

ALGORITHMISCHE SKITOURENPLANUNG

Vom Bildschirm an den Berg – und zurück



Jesse Born, G21D

September 2024

Eingereicht bei Michael Kappeler
Alte Kantonsschule Aarau

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis

Abstract

Vorwort

1 Einleitung	1
1.1 Theoretische Grundlagen	1
1.1.1 Analytische vs. Praktische Lawinenkunde	1
1.1.2 Lawinentypen	1
1.1.3 Typische Lawinenprobleme	2
1.1.4 Lawinenlagebericht	2
1.1.5 Lawinenbildende Faktoren	3
1.1.6 Schema 3×3	3
1.1.7 Grafische Reduktionsmethode & Relevante Geländefaktoren	3
1.1.8 Unfalldaten & Begehungen	4
1.1.9 Digitale Höhenmodelle	4
1.1.10 Digitale landschaftmodelle	4
1.2 Methodik	5
1.2.1 Berechnung von topographischen Oberflächenfaktoren	5
1.2.2 Gefahrenwert als Funktion einer Gitterkoordinate	5
1.2.3 Parallelere Berechnungen	6
1.2.4 3D-Karte im Webbrowser	6
2 Hauptteil	7
2.1 Resultat	7
2.2 Produktevaluation	7
2.2.1 Eigenevaluation	7
2.2.2 Expertenevaluation	7
2.3 Methodische Reflexion	7
2.3.1 Versionierung, Backup und Archiv mit Git	7
2.3.2 Verworfene Varianten	7
2.3.3 GIS	7
3 Schlusswort, Fazit und Diskussion	8
Literatur	9
Abbildungsverzeichnis	11

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 Höhenmodels (DEM) SwissAlti^{3D} mit einer Auflösung von 0.5m, der Bodenbedeckungskarte SwissTLM^{3D} sowie historischen Unfalldaten des SLF wird eine computeroptimierte Reduktionsmethode entwickelt, welche flächen-deckend 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 anhenden Arbeit nach.

³1. Oktober 2023 – 26. März 2024

EINLEITUNG

1.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

1.1.1 ANALYTISCHE VS. PRAKТИSCHE 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 Riskio 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.

1.1.2 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 [9]. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit einer möglichen Fernauslösung keine weitere Beachtung geschenkt.

1.1.3 TYPISCHE LAWINENPROBLEME

1. Neuschneeproblem [6]:

- 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 – 3 Tagen

2. Triebsschneeproblem [6]:

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

3. Nassschneeproblem [6]:

- 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 an
- Lange anhaltende Gefahr

4. Altschneeproblem [6]:

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

Es ist möglich, dass mehrere Lawinenproblem miteinander auftreten. Im LLB sind jeweils alle zu erwartenden Lawinenprobleme mit einer eigenen Gefahrenstufe aufgeführt. [7]

1.1.4 LAWINENLAGEBERICHT

Im Lawinenlagebericht, kurz LLB, werden die momentan am Berg zu erwartenden Lawinenprobleme (siehe 1.1.3) zusammengefasst und mit diversen zusätzlichen Daten ergänzt. In der europäischen Lawinengefahrenskala werden fünf Warnstufen unterschieden, von «1 - gering» bis «5 - sehr gross». [8]

Rund 50% der Unfälle geschehen dabei bei «3 - mässig» [6].

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].

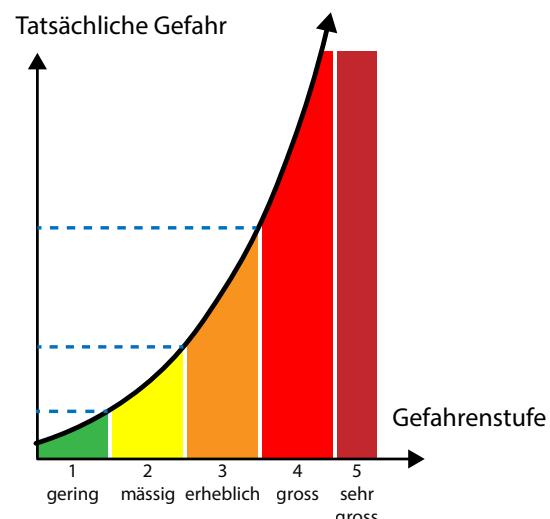


Abb. 1: Die 5 Europäischen Lawinengefahrenstufen in einem Graph

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.

1.1.5 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) [9].

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 lasen 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.

1.1.6 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

1.1.7 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 auf einer 1 : 25000er-Karte mittels Neigungsmesser herausgelesen. Dies liefert jedoch nur die durchschnittliche Neigung des Geländes zwischen den Höhenlinien — eine möglichen steilen Hangabschnitt sieht man also nicht. Unterwegs kann entweder mittels Smartphone, Skistöcker oder Pendel die Hangneigung ermittelt werden. Es kann nun in der Grafik (siehe unten) herausgelesen werden, ob das zu überprüfende Gelände problemslos, nur mit Vorsichtsmassnahmen oder gar nicht betreten werden darf.

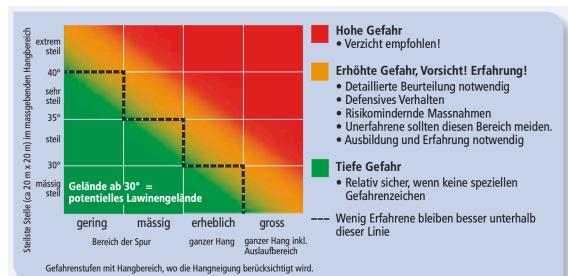


Abb. 2: GRM-Karte [6]

1.1.8 UNFALLDATEN & BEGEHUNGEN

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]

1.1.9 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 Stereokorrelierten 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 letztendlich nur 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. [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.

1.1.10 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 METHODIK

1.2.1 BERECHNUNG VON TOPOGRAPHISCHEM OBERFLÄCHENFAKTOREN

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

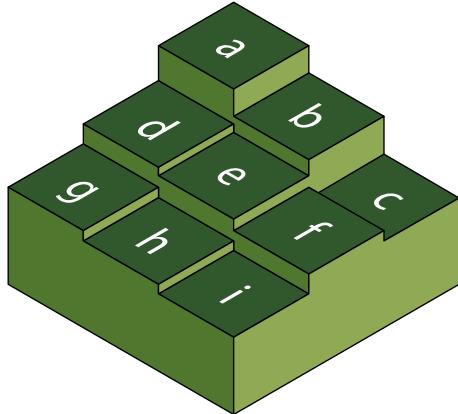


Abb. 3: 3×3 -Ausschnitt von Höhen aus einem DEM und deren Benennung

Hangneigung und Exposition nach [16]:

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

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

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 [17]:

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

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

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

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

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

(6) – (10) sind die Faktoren eines teilweisen Polynom vierten Grades [17]. Hangkrümmung c_{Plan} und c_{Profil} beschreiben, mit welchem Radius sich die Hangneigung parallel (Plankrümmung) bzw. senkrecht (Profilkrümmung) zur Exposition ändert:

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

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

Die Berechnung dieser Geländefaktoren wird an die quelloffene Datenabstraktionsbibliothek GDAL ausgelagert. Eine eigene Applikation zur Berechnung der Hangneigung wurde zwar implementiert, jedoch war diese nur marginal schneller als die angestammte Lösung.

1.2.2 GEFAHRENWERT ALS FUNKTION EINER GITTERKOORDINATE

Während der Realisierung unseres Programms stellten sich uns zwei Grundlegend verschiedene Herangehensweisen an die Bestimmung des Gefahrenwertes einer Gitterzelle.

Die erste Variante versucht, das Gelände analog eines Menschen während einer Begehung zu beobachten und aufgrund von einigen wenigen markanten Werten eine Annahme zu treffen.

Die zweite Variante simuliert tatsächlichen Lawinenabgänge. Dazu wurde mittels RAMMS::Avalanche zuerst Initialisierungspolygone, also Flächen, welche durch Schneesporthörer 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 Budgetanforderungen als unpraktikabel heraus.

Folgende Herangehensweise wurde letztendlich ausgewählt:

Es soll sich nur um die Hangneigung bemüht werden, da diese Geländeeigenschaft den höchsten Korrelationsfaktor mit der Anzahl Lawinenereignisse bildet. [cite hier skitourenguru pdf faktoren, datenbaltt datenset]. 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.

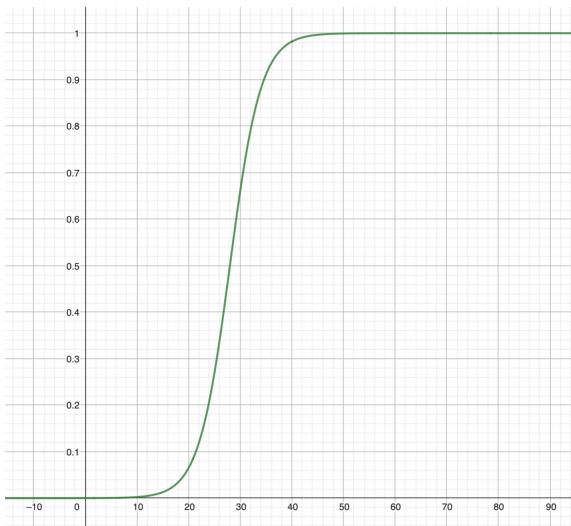


Abb. 4: $r(\rho)$ für $0 \leq \rho \leq 90$

1.2.3 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 aufgeführte, 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.

1.2.4 3D-KARTE IM WEBBROWSER

2 HAUPTTEIL

2.1 RESULTAT

2.2 PRODUKTEVALUATION

2.2.1 EIGENEVALUATION

2.2.2 EXPERTENEVALUATION

2.3 METHODISCHE REFLEXION

2.3.1 VERSIONIERUNG, BACKUP UND ARCHIV
MIT GIT

2.3.2 VERWORFENE VARIANTEN

2.3.3 GIS

3 SCHLUSSWORT, FAZIT UND DIS- KUSSION

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. 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].
7. 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].
8. 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].
9. 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].
10. MUNTER, Werner. *3x3 Lawinen*. Athesia-Tappeiner Verlag, 2016. ISBN 978-88-7073775-2.
11. SPIES, Andi. *3x3-Filtermethode* [<https://www.redbull.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-swisstopoch-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. 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).
 17. THORNE, Colin et al. Terrain analysis for quantitative description of zero-order basins. 1987.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1	Die 5 Europäischen Lawinengefahrstufen in einem Graph	2
2	GRM-Karte [6]	3
3	3 × 3-Ausschnitt von Höhen aus einem DEM und deren Benennung	5
4	$r(\rho)$ für $0 \leq \rho \leq 90$	6