

DEN ROUTENVERLAUF VON SKITOUREN BERECHNEN

Günter Schmudlach¹ und Andreas Eisenhut²

¹ Skitouren guru GmbH, Zürich, Schweiz

² Schweizer Alpen-Club (SAC), Bern, Schweiz

ZUSAMMENFASSUNG: Seit mehr als einem Jahrzehnt bewertet [skitouren guru.com](#) täglich tausende von Skitouren im Alpenraum nach dem Lawinenrisiko. Diese Bewertungen basieren auf der "Quantitativen Reduktionsmethode" (QRM) und dem "Screening the Likelihood of Avalanches on Backcountry Ski tours" (SLABS). Beide Methoden kombinieren Informationen aus der Lawinenvorhersage und dem Gelände zu einer Risikobewertung.

Die auf Skitouren guru zur Verfügung gestellten Standardrouten werden von Experten von Hand gezeichnet und geprüft. Die Endnutzer haben häufig den Wunsch geäußert, ihre eigenen Routen zu zeichnen und sie anschließend bewerten zu lassen. Die von den Endnutzern gezeichneten Routen haben jedoch nicht immer die erforderliche Qualität. Deshalb haben wir eine Routenberechnung entwickelt, welche nicht nur bestehende Routen anpassen kann, sondern auch neue Routen von einem gegebenen Start- zu einem gegebenen Zielpunkt erstellt. Diese Berechnung basiert auf der Kostenoptimierung (Dijkstra) durch eine Kostenoberfläche. Die Kostenoberfläche ist abhängig von Hangneigung, Geländeform, Bewaldung und anderen Kriterien wie Straßen, Wegen, Flüssen, Brücken, Seen oder Informationen über Skirouten und Pisten. Die Berechnung ist mit dem GRASS-Tool `r.walk` umgesetzt.

Für die Schweiz ist auf [skitouren guru.com/rating-view](#) seit Dezember 2023 ein neues Werkzeug verfügbar. Nutzer können entweder vor der Tour eine Route auf eine Karte zeichnen oder nach der Tour eine GPX-Datei hochladen. Anschließend wird der Routenverlauf auf Wunsch feinjustiert und der Lawinenrisikoscore auf der Grundlage einer vom Nutzer gewählten Lawinenvorhersage berechnet. Das Werkzeug wurde von der Schweizer Skitouren-Community sofort angenommen. Im Winter 2023/2024 bewerteten die Nutzer mehr als 50.000 Routen. Ab Dezember 2024 wird dieses Werkzeug für den gesamten Alpenraum verfügbar sein. Wir sind zuversichtlich, dass damit aufgrund des spielerischen Charakters ein wesentlicher Beitrag zur Lawinenausbildung und zum ständigen Lernen geleistet werden kann.

In diesem Beitrag stellen wir dieses Werkzeug vor, geben einen Einblick in die Berechnung des Routenverlaufs, erläutern den Zweck, diskutieren die Grenzen und geben einen Ausblick in die Zukunft.

SCHLÜSSELWÖRTER: Skitouren, Routing-Algorithmus, Lawinenrisiko, Skitouren guru.

1. EINFÜHRUNG

Skitouren guru ist ein Auswahl- und Planungstool für Skitouren in den Alpen. Dazu werden rund 10.000 Routen vollautomatisch mit einem Lawinenrisikoscore versehen. Die Risikobewertung wird in drei Kategorien unterteilt: *grün* (tiefes Lawinenrisiko), *orange* (erhöhtes Lawinenrisiko) oder *rot* (hohes Lawinenrisiko). Die Risikobewertungen basieren auf den neuesten lokalen Lawinenvorhersagen und den behördlichen Geländedaten. Zu diesem Zweck hat Skitouren guru drei Modelle entwickelt, die in den folgenden Beiträgen vorgestellt und diskutiert werden:

- Risikobewertung basierend auf GRM (Graphische Reduktionsmethode): Schmudlach und Köhler (2016),
- Risikobewertung basierend auf QRM (Quantitative Reduktionsmethode): Schmudlach et al. (2018)
- Risikobewertung basierend auf SLABS (Screening the Likelihood of Avalanches on Backcountry Ski tours): Degraeuwe et al. (2024).

Bisher wurden alle bereitgestellten Routen von Experten von Hand mit einem Geografischen Informationssystem (GIS) gezeichnet. Während des Zeichnungs- und Prüfprozesses werden genau definierte Regeln befolgt.

Die Website erfreut sich in der Gemeinschaft der Skitourengeher, insbesondere in der Schweiz, Österreich und Deutschland, großer Beliebtheit. Im Hochwinter klicken die Nutzer täglich rund 40.000 Routen an. Infolgedessen gab es während des gesamten letzten Jahrzehnts einen ständigen Strom von

Rückmeldungen seitens der Benutzer. Mit Abstand am häufigsten gewünscht wurde die Möglichkeit, "Routen selbst zu zeichnen und anschließend bewerten zu lassen". Eine Umfrage der Schweizerischen Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu) aus dem Jahr 2019 bestätigt dieses Ergebnis.

Aus technischer Sicht ist ein Werkzeug, das es der Öffentlichkeit ermöglicht, selbst Routen zu zeichnen, recht einfach. Allerdings muss eine Route, die von Skitouren guru bewertet werden soll, einige Qualitätskriterien erfüllen. Eine schlecht gezeichnete Route wird mit einer Risikobewertung von geringer Aussagekraft versehen. Es ist nicht einfach, unter Berücksichtigung der Lawinengefahr, der Absturzgefahr und Komfort-Kriterien eine Route von hoher Qualität zu zeichnen. Es war daher von Anfang an klar, dass ein solches Werkzeug von einer Berechnung begleitet werden muss, welche die von Hand gezeichnete Route anpassen kann.

Eisenhut (2013) stellte in einer Masterarbeit einen Berechnungsablauf vor, der in der Lage war, eine Route zu zeichnen, indem lediglich ein Start- und ein Endpunkt gesetzt werden musste. Der Ansatz basierte auf einer Kostenoberfläche und dem Optimierungsalgorithmus [ArcGis-PathDistance](#).

In den folgenden 10 Jahren verbesserte Eisenhut den angewandten Ansatz ständig. Auf der Grundlage der gewonnenen Erfahrungen präsentierte Eisenhut einen Entwurf, welcher eine automatisch erzeugte Skitourenkarte für die gesamten Schweizer Alpen zeigte (Bachmann, 2020). Die daraus resultierende Karte wurde der Öffentlichkeit von Skitouren guru (2020) zur Verfügung gestellt.

Vor einigen Jahren begann Skitouren guru, die Routenberechnung mit dem Open-Source-GIS "GRASS" umzusetzen. Das Werkzeug ging im November 2023 unter dem Namen "RUDR-Rating of user-defined Routes" online (Skitouren guru, 2023). Der angebotene Umfang war auf die Schweizer Alpen beschränkt. Im Winter 2023/2024 liessen die Benutzer rund 50'000 Routen bewerten. Da das Werkzeug auf grosses Interesse stiess, erhielt Skitouren guru die Möglichkeit, die Kostenoberfläche mit GRASS zu überarbeiten und auf den gesamten Alpenraum auszuweiten.

Unseres Wissens gibt es keine anderen Veröffentlichungen zu diesem Thema. Uns ist jedoch bekannt, dass Skida.com (und möglicherweise andere Plattformen) an ähnlichen Ansätzen arbeiten.

Die vorliegende Publikation beschreibt die aktuelle Kostenoberfläche (Kapitel 2 und 3.1), das Routen-Optimierungsverfahren (Kapitel 2 und 3.2) und das bereitgestellte Werkzeug auf Skitouren guru (Kapitel 4). In Kapitel 5 werden der Zweck und die Grenzen des Werkzeugs diskutiert und ein Ausblick gegeben.

Tabelle 1: Digitale Geländemodelle

Name	Ausmaß (Auflösung)
schweizerALTI3D	Schweiz (2 m)
BEV ALS DTM1	Österreich (1 m)
LDBV DGM1/5	Bayern (5 m)
IGN LiDAR HD	Frankreich (5 m) ¹
Arso Lidar DTM	Slowenien (1 m)
Ligurien DTM	Ligurien (5 m)
Piemonte DTM5	Piemonte (5 m)
Aostatal DTM2	Aostatal (2 m)
Lombardia DTM 5x5	Lombardei (5 m)
Trentino Lidar PAT 2014 DTM	Trentino (0,5 und 2 m)
DGM	Südtirol (2,5 m)
DTM5000	Friaul-Julisch Venetien (5 m)
DTM5	Venetien (5 m)

1 Das offizielle DTM5 des IGN bietet nicht überall in den französischen Alpen die erforderliche Qualität. Daher wird ein DTM aus Lidar-Rohdaten abgeleitet, wobei [der SMRF-Bodenfilter von PDAL](#) angewendet wird.

Tabelle 2: Oberflächendaten

Name	Ausmaß (extrahierte Merkmale, Auflösung bei Rasterdaten)
swissTLM3D	Schweiz (Autobahnen, Straßen, Wege, Pfade, Eisenbahnen, Seilbahnen, Brücken, Tunnel, Galerien, Seen, Gletscher, Flüsse, Dämme, Wälder)
OpenStreetMap	Alpen (Autobahnen, Straßen, Wege, Pfade, Eisenbahnen, Seilbahnen, Brücken, Tunnel, Galerien, Seen, Gletscher, Flüsse, Dämme, Grenzen, Küstenlinien, Skipisten)
Dichte der Baumbedeckung	Alpen (Dichte der Baumbestände, 10 m)
Modell der Vegetationshöhe NFI	Schweiz (Höhe der Vegetation, 1 m)
Corine Landcover Backbone	Europa (versiegelte Flächen, bewaldete Flächen, 10 m)
Skirouten	Schweiz (Skirouten von Swisstopo und Schweizer Alpen-Club SAC)
ATHM	Alpen (Lawinen-Geländekarte, 10m)
Gefahr des Herunterfallens	Alpen (Eine Karte über die Absturzgefahr, 10 m)
Routensammlung von Skitouren guru	Alpen (Eine Sammlung von ~10'000 handgezeichneten Skirouten, die in Zusammenarbeit mit Skitouren guru gepflegt wird)
Tracksammlung von Skitouren guru	Alpen (eine private Sammlung von GPS-Tracks, die von Benutzern während ihrer Skitouren aufgezeichnet wurden)

2. DATEN

Seit den Anfängen des Skitourensports werden Routen auf topografischen Karten eingezeichnet. Da Skitourengehen unabhängig von jeglicher Verkehrsinfrastruktur ist, ist die Topographie des Geländes (Hangneigung, Geländeform) von besonderer Bedeutung. Für die Entwicklung einer Routenberechnung für Skitouren werden digitale Geländemodelle (DTM) mit hoher Auflösung und Genauigkeit benötigt. Globale Daten wie SRTM (Vereinigte Staaten von Amerika), ALOS (Japan) oder EUEM (Europäische Union) bieten nicht die erforderliche Qualität. In unserem Ansatz stützen wir uns systematisch auf Daten von staatlichen Geodatenanbietern. Die verwendeten DGMs haben eine Auflösung von mindestens 5 m und eine absolute Genauigkeit von etwa 1-2 m. Die relative Genauigkeit ist in der Regel deutlich höher.

In Tabelle 1 sind alle verwendeten Datenquellen aufgeführt, die für die Abdeckung der Alpen benötigt werden. Alle DGMs werden auf das gemeinsame Koordinatenreferenzsystem (CRS) mit einem EPSG-Code von 3035 umprojiziert. Anschließend werden sie an den Grenzen beschnitten und zu einem nahtlosen DGM zusammengefügt, welches die gesamten Alpen abdeckt und eine Auflösung von 5 m aufweist.

Neben dem Gelände spielt auch die natürliche und künstliche Erdoberfläche eine wichtige Rolle für die Eignung eines bestimmten Ortes für Skitouren. In Tabelle 2 sind alle verwendeten Datenquellen, die für die Abdeckung der Alpen benötigt werden, und die daraus verwendeten Merkmale aufgeführt. Alle Oberflächendaten werden auf das gemeinsame Koordinatenreferenzsystem (CRS) mit einem EPSG-Code von 3035 umprojiziert. Die Vektordaten werden mit einer Auflösung von 10 m gerastert. Wo immer Daten aus zwei verschiedenen Quellen verfügbar sind, werden die Daten mit der höheren Qualität ausgewählt. Das Ergebnis sind 40 Raster-Eingabeebenen, welche die gesamten Alpen abdecken und jeweils ein bestimmtes Merkmal darstellen (Beispiel: See ja/nein).

3. METHODEN

3.1 Kostenoberfläche

Wir decken die Alpen mit einem Raster (Schachbrettmuster) von 10 m Auflösung ab. Jeder Rasterzelle wird ein Kostenwert im Bereich [1..99] zugewiesen. Tabelle 3 definiert die Bedeutung der Werte.

Tabelle 3: *Legende der Kostenwerte*

Farbe	Kosten	Bedeutung
Grün	1..4	Sehr niedrige Kostenwerte
Gelb	5..14	Niedrige Kostenwerte
Orange	15..60	Mittlere Kostenwerte
Braun	61..98	Hohe und sehr hohe Kostenwerte
Schwarz	99	Barriere (es ist nicht möglich, die Zelle zu durchqueren)

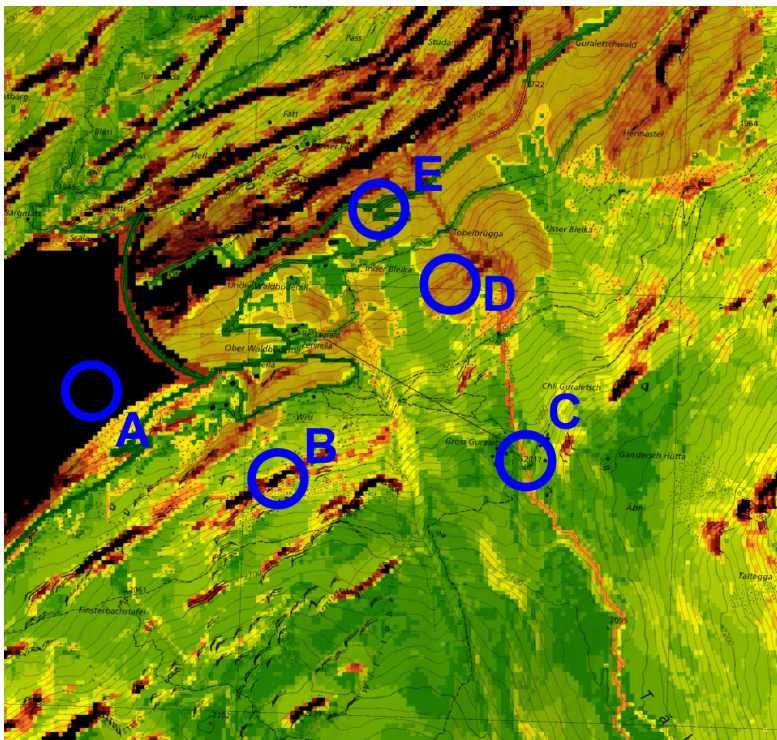


Abbildung 1: *Kostenoberfläche (Legende in Tabelle 3)*

Abbildung 1 zeigt eine Kostenoberfläche für das Gebiet um Zervreila (Schweiz). Die Kostenwerte werden durch die in Tabelle 3 definierten Farben dargestellt. Der Stausee von Zervreila (A) stellt eine Barriere dar. B zeigt eine Klippe, die mit Skiern nur schwer zu überqueren ist. C stellt eine Brücke über einen Bach dar. Der Wald in D spiegelt die höheren Kosten aufgrund der dichten Bewaldung wider. Andererseits haben die Straßen auf E niedrige Kostenwerte.

Eine solche Rasterebene wird als "*Kostenoberfläche*" bezeichnet. Eine gute Kostenoberfläche spiegelt die Präferenzen von Skitourengehern wider. Je kleiner der Kostenwert ist, desto besser ist eine Zelle für die Begehung mit Skiern geeignet.

Abbildung 2 zeigt einen stark vereinfachten Überblick darüber, wie die Eingabeschichten (grau) zu einer Kostenoberflächenschicht (grün) verarbeitet werden. Im Wesentlichen gibt es vier Hauptoperationen (rote Rechtecke):

- SUM: Die Initialkosten (SurfaceSumCosts) werden aus Hangneigung, Krümmung (konvexes oder konkaves Terrain) und Bewaldung berechnet. Mehr Informationen zur *Krümmung* finden Sie in Schudlach und Köhler (2016).

- **MAX:** Einige alternative Kosten können die ursprünglichen Kosten übersteigen. Hier sind einige unvollständige Beispiele: Eine Wasseransammlungsberechnung (*Grass-r.watershed*) wird angewendet, um die Breite der Flüsse und Bäche zu schätzen. Die endgültigen RiversCost hängen von der Flussbreite und der Höhe des Flusses ab. Spaltenzonen auf Gletschern werden durch die Berechnung eines topologischen Positionsindexes (*gdaldemgdaldem-TPI*) aus dem DGM identifiziert. Eisenbahnen, Autobahnen, Stauseen und versiegelte Zonen führen zu sehr hohen Kosten bzw. zu Barrieren. Die Transitzkosten von Seen hängen von ihrer Höhenlage ab.
- **MIN:** Pfade, Wege, Straßen und Brücken können die bei der Max-Operation berechneten Kosten senken. Das Verfahren hängt auch vom Grad der Bewaldung ab.
- **MOD:** Bisher haben wir eine rohe Kostenoberfläche, die auch einige Zellen mit sehr hohen Transitzkosten enthalten wird. Schneesport-Daten können die endgültigen Kosten abmildern. Die Tracks werden in der Regel mit einem GPS während der Outdoor-Aktivität aufgezeichnet. Routen sind von Experten von Hand gezeichnete Linien. Je nach der Qualität der Tracks oder Routen können sie ein Hindernis abmildern und es überwindbar machen.

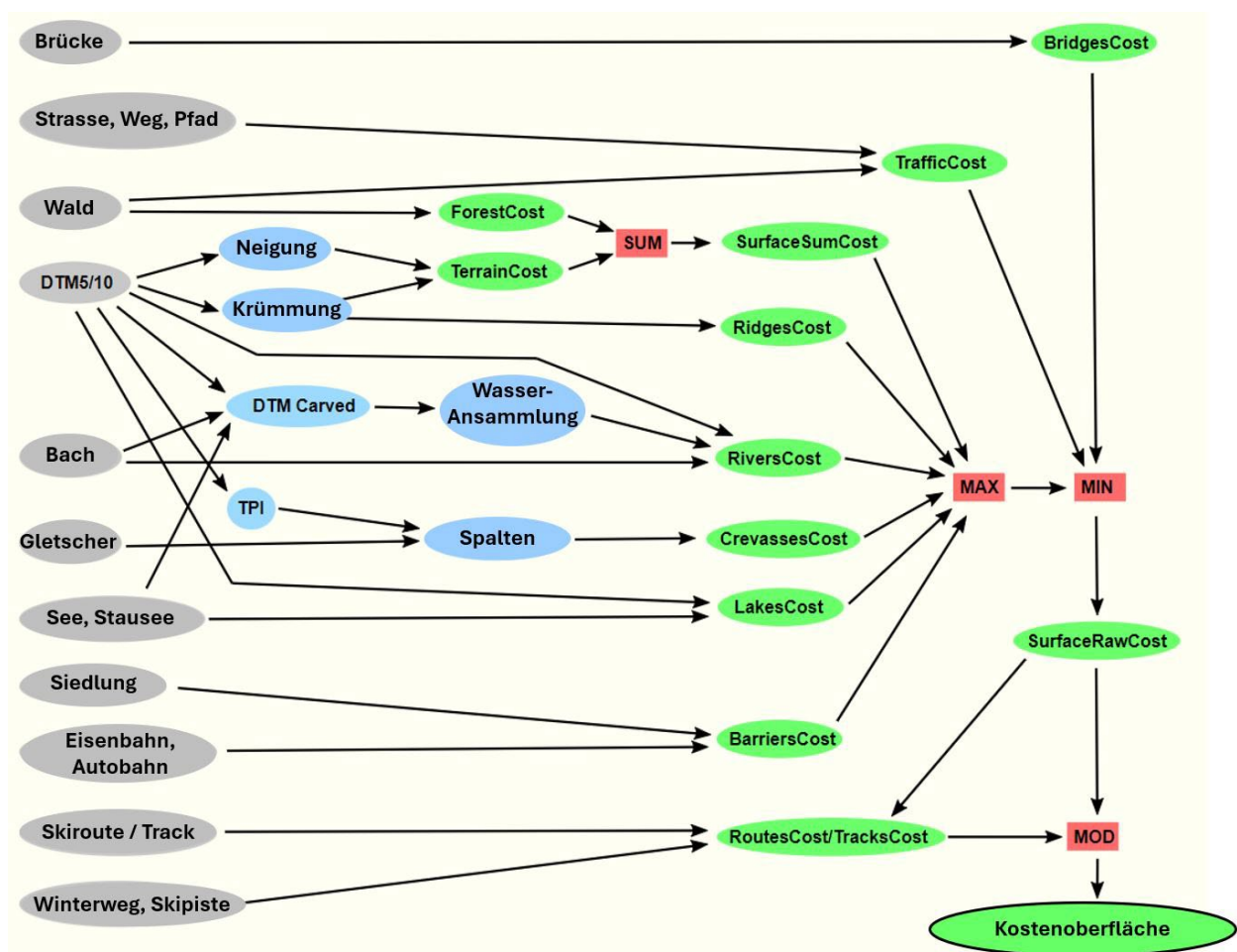


Abbildung 2: Vereinfachtes Rasterdatenflussdiagramm: Von den Eingangsrasterschichten (grau) zu einer Kostenoberfläche (grün). Wichtige Operationen in roten Rechtecken.

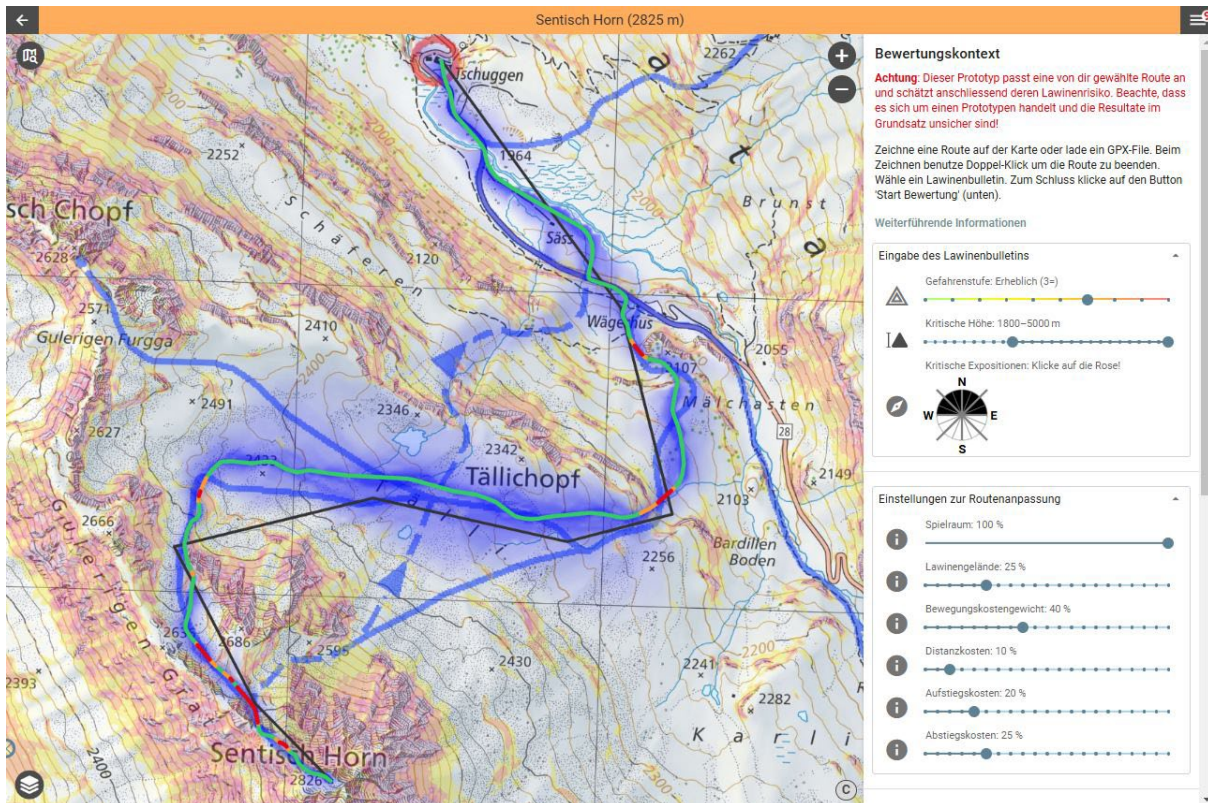


Abbildung 3: *Beispielroute* im Werkzeug *Routing of user-defined routes (RUDR)*. Schwarze Linie: Die vom Benutzer gezeichnete Route, Grüne/orange/rote Linie: Die angepasste Route, bewertet mit der oben rechts eingegebenen Lawinenvorhersage. Blaue Transparenzfarben: Ein Korridor von Alternativlösungen. Blaue Linien: Die Skirouten von swisstopo und Schweizer Alpen-Club (SAC).

3.2 Routen-Optimierungsverfahren

Die Berechnung des "billigsten Weges" durch eine Kostenoberfläche ist nur eine Frage der CPU-Leistung. Zu diesem Zweck wendet Skitouren guru das Tool [Grass-r.walk](#) an. r.walk berechnet die anisotropen kumulativen Kosten für die Bewegung zwischen einem Start- und einem Endpunkt auf einer Höhenrasterschicht (DTM) in Kombination mit einer Rasterschicht, deren Zellenwerte die Durchgangskosten darstellen. Das Tool optimiert die Summe der Bewegungs- und Durchgangskosten. Als Durchgangskosten dient die Kostenoberfläche aus Kapitel 3.1. Die Bewegungskosten hängen von der zurückgelegten vertikalen und horizontalen Strecke ab. Ein sogenannter Lambda-Wert legt fest, ob den Durchgangskosten oder den Bewegungskosten mehr Gewicht beigemessen wird. Das Ergebnis von r.walk ist eine Rasterschicht, die die kumulativen Kosten vom Startpunkt bis zu jeder Zelle darstellt. r.walk wird zweimal angewendet, einmal für jede Richtung. Die Summe der beiden Rasterschichten mit den kumulativen Kosten ergibt eine Korridor-Rasterschicht, die mögliche alternative Lösungen darstellt. Die transparenten blauen Werte in Abbildung 3 zeigen ein Beispiel für einen solchen Korridor. Je undurchsichtiger der Blauwert ist, desto besser ist die Stelle, die mit Skiern begangen werden kann. Wenn die kumulative Kostenrasterschicht an [Grass-r.path](#) übergeben wird, kann der optimale Pfad berechnet werden. Da r.walk auf dem Dijkstra-Algorithmus (Dijkstra, 1959) basiert, findet es immer den optimalen Weg. Bevor der optimale Pfad angezeigt werden kann, wird er zunächst vereinfacht und dann geglättet ([Grass-v.generalize](#)).

4. ERGEBNISSE

Das daraus resultierende Werkzeug namens Rating of user-defined Routes (RUDR) kann auf skitouren.guru.com/rating-view ausprobiert werden.

Im Wesentlichen gibt es drei Hauptanwendungsfälle:

1. Der Nutzer zeichnet eine eigene Route auf die Karte und lässt sie rechnerisch feinjustieren und bewerten (Primärer Anwendungsfall in der Feinplanung). Es kann auch direkt mit Standardrouten von Skitouren.guru experimentiert werden, jede Route lässt sich über *Mehr Anzeigen...* -> *EXPERIMENTIERE MIT ROUTE* in RUDR öffnen.
2. Der Nutzer lädt eine GPX-Datei hoch (ein mit GPS aufgezeichneter Track oder eine auf einer Karte eingezeichnete Route) und lässt sie rechnerisch glätten und bewerten (Feedback nach einer Tour).
3. Der Nutzer zeichnet eine Route, indem er nur einen Start- und einen Endpunkt festlegt. Danach wird automatisch ein Korridor und eine "*optimale Route*" erzeugt. Dieser Anwendungsfall ist nicht der primäre Fokus.

In allen drei Anwendungsfällen kann der Benutzer eine Einstellung namens "*Spielraum*" wählen, einen Wert im Bereich von [0..100]. Je höher der Wert ist, desto mehr kann die berechnete Route von der eingegebenen Route abweichen. Je kleiner der Wert ist, desto mehr hält sich die berechnete Route an die eingegebene Route. Wenn der Wert 0 gewählt wird, erfolgt keine Routenanpassung. Der Wert wird automatisch in Abhängigkeit von der Anzahl der Punkte der eingegebenen Route voreingestellt. Je mehr Punkte eingegeben werden, desto kleiner ist der Ausgangswert und desto mehr bleibt die berechnete Route an die eingegebene Route gebunden. Der Benutzer kann den voreingestellten Wert jedoch jederzeit überschreiben.

Es gibt fünf weitere Einstellungen (siehe Abbildung 3 unten rechts):

1. Lawinengelände: Je höher der Wert, desto mehr wird das Lawinengelände (Schmudlach und Köhler, 2016) bei der Routenanpassung berücksichtigt. In einer typischen Trockenschnee-Situation möchte der Benutzer dem Lawinengelände eventuell mehr Gewicht geben, als in einer typischen Frühlingssituation. Eine starke Berücksichtigung des Lawinengeländes kann auf Kosten der Zugänglichkeit gehen (schwierigeres Gelände).
2. Bewegungsgewicht: Je höher der Wert, desto stärker werden die Bewegungskosten gegenüber den Durchgangskosten berücksichtigt. Die Bewegungskosten hängen von der vertikalen und horizontalen Distanz ab. Die Durchgangskosten hängen von den Werten der Kostenoberfläche (Geländeeigenschaften) ab. Diese Einstellung wirkt sich direkt auf das in Kapitel 3.2 erwähnte *Lambda* aus.
3. Distanzkosten: Je höher der Wert, desto stärker werden Umwege vermieden.
4. Aufstiegskosten: Je höher der Wert, desto mehr werden Aufstiege vermieden.
5. Abstiegskosten: Je höher der Wert, desto mehr werden Abstiege vermieden.

Die Verbesserung der Routenanpassungs-Ergebnisse durch Änderung der Standardeinstellungen ist schwierig und erfordert ein tieferes Verständnis von r.walk und einige Erfahrung.

Der Benutzer kann auch eine Lawinenvorhersage definieren, indem er die *Gefahrenstufe*, die *kritischen Höhenlagen* und die *kritischen Expositionen* angibt (siehe Abb. 3 oben rechts). Skitouren.guru berechnet dann einen Lawinenrisikoscore (grün: *geringes Risiko*, orange: *erhöhtes Risiko*, rot: *hohes Risiko*) unter Anwendung des QRM- oder SLABS-Modells. Der Verlauf der Route wird ebenfalls mit diesen Ampelfarben markiert. Beachten Sie, dass die aktuelle Lawinenvorhersage in keinem Fall automatisch von den Lawinenwarndiensten ausgelesen wird. Der Benutzer muss sie selbst eingeben. Diese Einschränkung hat mehrere Gründe:

- Skitouren.guru möchte die Nutzer dazu ermutigen, sich die Lawinenvorhersage genauer anzusehen.
- Die Notwendigkeit, eine Lawinenvorhersage einzugeben, verdeutlicht, dass der Benutzer einen Teil der Verantwortung trägt.

- Durch die Möglichkeit, die Lawinenvorhersage zu ändern, wird es möglich, mit virtuellen (vergangenen oder zukünftigen) Verhältnissen zu spielen.

Routenbeschreibung

Gipfel	Sentisch Horn (2825 m)
Start	Tschuggen (1939 m)
Höhendifferenz	886 hm
Routenlänge	4589 m
Aufstiegszeit	3h
GPS-Track	GPX-File
Schwierigkeitsgrad	WS (automatisch)
Lawinenrisiko	1.80

Abb. 4: Von Skitourenuru identifizierte Routeneigenschaften

Skitourenuru identifiziert auch einige Routeneigenschaften (siehe Abb. 4). Es ermittelt nicht nur die Flurnamen und Höhen des Start- und Zielpunktes, sondern berechnet auch einen Schwierigkeitsgrad (Reincke und Schudlach, 2021) und gibt den Höhengewinn, die Streckenlänge und die Aufstiegszeit an. Zusätzlich ist es auch möglich, eine GPX-Datei der Route herunterzuladen.

Schließlich bietet Skitourenuru einen Permalink, der mit Freunden geteilt und später aufgerufen werden kann. Die Daten bleiben privat für Personen, die den Permalink teilen.

5. DISKUSSION

Die von Skitourenuru bereitgestellten Standardwerkzeuge helfen bei der Auswahl und Planung einer Skitour mit geringem Lawinenrisiko. Während der Skitour werden in der Regel Informationen verfügbar, die eine Aktualisierung der Risikoeinschätzung aus der Planungsphase ermöglichen. Beachten Sie, dass Skitourenuru nur als ergänzende Informationsquelle für die Planung einer Skitour auf eigene Verantwortung genutzt werden sollte. Das gilt nicht nur für die Standardwerkzeuge von Skitourenuru, sondern auch für das RUDR-Werkzeug.

Die Bewertung des Lawinenrisikos leidet systematisch an einem Mangel an Rückmeldungen. Glücklicherweise enden die meisten Touren ohne Schaden für die Teilnehmer. Das bedeutet aber auch, dass es keine Rückmeldungen gibt. Die Werkzeuge von Skitourenuru bieten konsistente, reproduzierbare Rückmeldungen, unabhängig von menschlichen Vorurteilen.

Das RUDR-Werkzeug hat ein großes Potenzial für die Lawinenausbildung und das ständige Lernen. Ein Lawinenkurs kann folgendermassen ablaufen:

1. Die Kursteilnehmer zeichnen auf einer Karte individuell eine Route von einem vorgegebenen Start zu einem vorgegebenen Tourenziel.
2. Die Kursteilnehmer führen aufbauend auf einer Lawinenvorhersage eine Risikobewertung durch, indem sie eine strategische Methode (Grafische Reduktionsmethode GRM, StopOrGo, DavSnowCard oder Avaluator) anwenden.
3. Der Kursleiter moderiert eine Diskussion über die Ergebnisse der Teilnehmer: Wer geht über welche Route und mit welchen Massnahmen bei diesem Bulletin auf diesen Berg? Wer nicht? Warum?
4. Nun wenden die Teilnehmer RUDR individuell auf der Website von Skitourenuru an. Sie experimentieren mit verschiedenen manuell gezeichneten Routen und verschiedenen Lawinenvorhersagen.
5. Der Kursleiter moderiert eine zweite Diskussion, in der manuelle und automatische Ergebnisse verglichen werden.

Während des Verfahrens können die Teilnehmer lernen, dass Menschen und Maschinen sowohl ihre Vorzüge als auch ihre Grenzen haben. Um ein erfahrener Skitourengeher zu werden, ist es entscheidend, eine kritische Haltung gegenüber den Schlussfolgerungen von Menschen und Maschinen zu entwickeln.

Das in diesem Beitrag vorgestellte Werkzeug hat Grenzen:

- Alle in Kapitel 2 vorgestellten Daten sind ein virtuelles Abbild der realen Erde. Obwohl sich die Datenqualität in den letzten zwei Jahrzehnten massiv verbessert hat, können sie die Realität nicht genau wiedergeben. Das gilt insbesondere für die Bewaldung und für komplexes Gelände.
- Die Zuweisung von Begehungs-Kosten ist ein eher subjektiver Prozess. Er erfordert eine gute Kenntnis der "*Kostensprache*", wie sie in Tabelle 3 vorgestellt wird, und eine Menge Erfahrung.
- Einige der Merkmale sind dynamischer Natur (Seen, Bäche, Flüsse, Gletscher), werden aber statisch behandelt.
- In komplexem Gelände (z. B. auf Bergkämmen) und in weglosen Wäldern kann die Berechnung Schwierigkeiten haben, einen brauchbaren Routenverlauf zu erzeugen.
- Auf Skitouren gibt es noch einige andere Gefahren, die bei den Berechnungen nicht erfasst werden: Eis- und Steinschlag, Sturzgefahr, Orientierungsverlust, Erschöpfung, etc.
- Die Routenberechnung konzentriert sich auf den Aufstieg und nicht auf die Abfahrt. Ein Fokus auf die Abfahrt mit Skiern würde eine angepasste Kostenoberfläche erfordern.
- Die lokalen Schnee- und Lawinenbedingungen fließen nicht in die Berechnungen ein. Daher muss an jedem einzelnen Entscheidungspunkt eine endgültige Aktualisierung der Risikobewertung vorgenommen werden.

All diese Einschränkungen können letztendlich zu ungenügenden oder falschen Ergebnissen führen.

Das Potenzial für weitere Entwicklungen ist enorm:

- Die Kostenzuweisung basiert derzeit auf Expertenwissen. Maschinelles Lernen hat ein großes Potenzial, wenn eine gute Zielvariable über die Aktivität der Skitourengeher verfügbar ist. Siehe auch den in Skitouren-guru (2022) beschriebenen Travel Usage Dataset (TUD). Erste Tests deuten jedoch darauf hin, dass das maschinelle Lernen die wichtigsten Korrelationen reproduzieren kann, sich aber schwer tut, die Ausnahmen zu reproduzieren.
- Derzeit basieren die Kostenoberfläche und die Routenberechnung auf 10 m und teilweise auf 5 m. Eine systematische Umstellung auf eine 5-m-Auflösung wird empfohlen.
- Bei der Anpassung der Route könnte die aktuelle Schnee- und Lawinensituation berücksichtigt werden (siehe Techel et al. 2024).
- Mit der derzeitigen Kostenoberfläche ist es möglich, automatisch eine alpenweite Skitourenkarte zu berechnen. Eine solche Karte würde die Routen nach Korridoren darstellen (Bachmann, 2020).

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Als Eisenhut im Jahr 2012 mit der Entwicklung einer Routenberechnung für Skitouren begann, war nicht klar, ob dies mehr als nur ein Traum sein würde. Jetzt, knapp 10 Jahre später, sind wir überzeugt, dass es möglich ist, Routenberechnungen von hoher Qualität zu entwickeln. Dieses Erkenntnis ist auf zwei Gründe zurückzuführen: Erstens wird die virtuelle Darstellung der physischen Erde immer besser. Zweitens vermischt der Schnee Bodeneigenschaften von sehr lokalem Charakter. Im Gegensatz zu Sommersportarten sind beim Skifahren keine Kenntnisse über die physische Erde in sehr großem Maßstab erforderlich. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Berechnung in klassischem, offenem Skitouren-gelände vernünftige Resultate ausgibt, dass unser Verfahren aber in steilem Fuß-gelände oder in Wäldern außerhalb bestehender Routen möglicherweise an seine Grenzen stößt.

Menschen und Maschinen machen Fehler. Das gilt auch für die Zeichnung von Skitouren. In diesem Zusammenhang stellen sich zwei schwierige Fragen. Erstens: Wie misst man die Qualität von Routen? Man denke nur an reale Auseinandersetzungen, ob Variante A oder B die bessere ist. Zweitens: Nach welchen Kriterien kann man entscheiden, ob ein bestimmtes Maß an Qualität ausreichend ist? Trotz unzähliger Diskussionen über diese beiden Fragen bleiben die Antworten unbefriedigend. Wir sind jedoch zuversichtlich, dass dieses Werkzeug solche Diskussionen anregen wird, sei es in formellen Lawinenkursen oder im privaten Umfeld. Diese Diskussionen haben ein enormes Potenzial, die Entscheidungen von Outdoor-Sportlern zu verbessern.

DANKSAGUNG

Wir bedanken uns bei der Schweizerischen Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu) für die Unterstützung der Teilnahme des Referenten an der ISSW in Tromsø. Wir danken auch dem Alpenverein Südtirol (AVS), dem Deutschen Alpenverein (DAV), dem Schweizer Alpenclub (SAC) und dem Österreichischen Alpenverein (ÖAV) für ihre Unterstützung bei der Ausweitung des Beitrags auf den gesamten Alpenraum.

REFERENZEN

- Bachmann, A., 2020: Der Computer als Skitourenautor. Automatisch generierte Skitourenkarte. Die Alpen (Schweizer Alpenclub), Vol. 2.
- Degraeuwe B., Schmuldach G., Winkler K., Köhler J., 2024: SLABS: An improved probabilistic method to assess the avalanche risk on backcountry ski tours. Cold Regions Science and Technology, Volume 221.
- Dijkstra, E. W., 1959. A note on two problems in connexion with graphs". Numerische Mathematik. 1: 269–271.
- Eisenhut, A., 2013: Skitourenplanung auf Knopfdruck? Die optimale Aufstiegsroute bezüglich Anstrengung und Lawinensicherheit, modelliert mit einem Geographischen Informationssystem (GIS). Master Thesis Uni GIS Salzburg.
- Eisenhut, A., 2014: Skitourenplanung auf Knopfdruck? Der optimale Aufstieg bezüglich Anstrengung und Lawinensicherheit. Gis Science, Vol. 2. URL: https://www.aus-sicht.ch/thesis/GISScience_2_2014_39-47_Eisenhut.pdf
- Reincke, U., Schmuldach, G., 2021: Simplest Explanation for Difficulties of Backcountry Ski Tours, Swiss Data Science Conference, Luzern. URL: <https://info.skitouren guru.ch/index.php/schwierigkeit>
- Schmuldach, G., Köhler, J., 2016: Automated Avalanche Risk Rating of Backcountry Ski Routes. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge.
- Schmuldach, G., Köhler, J., 2016: Method for an automatized avalanche terrain classification. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge.
- Schmuldach, G., Winkler, K., Köhler, J., 2018: Quantitative Risk Reduction Method (QRM), a data-driven avalanche risk estimator. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck.
- Techel, F., Winkler, K., Purves, R., Schmuldach, G., Mayer, S., (2024): Fully automatized data- and model-driven predictions vs. human-made forecasts of snow instability and avalanche danger. Natural Hazard (Preprint).
- Skitouren guru, 2020: Automatisch generierte Skitouren. URL: <https://info.skitouren guru.ch/index.php/corridors>
- Skitouren guru, 2022: Travel Usage Dataset (TUD). URL: <https://info.skitouren guru.ch/index.php/data/228-travel-usage-dataset-tud>
- Skitouren guru, 2023: Rating of user-defined Routes (RUDR). URL: <https://info.skitouren guru.ch/index.php/rudr-de>