

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. Bestehende Referenzsysteme	1
2. Grundlagen der Lawinenkunde	1
2.1. Analytische vs. Praktische Lawinenkunde	1
2.2. Lawinentypen	1
2.3. Typische Lawinenprobleme	2
2.4. Lawinenlagebericht (Bulletin) & Gefahrenstufen	3
2.5. Lawinenbildende Faktoren	4
2.6. Schema 3×3	4
2.7. Grafische Reduktionsmethode & Relevante Geländefaktoren	5
2.8. Unfalldaten & Begehung	5
3. Geoinformatische Grundlagen	6
3.1. Digitale Höhenmodelle	6
3.2. Digitale Landschaftmodelle	6
3.3. GIS	6
3.4. Dijkstra's Algorithmus und A*	7
3.5. Naismith'sche Regel	7
3.6. Berechnung von topographischen Oberflächenfaktoren	7
4. Methodik	10
4.1. Herunterladen des Höhenmodells	10
4.2. Erstellung von Risikokarten	10
4.3. Parallele Berechnungen	11
4.4. Einbrennen von Gewässern und Brücken	11
4.5. QGIS-Plugin LeastCostWalk	11
4.6. Server Deployment mit Docker	12
4.7. 3D-Karte im Webbrowser	12
5. Resultat	14
6. Diskussion	14
6.1. Modellevaluation	14
6.2. Einschränkungen des Modells	17
7. Methodische Reflexion	18
7.1. Versionsverwaltung, Backup und Archiv mit Git	18
7.2. Verworfene Variante	18
7.3. GIS	18
7.4. Verfassen mit L ^A T _E X	18
7.5. Evaluation	19

7.6. 3D-Karte & Webapp	19
8. Fazit & Schlusswort	20
9. Literatur	21
A. Abbildungsverzeichnis	23
B. Codebeispiele	I
B.1. Risikokarte	I
C. Evaluationsrouten	I
D. Lawinensimulation mit RAMMS::Avalanche	IX
E. It's not a bug, it's a feature	IX

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, wird das Risiko aus historischen Unfalldaten abgeleitet. 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 Beurteilung aufnehmen zu können.

Aus obigen Datengrundlagen können mittels vom Benutzer eingetragenen Start- & Zielkoordinaten sichere, bzw. risikooptimierte Routen automatisiert geplant werden. Die resultierenden Routen werden mit Literaturtouren aus SAC-legitinierten Tourenführern verglichen und gegenüber diesen bewertet.

¹Wie können Risikowerte berechnet werden

²Wie kann ein Computer diese Berechnungen effizient ausführen

Vorwort

Seit einigen Jahren, nicht zuletzt aufgrund 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?

³1. Oktober 2023 – 26. März 2024

1. Einleitung

1.1. Ziel der Arbeit

Es soll in erster Linie ein Computer-Modell entwickelt werden, welches aufgrund eines Höhenmodells eine möglichst defensive (risikominimierende) Aufstiegsroute plant. Als Erweiterung wird dieses Modell mit einer ansprechenden 3D-Karte als Hintergrundebene in einer Webapp zur Verfügung gestellt. Die vom Modell produzierten Touren werden mit Literaturrouten aus dem Tourenportal des SAC, bzw. aus diversen dort gesammelten Tourenführern verglichen und ihre Begehbarkeit kritisch überprüft.

1.2. Bestehende Referenzsysteme

- Andreas eisenhut Masterarbeit
- Skitourenguru

2. Grundlagen der Lawinenkunde

2.1. Analytische vs. Praktische Lawinenkunde

Lawinenprobleme lassen sich grundsätzlich aus zwei Perspektiven betrachten und vorhersagen: Einerseits auf Basis der Schneedecke, anderer seits 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. Daraus leiten wir die Entscheidung ab, weiter aufzusteigen oder umzukehren – diese Entscheidung steht in beiden Gebieten im Vordergrund.

2.2. Lawinentypen

Lawinen lassen sich anhand ihrer Auslösemechanismen, des Materials, das sie transportieren, und der spezifischen Bedingungen, unter denen sie entstehen, klassifizieren. Die wichtigsten Lawinentypen — Schneebrettlawinen, Lockerschneelawinen, Gleitschneelawinen (und Staublawinen) — unterscheiden sich in ihrer Entstehung, Dynamik und den daraus resultierenden Gefahren. Eine genaue Kenntnis dieser Unterschiede ist notwendig für die Lawinenkunde und das alpine Risikomanagement.

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 (Abgleiten erfolgt über mehrere Stunden oder Tage hinweg, zeigt sich gut durch sog. «Fischmäuler»)

Für unsere Zwecke interessieren uns an erster Stelle **Schneebrettlawinen** und an zweiter **Lockerschneelawinen**, da diese Lawinentypen für die meissten Unfälle mit Personenschaden 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 Fernalösung keine weitere Beachtung geschenkt.

2.3. Typische Lawinenprobleme

In der Lawinenkunde werden bestimmte Lawinenprobleme definiert, um die komplexen Zusammenhänge einfacher verständlich zu machen und die Risikoanalyse zu erleichtern. Diese typischen Lawinenprobleme umfassen verschiedene Szenarien, die besonders häufig auftreten und die Lawinengefahr massgeblich beeinflussen. Ein tiefes Verständnis dieser Probleme ist von Nöten, um in gefährdetem Gelände sicher unterwegs zu sein und präzise Entscheidungen in Bezug auf Lawinensicherheit zu treffen.

1. Neuschneeproblem [7]:
 - Frischer Neuschnee, welcher sich schlecht mit der darunterliegenden Schneeschichten verbunden hat.
 - Produziert 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
 - Triebsschnee verbindet sich leicht mit sich selbst, jedoch nicht mit darunterliegenden Schichten; ideale Voraussetzungen für ein Schneebrett
 - Gefahr durch Schneeverfrachtungen (z.B. auch Wechten)
 - Setzt sich innerhalb 2 bis 3 Tagen
3. Nassschneeproblem [7]:
 - Die Schneedecke wird durch eindringendes Wasser geschwächt

- Die erste Durchfeuchtung führt zu der bedeutendsten Schwächung
- Gefahr nach andauernden Regenperioden im Winter
- Typische Frühlingslawinen, steigende Gefahr im Verlauf des Tages mit steigender Temperatur
- 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]

2.4. Lawinenlagebericht (Bulletin) & Gefahrenstufen

Im Lawinenbulletin/Lawinenlagebericht, kurz LLB, werden die momentan am Berg zu erwartenden Lawinenprobleme (siehe 2.3) zusammengefasst und mit diversen zusätzlichen Datenprodukten ergänzt.

Abb. 1 zeigt ein Beispiel eines LLB Bulletins, wie dieses während dem Winter täglich erscheint.

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].

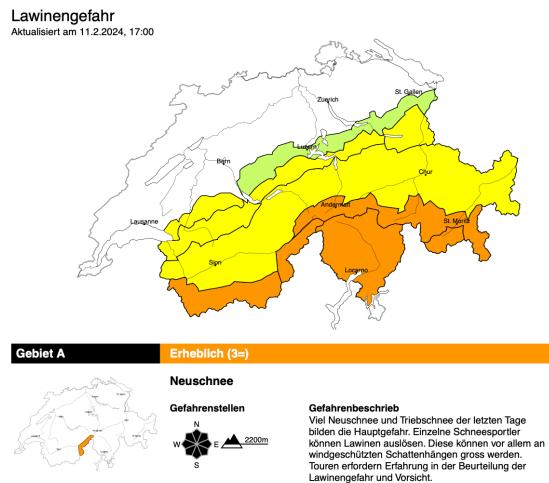


Abb. 1: Bulletin vom 12.2.24 [10]

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]. (Siehe Abb. 2)

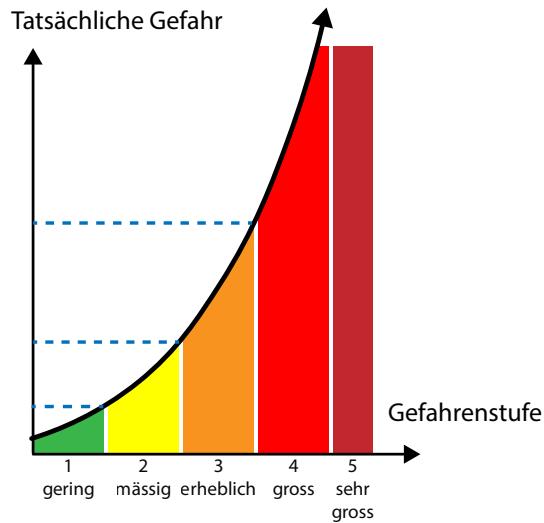


Abb. 2: Die 5 Europäischen Lawinengefahrstufen in einem Graph

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.

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 Personenschaden wurden durch Menschen ausgelöst) [6].

Weder die Verhältnisse 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.

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 [11]:

- 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 [11][12]:

- 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 [11][12]:

- 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

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 Ausgeprägtheit 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. 3) herausgelesen werden, ob das zu überprüfende Gelände problemlos, nur mit Vorsichtsmassnahmen oder gar nicht betreten werden darf.

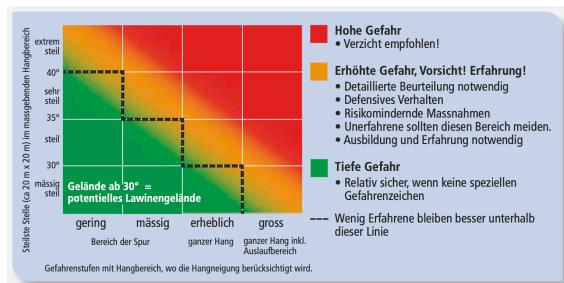


Abb. 3: GRM-Karte [7]

An der grafischen Reduktionsmethode wird oft kritisiert, dass sich zu stark auf die Hangneigung gestützt wird. Deshalb wird diese oft zusammen mit sog. «Mustern» gelehrt. Diese beschreiben einige Warnzeichen und wie diese das Risiko beeinflussen [7]. Letztendlich bleibt die GRM jedoch, wie der Name verrät, eine Reduktionsmethode — es werden selektiv die in die Auswertung einfließenden Parameter reduziert.

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. [13]

3. Geoinformatische Grundlagen

3.1. 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. [14]

Rufe nach einem engmaschigeren Modell brachten schliesslich unter anderem «DHM25» her vor, welches Daten in einer Auflösung von bereits 25 m mitbringt. [14]

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 stereokorrelierten Luftbildern abgeleitet [15]. 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 [16]. 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 komprimierte 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 km × 1 km grosse Kacheln unterteilt. [15]

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

3.2. 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.

3.3. 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 quelloffene Werkzeug QGIS [17] extensiv verwendet; unter anderem wurde eine eigene Analyse-Erweiterung entwickelt. QGIS wurde gegenüber anderen kommerziellen GIS-Lösungen gewählt, da diese oft schnell teuer verrechnet werden.

3.4. 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 [18].

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 $f(n) = g(n) + h(n)$. [19]

Als Heuristik wird im weiteren Verlauf der Arbeit die Taxi- bzw. Chebyshev-Distanz verwendet [20]. Der Beweis für die Zulässigkeit der Heuristik wird dem Leser als Übung überlassen.

3.5. 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 [21]. Beim Skitouren wird dabei je 4000 m Horizontaldistanz und 400 hm Vertikaldistanz eine Stunde Wegzeit gerechnet [4][21]. (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)

3.6. 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 :

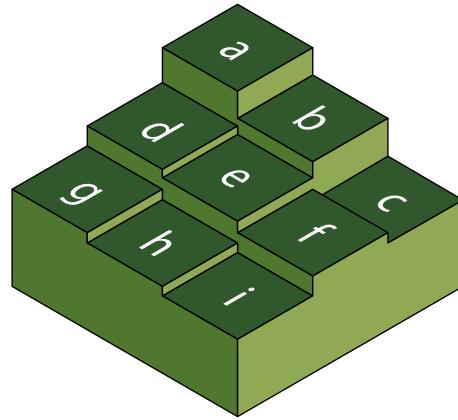


Abb. 4: 3×3 -Ausschnitt von Höhen aus einem DEM und deren Benennung

Hangneigung und Exposition nach [22]:

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

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

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 [23]:

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

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

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

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

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

(6) – (10) sind die Faktoren eines teilweisen Polynom vierten Grades [23]. Hangkrümmung c_{Plan} und c_{Profil} beschreiben, mit welchem Radius sich die Hangneigung parallel (Plankrümmung) bzw. senkrecht (Profilkrümmung) zur Exposition ändert:

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

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

4. 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 3.3) zu setzen — analog der UNIX-Philosophie [24]. Diese gilt als Orientierungshilfe, wie Software entworfen werden soll. Unter anderem soll zum Beispiel jeweils die einfachste, funktionale Lösung gewählt werden, Software modular aufgebaut sein oder nur einen Zweck erfüllen — und keine duplizierte Funktionalität enthalten [24]. Tausende Stunden Entwicklungsarbeit stecken bereits in GDAL [25] und QGIS [17], auf welchen gerne aufgebaut wurde.

4.1. Herunterladen des Höhenmodells

Wie bereits in 3.1 erwähnt, wird SwissAlti^{3D} in 1 km × 1 km großen Kacheln ausgeliefert, welche einzeln heruntergeladen und anschließend wieder vereint werden müssen [15]. 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)

4.2. Erstellung von Risikokarten

Als Grundlage für alle weiteren Schritte werden Risikokarten benötigt; ursprünglich hätten tatsächliche Lawinenabgänge 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 Geländeigenschaft den höchsten Korrelationsfaktor mit der Anzahl Lawinenereignisse bildet [26]. 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:

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

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. 5 für die resultierende Risikofunktion)

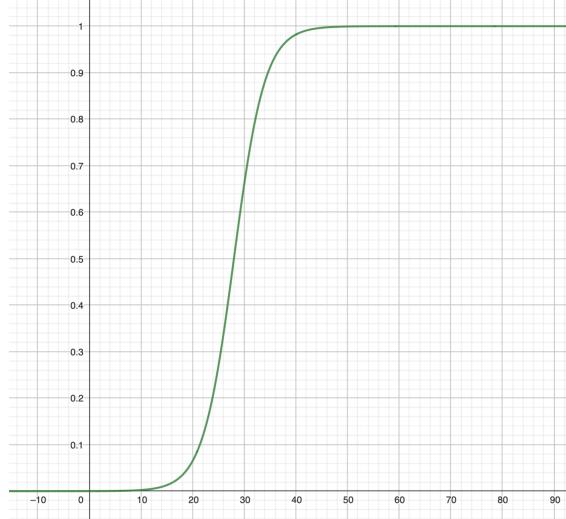


Abb. 5: Graph der Risikofunktion $r(\rho)$ für $0 \leq \rho \leq 90$ bei prognostizierter Gefahrenstufe 3=

4.3. Parallele Berechnungen

Um die Berechnung der Risikokarte effizient zu gestalten und alle auf dem Rechner verfügbaren Ressource zu verwenden, wird die Berechnung in kleinen Kacheln ausgeführt, 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.

4.4. 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 Abwegen ob eine Querung möglich ist, wurde aus Zeitgründen verzichtet.

4.5. 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 abzuwägen. 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. 6.

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.

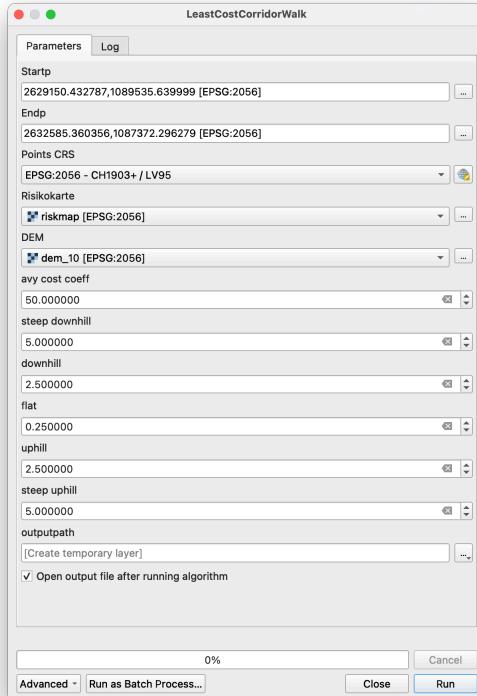


Abb. 6: QGIS-Erweiterung «LeastCostWalk» in der grafischen Oberfläche von QGIS

4.6. 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, dass auch andere Serverbetriebsysteme 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.

4.7. 3D-Karte im Webbrowser

Als Erweiterung zum reinen GIS-Modell wurde eine Webanwendung mittels Vue.js und MapLibre GL JS realisiert [27][28]. Als Basislayer für die Karte wurde das Layer «Base Map» von swisstopo verwendet, welches durch die Höhendaten von SwissAlti^{3D} in eine drei-dimensionale Form gebracht wurde [29][15]. 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

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

durch die Auswahl von Start- & Zielort sowie der gewünschten Modellvariante in Auftrag gegeben werden — innert ca. 20 s ist das Resultat anschliessen verfügbar und wird dem Nutzer direkt angezeigt.

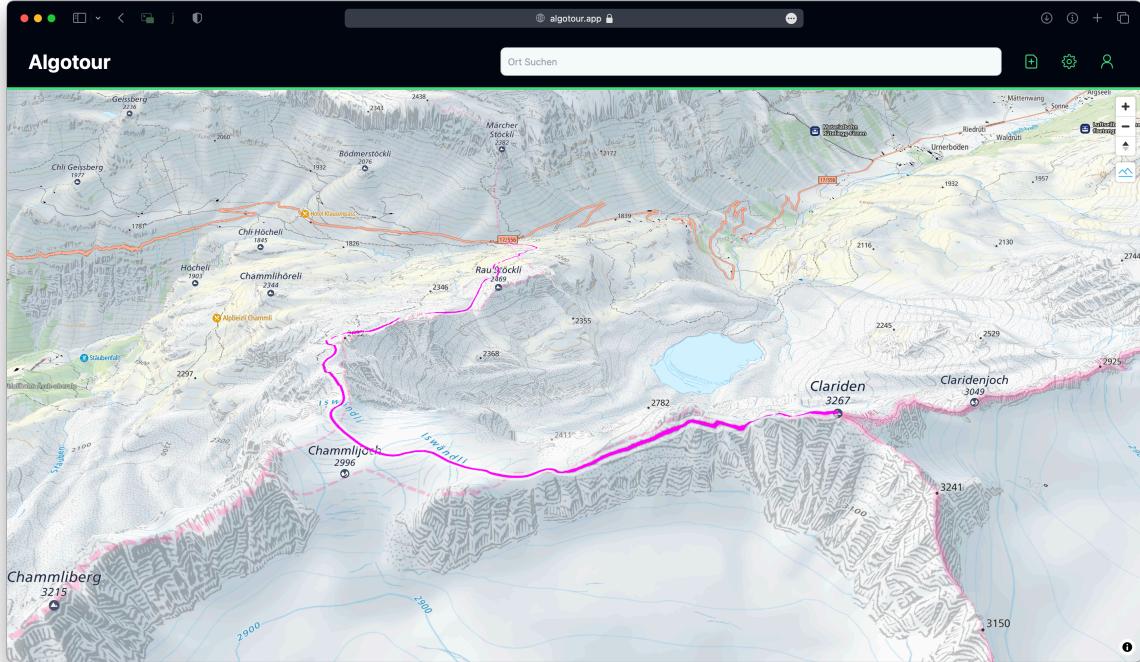


Abb. 7: Nutzeroberfläche der Webapp, Tour auf den Clariden

5. Resultat

Resultat ist eine Webapp, welche in allen modernen Webbrowsersn 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 eingebraunten Gewässern verwendet. Mit eigenen Touren kann auf <https://algotour.app> experimentiert werden.

6. Diskussion

6.1. 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 eingebraunten 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.

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 [30]. (Siehe Abb. 8)

Ebenso erreicht die Tour auf den Clariden in der Eigenevaluation eine Bestnote — Hier trumpft jedoch die nicht mit Gewässern ergänzte Karte (Siehe Abb. 9). 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 [31].

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 Spuranlage, 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. 10 «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. 11) nur bei günstigen Wetterverhältnissen zu empfehlen — in einem schneearmer Winter sind Schneebrücken über Spalten beispielsweise grundsätzlich schwächer [32]. 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 Skiern mangels einer attraktiven Abfahrt vom Skidepot aus keine Trendtouren-Kandidaten. (Für diese Routen siehe Anhang C)

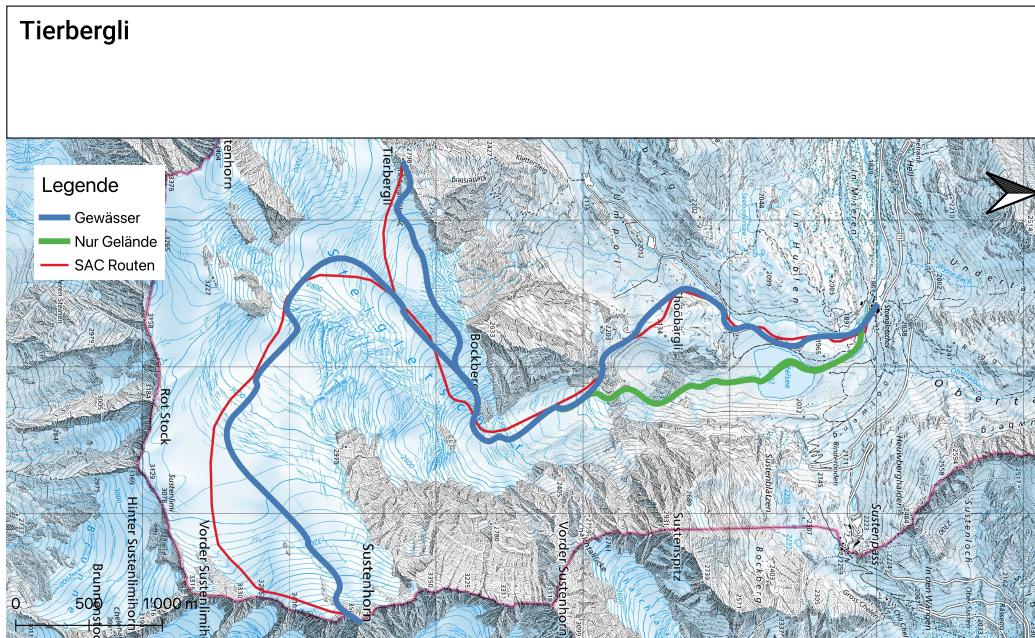


Abb. 8: Tour auf Tierberglihütte SAC und Sustenhorn ab Steingletscher,
Basislayer: swisstopo

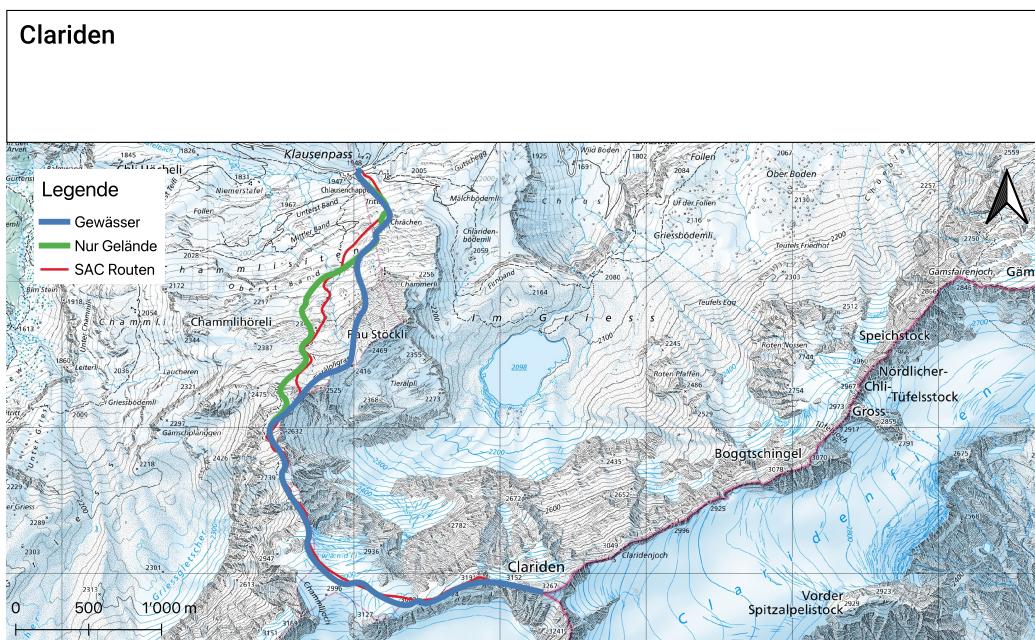


Abb. 9: Geplante Tour von der Klausenpass-Passhöhe auf den Clariden,
Basislayer: swisstopo

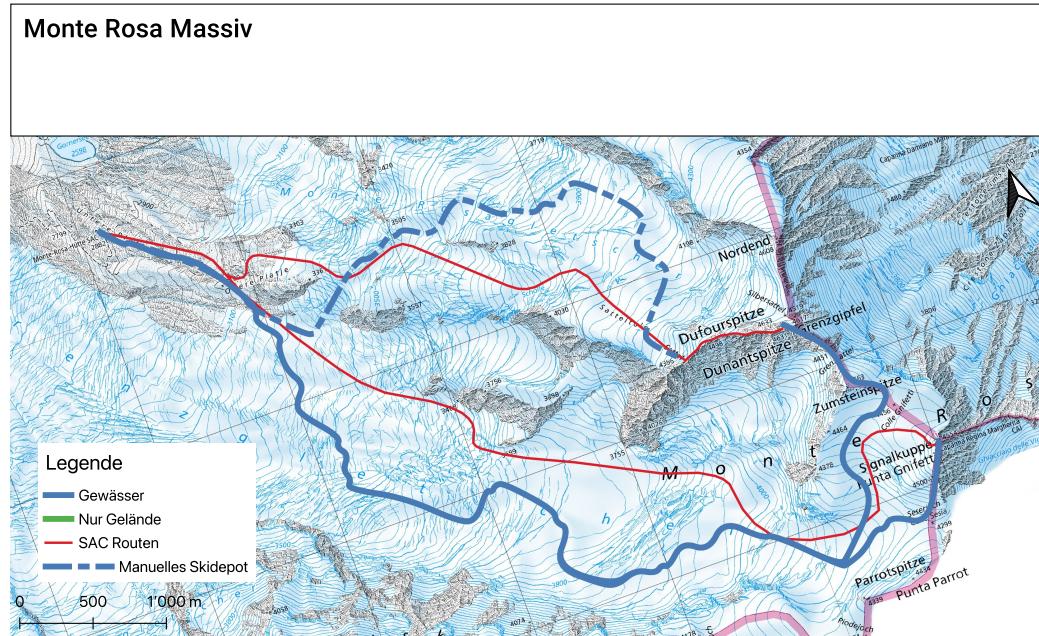


Abb. 10: Geplante Tour von der Monte-Rosa-Hütte SAC auf Dufourspitze und Signalkuppe,
Basislayer: swisstopo

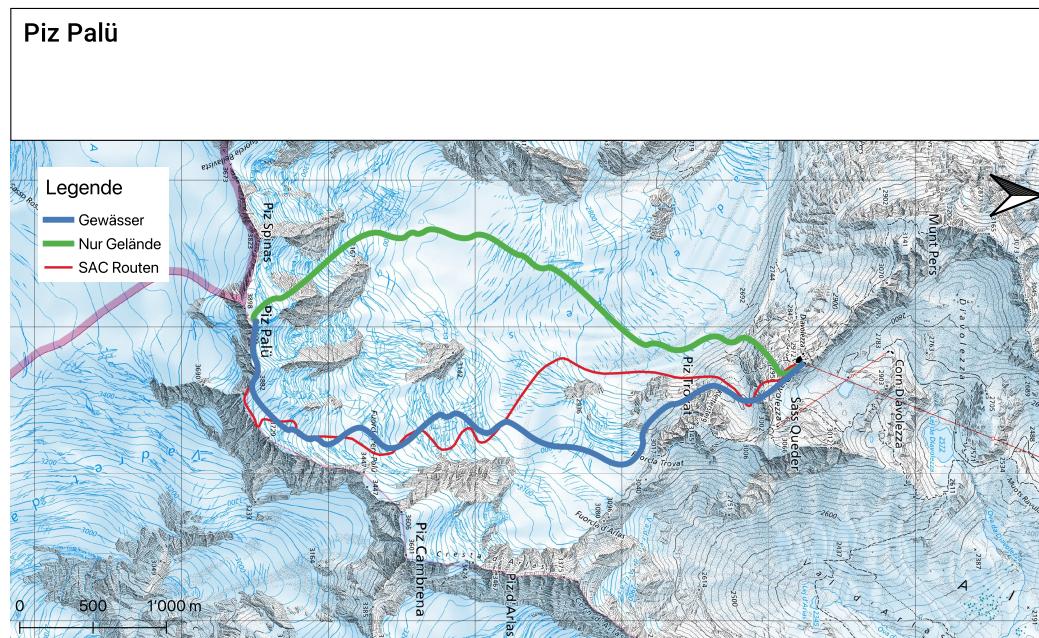


Abb. 11: Geplante Tour von der Diavolezza auf den Piz Palü
Basislayer: swisstopo

6.2. Einschränkungen des Modells

Die vom Modell verwendete Reduktionsmethode entspricht de-facto der GRM. So übernimmt diese Primär auch deren Schwächen. Es existieren mit der QRM eine Reduktionsmethode, welche ein umfassenderes Bild des Geländes beobachtet. [qrm] Leider lassen die Quellen keine vollständig einsatzfähige Reproduktion zu.

Ebenfalls leidet das Modell grundsätzlich unter einem Zielkonflikt. In der aktuellen Implementation kann das Modell theoretisch entscheiden, einen zu 100% tödlichen Abschnitt zu durchqueren, wenn die Wegersparnis gross genug ist. In der Praxis ist dies jedoch selten der Fall und wurde während der Evaluation nie beobachtet.

Ist ein Grat genug breit verzeichnet, wird dieser momentan mit einem Risikowert nahe von 0.00 ausgewiesen — ungeachtet der tatsächlichen Begehbarkeit. Hier gilt jedoch das Prinzip «Garbage in - garbage out» — die Datengrundlage lässt keine schlüssige Aussage über die Begehbarkeit von Graten zu.

6.3. Mögliche Verbesserungen

7. Methodische Reflexion

7.1. Versionsverwaltung, Backup und Archiv mit Git

In der Softwareentwicklung haben sich Softwareversionierungstools wie Git bereits bewährt. Mit diesen ist es möglich, laufende Veränderungen in Textdateien (bzw. Programmcode) zeitlich sortiert zu speichern. So kann auf verschiedenen Rechner an unterschiedlichen Versionen gearbeitet werden, welche anschliessend mit minimalem Aufwand wieder zusammengeführt (gemerged) werden können. Jede Änderung wird als «Commit» gespeichert — diese können mit einem kleinen Kommentar versehen werden. Man ist ausserdem frei darin, auf einen vorherigen Commit zurückzuspringen, sollte man mit einer Änderung nicht mehr zufrieden sein. Kurz: Zeitreise für Softwareentwicklung. In dieser Arbeit wurde jeglicher Programmcode sowie die Arbeit selbst in ein Git-Repository «eingechekkt». Dieses wurde auf Github synchronisiert, um ein sicheres Speichern aller Daten zu ermöglichen und einen Arbeitsverlust zu verhindern — was sich als absolut empfehlenswert herausgestellt hat. Speziell die Kombination von Git und L^AT_EX hat sich für das Verfassen einer Arbeit als mächtiger Arbeitsprozess bewährt.

7.2. Verworfene Variante

Die erste Variante, mit der Risikokarten hätten erstellt werden sollen, stellte sich als unpraktisch heraus. Aufgrund einer Quelle wurde eine 3D-Lawinensimulation implementiert, bzw. ein Versuch in deren Richtung unternommen. Die Physiksimulation könnte jedoch nicht korrekt implementiert werden — mangels des nötigen mathematischen geschicks⁵. Mit diesem hier nur kurz ausgeführten Unternehmen liesse sich bereits eine ganze Arbeit füllen, hier wurde der Versuch jedoch nach ca. einer Woche abgebrochen und eine einfachere Variante, die der GRM ähnelt, ausgewählt. Zwischenzeitliche wurde eine Lawinensimulation mittels RAMMS::Avalanche in Betracht gezogen, was jedoch aus praktischer Sicht sowie wegen dem eigentlichen Zweck des Werkzeuges (Gefahrenmodellierung von Infrastrukturprojekten mit grossen, seltenen Lawinenereignissen) auch nicht möglich war.

7.3. GIS

Der Versuch mitttels minimalen externen Werkzeugen zu arbeiten stellte sich schnell als mühsam heraus, trotzdem wurde erstaunlich lange daran festgehalten. Hier hätte noch schneller gewechselt werden können, grosse Fortschritte sind vor allem mit dem Wechsel von rohem Python auf QGIS gekommen. QGIS ist speziell geeignet, da es ein quelloffenes und erweiterbares Werkzeug ist. So konnte nicht vorhandene Funktionalität einfach ergänzt werden.

7.4. Verfassen mit L^AT_EX

Bereits in der Projektarbeit des Autors hat sich gezeigt, dass Microsoft Word ein denkbar ungünstiges Werkzeug zum Verfassen von Arbeiten ist. Nach kurzem einarbeiten in grundsätzlichen Befehle, vielen Google-Anfragen und anfänglichen Kopfschmerzen zeigte L^AT_EX schnell weshalb es in der wissenschaftlichen Gesellschaft so beliebt ist. Eine stärkere Empfehlung im Handbuch Projekte wäre seitens der Schule wünschenswert.

⁵Numerische Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen entziehen sich der Expertise des Autoren

7.5. Evaluation

In der ersten Fassung des Projektvertrages sollte die Evaluation anhand von Expertenmeinungen stattfinden. Dies wurde im Verlauf der Arbeit verworfen, da eine hohe Expertise in der Bedienung des Modells nötig ist, um brauchbare Parameter auszuwählen. Die Zeit die für erwerben der nötigen GIS-Kenntnisse, auswählen von Routen und evaluieren konnte Freiwilligen nicht zugemutet werden. Nach Vorschlag der Betreuungsperson wurde schliesslichi die Variante mit Literaturrouten gewählt.

7.6. 3D-Karte & Webapp

Dank des hohen Standards der bei der Entwicklung von MapLibre GL JS [28] durch die Beitragenden eingehalten wird, konnte innert wenigen Minuten eine erste Version der 3D-Karte erstellt werden. Swisstopo liefert ihre Grundlagenkarte ebenfalls bereit in einem Format, das bereits kompatibel ist. Das Grundgerüst der Webapp wurde in Vue.js implementiert, was ich im NAWiMAT-Praktikum erlernt habe. Diese Wahl stellte sich als sehr günstig heraus, auch wenn eine minimale Adaptionsschicht zwischen Vue und MapLibre zusätzlich implementiert werden musste. Die grössten Schwierigkeiten stellten sich beim umwandeln der Höhendaten. Diese mussten von GeoTIFF in ein sog. RGB-DEM umgewandelt werden. Von Höhe als direktem Rasterwert zu einem RGB-Bild, in welchem die Höhe in Farbwerte umgewandelt wird. Durch das verändern der Bildgrösse, treffen die neuen Pixel nicht genau auf die alten. Für Bilddaten würde man nun bilinear interpolieren, d.h. die Farbwerte der 4 umliegenden Pixel je nach Distanz gewichtet verrechnen. Probiert man dies mit RGB-DEM-Bildern, verfälscht man die höhen an Kanten bei denen zum ersten mal blaue Pixel relevant werden (Es entstehen falschem, hohe Spitzen). Die Lösung für dieses eigentlich triviale Problem bestand darin, QGIS mittels CLI-Flag mitzuteilen nur das nächste Pixel anstelle der nächsten 4 zu verwenden.

8. Fazit & Schlusswort

Das in dieser Arbeit präsentierte Werkzeug kann nicht ohne weiteres bzw. nur mit entsprechender alpinistischer Ausbildung verwendet werden. Um zuverlässig begehbarer Routen zu produzieren, ist ein komplexeres System, welches das Gelände anders als nur mit GRM und Anstrengungswerten «begutachtet» notwendig. Nebst Lawinengefahr ist auch die Absturzgefahr ein nicht zu unterschätzendes Kriterium. Das Werkzeug zeigt jedoch Potential, schon dieses zugegebenermaßen ungeschickte Modell kann in einigen Gebieten auftrumpfen. Das einstellen der Gewichtungsparameter nahm einige Zeit in anspruch und es stellte sich als Schwierig heraus, eine gute Balance zwischen Risikominimierender Routenwahl sowie Wegdistanz zu finden. Die grosse Schwäche des Computers ist die fehlende Intuition; der gesunde Menschenverstand, mag er manchmal auch emotional sein, behält zumindest momentan beim Tourenplanen noch die Oberhand.

Nebst den praktischen Einschränkungen kann auch über die philosophischen Hintergründe geschritten werden, angesicht des viralen Hypes rund um AI-Tools und Automatisierung — wollen wir unsere Kunstformen und Selbstausdrücke an Maschinen übergeben? Jede Tour ist letztenendes der Ausdruck des Verlangen eines Menschen nach Abenteuer, nach Entdeckung und eigenen Erfahrungen. Ich persönlich möchte, das mir ein Computer die Arbeit abnimmt, damit ich mich anderen Dingen wie Kunst und Sport widmen kann — nicht andersherum. Ich möchte mit einer kurzen Anekdote schliessen:

«Zu Risiken und Nebenwirkungen fragen Sie Ihren Berg- oder Tourenführer»

9. 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. WSL-INSTITUT FÜR SCHNEE- UND LAWINENFORSCHUNG SLF. *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. WSL-INSTITUT FÜR SCHNEE- UND LAWINENFORSCHUNG SLF. *SLF Archiv* [<https://www.slf.ch/de/lawinenbulletin-und-schneesituation/archiv/>]. 2024. [Accessed 19-08-2024].
11. MUNTER, Werner. *3x3 Lawinen*. Athesia-Tappeiner Verlag, 2016. ISBN 978-88-7073775-2.
12. SPIES, Andi. *3x3-Filtermethode* [<https://www.redbull.com/ch-de/kleine-lawinenkunde-teil-8-3x3-filtermethode>]. 2017. [Accessed 08-05-2024].
13. WINKLER, Kurt. *Bergsport Winter: Technik / Taktik / Sicherheit*. SAC-Verlag Schweizer Alpen-Club, 2023. ISBN 978-3-85902-488-5.
14. 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].
15. 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].

16. 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].
17. QGIS ASSOCIATION. *QGIS.org, QGIS Geographic Information System.* [<http://www.qgis.org>]. 2024.
18. DIJKSTRA, Edsger W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik.* 1959, Jg. 1, Nr. 1, S. 269–271.
19. 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).
20. CANTRELL, Cyrus D. *Modern mathematical methods for physicists and engineers.* Cambridge University Press, 2000.
21. NAISMITH, William W. Excursions. Cruach Ardran, Stobinian, and Ben More". *Scottish Mountaineering Club Journal.* 1892, Jg. 2, Nr. 3. [Accessed 11-08-2024].
22. 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).
23. THORNE, Colin et al. Terrain analysis for quantitative description of zero-order basins. 1987.
24. TAGUE, Doug McIlroy; E. N. Pinson; B. A. Unix Time-Sharing System: Foreword. *The Bell System Technical Journal.* 1978, Jg. 57, Nr. 6.
25. 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).
26. 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].
27. VUE.JS DEVELOPERS. *Vue.js - The Progressive JavaScript Framework.* 2024. Auch verfügbar unter: <https://vuejs.org/guide/introduction.html>. [Accessed 16-08-2024].
28. MAPLIBRE GL JS CONTRIBUTORS. *MapLibre GL JS.* 2024. Auch verfügbar unter: <https://maplibre.org/maplibre-gl-js/docs/>. [Accessed 16-08-2024].
29. SWISSTOPO, Bundesamt für Landestopografie. *Base Map Produktinformation* [<https://www.swisstopo.admin.ch/de/webkarten-base-map>]. 2024. [Accessed 16-08-2024].
30. MAIER, Martin. *Zentralschweizer Voralpen und Alpen: Einsiedeln bis Gotthard.* Weber verlag, 2015. ISBN 978-3-85902-374-1.
31. WÄLTI, Thomas; LEUZINGER, Samuel. *Skitourenführer Glarus St. Gallen Appenzell.* Weber Verlag, 2018.
32. *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].

A. Abbildungsverzeichnis

1.	Bulletin vom 12.2.24 [10]	3
2.	Die 5 Europäischen Lawinengefahrstufen in einem Graph	4
3.	GRM-Karte [7]	5
4.	3×3 -Ausschnitt von Höhen aus einem DEM und deren Benennung	8
5.	Graph der Risikofunktion $r(\rho)$ für $0 \leq \rho \leq 90$ bei prognostizierter Gefahrenstufe 3=	11
6.	QGIS-Erweiterung «LeastCostWalk» in der grafischen Oberfläche von QGIS	12
7.	Nutzeroberfläche der Webapp, Tour auf den Clariden	13
8.	Tour auf Tierberglihütte SAC und Sustenhorn ab Steingletscher, Basislayer: swisstopo	15
9.	Geplante Tour von der Klausenpass-Passhöhe auf den Clariden, Basislayer: swisstopo	15
10.	Geplante Tour von der Monte-Rosa-Hütte SAC auf Dufourspitze und Signalkuppe, Basislayer: swisstopo	16
11.	Geplante Tour von der Diavolezza auf den Piz Palü Basislayer: swisstopo	16
12.	Python Code zur Produktion von Risikokarten aus Neigungskarte	I

Alle Abbildungen ohne Kurzverweis in der Beschriftung stammen aus eigener Hand. Die Hintergrundkarten stammen wo nicht anders erwähnt aus der «LK-Winter» von swisstopo.

B. Codebeispiele

B.1. Risikokarte



```
import riomucho
import numpy as np

def riskfn(slope):
    return np.sqrt(1 / (1 + np.exp(-(slope-28.0) / 3.0))) # + np.power((1/45)*slope, 2)

def calculate_grm_risk(slope):
    # return np.maximum(expterm, expterm + ((slope/300) - 0.15))
    return riskfn(slope) / riskfn(90.0)

def read_function(data, window, ij, g_args):
    output = calculate_grm_risk(data[0])
    return output

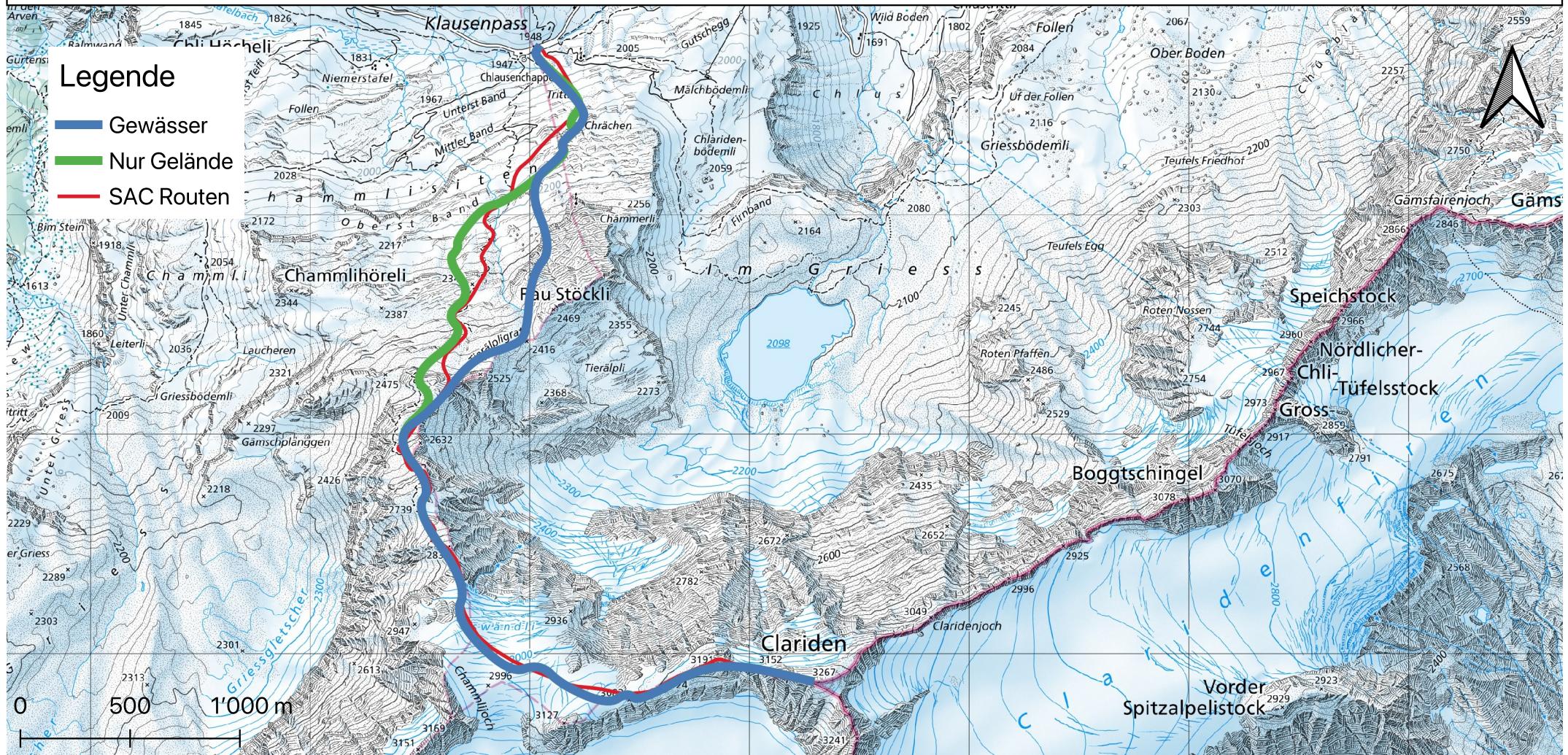
def main():
    # Open w/ simple read mode, and work in parallel.
    with riomucho.RioMucho(
        ['./riskmap.tif', read_function, global_args={}],
        ) as rm:
        rm.run(4)

if __name__ == '__main__':
    main()
```

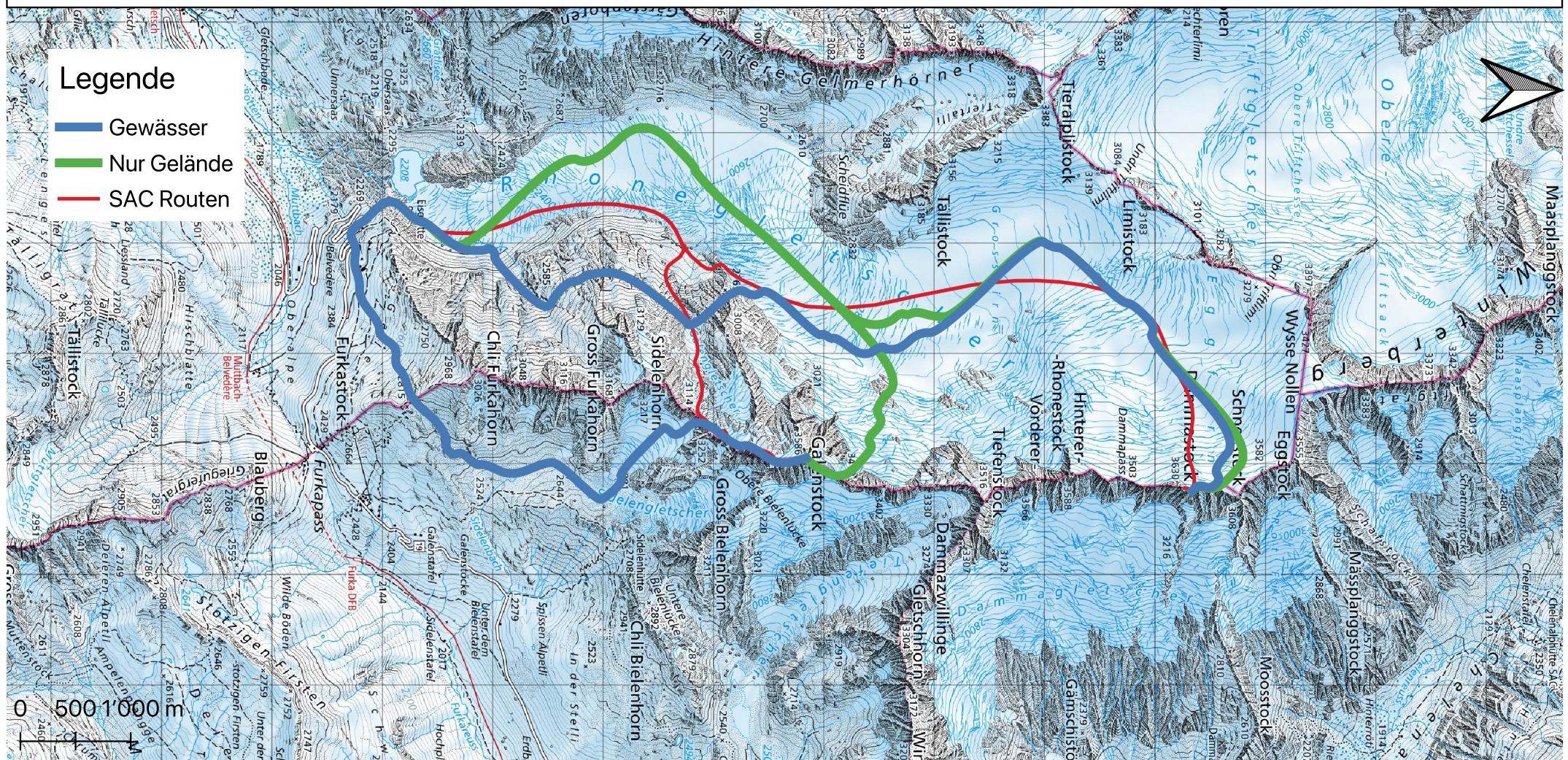
Abb. 12: Python Code zur Produktion von Risikokarten aus Neigungskarte

C. Evaluationsrouten

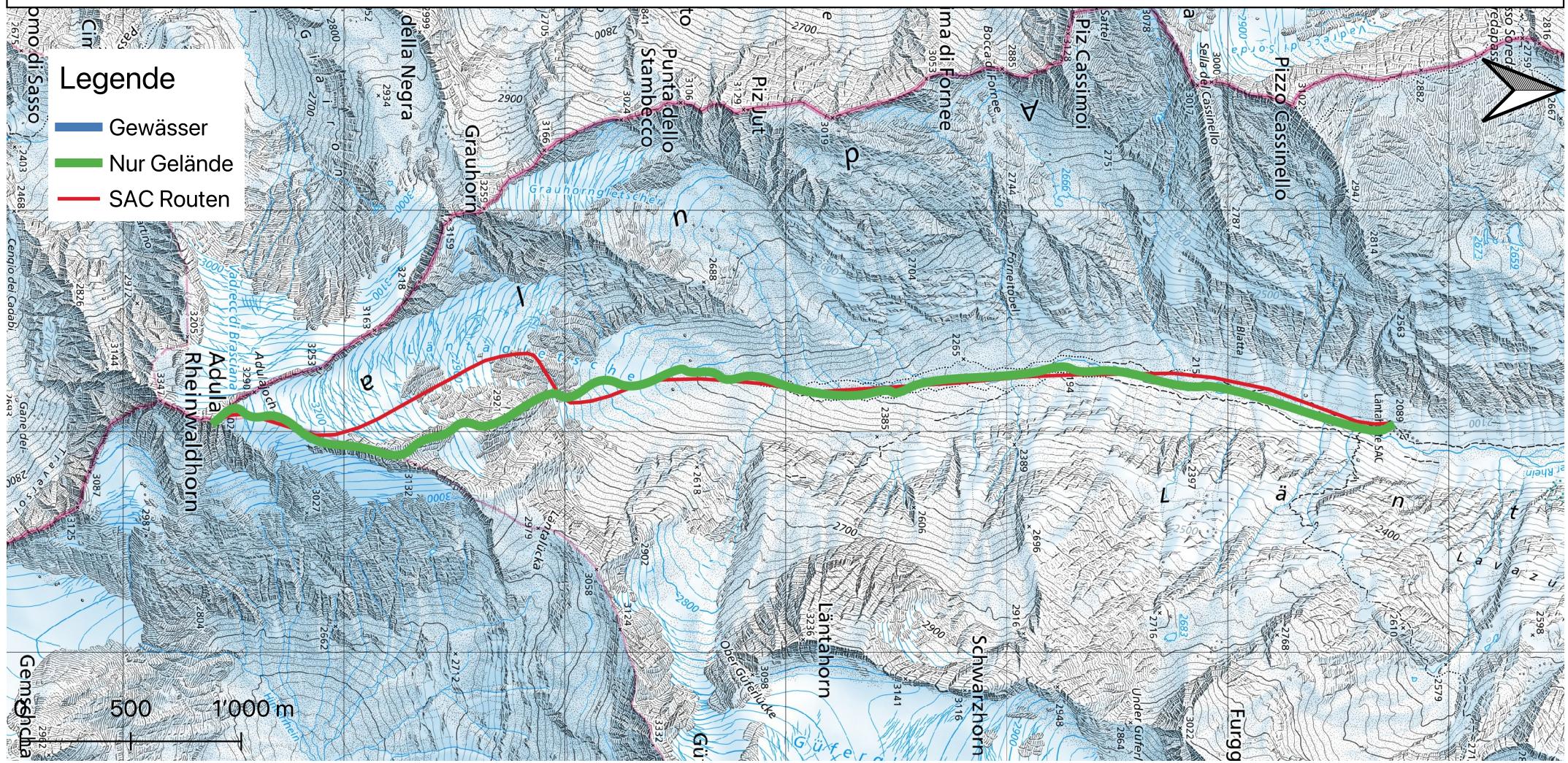
Clariden



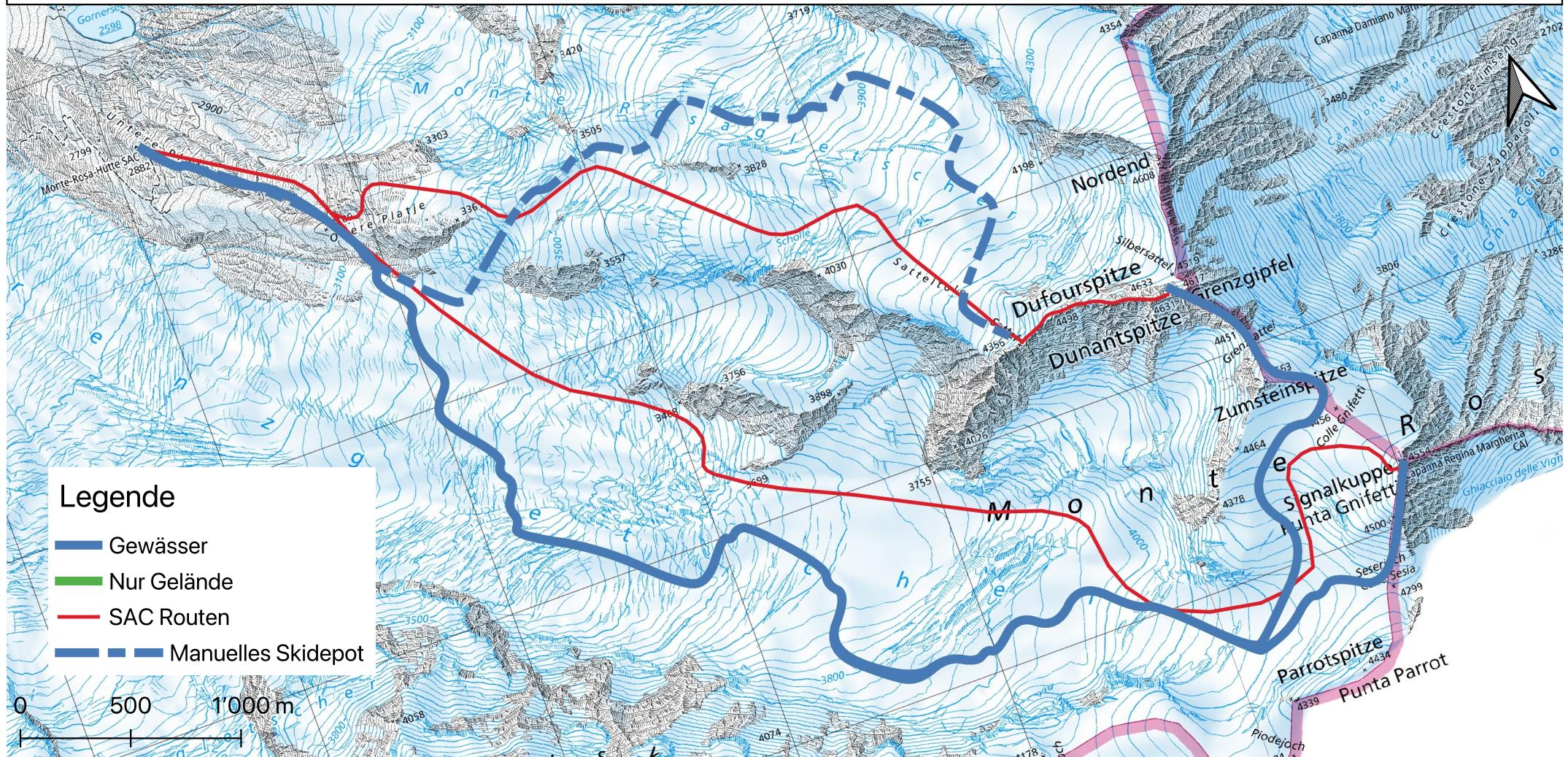
Furka - Galenstock & Dammastock



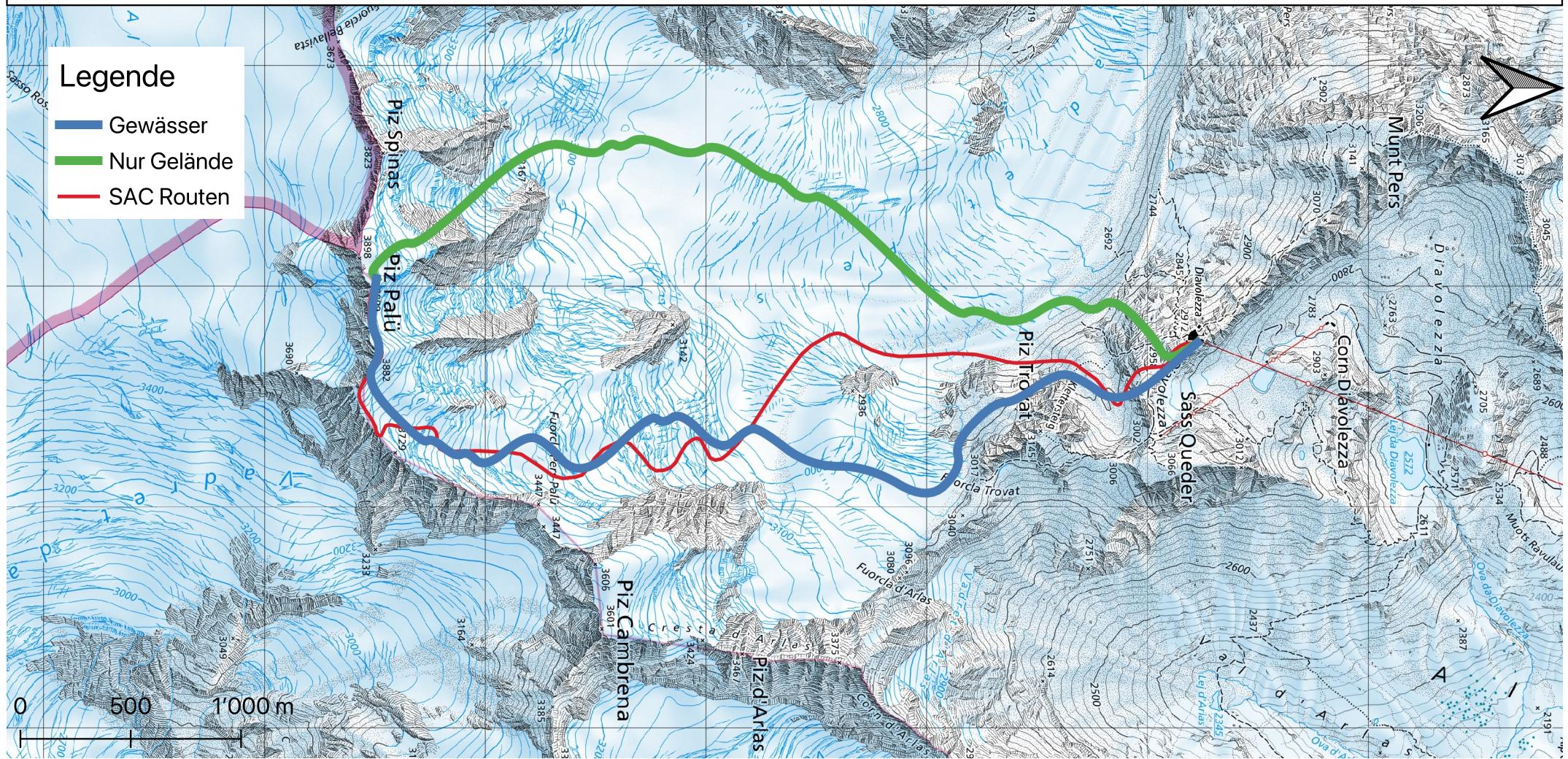
Länta - Rheinwaldhorn/Adula



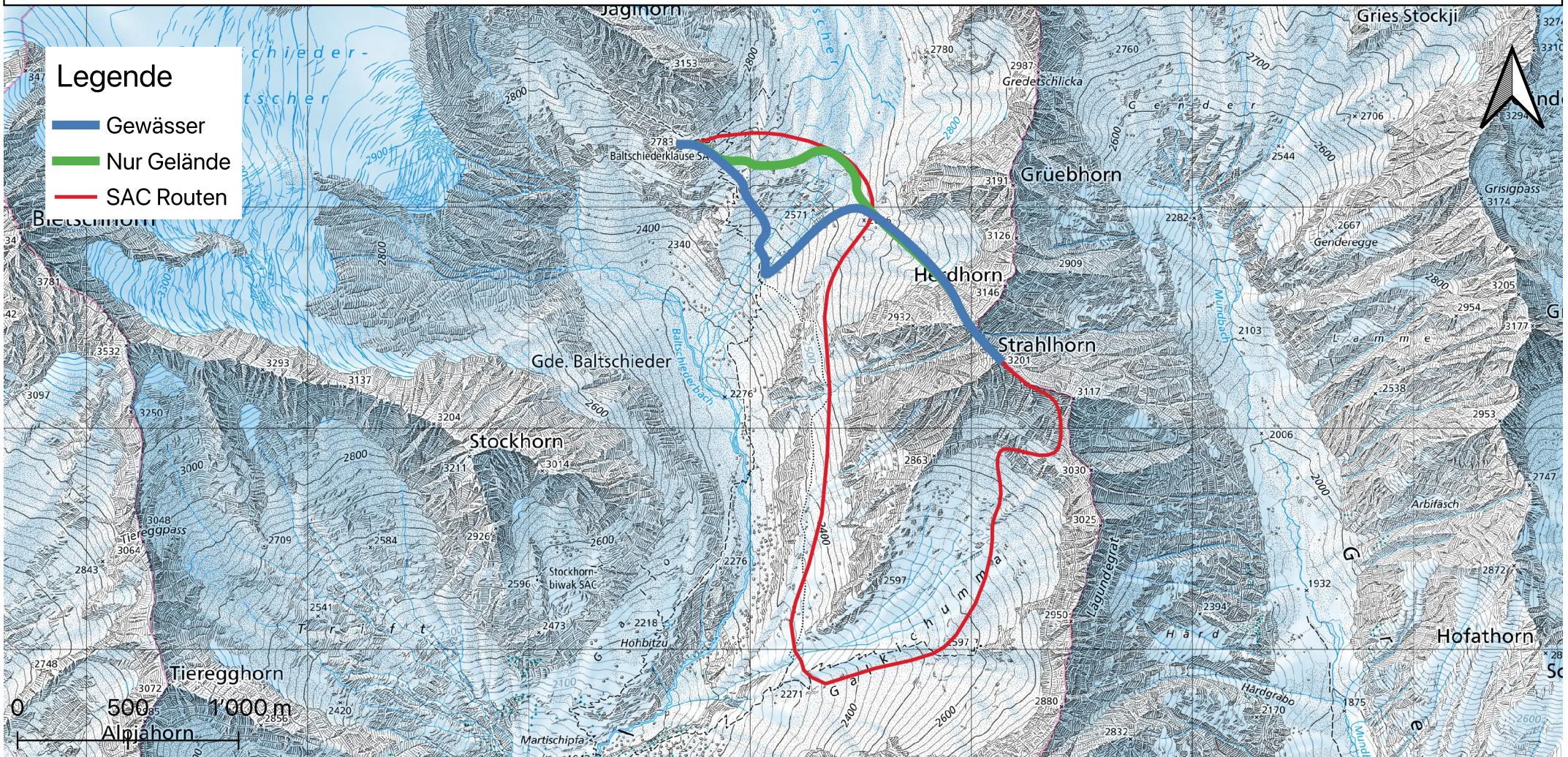
Monte Rosa Massiv



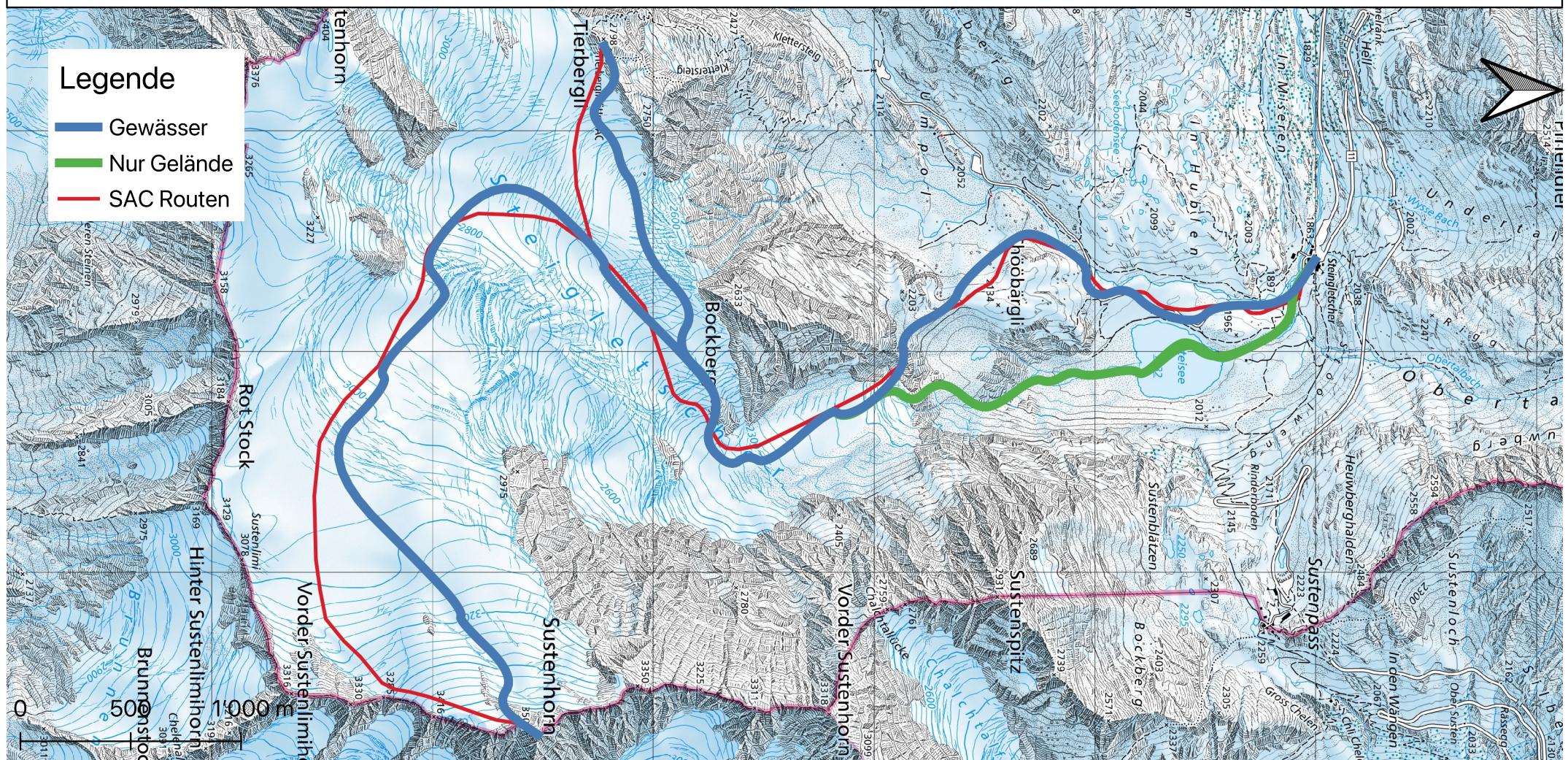
Piz Palü



Strahlhorn



Tierbergli



D. Lawinensimulation mit RAMMS::Avalanche

E. It's not a bug, it's a feature