



RECIPE

REINFORCING CIVIL PROTECTION
CAPABILITIES INTO MULTI-HAZARD
RISK ASSESSMENT UNDER
CLIMATE CHANGE

Prototyp für eine verbesserte
Entscheidungsfindung im Rahmen
des Risikomanagements von
Rutschungen und Steinschlag

DELIVERABLE 4.3

21 07 2021



Funded by
European Union
Humanitarian Aid
and Civil Protection

Project name: Reinforcing civil protection capabilities into multi-hazard risk assessment under climate change (RECIPE)

Financed by: DG ECHO 2019 Call for projects on prevention and preparedness in civil protection and marine pollution

Website: <http://recipe.ctfc.cat/> **Twitter:** @NATHaz_recipe

Partnership: Forest Science and Technology Centre of Catalonia - CTFC (Coord.), Pau Costa Foundation - PCF, Civil Protection General Directorate of Catalonia - DGPC-CAT, Forest Research Institute Baden-Württemberg - FVA, CIMA Research Foundation - CIMA, Austrian Research Centre for Forest Natural Hazards and Landscape - BFW, Institute of Cartography and Geology of Catalonia - ICGC, Higher Institute of Agronomy- ISA

Duration: 2020-2021

Contact: recipe@ctfc.cat

Document reference suggested: Andreu P., Hagen K., Plörer M. 2021. Report on Prototyp für eine verbesserte Entscheidungsfindung im Rahmen des Risikomanagements von Rutschungen und Steinschlag. Deliverable 4.3. Reinforcing civil protection capabilities into multi-hazard risk assessment under climate change. 874402 - RECIPE. 42 pp



INHALTSVERZEICHNIS

1 DAS PROJEKT RECIPE	4
2 PROJEKTUMFELD UND AUFGABENSTELLUNGEN	5
2.1 DAS BUNDESFORSCHUNGSZENTRUM FÜR WALD - BFW	5
2.2. ART DER BERÜCKSICHTIGTEN PROZESSE - RUTSCHUNG UND STEINSCHLAG	5
2.3 AKTEURE UND AUFGABENSTELLUNGEN	6
3 PLANUNGSGRUNDLAGEN FÜR DAS RISIKOMANAGEMENT (RUTSCHUNGEN UND STEINSCHLAG)	8
3.1 PLANUNGSUNTERLAGEN AUF REGIONALER EBENE – BEISPIELE	8
3.2 PLANUNGSUNTERLAGEN AUF LOKALER EBENE (GEMEINDE) – BEISPIELE	10
3.3 EINBEZIEHUNG VON INFRASTRUKTUREINRICHTUNGEN ALS RISIKOELEMENT	12
3.4 PLANUNGSUNTERLAGEN AUF REGIONALER UND ÜBERREGIONALER EBENE (LAND, BUND) - BEISPIELE	14
3.5 MODELLIERUNG AUF LOKALER UND REGIONALER EBENE	16
3.5.1 BESTIMMUNG DER INITIALBEREICHE	16
3.5.2 FESTLEGUNG DER PROZESSBEREICHE	17
4 DYNAMISCHE RISIKOBEWERTUNG - AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS	20
4.1 ANSTIEG DER PERMAFROSTGRENZE	20
4.1.1 PERMAFROST - BEDEUTUNG UND WIRKUNG	20
4.1.2 VERFÜGBARE DATENGRUNDLAGEN	20
4.2 METHODIK DES EINSATZES DER PERMAFROSTKARTE ZUR RISIKOABSCHÄTZUNG – BEISPIEL	24
4.2.1 AUSGANGSSITUATION	24
4.2.2 ERHÖHUNG VON EXPOSITION UND VULNERABILITÄT	25
4.2.3 KLIMAWANDELSZENARIO – ERHÖHTE GEFAHRENLAGEN	26
4.2.4 KLIMAWANDELSZENARIO – AUSWIRKUNGEN	27
4.2.5 QUANTIFIZIERUNG DER AUSWIRKUNGEN DER PERMAFROSTDEGRADATION – METHODIK/PRAXISBEISPIEL	28
4.3 KLIMABEDINGTE VERÄNDERUNGEN DER SCHUTZWIRKUNG DES WALDES	31
4.3.1 VERFÜGBARE INFORMATIONEN ZUM THEMA WALD	31
4.3.2 AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DEN WALD (RUTSCHUNGEN UND STEINSCHLAG)	31
4.3.3 SCHUTZWIRKUNG DES WALDES	33
4.3.4 QUANTIFIZIERUNG DER WALDWIRKUNG – METHODIK	34
4.3.5 QUANTIFIZIERUNG DER WALDWIRKUNG – BEISPIEL	36
5 ZUSAMMENFASSUNG	38
LITERATUR	39

1 Das Projekt RECIPE

Das Projekt "RECIPE - Reinforcing civil protection capabilities into multi-hazard risk assessment under climate change" ist ein EU-Projekt. Der Auftraggeber ist ECHO, das Directorate-General for European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations. Die Projektlaufzeit reicht von Februar 2020 bis November 2021. Neben dem BFW sind folgende Institutionen Partner des Projekts:

- CONSORCI CENTRE DE CIENCIA I TECNOLOGIA FORESTAL DE CATALUNYA, Spanien
- FUNDACIO D'ECOLOGIA DEL FOC I GESTIO D'INCENDIS PAU COSTA ALCUBIERRE, Spanien
- DEPARTAMENT D'INTERIOR - GENERALITAT DE CATALUNYA, Spanien
- FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WUERTTEMBERG, Deutschland
- CENTRO INTERNAZIONALE IN MONITORAGGIO AMBIENTALE - FONDAZIONE CIMA, Italien
- INSTITUT CARTOGRAFIC I GEOLOGIC DE CATALUNYA, Spanien
- INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA, Portugal

In dem Projekt werden die Naturgefahren Waldbrand, Hochwasser, Rutschungen, Lawinen, Steinschlag und Sturm behandelt, wobei das BFW für die Prozesse Steinschlag und Rutschungen verantwortlich zeichnet. Unter dem Aspekt "multi hazard-risks" werden die Wirkungen einzelner Prozesse aufeinander dargestellt. Durch ein solches Zusammenwirken verschiedener Naturgefahren kann sich das Gefahrenpotenzial mitunter wesentlich erhöhen: So kann sich z.B. die Steinschlag-, Rutschungs- oder Lawinengefahr durch die aufgrund des Klimawandels reduzierte Schutzwirkung des Waldes (z.B. infolge von Käferkalamitäten oder Waldbränden) verschärfen.

RECIPE geht dabei von folgender Problemstellung aus: Die multifaktorielle Thematik des Naturgefahrenmanagements wird durch den Klimawandel noch komplexer. Alle Entscheidungsprozesse im Zusammenhang mit naturräumlichen Maßnahmen, aber auch alle Vorbeugungsstrategien im Bereich des Zivilschutzes, müssen daher mit erheblichen Unsicherheiten zurechtkommen.

Die Einbeziehung von Verantwortlichen für Zivilschutzmaßnahmen schon bei der Risikobewertung dieser Naturgefahrenprozesse soll zur besseren Vorbereitung auf Schadensereignisse und deren Bewältigung beitragen.

Als Projektziel von RECIPE wurde die Entwicklung von Empfehlungen, Leitlinien und Tools für die Integration von aus dem Naturgefahren-Risikomanagement abgeleiteten Beurteilungen der Naturgefahren als Entscheidungshilfen für den angewandten Zivilschutz definiert.

Ausgangspunkte dafür sind einerseits die Identifikation potenzieller Auswirkungen des Klimawandels auf das Risikomanagement bei Steinschlag und Rutschungen, andererseits die Analyse vorhandener Entscheidungsgrundlagen, die im Risikomanagement von Zivilschutzeinrichtungen verwendet werden (können). Durch die aktive Beteiligung und Einbindung des Zivilschutzes (als Endnutzer) und externen Experten werden die Anforderungen von Zivilschutzeinrichtungen an den vorbeugenden Katastrophenschutz abgeleitet.

2 Projektumfeld und Aufgabenstellungen

2.1 Das Bundesforschungszentrum für Wald - BFW

Das Bundesforschungszentrum für Wald hat seine Zentrale in Wien. Daneben gibt es einen weiteren Standort in Innsbruck, zwei forstliche Ausbildungsstätten in Ossiach und Traunkirchen, einen Versuchsgarten bei Tulln, sowie einen Lehr- und Versuchsforst in Kärnten. Insgesamt hat das BFW derzeit rund 320 MitarbeiterInnen. Die Organe des BFW sind der Leiter und der Wirtschaftsrat, in dem das Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, das Finanzministerium und die Dienstnehmer vertreten sind.

Die Forschungsebene des BFW ist organisatorisch in sechs Fachinstitute untergliedert. Das Projekt Recipe ist dabei im Zuständigkeitsbereich des Fachinstituts "Naturgefahren" angesiedelt. Dieses Institut entwickelt praxisorientierte Methoden, um menschlichen Lebensraum zu sichern. Im Mittelpunkt stehen Untersuchungen zur Entstehung und Wirkung alpiner Naturgefahren wie Lawinen, Wildbäche, Muren und Rutschungen. Damit werden wichtige Grundlagen für einen nachhaltigen Schutz des alpinen Lebensraumes bereitgestellt, insbesondere damit der Wald auch in Zeiten der Klimaänderung und des gesellschaftlichen Wandels seine vielfältigen Leistungen für Mensch und Natur erbringen kann.

Für die Bearbeitung von RECIPE sind folgende Personen zuständig: DI Dr. Peter Andrecs, DI Karl Hagen, Matthias Plörer, BSc. Weiterführende Informationen zum BFW und den genannten Personen finden sich unter www.bfw.gv.at.

2.2. Art der berücksichtigten Prozesse - Rutschung und Steinschlag

Rutschung: Generell sind Rutschungen Bewegungen von Locker- und/oder Festgestein auf Gleitflächen. Sie variieren hinsichtlich Auslöseursache, Volumen und Bewegungsgeschwindigkeit in einem weiten Spektrum. Im Rahmen des Projekts RECIPE liegt der Fokus des BFW auf hydrologisch getriebenen, spontanen, mehr oder weniger flachgründigen Rutschungen in der Lockermaterialschicht. Sie werden durch die Erhöhung der Scherspannung (z.B. Erosion am Hangfuß, Auflast, Erdbeben und sonstige Änderungen der Hanggeometrie), die Abnahme des Scherwiderstandes (z.B. Wasserinfiltration, Erhöhung des Porenwasserdrucks, Verwitterung, Entfernung der Waldvegetation) oder beides zusammen ausgelöst. Die Dauer solcher Rutschungsvorgänge ist in der Regel kurz und liegt zumeist im Sekunden- bis Minutenbereich. Menschen, Gebäude und Infrastruktur werden auf drei Arten gefährdet: Erstens durch Erosion im Anrissbereich, zweitens durch den Anpralldruck während der (schnellen) Bewegung der Rutschungsmasse sowie durch Verschüttung, sowohl in der Transport- als auch in der Ablagerungszone.

Steinschlag: Das BFW konzentriert sich in diesem Projekt auf Steinschläge mit Volumina $<100 \text{ m}^3$. Solche Steinschläge treten häufig "überraschend" als zeitlich nicht vorhersehbare Einzelereignisse auf. Als Auslösemechanismen spielen in erster Linie Verwitterungsprozesse, Frost-Tauwechsel, Wurzeldruck, thermische Kontraktion und untergeordnet auch Erdbeben (in Österreich am häufigsten in Form sog. Mikrobeben) eine Rolle.

Da in Österreich diese beiden Naturgefahren auf Basis ähnlicher Grundlagen (Gefahrenzonenpläne, Katastrophenschutzpläne) bewertet werden und diese Grundlagen überwiegend von den gleichen Akteuren erstellt bzw. genutzt werden, erfolgen die Ausführungen zu diesen beiden Prozessen trotz unterschiedlicher Prozessabläufe gemeinsam. Im Bedarfsfall wird auf Unterschiede explizit hingewiesen.

Bei allen Vorgängen und Maßnahmen im Bereich von Rutschungs- und Steinschlagprozessen ist eine Anpassung an regionale Besonderheiten notwendig. Denn sowohl die Gefährdungssituation als auch deren Beeinflussung durch mögliche Auswirkungen des Klimawandels sind regional unterschiedlich da die Faktoren Exposition und Vulnerabilität in einem breiten Rahmen variieren. So beschränkt sich z.B. die durch Permafrostdegradation erhöhte Steinschlaggefahr auf das Hochgebirge, während die Erhöhung von Prozessfrequenz und -intensität infolge von Waldverlust auch durchaus den Dauersiedlungsraum betrifft.

2.3 Akteure und Aufgabenstellungen

Das Risikomanagement für die Naturgefahrenprozesse Steinschlag und Rutschung ist europaweit gesehen überwiegend Querschnittsmaterie, dadurch sind die Zuständigkeiten teilweise zersplittert und nicht immer eindeutig geregelt. Grundsätzlich kommen den Akteuren unterschiedliche Aufgaben in der Erhebung und Bereitstellung von Informationen und Planungsgrundlagen, deren Umsetzung, aber auch der Steuerung von Präventionsmaßnahmen sowie der Ereignisbewältigung und Schadensbehebung zu.

In Österreich nimmt die lokale Ebene (Gemeinden, Freiwillige Feuerwehren) eine zentrale Rolle im Risikomanagement ein (s. Abb. 1). Die Gemeinden und ihre obersten Vertreter (BürgermeisterInnen), sind die erste Instanz für die örtliche Flächenwidmung und Bauplanung und verantwortlich für die Umsetzung präventiver Maßnahmen wie z.B. der Freihaltung potenziell gefährdeter Flächen. Sie werden dabei primär von den Landesregierungen (regionale Ebene) unterstützt und kontrolliert.

Das unmittelbare Ereignismanagement erfolgt ebenfalls primär auf lokaler Ebene durch BürgermeisterInnen bzw. von diesen betrauten Personen/Institutionen, in ländlichen Gemeinden insbesondere den freiwilligen Feuerwehren. Dieses System kann als Vorbild gelten, da im Ereignisfall eine große Anzahl ortskundiger Helfer zu Verfügung steht und darüber hinaus die Vernetzung mit Ortsansässigen (im Sinne des Risikobewusstseins) gefördert wird. Den BürgermeisterInnen obliegt es, bei Bedarf Hilfe von Bezirks-, Landes- und/oder Bundesdienststellen anzufordern.

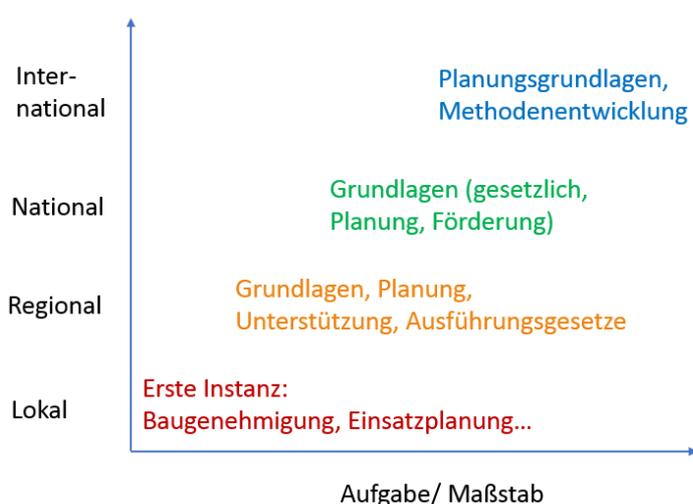


Abb. 1: Akteure und Aufgabenverteilung in Österreich für die Naturgefahrenprozesse Steinschlag und Rutschungen

Während für Wildbäche und Lawinen zu berücksichtigende Gefahrenzonenpläne im Siedlungsbereich flächendeckend verfügbar sind, gibt es weder für Rutschungen noch Steinschlag vergleichbare Planungsgrundlagen. Teilweise bestehende Unterlagen (Gefahrenhinweiskarten, Gutachten etc.) sind häufig nicht öffentlich bekannt bzw. ohne fachliche Ausbildung kaum verwendbar. Dies führt dazu, dass seitens der Gemeinden in einigen Fällen ohne geeignete Planungsgrundlagen über die Freihaltung oder Nutzung potenzieller Gefahrenbereiche entschieden wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nun versucht, einen Prototyp für eine verbesserte Entscheidungsfindung („Decision Support System“ = DSS) im Rahmen des Risikomanagements von Rutschungen und Steinschlag für den angewandten Zivilschutz zu entwickeln. Nachdem dieser in Österreich zunächst auf der lokalen Ebene verankert ist, sind Gemeinden und ihre Organe die vorrangigen Adressaten.

Ausgehend von vorhandenen Planungsunterlagen und den auf lokaler Ebene für den Zivilschutz primär verantwortlichen Akteuren, werden Entscheidungshilfen für die Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Risikomanagement im Bereich von Rutschungen und Steinschlag durch den Einsatz u.a. neuentwickelter Werkzeuge und Modelle vorgestellt. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über die dabei gewählte Vorgehensweise, die in Folge detailliert beschrieben wird.

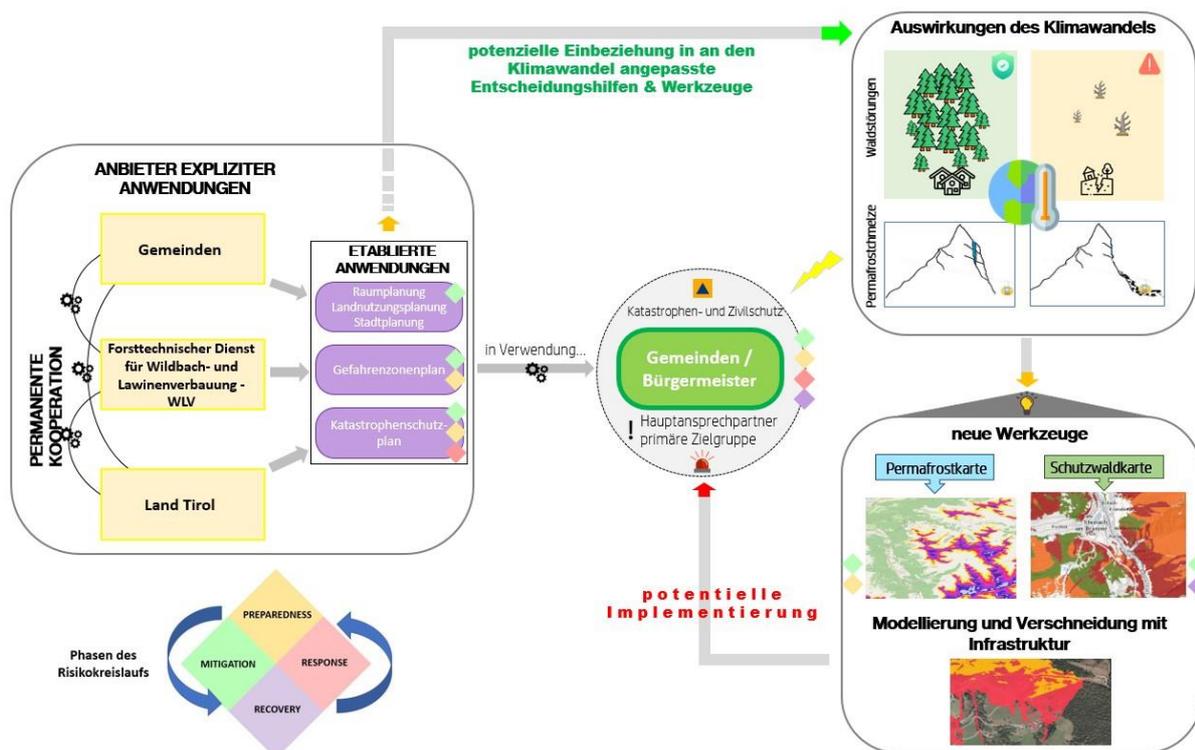


Abb. 2: Vorgehensweise zur Entwicklung des Prototyps einer Entscheidungshilfe für die Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Risikomanagement im Bereich von Rutschungen und Steinschlag

3 Planungsgrundlagen für das Risikomanagement (Rutschungen und Steinschlag)

Hilfsmittel zur Entscheidungshilfe (sog. Decision Support Systems/Tools (DSS)) im Bereich des Naturgefahrenmanagements und Zivilschutzes sind für bestimmte Adressaten und mit Bedacht auf verfügbare oder generierbare Informationen zu entwickeln. Beides variiert in Europa aufgrund regional unterschiedlicher Naturgefahrenexposition und der Verschiedenartigkeit der verwaltungstechnischen Organisationsstrukturen zum Teil beträchtlich.

Sowohl Rutschungen als auch Steinschlag sind zumeist von lokaler Bedeutung und haben in Österreich im Kontext der Naturgefahren z.B. im Vergleich zu Lawinen- oder Hochwasserereignissen und den durch sie verursachten Schäden nur mäßige Bedeutung. Dadurch bestehen betreffend geeigneter Datengrundlagen, praxistauglicher Ansätze und Planungswerkzeugen ebenso Defizite, wie bei klaren Regelungen der Zuständigkeiten in der Beurteilung dieser Naturgefahrenprozesse sowie der Schadensprävention.

3.1 Planungsunterlagen auf regionaler Ebene – Beispiele

Regional (z.B. in Niederösterreich) sind Gefahrenhinweiskarten für gravitative Massenbewegungen verfügbar. Die ausgewiesenen Bereiche sind hier mit Handlungsanleitungen verbunden, die auch für Laien verständlich sind (s. Abb. 3). Die Identifizierung potenzieller „Hotspots“ über die Verschneidung mit räumlichen Informationen zu bestehender Infrastruktur ist möglich. Auf dieser Basis können im Anlassfall gezielt Experten hinzugezogen bzw. lokale Gutachten beauftragt werden.

	Bezeichnung der Klassen in der Kartenlegende		
Arbeitsschritt	Nur bei augenscheinlichen Hinweisen Vorbegutachtung	Vorbegutachtung gegebenenfalls genaue Erkundung	Genaue Erkundung unverzichtbar
Ersteinschätzung	Lokalaugenschein Raumplaner	Lokalaugenschein Geologischer Dienst	Expertise ZT/TB* für Geologie
gegebenenfalls 2. Stufe	Lokalaugenschein Geologischer Dienst	Expertise ZT/TB* für Geologie	
gegebenenfalls 3. Stufe	Expertise ZT/TB* für Geologie		

Abb. 3: Gefahrenhinweiskarte Niederösterreich für gravitative Massenbewegungen (1:25.000, vgl. Abb. 4) und Handlungsempfehlung für die Raumordnung, Amt der. NÖ Landesregierung (Stand 2021, *ZT/TB Ziviltechniker/Technisches Büro)

In weiterer Folge können die Gemeinde oder Interessenten gezielt Schutzprojekte zur präventiven Risikominimierung initiieren, die gegebenenfalls von Land und Bund gefördert werden. Die Landesdienststellen unterstützen die Gemeinden auch bei der Ausarbeitung konkreter Katastrophenschutzpläne, welche Maßnahmen für alle Mitwirkenden Institutionen beinhalten, sowie bei der Finanzierung von Ausrüstung und der Ausbildung der Hilfskräfte.

In Österreich gibt es derzeit noch keine standardisierten, risikobasierten Planungsgrundlagen im Naturgefahrenbereich, wohl aber räumliche Darstellungen von Gefahrenbereichen und Landnutzungsarten. Unbedingte Voraussetzung für den Erfolg eines DSS ist, dass die potenziellen Nutzer überhaupt Kenntnis davon haben. Dafür sind die bestehenden Landes-Geo-Informationen-Systeme geeignete Plattformen. Hier können verfügbare Informationen und Planungsgrundlagen eingepflegt und potenziellen Nutzern zugänglich gemacht werden.

3.2 Planungsunterlagen auf lokaler Ebene (Gemeinde) – Beispiele

Unterlagen für Rutschungen und Steinschlag sind derzeit nur regional oder lokal verfügbar und variieren erheblich in Maßstab, Informationsgehalt und Interpretierbarkeit (vgl. Abb. 4 und 5). Die für eine Risikoanalyse wichtigen Angaben zu Frequenz und Magnitude von Schadensereignissen sind jedoch nicht enthalten. Vergleichbar ist die Situation bei Unterlagen der Risikoelemente: Es gibt zwar grundlegende Informationen zum Siedlungsraum und Infrastruktureinrichtungen, welche aber nur grobe Rückschlüsse auf Exposition und Vulnerabilität zulassen (s. Abb. 5).

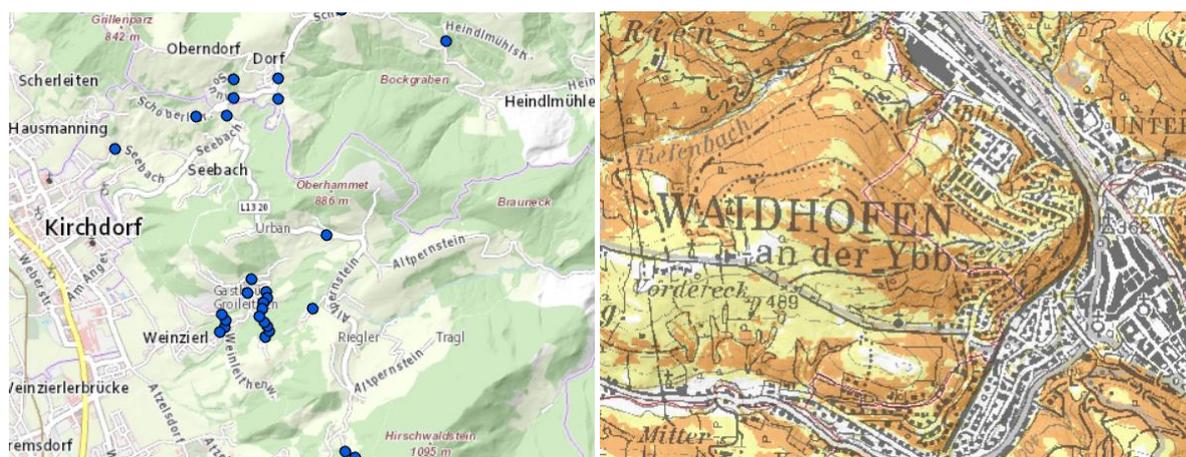


Abb. 4: Links: DORIS Ereigniskataster (Kirchdorf a.d. Krems); rechts: NÖ Atlas, Geogene Naturgefahren: Gefahrenhinweiskarte Rutschung und Steinschlag Maßstab 1:25.000 (Waidhofen a.d. Ybbs) flächendeckend für das Bundesland NÖ verfügbar

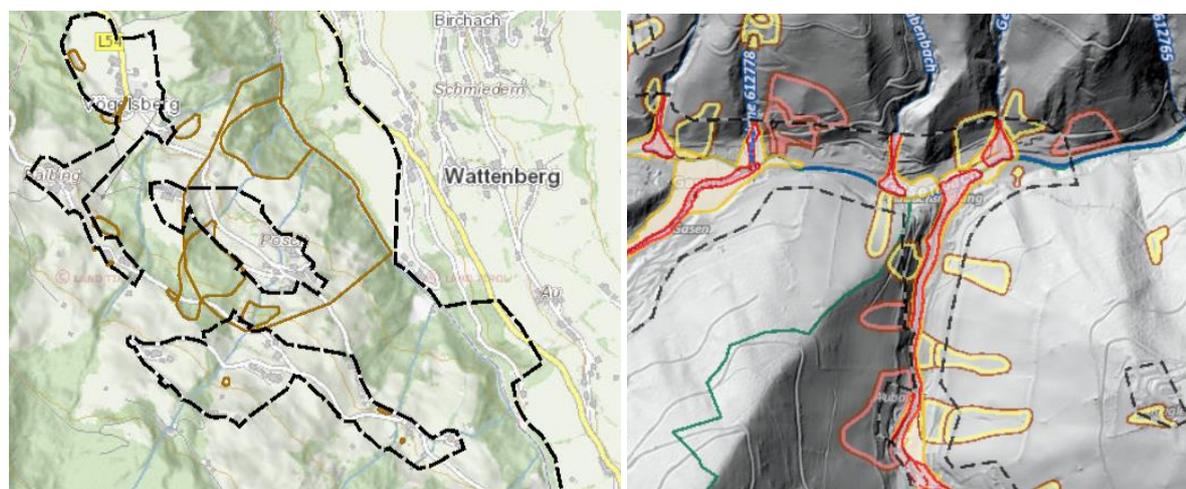


Abb. 5: Gefahrenzonenplan der Wildbach- und Lawinverbauung (WLV) Rutschungen; links: Bereich Großhangbewegung Vögelsberg (Tirol) braune Zonen; rechts: Großraum Gasen/Haslau (Steiermark) rotbraune und gelbbraune Zonen, raumrelevanter Bereich (schwarz). Beide nicht flächendeckend für das Bundesland verfügbar

In Österreich haben die Gefahrenzonenpläne (GZP) nicht den Charakter normativer Verordnungen, sondern dienen entsprechend der Raumordnungsgesetze der örtlichen Raumplanung als Informationsgrundlage. Sie umfassen weitgehend nur den aktuellen Siedlungsraum, fehlen also oft bei der Entwicklung neuer

Siedlungsstandorte. Grundsätzlich bilden sie nur die Gefahrenexposition und –intensität in vereinfachter Form ab, der Risikoaspekt fließt nicht ein (Schindelegger & Kanonier 2019). „Braune Zonen“ geben meist lediglich unspezifische Hinweise auf Rutschungen und Steinschlaggefahr und erheben außerdem keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Ein Fehlen „Brauner Zonen“ bedeutet nicht, dass es keine Gefährdung durch Rutschungen oder Steinschlag geben kann. In „Braunen Zonen“ sind vor allfälligen Änderungen der Raumnutzung aber jedenfalls Experten beizuziehen.

Ein anerkannter, verbreitet angewandter GZP-Standard (z.B. in der Schweiz oder Südtirol) sind Gefahrenkarten. Bei diesen erfolgt die Zonierung der Gefahrenprozesse über deren Intensität (Magnitude) und Eintrittswahrscheinlichkeit (Frequenz) (BAFU 2005, s. Abb. 6). Darüber hinaus erfolgt eine Differenzierung des Prozesses in Anrissbereich (Rutschung) und Transportbereich (Hangmure), die aufgrund unterschiedlicher Prozessparameter und Gefährdungen sinnvoll ist (s. Abb. 6). Entsprechend aufgebaute Gefahrenkarten eignen sich daher als Grundlage für eine risikobasierte Raumplanung.

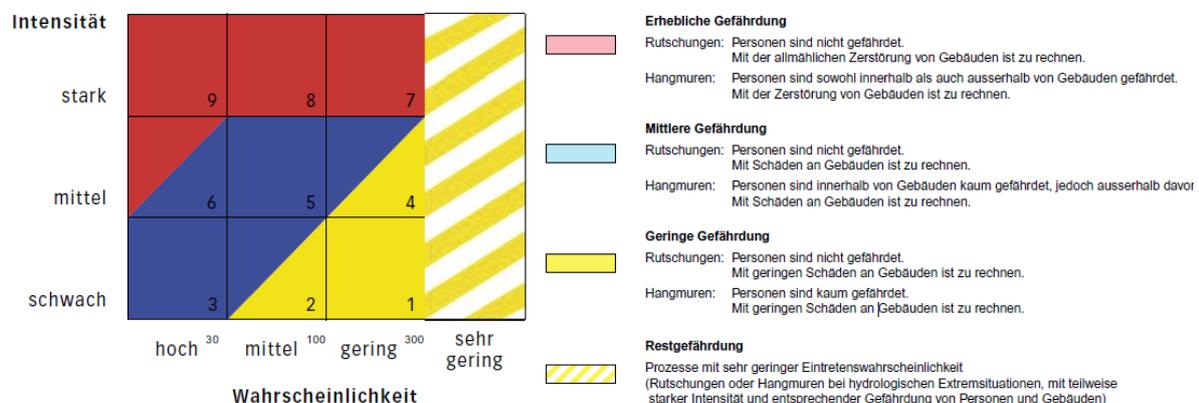


Abb. 6: Gefahrenstufen: Ergebnis von Intensität und Wahrscheinlichkeit (BAFU 2005) und Definition der Bereiche für Rutschungen (Bsp. Gefahrenkarte Rutschungen Chur)

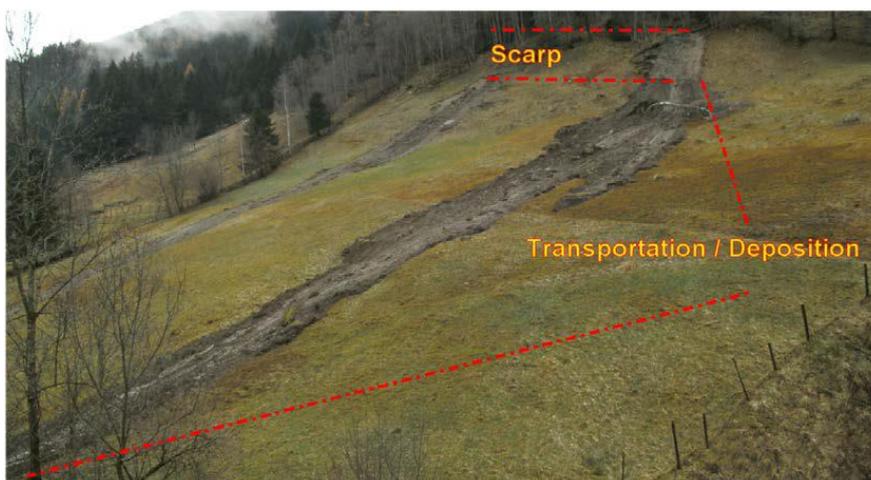


Abb. 7: Spontane Rutschung im Lockersediment, Anriss-(Scarp) und Hangmure Transport-/Depositionszone, Mölltal 2012 (BFW/Pichler, Hagen)

3.3 Einbeziehung von Infrastruktureinrichtungen als Risikoelement

In den Landes-Geoinformationssystemen (z.B. TIRIS – Tiroler Rauminformationssystem, s. Abb. 8-10) stehen viele georeferenzierte Informationen zur Verfügung.



Abb. 8: Links: TIRIS Kartendarstellung Infrastruktureinrichtungen (Bildungsstätten, Industriegefahren, Straßen, Bahn etc.); rechts: Aktuelles örtliches Raumordnungskonzept

Am Beispiel des Bundeslandes Tirol sind u.a. folgende Unterlagen zu Infrastruktureinrichtungen (Risikoelemente) zum freien Download, parzellenscharf erhältlich:

- „Verkehrsinfrastruktur (GIP) Tirol“: Gesamtes Straßen- und Wegenetz von Tirol inkl. Bahnlinien der ÖBB und Privatbahnen) oder alternativ: „Hochrangiges Straßennetz“ (Bundes- und Landesstraßen, ASFINAG – Netz) (s. Abb. 9)
- „Gebäude Tirol“: Gebäudebestand (Dachflächen als Polygon) manuell erfasst aus Fernerkundungsdaten (s. Abb. 9)
- „Radrouten in Tirol“: Freigegebene Mountainbike-Routen, überregionale Radwander-Routen und freigegebene Singletrail-Strecken in Tirol (s. Abb. 10)
- „Katalog Aufstiegshilfen in Tirol“: Auflistung aller Aufstiegshilfen mit Verortung des Landes Tirol aus dem Tiroler Sport-Informationssystem (s. Abb. 10)

Diese vier Datenquellen decken die gegenüber Naturgefahren potenziell exponierten Infrastrukturen im raumrelevanten Bereich (insbesondere Siedlungen) sowie auch außerhalb (alpine, touristische Infrastrukturen) weitgehend ab und könnten somit für eine erste grobe Risikoanalyse auf lokalem Maßstab herangezogen werden.



Abb. 9: Links: Datensatz „Gebäude Tirol“ Gebäudebestand, manuell erfasst aus Fernerkundungsdaten (Luftbild/Laserscan); rechts: Datensatz „Verkehrsinfrastruktur (GIP) Tirol“ inklusive Gemeindestraßen, Forstwegnetz und hochrangigem Straßennetz (ÖBB, ASFINAG)

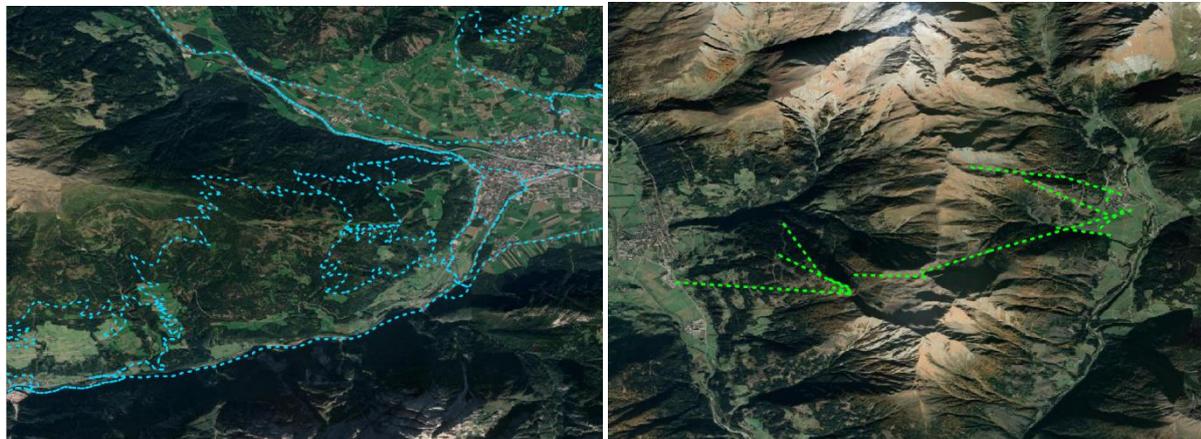


Abb. 10: Links: In Blau der Datensatz „Radrouten in Tirol“; rechts: In Grün der Datensatz „Katalog Aufstiegshilfen in Tirol“

Die einzelnen Datensätze (z.B. in Form GIS-fähiger „shapefiles“) zu den aufgelisteten Themen werden auf www.data.gv.at vom Amt der Tiroler Landesregierung zum freien Download zur Verfügung gestellt. Auf dieser Plattform sind auch vergleichbare Datensätze anderer Bundesländer als freie Downloads verfügbar.

Für die lokale Ebene bietet sich somit eine Verschneidung der Gefahrenhinweiskarten (sofern vorhanden) mit Informationen zu Siedlungs- und Infrastruktureinrichtungen aus dem Landes-GIS bzw. Grundbüchern, mit ihren Angaben über die Nutzungsart, an (s. Abb. 8). Damit lassen sich bestehende potenzielle „Gefahren-Hot-Spots“ identifizieren (statischer Ansatz) und mittels zielgenauer, lokaler Einzelgutachten um, für die Risikoanalyse notwendige, Informationen (s. auch Abb. 8, Datensätze www.data.gv.at) ergänzen.

3.4 Planungsunterlagen auf regionaler und überregionaler Ebene (Land, Bund) - Beispiele

Grundsätzlich ist die Bereitstellung von Planungsgrundlagen am besten bei überregionalen (nationalen) Institutionen angesiedelt. In Österreich ist die Aufgabe häufig im Rahmen der mittelbaren Bundesverwaltung zwischen nationalen und regionalen Einrichtungen geregelt. Die Erstellung von Risikokarten wird wohl hauptsächlich der regionalen Ebene (Bundesländer) zufallen, da Informationen und Datenformate bundesweit tlw. sehr heterogen sind. Folgende Unterlagen stehen für die Entwicklung und Implementierung risikobasierter Ansätze zu Verfügung:

- Geologische Karten der Republik Österreich (1:200.000, in Teilbereichen 1:50.000) der Geologischen Bundesanstalt (GBA)
- Ereignisdatenbanken wie z.B. GEORIOS (GBA), Wildbach und Lawinenkataster-Ereignisdokumentation (WLK), Waldbranddatenbank (Universität für Bodenkultur), Daten der Straßenmeistereien, Landesfeuerwehrverbände u.a.m.
- Digitale Bodenkarte eBod: Enthält Standortseigenschaften (Gründigkeit, Wasserverhältnisse, u.a.m.) der landwirtschaftlich nutzbaren und kartierten Böden (BFW, s. Abb. 11)
- Digitale, regionale Karten zu Waldstandorten z.B. Waldtypisierung Steiermark: (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, in Erstellung (s. Abb. 11)
- Österreichweite Karte modellierter Waldflächen mit Objektschutzfunktion in Bezug auf Steinschlag & Rutschungen (BFW, Projekte "Dakumo" & "Gravimod II")
- Digitale Geländemodelle für sämtliche Operationen (z.B. Naturgefahrenprozessmodellierung) in gängigen geographischen Informationssystemen (s. Abb. 12)

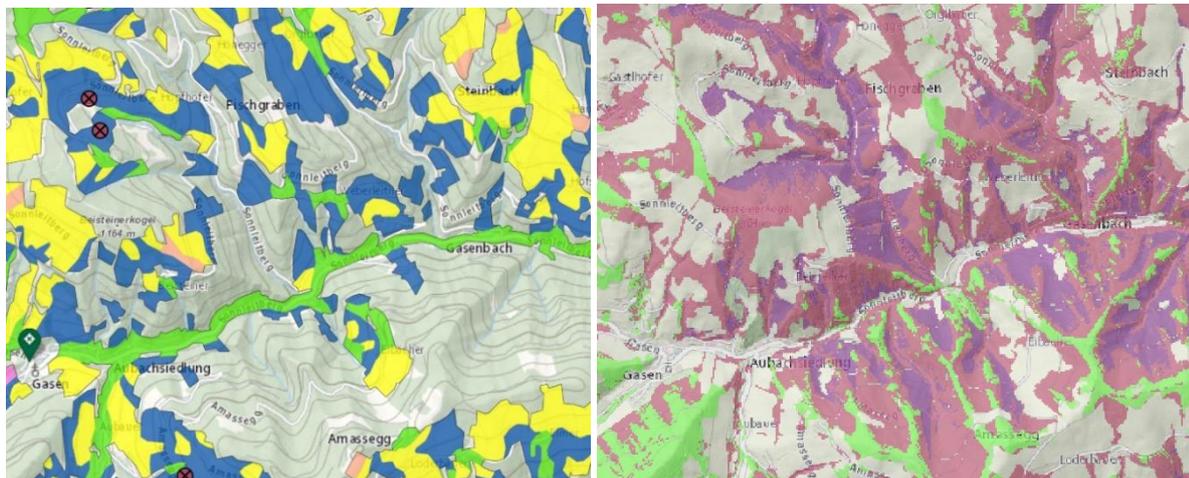


Abb. 11: Bodeninformationen, links: eBod (BFW); rechts: Karten zu Waldstandorten - Bsp. Bodengründigkeit (Amt der Steiermärkischen Landesregierung)

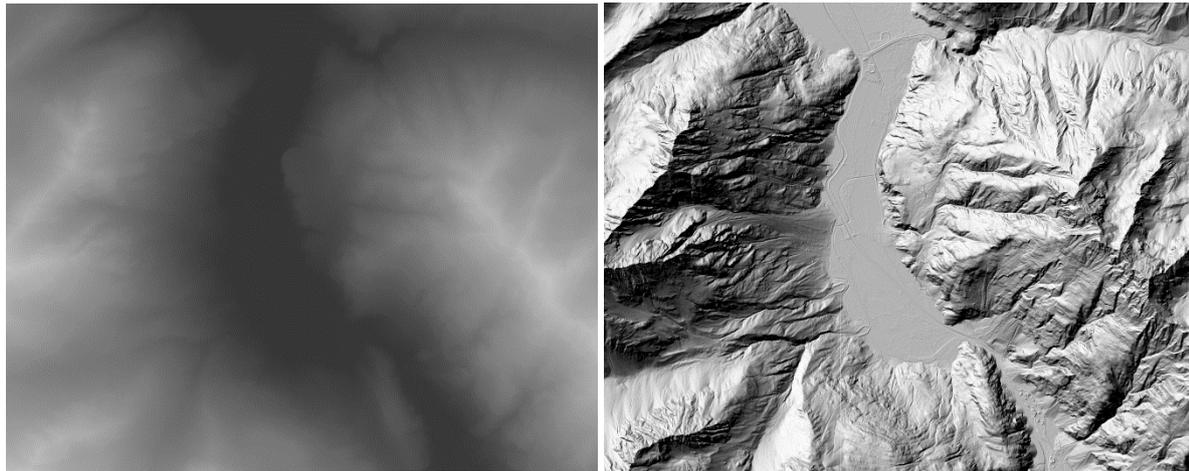


Abb. 12: Links: Digitales Geländemodell; rechts: „Schummerung“/„Hillshade“ (Land Tirol/www.data.gv.at)

Wetterwarnungen

Diese sind für Österreich für verschiedene Klimaelemente verfügbar, insbesondere auch für Starkniederschläge. Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) sowie auch private Unternehmen (z.B. Ubimet mit der Unwetterzentrale) bieten dabei eine räumliche Auflösung bis auf Gemeindeebene (<http://warnungen.zamg.at/html/de/heute/alle/at/steiermark/weiz/gasen/>) und eine Vorschau von mehreren Tagen an. Andere Anbieter (z.B. Meteoalarm, Meteoblue u.a.) bieten eine europaweite Auflösung bis zur regionalen Ebene (Bundesländer – z.B. http://meteoalarm.eu/de_GE/0/0/AT-Osterreich.html) an.

Die genannten Unterlagen dienen alle weitgehend der statischen Risikoplanung. Um die dynamische Komponente (Einbindung möglicher bzw. wahrscheinlicher Veränderungen in der Zukunft) mit einzubeziehen, sind Prognosen zu relevanten, veränderlichen Einflussparametern, namentlich den zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels in die Entwicklung von DSS mit einzubeziehen (dynamische Planung).

3.5 Modellierung auf lokaler und regionaler Ebene

Für lokale oder regionale Planungen stehen etablierte Ansätze zu Verfügung. Üblicherweise werden der Initialbereich (Ereignisauslösung) sowie der Prozessbereich (Reichweite) getrennt voneinander modelliert. Für beide Bereiche gibt es eine ganze Reihe von Modellansätzen, die je nach Fragestellung und Datenverfügbarkeit in unterschiedlicher Weise geeignet sind.

Grundsätzlich lassen sich die verfügbaren Modelle in heuristische, statistische und deterministische Modelle einteilen (s. Abb. 13, Hagen et al. 2015, ÖREK 2015, Schwarz et al. 2014, Thiebes 2012, Tilch et al. 2011, Van Asch et al. 2008).

	Heuristisch	Statistisch	Deterministisch
Grundlagen	Erfahrung, Expertenwissen	Dokumentierte Ereignisse	Physikalische Parameter und Gesetze
Ereignisdokumentation	Einzelne, Plausibilisierung	Flächendeckend, Datengrundlage	Einzelne, Modellkalibrierung
Anspruch an Geländeinformationen	Gering	Gering - mäßig	Hoch
Maßstab	Regional / Überregional	Regional / (Überregional)	Lokal (Hangskala) / Regional

Abb. 13: Grobe Einteilung und Anwendung von Modellen zur Ermittlung von Initialbereichen und Prozess-Reichweiten

3.5.1 Bestimmung der Initialbereiche

Heuristische Ansätze basieren auf Erfahrungen und Expertenwissen, auf deren Grundlage Initialbereiche z.B. über Hangneigungen und geologische Informationen grob abgeschätzt werden können (Thiebes 2012). Mit vergleichsweise geringem Aufwand kann somit ein erster, qualitativer Eindruck der Gefahrensituation gewonnen werden. Entsprechende Ansätze werden häufig für die regionale/überregionale Abschätzung von Steinschlag-Initialbereichen eingesetzt.

Statistische Ansätze sind derzeit für regionale, qualitative Abschätzungen der Rutschungsanfälligkeit (Suszeptibilität) am verbreitetsten. Dabei kommen verschiedene Arten von Regressionen, Wahrscheinlichkeitsquotienten oder Fuzzylogik-Methoden zum Einsatz. Eine umfassende Ereignisdokumentation ist Voraussetzung.

Deterministische Ansätze beruhen auf physikalischen Gesetzen und mathematischen Formeln. Sie haben die (unterschiedlich stark) vereinfachte Abbildung der Wirklichkeit in Modellen zum Ziel. Durch die Anwendung solcher Ansätze wird das Prozessverständnis verbessert und es können Schwellenwerte für Ereignisniederschläge festgelegt werden. Ihre Anwendung stellt je nach Modell allerdings hohe bis sehr hohe Ansprüche an die Datengrundlagen. Gut dokumentierte Ereignisse im vergleichbaren Umfeld sind für die Modellkalibrierung und –evaluierung essentiell.

3.5.2 Festlegung der Prozessbereiche

Heuristische Ansätze dienen zur Abschätzung maximaler Reichweiten und basieren auf einfachen geometrischen Funktionen (z.B. Schattenwinkel nach Evans und Hungr (1993), geometrisches Gefälle nach Heim (1932)). Ihr Einsatz ist mit vergleichsweise geringem Aufwand verbunden. Bei dem sogenannten α -Winkelansatz wird z.B. unterstellt, dass eine bestimmte Reichweite nicht überschritten wird. Der Alpha-Winkel ist dabei der Winkel, den die direkte Verbindungslinie zwischen dem obersten Anbruchsbereich des Prozesses und der am weitesten entfernten Ablagerung des Prozesses mit der Horizontalen einschließt (s. Abb. 14). Diese Modelle sind teilweise auch als kostenlose Anwendung downloadbar.

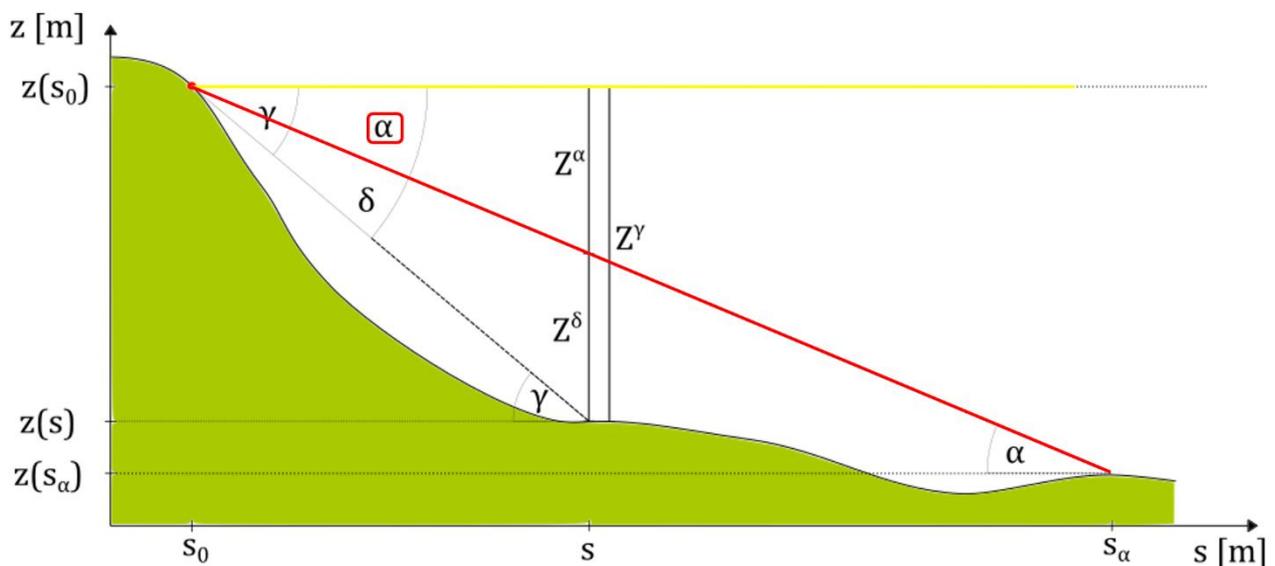


Abb. 14: Alpha-Winkel (rote Linie) zur Bestimmung der maximalen Auslauflänge eines gravitativen Naturgefahrenprozesses (D'Amboise, 2021)

Zur Simulation von Rutschungen und/oder Steinschlag auf regionalem Maßstab sind u.a. folgende Modelle erhältlich:

- Gravitational Process Path (GPP) Model (GIS-basiertes Modell, Wichmann 2017)
- Flow-R (Horton et al. 2013)
- Flow-Py (Neuhauser et al. 2019)

„Flow-Py“ ist ein regionales, open source Modell für die Berechnung von Auslauflängen gravitativer Massenbewegungsprozesse. Der Modell-Code kann unter <https://bitbucket.org/snowavalanche/flow-py/src/master/> heruntergeladen und erweitert werden. Für die Anwendung dieses Modells müssen folgende Daten zur Verfügung stehen: Der sog. „Release Layer“, ein Rasterdatensatz, der die Abbruchbereiche definiert, sowie das „DEM“, ein rasterbasiertes, digitales Geländemodell, das neben dem obligatorischen Parameter-Setting in die Berechnung der lateralen Ausbreitung und Auslauflängen der modellierten Prozesse einfließt.

Die wichtigsten Parameter zur Beschreibung des Prozesses sind „alpha“ und „exp“. „Alpha“ beschreibt den Alphawinkel (s. auch Abb. 14), während „exp“ die laterale Ausbreitung eines Naturgefahrenprozesses

definiert. Beide Parameter sollten von Experten auf Basis dokumentierter Ereignisse in der Region bestimmt werden.

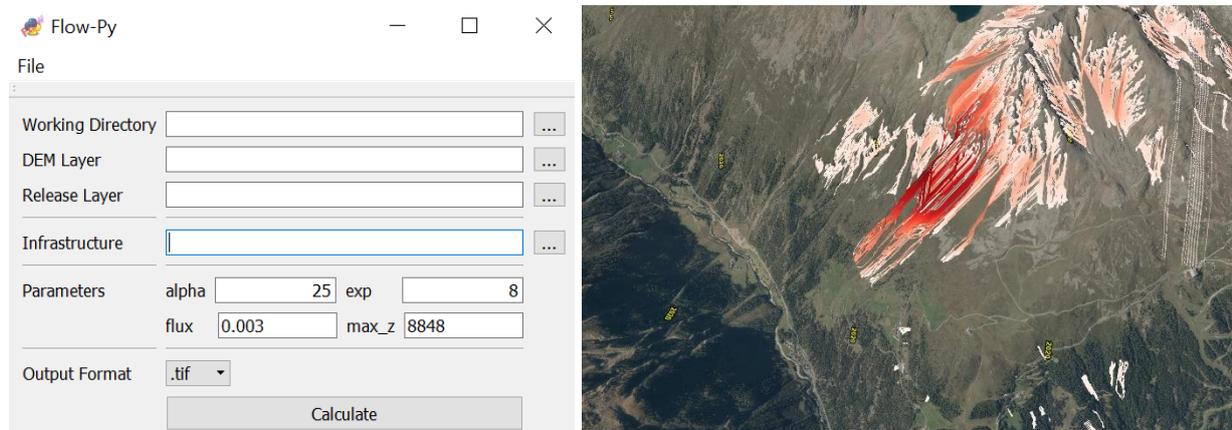


Abb. 15 Eingabemaske des Modells „Flow-Py“ und Visualisierung der Outputs in einem GIS (BFW, 2021)

Die Modelloutputs werden in Form von Rasterdatensätzen (TIFF/ASC) ausgegeben. Informationen zur Interpretation der Modell-Outputs sind unter <https://bitbucket.org/snowavalanche/flow-py/src/master/readme.md> abrufbar.

Statistische Ansätze zur Bestimmung der Reichweite von Steinschlägen und Rutschungen sind wenig verbreitet.

Deterministische Modelle werden zumeist dann herangezogen, wenn parzellenscharfe Detailuntersuchungen notwendig sind. Bei Steinschlagmodellen können zahlreiche Faktoren wie die Masse des Sturzblockes, die Rauigkeit und Dämpfungseigenschaften des Untergrundes, mit dem der Block interagiert, sowie etwaige Hindernisse in der Sturzbahn, in die Modellierung mit einbezogen werden. Je nach Modell sind auch Prozessgeschwindigkeiten, Volumina und auf Bauwerke einwirkende Kräfte ermittelbar. Die Anwendung dieser Modelle stellt hohe Ansprüche an vorhandene Datengrundlagen und deren Anwender.

Folgende gebräuchliche, deterministische Modelle zur Simulation von Steinschlag und/oder Rutschungen auf lokalem Maßstab sind z.B. gegen Lizenzgebühren erhältlich:

- RAMMS – Rapid Mass Movement Simulation (Christen et al. 2012) – s. Abb. 16
- Rockyfor3D (Dorren 2012)

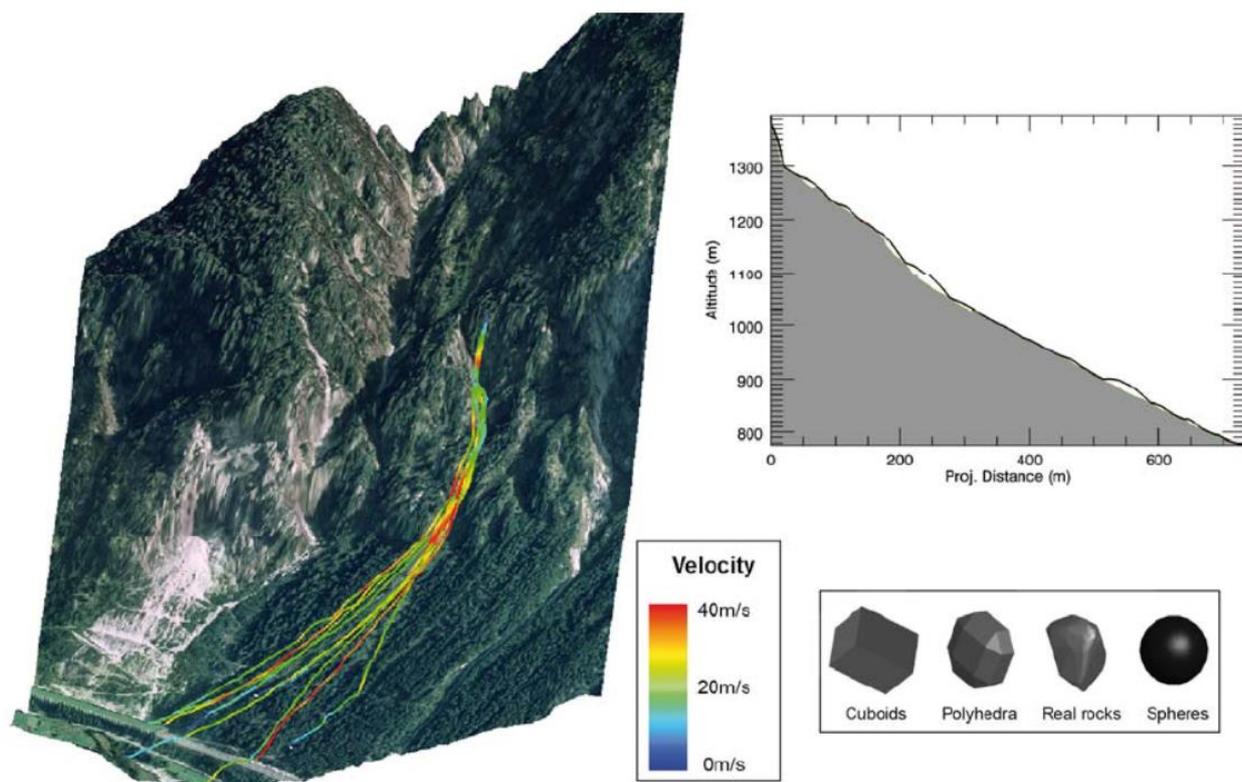


Abb. 16: Beispiel einer Visualisierung des physikalischen 3D Steinschlagmodells „RAMMS Rockfall“ (Christen et al. 2012)

4 Dynamische Risikobewertung - Auswirkungen des Klimawandels

Einer der Hauptauslösefaktoren von Hangrutschungen sind Starkniederschlagsereignisse. Die Vorhersage ihrer Entwicklung (Frequenz, Magnitude) im Zuge des Klimawandels ist jedoch im Gegensatz zum Temperaturanstieg unsicher. Es wurden daher sowohl für Rutschungen als auch Steinschlag folgende zwei Parameter herangezogen, die als Auswirkungen des Temperaturanstiegs direkt mit möglichen Folgen für diese beiden Naturgefahrenprozesse in Verbindung stehen:

- **Anstieg der Permafrostgrenze (=Permafrostdegradation)**, also jener Höhenlage, ab der der Boden das gesamte Jahr über gefroren ist.
- **Waldveränderungen** (durch veränderten Wasserhaushalt, Schädlinge, Waldbrand, Windwurf etc.) und damit verbundene Beeinträchtigungen der Schutzwirkung des Waldes.

Zu beiden Auswirkungen des Klimawandels besteht für den Alpenraum weitgehender Konsens.

4.1 Anstieg der Permafrostgrenze

4.1.1 Permafrost - Bedeutung und Wirkung

Der Anstieg der Permafrost-Grenze erfolgt parallel zum Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperatur um ca. 150 m/°C (Schrott et al., 2012b).

Als Permafrostboden wird Untergrund bezeichnet, welcher über einen Zeitraum von mehr als 2 Jahren in gefrorenem Zustand ist, d.h. dessen Temperatur bei 0° Celsius oder darunterliegt. Das Auftreten von alpinem Permafrost ist von der Höhenlage, Topographie und Exposition abhängig (Mair et al. 2011).

Die Permafrostdegradation beeinflusst die Stabilität von Felswänden sowie die Dynamik von Schuttkörpern und kann durch ihre Auswirkungen auf das geotechnische Verhalten des Untergrundes das Naturgefahrenpotenzial in Berggebieten maßgeblich erhöhen (Gruber & Haerberli, 2007 in Schoeneich et al. 2011). Betroffen sind insbesondere Infrastruktureinrichtungen in Skigebieten unter Umständen aber auch Verkehrsanlagen und Siedlungsräume in tieferen Lagen. Die durch den Klimawandel bedingten Auswirkungen der Permafrostdegradation sind im Zuge der dynamischen Risikobeurteilung und -analyse zu bewerten.

4.1.2 Verfügbare Datengrundlagen

Die in Kapitel 3.3 angeführten Datenquellen zur Infrastruktur (Straßennetz, Gebäude, Radwege, Liftanlagen) erlauben einen Überblick über Elemente, die in einem bestimmten Bereich (z.B. Gemeindegebiet) potenziell einer Naturgefahr ausgesetzt sein können. Durch die Verschneidung mit den potenziellen Gefahrenbereichen ergibt sich die Exposition dieser Infrastruktureinrichtungen. Die Risikoabschätzung ist unter der Limitation zu bewerten, dass sowohl die Vulnerabilität der gefährdeten Objekte (Gebäudeart und Bauausführung, Anzahl der Personen im Gefahrenbereich etc.) als auch Frequenz und Magnitude der Gefahrenprozesse nur näherungsweise bestimmt werden können.

Planungsgrundlagen für das Risikomanagement im lokalen bis regionalen Maßstab können aus dem internationalen Projekt „PermaNET“ (Permafrost Long-term Monitoring Network - Interreg Alpine Space 2007-2013) bezogen werden (Amt für Geologie und Baustoffprüfung der Südtiroler Landesregierung). Im Rahmen dieses Projekts wurde ein konsistenter Datensatz von Permafrostflächen in den Alpen sowie Karten, Handbücher, Datengrundlagen, Richtlinien, Anpassungsstrategien und Handlungsempfehlungen im Umgang mit Permafrost erarbeitet (Mair et al. 2011).

Die „APIM“ („Alpine Permafrost Index Map“) zeigt einen für den gesamten Alpenraum einheitlichen, farblich abgestuften, modellierten „Permafrostindex“, der qualitativ die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von Permafrost angibt. Die räumliche Auflösung beträgt ca. 30 m und ist daher auch für eine Anwendung auf lokaler Ebene geeignet. Die Karte steht als WMS (Web Map Service) online frei zur Verfügung (s. Abb. 17) und kann als Planungsgrundlage mit der URL <https://geoserver.geo.uzh.ch/cryogis/wms> in jedes übliche GIS-Programm eingebunden werden.

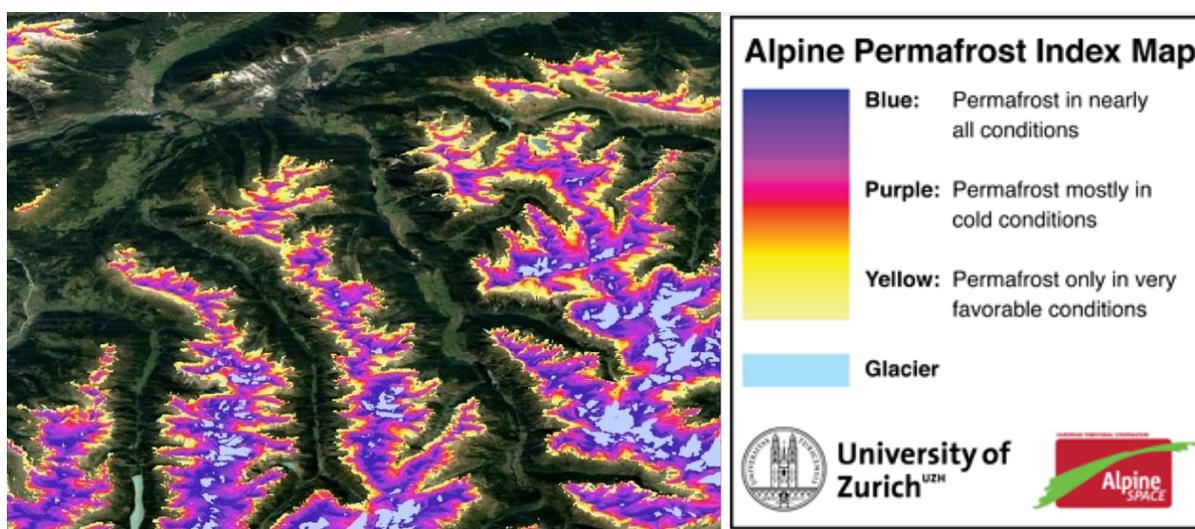


Abb. 17: „APIM“ Alpine Permafrost Index Map als online frei verfügbarer WMS-Layer

Zu beachten ist, dass kleinflächige Parameter wie z.B. Untergrundverhältnisse (anstehender Fels, Lockermaterial, organischer Boden) oder Schneebedingungen bei der Erstellung der Karte kaum berücksichtigt werden konnten. Daher liegt der Legende für eine gezieltere Ersteinschätzung ein Interpretationsschlüssel bei.

Den Planenden wird aufgrund der methodisch bedingten Unschärfen empfohlen, im Falle von indiziertem, möglichem Permafrostvorkommen (entsprechend „APIM“) die Verhältnisse vor Ort mittels direkter (z.B. Bohrung) oder indirekter Methoden (z.B. Geophysik) durch Experten im Detail zu erkunden.

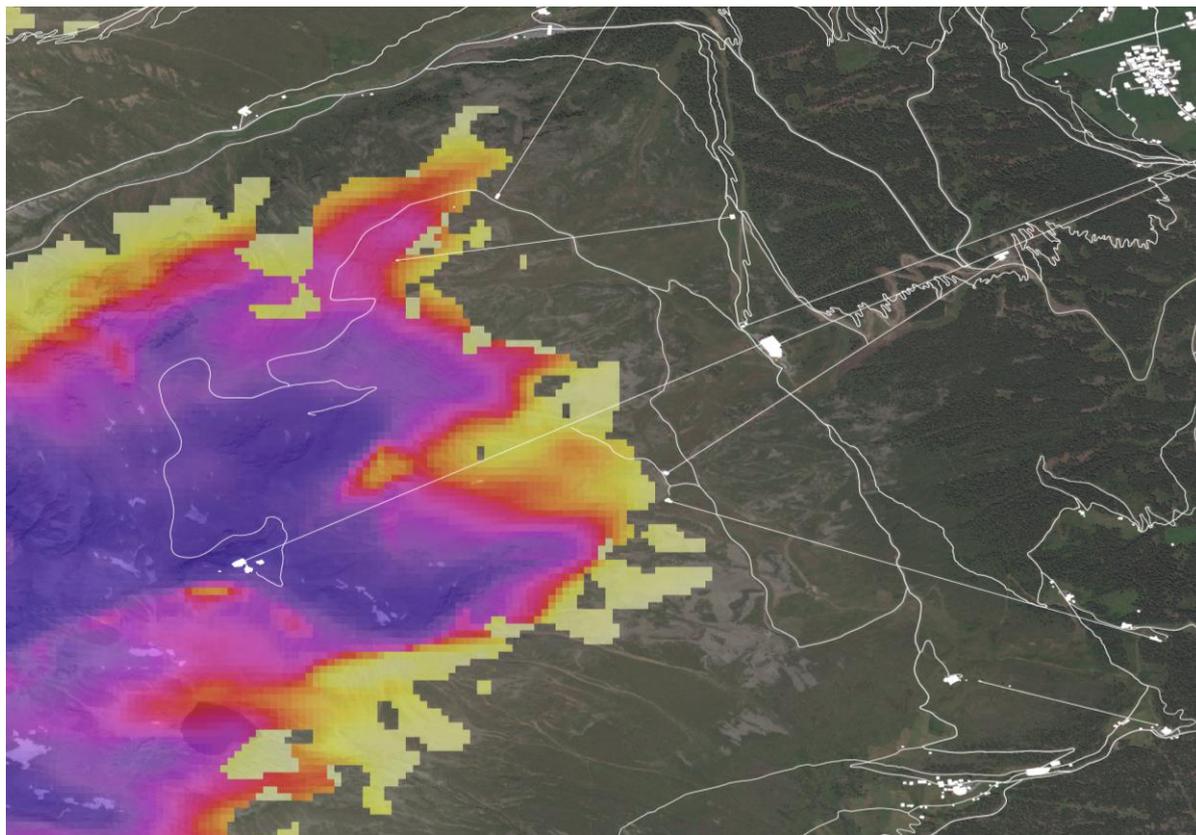


Abb. 18: „APIM“ Alpine Permafrost Index Map, dargestellt auf lokalem Maßstab. Weiße Kästchen und Linien: Potenziell betroffene, alpine Infrastrukturen (Berg- und Talstationen von Skiliften und Pistenanlagen)

Die Permafrostindex-Karte stellt eine Grundlage für die dynamische Risikoplanung in Hochlagen dar, mit deren Hilfe Auswirkungen sich ändernder klimatischer Bedingungen abgeschätzt werden können. Unterstellt man z.B. für einen Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperatur von 2°C einen durchschnittlichen Anstieg der Permafrostgrenze von 300 m Seehöhe, so lassen sich über die Verschneidung mit dem digitalen Geländemodell (DHM/DGM) Bereiche identifizieren, in denen künftig gravitative Massenbewegungen vermehrt zu erwarten sind. Dadurch können Auswirkungen des Klimawandels auf das künftige Risikopotenzial vorhandener und geplanter Infrastrukturen abgeschätzt werden.

Neben der Permafrostkarte, werden in PermaNet weitere spezifische „State-of-the-art-reports“ zur Verfügung gestellt:

- Methoden zur lokalen Permafrosterkundung für eine detaillierte Untersuchung der Situation:
www.permanet-alpinespace.eu/products/permafrosthazards
- Bericht über die thermischen und geomorphologischen Reaktionen von Permafrost auf aktuelle und zukünftige Klimaschwankungen:
www.permanet-alpinespace.eu/products/permafrostresponse
- State-of-the-Art Bericht in Bezug auf Rutschungen und Murgänge:
http://www.permanet-alpinespace.eu/archive/pdf/WP6_2_debris_flows.pdf

- State-of-the-Art Bericht in Bezug auf Steinschläge und Felsstürze:
http://www.permanet-alpinespace.eu/archive/pdf/WP6_2_rockfalls.pdf
- State-of-the-Art Bericht in Bezug auf lokale Untergrundbewegungen (Setzungen, etc.):
http://www.permanet-alpinespace.eu/archive/pdf/WP6_2_local_ground_movements.pdf

4.2 Methodik des Einsatzes der Permafrostkarte zur Risikoabschätzung – Beispiel

Nachstehend wird gezeigt, wie eine dynamische Risikoanalyse auf Basis verfügbarer Informationen (Standorte der Infrastrukturen) in Zusammenhang mit der Änderung des Gefahrenpotenzials aufgrund des Klimawandels für Akteure im Naturgefahrenmanagement abgeleitet werden kann. Dafür werden ein deutlicher Temperaturanstieg, steigender Siedlungsdruck und der Ausbau alpiner Infrastrukturen angenommen.

Die Grafiken (Abb. 19 - 22) skizzieren ein Szenario, bei dem sich das Risiko durch die Folgen des Klimawandels in Gebirgsregionen in Bezug auf die Wirkungskette Permafrost, Steinschlag und Rutschungen auf Mensch und Umwelt auswirken könnte. Gleichzeitig wird eine Erhöhung der Faktoren Exposition/Vulnerabilität unterstellt.

4.2.1 Ausgangssituation

„Statisches“ Klima, mit aktueller Permafrostgrenze bei ca. 2200-2400 m Seehöhe. Alpine Infrastrukturen sowie Siedlungsbereiche sind vorhanden. Mäßige Steinschlagaktivität bei geotechnisch unproblematischen Verhältnissen im Hochgebirge, da der Permafrost die Kluftsysteme (noch) weitgehend stabil hält. In den aktuell aktiven Gefahrenbereichen befinden sich keine relevanten Infrastruktureinrichtungen (s. Abb. 19)

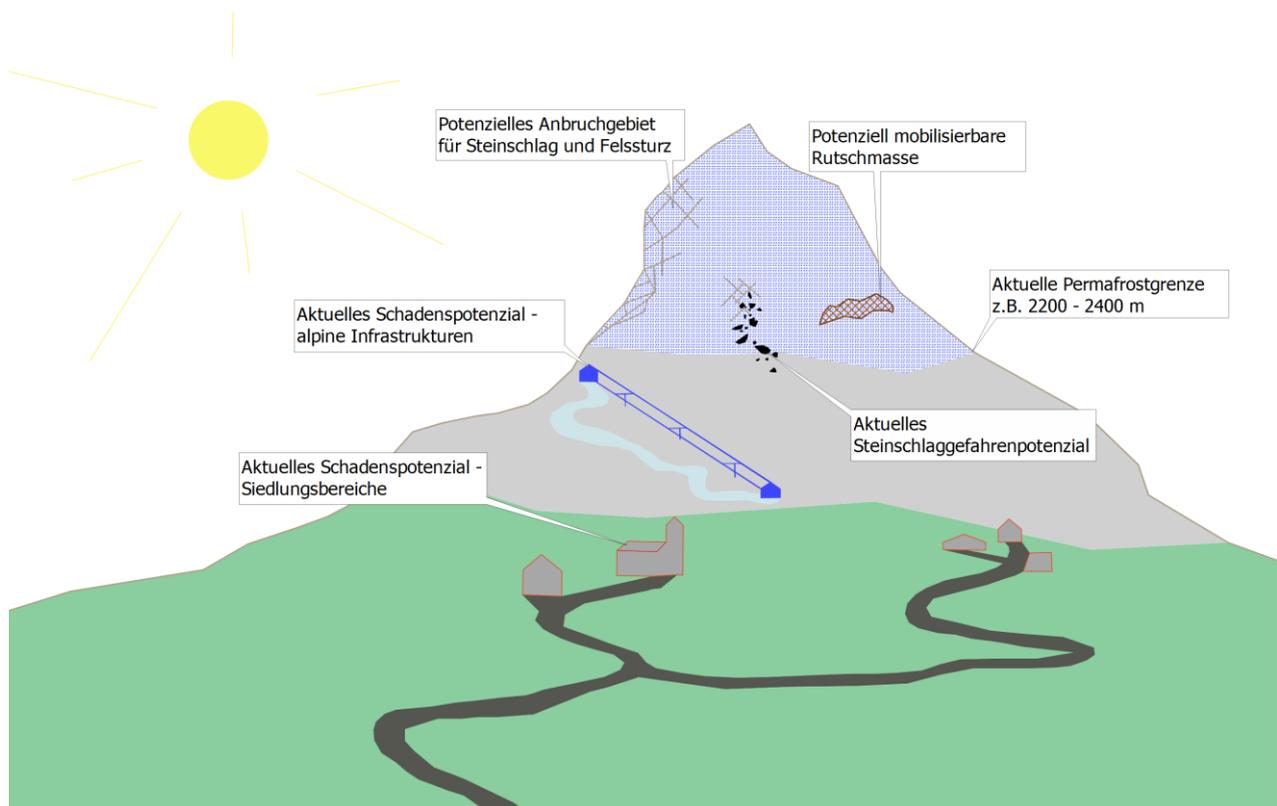


Abb. 19: „Statisches Klima“ mit stagnierender Permafrostgrenze (©Plörer, 2021)

4.2.2 Erhöhung von Exposition und Vulnerabilität

Durch Vordringen von Siedlungsbereichen in sensiblere Gebiete und der Erweiterung alpiner Infrastrukturen kommt es zu einer Erhöhung des Schadenspotenzials bzw. der allgemeinen Anfälligkeit (s. Abb. 20).

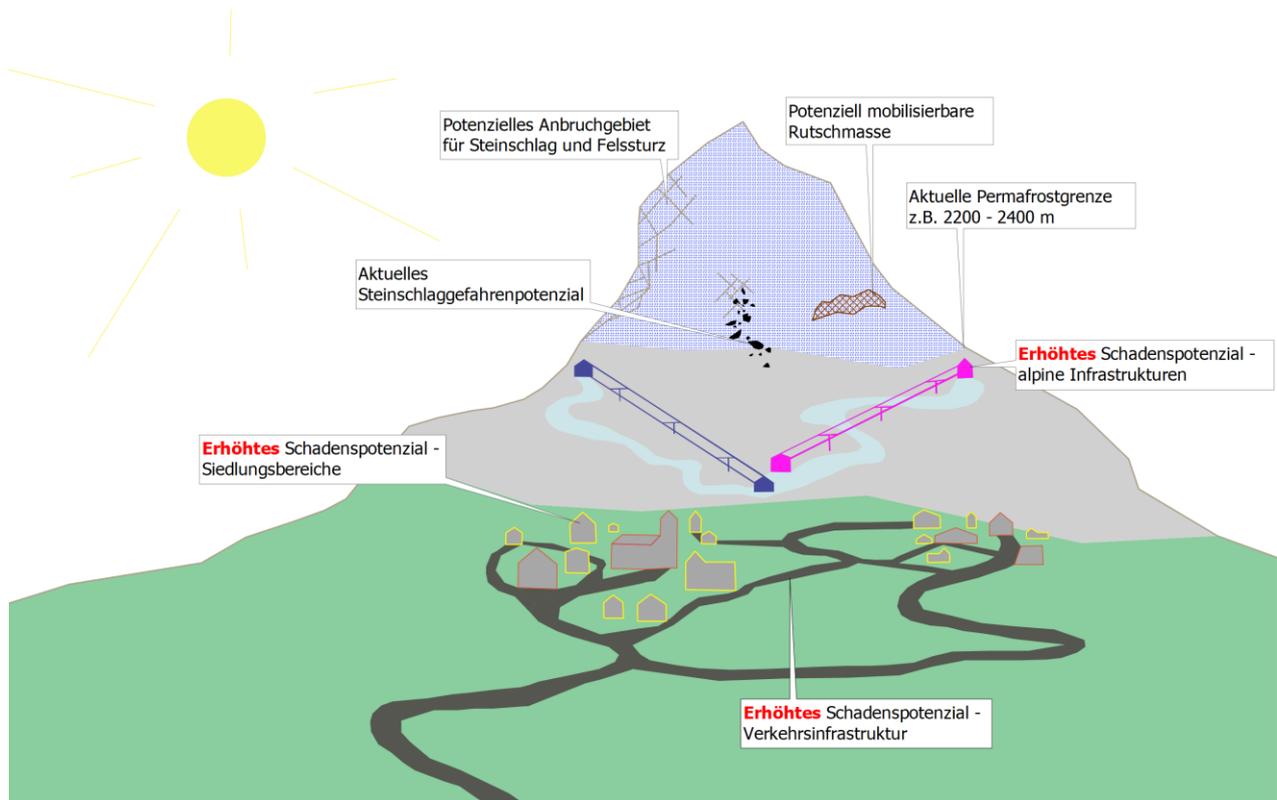


Abb. 20: „Statisches Klima“ mit aktueller Permafrostgrenze, jedoch zunehmender anthropogener Landnutzung (©Plörer, 2021)

4.2.3 Klimawandelszenario – erhöhte Gefahrenlage

Szenario RCP 8.5: Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis zum Jahr 2100 um 4 °C gegenüber 1986-2005. Unter Annahme einer linearen Beziehung zwischen Permafrost-Untergrenze und Lufttemperatur, steigt die Permafrost-Untergrenze um 600-800 Meter (Schrott et al., 2012b). Bisher stabile Wandabschnitte werden zunehmend instabil. Das Trennflächengefüge lockert sich auf, die interne Reibung wird herabgesetzt. Zuvor in Kluffüllungen stabilisierend wirkendes Eis dringt nun als Wasser in prädisponierte Klufsysteme ein und lockert diese durch Frost-Tau-Wechsel auf (s. Abb. 21).

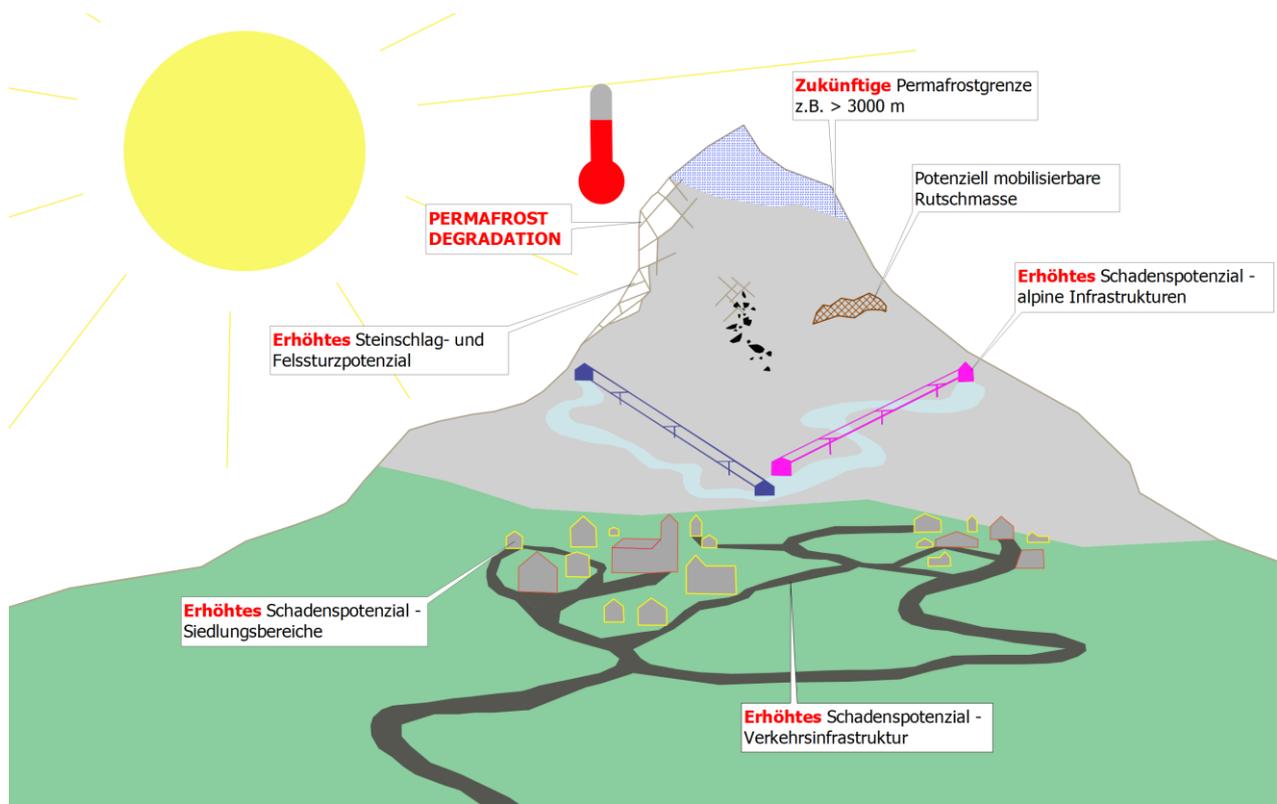


Abb. 21: Klimawandelszenario RCP 8.5: Permafrostdegradation – erhöhte Gefahrenlage (©Plörer, 2021)

4.2.5 Quantifizierung der Auswirkungen der Permafrostdegradation – Methodik/Praxisbeispiel

Anhand eines Beispiels in einem Tiroler Skigebiet wird nachstehend ausgeführt, wo die prioritären Infrastrukturen (Information öffentlich als Download verfügbar) situieren. Mit der gelb-rot-violetten Signatur wird die Lage der auftauenden Permafrostbereiche dargestellt. Als Hintergrundkarte dient das digitale Geländemodell (freier Download, www.data.gv.at). Zur Orientierung können beispielsweise auch die „OpenStreetMap“ oder die von Google zur Verfügung stehenden Layer „Google Satellite“ oder „Google Hybrid“ verwendet werden.

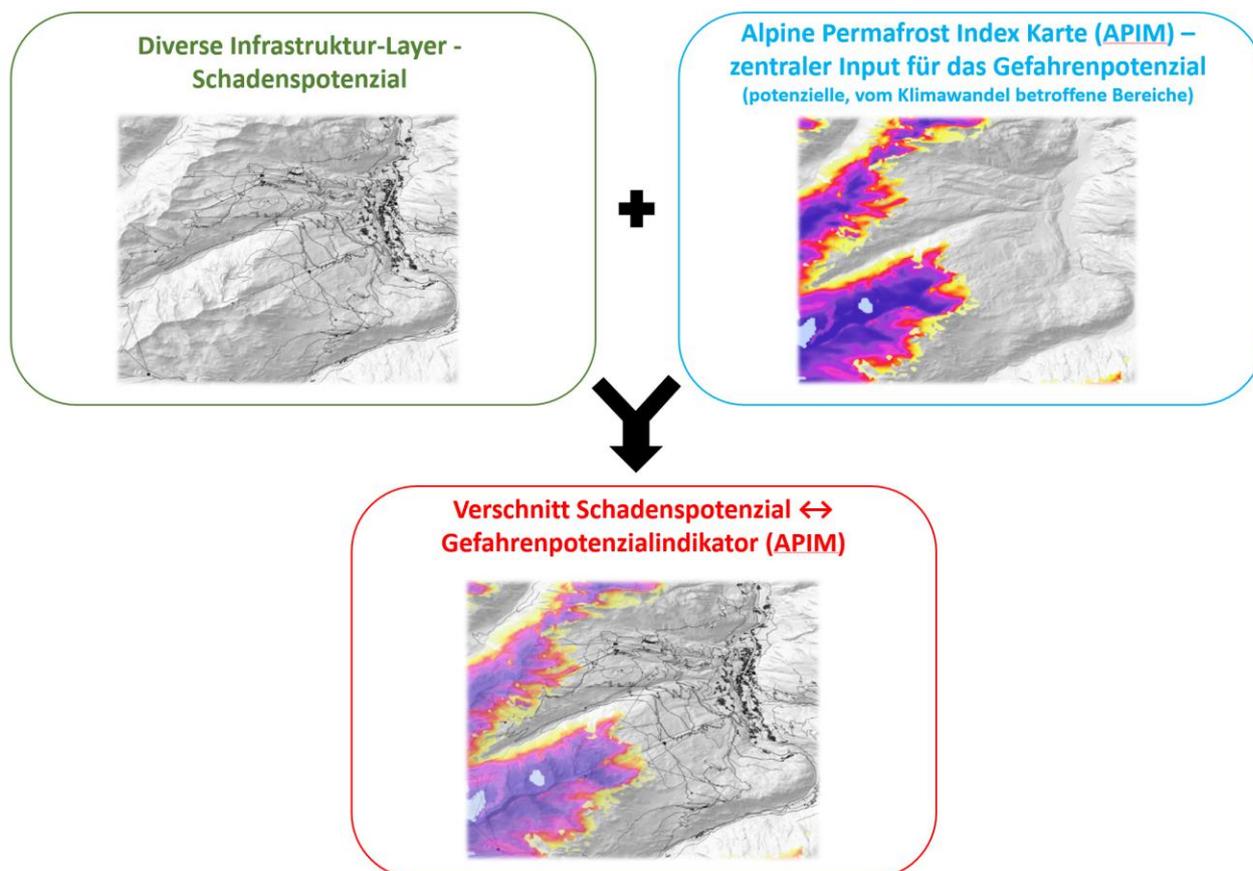


Abb. 23: Links oben: Infrastrukturlayer; rechts oben: Potenziell vom Klimawandel betroffene Permafrostbereiche; unten: Verschneidung der beiden Karten

Die Verschneidung der bestehenden Informationen ergibt die potenziell direkt durch die Permafrostdegradation gefährdeten Bereiche (Baugrunddestabilisierung). In dem Beispiel überlagern sich Infrastruktureinrichtungen und voraussichtlich auftauende Permafrostbereiche stellenweise. Diese Bereiche sind als Hinweisbereiche zu interpretieren, auf deren Basis die lokalen Verhältnisse bezüglich Baugrund und dem Auftreten gravitativer Prozesse vor Ort überprüft werden sollten.

Noch nicht enthalten ist der als Folgewirkung erweiterte Gefahrenbereich von Rutschungen und Steinschlag.

Verschnitt Schadenspotenzial ↔ Gefahrenpotenzialindikator (APIM)

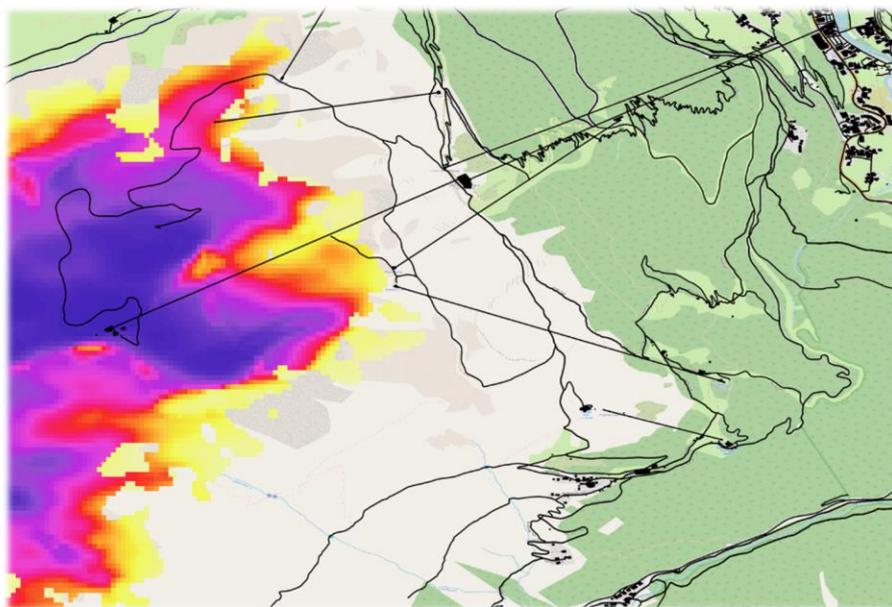


Abb. 24: Infrastrukturen (schwarz) und der potenzielle Permafrostbereich entsprechend der „Alpine Permafrost Index Map“. Im oberen linken Bildbereich ist zu erkennen, dass Infrastrukturen im potenziellen Permafrostbereich situieren – es kann somit ein Baugrundrisiko vorhanden sein (PermaNET Alpine Space bzw. www.data.gv.at)

Beispiel Permafrostdegradation – Steinschlag

Ausgangssituation: Felswände und Schuttkörper mit Permafrost im Untergrund befinden sich in einem stabilen Gleichgewicht. Vereinzelt traten in solchen Bereichen in der Vergangenheit bereits Steinschläge und Rutschungen auf. Aufgrund der allgemeinen fels- und bodenmechanischen Stabilität jedoch mit untergeordneter Frequenz und Magnitude. Durch die Permafrostdegradation ist mit einer Intensivierung bzw. vermehrten Auslösung solcher Ereignisse zu rechnen (s. auch 4.1.2 Literaturhinweise des „State-of-the-art-reports“ aus dem „PermaNET“-Projekt).

Für die Modellierung wird empfohlen, das Geländemodell, die Infrastrukturlayer und die Permafrostkarte in ein GIS zu importieren. Grundsätzlich gibt es keine Datensätze oder Inventare in welchen flächendeckend die potenziellen Ablösebereiche von Steinschlägen enthalten sind. Für folgendes Beispiel werden diese Bereiche definiert als alle Zellen, welche eine Neigung $> 50^\circ$ aufweisen (d.h. alle Flächen mit mehr als 50° Hangneigung werden im Geländemodell als potenzielle Steinschlaganbruchgebiete angenommen). Dieser Wert basiert auf Empfehlungen des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT, 2020). Die Initialgebiete werden in Bereiche ober- bzw. unterhalb der Permafrostgrenze unterteilt. In diesem Beispiel wird angenommen, dass die potenziellen Steinschlaganbruchgebiete ohne Einfluss des Klimawandels nur unterhalb der Permafrostgrenze aktiv werden (s. Abb. 25, blaue Bereiche). Bei dem Klima-Szenario RCP 8.5 steigt die Permafrostgrenze bis in den obersten Gipfelbereich, wodurch nun auch potenzielle Steinschlaganbruchgebiete oberhalb der aktuellen Permafrostgrenze aktiv werden (s. Abb. 25, rote Bereiche).

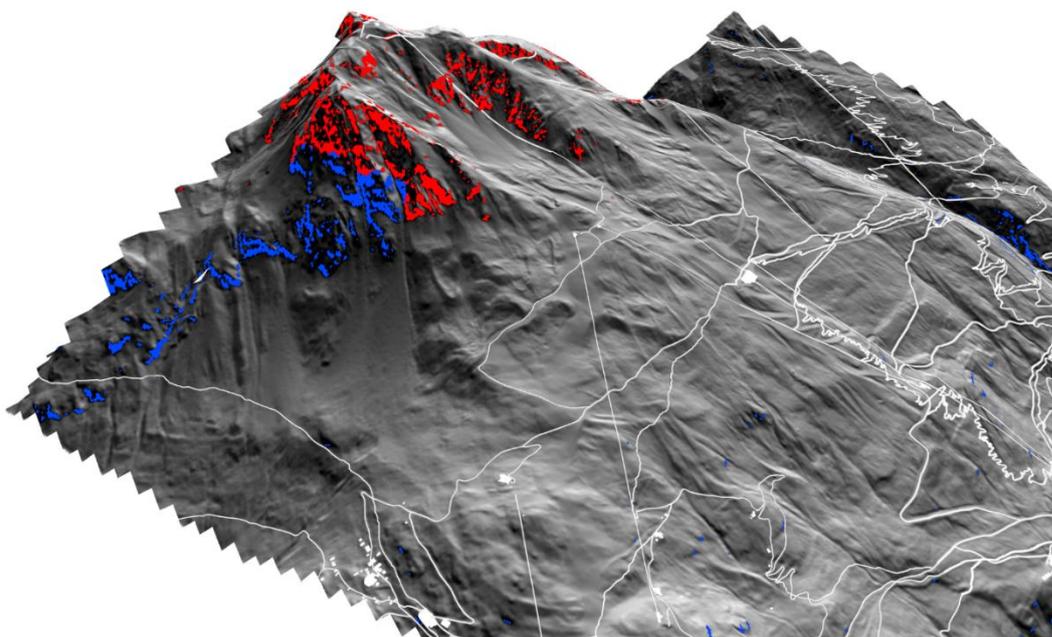


Abb. 25: Geländemodell eines Tiroler Skigebietes. Blaue Flächen: Derzeit bestehende, potenzielle Steinschlaganbruchgebiete (unterhalb der Permafrostgrenze); rote Flächen: Potenzielle Anbruchgebiete nach dem klimawandelbedingten Anstieg der Permafrostgrenze

Diese Informationen bilden den Input für Reichweitenmodelle. Im Beispiel wurde das am BFW entwickelte Modell "Flow-Py" eingesetzt um den Gefahrenbereich möglicher Sturzprozesse (Trajektorien) zu bestimmen. Abbildung 26 zeigt links die simulierten Sturztrajektorien der Anbruchgebiete unterhalb der (aktuellen) Permafrostgrenze. Die Verschneidung dieser Gefahrenkarte mit den Infrastrukturen erlaubt eine grobe Steinschlag-Risikoanalyse des Istzustandes. Auf der rechten Seite wurden die Anbruchgebiete im Bereich der Permafrostdegradation miteinbezogen. Diese Darstellung weist (künftige) Gefahren- und Risikobereiche unter Berücksichtigung des RCP 8.5 Klimawandelszenarios aus.

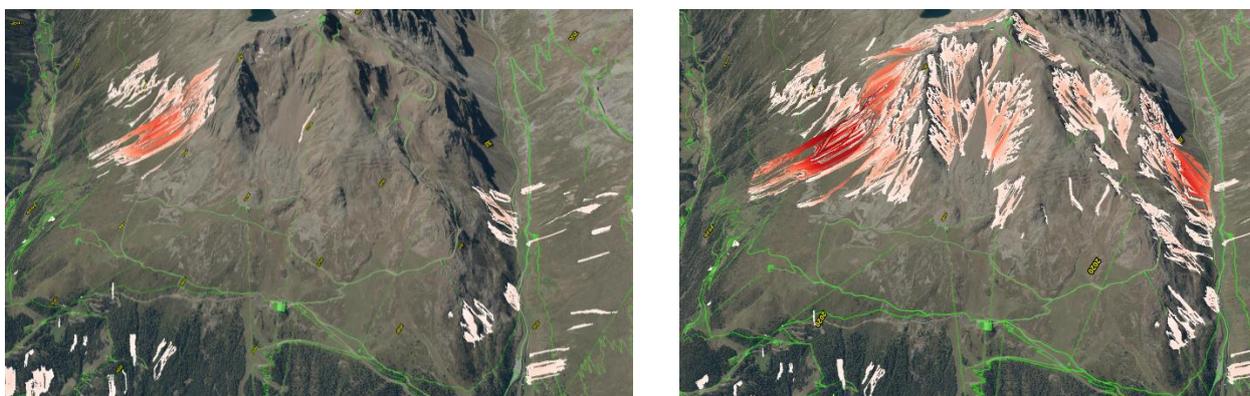


Abb. 26: Vereinfachte Darstellung der Steinschlag-Prozessausbreitung Links: vor der Permafrostdegradation; rechts nach dem Anstieg der Permafrostgrenze (RCP 8.5 Klimawandelszenario)

Der markante Unterschied der potenziellen Steinschlagprozessbereiche zeigt, dass sich die Risikosituation unter den getroffenen Annahmen deutlich verschärft.

4.3 Klimabedingte Veränderungen der Schutzwirkung des Waldes

4.3.1 Verfügbare Informationen zum Thema Wald

Die durch das BFW periodisch durchgeführte Waldinventur bietet flächendeckend für Österreich eine Vielzahl von Informationen über den annähernd aktuellen Zustand (zeitliche Verzögerung 3-5 Jahre) und die Veränderungen des österreichischen Waldes, die auch dem Naturgefahren-Risikomanagement dienlich sein können. Viele Datensätze sind auf Basis von Luftbildinterpretationen und terrestrischen Stichproben erstellt, räumlich hochaufgelöst (1m x 1m, s. Abb. 27) und für die Implementierung in Geo-Informationssystemen geeignet.

Die Verfügbarkeit der einzelnen Datensätze ist allerdings unterschiedlich. So ist z.B. die Waldkarte, welche Waldflächen räumlich darstellt, für jedermann gegen Registrierung frei zugänglich. Der Kreis der Personen, welche Holzvorratskarten - aus denen sich Rückschlüsse auf die Schutzwirksamkeit der Waldbestände ableiten lassen - beziehen können, ist aus Datenschutzgründen jedoch von Fall zu Fall zu klären. Andere Auswertungen (z.B. Stammzahl, Verjüngung) können gegebenenfalls nach Bedarf im Rahmen von Projekten erstellt werden. Zu erwähnen ist eine im Aufbau befindliche, satellitenbasierte Applikation, das sog. „Forest-Disturbance-Tool“, das negative Veränderungen im Wald (z.B. Borkenkäferlöcher etc.) mit nur geringer zeitlicher Verzögerung (einige Tage) erkennen lässt.

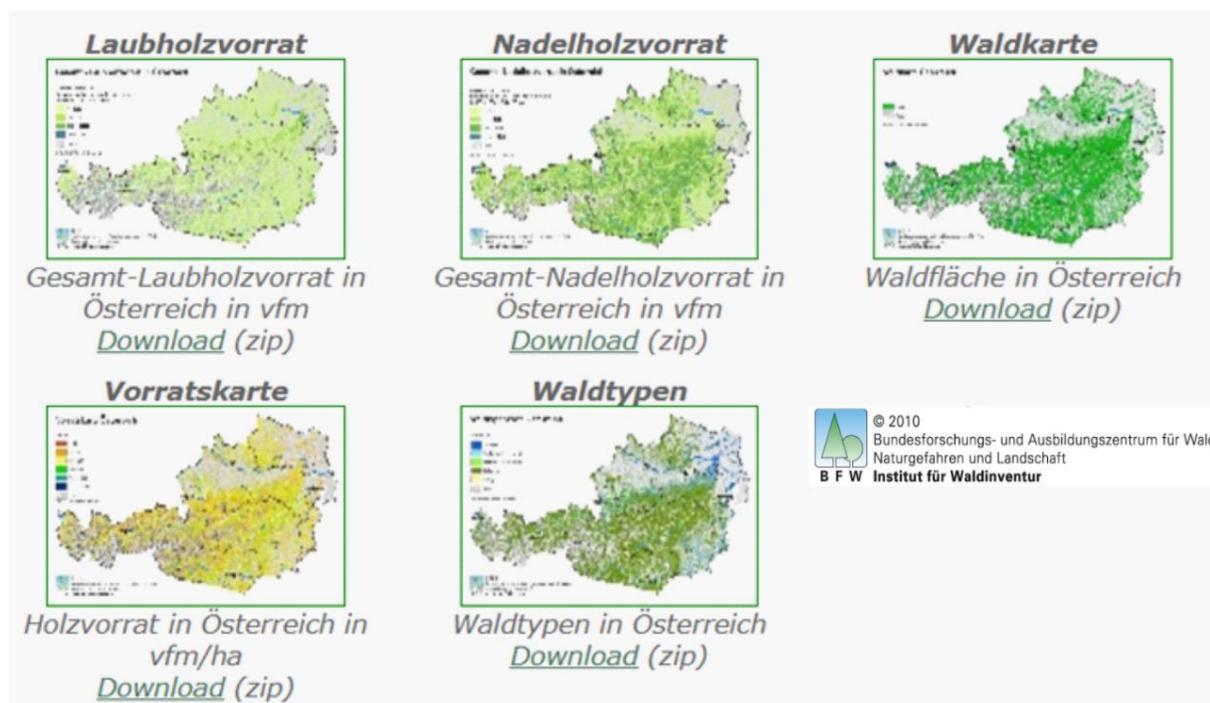


Abb. 27: Beispiele für flächige Informationen der österreichischen Waldinventur (<http://bfw.ac.at/rz/wi.karten>)

4.3.2 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald (Rutschungen und Steinschlag)

Die Auswirkungen des Klimawandels sind bereits zu beobachten und werden unsere Wälder in Zukunft verstärkt betreffen. Sie können positiv oder auch negativ sein.

4.3.2.1 Positive Wirkung des Klimawandels auf die Schutzfunktion des Waldes

Vielorts ist ein Anstieg der Waldgrenze zu erwarten bzw. bereits zu beobachten. Diese Entwicklung hängt wesentlich von der Temperatur ab, es spielen aber auch Faktoren wie Niederschlag, Trockenheit, Orographie, Nährstoffversorgung und anthropogene Einflussnahme eine Rolle (Greenwood and Alistair 2014, Wieser et al. 2009). Ein durch die Klimaerwärmung bedingter Anstieg der Waldgrenze ist daher allgemein zu erwarten, aufgrund fehlender Informationen räumlich jedoch schwer festzulegen.

4.3.2.2 Negative Wirkung des Klimawandels auf die Schutzfunktion des Waldes

Die Auflichtung oder gar der Ausfall der Waldvegetation durch eine Zunahme von Käferbefall, Windwurf oder Waldbrand infolge steigender Temperaturen führt zu einer Ausweitung potenzieller Gefahrenbereiche, einer erhöhten Schadensexposition und somit zu einem höheren Risiko. Daher ist es wichtig, Bereiche zu identifizieren, für die eine solche Entwicklung unter den zu erwartenden künftigen klimatischen Verhältnissen wahrscheinlich erscheint.

Dafür sind zunächst Informationen zum Ist-Zustand notwendig, insbesondere zur Bestockung (Baumarten und Baumartenmischung, Alter, Herkunft) aber auch zum Standort (Bodenhydrologie, Nährstoffversorgung). Über die Verschneidung der Ansprüche der Baumarten und den standörtlichen Gegebenheiten mit künftigen Szenarien (erhöhte Temperaturen, Trockenheit) ergeben sich die Bereiche, in denen die aktuelle Bestockung nicht (mehr) angepasst ist und daher mit einer höheren Wahrscheinlichkeit von Kalamitäten zu rechnen ist. So ergibt sich z.B. für den Bereich Gasen in der Steiermark, für die dort überwiegend bestandesbildende Fichte durch Wassermangel ein mittleres bis (im östlichen Bereich) hohes Ausfallsrisiko (s. Abb. 28).

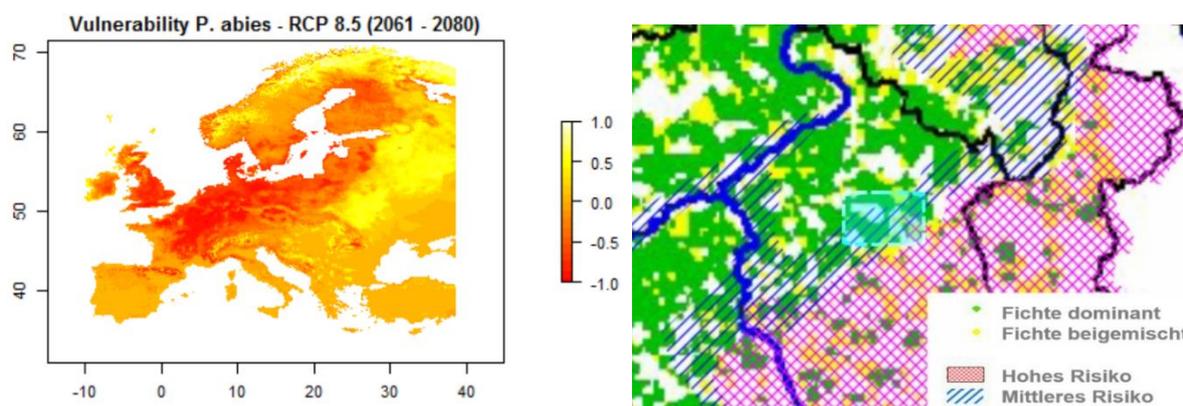


Abb. 28: Links: SUSTREE (2019) Fichte, Entwicklung der Eignung durch Klimawandel, rot hohes Risiko, gelb sicherer Bereich (Europa); rechts: Ausfallsrisiko für die Fichte, blaues Rechteck: Bereich Gasen (vgl. auch Abb. 5) mittel bis hoch (Kazda & English 2005)

4.3.3 Schutzwirkung des Waldes

Die Schutzwirkung des Waldes für einen bestimmten Bereich ist als der Grad definiert, in dem der im potenziellen Prozessbereich befindliche Wald Schutz bietet. Dies kann entweder durch die Verringerung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Prozess einen bestimmten Punkt erreicht oder die Verringerung der Schadenswirkung an diesem Punkt erfolgen.

Am bedeutsamsten ist diese direkte und/oder indirekte Reduktion des Risikos in Österreich wohl bei der Lawinengefahr – ohne Bewaldung wären viele Täler nicht bewohnbar. Aber auch bei Rutschungen und Steinschlag kommt dem Wald gegenüber anderen Landnutzungsformen eine erhöhte Schutzfunktion zu (s. Abb. 29 und 30). Während die Waldwirkung bei Rutschungen primär durch die stabilisierende Wirkung der Wurzeln, aber auch durch erhöhte Transpirationsleistung im Anrissbereich relevant ist, ist für Steinschlag die Bremswirkung des Waldes im Transportbereich ausschlaggebend. Wesentlich für die Schutzwirkung bei beiden Prozessen ist der Bestandaufbau – es insbesondere den Parametern Stammdurchmesser, Stammzahl und Vitalität große Bedeutung zu.

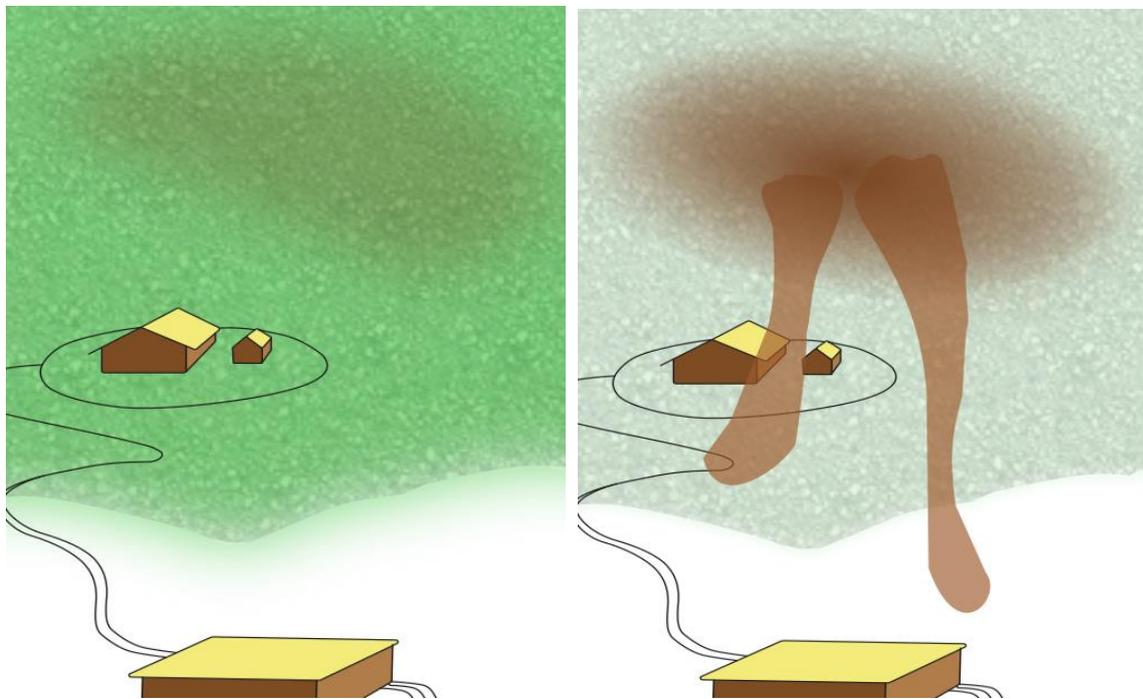


Abb. 29: Rutschungsanriss- und Transportbereich; links: mit Schutzwirkung des Waldes; rechts: ohne Schutzwirkung (©Hagen, 2021)

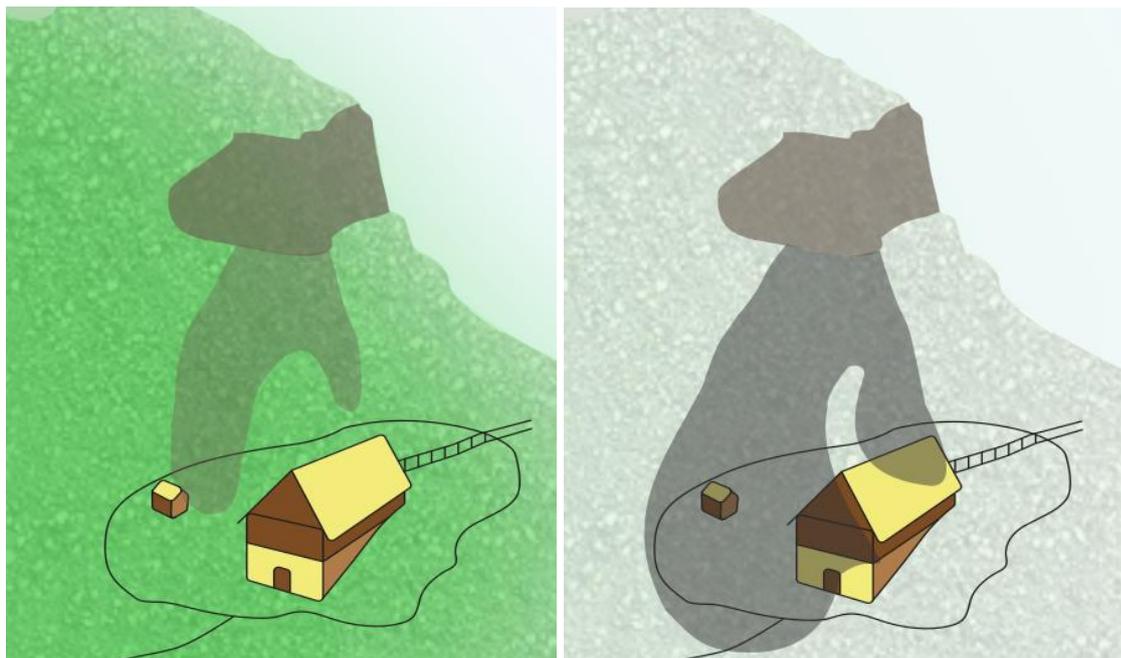


Abb. 30: Steinschlag Anriss- und Transportbereich; links mit Schutzwirkung des Waldes; rechts: ohne Schutzwirkung des Waldes (©Hagen, 2021)

4.3.4 Quantifizierung der Waldwirkung – Methodik

4.3.4.1 Rutschungen

Es herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass durch Bewaldung Hänge, die zu Rutschungen neigen, tendenziell stabilisiert werden. Allerdings bestehen erhebliche Meinungsverschiedenheiten darüber, in welchem Ausmaß Waldbestände diese Gefahren verringern. Feldstudien und Modellierungen von Szenarien zeigen, dass Rutschungen in bewaldetem Gelände seltener als im Freiland auftreten und für den Fall, dass sie auftreten, erst bei größeren Hangneigungen stattfinden (Bebi et al. 2015, Kim et al. 2013, Malek et al. 2015, Rickli und Graf 2009). Eine plötzliche oder allmähliche Abnahme der Wurzelwirkung, der Evapotranspiration sowie der Interzeption hat demzufolge Auswirkungen auf die Rutschungsaktivität (Cislaghi et al. 2017, Kim et al. 2013).

Ausgehend von einem digitalen Geländemodell (DGM) und Angaben, von wo die Prozesse starten, lassen sich die Gefahrenbereiche ermitteln. Entwickelt sich z.B. aus einer Rutschung eine Hangmure, so erhöhen sich aufgrund der gestiegenen Prozessgeschwindigkeit die Reichweite und das Gefahrenpotenzial der Rutschung erheblich. Eine Abschätzung der auftretenden Kräfte ist allerdings nur mit hohem Aufwand (Hangskala, physikalisch basierte Modelle) möglich. Es können zusätzlich auch noch weitere Layer mit Informationen zur Vegetation und deren Auswirkung auf die Reichweite berücksichtigt werden. Die einzelnen Prozessbereiche können über ihre Energielinienhöhe und dem Ausbreitungsfaktor dargestellt werden.

Eine durch Auswirkungen des Klimawandels veränderte Rutschungsanfälligkeit hat Auswirkungen auf die Lage der Prozessstartpunkte. Diese Modell-Inputparameter sind vorab zu bestimmen (vgl. Kapitel 3.5). Hinweise zur Quantifizierung der stabilisierenden Wirkung des Waldes sind vereinzelt in der Literatur zu finden (z.B. Maringer et al. 2020, Perzl et al. 2015, Reid and Page 2002; Schwarz et al. 2012).

Einen einfachen, praxistauglichen Ansatz zur lokalen Quantifizierung der lateralen Wurzelwirkung als maßgeblicher Faktor, wurde von Schwarz et al. 2012 entwickelt. Basal wirkende Wurzelkräfte, erhöhte Transpirationsleistung (verringerte Bodenfeuchte), aber auch erhöhtes Eigengewicht durch die Bestockung werden nicht berücksichtigt. Der Ansatz ist als online-Tool im Rahmen von ecorisQ derzeit frei verfügbar. Zur Bestimmung der Rutschungsdisposition bzw. der Schutzwirkung des Waldes werden Angaben zum Standort (Hangneigung, Material-Reibungswinkel etc.) und zum Bestand (Baumart, Stammzahl, Durchmesser) benötigt (s. Abb. 31).

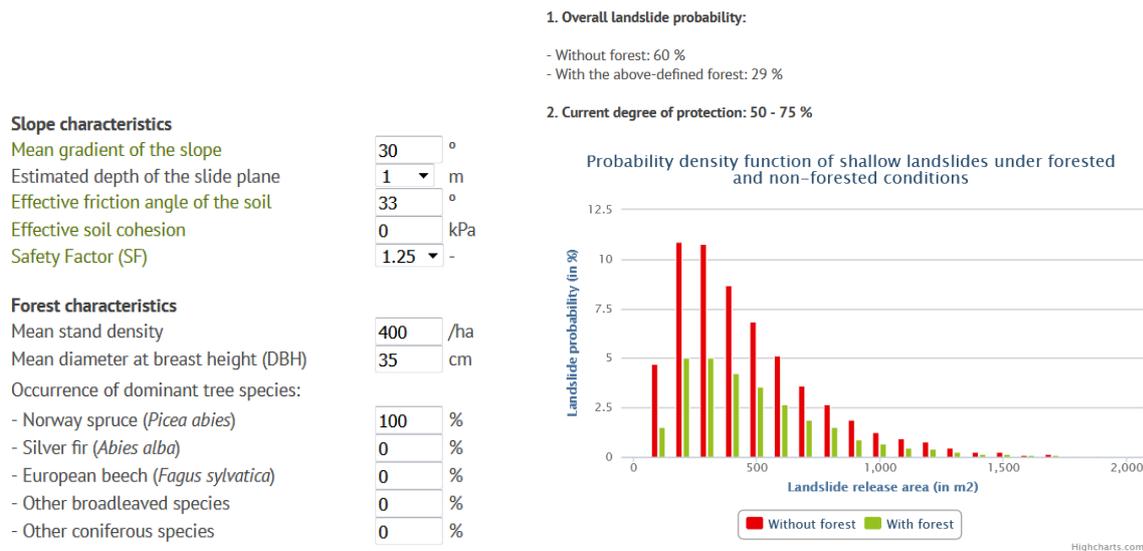


Abb. 31: SlopeforNET (ecorisQ): Beispiel der Schutzwirkung eines Fichten-Reinbestandes gesamt und über die Rutschungsgröße

Die Stabilität eines Hanges gegenüber Rutschungen wird allgemein über den Stabilitätsfaktor (safety factor SF) beschrieben:

$$SF = \frac{A \cdot \tau_{bas}}{F_{par}} \quad (1)$$

wobei A die Rutschungsfläche, τ_{bas} die Scherfestigkeit entlang der Rutschungsfläche und F_{par} für die destabilisierenden Kräfte parallel zur Rutschungsfläche stehen. Schwarz erweitert diese Gleichung um die laterale Wurzelwirkung ($F_{lat.veg}$):

$$SF = \frac{A \cdot \tau_{bas} + F_{lat.veg}}{F_{par}} \quad (2)$$

4.3.4.2 Steinschlag

Im Gegensatz zu Rutschungen kommt dem Wald im Initialbereich von Steinschlag eine eher destabilisierende Bedeutung durch die Wurzelwirkung (Gesteinsauflockerung, Einleitung der Hebelwirkung von auf Bäumen wirkende Windkräfte in den Boden) zu. Meist sind diese Initialstandorte aber ohnehin kaum bewaldet. Dagegen hat der Wald in Abhängigkeit von Bestockungsdichte und Stammdurchmesser

besonders bei kleineren Ereignissen eine deutlich bremsende Wirkung. Der Prozessbereich des Steinschlags wird dadurch verkleinert, auftretende Kräfte verringert.

Für eine grobe, flächenhafte Abschätzung des Wirkungsbereiches bieten sich einfache α -Linien basierte Ansätze an. Mit einem digitalen Geländemodell (DGM) und Angaben zu den Initialbereichen lassen sich die Gefahrenbereiche ermitteln. Darüber hinaus ist ein Layer mit Informationen zur Vegetation (insbesondere Walddaten) notwendig, um deren Einfluss auf den α -Winkel und die sich daraus ergebende Änderung der Gefahrenbereiche abschätzen zu können.

4.3.5 Quantifizierung der Waldwirkung – Beispiel

Ausgangssituation: Für die nachstehenden Modellierungen wurden Windwurfflächen in Osttirol (Gemeinde Hopfgarten in Deferegggen) herangezogen, welche 2018 durch das Sturmtief „VAIA“ verursacht wurden (s. Abb. 32)

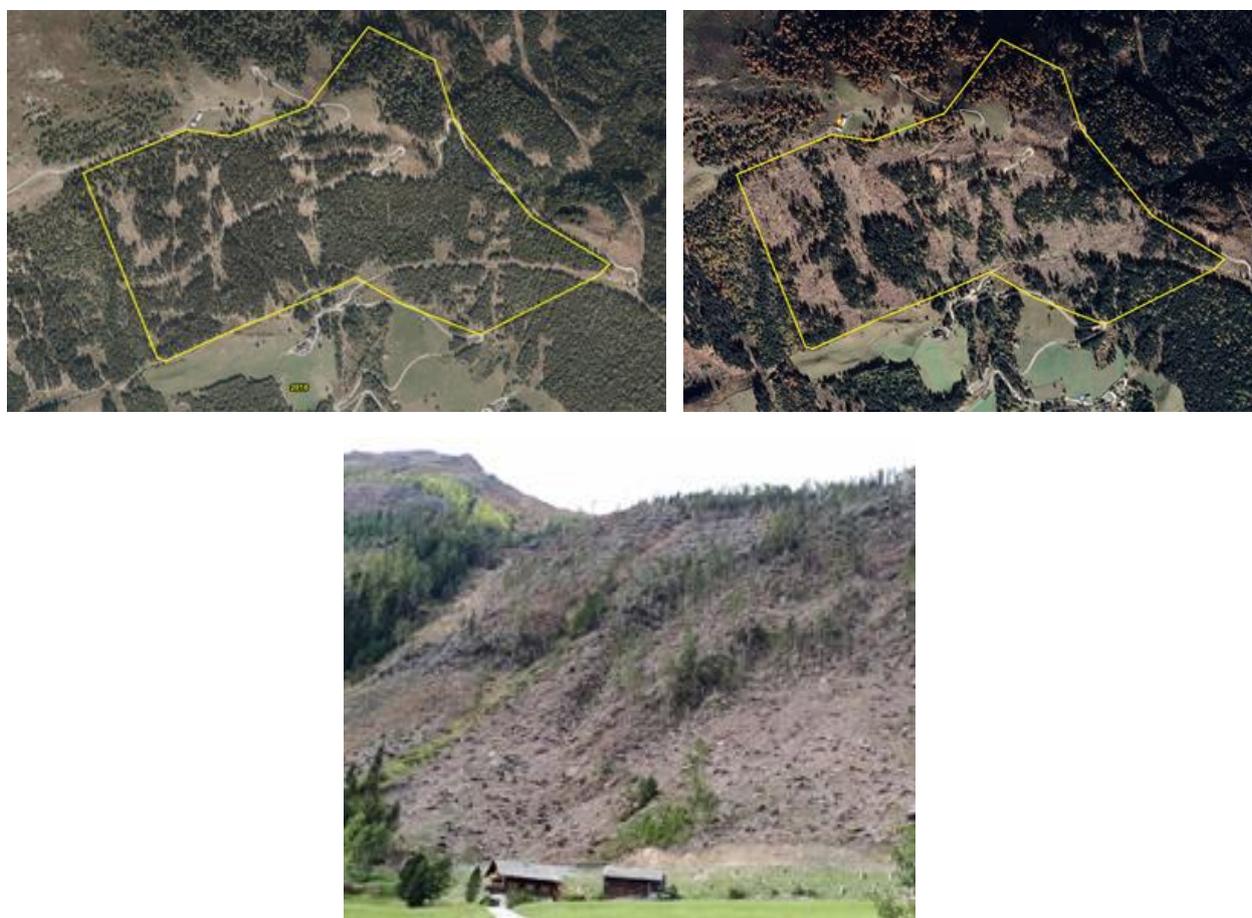


Abb. 32: Links oben: Waldfläche vor dem Sturm „VAIA“ (Land Tirol); rechts oben: Waldfläche nach dem Sturm (WMS Layer „Google Hybrid“)

Die nachstehenden Modellierungen wurden mit dem in Kapitel 3.5.2 beschriebenen offenen Modellcode „Flow-Py“ durchgeführt (<https://bitbucket.org/snowavalanche/flow-py/src/master/>).

Die modellierten Prozesspfade beruhen auf einer „stopping routine“ (Bestimmung der potenziellen Auslauflänge) und einer „routing routine“ (Bestimmung der Prozessrichtung). Für diese Routinen müssen grundsätzlich vier Parameter definiert werden. Neben dem Alpha-Winkel für die Auslauflänge sind dies 2

Parameter für die laterale Prozessausbreitung und einer für die max. Prozessgeschwindigkeit (s. auch Kap. 3.5.2). Diese Parameter sind von Experten unter Berücksichtigung der jeweiligen lokalen Gegebenheiten nachvollziehbar festzulegen.

Unter der Voraussetzung, dass Rutschungen bei intaktem Wald erst bei einer steileren Neigung anbrechen als bei Waldverlust, werden bei dem Szenario vor dem Windwurf Flächen zwischen 45° und 50° Hangneigung als Rutschungsanbrüche ausgewiesen (türkis) und die entsprechenden Rutschungstrajektorien (blau) berechnet (s. Abb. 33 links). Für die Windwurfflächen wurden die Rutschungsanbrüche für Flächen mit Hangneigungen zwischen 35° und 50° definiert (gelbe Bereiche), die entsprechenden Trajektorien sind in Rot dargestellt (s. Abb. 33 rechts).

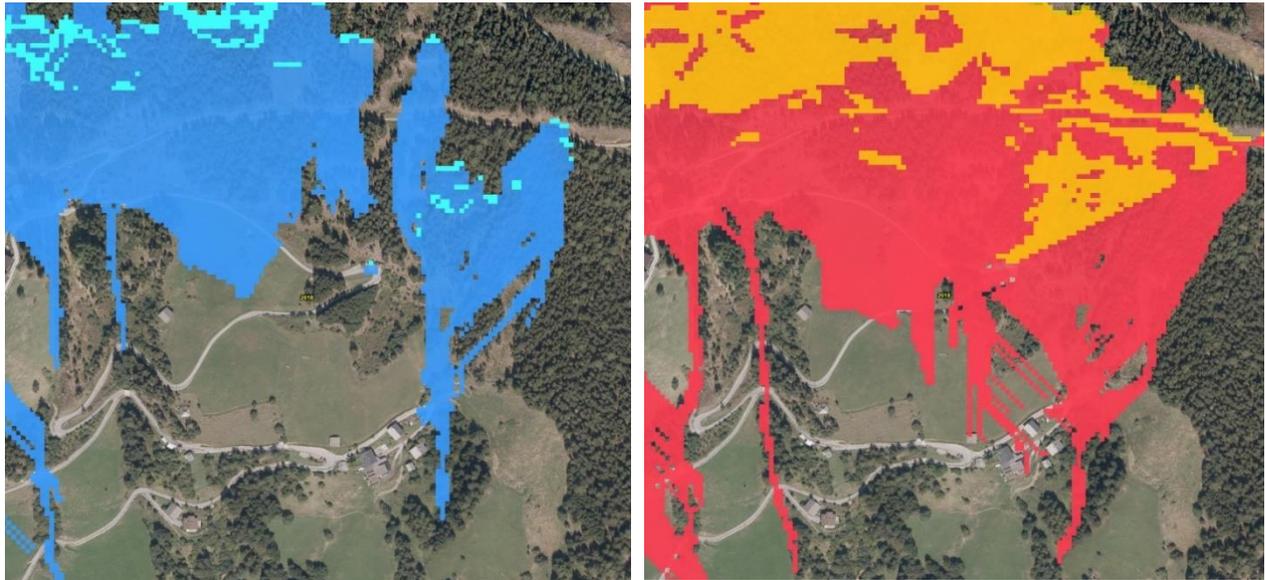


Abb. 33: Links: Anbruchsflächen (türkis) und deren Rutschungstrajektorien (blau) bei intaktem Wald; rechts: Anbruchsflächen (gelb) und deren Rutschungstrajektorien (rot) bei durch Windwürfen geschädigten Waldflächen

Da die Initialbereiche bei intaktem Wald oft direkt oberhalb jener bei einem Waldverlust zusätzlich anbrechenden Flächen liegen, kommt es häufig zu ähnlichen Verläufen der modellierten Rutschungspfade. Im Hinblick auf die durch die Rutschungen gefährdete Infrastruktur (Wohngebäude und Straßen) ergeben sich jedoch signifikante Unterschiede (siehe Abb. 33 rechts, Siedlungsbereich rechts unten)!

5 Zusammenfassung

Der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Prototyp zeigt auf, welche Informationen und Datengrundlagen im Bereich der Risikobeurteilung von Rutschungen und Steinschlag (am Beispiel des Bundeslandes Tirol in Österreich) bereits vorhanden sind und wie diese mit neuen Tools für eine verbesserte Entscheidungsfindung im Zivilschutz- und Katastrophenmanagement verknüpft werden können.

Als Parameter, welche mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Gefahrensituation bei Rutschungen und Steinschlägen direkt in Zusammenhang mit einem Anstieg der jährlichen Durchschnittstemperatur induzieren, wurden der Anstieg der Permafrostgrenze sowie Veränderungen in der Schutzwirkung des Waldes (aufgrund von veränderten Wasserhaushaltsbedingungen, Borkenkäferkalamitäten, Windwürfen und Waldbrände) gewählt.

Für die Möglichkeiten der konkreten Abschätzung dieser beiden Auswirkungen auf Rutschungen und Steinschläge wurde der Prototyp eines DSS (Decision Support System) detailliert beschrieben. Dieser Prototyp kann - in Abhängigkeit der Verfügbarkeit der vorgestellten Datengrundlagen - auch in anderen Ländern problemlos eingesetzt werden. So steht z.B. für die Permafrostdegradation mit der Alpine Permafrost Index Map (APIM) die diesbezüglich wichtigste Datengrundlage für den gesamten Alpenraum zur Verfügung. Die dabei verwendete räumliche Auflösung ermöglicht deren Anwendung auch auf lokaler Ebene. Die mögliche Integration der APIM in jedes standardisierte GIS ist somit die Grundlage für weiterführende Berechnungen der Auslauflängen gravitativer Massenbewegungsprozesse. Das für diese Berechnungen eingesetzte Modell Flow-Py ist ebenfalls ein open source Modell, das im Rahmen des Interreg Alpine Space Projekts „GreenRisk4Alps“ entwickelt wurde. Die Verknüpfung der APIM Daten mit den Ergebnissen des Flo-Py Modells ermöglichen somit eine Abschätzung der durch Rutschungen und Steinschlag gefährdeten Bereiche unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien des Klimawandels.

Für den Einsatz dieses Prototyps ist jedoch das prinzipielle Wissen um vorhandene Datengrundlagen und Modelle entscheidend. Das Risikomanagement bei Rutschungen und Steinschlägen ist überwiegend auf lokaler Ebene (Gemeinden) angesiedelt. Diese sind für die örtliche Flächenwidmung, Bauplanung aber auch die Umsetzung präventiver Maßnahmen und das unmittelbare Ereignismanagement als erste Instanz zuständig. Die Bereitstellung von Wissen um Planungsgrundlagen und Informationen ist jedoch am besten bei überregionalen (nationalen) Institutionen angesiedelt. Eine gut entwickelte Vernetzung der einzelnen Organisationseinheiten unterschiedlicher Ebenen und eine strukturierte, konsolidierte und standardisierte Aufbereitung von Informationsquellen kann/wird es den lokal für den Zivilschutz verantwortlichen Stakeholdern somit ermöglichen, ihre Aufgaben noch effizienter wahrzunehmen.

Literatur

Amt d. NÖ Landesregierung (Stand 22.4.2021): https://www.bfw.gv.at/wp-content/uploads/IHG15_Wollansky_MoNOE.pdf

BAFU (2005): Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren
Christen M., Bühler Y., Glover J., Gerber W., Bartelt P. (2012):
https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_ROCKFALL_FACTSHEET_EN.pdf

Bebi P., Putallaz J.M., Fankhauser M., Schmid U., Schwitter R., Gerber W. (2015): Die Schutzfunktion in Windwurfflächen, Schweiz Z Forstwes. 166 (2015) 3: 168–176

BMLRT (2020): Rock ‘n’ Roll am Berghang – Steinschlagschutz in Österreich; Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus

Cislaghi A., Chiaradia E.A., Bischetti G.B. (2017): Including root reinforcement variability in a probabilistic 3D stability model; Earth surf. Process. Landforms 42, 1789.1806

D’Amboise C., Neuhauser M., Teich M., Hormes A., Adams M., Plörer M., Fischer J.T. (2021): Using the open-source gravity mass flow runout model Flow-Py to identify and quantify protective forest

Christen M., Bühler Y., Bartelt P., Leine R., Glover J., Schweizer A., Graf C., McArdell B.W., Gerber W., Deubelbeiss Y., Feistl T. & Volkwein A. (2012): INTEGRAL HAZARD MANAGEMENT USING A UNIFIED SOFTWARE ENVIRONMENT - NUMERICAL SIMULATION TOOL “RAMMS” FOR GRAVITATIONAL NATURAL HAZARDS; 12th Congress INTERPRAEVENT 2012 – Grenoble / France

DORIS: (LandesGIS Oberösterreich (Stand 26.4.2021)
<https://wo.doris.at/weboffice/synserver?project=weboffice&client=core&user=guest&stateid=15e24ec8-2f2b-4324-adc5-b91f0862bb4d>

Dorren L. (2012): Rockyfor3D (V5.1) enthüllt – Transparente Beschreibung des kompletten 3D-Steinschlagmodells. ecorisQ Paper (www.ecorisq.org): 32 S

Dorren L., Berger F., Jonsson M., Krautblatter M., Mölk M., Stoffel M., Wehrli A. (2007): State of the art in rockfall – forest interactions, Schweiz Z Forstwes 158 (2007) 6: 128–141 eBod (BFW, Stand 28.4.2021):
<https://bodenkarte.at/#/center/13.3458,47.7132>

Evans S.G., and Hungr O. (1993): The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30: 620–636.

Greenwood S., Alistair S. Jump A.S. (2014): Consequences of treeline shifts for the diversity and function of high altitude ecosystems, Arctic, Antarctic, and Alpine Research, Vol. 46, No. 4, 2014, pp. 829–840

Hagen K., Huber A., Fischer J.T. Benedetti L. (2015): MUMOLADE, Database of hydrologically-driven slope failures, in multiscale modelling of landslides and debris flows, EU - Seventh Framework Programme

Gruber S., Haeberli W. (2007): Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, 112, F02S18, DOI: 10.1029/2006JF000547

Heim A. (1932): Bergsturz und Menschenleben - Fretz und Wasmuth, Zurich, p 218

Horton P., Jaboyedoff M., Rudaz B., and Zimmermann M. (2013): Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 869-885, doi:10.5194/nhess-13-869-2013, 2013

<http://www.permanet-alpinespace.eu/home.html>

Kazda M., Englisch M., (2005): The ecological and silvicultural bases for underplanting beech (*Fagus sylvatica* L.) below Norway spruce shelterwood (*Picea abies* L. Karst.). Chapter 3: Definition of the conversion process priority. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Frankfurt am Main, (139): 13-19

Kim D., Ima S., Lee C., Woo C. (2013): Modeling the contribution of trees to shallow landslide development in a steep, forested watershed; Ecological Engineering 61(P), 658-668

LandesGIS Stmk digitaler Atlas Steiermark (Stand 27.4.2021):

[https://gis.stmk.gv.at/atlas/\(S\(cwc4emoedjh3fbqbxmnat1dv\)\)/init.aspx?cms=da&karte=emptymap&layout=gisstmk&styles=gisstmk&template=gisstmk&gdiservices=hintergr,gel,dopags_tc,opbmgrau,opbm,uctc,opoverlay&sichtbar=relief&gdiservices=kat,orient_adr,melikat_gdi,messst_gdi,regionalp_gdi,gewaesser_gdi,ngp_gdi,hochwasserr,kanal_trinkw_gdi,naturgef_gdi,wasserrechte_gdi,grundw_gdi,gza&darstellungsva riante=kat_aus=on,adr=off,str=off,gew=off,orte=on,vw_grenz=on,dvg_gefahrenzonenplaene_wlv/gefzo=off](https://gis.stmk.gv.at/atlas/(S(cwc4emoedjh3fbqbxmnat1dv))/init.aspx?cms=da&karte=emptymap&layout=gisstmk&styles=gisstmk&template=gisstmk&gdiservices=hintergr,gel,dopags_tc,opbmgrau,opbm,uctc,opoverlay&sichtbar=relief&gdiservices=kat,orient_adr,melikat_gdi,messst_gdi,regionalp_gdi,gewaesser_gdi,ngp_gdi,hochwasserr,kanal_trinkw_gdi,naturgef_gdi,wasserrechte_gdi,grundw_gdi,gza&darstellungsva riante=kat_aus=on,adr=off,str=off,gew=off,orte=on,vw_grenz=on,dvg_gefahrenzonenplaene_wlv/gefzo=off)

Leitgeb E., Englisch M., Herzberger E., Starlinger F. (2013): Fichte und Standort – Ist die Fichte besser als Ihr Ruf? BFW Praxisinformation Nr. 31, 7-9

Mair V., Zischg A., Lang K., Tonidandel D., Krainer K., Kellerer-Pirklbauer A., Deline P., Schoeneich P., Cremonese E., Pogliotti P., Gruber S., Böckli L., (2011): PermaNET - Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesebericht. INTERPRAEVENT Schriftenreihe 1, Report 3. Klagenfurt.

Maringer, J., Ascoli, D., Gehring, E., Wohlgemuth, T., Schwarz, M., Conedera, M. (2020): Feuerökologie montaner Buchenwälder – Waldleistungen und waldbauliche Maßnahmen nach Waldbränden; in „Merkblatt für die Praxis“ Ausgabe 65, WSL

Melzner S., Shtober-Zisu N., Katz O., Wittenberg L. (2019): Brief communication: Post-wildfire rockfall risk in the eastern Alps, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 19, 2879–2885

Neuhauser M., D'Amboise C., Teich M., Kofler A., Huber A., Fromm R. & Fischer J.T. (2021): avaframe/FlowPy: Flow-Py: routing and stopping of gravitational mass flows (Version v1.0.2). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.5102717>

NÖAtlas: (LandesGIS NÖ)

[https://atlas.noe.gv.at/webgisatlas/\(S\(cddu0ahzcoqhfy3tksi1b5ti\)\)/init.aspx?karte=atlas_geogene_gefahr_enhinweiskarten&ks=erdwissenschaften&redliningid=d5ua5l43o2pabojmaqpeksbl&box=623925.012713621;313894.184248633;627449.262713621;315725.204361415&srs=31259](https://atlas.noe.gv.at/webgisatlas/(S(cddu0ahzcoqhfy3tksi1b5ti))/init.aspx?karte=atlas_geogene_gefahr_enhinweiskarten&ks=erdwissenschaften&redliningid=d5ua5l43o2pabojmaqpeksbl&box=623925.012713621;313894.184248633;627449.262713621;315725.204361415&srs=31259)

ÖREK (2015): Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung, Materialienband, Geschäftsstelle der Österr. Raumordnungskonferenz, Wien, p 285

Perzl F., Hagen K., Huber A. (2015): Verbesserung der Erfassung der Schutzwaldkulisse für die forstliche Raumplanung Methodik - Prozessmodellierung Steinschlag für die Kartierung von Wald mit Steinschlag-Objektschutzfunktion – BFW

Perzl F., Rössel M., Kofler A. (2017): GRAVIMOD II - Erstellung von Grundlagen zur bundeseinheitlichen Ausweisung von Waldflächen mit Schutzfunktion vor Boden- und Felsrutschungen; Grundlagen, Methoden und Ergebnisse der Modellierung von Waldflächen mit Schutzfunktion vor spontanen Lockergesteinsrutschungen (Hangrutschungen) - BFW – Institut für Naturgefahren

Petschko H., Bell R., Glade T., Goetz J., Heiss G., Leopold P (2013): MoNOE – Modellierung der Rutschprozesse, Berichte Geol. B.-A., 100, NÖ GEOTAGE – 19. & 20. 9. 2013, Rabenstein an der Pielach

Pomaroli G., Bell R., Glade T., Heiss G., Leopold P., Petschko H., Proske H., Schweigl J. (2011): Darstellung der Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen im Bundesland Niederösterreich als Grundlage der Raumplanung, Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 169

Reid, L.M., Page, M.J. (2002): Magnitude and frequency of landsliding in a large New Zealand catchment, *Geomorphology* 49 (2002) 71–88

Schindelegger A., Kanonier A. (2019): Die Bedeutung der Gefahrenzonenplanung für die Raumplanung; Wildbach- und Lawinenverbau Nr.184, 24-33S

Schoeneich P., Dall’Amico M., Deline P., Zischg A., eds (2011): Hazards related to permafrost and to permafrost degradation. PermaNET project, state-of-the-art report 6.2. On-line publication ISBN 978-2-903095-59-8

Schrott L., Otto J.C., Keller F. (2012b): Modelling alpine permafrost distribution in the Hohe Tauern region, Austria; *Austrian journal of earth sciences* | volume 105/2 | 169-183

Schwarz, M., Thormann, J.J., Zürcher, K., Feller, K. (2012): Qualifying root reinforcement in protection forests: implications for slope stability and forest management 12th Congress INTERPRAEVENT 2012, Grenoble

Schwarz M., Matti J., Dorren L., Hunziker G., Loup B., Hagen K., Mazzorana B., Rickli C., Bebi P., Wohlwend S., Huwiler A., Vacchiano G. (2014): Best Practice Methods for Shallow Landslide Hazard Assessment – A Review of the Alpine Region, in Wildbach und Lawinenverbau, Heft Nr. 174, pp 222 – 231

SUSTREE (2019): Maps of species vulnerabilities and its uncertainties for present and three future climate scenarios, D.T1.4.1, INTERREG Central Europe

Thiebes B. (2012): *Landslide Analysis and Early warning Systems, Local and Regional Case Study in the Swabian Aib, Germany*, Springer, Heidelberg, p 260

Tilch N., Hagen K., Proske H. Pistotnik G., Schwarz L., Aust G., Fromm R., Herzberger E., Klebinder K., Perzl F., Bauer C., Kronberger B., Kleb U., Granica K., Haiden T. (2011): Modelling of Landslide Susceptibility and affected Areas – Process-specific Validation of Databases, Methods and Results for the Communities of Gasen and Haslau, (AdaptSlide – Endreport), <http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=8935>, p 305

Van Asch Th. W. J., Malet J.-P., Van Beek L.P.H., Amitrano D. (2008): Techniques, advances, problems and issues in numerical modeling of landslide hazard; <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0709/0709.2642.pdf>, p 32

Wichmann V. (2017): The Gravitational Process Path (GPP) model (v1.0) – a GIS-based simulation framework for gravitational processes, *Geosci. Model Dev.*, 10, 3309–3327, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3309-2017>, 2017

Wieser G., Matyssek R., Luzian R., Zwerger P., Pindur P., Oberhuber W., Gruber A. (2009): Effects of atmospheric and climate change at the timberline of the Central European Alps, *Annals of Forest Science*, June 2009

