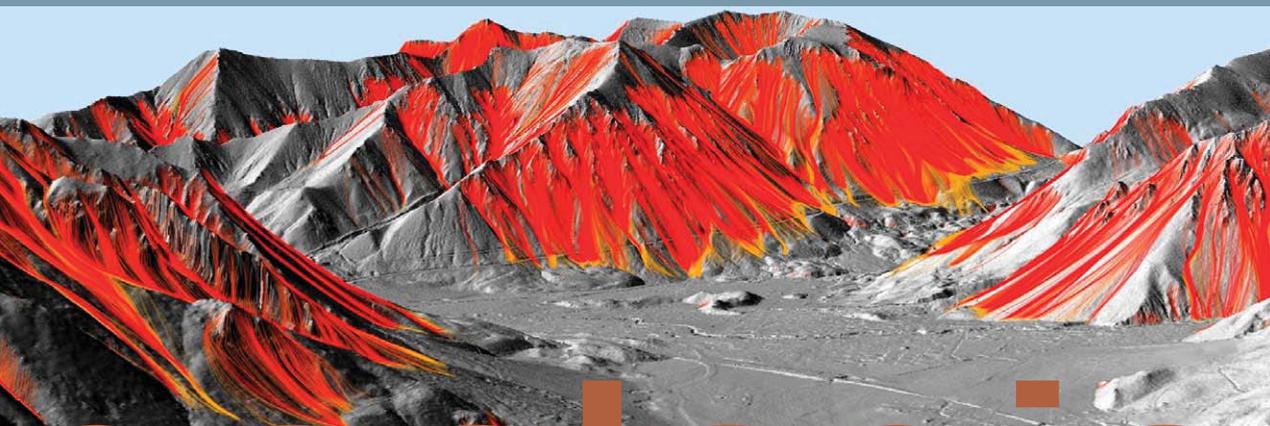




Methoden-Bericht zur Gefahrenhinweiskarte Bayern

Vorgehen und technische Details



geologie



Methoden-Bericht zur
Gefahrenhinweiskarte Bayern
Vorgehen und technische Details

Impressum

Methoden-Bericht zur Gefahrenhinweiskarte Bayern – Vorgehen und technische Details

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

Fax: 0821 9071-5556

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de/

Konzept/Text:

LfU, Referat 102 Landesaufnahme Geologie, Geogefahren

Redaktion:

LfU, Referat 102 Landesaufnahme Geologie, Geogefahren

Bildnachweis:

LfU

Stand:

März 2015 (Jura), Februar 2018 (Alpen und Alpenvorland)

März 2020: Aktualisierung und Zusammenführung älterer Methodenberichte (Alpen, Alpenvorland, Jura)

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbenden oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 0 89 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Datengrundlagen	6
3	Stein- und Blockschlag	7
3.1	Vorbereitende Arbeiten – Datenbasis für die Steinschlagmodellierung	9
3.2	Ermittlung der Gefahrenhinweisflächen – Modellierung	11
3.3	Ergebnisformate und Aussage der Gefahrenhinweisflächen	13
4	Felssturz	13
4.1	Vorbereitende Arbeiten – Ermittlung der Anbruchpunkte	14
4.2	Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche – Modellierung	14
5	Rutschung	18
5.1	Vorbereitende Arbeiten – Rutschungskartierung	18
5.2	Ermittlung der Gefahrenhinweisflächen	19
6	Hanganbruch	20
6.1	Vorbereitende Arbeiten – Grundlagen zur Ermittlung der Anrisszonen und Auslaufbereiche	21
6.2	Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche – Modellierung	25
7	Erdfall	27
7.1	Vorbereitende Arbeiten – Erfassung von Erdfällen und Dolinen	28
7.2	Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche	28
8	Großflächige Senkungsgebiete	28
9	Literaturverzeichnis	29

1 Einleitung

Gefahrenhinweiskarten werden definiert als nach wissenschaftlichen Kriterien erstellte Übersichtskarten mit Hinweisen auf geogene Naturgefahren, die erkannt und lokalisiert, jedoch nicht im Detail analysiert und bewertet sind. Die Aussagen der Gefahrenhinweiskarten sind insbesondere auf die Belange der Raumplanung ausgerichtet. Gefahrenhinweiskarten sollen Ministerien, Fachbehörden, Kreis- und Kommunalverwaltungen sowie Wirtschaftsunternehmen und Bürgern eine Einschätzung geogener Gefahren ermöglichen, um Schäden durch vorausschauende Planung zu verhindern oder zu minimieren (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE 2016).

In der Gefahrenhinweiskarte Bayern werden Gebiete möglicher Gefahren durch Massenbewegungen wie Steinschlag, Felssturz, Hanganbrüche, Rutschungen oder Erdfälle dargestellt, die durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) ermittelt wurden. Mittelfristiges Ziel ist eine Bearbeitung der gesamten Fläche Bayerns.

Vorrangig wurden die als besonders sensibel gegenüber geogenen Naturgefahren eingestuft Bereiche in den bayerischen Alpenlandkreisen und im Schwäbisch-Fränkischen Jura bearbeitet. Anschließend folgen weitere Teilbereiche Bayerns entsprechend der Prioritäten.

Die Bearbeitung erfolgt jeweils nach Landkreisen im Maßstab 1:25.000. Die neu erstellten Gefahrenhinweiskarten und dazugehörigen Berichte werden nach Fertigstellung an die zuständigen Behörden (z. B. Landratsämter, Gemeinden) übergeben und im Internet bereitgestellt: www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen_karten_daten/ Gefahrenhinweiskarten > Landkreis-Berichte .

Hier finden Sie auch das Ministerialschreiben „Hinweise Geogefahren für den Verwaltungsvollzug“ www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen_karten_daten/ Gefahrenhinweiskarten/doc/hinweise_geogefahren.pdf sowie Publikationen zu den Themen „Geogefahren erkennen“ und „Eigenvorsorge bei Geogefahren“: www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_bod_00117.htm , www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_bod_00078.htm .

Die Gefahrenhinweiskarte sowie die Dokumentation der bekannten Ereignisse („GEORISK-Objekte“) sind im UmweltAtlas Bayern abrufbar unter http://www.umweltatlas.bayern.de/angewandte_geologie und über die Funktion „Standortauskunft“ und können zudem als Geodaten-Dienste genutzt werden.

Die Ermittlung der Gefahrenhinweisflächen erfolgt objektunabhängig, das heißt ohne Berücksichtigung potenziell betroffener Bauwerke. Zu dieser Objektunabhängigkeit gehört auch, dass **bestehende Schutzmaßnahmen** explizit ignoriert werden. Die Karte stellt **keine parzellenscharfe Einteilung** von Gebieten in unterschiedliche Gefahrenbereiche dar. Die Abgrenzung der Gefahrenhinweisflächen ist **als Saum und nicht als scharfe Grenze** zu verstehen. Auch erheben die ermittelten Gefahrenhinweisbereiche **keinen Anspruch auf Vollständigkeit**. Dies betrifft sowohl bereits erfolgte als auch zukünftige Massenbewegungsereignisse. Es handelt sich um eine Darstellung von Gefahrenverdachtsflächen, die zum Zeitpunkt der Bearbeitung auf Basis der verfügbaren Informationen und mit Hilfe zeitgemäßer Methoden ermittelt werden. In Zweifelsfällen werden nur Flächen mit hinreichender Signifikanz dargestellt. Bei der Bearbeitung werden Massenbewegungsereignisse herangezogen bzw. modelliert, die häufiger auftreten, damit repräsentativ sind und als Risiko empfunden werden. Selten auftretende Extremereignisse sind nicht berücksichtigt und müssen aus geologischer Sicht als nicht zu vermeidendes Restrisiko bezeichnet werden. Für jeden untersuchten Prozess werden Flächen mit Hinweis auf Gefährdung und Flächen mit Hinweis auf Gefährdung im Extremfall ausgewiesen. Jeder Gefahrenprozess wird dabei unabhängig betrachtet, so dass sich die Gefahrenhinweisflächen überlagern können. Anthropogen bedingte Gefährdungen (Bergbau, Halden, Straßenanschnitte etc.) werden nicht erfasst.

2 Datengrundlagen

Topographische Karten

Als topographische Grundlage dient die Topographische Karte des Bayerischen Landesamts für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) im Maßstab 1 : 25.000 (TK 25). Der Ausgangspunkt des Karteninhalts ist das Digitale Landschaftsmodell (DLM 25) des ATKIS® Bayern (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem).

Geologische Karten

Die Geologische Karte im Maßstab 1 : 25.000 (GK 25) des Bayerischen Landesamts für Umwelt ist eine wichtige Grundlage für die meisten Fragestellungen zu geogenen Naturgefahren. Unveröffentlichte Manuskriptkarten dienen als Ergänzung. Die Manuskriptkarten weisen unterschiedliche Bearbeitungstiefen und Qualitätsstände auf. Des Weiteren kommt die Geologische Karte im Maßstab 1 : 200.000 (GÜK 200) zur Ausweisung des verkarstungsfähigen Untergrundes zum Einsatz.

Orthophotos

Digitale Orthophotos (DOP) liegen bayernweit in den Auflösungsstufen 1 m, 40 cm und 20 cm vor. Sie sind einerseits hilfreich für die Orientierung, andererseits können sie auch zusätzliche Hinweise zu den Verhältnissen vor Ort liefern.

Digitales Geländemodell

Das Digitale Geländemodell (DGM) ist eine wesentliche Basis für die Ausweisung von Gefahrenhinweisbereichen. Es dient als Grundlage für die computergestützten Modellierungen und in verschiedenen Visualisierungen (Schattenbild, Geländeschnitte) bietet es große Vorteile für die Interpretation des Geländes hinsichtlich Rutschungen und Erdfällen.

Das LDBV erstellt mittels Airborne-Laserscanning-Verfahren hoch aufgelöste Punktwolken in diskreten Abständen, die zu einem Digitalen Geländemodell umgerechnet werden. Dargestellt wird die Höhe der Geländeoberfläche pro Messpunkt. Messpunkte, die Reflexionen von Gebäuden oder Vegetation enthalten, werden entfernt und das Modell an dieser Stelle interpoliert und geglättet. Resultat ist dann die eigentliche Geländeoberfläche. Stellenweise führt dieser automatisierte Ablauf zu sogenannten Artefakten (Fehlern). Solche Artefakte bleiben zum Beispiel dann erhalten, wenn die Interpolation der Geländeoberfläche unter dichtem Wald oder Schnee nicht die reale Geländeoberfläche abbildet und nicht korrigiert wird. Die Fehler halten sich räumlich und bezogen auf die Gesamtfläche des Untersuchungsraums im Rahmen. Seitens des LDBV sind bayernweit Daten in den Auflösungsstufen 1 m, 2 m und 5 m verfügbar, allerdings zum Zeitpunkt der Bearbeitung nicht in allen Auflösungsstufen flächendeckend.

Für die verschiedenen Anwendungen werden unterschiedliche Auflösungsstufen des DGM benutzt. Für die Beurteilung von tiefreichenden Rutschungen und die Erhebung von Gefährdungen durch Erdfälle wird die bestmögliche Auflösungsstufe verwendet.

Aus den reinen Höheninformationen des DGM werden für die Bearbeitung weitere Darstellungen erzeugt. Die bedeutendste ist die Visualisierung als Schattenbild. Dabei werden für eine Beleuchtung aus bestimmten Winkeln (45° und 315°) Schatten auf der virtuellen Geländeoberfläche berechnet. Resultat ist ein Pseudo-3-D-Bild. Des Weiteren liefern Hangneigungs- und Expositionskarten sowie Geländeschnitte einen wertvollen Beitrag als Interpretationshilfe.

Landnutzung laut ATKIS

Die für die Sturzmodellierung verwendeten Wald- bzw. Forstflächen entstammen dem Digitalen Landschaftsmodell (DLM 25) des ATKIS® Bayern. Es werden Laubwald, Nadelwald, Mischwald und Gehölz unterschieden. Des Weiteren werden landwirtschaftliche Nutzflächen berücksichtigt.

Gebäude

Die Gebäudedaten werden der aktuellen Digitalen Flurkarte (DFK) entnommen (www.ldbv.bayern.de). Die Gebäude sind unterteilt in bewohnte und unbewohnte Objekte.

GEORISK-Kataster

Das Bodeninformationssystem Bayern (BIS-BY) ist die zentrale Datenbank des LfU zu Geofachdaten. Darin sind die bereits seit 1987 im Rahmen des Programms GEORISK gesammelten Informationen zu Massenbewegungen standardisiert abgelegt. Große Anteile der Datenbestände sind öffentlich über das Internet zugänglich (www.umweltatlas.bayern.de > Angewandte Geologie > Geogefahren).

Im BIS-BY werden alle Arten von Massenbewegungen systematisch erfasst und mit den verfügbaren Informationen ergänzt. Für jedes einzelne Objekt ist dadurch eine Beschreibung zur Art der Massenbewegung und ihrer räumlichen Ausdehnung festgehalten. Ergänzende Erläuterungen umfassen Angaben zum Zeitpunkt der Aktivität, zum Alter und Zustand sowie eine Einschätzung der zukünftigen Entwicklung der Massenbewegung. Ebenso wird eine Informationsqualität angegeben und ein Quellenachweis geführt, so dass Herkunft und Qualität der Daten nachvollzogen werden können. Nach Möglichkeit werden auch Anbruch- und Ablagerungsbereiche der Massenbewegung als Geometrie digitalisiert und aussagekräftiges Bildmaterial hinterlegt.

Die GEORISK-Datenbank ist die Grundlage für die Ausweisung der Gefahrenhinweisflächen von Rutschungen, Felsstürzen und Erdfällen. Auch bei der Modellierung von Stein- und Blockschlag werden die Informationen über bekannte Ereignisse genutzt, um die modellierten Anbruchbereiche zu ergänzen und die Sturzmodellierung zu überprüfen. Da vor Projektbeginn jeweils nur teilweise eine ausreichende Datengrundlage vorliegt, muss die Datengrundlage für die Bearbeitung der Projektgebiete jeweils größtenteils erst geschaffen werden. Hierzu werden im Rahmen der Projekte für alle bearbeiteten Landkreise historische Recherchen durchgeführt, um möglichst alle bei anderen Stellen bekannten oder schriftlich festgehaltenen Ereignisse zu sammeln. Es wird eine flächendeckende Erfassung von Rutschungen anhand von Kartenauswertungen und Geländebegehungen durch das LfU oder durch Projektpartner, z. B. an Universitäten, durchgeführt. Zudem werden Dolinen anhand des DGMs, durch Signaturen in bestehenden topographischen und geologischen Karten und zum Teil durch Geländebegehungen flächendeckend erfasst.

3 Stein- und Blockschlag

Eine potenzielle Steinschlaggefahr geht generell von steilen und exponierten Felswänden aus. Mögliche Sturzkörper können außerdem im Hang liegen und zum Beispiel durch den Anstoß fallender Steine remobilisiert werden. Die Mechanismen, welche die Sturzkörper in Bewegung bringen, sind vielfältig. Entscheidend für die finale Ablösung sind die Lage des Schwerpunkts des Sturzkörpers sowie dessen Verbindung zum umliegenden Fels. Kritische Lageeigenschaften resultieren vor allem aus einer ungünstigen Kombination des Trennflächensystems im Fels und der Geländeoberfläche (Abb. 1). Diese Disposition beeinflusst die Größe, Form und damit die Bewegungseigenschaften des Blocks.

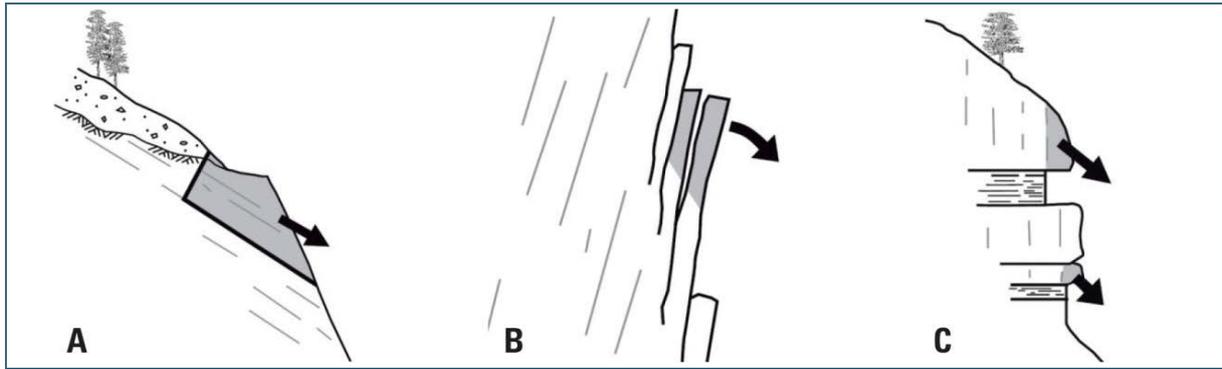


Abb. 1: Die häufigsten Möglichkeiten, wie Sturzkörper in Bewegung kommen (Quelle: WYLLIE & MAH 2004):
 A) Abgleiten eines Felsblocks erfolgt, wenn die treibenden Kräfte die haltenden Kräfte überschreiten.
 B) Abstürze durch Kippen erfolgen, wenn der Schwerpunkt der Felspartie durch Rotation um einen Scharnierpunkt vom Hang weg verlagert wird.
 C) Abstürze aus Überhängen entstehen durch die Rückverlegung einer schneller verwitternden Gesteinsschicht unterhalb einer harten Felspartie.

Das Gefahrenpotenzial von Sturzprozessen hängt maßgeblich von der Masse und der Beschleunigung des Sturzkörpers ab, welche die Kraft des Aufschlags bestimmen. Die Eigenschaften der Geländeoberfläche (Rauigkeit) beeinflussen den Transport und die Ablagerungsposition (Reichweite). Beim Sturz führen Energieverluste beim Aufschlag auf den Untergrund (Dämpfung) und Kontakte mit Hindernissen (Ablenkung) zur Veränderung der Bewegung – weite Sprünge und Rollen wechseln sich ab. Jeder Sturzkörper bewegt sich daher auf einer eigenen Bewegungsbahn (Trajektorie) und erreicht somit eine individuelle Reichweite. Die Reichweite ist das Maß für die Ausweisung der Gefahrenhinweisflächen unterhalb von Felswänden. Aktuelle Experimente zeigen, dass bei sonst gleichen Bedingungen runde oder radförmige Steine eher anfangen zu rollen und größere Distanzen zurücklegen als eckige. Hingegen springen eckige Blöcke höher und besitzen damit größere Aufprallkräfte (vgl. WSL 2019).

Für die Gefahrenhinweiskarte wird das deterministische 3D-Steinschlagmodell nach KRUMMENACHER et al. (2005) und ZINGGELER & PFEIFER (2009) verwendet, das die Vielfalt der Faktoren bei Steinschlagprozessen berücksichtigt. Das numerische Modell simuliert eine Abfolge von Sturzparabeln mit dazwischen liegenden Kontaktreaktionen auf Grundlage der Topographie (DGM) und in Abhängigkeit vorher fixierter Parameter für die Sturzblockform und Geländeeigenschaften (ZINGGELER & PFEIFER 2009). Im Modell werden die physikalischen Gesetze der Bewegungsarten Fallen, Springen und Rollen berücksichtigt. Außerdem kann das Modell die bremsende Wirkung von Wäldern als Folge von Kollisionen und Ablenkungen an Baumstämmen abbilden.

Die Ausweisung von Gefahrenhinweisflächen berücksichtigt keine bestehenden baulichen Schutzmaßnahmen. Ein Wald hat natürlicherweise eine bremsende Wirkung auf stürzende Steine und soll mit seiner langfristigen Schutzwirkung berücksichtigt werden. Zwei Szenarien werden in der Gefahrenhinweiskarte dargestellt: **Rote Gefahrenhinweisflächen** kennzeichnen ein realitätsnahes Szenario, in dem die Prozessräume von Stürzen mit den dämpfenden Effekten des aktuellen Waldbestands modelliert werden. In Bereichen ohne Waldbestand werden keine Stoßreaktionen zwischen Sturzblock und Bäumen simuliert. In einem zweiten, konservativen Szenario wird der Steinschlagprozess ohne Einfluss eines Waldes berechnet (**orange Gefahrenhinweisflächen**). Als Worst-Case-Szenario trägt es zukünftigen Veränderungen des Waldbestands Rechnung, die sich möglicherweise durch Kahlschlag, Waldbrand, Windwurf oder Schädlingsbefall ergeben. Das erste Szenario entspricht dem zweiten an allen Stellen, an denen kein Wald vorliegt. Der Vergleich der Szenarien ermöglicht eine Einschätzung der Bedeutung des Waldes als Schutz vor Steinschlag.

3.1 Vorbereitende Arbeiten – Datenbasis für die Steinschlagmodellierung

Für die Sturzmodellierung gilt es gebietsspezifische Eingabeparameter zu ermitteln, von denen die beiden wichtigsten die Ablöseposition (Anbruchbereiche) und die Sturzblockgröße (Bemessungsereignis) sind. Grundlage dafür sind primär das Digitale Geländemodell (DGM) und die Geologische Karte 1 : 25.000 (GK 25). Dazu kommen Sekundärparameter, die über die Primärdaten (DGM, etc.) abgeleitet werden (vgl. Abb. 3).

Ausweisung der Anbruchbereiche

Als potenzielle Anbruchbereiche für Stein- und Blockschlag werden im DGM 2 m (Weite der Rasterzellen 2 m) bzw. im DGM 5 m (in den Landkreisen mit Alpenanteil) alle Hangbereiche mit einer Neigung $\geq 45^\circ$ angenommen. Hiermit sind erfahrungsgemäß nahezu alle steilen Felsbereiche abgedeckt, die auch im Gelände als Anbruchbereiche für Steinschläge verifiziert werden können. Unterhalb 45° findet vorwiegend der Prozess des Rollens statt (DORREN 2003). Die Ablösung von Sturzblöcken aus diesen Bereichen wird nicht im Modell erfasst.

Bestimmung der Bemessungsereignisse

Durch den Verschnitt der Anbruchbereiche mit der Geologischen Karte werden die potenziell von Sturzereignissen betroffenen Gesteinseinheiten ermittelt. Im Gelände wird jeder Einheit eine zu erwartende Blockgröße (repräsentatives Bemessungsereignis) zugewiesen. Die Dimensionierung nach Achsenlängen (X, Y, Z) ist das Ergebnis der Abwägung zwischen der zu erwartenden Sturzblockgröße und der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Absturzes dieser Blockgröße. Für das Modell folgt eine Generalisierung der im Gelände ermittelten Blockgrößen in bis zu vier Blockgrößenklassen (I-IV), in denen vergleichbar dimensionierte Einheiten zusammengefasst sind. Die stratigraphischen Einheiten mit großen Flächenanteilen an den potenziellen Anbruchbereichen werden vorrangig differenziert. Damit wird vermieden, dass flächenmäßig unterrepräsentierte Einheiten bei der Festlegung der Klassengrenzen überbewertet werden.

Attribuierung und Korrektur der Anbruchbereiche

Sind die Bemessungsereignisse ermittelt, werden die Anbruchflächen je nach geologischer Einheit mit diesen Werten attribuiert. Da die stratigraphischen Grenzen der GK 25 eine maßstabsabhängige Unschärfe bezüglich der Lagegenauigkeit aufweisen, wird die Attribuierung mit Hilfe des Schattenbildes an die Geländemorphologie angepasst. Unplausible oder hier nicht zu betrachtende Anbruchbereiche (z. B. Brückenwiderlager, Stützmauern oder Steinbruchwände) werden bereinigt.

Eine Ergänzung zu den rechnerisch ermittelten Anbruchflächen liefern die kartierten Anbruchkanten der GEORISK-Objekte (BIS-BY), die ebenfalls mit den Angaben zur Blockgrößenklasse attribuiert werden. Diese Daten werden zum Beispiel dort wichtig, wo die Interpolation der Laserscan-Punkte das DGM glättet und schmale Felsnadeln oder -türme nicht differenziert sind.

Festlegung von Sekundärparametern

Aus den Primärdaten abgeleitete Modellierungsparameter sind die Rauigkeit der Geländeoberfläche sowie die Dämpfungseigenschaften des Untergrunds, die auf empirischen Analysen beruhen (Abb. 2). Für das erste Szenario (rot) werden außerdem Angaben zum Wald- und Gehölzbestand aus dem ATKIS® ermittelt.

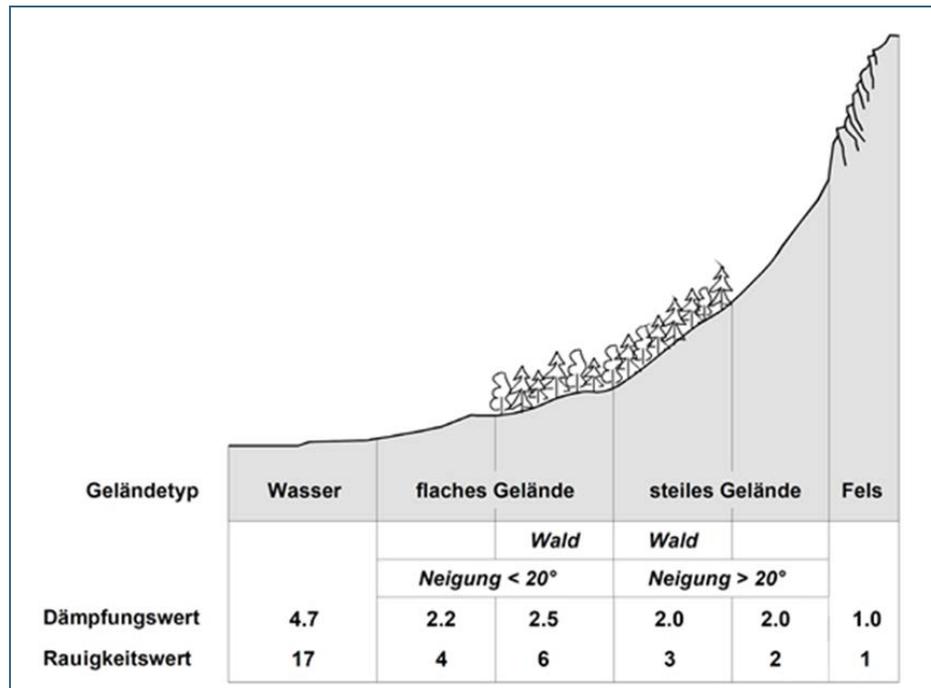


Abb. 2: Kalibrierte Sekundärparameter Dämpfung und Rauigkeit, abgeleitet von der Hangneigung und den Untergrund-Eigenschaften (KRUMMENBACHER & PFEIFER, R. 2007).

Der Parameter **Rauigkeit** (Werte zwischen 1 und 17) ergibt sich aus Geländeformen, wie zum Beispiel Schutthalden, die im Zentimeter- bis Dezimeterbereich liegen („Mikrotopographie“) und setzt sich aus der Entfernung einzelner Rauigkeitsformen zueinander und deren Durchmesser zusammen.

Die **Dämpfung** des Untergrunds entscheidet über die Stoßreaktion (Eindringtiefe) und den Energieverlust (plastische Deformation) während des Kontakts von Sturzkörper und Oberfläche sowie den Abprall und die resultierende Transportgeschwindigkeit (Geometrie der Rampe, Hebelwirkung). Als Eingabeparameter für das Modell gelten Werte zwischen 1 (sehr gering) und 5 (sehr hoch).

Aufgrund der großen Untersuchungsgebiete werden die Rauigkeit der Geländeoberfläche und die Dämpfung des Untergrundes nicht im Gelände kartiert, sondern aus vorhandenen Daten abgeleitet. Dies erfolgt aus der Hangneigung (Ermittlung aus DGM) und der Oberflächenbeschaffenheit (Ermittlung aus Landnutzungsdaten).

Kontakte zwischen Sturzkörper und Baumstämmen sorgen einerseits für einen Energieverlust und andererseits für eine Ablenkung aus der Bewegungsrichtung. Die Kontaktreaktion hängt von einigen Zufälligkeiten ab: unterschiedliche Bestandsdichten, wechselnde Baumtypen und Baumstammdicken sowie variierende Trefferhöhen. Der **Waldparameter** für die Verteilung der Stammdurchmesser wird auf Grundlage der Stammzahl pro Hektar abgeleitet. Die Werte variieren zwischen 100 Stämmen / ha (Nadelwald) und 275 Stämmen / ha (Laubwald), was eine konservative Annahme darstellt (lichter Bestand). Die mittleren Stammdurchmesser werden nach einer Zufallsverteilung berechnet. Die Werte variieren zwischen 28 cm (Nadelwald) und 18 cm (Laubwald). Das Modell berechnet statistisch einen Faktor für die mittlere Trefferdistanz in Abhängigkeit von der Blockgröße mit der zufällig ein Stamm des definierten Waldtyps getroffen wird.

3.2 Ermittlung der Gefahrenhinweisflächen – Modellierung

Basis für die Steinschlagmodellierung ist das DGM 5 m des Untersuchungsgebietes, in den Alpenlandkreisen wurde das DGM 10 m verwendet. Der Puffer von 500 m um das Untersuchungsgebiet trägt Steinschlägen von außerhalb des eigentlichen Bearbeitungsraums Rechnung. Die beiden Szenarien (rot: mit Wald, orange: ohne Wald) werden getrennt voneinander modelliert.

Der Ursprung der Sturzbahnmodellierung liegt in den Anbruchpunkten, aus denen im Modell die Sturzkörper jeweiliger Ausdehnung und Masse mit geringer Anfangsgeschwindigkeit gestartet werden. Da die Sturzkörper keine Quader sind, wird ein Rundungsgrad (81 % des Quaders) angenommen. Darüber hinaus wird der Radius der Sturzkörper berücksichtigt, um dem Größenverhältnis zwischen Sturzblock und Rauigkeit gerecht zu werden. Kleine Blöcke werden bei gleicher Rauigkeit stärker beeinflusst (Skaleneffekt), was zu einer Reduktion der Geschwindigkeit führt. Unter Einhaltung der Bewegungsprozesse Fallen, Springen, Rollen und Stillstand mit Translations- und Rotationsanteilen werden folgende Teilprozesse modelliert:

- **Kontaktreaktionen**

Im Modell werden beim Bodenkontakt des Sturzkörpers erstens der Eindringprozess und zweitens der Absprungprozess in Abhängigkeit von der Rauigkeit und Topographie getrennt berechnet:

- Beim Aufprall auf den Untergrund finden Energieverlustreaktionen statt, die aus der Deformation des Untergrundmaterials resultieren. Der Sturzblock wird dabei vereinfacht als Kugel angenommen, die volumenkonform zur ursprünglichen Abmessung ist. Der Aufschlagimpuls führt zur Bildung eines spezifischen Aufschlagtrichters. Eine elastische „Rückgabe“ der Energie erfolgt nicht, so dass dem Sturzblock Energie verloren geht – beim Erstaufschlag beträgt dieser Verlust etwa 75 bis 86 % (Dorren 2003).
- Der Abprallprozess hängt dann von der restlichen Bewegungsenergie des Blocks ab sowie von der Geometrie des Aufschlagtrichters, der als eine Art Rampe den Absprungwinkel beeinflusst. Das Modell geht davon aus, dass der Sturzkörper (Kugel) eine Richtungskomponente erhält, die von der Form des Trichters abhängt. Der Absprungprozess beinhaltet wieder die eigentlichen Achsenabmessungen des Blockes, damit die resultierende Rotationsbewegung in Abhängigkeit von der Hebelwirkung an den Achsen berechnet werden kann.

- **Baumtreffer**

Baumtreffer werden durch Zufallsvariablen in der Fläche berechnet. Findet im Modell ein Einschlag statt, werden die Eigenschaften des Holzes pauschal berücksichtigt. Bei der Betrachtung des Einschlags ist die Trefferhöhe entscheidend, da mit der Entfernung zum Boden die dynamischen Effekte (Schwungsverhalten) und die Stammmächtigkeit variieren. Je nach Zentralität des Aufschlags, die im Modell zufällig bestimmt wird, führt der Impuls auf den Baumstamm nur zu einer Ablenkung oder zum Bruch des Baumstammes. Baumtreffer sind mit Geschwindigkeitsreduktionen verbunden.

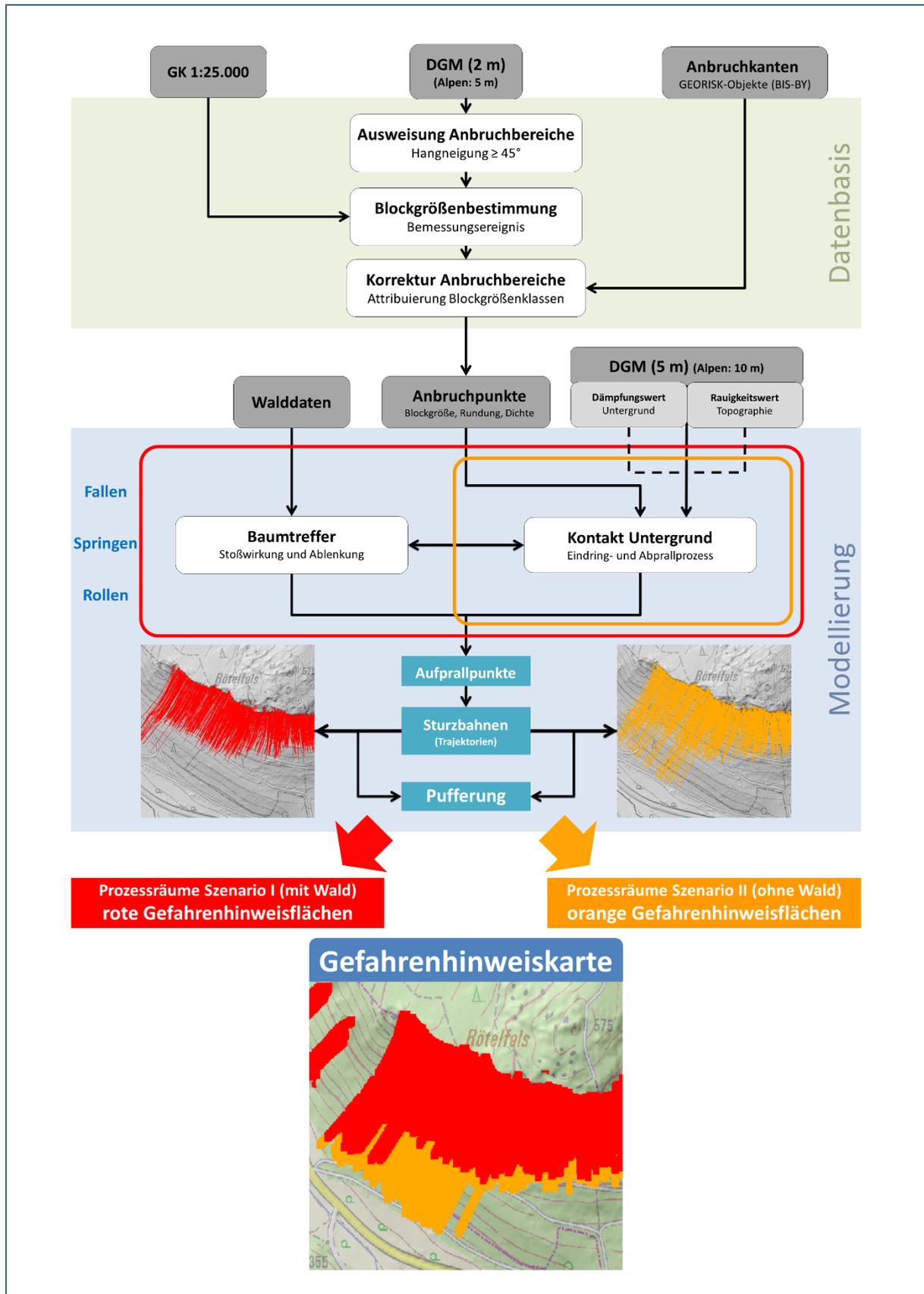


Abb. 3: Erstellung der Gefahrenhinweiskarte für Steinschlag/Blockschlag: Schaffung der Datenbasis (grün) und Modellierungsablauf (blau) für die zwei Szenarien „mit Wald“ und „ohne Wald“. Primärdaten (dunkelgrau), Sekundärparameter (hellgrau), Arbeitsschritte (weiß) und Ergebnisse (unten)

3.3 Ergebnisformate und Aussage der Gefahrenhinweisflächen

Sobald Kontakte mit Untergrund oder Bäumen stattfinden, werden im Modell **Stützpunkte** gesetzt und die Bewegungsdaten des Sturzes zwischengespeichert. Der Bewegungsprozess läuft so lange springend oder rollend fort, bis die Bewegung stoppt. Die **Trajektorien** (Sturzbahnen) sind das Ergebnis der Verbindung dieser Punkte. Die **Prozessräume** werden abschließend beidseitig mit einem 5 m breiten Sicherheitssaum versehen, welcher der Variabilität der Sturzbahnen Rechnung trägt. Die Darstellung erfolgt mit 2 m Rasterzellen (in Landkreisen mit Alpenanteil 5 m Rasterzellen).

Im Modell gibt es Hangbereiche $\geq 45^\circ$, für die keine Trajektorien errechnet werden. Dieser Sachverhalt liegt einerseits darin begründet, dass Blöcke der vorliegenden Größe auf den sich unterhalb anschließenden flacheren Hangbereichen keine für den Weitertransport ausreichende Geschwindigkeit erreichen. Andererseits führt die gröbere Auflösung des DGMs innerhalb der Modellierungsumgebung (5 m bzw. 10 m Rasterzellen) zu einer scheinbaren Verflachung des Geländes. Im Modell wird der Sturz dann direkt gestoppt. Das führt dazu, dass in der Gefahrenhinweiskarte stellenweise nur die Anbruchbereiche ausgewiesen werden. Aus diesen Hangbereichen können allerdings trotzdem Steine herausgelöst werden und kurze Strecken (2 - 5 m) stürzen. Deren Gefährdungspotenzial wird mit einem 5 m breiten Sicherheitssaum berücksichtigt.

4 Felssturz

Im Gegensatz zum Trajektorienmodell mit Bestimmung der Reichweite von Einzelblöcken, kommt für die Simulation größerer Felsstürze ein Modell zur Anwendung, das mit einem Worst-Case-Ansatz die Reichweite des Absturzes ganzer Felsbereiche ermittelt.

Zahlreiche Veröffentlichungen (WIECZOREK et al. 1999, MEIßL 1998, EVANS & HUNGR 1993, ONOFRI & CANDIAN 1979, LIED 1977) zeigen, dass die maximale Reichweite eines Felssturzes durch einen Pauschalwinkel abgeschätzt werden kann. Bei diesem Verfahren wird, ausgehend von einem Ansatzpunkt im Anbruchbereich, mit einem festgelegten Neigungswinkel eine Gerade in Falllinie nach unten gezogen. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Geländeoberfläche ergibt die maximale Reichweite des Felssturzes. Die Pauschalwinkel werden bereits seit langem bei der Geländearbeit verwendet, wobei potenzielle Sturzbereiche mit Hilfe von Neigungsmessern abgeschätzt werden.

Zwei unterschiedliche Pauschalwinkelmodelle werden herangezogen. Zum einen das **Geometrische Gefälle**, das den Winkel beschreibt, den die Horizontale mit der Geraden zwischen dem Block maximaler Reichweite und der obersten Abrisskante des Felssturzes einschließt (Abb. 4: α). Zum anderen kann der **Schattenwinkel** verwendet werden (Abb. 4: β), den die Horizontale mit der Geraden zwischen dem Block maximaler Reichweite und der oberen Begrenzung des Ablagerungsbereiches einschließt. Hier wird davon ausgegangen, dass ein Großteil der kinetischen Energie des Sturzes bereits beim ersten Aufprall im oberen Bereich des Schuttkegels verloren geht.

Für die Gefahrenhinweiskarte wird in Anlehnung an MEIßL (1998) ein minimales Geometrisches Gefälle von 30° angenommen. Untersuchungen von EVANS & HUNGR (1993) entsprechend, wird ein Schattenwinkel von 27° eingesetzt. Die Entscheidung für eines der beiden Pauschalwinkelmodelle ist von der Hangmorphologie abhängig. Sie kann mit Hilfe des Quotienten aus Tangens des Schattenwinkels und Tangens des Geometrischen Gefälles getroffen werden (MAYER & VON POSCHINGER 2005). Dieses Verhältnis lässt sich auch als Quotient aus z_1 (Höhendifferenz aus maximaler Reichweite und Obergrenze des Schuttkegels) und z_2 (Höhendifferenz aus maximaler Reichweite und Obergrenze des Anbruchbereichs) darstellen (Abb. 4). Ist dieser Quotient kleiner 0,88, ist der Schattenwinkel zu wählen, ansonsten ist das Geometrische Gefälle zu verwenden. Bei hohen Wänden ist somit der Schattenwinkel anzusetzen, bei steilen Hängen mit kleinen Wandstufen das Geometrische Gefälle.

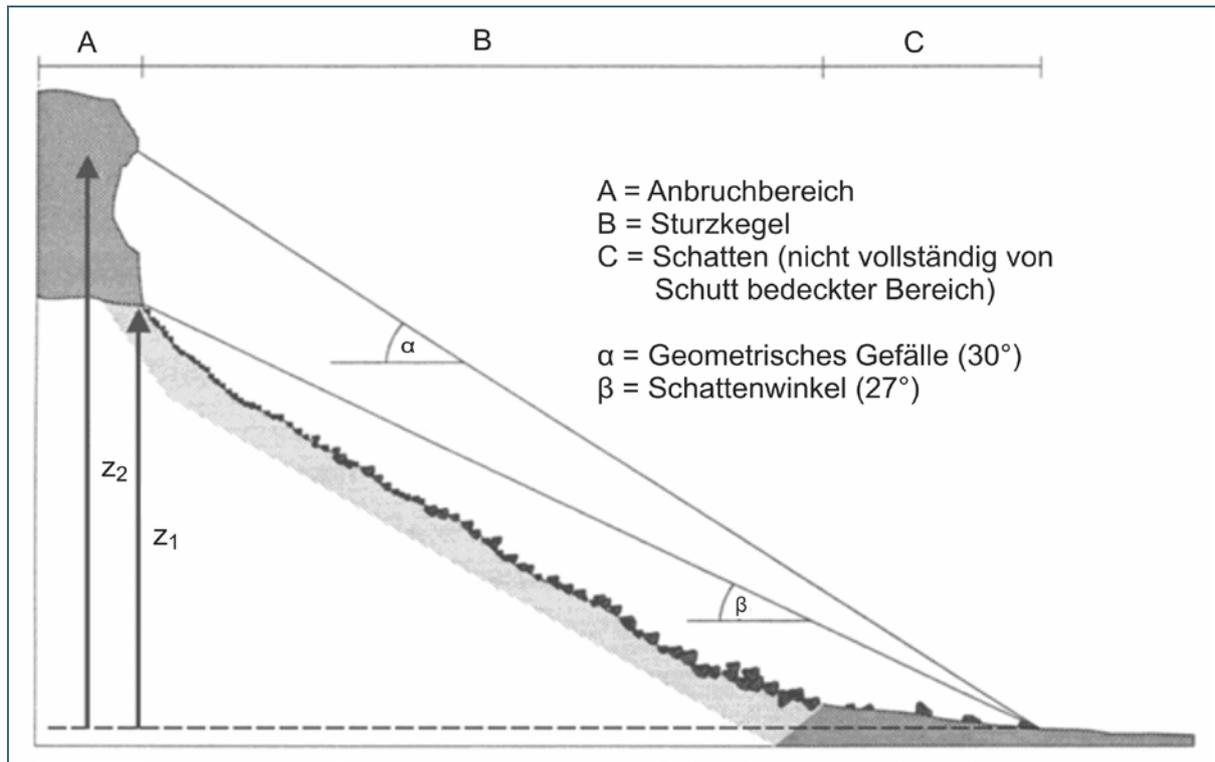


Abb. 4: Pauschalwinkelmodelle Geometrisches Gefälle (α) und Schattenwinkel (β), verändert nach MEIBL (1998)

Da Felsstürze eher seltene Extremereignisse sind, werden die ermittelten Bereiche mit den **orangenen Gefahrenhinweisbereichen** für Steinschlag zusammengefasst und nur in jenen Bereichen als Felssturz attribuiert, wo die Felssturz-Modellierung weiter reicht als die Stein- und Blockschlagmodellierung.

4.1 Vorbereitende Arbeiten – Ermittlung der Anbruchpunkte

Zur Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche wurde im BIS-BY nach allen GEORISK-Objekten recherchiert, für die Hinweise auf eine Felssturzaktivität größeren Volumens vorliegen. Anhand repräsentativer Werte für z_1 , z_2 und für die geschätzte maximale Reichweite kann die Entscheidung für einen der beiden Pauschalwinkelansätze getroffen werden.

In Anlehnung an die digitalisierten GEORISK-Objekte im BIS-BY werden Pauschalwinkelansatzpunkte für die Felssturzmodellierung neu digitalisiert. Um diese Punkte möglichst exakt platzieren zu können, werden ein hochauflösendes Schattenbild und eine aus dem DGM erstellte Hangneigungskarte als Digitalisierungsgrundlagen herangezogen.

4.2 Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche – Modellierung

Für die Modellierung der Gefahrenhinweisbereiche wird die **Viewshed-Funktion** des Spatial Analyst in ArcGIS verwendet. Diese Funktion ermittelt alle Rasterzellen, die von den Ansatzpunkten aus mit einem festgelegten Vertikal- und Horizontalwinkelsegment gesehen werden (Abb. 5).

Abhängig vom gewählten Pauschalwinkelansatz werden die Startpunkte für die Viewshed-Modellierung digitalisiert. Anschließend werden alle nötigen Attribute bestimmt und die Viewshed-Funktion ausgeführt (Abb. 6, Abb. 8). Der Vertikalwinkel (VERT1 in Abb. 6), ergibt sich aus dem gewählten Pauschalwinkelmodell. Das horizontale Winkelsegment ist definiert mit einem Bereich von je 15° links

und rechts der aus dem DGM rechnerisch ermittelten Falllinie (entspricht der Exposition) an jedem Startpunkt (AZIMUTH1, AZIMUTH2 in Abb. 6).

Die Güte der Ergebnisse der Viewshed-Modellierung ist abhängig von der Geländemorphologie. Für Felswände, die direkt in Richtung des Auslaufbereichs exponiert sind, liefert die Modellierung meist gute Ergebnisse. Stärker gegliederte Wände, in denen die Anbruchbereiche nicht direkt in Richtung des Auslaufs exponiert sind oder bei denen der Auslaufbereich eine Krümmung aufweist, lassen sich schlechter mit der Viewshed-Funktion erfassen (Abb. 7).

Zudem kommt es bei Steilbereichen zu Artefakten, das heißt es gibt Rasterzellen, die aufgrund des festgelegten Vertikalwinkels von den Startpunkten aus nicht gesehen werden („Löcher“), die aber dennoch im Sturzbereich liegen (Abb. 8). Bei der Modellierung erfolgt keine Berücksichtigung eines Sturzvolumens, das heißt die Reichweite eines Felssturzes kann bei kleinen Sturzmassen hinter der errechneten maximalen Reichweite zurückbleiben. Ebenso schließt die Modellierung Bergstürze (Sturzmassen $> 1.000.000 \text{ m}^3$) nicht mit ein.

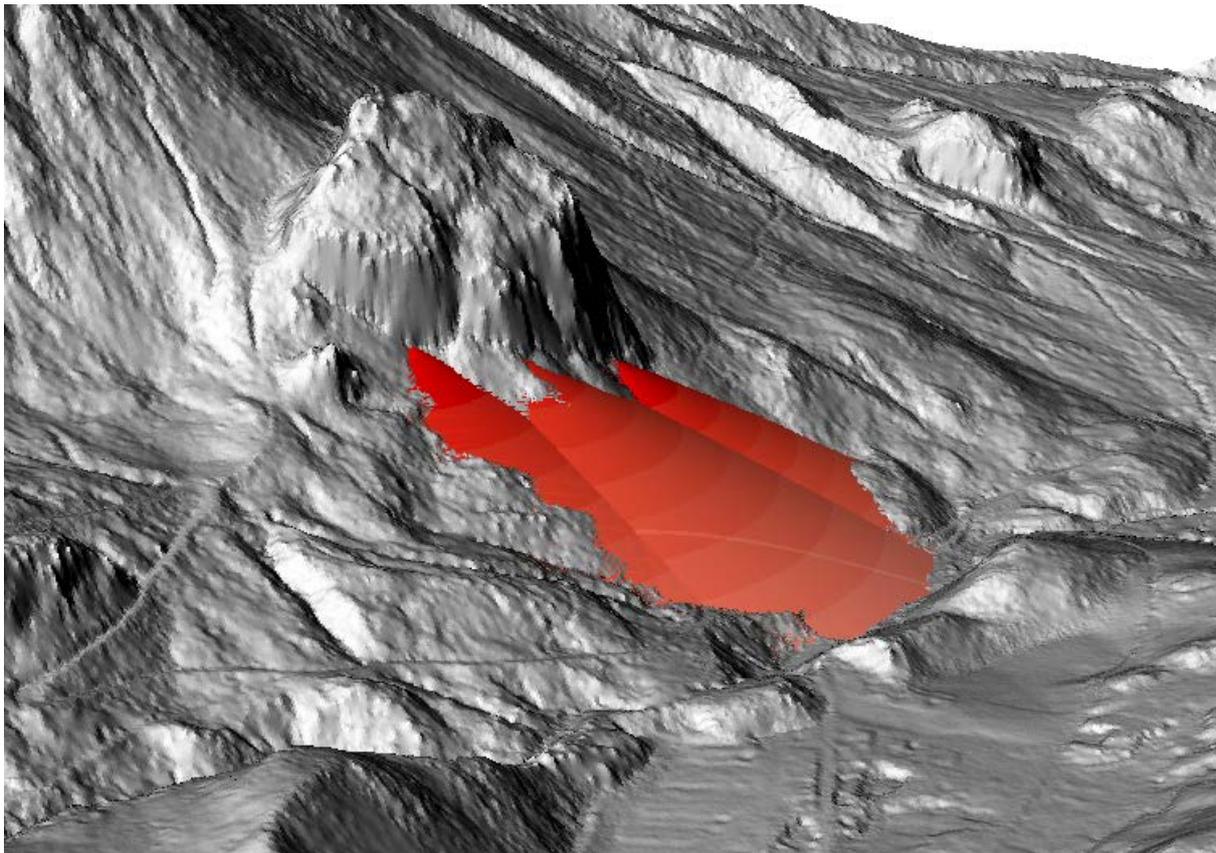


Abb. 5: Viewshed-Funktion mit der Pauschalwinkelmethode: Die Viewshed-Funktion ermittelt alle Rasterzellen, die von definierten Punkten aus mit einem festgelegten Vertikal- und Horizontalwinkel gesehen werden (Schattenwinkel 27°).

FID	Shape	POINTID	GRID_CODE	VERT1	VERT2	AZIMUTH1	AZIMUTH2	OFFSETA	OFFSETB
0	Point	1	114	-27	-90	99	129	1	1
1	Point	2	95	-27	-90	80	110	1	1
2	Point	3	106	-27	-90	91	121	1	1
3	Point	4	92	-27	-90	77	107	1	1
4	Point	5	59	-27	-90	44	74	1	1
5	Point	6	102	-27	-90	87	117	1	1
6	Point	7	72	-27	-90	57	87	1	1

Abb. 6: Attributtabelle für die Berechnung der Viewshed-Funktion

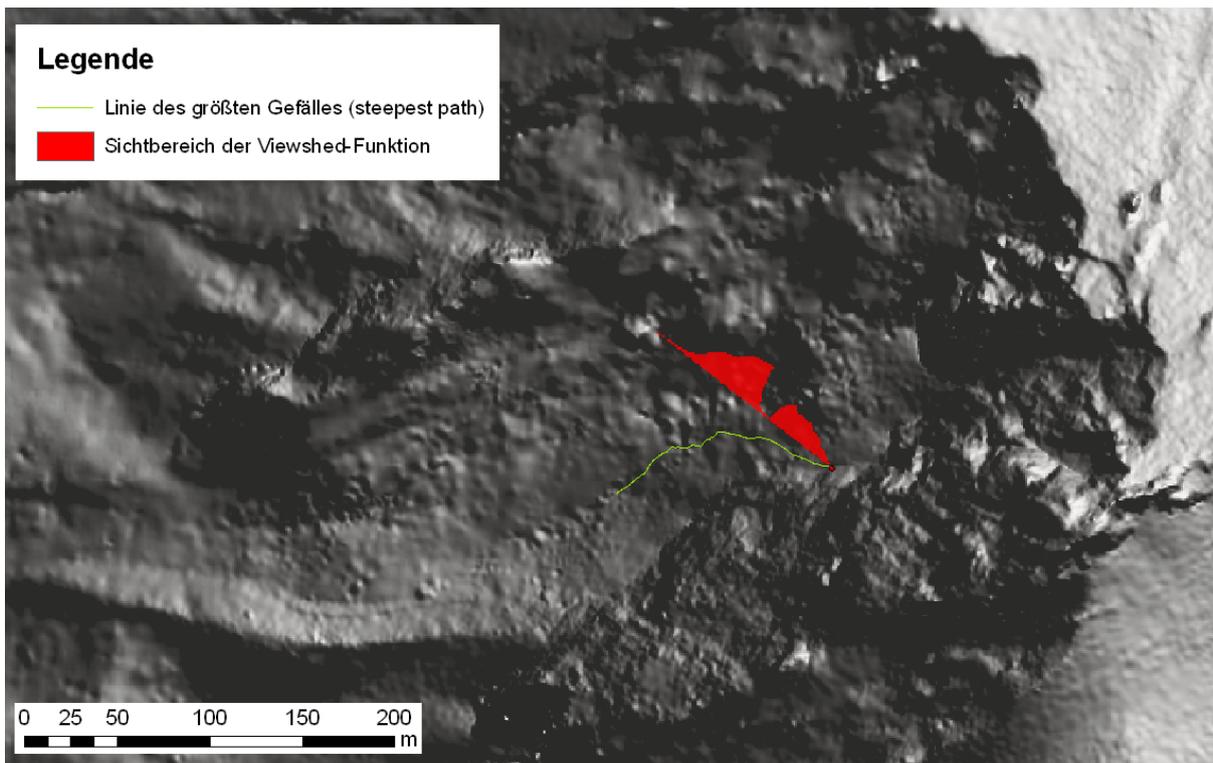


Abb. 7: Viewshed-Funktion bei gekrümmten Auslaufbereichen. Bei gekrümmten Auslaufbereichen (grün) und Anbruchbereichen, die nicht direkt in Richtung des Auslaufs exponiert sind, kann die Viewshed-Funktion (rot) den Sturzbereich nicht korrekt abschätzen.

Die Gefahrenhinweisbereiche müssen aufgrund der oben erwähnten Einschränkungen im Gelände verifiziert bzw. manuell abgegrenzt werden. Des Weiteren liefert die Viewshed-Modellierung als Ergebnis nur den Ablagerungsbereich eines Felssturzes. Der Prozessraum muss deshalb ebenso manuell um den Anbruchbereich erweitert werden. Die so ermittelten Prozessräume werden im Anschluss daran mit den orangenen Gefahrenhinweisbereichen für Stein-/Blockschlag verschnitten und nur die Teile in der Gefahrenhinweiskarte über das Attribut Felssturz gesondert ausgewiesen, die über die Stein-/Blockschlagmodellierung hinausreichen.

Darüber hinaus haben die Modellierungen gezeigt, dass nicht jede vermutete Felssturza blagerung tatsächlich auf einen Sturz zurückzuführen ist. Geländeuntersuchungen im unter Abb. 9 dargestellten Beispiel an der Spitzsteinwand haben ergeben, dass diese Ablagerung eher einen fossilen Blockgletscher darstellen dürfte. Trotz mancher Einschränkungen sind die Ergebnisse der Viewshed-Modellierung eine gute Grundlage für die Abgrenzung der Prozessräume.

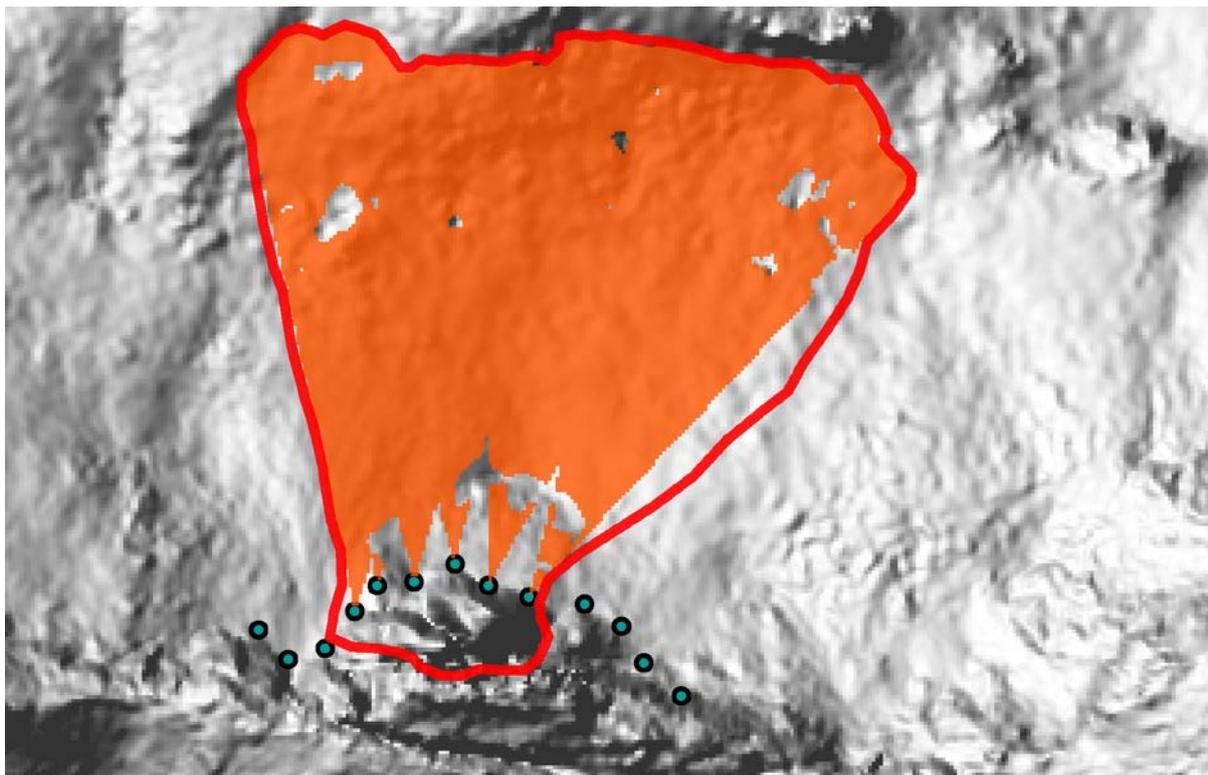


Abb. 8: Modellierung von Felssturzbereichen mit der Viewshed-Funktion (hellrot). Der Gefahrenhinweisbereich ist nach einer Validierung der Modellierung im Gelände anhand des Schattenbilds abzugrenzen (rote Linie).

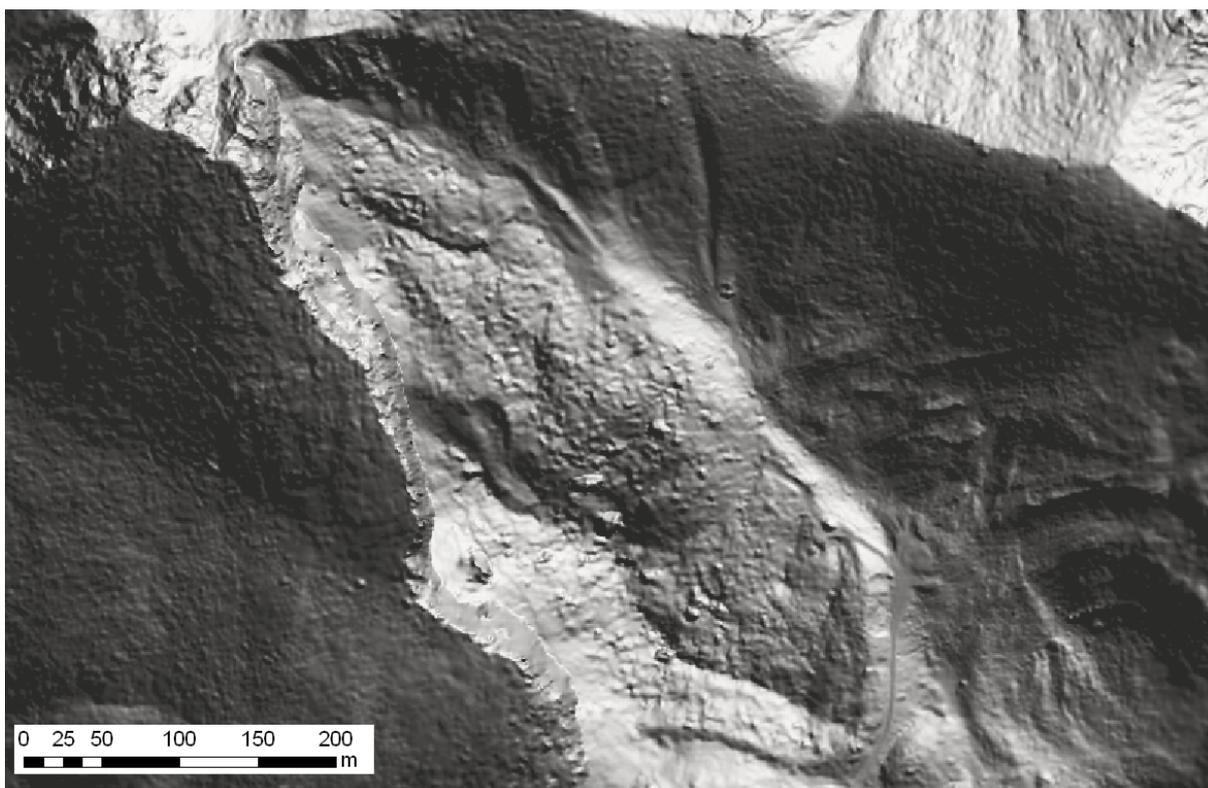


Abb. 9: Schattenbild eines anzunehmenden späteiszeitlichen Blockgletschers (Spitzsteinwand), der eine große Sturzablagerung vortäuscht

5 Rutschung

Die ausgewiesenen Gefahrenhinweisflächen zum Prozess Rutschung beziehen sich insbesondere auf tiefreichende Rutschungen (Tiefgang in der Regel mehr als 5 m). Eine Gefährdung durch flachgründige Rutschungen wird nur in Einzelfällen betrachtet (s.u.). Da Rutschprozesse von sehr vielen Faktoren abhängen, sind Aussagen über eine Gefährdung grundsätzlich schwer zu treffen und bisher nicht durch Modelle abbildbar. Die Ausweisung der Gefahrenhinweisflächen für Rutschungen beruht daher auf einer empirischen Herangehensweise mit Einzelfallbeurteilung. Entsprechend werden für die Gefahrenhinweiskarte tiefreichende Rutschungen grundsätzlich im Gelände kartiert.

Rote Gefahrenhinweisflächen werden ausgewiesen, wo eine Gefährdung durch tiefreichende Rutschungen besteht. Dies ist insbesondere im Bereich anhaltend aktiver tiefreichender Rutschungen der Fall. Zum anderen kann eine erhöhte Gefährdung aber auch durch momentan inaktive tiefreichende Rutschungen gegeben sein. Nach bisherigen Erfahrungen ereignen sich tiefreichende Rutschungen meist in Gebieten, die bereits in der Vergangenheit von entsprechenden Ereignissen betroffen waren. Dies liegt daran, dass Rutschungen meist mehrphasige Prozesse sind, die nach einer Zeit der Inaktivität wieder in eine aktive Phase übergehen können. Die ausgewiesenen Flächen beinhalten dabei den potenziellen Prozessraum, das heißt es wird berücksichtigt, in welche Richtung sich der Prozess bei anhaltender Aktivität oder Reaktivierung voraussichtlich ausweiten kann (rückschreitende Prozesse, Reaktivierungen innerhalb der Rutschmassen, seitliche und talwärtige Ausweitung).

Eine **Rutschanfälligkeit (orange Flächen)** wird für Geländebereiche ausgewiesen, in denen eine erhöhte Anfälligkeit für die Bildung eines tiefreichenden Rutschprozesses erkennbar ist. Eine solche Anfälligkeit äußert sich beispielsweise im Zusammenspiel von Faktoren wie rutschanfälligem Untergrund, Vorhandensein flachgründiger Rutschungen, unruhiger Morphologie, Vernässungen und weiteren mehr. An Blockschollenbewegungen sind alte Zerrspalten und Nackentälchen, an denen derzeit keine erheblichen Vertikalbewegungen von Blöcken erkennbar sind, möglicherweise als Vorbereitung für zukünftige tiefreichende Bewegungen zu sehen. Eine solche Entwicklung ist insbesondere in Extremfällen zu erwarten, wie zum Beispiel beim Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Umstände (z. B. Starkregen nach langer Niederschlagsperiode).

5.1 Vorbereitende Arbeiten – Rutschungskartierung

Wichtigste Grundlage für die Ausweisung der Gefahrenhinweisflächen ist die vollständige, flächendeckende Erfassung von tiefreichenden Rutschprozessen im Gelände. Für die Abgrenzung der Gefahrenhinweisflächen ist daher eine detaillierte Beschreibung jedes einzelnen bekannten Rutschprozesses hinsichtlich Tiefgang, Reaktivierbarkeit und Ausdehnung des potenziellen zukünftigen Prozessraumes unerlässlich. Die Qualität der Gefahrenhinweiskarte hängt entscheidend von der Qualität der Datengrundlage ab. Viele wichtige Informationen, wie die Aktivität des Prozesses oder auftretende Schäden, können nur im Gelände erhoben werden. Diese Informationen werden in das GEORISK-Kataster (BIS-BY) übernommen.

Die Visualisierungen des digitalen Geländemodells als Schattenbild, Höhenlinienkarte und Hangneigungskarte sind die Basis für die Festlegung der zu begehenden Flächen, da sie eine detaillierte Darstellung der Geländemorphologie ermöglichen. Typische Rutschungsformen, wie nischenförmige Abrisskanten oder zungenförmige Ablagerungen sind auf dem Schattenbild meistens deutlich zu erkennen. Auch undeutlichere Zeichen, wie eine unruhige Morphologie, eine Abweichung vom verbreiteten, ungestörten Hangprofil oder Verflachungen im Hang, können Indizien für Rutschungen sein. Des Weiteren werden Bereiche begangen, welche bei der historischen Recherche ermittelt wurden und es wird Hinweisen aus den Geologischen Karten nachgegangen.

Im Gelände werden morphologische Indizien erfasst, die für eine Rutschbewegung und deren Ausdehnung sprechen (Abrisskanten, Zugrisse, offene Spalten, Nackentälchen, Doppelgrate, Geländestufen etc.). Zudem werden weitere Anzeichen erfasst, die Aufschluss über die Aktivität, die aktuelle Bewegungsrate sowie die weitere Entwicklung der Bewegung geben. Dies können aufgetretene Schäden, Bodenrisse mit gespannten Wurzeln, säbelwüchsige oder schiefe Bäume, Senkungen und Vernässungen des Untergrunds oder Fließloben und Stauchwülste sein. Die Anzeichen sind vor dem Hintergrund der Geologie, der Nutzung und im Zusammenhang mit technischen Maßnahmen (Stützmauern, Drainagen, etc.) zu bewerten.

5.2 Ermittlung der Gefahrenhinweisflächen

Für die Ermittlung der Gefahrenhinweisflächen werden die vorhandenen Daten aus dem GEORISK-Kataster ausgewertet, bei denen es sich weitgehend um im Gelände erhobene Daten handelt. Daneben liefern auch geotechnische Gutachten, Diplomarbeiten und Dissertationen relevante Informationen.

Beurteilung der Gefährdung

Die erfassten Rutschungen werden zunächst nach ihrem Tiefgang bewertet. Handelt es sich um eine tiefreichende Rutschung, also eine mit einem Tiefgang von mindestens 5 m, so wird im nächsten Schritt die Reaktivierbarkeit beurteilt. Ist die Rutschung aktiv oder reaktivierbar oder kann dies nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, so wird die zugehörige Gefahrenhinweisfläche als rote Fläche ausgewiesen. Nur wenn die Rutschung aller Wahrscheinlichkeit nach nicht reaktivierbar ist, wird auf die Ausweisung einer Gefahrenhinweisfläche verzichtet. Alle roten Gefahrenhinweisflächen basieren auf GEORISK-Objekten, bei denen eine Geländebegehung durchgeführt wurde (Abb. 10).

Handelt es sich bei der erfassten Rutschung um eine flachgründige Bewegung und liegen im Umfeld weitere derartige Rutschungen vor, wird anhand der vorhandenen Daten beurteilt, ob diese sich zukünftig zu einem tiefreichenden Prozess entwickeln kann oder künftige Aktivität sehr wahrscheinlich ist. Ist dies der Fall, etwa weil sich tiefreichende Rutschungen in ähnlichen geologischen Einheiten und morphologischen Positionen in der Umgebung finden, so wird der Bereich als orange Fläche ausgewiesen. Außerdem werden sie dort ausgewiesen, wo eine Rutschanfälligkeit durch ein Zusammenspiel von Faktoren wie rutschanfälliger Untergrund, unruhige Morphologie und Vernässungen gegeben ist und Bewegungen bereits stattgefunden haben.

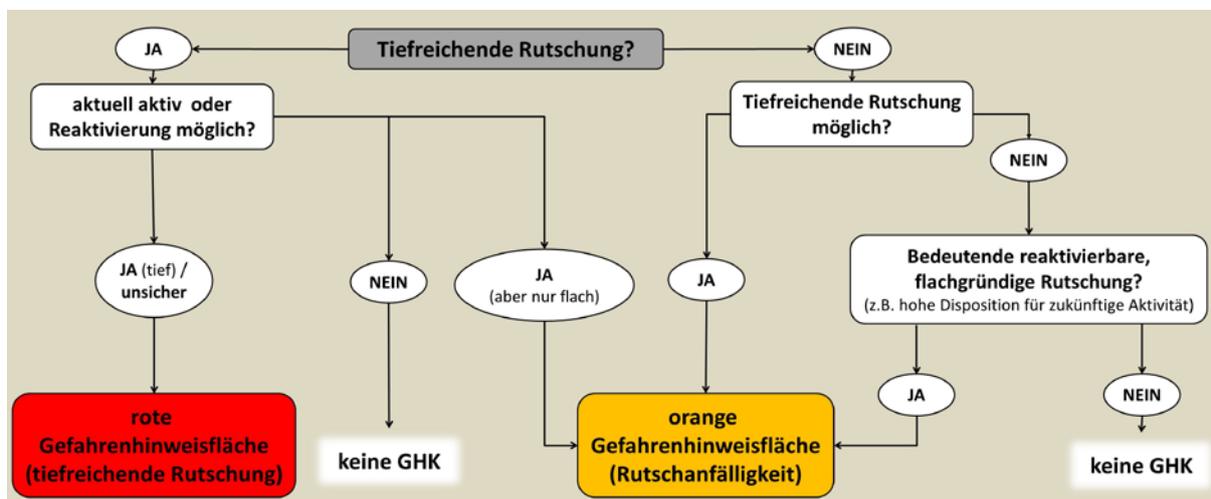


Abb. 10: Entscheidungsbaum zur Beurteilung der Gefährdung durch tiefreichende Rutschungen

Ermittlung des potenziellen Prozessraumes tiefreichender Rutschungen

Die Ausdehnung der Gefahrenhinweisflächen basiert auf einer Einschätzung der zukünftigen Entwicklung der Rutschung und stellt den wahrscheinlichen zukünftigen Prozessraum dar. Alle Rutschungen werden in der Regel mit einem Sicherheitssaum von 20 - 30 m versehen. Dieser wird den örtlichen Gegebenheiten angepasst und ist vor allem von den geologischen und bodenmechanischen Randbedingungen abhängig.

Die Bewegungsbereiche bekannter Ereignisse können sich bei anhaltender Aktivität oder bei einer Reaktivierung verändern. Eine Ausweitung kann beispielsweise im Anbruchbereich oder im Ablagebereich der Rutschmasse stattfinden. Der sogenannte Prozessraum der Rutschung kann sich also mitunter stark vergrößern. Andererseits können auch Bewegungen innerhalb eines festen Prozessraums stattfinden. Hinweise zu einer möglichen Ausweitung finden sich teilweise im Gelände und werden bei der Ausweisung der Gefahrenhinweisfläche berücksichtigt.

Bei der potenziellen Ausweitung des Prozessraumes im Anbruchbereich sind im Wesentlichen die morphologische Situation sowie die boden- und felsmechanischen Eigenschaften des Untergrunds maßgeblich. Gelegentlich reicht der Prozessraum bis an den nächstliegenden Bergrücken, Grat (Kamm) oder an markante Geländestufen und Rinnen im Umfeld der Rutschungen.

Zur Bestimmung der potenziellen Reichweite einer aktiven oder reaktivierbaren Rutschung wird zunächst die bisherige Reichweite auf der Basis von Datenbankinhalten, dem Schattenbild und Geländedaten (stumme Zeugen) bestimmt. Liegen beispielsweise Anzeichen für aktive Bewegungen an der Rutschungsstirn vor, muss davon ausgegangen werden, dass bei einer Reaktivierung die Reichweite der „alten“ Rutschmasse lokal übertroffen wird. Der Gefahrenhinweisbereich wird dann entsprechend der geomorphologischen Gegebenheiten evaluiert. Reichen die Gefahrenhinweisflächen für tiefreichende Rutschungen bis in ein wasserführendes Gerinne, werden sie dort abgegrenzt, wenn davon auszugehen ist, dass die sich dort ansammelnden Lockergesteinsmassen vom Bach abgetragen und weitertransportiert werden.

6 Hanganbruch

Hanganbrüche sind flachgründige Rutschungen der Verwitterungsdecke von einigen Zehnern bis wenigen 100 m³ Volumen, die bei Starkniederschlagsereignissen auftreten können. Trotz des meist geringen Volumens bedingen sie durch die Mobilität der Rutschmassen und ihr spontanes Auftreten oft ein erhebliches Schadenspotenzial und haben auch schon zu Todesfällen geführt. So waren im Jahr 2002 in Lutzenberg im Kanton St. Gallen drei Todesfälle zu beklagen, als zwei Häuser durch ein solches spontanes Ereignis zerstört wurden. Im Rahmen der Erstellung von Gefahrenhinweiskarten für die Landkreise mit Alpenanteil (Lindau, Oberallgäu, Ostallgäu, Weilheim-Schongau, Garmisch-Partenkirchen, Bad Tölz-Wolfratshausen, Miesbach, Rosenheim, Traunstein, Berchtesgadener Land) wurde deshalb auch die lokale Anfälligkeit für Hanganbrüche ermittelt.

Da es sich bei Hanganbrüchen grundsätzlich um Extremereignisse handelt, die nur bei bestimmten Witterungsverhältnissen auftreten (z. B. Starkniederschlagsereignisse, die das für die Region übliche Maß überschreiten), werden die ermittelten Bereiche in der Gefahrenhinweiskarte schraffiert dargestellt. Bei der Ausweisung von Gefahrenhinweisbereichen zu Hanganbrüchen werden grundsätzlich keine bestehenden baulichen Schutzmaßnahmen berücksichtigt. Allerdings fließt die bestehende Bebauung (Häuser, Gebäude) bei der Ermittlung der potenziellen Anrisszonen für Hanganbrüche ein. Wie beim Prozess Stein- und Blockschlag hat Wald auch bei der Entstehung von Hanganbrüchen eine schützende Wirkung und wird mit seiner langfristigen Schutzwirkung berücksichtigt.

Zwei Szenarien werden in der Gefahrenhinweiskarte dargestellt: **Rot-schraffierte Gefahrenhinweisbereiche** kennzeichnen ein realitätsnahes Szenario, in dem die Prozessräume von Hanganbrüchen mit den schützenden Effekten des aktuellen Waldbestands modelliert werden. In einem zweiten, konservativen Szenario wird der Hanganbruchprozess ohne Einfluss eines Waldes berechnet (**orange-schraffierte Gefahrenhinweisflächen**). Als Worst-Case-Szenario trägt es zukünftigen Veränderungen des Waldbestands Rechnung, die sich möglicherweise durch Kahlschlag, Waldbrand, Durchforsten oder Schädlingsbefall ergeben. Das erste Szenario entspricht dem zweiten an allen Stellen, an denen kein Wald vorliegt. Der Vergleich der Szenarien ermöglicht eine Einschätzung der Bedeutung des Waldes als Schutz gegen Hanganbruch.

6.1 Vorbereitende Arbeiten – Grundlagen zur Ermittlung der Anrisszonen und Auslaufbereiche

Die Ausweisung von Gefahrenhinweisflächen zum Prozess Hanganbruch wird auf Grundlage einer computer-basierten Modellierung durchgeführt. Diese erfolgt in Lockergestein und Böden analog zur Modellierung der Reichweiten von Stein- und Blockschlag in zwei Stufen.

- a) Dispositionsmodell: Zuerst werden die **Anrisszonen** mit dem Modell SLIDISP (LIENER (2000) und TOBLER et al. (2013a)) ausgedehnt.
- b) Prozessmodell: Anschließend werden deren **Auslaufbereiche** mit dem GIS-Ansatz SLIDEPOT (TOBLER et al. (2013b)) berechnet.

Grundlage für die Dimensionierung der Bemessungsereignisse sind Geologie, Hangneigung und Landnutzung.

Grundlagen zur Modellierung der Anrisszonen

Die numerische Modellierung der Anrissgebiete erfolgte mit dem Modell SLIDISP. Es bestimmt mit Hilfe der Infinite-Slope-Analyse (Methode zur Stabilitätsberechnung) die Hangstabilität für jede Rasterzelle.

Die beiden zentralen Grundlagen für die Modellierung der Hanganbruch-Anrissflächen sind die Hangneigungen aus dem DGM sowie der geologische Untergrund, aus welchem die geotechnischen Modellparameter abgeleitet werden. Die Erfahrungen zeigen, dass die Qualität der Modellierungsergebnisse stark von der räumlichen Auflösung des DGM und der Geologie abhängt.

Für alle geologischen Einheiten im Projektgebiet wird anhand der Eigenschaften des Verwitterungsproduktes der kritische Reibungswinkel (Mittelwert, Standardabweichung) sowie die Kohäsion (bei definierter Wassersättigung) abgeschätzt. Diese fließen als Parameter in die Modellierung ein. Der Sicherheitsgrad F einer Rasterzelle beschreibt das Verhältnis von rückhaltenden zu treibenden Kräften gemäß der Formel in Abb. 11.

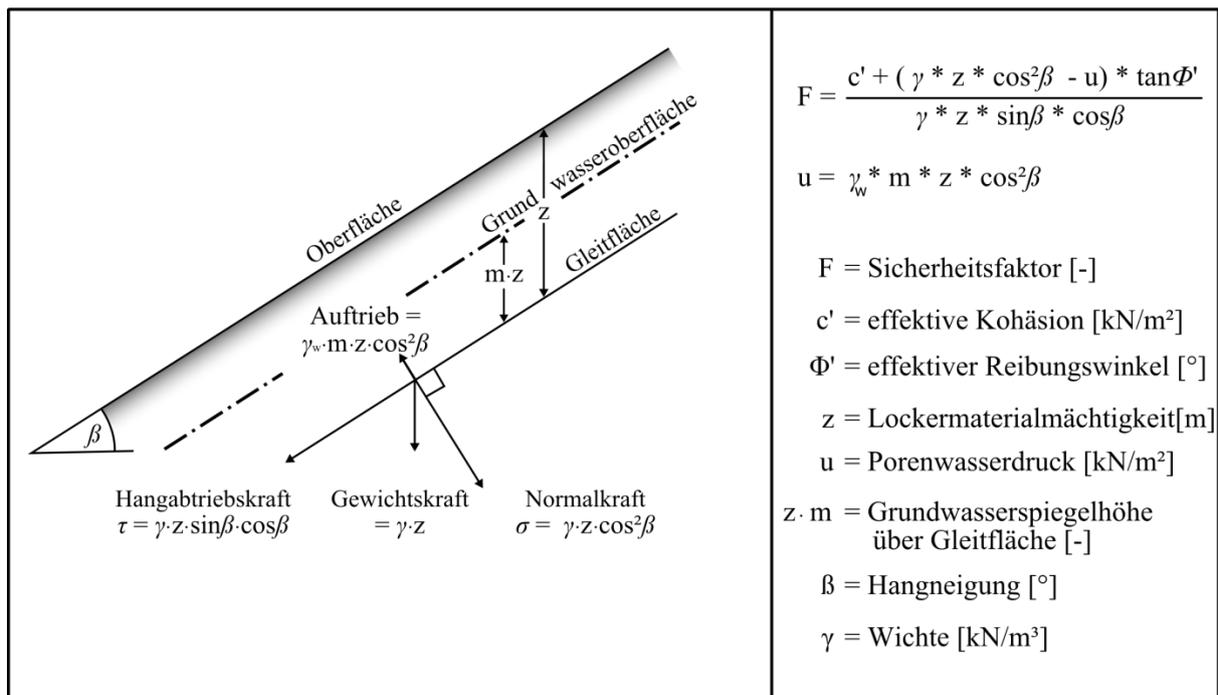


Abb. 11: Grundlagen zur Berechnung des Sicherheitsgrades F einer Rasterzelle (SELBY 1993)

Wurzelkraft

Zur Berechnung des Sicherheitsfaktors F wird häufig die Formel nach SELBY (1993) zitiert (Abb. 11). Die Erfahrungen zeigen, dass das Vorhandensein von Wald die Stabilitätsverhältnisse beeinflusst und folglich die Formel ergänzt werden muss, indem zum gesamten Zähler ein Szenario-spezifischer Wert, die sogenannte Wurzelkraft (WK), addiert wird. Diese WK-Werte können nicht aus der einschlägigen Literatur entnommen werden. Sie können jedoch aufgrund von Erfahrungswerten als empirische Größen in Relation zur Größenordnung der übrigen Formel-Faktoren (Kohäsion, Lockermaterialmächtigkeit, Reibungswinkel) eingesetzt werden.

Variabilität der Modellparameter

Neben der Wurzelkraft beinhalten auch andere Variablen, die den Sicherheitsgrad F bestimmen (Abb. 11) in geringerem Maße eine gewisse Variabilität. Es handelt sich dabei um den Reibungswinkel ϕ' , die Kohäsion c' sowie den Porenwasserdruck u (Wassersättigung) des Lockermaterials. Die Unsicherheiten betreffen vor allem kleinräumige (primär Reibungswinkel) und raumzeitliche Variationen (Primär-Kohäsion, Porenwasserdruck) dieser Faktoren, welche beträchtlich sein können. Im Sinne einer Gefahrenhinweiskarte im Maßstab 1:25.000 müssen diese Faktoren eher konservativ angesetzt werden, um alle potenziellen Prozessflächen zu erfassen.

Topo-Index

Aus dem DGM wird flächendeckend der sogenannte Topo-Index berechnet, der das topographisch bedingte Wassersättigungspotenzial für jede Rasterzelle definiert. Der Topo-Index korrigiert die für jede Modellierungsklasse pauschal definierte Wassersättigung (bzw. den Porenwasserdruck) in Funktion der Geländeoberflächenform.

$$\text{Topo-Index} = \ln(a / \tan \beta)$$

(mit a = Fläche, die durch die Rasterzelle entwässert; β = Hangneigung Rasterzelle)

Die berechneten Werte werden in vier Klassen eingeteilt (Tab. 1).

Topo-Index	Klassifizierung
0 – 5,3	1 (trocken)
5,3 – 7,2	2
7,2 – 9,1	3
> 9,1	4 (feucht)

Tab. 1:
Klassifizierung des Topo-Index

Digitale Codierung der Geologie

Die Eigenschaften der verschiedenen geologischen Einheiten im Projektgebiet werden gemäß Tab. 2 attribuiert. Die Codierungen beziehen sich jeweils auf das Verwitterungsprodukt der lithologischen Einheiten, welches das Ausgangsmaterial für einen möglichen Hanganbruch-Anriss bildet.

Tab. 2: Codierungsschema für die stratigraphischen Einheiten:

Jede stratigraphische Einheit im Projektgebiet wird nach diesem Schema attribuiert. Anhand der Werte, die für die Durchlässigkeit, das Gestein, den Zustand bzw. die Beanspruchung, die Erodierbarkeit sowie die Korngröße vergeben werden, wird der Code SliDisp, der Reibungswinkel und die Kohäsion für jede stratigraphische Einheit ermittelt.

Einheit	Code SliDisp	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [N/mm²]	Durchlässigkeit	Gestein	Zustand / Beanspruchung	Erodierbarkeit	Korngröße
				Verwitterungsprodukt				Verwitterungsprodukt
				1 = dicht (Stauer)	1 = Sandstein	1 = kompakt	1 = sehr gering	1 = sehr fein (Ton)
				2 = sehr gering (z. B. tonige Gesteine)	2 = Kalkstein	2 = wenig zerklüftet	2 = gering	2 = fein (Schluff)
				3 = gering	3 = Mergelstein	3 = stark zerklüftet	3 = mittel	3 = mittel (Sand)
				4 = mittel	4 = Tonstein	4 = gebräich	4 = hoch	4 = groß (Sand / Steine)
				5 = hoch	5 = Schotter / Kies / Sand	5 = vorbelastet	5 = sehr hoch	5 = sehr groß (Blöcke)
				6 = sehr hoch (z. B. geklüftete Gesteine, Schotter)	6 = Gehängeschutt	6 = Lockergestein		6 = Diamektit
					7 = Humos			
					8 = Vulk. Silikat			
					9 = glaziale Sedimente			
					10 = Nagelfluh			
					11 = Ton/Schluff			
Geologische Einheit								

Das Untersuchungsgebiet umfasst mehrere geologische Karten, die zum Zeitpunkt der Modellierung teilweise noch nicht blattschnittfrei vorlagen. Daher können einerseits an den Blattgrenzen unterschiedlich kartierte Einheiten aneinandergrenzen und andererseits quartäre Einheiten unterschiedlich detailliert aufgenommen vorliegen. Dies kann lokal Auswirkungen auf die modellierten Anrissbereiche haben, indem sich deutliche Begrenzungen, die in der Natur so nicht auftreten, im Kartenbild abzeichnen. Teilweise musste auch auf ungeprüfte Manuskriptkarten zurückgegriffen werden.

Die Modellierung der Hanganbruch-Anrisse benötigt die flächenhafte Bearbeitung von fünf Dateien. Diese werden als GIS-Grids aufbereitet. Die Dateien haben folgende Inhalte:

- GEOLOGIE.DAT SLIDISP-Code
- WALD.DAT Waldgrenzen
- NEIGUNG.DAT Hangneigung

- TOPOIX.DAT Klassifizierter Topo-Index (Basis: 5 m-DGM, s.o.)
- MAECHTIG.DAT Mächtigkeit des Lockermaterials

Die pauschalisierte Mächtigkeit des Lockermaterials wird mittels eines empirischen Ansatzes aus der Hangneigung gemäß Tab. 3 abgeleitet.

Hangneigung [°]	Mächtigkeit Lockermaterial [m]
< 20	8,0
20 - 25	4,0
25 - 30	2,0
30 - 35	1,0
35 - 40	0,5
> 40	0

Tab. 3:
Mächtigkeit Lockermaterial (empirische Werte)

Grundlagen zur Modellierung der Auslaufbereiche

Die aus den Hangneigungen pauschal abgeleiteten Lockermaterial-Mächtigkeiten (Tab. 3) werden lediglich für die Berechnung des Sicherheitsgrades F verwendet. Diese sind jedoch zu unsicher, um sie als Grundlage für die Auslaufberechnung zu verwenden. Deshalb wird allen Anrisszonen eine hypothetische Mächtigkeit von einem Meter zugewiesen und diese mit jedem Ausbreitungsschritt sukzessive abgebaut, bis entweder maximal acht Ausbreitungsschritte erfolgt sind oder eine Restkubatur (bzw. Abbaufaktor) mit einem Wert unter 0,1 erreicht wird.

Die Tab. 4 zeigt die im vorliegenden Projekt gewählten Abbaufaktoren und die entsprechenden maximalen Reichweiten.

Tab. 4: Abbaufaktoren und maximale Reichweiten

Lokale Hangneigung	Abbaufaktoren nach Nummer des Ausbreitungsschritts und maximale Reichweiten								
	Startwert	1 (20 m)	2 (40 m)	3 (60 m)	4 (80 m)	5 (100 m)	6 (120 m)	7 (140 m)	8 (160 m)
> 25°	0,85	0,72	0,61	0,52	0,44	0,38	0,32	0,27	0,23
> 25° im Wald	0,60	0,36	0,22	0,13					
17° - 25°	0,75	0,56	0,42	0,32	0,24	0,18	0,13	0,10	
17° - 25° im Wald	0,50	0,25	0,13						
10° - 17°	0,65	0,42	0,27	0,18	0,12				
10° - 17° im Wald	0,40	0,16							
< 10°	0,45	0,20							
< 10° im Wald	0,20								

Die Reichweite eines Hanganbruch-Auslaufprozesses wird hauptsächlich durch den Wasseranteil des Hanganbruchs bestimmt. Weitere, teilweise komplexe Randbedingungen (Oberflächenrauigkeit, Entwicklungsstufe der Vegetation) beeinflussen die Reichweite zusätzlich. Diese sind jedoch nur mit gro-

ßen Unsicherheiten in einem Modell abzubilden. Die im Modell SLIDEPOT verwendeten Abbaufaktoren können erfahrungsgemäß die Reichweiten relativ gut abbilden, wenn die Modellierungsergebnisse an erfolgten Ereignissen (BIS-BY) kalibriert werden können. Wenn, wie im Projektgebiet, nur wenige Ereignisse flächig kartiert und dokumentiert sind, müssen die Abbaufaktoren eher konservativ definiert werden, um ausreichend große, im Zweifelsfall eher etwas zu lange Auslaufstrecken zu erhalten.

6.2 Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche – Modellierung

Modellierung der Anrisszonen

Um die hohe natürliche Variabilität der Scherparameter abzubilden, werden diese im Modell nicht durch einzelne Werte jeder geologischen Klasse, sondern durch Normalverteilungen beschrieben. Für die Bestimmung der Rutschanfälligkeit werden zufällig 100 Werte aus den Verteilungen der Scherparameter ausgewählt und mit diesen Werten 100 Sicherheitsgrade F berechnet. Mit dieser sogenannten Monte-Carlo-Simulation können die natürlichen Variationsbreiten verschiedener Parameter in der Modellierung berücksichtigt werden.

Für das Modell wird angenommen, dass Kohäsion und Reibungswinkel je als Normalverteilung vorliegen und dass sie nicht miteinander korrelieren. Diese Annahme stimmt in der Natur nicht und die Stabilitätsberechnung kann unter dieser Annahme zu hohe oder zu tiefe Werte ergeben. Da die Berechnung aber mit einer großen Anzahl von Parameterkombinationen durchgeführt wird, heben sich die zu hohen und zu tiefen Werte auf und die Wahrscheinlichkeit der Verteilung der Sicherheitsgrade bleibt ähnlich.

Als Modellierungsergebnis wird pro Rasterzelle die Anzahl der Fälle bestimmt, bei denen der Sicherheitsgrad $F \leq 1$ ist, das heißt, bei welchen Instabilität angenommen wird. Je größer die Anzahl der Instabilitäten ist, desto größer ist die Hanganbruchwahrscheinlichkeit. Als mögliche Anrissgebiete werden diejenigen Gebiete ermittelt, bei denen mehr als 60 % der Parameterkombinationen einen Sicherheitsgrad $F \leq 1$ ergeben. Dieser Schwellenwert hat sich bei zahlreichen Projekten bereits bewährt.

Die Anriss-Modellierung mit SLIDISP ist ein C-Programm, welches außerhalb eines GIS läuft. Die Modellierungsergebnisse werden anschließend jedoch wiederum im GIS aufbereitet.

Der berechnete Topo-Index wird nach der SLIDISP-Modellierung zum zweiten Mal herangezogen, indem modellierte Instabilitäten in ausgeprägten Kuppen- bzw. Kammlagen nicht als Anrisszonen klassifiziert werden. Zudem werden Gebäude mit zwei Rasterzellen (= 10 m) gepuffert, um unrealistischen Anbrüchen in Ortslagen vorzubeugen.

Analog zur Stein- und Blockschlagmodellierung wurden auch die Hanganbrüche mit zwei unterschiedlichen Szenarien modelliert. Die beiden Szenarien unterscheiden sich im Grad der Berücksichtigung des Waldes für die Anrisszonen von Hanganbrüchen.

Szenario A (entspricht einem Szenario ohne Wald)

Szenario A geht von einer geringen Schutzwirkung des Waldes aus, das heißt geringe Stabilisierung des Waldbodens bzw. der Lockermaterialüberdeckung aufgrund der Durchwurzelung (Wurzelkraft $WK = 3,5 \text{ kN/m}^2$).

Szenario B (entspricht einem Szenario mit Wald)

Szenario B geht von einer starken Schutzwirkung des Waldes aus, das heißt hohe Stabilisierung des Waldbodens bzw. der Lockermaterialüberdeckung aufgrund der Durchwurzelung ($WK = 7,0 \text{ kN/m}^2$).

Als weitere Faktoren gehen ein höheres Wasseraufnahmevermögen und eine möglicherweise mächtigere Lockermaterialüberdeckung in die Modellierung mit ein.

Modellierung der Auslaufbereiche

Die Berechnung der Auslaufbereiche mit dem Modell SLIDEPOT (TOBLER et al. 2013b) ist ein reiner GIS-Ansatz, welcher für jede Rasterzelle im modellierten Anrissgebiet die Ablagerung hangabwärts in Fließrichtung modelliert. Dabei wird von einem hypothetischen Anfangsvolumen (= 25 m³) oder von ausgeschiedenen oder modellierten Anrissmächtigkeiten ausgegangen.

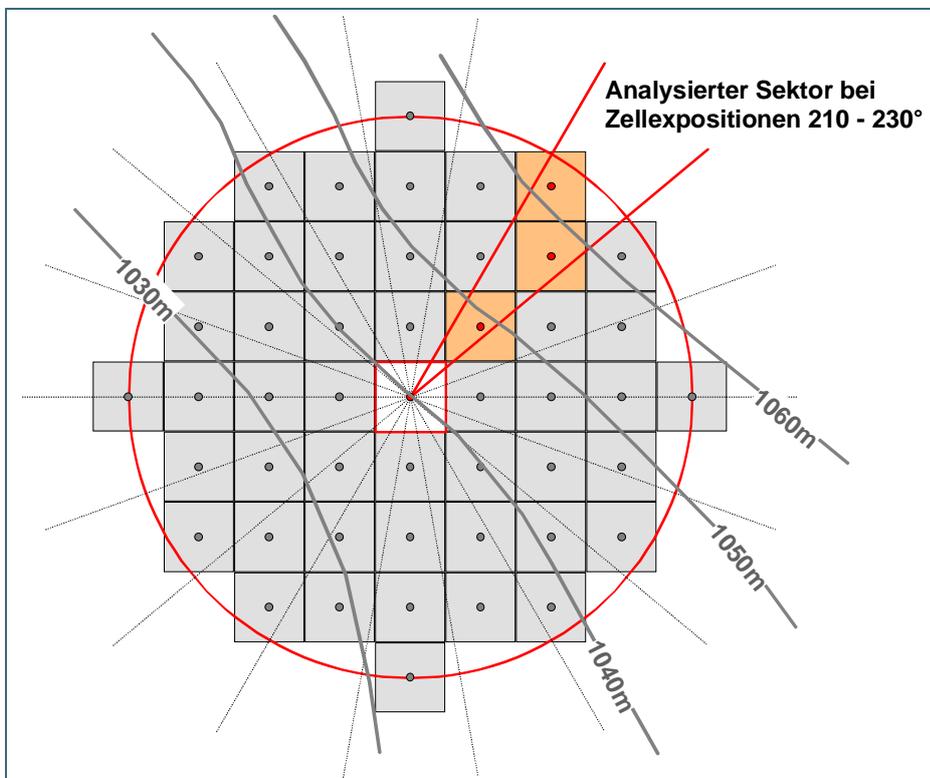


Abb. 4:
Beispiel Modellierung
SLIDEPOT: Drei analysierte Rasterzellen im Sektor für Zellexpositionen 210° – 230° (für Zellengröße 5 m hat der rote Kreis einen Radius von 20 m)
KRUMMENACHER et al. (2008).

Das Modell beruht dabei nicht auf einem sogenannten single-flow-Ansatz, welcher die Zuflussrichtung zu einer potenziellen Ablagerungszelle mit der höchstliegenden direkten Nachbarzelle bestimmt, sondern auf einer erweiterten Nachbarschaftsanalyse: Dabei werden mehrere Zellen in einem 20°-Sektor oberhalb (Gegenrichtung zur Exposition der Zelle) einer potenziellen Ablagerungszelle bis zu einem Abstand von vier Rasterzellen analysiert. Für die aktuelle Rasterzelle wird eine Ablagerung berechnet, wenn im genannten Sektor eine Anrisszelle bzw. ein berechnetes Ablagerungsvolumen vorhanden ist (Abb. 4: orange markierte Zellen) und im Sektor keine stark konvexe Topographie vorliegt. So kann im Gegensatz zum sogenannten single-flow-Ansatz die Ausbreitungsrichtung besser kontrolliert werden.

Jeder Ausbreitungsschritt analysiert Nachbarzellen bis zu einer Distanz von 20 m (für Rasterweite 5 m). Mit jedem Ausbreitungsschritt wird das Anfangsvolumen bzw. das Restvolumen über einen lokalen Abbaufaktor verringert. Dieser Faktor wird vor allem durch die lokale Hangneigung definiert. Zusätzlich können die Abbaufaktoren durch das Vorhandensein von Wald, rauer Geländeoberfläche (Blockschutt etc.) und weiterer räumlicher Parameter modifiziert werden. Die Datenverfügbarkeit bestimmt letztlich die definitiven Abbaufaktoren. Tab. 5 zeigt die im vorliegenden Projekt gewählten Abbaufaktoren.

Die Ausbreitung stoppt, wenn entweder eine definierte Anzahl von Ausbreitungsschritten erreicht wird oder wenn der berechnete Wert unter einen definierten Schwellenwert (z. B. 0,1) fällt.

Lokale Hangneigung der potenziellen Ablagerungszelle [°]	Startwert Abbaufaktor	
	nicht bewaldet	im Wald
> 25	0,85	0,6
17 - 25	0,75	0,5
10 - 17	0,65	0,4
< 10	0,45	0,2

Tab. 5:
Startwert der Abbaufaktoren
(Kalibrierung erfolgte auf Basis empirischer Untersuchungen im Gelände)

Die Auslauf-Modellierung wird für beide Szenarien A und B mit identischen Einstellungen durchgeführt. Es wurden jeweils maximal acht Ausbreitungsschritte gerechnet, wobei im Wald reduzierte Abbaufaktoren definiert wurden.

Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche

Die Resultate der beiden oben genannten Modellierungen (Anriss und Auslauf) werden zusammengefasst und anhand der zwei modellierten Szenarien unterschieden.

7 Erdfall

Subrosion infolge Lösung (Verkarstung) ist die Ursache für die Entstehung oberirdischer Hohlformen (Dolinen oder Senkungsmulden) und unterirdischer Hohlräume (Höhlen). Auch durch die Auswaschung von Feinmaterial (Suffosion) kann es zum Materialverlust im oberflächennahen Untergrund kommen. Der plötzliche Einsturz so entstandener Hohlräume (Erdfall) hinterlässt an der Erdoberfläche unterschiedlich große und tiefe Löcher. Je nach Landnutzung bleiben diese zum Teil offen oder werden rasch verfüllt. Die Gefährdung durch **Erdfälle** besteht also in einem plötzlichen Einbruch, dem Nachbruch oder einer langsamen Senkung des Untergrunds.

Grundsätzlich ist die Gefährdung durch Erdfälle schwer vorherzusagen, da es bislang keine verlässliche Methode gibt, mit der man von der Oberfläche aus beurteilen kann, ob im Untergrund potenziell einsturzgefährdete Hohlräume vorhanden sind. Daher werden in der Gefahrenhinweiskarte zwei unterschiedliche Ansätze gewählt:

Rote Gefahrenhinweisflächen werden dort ausgewiesen, wo Dolinen/Erdfälle im Gelände sichtbar oder Daten über offene oder verfüllte bekannt sind. An den Strukturen oder in deren unmittelbarem Randbereich muss tendenziell mit Nachbrüchen gerechnet werden. Die Dolinen müssen nicht durch Erdfälle entstanden sein. In vielen Fällen handelt es sich auch um Dolinen, die durch das allmähliche Nachsacken von Deckschichten oder die voranschreitende Lösung des verkarstungsfähigen Gesteins im Untergrund geprägt werden. Ohne detaillierte Untersuchungen kann die Entstehungsursache einer Doline nicht beurteilt werden. Die Gefahrenhinweisflächen sind als allgemeiner Hinweis darauf zu verstehen, dass lokal Dolinen vorhanden sind oder Erdfälle stattgefunden haben, welche sich möglicherweise durch Nachstürze oder neue Erdfälle erweitern können.

Zudem besteht prinzipiell überall dort eine gewisse Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Erdfällen, wo im Untergrund verkarstungsfähige Gesteine vorhanden sind. Daher werden zusätzlich die Gebiete, in denen Verkarstungs- oder Auslaugungsvorgänge potenziell möglich sind, als **orange Gefahrenhinweisflächen** ausgewiesen und nach den petrologischen Gesteinseigenschaften unterschieden.

7.1 Vorbereitende Arbeiten – Erfassung von Erdfällen und Dolinen

Die Erfassung von Dolinen erfolgt mit Hilfe der hochauflösenden Schattenbilder sowie anhand der Geologischen und Topographischen Karten (1:25.000). Zusätzlich werden auch Daten aus Dolinenkatastern, von Wasserwirtschaftsämtern, aus Gemeindearchiven und von Bauämtern übernommen. Die so gewonnenen Punktdaten werden im Anschluss an ihre Aufnahme anhand der Eigenschaften des geologischen Untergrunds auf ihre Plausibilität geprüft. Ergänzend erfolgt eine Abgrenzung von Dolinen als Flächengeometrie, wenn sie einen Durchmesser größer als 25 m besitzen.

Eine Einschränkung in der flächenhaften Erfassung ergibt sich vor allem daraus, dass Dolinen/Erdfälle in Siedlungsgebieten und auf landwirtschaftlichen Nutzflächen oftmals rasch verfüllt werden und ihr Auftreten nicht dokumentiert wird. Manchmal können Informationen über Verfüllungen noch aus Archivdaten gewonnen werden. Die in der Gefahrenhinweiskarte ausgewiesenen Flächen zur Gefährdung durch Erdfälle haben somit keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Die erfassten Daten werden in das GEORISK-Kataster des LfU eingepflegt und als Basis für die Ermittlung der Gefahrenhinweisflächen herangezogen. In Einzelfällen wird eine Geländebegehung zur Überprüfung der Daten durchgeführt. Hohlformen, die nicht als Dolinen plausibel erscheinen (z. B. anthropogene Formen wie Abgrabungen) werden im GEORISK-Kataster teilweise als „Negativobjekte“ erfasst, erscheinen jedoch nicht in der Gefahrenhinweiskarte.

7.2 Ermittlung der Gefahrenhinweisbereiche

Sowohl die Punkte als auch die Flächen der Dolinen und Senkungsmulden aus dem GEORISK-Kataster werden zur Darstellung als rote Gefahrenhinweisfläche mit einem 50 m breiten Puffer (radialer Sicherheitssaum) versehen.

Zur Ausweisung des verkarstungsfähigen Untergrundes (orange Gefahrenhinweisfläche) werden aus der Geologischen Karte 1:200.000 (GÜK 200) alle potenziell verkarstungs- oder auslaugungsfähigen geologischen Einheiten extrahiert. Eine zusätzliche Kategorisierung nach der Subrosionsanfälligkeit der verschiedenen Gesteinsarten wird nicht vorgenommen. Des Weiteren werden aus der GÜK 200 Flächen nicht verkarstungs- oder auslaugungsfähigen oberflächennahen Untergrunds extrahiert, bei denen es sich um vermutlich geringmächtige Deckschichten über verkarstungs- oder auslaugungsfähigem Gestein handelt. Hier können sich Subrosionsstrukturen bis an die Oberfläche durchpausen.

8 Großflächige Senkungsgebiete

Durch die flächige Auslaugung von Steinsalz, Gips oder Anhydrit im Untergrund kann es zur Ausbildung von großflächigen Senkungsgebieten kommen, in denen die Geländeoberfläche um mehrere Millimeter bis Dezimeter pro Jahr absinkt. Für bekannte großflächige Senkungsgebiete werden unter Zuhilfenahme aller vorliegenden Unterlagen Gefahrenhinweisflächen erstellt. Obwohl hierbei verschiedenste geologische, hydrogeologische, geodätische und andere Daten einfließen und fachlich bewertet werden, ist eine eindeutige Abgrenzung nicht überall möglich.

Insbesondere in den Randbereichen eines Senkungsgebiets kann es vermehrt zu differentiellen Senkungen kommen. Meist herrscht in und um Senkungsgebiete auch erhöhte Erdfallgefahr. Baugrund- und Gründungsgutachten haben dieser speziellen Problematik Rechnung zu tragen.

9 Literaturverzeichnis

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE (2016): Gefahrenhinweiskarten geogener Naturgefahren in Deutschland – ein Leitfaden der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD). - Geol. Jb., **A164**, 88 S., Stuttgart.
- DORREN, L. K. A. (2003): A review of rockfall mechanics and modelling approaches. - In: Progress in Physical Geography, **27** (1), 69-87.
- EVANS, S. G. & HUNGR, O. (1993): The assessment of rock fall hazards at the base of talus slopes. - In: Canadian Geotechnical Journal, **30** (4), 620-636, Ottawa (Nat. Res. Council of Canada).
- KRUMMENACHER, B. & PFEIFER, R. (2007): Gefahrenhinweiskarte Oberallgäu, Numerische 3D-Modellierung Stein-/Blockschlag und Felssturz mit und ohne Waldwirkung, Technischer Kurzbericht (Bericht Nr. G0603).
- KRUMMENACHER, B., PFEIFER, R., TOBLER, D. & DOLF, F. (2008): Flächendeckende 3-D Modellierung von flachgründigen Hanganbrüchen auf einer Fläche von 3662 km²; Projekt "Gefahrenhinweiskarte Bayerische Alpen" Teilgebiet 1 Landkreis Miesbach; Bericht Nr. G0811.1. - 19 S., Davos Platz.
- KRUMMENACHER, B., PFEIFER, R., TOBLER, D., KEUSEN, H. R., LINIGER, M. & ZINGGELER, A. (2005): Modellierung von Stein- und Blockschlag; Berechnung der Trajektorien auf Profilen und im 3-D Raum unter Berücksichtigung von Waldbestand und Hindernissen. - Fan-Forum ETH Zürich, Zollikofen.
- LIED, K. (1977): Rockfall problems in Norway. - Istituto Sperimentale Modelli e Strutture (ISMES) Publication, **90**, 51-53, Bergamo.
- LIENER, S. (2000): Zur Feststofflieferung in Wildbächen. - In: Geographica Bernensia, Geographisches Institut Bern, **G64**, Bern.
- MAYER, K. & V. POSCHINGER, A. (2005): Creation of danger and hazard maps for rock falls in a regional scale. A comparison between an empirical and a numerical model. - European Geosciences Union General Assembly 2005, Geophysical Research Abstracts, **7**, Wien.
- MEIßL, G. (1998): Modellierung der Reichweite von Felsstürzen: Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. - 249 S., Innsbruck.
- ONOFRI, R. & CANDIAN, C. (1979): Indagine sui limiti di massima invasione dei blocchi franati durante il sisma del Friuli del 1976. - 41 S., Trieste (Cluet Publisher).
- SELBY, M. J. (1993): Hillslope Materials and Processes. - 468 S., Oxford (Oxford University Press).
- TOBLER, D., RINER, R. & PFEIFER, R. (2013a): Modeling Potential Shallow Landslides over Large Areas with SliDisp⁺. - In: MARGOTTINI et al. (eds.): Landslide Science and Practice, **3**: 37-45, Springer, Berlin Heidelberg.
- TOBLER, D., RINER, R. & PFEIFER, R. (2013b): Runout Modelling of Shallow Landslides over Large Areas with SliDepot. - In: MARGOTTINI et al. (eds.): Landslide Science and Practice, **3**: 239-245, Springer, Berlin Heidelberg.
- WIECZOREK, F. G., MORRISSEY, M. M., IOVINE, G. & GODT, J. (1999): Rockfall Potential in the Yosemite Valley, California. - <http://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0578/>, (Abruf am 25. März 2015).
- WSL - EIDGENÖSSISCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALD, SCHNEE UND LANDSCHAFT (2019): Steinschlagforschung: Experimente liefern Grundlagen für Modelle. - <https://www.slf.ch/de/projekte/steinschlag-experimente.html> (Abruf am 30. Dezember 2019).
- WYLLIE, D. C. & MAH, C. W. (2004): Rock Slope Engineering: Civil and Mining. - 430 S., London (Spon Press).
- ZINGGELER, A. & PFEIFER, R. (2009): Steinschlagmodellierung GEOTEST & Zinggeler: Modellbeschreibung. – 21 S., Zollikofen.



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

