoher, kritischer Hangwasserspiegel erst bei extremen Witterungsverhältnissen einstellt.

Die Unsicherheiten bei der Massnahmenbeurteilung sind insgesamt als erheblich, die Versagenswahrscheinlichkeit als gross einzustufen.

Unsichere Beurteilung

H2: Absenkung Hangwasserspiegel ausserhalb Rutschmasse

Die Auslösung von spontanen Rutschungen und Hangmuren betreffend lässt diese Massnahmenkategorie ebenfalls eine gewisse Wirkung vermuten, die aber äusserst schwierig zu erfassen und zu kontrollieren ist. Die Unsicherheiten sind gross.

Wirkung zu vermuten aber schwer zu erfassen

W1/W2: Einbringen von Scherwiderständen/negativen treibenden Kräften

Hänge mit einer Disposition zum Ausbruch von Hangmuren können durch den Verbau mit Widerständen gesichert werden. Da Hangmuren selbst auf kleiner Fläche (ca. 1 Are) entstehen können, wäre dazu ein relativ enges Verbauraster nötig, gegebenenfalls mit einer flächenhaften Netzabdeckung ergänzt, welche den Verbund zwischen den Widerstandselementen (z.B. Köpfe von Mikropfählen) sicherstellt und einen Erosionsschutz bildet. Die Unsicherheiten bei der Dimensionierung eines solchen Hangverbaus können dank der heutigen Untersuchungsmethoden stark eingeschränkt werden. Eine optimale Wirkung ist dann zu erwarten, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Enges Verbauraster notwendig

- Widerstände müssen bis unter die potenziell mobilisierbare Lockergesteinsschicht reichen, bei untiefem Fels (Förderfaktor) bis in den Fels;
- Die Widerstände müssen in einem relativ engen Raster angeordnet sein, um das Ausbrechen von Hangmuren aus den Zwischenräumen zu verhindern (oder evtl. Ausfachung der Zwischenräume mit Netzabdeckung).

Nachteilig ist die erschwerte Kontrollierbarkeit einer flächigen Hangsicherung, was Fragen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Massnahme aufwirft. Grundsätzlich könnte ein solcher Hang auch durch eine systematische, durch einen Geologen/Geotechniker konzipierte und begleitete, geschlossene Überbauung mit Häusern gesichert werden. Die Unsicherheiten sind in diesem Fall gering und die Frage der Kontrollierbarkeit kaum relevant, so dass diese Massnahme als wirksam bezeichnet werden kann.

Dauerhaftigkeit schwierig zu kontrollieren

W3: Veränderung Materialeigenschaften

Ein Materialersatz in Form von Sickerbetongräben kann die Entstehung spontaner Rutschungen und auch das Ausbrechen von Hangmuren erschweren. Neben der

Wirkung schwierig zu beurteilen

Wirkung als Widerstand ist dabei auch der Drainageeffekt zu beachten. Die Beurteilung der Massnahmenwirkung ist schwierig zu erfassen.

M1/M2/M3: Auflast und Entlastung

Bei tiefgründigen Rutschungen ungeeignet

Diese Massnahmen können zur Verhinderung spontaner, v.a. flach- und mittelgründiger Rutschungen wirkungsvoll und zuverlässig sein. Zur Verhinderung von Hangmuren sind sie weniger geeignet.

V1/V2: Wald und ingenieurbiologische Massnahmen

Dauerhaftigkeit nicht sichergestellt

Wald und ingenieurbiologische Massnahmen können bei spontanen flachgründigen und flachen mittelgründigen Rutschungen sowie bei Hangmuren als Massnahme berücksichtigt werden. Wie bereits aus Kap. 2 hervorgeht, ist die Wirkung schwierig zu beurteilen und beim Wald ist die Dauerhaftigkeit nicht sichergestellt.

4.9 Gesamtsystem Massnahmen

Einzelmassnahme wirkt auf Gesamtsystem

Unter dem Gesamtsystem wird der Verbund mehrerer Einzelmassnahmen verstanden. Das Versagen einer Einzelmassnahme kann eine Beeinträchtigung des Gesamtsystems zur Folge haben. Bei einer Kombination von Massnahmen, wie dies bei Rutschungen oft der Fall ist, sind die Auswirkungen jeder einzelnen Massnahme zu beurteilen. Beispielsweise werden Stützkonstruktionen meist mit Entwässerungen kombiniert. Wenn die Entwässerung versagt, dann wirken auch auf die Stützkonstruktion andere Kräfte.

Tab. 4.2: Ablauf der Massnahmenbeurteilung (Minimalanforderungen, Fortsetzung von Tab. 3.1). Die Beurteilung hat szenarienbezogen zu erfolgen. Der Ablauf bezieht sich auf bestehende Massnahmen, ist aber auch bei projektierten Massnahmen anzuwenden (dabei fallen verschiedene Beurteilungspunkte weg). Hinweis: In der Spalte „Nein" ist unter verschiedenen Ziffern „Schritt 3" aufgeführt. Was darunter zu verstehen ist, geht aus den jeweiligen Bemerkungen hervor.

	Anforderungen/Kriterien	**Ja**	**Nein**	**Bemerkungen**
Grundlagen Prozess				
9	Um die Wirkung der Massnahme mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können, liegen umfassende **quantitative Grundlagen** vor, insbesondere: - a. Ausreichend lange Messreihen (Geodäsie, Inklinometer, Extensometer); - b. Die Geschichte der Rutschung ist bekannt bzw. rekonstruierbar; - c. Für bekannte „Krisen" liegt eine Ursachenanalyse vor; - d. Geologisch-hydrogeologisches Modell (geotechnisches Modell), möglichst auf der Basis von Sondierungen (Bohrungen, Seismik, Geoelektrik, Sondierschlitze); - e. Geologische Hangprofile (ohne/mit Massnahme[n]), möglichst auf der Basis von Sondierungen (wie oben); - f. Quantifizierte Bodenparameter; - g. Stabilitätsberechnungen mit Sensitivitätsanalysen (2D in diversen Schnitten oder 3D). -	→10	Abbruch oder ⬆	Rein qualitative oder nur punktuell-quantitative Beurteilungen sind unzureichend. ⬆ = Falls einer der Punkte nebenstehenden nicht erfüllt ist, sind die entsprechenden Abklärungen nachzuholen. Andernfalls erfolgt Abbruch. Eine Ausnahme bilden Spontanrutschungen, für welche a, b und c nicht zutreffen.

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
Grundlagen Massnahme				
10	Die vorhandenen Werksangaben sind umfassend. Sie informieren ausreichend über das Werk (Erstellungszeitpunkt, z.B. Ausführungsprojekt).	→11	Abbruch oder ↑	Weitere Abklärungen, wenn ungenügende Angaben vorliegen. Sind keine genügenden Angaben eruierbar → Abbruch und spezielle Abklärungen auf negative Wirkung (Kap. 3.3).
11	Der Ist-Zustand ist erfasst. Es können Aussagen gemacht werden zu allfällig reduzierten Wirkungen.	→12	Abbruch oder ↑	Weitere Abklärungen, wenn ungenügende Angaben vorliegen. Sind keine genügenden Angaben eruierbar → Abbruch und spezielle Abklärungen auf negative Wirkung (Kap. 3.3).
Bestimmung Tragsicherheit/Funktionalität				
12	Tragsicherheit/Funktionalität sind gegeben. Sie können szenarienbezogen entweder **qualitativ** oder **quantitativ** ausreichend genau abgeschätzt oder bewertet werden. Bei qualitativer Betrachtung gilt insbesondere: - a. Das Bauwerk zeigt keine verdächtigen Mängel; - b. Es ist zu vermuten, dass Punkt a. auch für verborgene, nicht kontrollierbare Massnahmenteile gilt.	→13	Schritt 3 +21 oder: Abbruch	Nein = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit geringer Zuverlässigkeit. oder: Abbruch, falls Tragsicherheit/Funktionalität völlig unzureichend. Spezielle Abklärungen auf negative Wirkung (vgl. Kap. 3.3).
13	Die Massnahme hat in der Vergangenheit erheblichen Belastungen („Krisen“) bereits erfolgreich widerstanden, was als Hinweis für eine genügende Tragsicherheit/Funktionalität betrachtet werden kann.	→16	→14	
14	Es kann quantitativ oder semi-quantitativ nachgewiesen werden, dass die Tragsicherheit/Funktionalität der Massnahme auch bei einer „Krise“ gegeben ist.	→16	→15	
15	Aus ungenügender Tragsicherheit/Funktionalität ist resultiert **keine** Verschärfung der Gefahrensituation.	Schritt 3 +21	Abbruch	Ja = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit geringer Zuverlässigkeit. Nein = Abbruch und spezielle Abklärungen auf negative Wirkung (vgl. Kap. 3.3).
Bestimmung Gebrauchstauglichkeit				
16	Die Schutzmassnahme ist neu. Die Gebrauchstauglichkeit kann bezogen auf Szenario X als erfüllt betrachtet werden.	→18	→17	Ja = Gebrauchstauglichkeit erfüllt.
17	Die Schutzmassnahme zeigt **keine** Schwachstellen, welche bezüglich Szenario X ein funktionelles Versagen vermuten lassen.	→18	Schritt 3 +21 oder Abbruch	Ja = Gebrauchstauglichkeit teilweise/bedingt erfüllt. Nein = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit geringer Zuverläs-

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
				sigkeit. oder: Bei erheblichen Schwachstellen Abbruch und spezielle Abklärungen auf negative Wirkung (Kap. 3.3).
Bestimmung Dauerhaftigkeit				
18	Die Schutzmassnahme hat **keine** nicht direkt kontrollierbaren Bauteile. oder: Die Wirkung verborgener Bauteile kann indirekt über Messungen kontrolliert werden.	→19	Schritt 3 +21	Nein = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit Zuverlässigkeit eingeschränkt (falls Ziffern 16 oder 17 bejaht).
19	Es kann angenommen werden, dass die Massnahme auf längere Zeit den möglichen Einwirkungen standhält und in gutem Zustand bleibt. oder: Das System ist so ausgelegt, dass bei Bedarf kurzfristig gleichwertige Ersatzmassnahmen vorgenommen werden können (z.B. Ersatz eines defekten Ankers).	→20	Schritt 3 +21	Nein = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit eingeschränkter Zuverlässigkeit .
20	Kontrollen und Unterhalt sind auf längere Zeit durch Institutionen der öffentlichen Hand (ggf. Flurgenossenschaften) gewährleistet.	Schritt 3 +21	Schritt 3 +21	Ja = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit hoher Zuverlässigkeit . Nein = Wirkungsbeurteilung (Schritt 3) mit eingeschränkter Zuverlässigkeit .
Betrachtung im Massnahmen-Gesamtsystem				
21	Die Massnahme ist isoliert zu betrachten. Sie ist nicht Bestandteil eines Gesamtsystems von Massnahmen.	Schritt 3	→22	Ja = Gesamtbetrachtung.
22	Es bestehen weitere, direkt rutschbezogene Massnahmen.	→23	→24	
23	Die Zuverlässigkeit des Massnahmen-Gesamtsystems ist aufgrund der Zuverlässigkeit der einzelnen Massnahmen überprüft. oder: Es existieren nachweislich Redundanzen (das Versagen der einzelnen Massnahme beeinträchtigt das Gesamtsystem nicht oder nur geringfügig).	→24	⮤	Nein = jede einzelne Massnahme ist im Ablauf bis zu Ziffer 20 zu beurteilen.
24	Es bestehen weitere Massnahmen im Bereich eines anderen Gefahrenprozesses (z. B. Wildbach), welche sich auf das System auswirken können. Deren Wirkung ist bekannt.	Schritt 3	Schritt 3	Ja = Wirkungsbeurteilung des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der Massnahmen des anderen Gefahrenprozesses. Falls deren Wirkung nicht bekannt → Beurteilung derselben bis zu Ziffer 20. Nein = Wirkungsbeurteilung des Gesamtsystems „Rutschung“.

5. Wirkungsbeurteilung

Es wird die szenarienbezogene Wirkung der Massnahme(n) auf den Prozessablauf quantifiziert. Die Resultate werden direkt in Gefahrenkarten umgesetzt.

5.1 Permanente und spontane Rutschungen: Ansatz Stabilitätsberechnungen

Stabilitätsberechnungen bestmöglicher quantitativer Ansatz

Die Quantifizierung der Massnahmenwirkung ist auf Verfahren zur Berechnung der Stabilität abzustützen (2D oder 3D). Solche Stabilitätsberechnungen machen keine Aussagen zur Aktivität einer Rutschung. Sie unterscheiden sich darin zu Hochwasser-, Lawinen- oder Sturzmodellierungen, welche konkrete Aussagen zu Intensitäten und Wirkungsräumen liefern. Da Stabilitätsberechnungen jedoch vereinfachender rechnerischer Ausdruck eines Systemzustandes bzw. von dessen Sensitivität sind, müssen sie als bestmöglicher quantifizierender Ansatz zur Gefahren- bzw. Wirkungsbeurteilung bei permanenten und spontanen Rutschungen betrachtet werden.

2D-Stabilitätsberechnungen häufiger

Vor allem 2D-Stabilitätsberechnungen werden in der Praxis von zahlreichen Fachspezialisten angewandt. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass mögliche Anwender in genügender Zahl vorhanden sind. Bei 3D-Stabilitätsberechnungen hingegen ist der Kreis der Anwender auf hochspezialisierte Institutionen (v.a. Hochschulen) beschränkt. Das prinzipielle Vorgehen bei Stabilitätsberechnungen betreffend wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (z.B. Lang et al., 2003).

Parametervariationen bei Stabilitätsberechnungen

Die Stabilitätsberechnungen müssen der möglichen Variation der relevanten Parameter ausreichend Rechnung tragen und auf einem plausiblen geologisch-hydrogeologischen Modell basieren (Anforderungen siehe Kap. 1.3). Unsicherheiten im Modell sind durch entsprechende Parametervariation zu berücksichtigen, woraus ein „Ensemble“ errechneter Stabilitätswerte resultiert.

Prozessseitig bezieht sich die Parametervariation v.a. auf:

- Bodenkennwerte φ’, c’
- Lage der Gleitfläche(n)
- Geometrie der Gleitfläche [polygonal, kreisförmig]
- Möglichkeit der Bildung neuer Gleitflächen
- Lage des/der Hangwasserspiegel
- Porenwasserdrücke
- evtl. Erosion im bremsenden Teil
- Bildung möglicher Auflasten im treibenden Teil (z.B. Einflüsse aus angrenzenden Rutschungen)
- Mögliche Lastfälle

Erheblicher Untersuchungsaufwand insbesondere. bei grossen Rutschungen

Die Komplexität von Rutschungen bedingt unter Umständen einen erheblichen Untersuchungsaufwand, insbesondere bei grossen Rutschungen. Dadurch kann die Bandbreite möglicher Parametervariationen besser eingegrenzt werden. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass bei zu grossen Unsicherheiten in der Bildung des geologisch-geotechnischen Modells ein Abbruch der Beurteilung zu erwägen ist

Parametervariationen bei Scherwiderständen und negativ treibenden Kräften

Massnahmenseitig betrifft die Parametervariation v.a. die effektiven Werte für Scherwiderstände und negativ treibende Kräfte (Ankerkräfte). Variationen sind besonders dann erforderlich, wenn die Zuverlässigkeit von Massnahmen nur eingeschränkt oder gering ist. Spezieller Fokus ist dabei auf die Tragsicherheit/Funktionalität (Kap. 4.4) und die Gebrauchstauglichkeit (Kap. 4.5) zu richten. Bei einer Absenkung des Hangwasserspiegels könnte die Frage beispielsweise lauten: Wie verändert sich die Stabilität des Systems, wenn die Entwässerungsleistung durch Versinterung oder Verstopfung abnimmt?

Verwendung geotechnischer Grössen gemäss SIA 260

Die Geotechniknorm (SIA 260) liefert die Grundsätze zur Verwendung von geotechnischen Grössen. In den Berechnungen und bei den verwendeten Parametern ist zwischen totalen und effektiven Spannungen zu unterscheiden.

Grundsätze, Annahmen, Vorgehen:

a) Eine Massnahme bewirkt eine verringerte Wahrscheinlichkeit, dass eine substanzielle Beschleunigung/Aktivierung („Krise“) eintritt (permanente Rutschungen) oder ein Bruchvorgang stattfindet (spontane Rutschungen). Die Wirkung einer Massnahme kann anhand der Resultate von Stabilitätsberechnungen beziffert werden. Als Mass wird der Sicherheitsfaktor FS verwendet. Als Sicherheitsgewinn wird die prozentuale Veränderung der Stabilität zwischen dem Ausgangszustand und dem Zustand nach Massnahmen bezeichnet.

b) Die Stabilität ist vorteilhaft entlang verschiedener Profile zu berechnen. Dabei ist für die Beurteilung der Wirksamkeit jeweils das ungünstigste Profil zu verwenden.

c) Die Zuverlässigkeit bzw. Versagenswahrscheinlichkeit einer Massnahme wird szenarienbezogen über die Modellparameter berücksichtigt. So hat beispielsweise eine eingeschränkt zuverlässige Entwässerung einen Anstieg des Hangwasserspiegels zur Folge, was sich in einem geringeren Sicherheitsfaktor niederschlägt. Defekte Anker haben einen Verlust an negativen treibenden Kräften zur Folge. Je geringer die Zuverlässigkeit der Massnahme, umso mehr nähern sich die Modellparameter dem Ausgangszustand an (vor Massnahmen). Die Steuerung der Modellparameter hat fallspezifisch zu erfolgen. Es gibt dazu keine allgemein gültigen Regeln. Speziell zu beachten sind mögliche verschärfende Auswirkungen nicht funktionierender Massnahmen. Die Überlegungen zur Variation der Modellparameter müssen textlich klar dargelegt werden.

d) Für die Zustände vor und nach Massnahmen sind dieselben szenarienabhängigen Randbedingungen zu verwenden.

e) Bei den Berechnungen ist eine Variation der Modellparameter erforderlich, welche der Komplexität der Gefahrensituation sowie den jedem Untergrund immanenten Inhomogenitäten und Anisotropien ausreichend Rechnung trägt. Die Parametervariation hat innerhalb eines vernünftigen Wahrscheinlichkeitsbereichs stattzufinden, der im Einklang steht mit den bei der Erarbeitung von Gefahrenkarten üblichen Standards des Bundes (also keine extrem unwahrscheinlichen Szenarien wählen).

f) Aus der Variation der Parameter gehen verschiedene Sicherheitsfaktoren hervor, welche letztlich ein Mass für die Sensitivität des Systems sind. Die Streuung wird durch den Quotienten $FS_{max}./FS_{min}$. zum Ausdruck gebracht. FS_{max} entspricht dem besten, FS_{min} dem schlechtesten realistischen Systemzustand. Je umfangreicher eine sinnvolle Parametervariation möglich ist (z.B. grosse Zahl von Hangwasserspiegelmessungen), umso mehr ergeben sich Möglichkeiten einer statistischen Auswertung der erreichten Sicherheits-

faktoren (Standardabweichung $\mu \pm 2\sigma$ = 95% der Fälle. Anmerkung: geotechnische Parameter sind oft nicht normal verteilt).
Dabei wird von folgenden Überlegungen ausgegangen:

- Je grösser der Sensitivitätsquotient desto grösser sind die Unsicherheiten.
- Bei einem sensiblen/unsicheren System muss der prozentuale Sicherheitsgewinn gegenüber dem Zustand vor Massnahmen grösser sein als bei einem weniger sensiblen, um die Wirkung einer Massnahme berücksichtigen zu können.

g) Der Sensitivitätsquotient ($FS_{max.}/FS_{min.}$) wird dem prozentualen Sicherheitsgewinn gegenüber gestellt, wie in Abb. 5.1 anhand eines Beispieles erläutert wird.

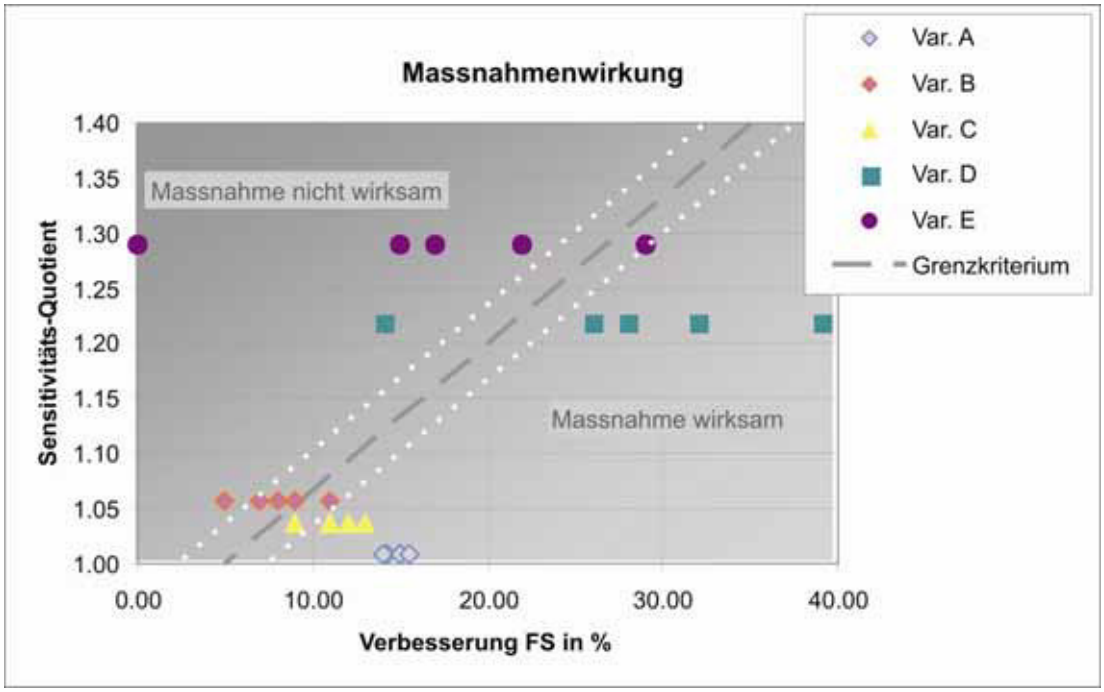


Abb. 5.1: Beurteilung der Massnahmenwirkung. Datengrundlage Massnahmen: Bericht F0725.5, GEOTEST, 18.12.2007.

Sicherheitsgewinn = prozentuale Veränderung gegenüber Ausgangszustand

In Abb. 5.1 sind als Beispiel die Sicherheitsfaktoren für fünf Systemzustände mit Massnahmen dargestellt (Var. A, B, C, D, E). Jeder Fall ist durch Parametervariationen (φ', c', Hangwasserspiegel) und verschiedene Lastannahmen charakterisiert, woraus unterschiedliche Sicherheitsfaktoren resultieren. Die Variation der Sicherheitsfaktoren wird durch den Quotienten (y-Achse, „Sensitivitätsquotient") ausgedrückt. Der Sicherheitsgewinn (x-Achse) ist die prozentuale Veränderung gegenüber dem Ausgangszustand (vor Massnahme). Das Grenzkriterium (graue Gerade) unterteilt das Diagramm in zwei Felder (Massnahme wirksam vs. nicht wirksam). Es ist nicht als scharfe Grenze zu verstehen, sondern als ein Übergangsbereich (hell gepunktete Geraden). Bei erfüllter Massnahmenwirkung ist eine Reduktion der Gefahrenstufe möglich, bei schlechter Wirksamkeit nicht. Im vorliegenden Fall erweisen sich Varianten A und C als weitgehend wirksam. Bei den Varianten B, D und E existieren verschiedene Parameterkombination, bei denen die Massnahmenwirkung ungenügend ist.

5.2 Alternativer Ansatz für permanente Rutschungen

Nach langer Beobachtungszeit Wirksamkeit ohne Berechnungen zu beurteilen

Es gibt einzelne Fälle permanenter Rutschungen, in denen die Massnahmenwirkung nicht mittels 2D- oder 3D-Modellierungen geprüft wurde, wo aber lange Messreihen (v.a. Bewegungsraten, Hangwasserspiegel) vorliegen (z.B. Lehnenviadukt A2 Beckenried NW, Arveyes VD). In solchen Fällen kann die Wirksamkeit als gegeben betrachtet werden, wenn die Beobachtungszeit ausreichend lang ist (ca. 10 Jahre) und die Rutschung dabei auch witterungsmässig kritische Situationen schadlos überstanden hat (z.B. Starkniederschläge Frühjahr 1999, August 2005).

Bei geologischen Unsicherheiten lange Beobachtungen sinnvoll

Generell sind längere Beobachtungsphasen äusserst wertvoll, um die Wirkung einer Massnahme zu verifizieren. Dies gilt speziell dort, wo die Unsicherheiten im geologischen Modell relativ gross sind.

5.3 Methodischer Ansatz für Hangmuren

Wirkungsbeurteilung auf Stabilitätsberechnungen abstützen

Bei Hangmuren bestehen graduelle Übergänge zu flachgründigen spontanen Rutschungen. Inwieweit der Prozess durch einen Bruchvorgang im engeren Sinne oder durch Verflüssigungsphänomene (z.B. hydraulischer Grundbruch, Liquefaktion, Überschreiten Fliessgrenze) initiiert wurde, ist im Einzelfall indes schwierig zu beurteilen. Obschon Stabilitätsberechnungen nur Aussagen zum Bruchverhalten des Untergrundes machen, ist bei der Wirkungsbeurteilung von Massnahmen gegen Hangmuren auf dieses Hilfsmittel abzustützen. Es erlaubt einerseits den Einfluss des Wassers (Hangwasserdruckhöhe bei der Auslösung von Hangmuren oft höher als die Terrainoberfläche), andererseits die kritischen Gleitflächen (Tiefe) und involvierten Volumina abzuschätzen. Den Unsicherheiten im Modell ist durch Variation der Parameter Rechnung zu tragen. Zusätzlich ist eine Massnahme zwingend hinsichtlich ihrer Flächenwirkung zu beurteilen, denn der Ausbruch von Hangmuren erfolgt oft sehr kleinräumig (Ausbrüche auf einer Fläche von 1 Are sind keine Seltenheit) und ist in der Regel durch nicht lokalisierbare Diskontinuitäten oder Inhomogenitäten im Untergrund vorgezeichnet. Durch eine wirksame Massnahme müssen auch kleinflächige Ausbrüche unterbunden werden.

Die Wirkungsbeurteilung umfasst somit zwei Schritte:

1. Stabilitätsberechnungen (analog Kap. 5.1) → wirksam/nicht wirksam;
2. Beurteilung der Flächenwirkung einer Massnahme bzw. des Massnahmenrasters (vgl. Hinweise Kap. 4.8.2) bezüglich der minimal noch möglichen Ausbruchflächen. Verhindert der Verbau das Ausbrechen von Hangmuren < 1-2 Are, so kann die Massnahme als wirksam (++) betrachtet werden.

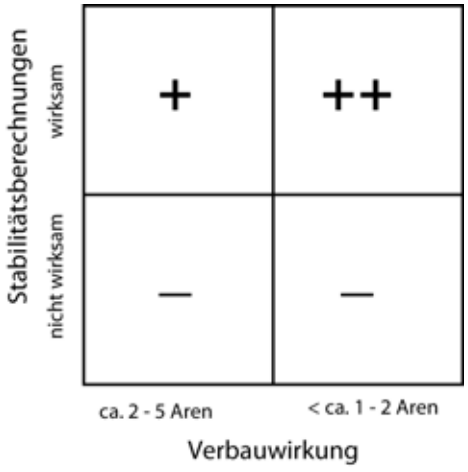


Abb. 5.2: Beurteilung der Massnahmenwirkung bei Hangmuren aufgrund der Kriterien Stabilität und Verbauraster (++ = weitgehend wirksam, + = bedingt wirksam → kleine Ausbrüche sind noch möglich; – = unwirksam).

5.4 Umsetzung in der Gefahrenkarte

System mit und ohne Massnahmen überprüfen

Die Beurteilung der Wirksamkeit von Massnahmen bei Rutschungen ist sehr anspruchsvoll. Im Gegensatz zu den anderen gravitativen Naturgefahren kann nicht einfach eine neue Modellierung beispielsweise auf der Basis der Existenz eines Schutzdammes (z.B. Sturz, Lawinen) gerechnet und anschliessend analysiert werden, wie viel Material zurückgehalten wird. Bei Rutschungen muss stets geprüft werden, wie sich das ganze System mit und ohne Massnahmen verhält. Dabei müssen alle Unsicherheiten bezeichnet werden, und zwar auf folgenden Ebenen:

- Prozess (Unsicherheiten geologisch-hydrogeologisches Modell);
- Massnahme (Unsicherheiten bezüglich Zuverlässigkeit);
- Wirkung der Massnahme (inkl. Abschätzung Extremereignis).

Permanente Rutschungen

Wirkung auf Intensität, Aktivierungspotenzial, Differenzialbewegung, Wahrscheinlichkeit

Massnahmen wirken in der Regel auf die Intensität bzw. Aktivität, das Aktivierungspotenzial und das Potenzial zu Differenzialbewegungen (z.B. Hangbewegungen werden durch eine Ankerwand stark reduziert oder gestoppt) sowie etwas untergeordnet auch hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit (Eintretenswahrscheinlichkeit einer „Krise“ oder Aktivierung).

Umsetzung durch Reduktion der Gefahrenstufe

Die Umsetzung der ausgewiesenen Massnahmenwirkung erfolgt durch eine Reduktion der Gefahren- bzw. Aktivitätsstufe, ausgehend von der Gefahren- bzw. Aktivitätsstufe vor der Massnahme.

Spontane Rutschungen und Hangmuren

Wirkung auf Wahrscheinlichkeit, Aktivität

Massnahmen können sowohl die Wahrscheinlichkeit, als auch die Intensität/Aktivität beeinflussen. Es ist von Fall zu Fall zu beurteilen, welches Kriterium eine stärkere Verringerung erfährt.

Tab. 5.1: Umsetzung von wirksamen Massnahmen in die Gefahrenkarte.

	Verfahren/Kriterien			**Rückstufung um max.**
	Stabilitäts-berechnungen (Modellierungen 2D)	Lange Beobach-tungsreihe	Verbauraster Bei Massnah-mentyp W1, W2	Wegen den bei Rutschun-gen vorhandenen Unsi-cherheiten kann keine Rückstufung nach weiss erfolgen. Es ist stets mind. Restgefährdung auszu-scheiden (gelb-weiss).
Permanente Rutschungen	ja	nein	Verbauungen sind bei den Stabilitäts-berechnungen zu berücksichtigen	1 Gefahrenstufe
	nein	ja		1 Gefahrenstufe
	ja	ja		2 Gefahrenstufen
Spontane Rutschungen innerhalb von permanenten Rutschgebieten[1] (9-Felder-Diagramm)	ja	nein		1 Gefahrenstufe[2]
	nein	ja		1 Gefahrenstufe[2]
	ja	ja		2 Gefahrenstufen[2]
Spontane Rutschungen in total unverrutschtem Terrain[3] (9-Felder-Diagramm)	ja	nicht relevant		1 Stufe auf Intensitäts- und/oder Wahrscheinlich-keitsachse
			mit engem Verbauraster[4]	2 Stufen auf Intensitäts- und/oder Wahrscheinlich-keitsachse
Hangmuren s. str. (9-Felder-Diagramm)	ja		Verbauraster ca. 2-5 Aren	1 Stufe auf Intensitäts- und/oder Wahrscheinlich-keitsachse
			Verbauraster < ca. 1-2 Aren	2 Stufen auf Intensitäts- und/oder Wahrscheinlich-keitsachse

[1] Z.B. spontaner Abgang aus Front einer permanenten Rutschung.
[2] Max. bis auf Gefahrenstufe des Grundprozesses (= permanente Rutschung).
[3] Gebiete ohne Anzeichen früherer oder rezenter Hangbewegungen.
[4] Verhindert den Ausbruch von kleinräumigen Teilrutschungen.

Rückstufungen werden generell nur auf Basis einer umfassenden Beurteilung gemäss der vorgestellten Methode und unter Berücksichtigung der Unsicherheiten vorgenommen. Rückstufungen um 2 Stufen sind zudem immer als Spezialfälle anzusehen und erfordern eine gründliche Überprüfung.

Vor Umsetzung in Gefahrenkarte mehrere Jahre Bewegungsmessungen

Bei permanenten Rutschungen ist bei neuen Massnahmen zu prüfen, vor der Umsetzung in die Gefahrenkarte und insbesondere in die Raumplanung eine Frist von mehreren Jahren anzusetzen, um die Wirkung der Massnahmen anhand von Bewegungsmessungen zu verifizieren. Dies gilt speziell für jene Massnahmen, die einzig auf die Beeinfussung der Hangwasserverhältnisse wirken (Bsp. Rutschkomplex Hohberg FR).

6. Fallbeispiel Flamatt/Wünnewil

6.1 Allgemeine Angaben

Das Beispiel repräsentiert nicht den Fall einer konkreten Anwendung auf der Basis einer vorhandenen Gefahrenkarte. Es ist aber gut geeignet, das Vorgehen gemäss Protect anhand eines räumlich klar begrenzten, gut untersuchten Falls aufzuzeigen.

6.1.1 Ereignis vom 10. August 2007

Hangbewegung durch ergiebige Niederschläge

In der Folge der ergiebigen Niederschläge zwischen dem 7. und 9. August 2007 kam es an der zweispurigen Bahnstrecke Fribourg-Bern zu Hangbewegungen. Der Bahnverkehr musste daraufhin für mehrere Tage unterbrochen werden, um den betroffenen Bahndamm mittels Sofortmassnahmen zu stabilisieren.

Ausserordentlich starker Oberflächenabfluss

Die starken Niederschläge (5-Tageswerte: 126.4 mm [Tafers], 127.7 mm [Laupen]) fielen auf einen bereits wassergesättigten Untergrund, was einen ausserordentlich starken Oberflächenabfluss in Richtung der Bahngleise zur Folge hatte.

6.1.2 Geologie, Hydrogeologie

Der Felsuntergrund wird aus Molasseschichten (weiche Sandsteine und Mergel) gebildet. Die Mergel bilden Stauschichten und Quellhorizonte. Das ins Rutschen geratene Lockergestein besteht aus dem Verwitterungsschutt der Molasse, Moränenmaterial und glazigenen Kiesen.

Anstieg des Kluftwasserspiegels durch Niederschlag

Der Felsuntergrund ist geklüftet. Bergwasserzirkulation erfolgt entlang von Klüften (Kluftwasserleiter). Das Niederschlagsereignis dürfte von einem raschen Anstieg des Kluftwasserspiegels begleitet gewesen sein. Es ist denkbar, dass daraus Wasser in die Lockergesteinsdecke übertrat, eventuell unter Druck.

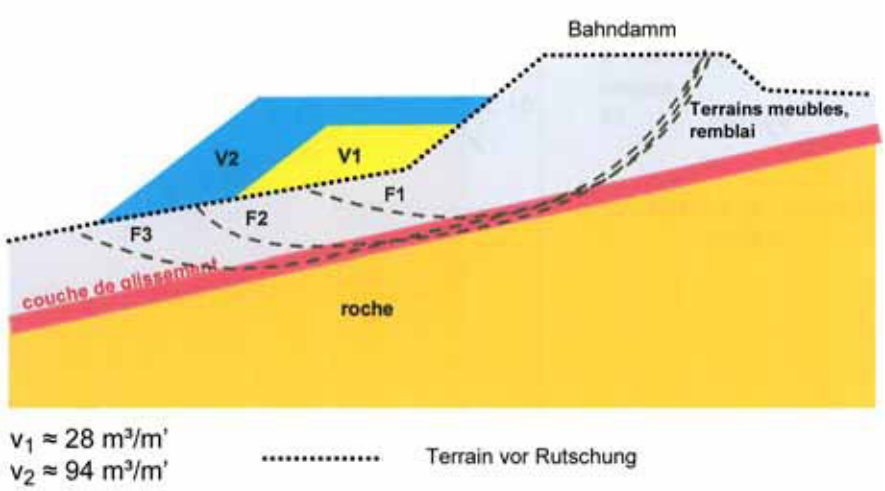


Abb. 6.1: Eines von verschiedenen Querprofilen durch den instabilen Hang mit Lage der Felsoberfläche und der Molasse-Verwitterungsschicht als prädestiniertem Gleithorizont. Dargestellt sind rechnerisch analysierte potenzielle Gleitkreise (F1, F2, F3) sowie künstliche Aufschüttungen V1, V2 (Fusslast) zur Stabilisierung. V1 wurde als Sofortmassnahme realisiert, V2 als Variante für weiter reichende Massnahmen geprüft.

6.1.3 Geologisches Modell

Das geologische Modell geht von spontanen mittelgründigen Rutschungen auf der Molassefelsoberfläche aus (verwitterte Mergel geringer Scherfestigkeit). Bei Wassersättigung wirken Strömungsdrücke und vertikale Kluftwasserdrücke.

6.1.4 Sofortmassnahmen

- Tiefendrainage bergseits des Trasses
- Ableitung des zufliessenden Oberflächenwassers
- Belastung des Rutschfusses durch Aufschüttung von 13'000 m^3 Lockermaterial
- Überwachung: Ausführung von Bohrungen mit Piezometern zwecks Hangwasserspiegelmessungen; Inklinometer; automatisierte, permanente geodätische Überwachung

6.1.5 Definitive Massnahmen

- Hangstabilisierung: Verankerte Pfähle (∅ 130 cm, Länge 16.5 m, Pfahlabstand 2.6 m, Ankerlast 500kN)
- Gleisinfrastruktur: Unterbau mit Betonplatte

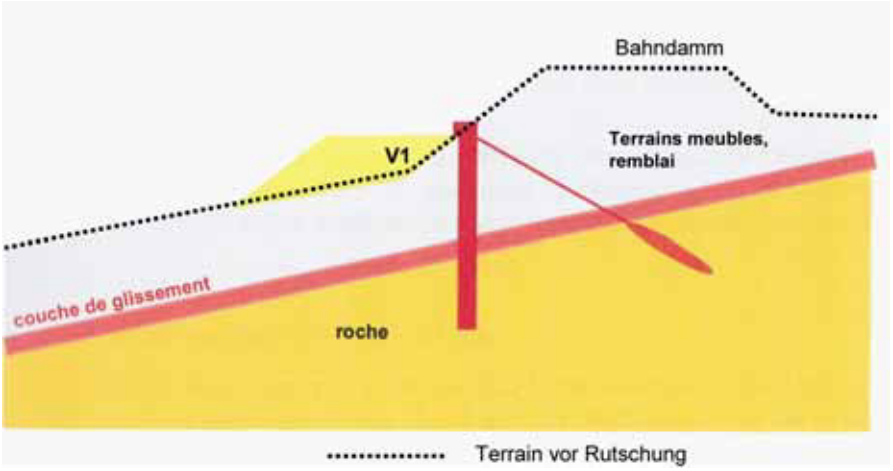


Abb. 6.2: Definitives Sicherungskonzept als Ergänzung zur Aufschüttung V1 (Sofortmassnahme). Die rückverankerten Pfähle bieten ausreichend Sicherheit. Pfähle wie auch Anker reichen bis in den Fels und verhindern dadurch jegliche Ausbildung von Gleitkreisen wie in Abb. 6.1 dargestellt.

6.1.6 Übersicht Untersuchungen

- Sondierbohrungen bis in den Felsuntergrund
- Entnahme von Bohrproben zwecks geotechnischer Analyse im Labor
- Setzen von Piezometern und Inklinometern
- Stabilitätsberechnungen 2D zur Ereignisanalyse und für die Massnahmenplanung. Inverse Berechnung (FS = 1) unter folgenden Annahmen:
  - Hangwasserspiegel beim Ereignis an der Terrainoberfläche;
  - Gleithorizont auf der Felsoberfläche (was die Inklinometermessungen nachträglich bestätigten);
  - Zwei Zustände: Drainierter und undrainierter Zustand.

6.2 Beurteilung der Massnahmen

Tab. 6.1: Schritt 1: Grobbeurteilung.

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
Prozesskenntnisse, Gefahrensituation				
0	Es liegen folgende Unterlagen in ausreichender Qualität vor: - a. Karte der Phänomene (erweiterte Legende) oder vergleichbare Grundlagenkarte; - b.Das Gesamtsystem ist mitsamt seiner Teilprozesse und möglichen Interaktionen erfasst; - c. Das Spektrum möglicher Prozesswirkungen ist mittels Gefährdungsbildern (Szenarien) erfasst. Dabei ist auch das Extremereignis betrachtet worden; - d. Geologisch-hydrogeologisches Modell, mit entsprechenden Hangprofilen; - e. Gefahrenbeurteilung basierend auf den Empfehlungen des Bundes und der AGN-Methode.	→1 ✔	Abbruch ⮉	Ausgeführt wurden 13 Bohrungen mit 7 Piezometern und 8 Inklinometern. Zudem wurde ein Pluviometer mit Fernablesung installiert. An Bohrproben wurden Laborversuche durchgeführt (Wassergehalt, Granulometrie, Konsistenzgrenzen). Eine Grundlagenkarte (Situation 1:10'000) liegt als Arbeitsgrundlage vor. Das Gesamtsystem wurde analysiert. Das geologisch-hydrogeologische Modell ist aufgrund der zahlreichen Bohrresultate erstellt und zuverlässig. Es wurden verschiedene Systemzustände (Szenarien) erfasst, inkl. Extremereignis. Eine Gefahrenkarte wurde nicht erstellt, da nicht erforderlich (Vor dem Ereignis: keine Gefährdung).
Massnahme (Verfügbarkeit, Lebensdauer)				
1	Die Massnahme ist auf eine lange Lebensdauer ausgelegt (mindestens 50 Jahre).	→2 ✔		Die vorgeschlagene Massnahme (verankerte Pfähle) ist langlebig. Für eine Lebensdauer von 80 Jahren ist ein 2- bis 3-maliger Ersatz der Anker eingeplant.
2	Kontrollen, Unterhalt und Reparaturen sind - langfristig geregelt. Es besteht eine Trägerschaft, evtl. ein Grundbucheintrag. - können verbindlich und dauerhaft geregelt werden.	→3 ✔		Die SBB als Bauherrin sind Garant für langfristig geregelte Kontrollen, Unterhalt und Sanierungen.
Gesamtkonzept und Relevanz				
3	Der Fokus der Massnahme ist auf den gesamten Prozessraum ausgerichtet.	→4 ✔		
4	Die Massnahmenwirkung kann unter Berücksichtigung mindestens der folgenden Aspekte beurteilt werden: - Interaktionen bekannt; - Absicht der Massnahme bekannt/kann vermutet werden; - Massnahmenstandort wirksam; - Ausreichende Ausdehnung der Massnahme im Hinblick auf die Absicht der Massnahme; - Erfahrungen in ähnlichen Fällen.	→5 ✔		Massnahmenwirkung ist für verschiedene Lastfälle bestimmbar. Die Schutzzielvorgabe ist hoch (Verfügbarkeit SBB-Strecke).
5	Es besteht eine bestimmbare, relevante Wirkung oder eine solche kann mit guten Gründen vermutet werden.	→9 ✔		Rechnerisch nachweisbar.

Tab. 6.2: Schritt 2: Massnahmenbeurteilung

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
Grundlagen Prozess				
9	Um die Wirkung der Massnahme mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können, liegen umfassende **quantitative Grundlagen** vor, insbesondere: - a. Ausreichend lange Messreihen (Geodäsie, Inklinometer, Extensometer); - b. Die Geschichte der Rutschung ist bekannt bzw. rekonstruierbar; - c. Für bekannte „Krisen“ liegt eine Ursachenanalyse vor; - d. Geologisch-hydrogeologisches Modell (geotechnisches Modell), möglichst auf der Basis von Sondierungen (Bohrungen, Seismik, Geoelektrik, Sondierschlitze); - e. Geologische Hangprofile (ohne/mit Massnahme[n]), möglichst auf der Basis von Sondierungen (wie oben); - f. Quantifizierte Bodenparameter; - g. Stabilitätsberechnungen mit Sensitivitätsanalysen (2D in diversen Schnitten oder 3D).	→10 ✔		- a. Irrelevant, da spontanes Ereignis. - b. dito. - c. Für das Ereignis liegt eine Ursachenanalyse vor. - d. Modell abgestützt auf zahlreiche Sondierungen. - e. Mehrere Hangprofile erstellt auf der Basis der Sondierbohrungen. - f. Bodenparameter quantifiziert anhand von Laborversuchen an Bohrkernen und aufgrund von Erfahrungswerten. - g. durchgeführt (Ansatz: inverse Berechnungen mit FS=1). Parametervariationen zur Bestimmung der Sensitivität des Systems. Ebenfalls berücksichtigt wurden die Lastfälle seitens der Bahn (Einspur-, Doppelspurbelastung). Berechnungen ohne und mit Massnahmen.
Grundlagen Massnahme				
10	Die vorhandenen Werksangaben sind umfassend. Sie informieren ausreichend über das Werk (Erstellungszeitpunkt, z.B. Ausführungsprojekt).	→11 ✔		Neue Massnahme, die umfassend dokumentiert ist. Der Ist-Zustand ist somit erfasst.
11	Der Ist-Zustand ist erfasst. Es können Aussagen gemacht werden zu allfällig reduzierten Wirkungen.	→12 ✔		
Bestimmung Tragsicherheit/Funktionalität				
12	Tragsicherheit/Funktionalität sind gegeben. Sie können szenarienbezogen entweder **qualitativ** oder **quantitativ** ausreichend genau abgeschätzt oder bewertet werden. Bei qualitativer Betrachtung gilt insbesondere: - a. Das Bauwerk zeigt keine verdächtigen Mängel; - b. Es ist zu vermuten, dass Punkt a. auch für verborgene, nicht kontrollierbare Massnahmenteile gilt.	→13 ✔		Aufgrund obiger Ausführungen gegeben.
13	Die Massnahme hat in der Vergangenheit erheblichen Belastungen („Krisen“) bereits erfolgreich widerstanden, was als Hinweis für eine genügende Tragsicherheit/Funktionalität betrachtet werden kann.	→16 →14 ✔		Nein: Massnahme ist ganz neu und hat noch keine „Krise“ erlebt.
14	Es kann quantitativ oder semi-quantitativ nachgewiesen werden, dass die Tragsicherheit/Funktionalität der Massnahme auch bei einer „Krise“ gegeben ist.	→16 →15	✔	Die Tragsicherheit ist aufgrund umfassender Analysen rechnerisch nachgewiesen.

	Anforderungen/Kriterien	Ja	Nein	Bemerkungen
Bestimmung Gebrauchstauglichkeit				
16	Die Schutzmassnahme ist neu. Die Gebrauchstauglichkeit kann bezogen auf Szenario X als erfüllt oder mindestens teilweise erfüllt betrachtet werden.	→18 ✔		
Bestimmung Dauerhaftigkeit				
18	Die Schutzmassnahme hat keine nicht direkt kontrollierbaren Bauteile. oder: Verborgene Bauteile können indirekt über Messungen kontrolliert werden.	→19 ✔		Die Bauteile der Massnahme sind kontrollierbar (Ankerkräfte). Daneben finden auch geodätische Kontrollmessungen statt.
19	Es kann angenommen werden, dass die Massnahme auf längere Zeit den möglichen Einwirkungen standhält und in gutem Zustand bleibt. oder: Das System ist so ausgelegt, dass bei Bedarf kurzfristig gleichwertige Ersatzmassnahmen vorgenommen werden können (z.B. Ersatz eines defekten Ankers).	20 ✔		Die Bauteile der Massnahmen sind ersetzbar (Bohrpfähle, Anker). Die gewählten Massnahmen sind zudem erprobt und für den Langzeiteinsatz geeignet .
20	Kontrollen und Unterhalt sind auf längere Zeit durch Institutionen der öffentlichen Hand (ggf. Flurgenossenschaften) gewährleistet.	Schritt 3 +21 ✔		Die SBB als Bauherrin sind Garant für langfristig geregelte Kontrollen, Unterhalt und Sanierungen.
Betrachtung im Massnahmen-Gesamtsystem				
21	Die Massnahme ist nicht Bestandteil eines Gesamtsystems von Massnahmen und ist somit isoliert zu betrachten.	Schritt 3 ✔		Massnahmenkonzept in sich geschlossen. Keine Beeinflussung durch andere Massnahmen oder andere Randbedingungen.

6.3 Wirkungsbeurteilung

Sofortmassnahmen ohne ausreichenden Sicherheitsgewinn

Im unten stehenden Diagramm sind Systemzustände nach den Sofortmassnahmen (Fusslast V1 gemäss Abb. 6.1) dargestellt. Die Stabilitätsberechnungen zeigen, dass diese Aufschüttung V1 im Fall einer maximalen Belastung (Var. B: Bahnverkehr zweigleisig) keinen umfassend ausreichenden Sicherheitsgewinn bewirkt. Deshalb wurde als definitive Massnahme das in Abb. 6.2 schematisch dargestellte Konzept verankerter Pfähle gewählt, zusätzlich zu den bereits bestehenden Aufschüttungen. Dieses bildet auch die Grundlage für die oben aufgeführte tabellarische Beurteilung. Dank dieser verankerten Pfähle lässt sich eine ausreichende Sicherheit für die relevanten Zustände erzielen, was im Diagramm durch den Pfeil angedeutet wird.

Die gewählten Massnahmen wirken umfassend. Sie können auf einer Gefahrenkarte als voll wirksam berücksichtigt werden (Darstellung als Restgefährdung).

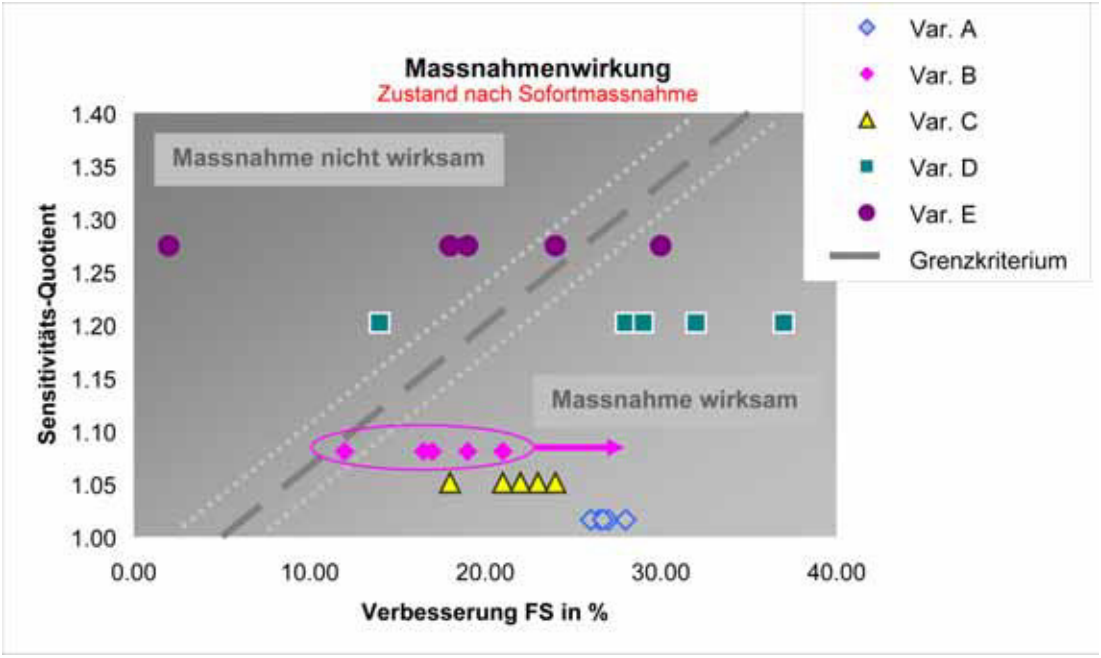


Abb. 6.3: Massnahmenwirkung.

7. Fallbeispiel „grosse Rutschung“

Ein Fallbeispiel zur Beurteilung von Schutzmassnahmen bei einer grossen Rutschung wird zu einem späteren Zeitpunkt hier ergänzt.

Literatur

Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN 2004: Gefahreneinstufung Rutschungen i.w.S.: Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren. – Bericht, 24. März 2004.

Bonnard, Ch. 2006: Evaluation et prédiction des mouvements des grands phénomènes d’instabilité de pente. Bull. angew. Geol., 11/2, 89-100.

BRP, BWW, BUWAL 1997: Naturgefahren - Empfehlungen zur Berücksichtigung von Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten.

Frehner, M., Wasser, B. & Schwitter, R. 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion (NaiS). Vollzug Umwelt. BUWAL, Bern, 564 S.

H.J. Lang, J. Huder & P. Amann 2003: Bodenmechanik und Grundbau – Das Verhalten von Boden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. 7. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Turner, A.K. & Schuster, R.L. (Eds.) 1996: Landslides, Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Academy Press, Special Report N° 247.