

ALGORITHMISCHE SKITOURENPLANUNG

Vom Bildschirm an den Berg — und zurück



Jesse Born, G21D

Oktober 2024

Eingereicht bei Michael Kappeler
Alte Kantonsschule Aarau

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

Abstract

Vorwort

1 Einleitung	1
1.1 Ziel der Arbeit	1
1.2 Theoretische Grundlagen	1
1.2.1 Analytische vs. Praktische Lawinenkunde	1
1.2.2 Lawinentypen	1
1.2.3 Typische Lawinenprobleme	2
1.2.4 Lawinenlagebericht	2
1.2.5 Lawinenbildende Faktoren	3
1.2.6 Schema 3×3	3
1.2.7 Grafische Reduktionsmethode & Relevante Geländefaktoren	3
1.2.8 Unfalldaten & Begehungen	4
1.2.9 Digitale Höhenmodelle	4
1.2.10 Digitale landschaftsmodelle	4
1.2.11 GIS	4
1.2.12 Dijkstra's Algorithmus und A*	4
1.2.13 Naismith'sche Regel	5
1.2.14 Berechnung von topographischen Oberflächenfaktoren	5
1.3 Methodik	7
1.3.1 Herunterladen des Höhenmodells	7
1.3.2 Erstellung von Risikokarten	7
1.3.3 Parallele Berechnungen	7
1.3.4 Einbrennen von Gewässern und Brücken	8
1.3.5 QGIS-Plugin LeastCostWalk	8
1.3.6 Server Deployment mit Docker	8
1.3.7 3D-Karte im Webbrower	9
2 Hauptteil	11
2.1 Resultat	11
2.1.1 Modellevaluation	11
2.2 Methodische Reflexion	14
2.2.1 Versionierung, Backup und Archiv mit Git	14
2.2.2 Verworfene Variante	14
2.2.3 GIS	14
2.2.4 Verfassen mit L ^A T _E X	14
2.2.5 Evaluation	14
3 Schlusswort, Fazit und Diskussion	15
Literatur	16
Abbildungsverzeichnis	18

Abstract

In vorliegender Arbeit wird die methodische¹ sowie technische Umsetzung² eines Computer-Programms zur automatisierten Planung von Ski- und Bergtouren diskutiert.

Auf Basis des digitalen Höhenmodells (DHM/DEM) SwissAlti^{3D} mit einer Auflösung von 0.5m, der Bodenbedeckungskarte SwissTLM^{3D} sowie historischen Unfalldaten des SLF wird eine computeroptimierte Reduktionsmethode entwickelt, welche flächendeckend individuelle Gefahrenwerte für einzelne Rasterpunkte innerhalb der Schweiz errechnen kann. Um sinnvolle Risikowerte zu errechnen, muss ausserdem die Begehungshäufigkeit zugezogen werden. (Weniger Begehungen entsprechen nicht unbedingt linear auch weniger Unfällen). Die Berechnung der Risikokarten soll dabei in Echtzeit erfolgen können, um das täglich erscheinende Lawinenbulletin sowie – als Erweiterung des Projekts – im Tagesverlauf wahrgenommene Warnzeichen in die Karte aufnehmen zu können.

Aus obigen Datengrundlagen können mittels vom Benutzer eingetragenen Start- & Zielkoordinaten sichere, bzw. risikooptimierte Routen automatisiert geplant werden. Ausserdem wird der Einfluss eines solchen Werkzeuges auf die Risikobereitschaft eines Tourengängers sowie dessen Nutzwert diskutiert. Die mit dem Algorithmus erstellten Routen sollen durch Bergführer, Risk-V ausgebildete Schneesportlehrpersonen sowie Freizeittourengeher blind bewertet und aus einer Auswahl von nicht-computergenerierten Routen identifiziert werden.

¹Wie können Risikowerte berechnet werden

²Wie kann ein Computer diese Berechnungen effizient ausführen

Vorwort

Seit der weltweiten Coronapandemie erlebt das Skitourengehen eine neue Hochkonjunktur, viele Pistenskifahrer stiegen dank geschlossener Transportanlagen auf Muskelkraft um [1]. So begab auch ich mich mit meinem Vater auf meine erste Skitour – den 1922 Meter hohen Fronalpstock im Herzen des Kantons Schwyz. Eigentlich ist dieser durch eine Sesselbahn in 2 Sektionen mechanisch erschlossen, nicht aber während der Weihnachtsferien 2020. Als ich im August 2021 an der Alten Kanti Aarau mit dem Gymnasium begann und ich mich bereits in den ersten Wochen für eine Themenwoche entscheiden musste, schafften es für mich nur drei Angebote in die engere Auswahl: Die beiden Skilager Flims 1 & 2 – und das Tourenlager angeboten von Michael Kappeler. So war ich im dann im April 2021 zum ersten Mal in Begleitung eines Bergführers auf Tour im Sustengebiet. Seit dort lässt mich das Skitourengehen nicht mehr los.

Im Winter der Jahre 2023/2024³ wurden vom Schweizer Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF 175 Lawinenabgänge mit Sach- oder Personenschaden gemeldet. Insgesamt waren 190 Personen von einer Lawine erfasst worden. [2]

Daher auch die Motivation für diese Arbeit. Um eine Risikominimierende Tour zu planen, gibt es bereits viele sogenannte Reduktionsmethoden, Entscheidungshilfen, die dazu dienen, eine Ja / Nein-Entscheidung zu treffen, ob eine gewünschte Route möglich oder unmöglich ist [3]. Hier besteht oft eine gewisse Interpretationsfreiheit. Computer besitzen keine Arroganz, sie sind emotional nicht an eine Lieblingstour oder ein Gipfelerlebnis gebunden. Sie führen nur genau diese Berechnungen durch, mit denen sie beauftragt wurden – genau diese Qualität ist hier verlangt. Stures, objektives abarbeiten des Geländes auf der Suche nach Schlüsselstellen oder übermäßig gewagten Routenführungen. Kann ein Computer also, ohne je das Konzept eines Gipfels zu verstehen, eine Reduktionsmethode durchführen? Uns vom Bildschirm lösen, uns aus dem Wohnzimmer auf eine sichere Tour schicken? Auf der Suche nach einer variantenreichen Abfahrt, das Risiko in einer Statistik des SLF zu enden, zu minimieren? Dieser Frage gehen wir in der anstehenden Arbeit nach.

³1. Oktober 2023 – 26. März 2024

1 Einleitung

1.1 Ziel der Arbeit

1.2 Theoretische Grundlagen

1.2.1 Analytische vs. Praktische Lawinenkunde

Lawinenprobleme lassen sich grundsätzlich aus zwei Perspektiven betrachten und vorhersagen: Einerseits auf Basis der Schneedecke, andererseits auf Basis von Geländeformen und Statistik. Dabei wird bei der praktischen Lawinenkunde auf das erstellen von beispielsweise Schneeprofilen (Extended Column Test) zur Einschätzung der lokalen Stabilität der Schneedecke gesetzt.

Bei der analytischen Lawinenkunde arbeiten wir mit historischen Unfalldaten, konkret ist das Ziel, ein quantitatives Mass für das eingegangene Risiko zu errechnen. Dies steht der praktischen Lawinenkunde gegenüber. Hier beobachten wir die Schneedecke und leiten daraus die Entscheidung ab, weiter aufzusteigen oder umzukehren – diese Entscheidung steht in beiden Gebieten im Vordergrund.

1.2.2 Lawinentypen

1. Schneebrettlawinen [4][5]:

- Fordern 90% der Lawinenopfer
- Abriss entlang einer Kante, Schnee gleitet als ganzer Block «Brett» ab
- Brett gleitet auf einer darunterliegenden Schwachschicht in der Schneedecke ab
- Kann aufgrund von mehrbelastung durch Wintersportler oder spontan abgehen
- Auslösender Athlet steht oft mitten im Schneebrett
- Verschüttungsgefahr gross – Mitreis- & Absturzgefahr gross
- Gefahr ab einer Hangneigung von 30°

2. Lockerschneelawinen [4][5]:

- Punktformiger Auslösepunkt
- Reisst immer mehr Schnee mit, Kegelförmiger Abgang der nach unten breiter wird
- Verschüttungsgefahr klein – Mitreis- & Absturzgefahr gross
- Im Auslösepunkt ist meistens eine hohe Steigung von 40° notwendig

3. Gleitschneelawinen [4][5]:

- Ebenfalls linienförmige Abrisskante
- Die gesamte Schneedecke gleitet ab
- Kleine Bedeutung für Wintersportler – gehen oft spontan ab und gefährden vor allem Infrastruktur

Für unsere Zwecke interessieren uns an erster Stelle **Schneebrettlawinen** und an zweiter **Lockerschneelawinen**, da diese Lawinentypen für die meisten Unfälle mit Personenschäden abseits der Schweizer Pisten verantwortlich sind. In 95 % aller Unfälle lösen Schneesportler dabei ihre Unglücksawine selbst aus [6]. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit einer möglichen Fernauslösung keine weitere Beachtung geschenkt.

1.2.3 Typische Lawinenprobleme

1. Neuschneeproblem [7]:

- Frischer Niederschlag, der sich schlecht mit der darunterliegenden Schneeschichten verbunden hat.
- Ab der Kritischen Neuschneemenge (je nach Bedingungen zwischen 10 cm – 50 cm) mindestens die Warnstufe «3 - Erheblich» im LLB.
- Setzt sich in 2 bis 3 Tagen

2. Triebsschneeproblem [7]:

- Wind trägt Neuschnee in Windschattenlagen
- Praktisch immer gebunden, ideale Voraussetzungen für ein Schneebrett
- Gefahr durch Schneeverfrachtungen
- Setzt sich in 2 bis 3 Tagen

3. Nassschneeproblem [7]:

- Die Schneedecke wird durch eindringendes Wasser geschwächt
- Erste Durchfeuchtung führt zu der bedeutendsten Schwächung
- Gefahr nach Regenperioden im Winter
- Typische Frühlingslawinen, Gefahr steigt im Verlauf des Tages mit steigender Temperatur an
- Lange anhaltende Gefahr

4. Altschneeproblem [7]:

- z.B. Eingeschneite Harschschichten schwächen die Schneedecke erheblich
- Dauert Wochen bis Monate an

Es ist möglich, dass mehrere Lawinenproblem miteinander auftreten. Im LLB sind jeweils alle zu erwartenden Lawinenprobleme mit einer eigenen Gefahrenstufe aufgeführt. [8]

1.2.4 Lawinenlagebericht

Im Lawinenlagebericht, kurz LLB, werden die momentan am Berg zu erwartenden Lawinenprobleme (siehe 1.2.3) zusammengefasst und mit diversen zusätzlichen Daten ergänzt. In der europäischen Lawinengefahrenskala werden fünf Warnstufen unterschieden, von «1 - gering» bis «5 - sehr gross». [9]

Rund 50% der Unfälle geschehen dabei bei «3 - mässig» [7].

Die Skala ist kontinuierlich, jedoch nicht linear. Heisst konkret: Im Durchschnitt ist das Risiko bei «mässig» fünf Mal so hoch wie bei «gering», und bei «erheblich» drei Mal so hoch wie bei «mässig» [4].

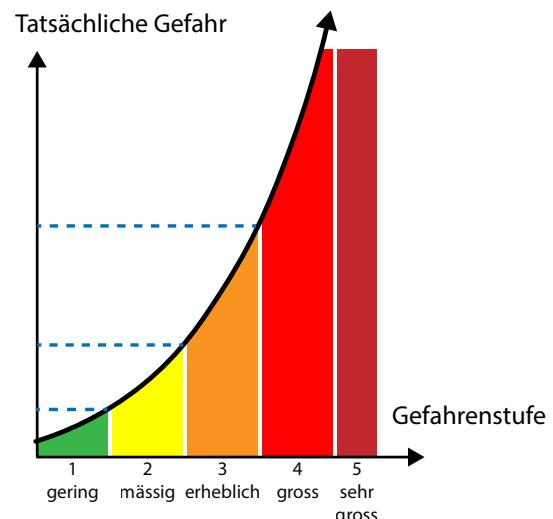


Abb. 1: Die 5 Europäischen Lawinengefahrenstufen in einem Graph

Um die Einteilung dieser fünf Kategorien weiter zu verfeinern, wurden in der Schweiz zusätzlich Teilabstufen mittels +, – und = eingeführt (So lautet die Warnstufe im Bericht nun z.B. 3+, wenn die tatsächliche Gefahr bereits nahe an einer 4 bzw. 4– liegt) [4]. Unterschiedliche Interpretation der standartisierten europäischen Skala sorgen leider dafür, dass Differenzen zwischen Schweizerischen und Ausländischen Vorhersagen bestehen. Dies stellt besonders in Grenzregionen ein Problem dar, in dieser Arbeit im weiteren jedoch keine Beachtung geschenkt.

1.2.5 Lawinenbildende Faktoren

Lawinen sind das Resultat eines unglücklichen Zusammenspiels drei wesentlicher Faktoren: **Verhältnisse** (Wetterlage und Zustand der Schneedecke), **Gelände** (Neigung, Exposition, Höhe) und **Mensch** (95% aller Lawinen mit Personenschäden wurden durch Menschen ausgelöst) [6].

Weder die Verhältnissen noch das Gelände lässt sich direkt von Wintersportlern beeinflussen. Nur durch die Wahl eines anderen Datums (nur in Ausnahmefällen sinnvoll, z.B. bei einer Erstbesteigung), oder durch clever Spuranlage lassen sich diese Faktoren mildern. Ist beides keine Option, muss eine alternative Tour ausgewählt werden. Den grössten Einfluss hat bei weitem die maximale Hangneigung — daher konzentrieren sich die meisten gängigen Reduktionsmethoden vor allem darauf.

1.2.6 Schema 3×3

Der Goldstandard der Tourenplanung ist heute Werner Munters 3×3 -Schema. Dabei werden in drei «Zoom»-Stufen drei Faktoren ausgewertet: **Regional** Von zuhause aus [10]:

- Verhältnisse: 1. Lawinenlagebericht LLB, 2. Wetterprognose, 3. Auskünfte von Einheimischen/Hüttenwart
- Gelände: 1. 1 : 25000-Karte, 2. Tourenführer, 3. Eigene Geländekenntnis
- Menschen: 1. Wer ist Dabei?, 2. Ausbildung, 3. Material, 4. Mentale und Physische Kondition?

Lokal Im Gebiet, auf Sichtdistanz [10][11]:

- Verhältnisse / Schneedecke / Wetter: 1. Sicht?, 2. Bewölkung, Wind, Niederschlag, Temperatur?, 3. Schneeverfrachtungen, Neuschneemenge, 4. Stimmt der LLB?
- Gelände: 1. Stimmt meine Vorstellung (Steilheit, Exposition)? 2. Spuren anderer Gruppen
- Menschen: 1. Ausrüstungskontrolle (Gruppencheck LVS), 2. Andere Gruppen unterwegs?

Zonal Im Einzelhang [10][11]:

- Verhältnisse: 1. Neuschneemenge, 2. Triebsschnee, 3. Mögliche Abrisszonen, 4. Sonneneinstrahlung
- Gelände: 1. Wer / was ist über/unter der Gruppe?, 2. Steilste Stelle?, 3. Exposition, 4. Typisches Lawinengelände, 5. Hangform, 6. Höhe, 7. Oft befahren?
- Menschen: 1. Können & Kondition, 2. Vorsichtsmassnahmen, 3. Sichere Sammelstellen

1.2.7 Grafische Reduktionsmethode & Relevante Geländefaktoren

Die momentan am meisten verwendete Reduktionsmethode ist dabei wohl die sog. «grafische Reduktionsmethode», kurz GRM. Bei dieser wird — je nach prognostizierter Ausprägtheit eines Lawinenproblems — nur die lokale Hangneigung an einer Stelle zur Entscheidungsfindung eingesetzt [4]. In der Planungsphase wird die Hangneigung aus einer 1 : 25000er-Karte mittels Neigungsmesser herausgelesen. Dies liefert jedoch nur die durchschnittliche Neigung des Geländes zwischen den Höhenlinien — eine möglichen steileren Hangabschnitt sieht man also nicht. Unterwegs kann entweder mittels Smartphone, Skistöcker oder Pendel die Hangneigung ermittelt werden. Es kann nun in der Grafik (siehe Abb. 2) herausgelesen werden, ob das zu überprüfende Gelände problemslos, nur mit Vorsichtsmassnahmen oder gar nicht betreten werden darf.

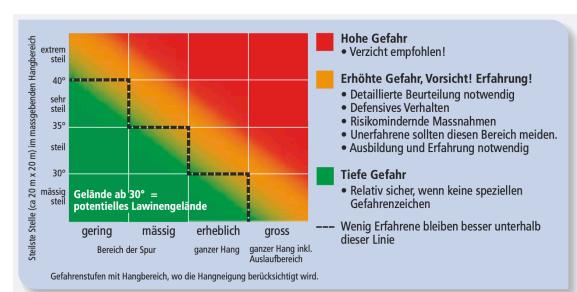


Abb. 2: GRM-Karte [7]

1.2.8 Unfalldaten & Begehungungen

Hänge, deren steilste Stelle mindestens ca. 30° geneigt ist gelten als Lawinengefährdet. Etwa 18° geneigtes Gelände wird am häufigsten begangen, zwischen 30° und 40° steigt das Lawinenrisiko enorm an. [12]

1.2.9 Digitale Höhenmodelle

In den 1960er Jahren verlangte der schweizer Generalstab vom heutigen Bundesamt für Landestopografie zu prüfen, ob tief fliegende feindliche Kampfflugzeuge unbemerkt in den schweizer Luftraum eindringen könnten. Um die für diese Prüfung nötigen Berechnungen erstmals an einem Grossrechner ausführen zu können, mussten die topographischen Höhen aus der Landeskarte 1 : 250000 auf Lochkarten transferiert werden. Mit einer Auflösung von 250 m wurden die Höhenlinien der analogen Kartenprodukte so in mühseliger Handarbeit zwischen 1966 – 1968 erstmals digital nutzbar gemacht. Das so erstellte digitale Höhenmodell DEM «RIMINI» wurde bis in die 1970er Jahre genutzt. [13]

Rufe nach einem engmaschigerem Modell brachten schliesslich unter anderem «DHM25» hervor, welches Daten in einer Auflösung von bereits 25 m mitbringt. [13]

Um die Jahrtausendwende erfolgte dank schnelleren CPUs und günstigem Datenspeicher eine Umkehrung des Prozess. Neu werden die analogen Landeskarten auf Basis eines DEM erstellt. Moderne DEMs erreichen dabei eine Auflösung bis zu 0.5 m bei einer Genauigkeit von 0.5 – 3 m und werden direkt aus Lasermessungen oder Stereokorrierten Luftbildern abgeleitet [14]. SwissAlti^{3D} ist genau solch ein Modell.

Dank der «Open Government Data Strategie» des Bundes werden seit 2020 diverse Datensammlungen die öffentliche Verwaltungen produzieren der Öffentlichkeit wieder zur Verfügung gestellt [15]. So landet nebst dem Fahrplan der SBB, Jungwaldflächen und den Standorten aller öffentlichen Toiletten der Stadt Luzern (nebst unzähligen weiteren Datensätzen) auch SwissAlti^{3D} auf dem Opendataportal des Bundes. SwissAlti^{3D} wird als GeoTIFF ausgeliefert. GeoTIFF sind verlustfrei komprimier-

te Bilddaten, die um einen Eintrag zur Lokalisierung in einem Koordinatensystem, hier LV95 LN02, ergänzt wurden. Der Farbwert eines Pixel entspricht jedoch der Höhe an dieser Stelle. Insgesamt wird die Schweiz in ca. 43500 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ grosse Kacheln unterteilt. [14]

Aus einem Solchen Höhenmodell lässt sich die Hangneigung viel präziser und hochauflösender herauslesen, als dies von Hand aus einer 1 : 25000er-Karte möglich ist.

1.2.10 Digitale landschaftmodelle

Berge, Wälder, Flüsse und Seen sind ebenfalls ein wichtiger Kartenbestandteil. Auf Skitour gilt es zum Beispiel Schwimmpassagen zu vermeiden. Swisstopo liefert mit SwissTLM^{3D} einen Datensatz, der alle auf einer Landeskarte ersichtlichen Objekte enthält. Im weiteren Verlauf interessieren uns hier vor allem Gewässer (stehend und fliessend), Brücken über diese sowie Wald und Wildruhezonen.

1.2.11 GIS

Geoinformationssysteme (GIS) sind leistungsstarke Werkzeuge, die zur Analyse, Darstellung und Interpretation von geografischen Daten verwendet werden. Mit einem solchen Werkzeug können etwa Landkarten verfasst, ökologische Veränderungen überwacht oder zoologische Migrationsmuster analysiert werden. In dieser Arbeit wurde das Werkzeug QGIS [16] extensiv verwendet; unter anderem wurde eine eigene Analyse-Erweiterung entwickelt.

1.2.12 Dijkstra's Algorithmus und A*

Die Suche nach einem Pfad mit minimalen Kosten lässt sich formal als Graphproblem darstellen und lösen — dabei wird jeder Gitterpunkt zu einem Knotenpunkt in einem Graphen, der mittels acht ungerichteten Kanten mit seinen Nachbarn verbunden ist. So kann das Problem bereits mit dem Algorithmus von Dijkstra gelöst werden [17].

Es wird eine leere Vorrangwarteschlange initialisiert, der sofort der dem Ursprungspunkt entsprechend Knoten mit Kosten 0 hinzugefügt wird. Die laufenden Kosten aller Knoten werden auf $+\infty$ gesetzt. Wir führen nun folgende

zwei Schritte fortlaufend aus, bis der Knoten, welcher der Zielzelle entspricht, erweitert wurde.

- **Selektion:** Wir fahren mit jenem Knoten fort, der die geringsten laufenden Kosten hat. Dank der Vorrangwarteschlange ist dies trivial möglich, da diese Datenstruktur bereits beim Eingügen eines Elementes dieses am richtigen Ort einsortieren kann. Mit dem abrufen des vordersten Elements aus der Warteschlange, wird dieses auch entfernt.
- **Erweitern:** Wir iterieren durch die Nachbarn unseres aktuellen Knoten. Jeden Nachbarn, bei dem die Summe aus den laufenden Kosten des aktuellen Knoten, den Gitterkosten des Nachbarn sowie den Bewegungskosten zwischen den beiden Zellen geringer ist, als dessen bisherige Kosten, fügen wir diesen mit der oben errechneten Summe als Priorität der Warteschlange hinzu. Formal sind die zu minimierenden Kosten hier $f(n) = g(n)$, wobei n dem nächsten Knoten und $g(n)$ den laufenden Kosten vom Start zum Knoten n entspricht. Außerdem speichern wir, von welcher Zelle aus die Nachbarn erreicht wurden.

Da wir jeweils den Vorgänger jeder Zelle gespeichert haben, können wir am Ende den Pfad vom Ende zum Start hin zurückverfolgen, und so nicht nur die gesamten Kosten, sondern auch den Pfad als Lösung erhalten.

Eine implementierte Erweiterung die auf dem Algorithmus von Dijkstra aufbaut, wird A* (A-Star) genannt. Hier wird die Berechnung der zu minimierenden Kosten um eine Heuristik (eine Schätzung der verbleibenden Kosten) erweitert. Formal werden die zu minimierenden Kosten neu also $f(n) = g(n) + h(n)$. [18]

Als Heuristik wird im weiteren Verlauf der Arbeit die Taxi- bzw. Chebyshev-Distanz verwendet [19]. Der Beweis für die Zulässigkeit der Heuristik wird dem Leser als Übung überlassen.

1.2.13 Naismith'sche Regel

Nebst den risikoabhängigen Durchgangskosten, werden auch noch Bewegungskosten berücksichtigt. Diese beschreiben die Zeit und Anstrengung die benötigt wird, um einen Meter Weg zurückzulegen. Eine weit verbreitete und akzeptierte Schätzungsweise ist die sog. Naismith'sche Regel [20]. Beim Skitouren wird dabei je 4000 m Horizontaldistanz und 400 hm Vertikaldistanz eine Stunde Wegzeit gerechnet [4][20]. (Für eine 3500 m lange Tour mit 800 hm Anstieg wird eine Aufstiegsdauer von $\frac{3000 \text{ m}}{4000 \text{ m}} + \frac{800 \text{ hm}}{400 \text{ hm}} = 2 \text{ h } 45 \text{ min}$ gerechnet)

1.2.14 Berechnung von topographischen Oberflächenfaktoren

Wir schneiden 3×3 -Ausschnitt aus dem Höhenmodell. Unser Ziel ist es, die charakteristischen Geländeeigenschaften für die Zelle e zu berechnen. $a - h$ sind die Höhen der Gitterpunkte rund um unserer Zielzelle e :

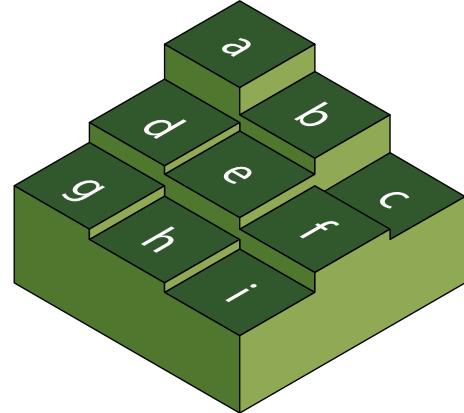


Abb. 3: 3×3 -Ausschnitt von Höhen aus einem DEM und deren Benennung

Hangneigung und Exposition nach [21]:

$$\frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8r} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta z}{\Delta y} = \frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8r} \quad (2)$$

Hangneigung ρ und Exposition θ :

$$\rho = \arctan \left(\sqrt{\left(\frac{\Delta z}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{\Delta y} \right)^2} \right) \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{\frac{\Delta z}{\Delta x}}{-\frac{\Delta z}{\Delta y}} \right) \quad (4)$$

Geländekrümmung nach [22]:

$$D = \frac{(d+f)/2 - e}{r^2} \quad (5)$$

$$E = \frac{(b+h)/2 - e}{r^2} \quad (6)$$

$$F = \frac{-a+c+g-i}{4r^2} \quad (7)$$

$$G = \frac{-d+f}{2r} \quad (8)$$

$$H = \frac{b-h}{2r} \quad (9)$$

(6) – (10) sind die Faktoren eines teilweisen Polynom vierten Grades [22]. Hangkrümmung c_{Plan} und c_{Profil} beschreiben, mit welchem Radius sich die Hangneigung parallel (Plankrümmung) bzw. senkrecht (Profillkrümmung) zur Exposition ändert:

$$c_{Plan} = -\frac{2(DH^2 + EG^2 - FGH)}{G^2 + H^2} \quad (10)$$

$$c_{Profil} = \frac{2(DG^2 + EH^2 + FGH)}{G^2 + H^2} \quad (11)$$

1.3 Methodik

Zu Beginn der Arbeit war ein Ziel, möglichst unabhängig von Software-Bibliotheken und fremden Code zu bleiben. So wurde während der Machbarkeitsstudie jedoch festgestellt, dass es letztendlich doch Sinn macht, auf eine kommerzielle GIS-Lösung (siehe 1.2.11) zu setzen — analog der UNIX-Philosophie [23]. Diese gilt als Orientierungshilfe, wie Software entworfen werden soll. Unter anderem soll zum Beispiel jeweils die simpelste, funktionale Lösung gewählt werden, Software modular aufgebaut sein oder nur einen Zweck erfüllen — und keine duplizierte Funktionalität enthalten [23]. Tausende Stunden Entwicklungsarbeit stecken bereits in GDAL [24] und QGIS [16], auf welchen gerne aufgebaut wurde.

1.3.1 Herunterladen des Höhenmodells

Wie bereits in 1.2.9 erwähnt, wird SwissAlti^{3D} in $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ Größen Kacheln ausgeliefert, welche einzeln heruntergeladen und anschließend wieder vereint werden müssen [14]. Auf dem Datenportal von swisstopo kann für jeden Kanton eine Liste mit den URLs der Kacheln, welche in dem Kanton liegen, heruntergeladen werden. Mittels eines Python-Skriptes wurden so über Nacht knapp 30 GB Höhendaten heruntergeladen. Durch `gdal_warp`, `rasterio` und `gdal2tiles` wird als erstes eine Kopie in einem für die Webkarte lesbaren Datenformat erstellt. (Siehe Anhang für weitere Details)

1.3.2 Erstellung von Risikokarten

Als Grundlage für alle weiteren Schritte werden Risikokarten benötigt; ursprünglich hätten tatsächliche Lawinenabgäne simuliert werden sollen. Mittels RAMMS::Avalanche wurden zuerst Initialisierungspolygone, also Flächen, welche durch Schneespätler ausgelöst werden könnten, gesucht und dann mittels einer Standardlawinensituation (50cm Neuschnee, Lockerschneeproblematik) ausgelöst und simuliert. Dies stellte sich aufgrund der hohen Rechenanforderungen und damit verbunden Budget- & Zeitanforderungen als unpraktikabel heraus.

Stattdessen soll sich nur um die Hangneigung bemüht werden, da diese Gelände-eigen-

schaft den höchsten Korrelationsfaktor mit der Anzahl Lawinenereignisse bildet [25]. Dies ist außerdem in der GRM bereits gebräuchlich. Auf die Geländekrümmung wird verzichtet, da diese auf die tatsächliche Route praktisch keinen Einfluss hat.

Der Risikowert einer einzelnen Zelle wird folgendermassen berechnet:

$$r(\rho) = \frac{1}{1 + e^{\frac{s-\rho}{3.0}}}$$

Je nach prognostizierter Gefahrenstufe des LLB wird s zwischen 20 und 35 linear interpoliert. Im Fall der Gefahrenstufe 3= kommt s dabei bei 28.0 zu liegen. (Siehe Abb. 4 für die resultierende Risikofunktion)

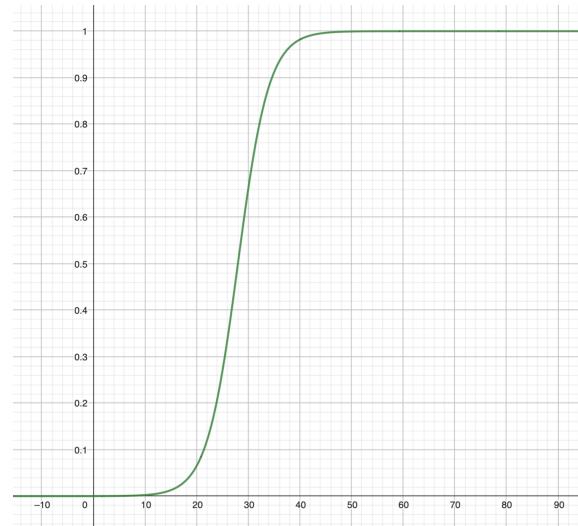


Abb. 4: Graph der Risikofunktion $r(\rho)$ für $0 \leq \rho \leq 90$ bei prognostizierter Gefahrenstufe 3=

1.3.3 Parallel Berechnungen

Um die Berechnung der Risikokarte effizient zu gestalten und alle auf dem Rechner verfügbaren Ressource zu verwenden, wird die Berechnung in kleinen Kacheln aufgezählt, welche dann zusammengepuzzelt werden. Die einzelnen Kacheln werden dabei auf der GPU verarbeitet. Letztendlich ist diese Berechnung ein grafisches Problem, welches durch die Grafikeinheit mit ihren vielen parallel arbeitenden Rechenkernen um ein Vielfaches schneller gelöst werden kann.

1.3.4 Einbrennen von Gewässern und Brücken

SwissTLM^{3D} liefert den Verlauf von Strassen sowie Gewässern. Zuerst werden die Daten so gefiltert, das nur noch Oberflächengewässer und Strassenabschnitte, die als Brücke deklariert sind im Datensatz vorhanden sind.

In QGIS werden nun zuerst alle Gewässerflächen um einen Radius von 7.5 m «gepuffer», also erweitert. Die resultierenden Gewässerpolygone werden gerastert und mit einem Risikowert von 9×10^9 in die rohe Risikokarte eingebrannt. Anschliessend wird dasselbe mit den Brücken wiederholt, hier wird jedoch das Risiko auf 0.0 gesetzt. Somit sind Gewässer für den Algorithmus ein absolutes Tabu und werden nur bei Brücken überquert. Auf das Abwägen ob eine Querung möglich ist, wurde aus Zeitgründen verzichtet.

1.3.5 QGIS-Plugin LeastCostWalk

Um den Algorithmus von Dijkstra nun auch auszuführen, musste eine neue Erweiterung für QGIS in Python implementiert werden. Ein Auszug des Quellcodes befindet sich im Anhang. Gegenüber bestehenden Least-Cost-Plugins verfügt das hier implementierte über die Funktionalität, Wegzeit/Bewegungskosten gegen Reibungs- bzw. Risikokosten abzuwegen. Dies geschieht mittels 5 Parametern k_{risk} , wie schwer die Risikokosten ins Gewicht fallen, $c_{steepascend} / c_{steepdescend}$, wie stark steile Auf- & Abstiegspassagen gewichtet werden, c_{flat} , wie teuer Horizontaldistanz ist und $c_{ascend} / c_{descend}$, wie teuer ein normaler Auf- & Absteig ist.

Nebst den Kostenkoeffizienten werden Start- & Zielpunkt, die Koordinatenreferenzsysteme dieser Punkte, das Höhenmodell und die gewünschte Variante der Risikokarte an das Modell übergeben. Wird die Erweiterung in der grafischen Oberfläche von QGIS gestartet, entspricht dies Abb. 5.

Im Fall der Webanwendung wird die Erweiterung serverseitig über die Kommandozeile automatisch aufgerufen. Um hier Rechenressourcen einzusparen, wird das Höhenmodell sowie

die Risikokarte zuerst auf einen Bereich rund um unsere Zielregion zugeschnitten.

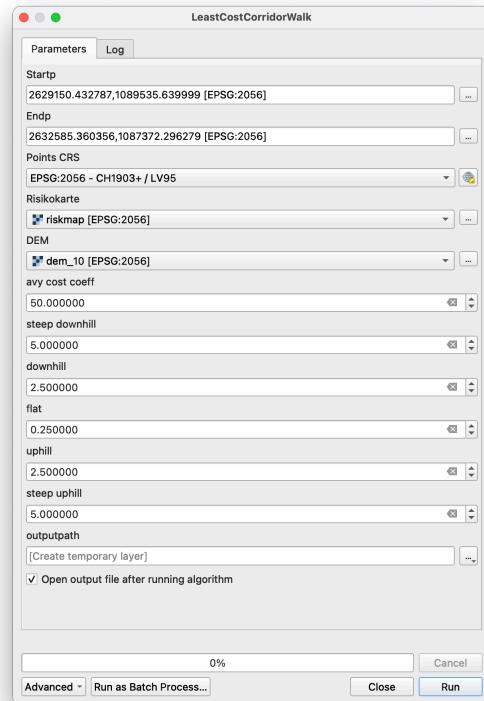


Abb. 5: QGIS-Erweiterung «LeastCostWalk» in der grafischen Oberfläche von QGIS

1.3.6 Server Deployment mit Docker

Um ein einfaches Bereitstellen zu ermöglichen und so horizontale Skalierbarkeit der Serverressource zu gewährleisten, wurde ein Docker-Image⁴ erstellt. Darin wurde die GIS-Anwendung sowie die Risikokarten und das Höhenmodell vorinstalliert. Momentan läuft die Anwendung nur auf einem Miniaturserver unter Ubuntu Server 24.04 LTS. Vorteil der hier gewählten Paketierung ist jedoch, das auch andere Serverbetriebssysteme ohne Änderung der des eigentlichen Quellcodes unterstützt werden. Zusätzliche Instanzen könnten ebenfalls zugeschalten werden, um eine durchgehend verfügbare öffentliche Version für 100 – 1000 Nutzer ohne Warteschleife zur Verfügung stellen zu können.

⁴Vereinfacht gesagt: Ein Miniaturbetriebssystem das auf diversen Rechner innert Sekunden als Gastsystem hochgefahren werden kann und vom Rest des Systems isoliert ist

1.3.7 3D-Karte im Webbrowser

Als erweiterung zum reinen GIS-Modell wurde eine Webanwendung mittels Vue.js und MapLibre GL JS realisiert [26][27]. Als Basislayer für die Karte wurde das Layer «Base Map» von swisstopo verwendet, welches durch die Höhendaten von SwissAlti^{3D} in eine dreidimensionale Form gebracht wurde [28][14]. Nutzer können sich mittels einem Google-Account anmelden und ihre Routen so abspeichern und wieder aufrufen. Zusätzlich steht basierend auf den in SwissTLM verfügbaren Lokalnamen eine Suchfunktion zur Verfügung. Die Planung einer neuen Tour kann durch die Auswahl von Start- & Zielort sowie der gewünschten Modellvariante in Auftrag gegeben werden — innert ca. 20s ist das Resultat anschliessen verfügbar und wird dem Nutzer direkt angezeigt.

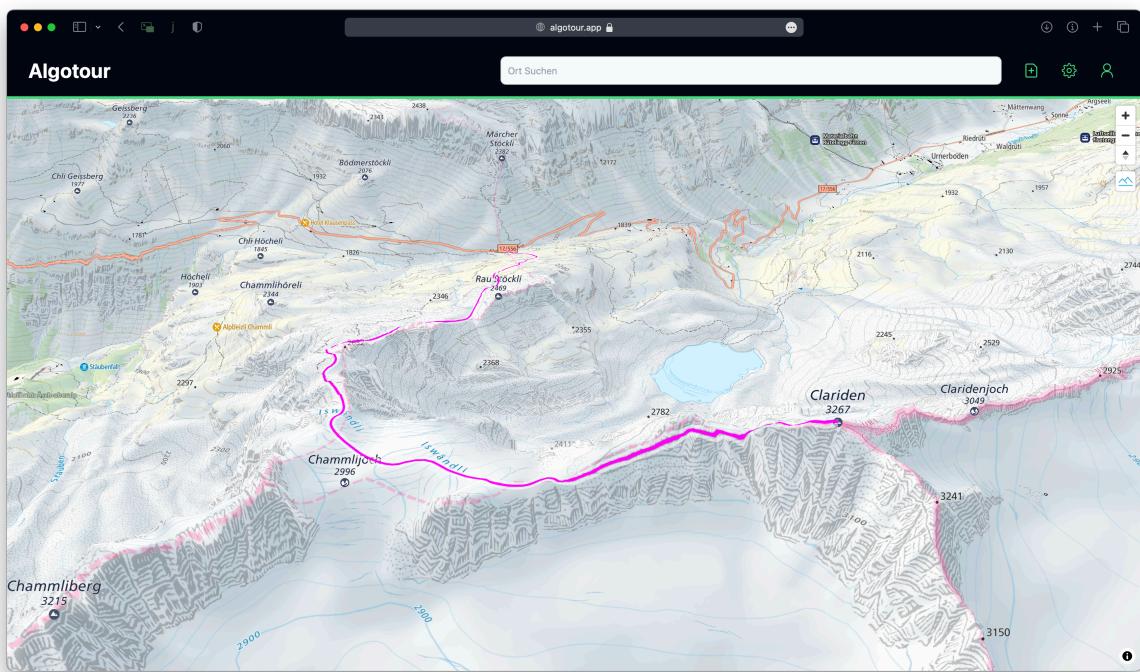


Abb. 6: Nutzeroberfläche

2 Hauptteil

2.1 Resultat

Resultat ist eine Webapp, welche in allen modernen Webbrowsern funktioniert. Mittels Klicken können Start- & Zielpunkt ausgewählt werden. Mit einem bestätigenden Klick auf «Ausführen» wird im Hintergrund ein GIS-Modell gestartet, welches entweder eine «rohe» Gefahrenkarte oder eine mit eingebrannten Gewässern verwendet.

2.1.1 Modellevaluation

Es wurden 14 typische Frühlings-Skitouren & Skihochtouren aus dem SAC Tourenportal ausgewählt und mittels einem kurzen Python-Skript heruntergeladen. Anschliessend wurden die Modellversionen mit und ohne eingebrannten Gewässern für die Start und Zielpunkte der einzelnen Routensegmente ausgeführt. Star und Zielpunkte wurden dabei von Hand plaziert. Für alle 28 Tests wurden die Gleichen Hyperparameter verwendet: $k_{risk} = 50.0$; $c_{steepascend} = 5.0$; $c_{steepdescend} = 5.0$; $c_{flat} = 0.25$; $c_{ascend} = 2.5$; $c_{descend} = 2.5$

Für einige Regionen bzw. Gipfel (Länta, Steingletscher) war nur eine von beiden Gefahrenkarten brauchbar — so macht es wenig Sinn, Quer über den Steinsee zu laufen, da dieser nur selten zugefroren ist. Erfahrungswerte mit beiden Modellversionen zeigen, dass in den meisten Fällen beide Versionen vom Benutzer begutachtet werden müssen.

Nachfolgend wird eine Auswahl der Touren kurz diskutiert. Mit eigenen Touren kann auf <https://algotour.app> experimentiert werden.

Die besten Routen waren jene vom Steingletscher aus auf die Tierberglihütte SAC, sowie auf das Sustenhorn. (Wenn die korrekte Gefahrenkarte verwendet wird — Die andere produziert unbrauchbare Resultate) Es kann eine hohe Korrelation mit den Literaturrouten die der SAC im Tourenportal auflistet festgestellt werden [29]. (Siehe Abb. 7)

Ebenso erreicht die Tour auf den Clariden in der Eigenevaluation eine Bestnote — Hier trumpft jedoch die nicht mit Gewässern ergänz-

te Karte (Siehe Abb. 8). Die nicht ganz offensichtliche Gratpassagen werden vom Modell sehr gut abgebildet, der Bach an einem sinnvollen Ort überquert. Die Übereinstimmung mit der SAC-legitinierten Route ist ebenfalls hervorragend [30].

Weniger erfreulich sieht das Resultat bei den Touren im Monte Rosa Massiv aus. Bei der Route auf die Dufourspitze findet der Algorithmus ohne weitere Hilfe zwar eine Spuranzlage, welche als Hochtour so existiert, im Winter jedoch — dank einer Kletterstelle im III. Grad — kaum oder nur unter extremer Schwierigkeit und nur ohne Skis begangen werden kann. Die Tour welche nicht direkt zum Gipfel, sondern nur bis zum Skidepot der Literaturtour führt, funktioniert und kann so begangen werden. Die Routenwahl ist jedoch um einiges defensiver als jene aus dem Tourenführer (siehe Abb. 9 «Manuelles Skidepot»). Ein umweg von ca. 1 h wird gegenüber eines 32° steilen Hanges in Kauf genommen.

Die Route auf den Piz Palü ist aufgrund der Nähe zu einer Spaltenzone (siehe Abb. 10) nur bei günstigen Wetterverhältnissen zu empfehlen — in einem schneearmer Winter sind Schneebrücken über Spalten beispielsweise grundsätzlich schwächer [31]. Sie kann jedoch ansonsten ohne grössere alpintechnische Probleme begangen werden.

Auch bei den Touren auf den Galenstock sowie den Dammastock werden eher einer Hochtour entsprechende Spurwahlen getroffen. In der Praxis sind diese mit Skieren mangels einer attraktiven Abfahrt vom Skidepot aus keine Trendtouren-Kandidaten. (Für diese Routen siehe Anhang.....)

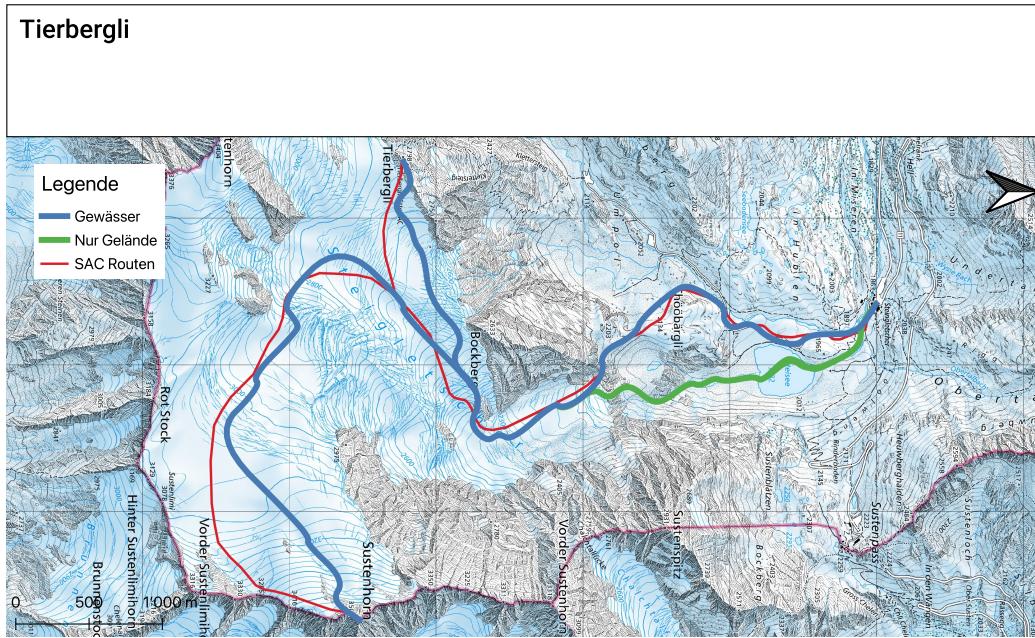


Abb. 7: Tour vom Steingletscher zu der Tierberglihütte SAC und dem Sustenhorn,
Basislayer: swisstopo

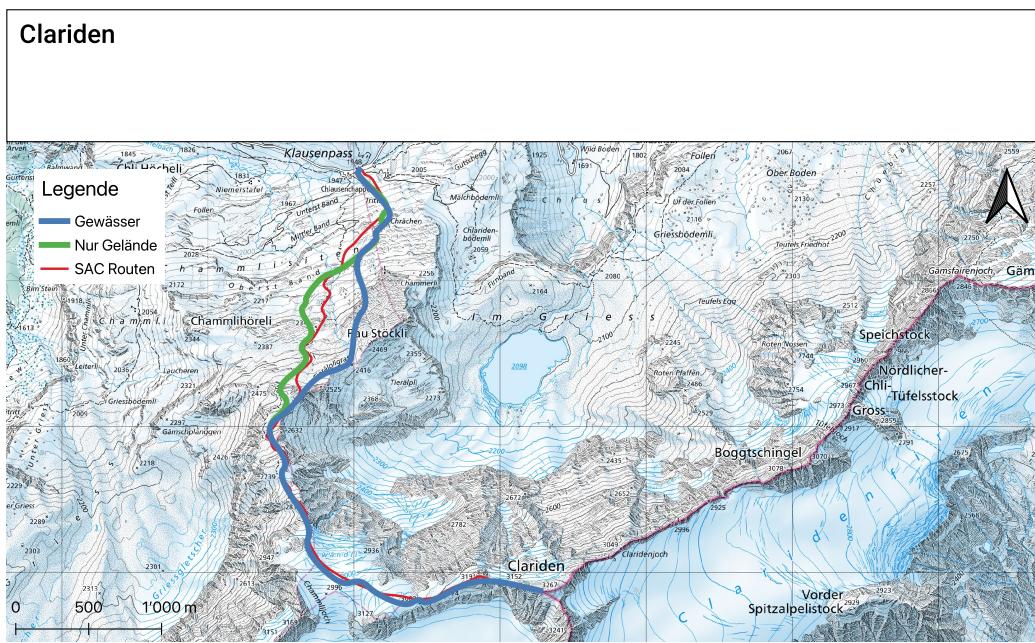


Abb. 8: Geplante Tour von der Klausenpass-Passhöhe auf den Clariden,
Basislayer: swisstopo

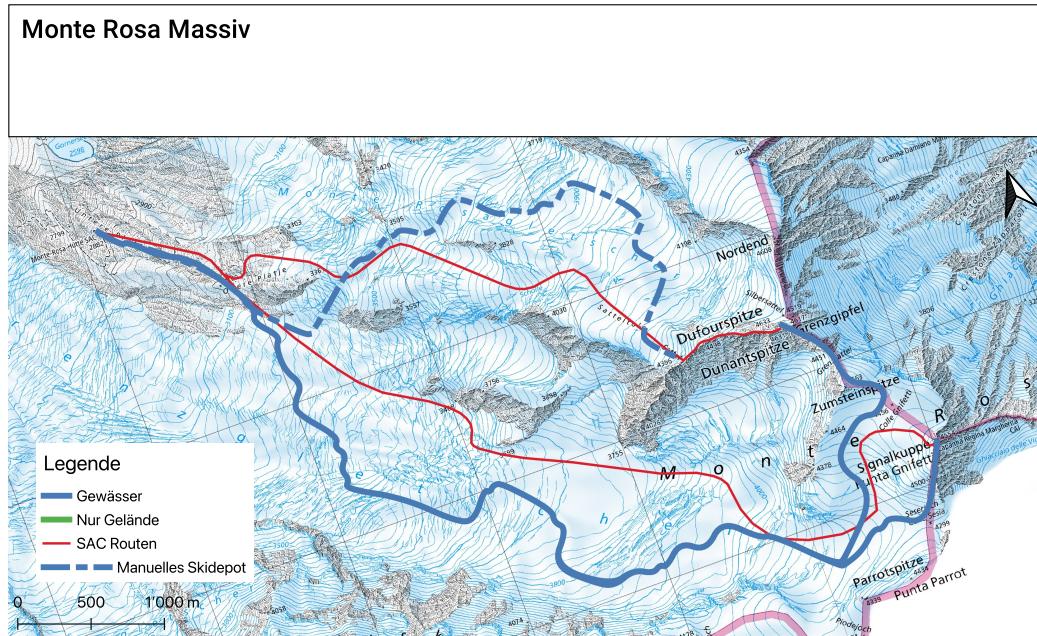


Abb. 9: Geplante Tour von der Monte-Rosa-Hütte SAC auf Dufourspitze und Signalkuppe,
Basislayer: swisstopo

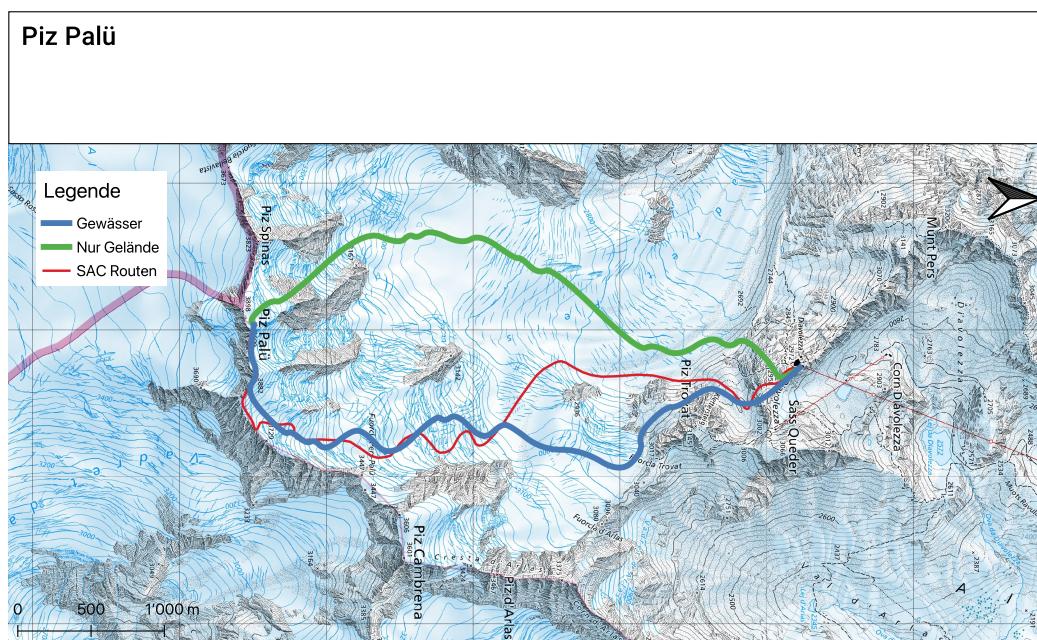


Abb. 10: Geplante Tour von der Diavolezza auf den Piz Palü
Basislayer: swisstopo

2.2 Methodische Reflexion

2.2.1 Versionierung, Backup und Archiv mit Git

2.2.2 Verworfene Variante

2.2.3 GIS

2.2.4 Verfassen mit L^AT_EX

2.2.5 Evaluation

3 Schlusswort, Fazit und Diskussion

Literatur

1. BACHMANN, Anita. *Corona macht Skitouren populärer — sac-cas.ch* [<https://www.sac-cas.ch/de/ausbildung-und-sicherheit/corona-macht-skitouren-populaerer-24680/>]. 2020. [Accessed 10-05-2024].
2. DR. ZWEIFEL, Benjamin. *Winterbericht 2023/24 — slf.ch* [<https://www.slf.ch/de/lawinenbulletin-und-schneesituation/winterberichte/winterbericht-202324>]. 2024. [Accessed 10-05-2024].
3. SCHMUDLACH, Günter. *Reduktionsmethoden — info.skitourenguru.ch* [<https://info.skitourenguru.ch/index.php/reduktionsmethoden>]. [Accessed 10-05-2024].
4. WINKLER, Kurt. *Bergsport Winter: Technik / Taktik / Sicherheit*. SAC-Verlag Schweizer Alpen-Club, 2023. ISBN 978-3-85902-488-5.
5. SCHNEE- UND LAWINENFORSCHUNG SLF, WSL-Institut für. *Lawinentypen — slf.ch* [<https://www.slf.ch/de/lawinenbulletin-und-schneesituation/wissen-zum-lawinenbulletin/lawinentypen/>]. [Accessed 10-05-2024].
6. GMBH, Ortovox Sportartikel. *Safety Academy Lab Snow* [<https://www.ortovox.com/de/safety-academy-lab-snow/01-lawinen-basics/lawinenbildende-faktoren>]. [Accessed 10-05-2024].
7. HARVEY, Stephan; RHYNER, Hansueli; DÜRR, Lukas; SCHWEIZER, Jürg; HENNY, Hans Martin. *Achtung Lawinen!* [<https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:31985/datastream/PDF>]. 2022. [Accessed 10-05-2024].
8. SCHNEE- UND LAWINENFORSCHUNG SLF, WSL-Institut für. *Typische Lawinenprobleme — slf.ch* [<https://www.slf.ch/de/lawinenbulletin-und-schneesituation/wissen-zum-lawinenbulletin/typische-lawinenprobleme/>]. [o. D.]. [Accessed 10-05-2024].
9. SCHNEE- UND LAWINENFORSCHUNG SLF, WSL-Institut für. *Europäische Lawinengefahrenskala mit Empfehlungen und Ergänzungen* [https://www.slf.ch/fileadmin/user_upload/SLF/Lawinenbulletin_Schneesituation/Wissen_zum_Lawinenbulletin/Gefahrenstufen/Gefahrenskala-www_Komplettversion_DEU.pdf]. [o. D.]. [Accessed 10-05-2024].
10. MUNTER, Werner. *3x3 Lawinen*. Athesia-Tappeiner Verlag, 2016. ISBN 978-88-7073775-2.
11. SPIES, Andi. *3x3-Filtermethode* [<https://www.redbull.com/ch-de/kleine-lawinenkunde-teil-8-3x3-filtermethode>]. 2017. [Accessed 08-05-2024].
12. WINKLER, Kurt. *Bergsport Winter: Technik / Taktik / Sicherheit*. SAC-Verlag Schweizer Alpen-Club, 2023. ISBN 978-3-85902-488-5.
13. SWISSTOPO, Bundesamt für Landestopografie. *Die Digitalisierung der Landestopografie (1960 - 1980) — swisstopohistoric.ch* [[https://www.swisstopohistoric.ch/de/archiv/die-digitalisierung-der-landestopografie-\(1960-1980\)-126.html](https://www.swisstopohistoric.ch/de/archiv/die-digitalisierung-der-landestopografie-(1960-1980)-126.html)]. [Accessed 08-05-2024].
14. SWISSTOPO, Bundesamt für Landestopografie. *SwissAlti3d Produktinformation* [<https://backend.swisstopo.admin.ch/fileservice/sdweb-docs-prod-swisstopo-ch-files/files/2023/11/14/6d40e558-c3df-483a-bd88-99ab93b88f16.pdf>]. 2022. [Accessed 08-05-2024].
15. DER BUNDESRAT, Informationsdienst EDI. *Bundesrat will die Nutzung offener Verwaltungsdaten stärker fördern — admin.ch* [<https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-73188.html>]. 2018. [Accessed 08-05-2024].

16. QGIS ASSOCIATION. *QGIS.org, QGIS Geographic Information System*. [<http://www.qgis.org>]. 2024.
17. DIJKSTRA, Edsger W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*. 1959, Jg. 1, Nr. 1, S. 269–271.
18. HART, Peter; NILSSON, Nils; RAPHAEL, Bertram. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968, Jg. 4, Nr. 2, S. 100–107. Abger. unter DOI: [10.1109/tssc.1968.300136](https://doi.org/10.1109/tssc.1968.300136).
19. CANTRELL, Cyrus D. *Modern mathematical methods for physicists and engineers*. Cambridge University Press, 2000.
20. NAISMITH, William W. Excursions. Cruach Ardran, Stobinian, and Ben More". *Scottish Mountaineering Club Journal*. 1892, Jg. 2, Nr. 3. [Accessed 11-08-2024].
21. HORN, Berthold. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*. 1981, Jg. 69, S. 14–47. Abger. unter DOI: [10.1109/PROC.1981.11918](https://doi.org/10.1109/PROC.1981.11918).
22. THORNE, Colin et al. Terrain analysis for quantitative description of zero-order basins. 1987.
23. TAGUE, Doug McIlroy; E. N. Pinson; B. A. Unix Time-Sharing System: Foreword. *The Bell System Technical Journal*. 1978, Jg. 57, Nr. 6.
24. GDAL/OGR CONTRIBUTORS. *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. Open Source Geospatial Foundation, 2024. Abger. unter DOI: [10.5281/zenodo.5884351](https://doi.org/10.5281/zenodo.5884351).
25. SCHMUDLACH, Günther. *Avalanche Risk Property Dataset (ARPD) User Manual* [https://info.skitourenguru.ch/download/data/ARPD_Manual_3.1.2.pdf]. 2024. [Accessed 11-08-2024].
26. VUE.JS DEVELOPERS. *Vue.js - The Progressive JavaScript Framework*. 2024. Auch verfügbar unter: <https://vuejs.org/guide/introduction.html>. [Accessed 16-08-2024].
27. MAPLIBRE GL JS CONTRIBUTORS. *MapLibre GL JS*. 2024. Auch verfügbar unter: <https://maplibre.org/maplibre-gl-js/docs/>. [Accessed 16-08-2024].
28. SWISSTOPO, Bundesamt für Landestopografie. *Base Map Produktinformation* [<https://www.swisstopo.admin.ch/de/webkarten-base-map>]. 2024. [Accessed 16-08-2024].
29. MAIER, Martin. *Zentralschweizer Voralpen und Alpen: Einsiedeln bis Gotthard*. Weber verlag, 2015. ISBN 978-3-85902-374-1.
30. WÄLTI, Thomas; LEUZINGER, Samuel. *Skitourenführer Glarus St. Gallen Appenzell*. Weber Verlag, 2018.
31. *Erhöhtes Risiko von Spaltenstürzen bei Skihochtouren / Bergsteigen.com — bergsteigen.com* [<https://www.bergsteigen.com/news/neuigkeiten/erhoehtes-risiko-von-spaltenstuerzen-bei-skihochtouren/>]. 2016. [Accessed 16-08-2024].

Abbildungsverzeichnis

1	Die 5 Europäischen Lawinengefahrstufen in einem Graph	2
2	GRM-Karte [7]	3
3	3 × 3-Ausschnitt von Höhen aus einem DEM und deren Benennung	5
4	Graph der Risikofunktion $r(\rho)$ für $0 \leq \rho \leq 90$ bei prognostizierter Gefahrenstufe $3=$	7
5	QGIS-Erweiterung «LeastCostWalk» in der grafischen Oberfläche von QGIS . . .	8
6	Nutzeroberfläche	10
7	Tour vom Steingletscher zu der Tierberglihütte SAC und dem Sustenhorn, Basislayer: swisstopo	12
8	Geplante Tour von der Klausenpass-Passhöhe auf den Clariden, Basislayer: swisstopo	12
9	Geplante Tour von der Monte-Rosa-Hütte SAC auf Dufourspitze und Signalkuppe, Basislayer: swisstopo	13
10	Geplante Tour von der Diavolezza auf den Piz Palü Basislayer: swisstopo	13