

Automatische Fels-Schraffur für den Alpenraum

Reproduktion und Skalierung der Swiss-Style-Felsdarstellung

alpine[^]terrain

Version 1.0 — 21. Juli 2026

Zusammenfassung. Die klassische Schweizer Felszeichnung gilt als Höhepunkt der Reliefkartografie, war aber jahrzehntelang reine Handarbeit. Geisthövel¹ hat diese Kunst — nach Kenntnisstand der einschlägigen Literatur erstmals — vollständig aus einem digitalen Höhenmodell algorithmisiert. Dieses Dokument beschreibt eine Reimplementierung seines Verfahrens sowie dessen Erweiterung auf Ländermaßstab. Die Pipeline erzeugt aus einem digitalen Höhenmodell und einer Fels-Maske eine kartografische Schraffur in zehn Stufen. Der Referenz-Algorithmus wird stufenweise reproduziert: viele Stufen sind praktisch identisch ($r > 0,99$ gegen die Referenz), die Endkomposition erreicht $r \approx 0,78$ bzw. SSIM $\approx 0,84$ — die Pearson-Korrelation ist für Strichzeichnungen ein strenges Maß, SSIM das perzeptuell fairere. Der eigene Beitrag ist eine gekachelte Berechnung mit empirisch kalibriertem Halo, die das Verfahren auf landesweite Eingaben (Schweiz: 3,3 Gigapixel) bringt, wo eine zusammenhängende Berechnung nicht zuverlässig durchläuft.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Verwandte Arbeiten	3
3	Datengrundlage	4
4	Methodik: die Pipeline	4
4.1	Stufe 0 — Datenaufbereitung	4
4.2	Stufe 1 — Generalisierung	4
4.3	Stufe 2 — Schräglicht und Kanten	5
4.4	Stufe 3 — Kantentopologie	6
4.5	Stufe 4 — Reliefskelett	7
4.6	Stufe 5 — Flächenschattierung	7
4.7	Stufe 6 — Politur	8
4.8	Stufe 7 — Form- und Konturstriche	8
4.9	Stufe 8 — Fels-Schraffur	8
4.10	Stufe 9 — Endkomposition	9
5	Skalierung auf Ländermaßstab	10
5.1	Ein verworfener Weg: Out-of-Core	10
5.2	Der Produktions-Weg: gekachelte Berechnung mit Halo	10
5.3	Nahtlosigkeit	11
5.4	Extremrelief: vom Deadlock zur berechenbaren Kachel	12
6	Validierung	13
6.1	Reproduktions-Treue (Stufe für Stufe)	13
6.2	Kalibrierung des Halos	14
6.3	Konsistenz über Regionen	14
6.4	Fels-Maske	15
6.5	Varianten: Out-of-Core und native Beschleunigung	15
7	Diskussion und Ausblick	17
8	Referenzen	19

1 Einleitung

Die Felszeichnung der klassischen Schweizer Gebirgskartografie — die feine, gerichtete Schraffur, die Felswände plastisch und lesbar macht — gilt als eine der anspruchsvollsten Techniken der Reliefdarstellung². Über Jahrzehnte war sie das Werk spezialisierter Kartografinnen und Kartografen bei swisstopo und blieb damit auf wenige Regionen und hohen manuellen Aufwand beschränkt.

Geisthövel¹ hat dieses Handwerk in seiner Dissertation an der ETH Zürich — nach Kenntnisstand der einschlägigen Literatur erstmals — vollständig automatisiert: ein Verfahren, das allein aus einem digitalen Höhenmodell (DHM) und einer Fels-Ausweisung eine Schraffur erzeugt, die der manuellen Zeichnung visuell nahekommt. Die Arbeit beschreibt den Algorithmus, stellt aber keine unmittelbar auf beliebige Gebiete anwendbare, frei verfügbare Implementierung bereit.

Dieses Dokument verfolgt zwei Ziele. Erstens dokumentiert es eine **eigenständige Reimplementierung** des Geisthövel-Verfahrens in Python. Die algorithmischen Kerne — Line-Integral-Convolution, das Poisson-Editing der Schräglichter (ein Verfahren, das Helligkeitsverläufe so zusammenfügt, dass Übergänge ohne harte Brüche wirken) und die Laplace-Interpolation der Flächen — sind in der Dissertation¹ als Pseudocode veröffentlicht; unsere Reimplementierung leitet sich daraus ab und wurde *Stufe für Stufe* gegen die Referenz-Ausgaben verifiziert (Abschnitt 6.1). Zweitens beschreibt es unseren **eigenen Beitrag** — eine gekachelte Berechnung mit kalibriertem Randüberlapp (Halo), die den Algorithmus auf Eingaben in Landesgröße bringt, wo eine zusammenhängende Berechnung nicht zuverlässig durchläuft.

Nicht jede Stufe ist im Pseudocode der Dissertation bis zur Eindeutigkeit spezifiziert. Wo die Beschreibung Freiräume lässt — etwa bei der Auflösung von Gleichständen im Skelett-Aufbau (Stufe 4) — orientiert sich unsere Reimplementierung am beobachtbaren Verhalten der Referenz-Ausgaben, ohne Anspruch auf Bit-Identität an diesen Stellen. Wir kennzeichnen solche Fälle im Text explizit, damit die Herkunft jeder Designentscheidung nachvollziehbar bleibt.

Wir verstehen diese Arbeit als **Reproduktion publizierter Wissenschaft**. Der methodische Kern ist und bleibt der von Geisthövel¹ die Swiss-Style-Felsdarstellung selbst steht in der kartografischen Tradition Eduard Imhofs². Unser Beitrag liegt in der Reproduzierbarkeit und der Skalierung.

2 Verwandte Arbeiten

Manuelle Felszeichnung. Die Grundregeln der Schweizer Felsdarstellung — Strichführung entlang der Falllinie, Dichte proportional zur Steilheit, Betonung von Graten und Kanten durch Schräglicht — gehen auf Imhof² — dessen Wirkung auf die moderne Reliefkartografie Hurni³ rückblickend einordnet — und die swisstopo-Kartografie zurück; Jenny et al. erheben diese Gestaltungsprinzipien zunächst in einer Bestandsaufnahme⁴ und formalisieren sie samt konkreter Strichmetriken⁵. Sie bilden das ästhetische und konstruktive Vorbild, an dem sich jede Automatisierung messen lassen muss.

Algorithmische Felsdarstellung. Geisthövel¹ formuliert das nach Kenntnisstand der Literatur erste vollständige, aus dem DHM abgeleitete Verfahren; die algorithmischen Kern-Formeln (Seitenlicht, Poisson-Blending) erscheinen bereits im vorangehenden Konferenzpapier⁶ und werden in der späteren Journalfassung⁷ ausführlicher dargestellt. Es kombiniert Line-Integral-Convolution zur richtungstreu Glättung⁸, Kantenerkennung⁹, gradientenbasiertes Poisson-Editing zur kontrastwahrenden Kombination von Schräglichtern¹⁰ und eine gleichabständige Stromlinien-Platzierung¹¹ zu einer Pipeline, deren Ausgabe der manuellen Zeichnung nahekommt. Die LIC-Generalisierung des Geländes wurde später eigenständig weiterentwickelt¹².

Andere Automatisierungsansätze. Die automatische Felsdarstellung ist kein isoliertes Vorhaben: frühere, arbeitsintensivere Versuche im Schweizer Stil stammen von Hurni et al.¹³ und Dahinden¹⁴ Lysák¹⁵ verfolgt einen unabhängigen Ansatz für den tschechischen Kartenstil. Unser Beitrag ordnet sich in dieses Feld ein, verfolgt aber gezielt die *Reproduktion* und *Skalierung* des Geisthövel-Verfahrens.

Neuronale Reliefschummerung. Parallel dazu wenden Jenny et al.¹⁶ neuronale Netze auf die verwandte Aufgabe der Reliefschummerung an. Diese datengetriebenen Ansätze zielen auf die Schummerung, nicht auf die strichbasierte Felszeichnung, und sind zu unserem regelbasierten Verfahren komplementär.

3 Datengrundlage

Die Pipeline benötigt zwei Eingaben.

Höhenmodell. Grundlage ist das amtliche LiDAR-Höhenmodell **swissALTI3D** von swisstopo¹⁷. Das Produkt bietet feinere Raster an; wir rechnen auf einem 5-m-Raster als tragfähigem Kompromiss aus Detailtreue und Datenmenge für die alpenweite Verarbeitung. Die Pipeline ist grundsätzlich auf andere Rasterauflösungen übertragbar, kalibriert und validiert wurde sie hier auf 5 m.

Fels-Maske. Wo überhaupt schraffiert wird, bestimmt eine Fels-Ausweisung. In der Schweiz stammt sie aus dem Landschaftsmodell **swissTLM3D**¹⁸ — einem großmaßstäblichen, sehr genauen 3D-Vektordatensatz, der allerdings nicht eigens für die automatische Felskartierung erhoben wurde: die Bodenbedeckungsklassen *Fels*, *Fels locker*, *Felsblöcke* und *Felsblöcke locker* bilden die primäre Referenzquelle für die Fels-Ausweisung, ihre Vollständigkeit hängt jedoch an den Klassen- und Abdeckungsgrenzen des Landschaftsmodells. Optional ergänzt eine strukturelle Erweiterung über Hangneigung und Plan-Krümmung isolierte Felspartien, die im Landschaftsmodell fehlen. Gletscher, Firn und Gewässer werden ausgeschlossen, damit die Schraffur nicht auf Eis oder Wasser gerät.

Außerhalb der Schweiz treten an die Stelle von swissTLM3D die jeweiligen nationalen LiDAR- und Landschaftsmodelle; die Genauigkeit der Fels-Maske hängt dann von deren Vollständigkeit ab.

4 Methodik: die Pipeline

Die Pipeline besteht aus zehn Stufen (Stufe 0–9). Die Stufen 1–7 liefern Fließkomma-Raster, Stufe 8 rendert die eigentliche Strichzeichnung in einen Zeichenpuffer, Stufe 9 mischt alle Ebenen zum Endbild. Die folgende Darstellung beschreibt den konzeptionellen Ablauf; die vollständige numerische Spezifikation folgt Geisthövel¹.

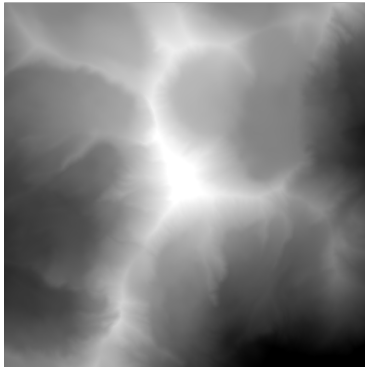
4.1 Stufe 0 — Datenaufbereitung

Aus dem Höhenmodell werden Hangneigung und Exposition abgeleitet und die Fels-Maske gebildet (Abschnitt 3). Die Maske begrenzt alle folgenden Schritte auf die Felsflächen.

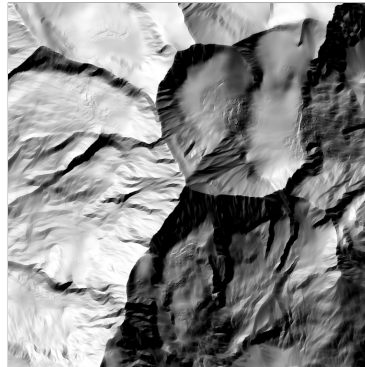
4.2 Stufe 1 — Generalisierung

Das rohe Höhenmodell wird entlang der Falllinien geglättet. Eine Line-Integral-Convolution⁸ integriert die Höhe entlang des Gradientenfeldes und entfernt so Rauschen, ohne Grate und Rinnen zu verwischen (Abbildung 1, geglättetes Höhenmodell). Aus dem geglätteten Modell z_2 werden ein erstes Schräglicht-Relief (Lambert-Beleuchtung, Azimut 315°), die Hangneigung und eine Markierung flacher Zonen berechnet — letztere schließt Firn- und Talböden von der späteren Schraffur aus.

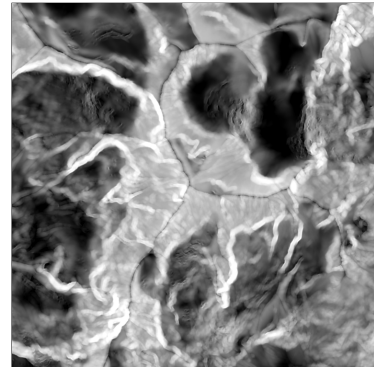
Das normierte, negierte Gradientenfeld (n_x, n_y) definiert die Richtung, entlang derer die Striche laufen.



Geglättetes Höhenmodell



Schräglichkeit-Relief



Hangneigung



Flache Bereiche

Abbildung 1: Stufe 1 (Beispielregion Weisshorn): Zwischenprodukte der Generalisierung.

4.3 Stufe 2 — Schräglichkeit und Kanten

Die Geländekanten werden aus zwei komplementären Schräglichtern gewonnen. Neben der Lambert-Schummerung dient ein *Seitenlicht*

$$\text{Sl}(\alpha) = n_x \cos \alpha + n_y \sin \alpha$$

mit der projizierten Flächennormale (n_x, n_y) . Es hat die nützliche Eigenschaft $\text{Sl}(\alpha) = -\text{Sl}(\alpha \pm \pi)$: die Beleuchtung aus $\alpha + \frac{\pi}{2}$ und $\alpha - \frac{\pi}{2}$ liefert bis auf das Vorzeichen dasselbe Bild, sodass die Kantenextraktion senkrecht zur Hauptlichtrichtung *richtungsneutral* bleibt. Ein erstes Bild kombiniert Lambert-Schummerung und $\text{Sl}(\alpha)$, ein zweites nutzt $\text{Sl}(\alpha + \frac{\pi}{2})$, um die im ersten fehlenden, parallel zum Licht verlaufenden Kanten zu erfassen. Aus beiden Schräglichtern (Abbildung 2) findet eine Kantenerkennung⁹ die markanten Geländelinien; daraus werden die Falllinien-Pfade extrahiert — die Spuren, entlang derer später die Schraffur gezogen wird.

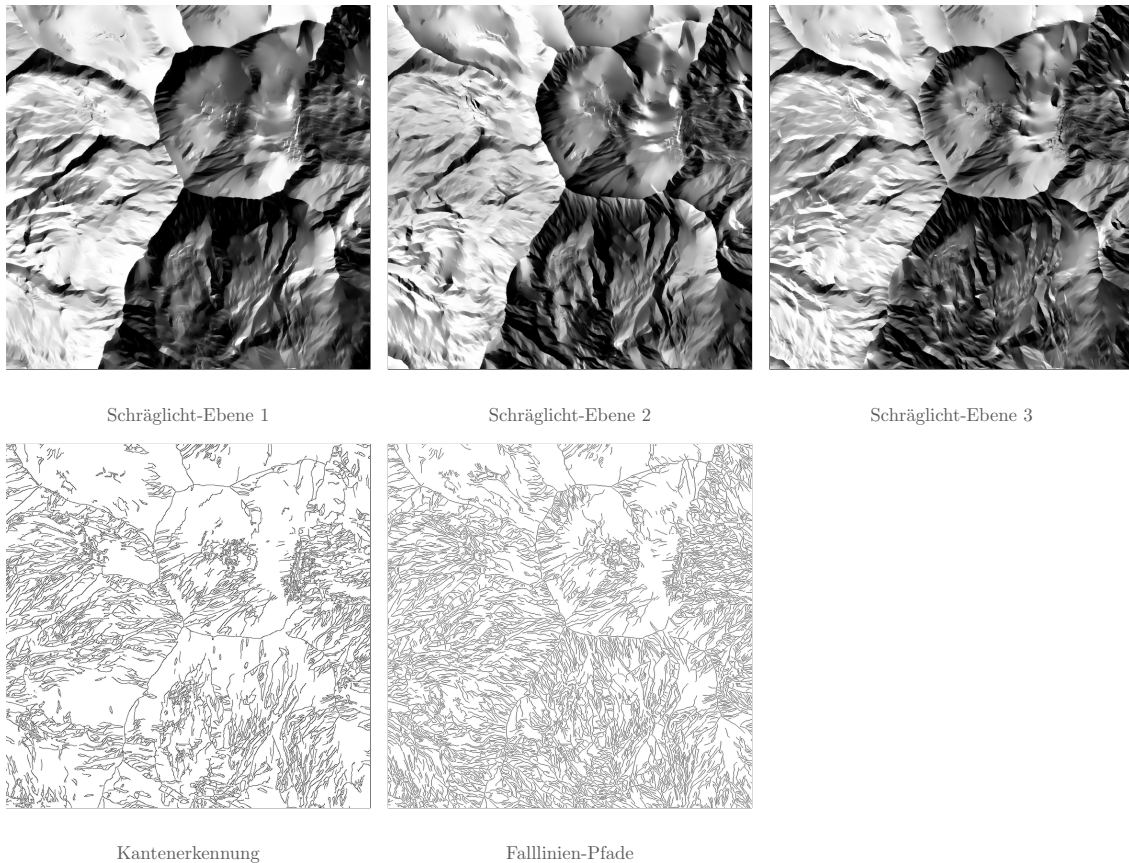


Abbildung 2: Stufe 2: Schräglicht-Ebenen, Kantenerkennung und extrahierte Falllinien-Pfade.

4.4 Stufe 3 — Kantentopologie

Aus den Canny-Kanten werden einfache Pfade extrahiert und die aus beiden Schräglichtern nach einem *Geradheitsmaß* (dem Knickwinkel entlang des Pfades) zusammengeführt: geradere Pfade werden gegenüber benachbarten, stärker gekrümmten bevorzugt — ein weiterer Generalisierungsschritt. Eine Delaunay-Triangulation — ein Standardverfahren, um aus Punkten robuste Nachbarschaften abzuleiten — der subsamplten Pfadpunkte bestimmt, welche Linien benachbart sind, und definiert einen Pfad-Graphen (Abbildung 3). Jeder Linie wird ein Gewicht zugewiesen: nah benachbarte, dicht vernetzte Linien gelten als wichtiger. Diese Ordnung steuert in Stufe 4, in welcher Reihenfolge die Grauwerte zugewiesen werden.

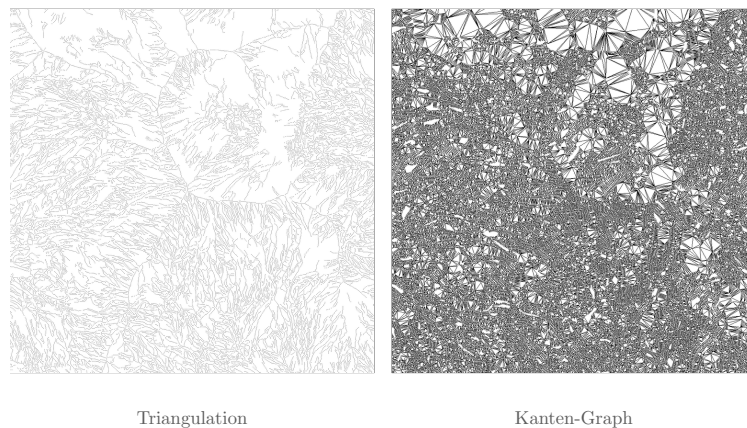
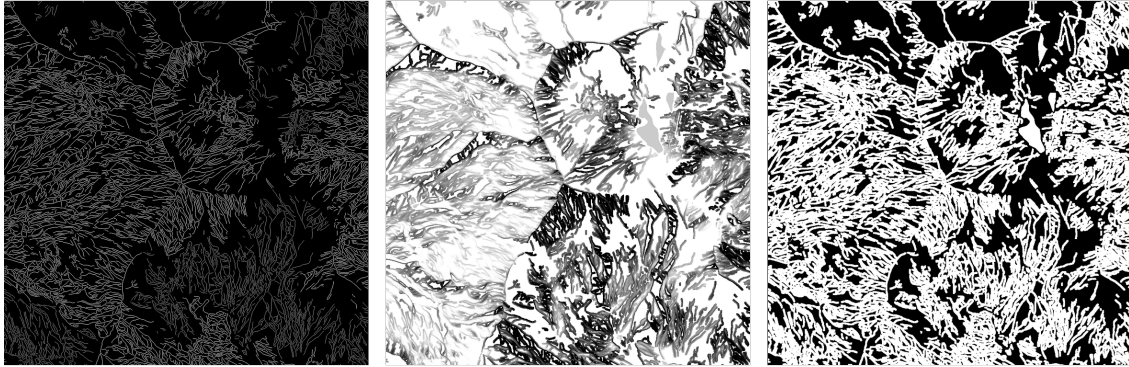


Abbildung 3: Stufe 3: Delaunay-Triangulation der Pfadpunkte und daraus abgeleiteter Kanten-Graph.

4.5 Stufe 4 — Reliefskelett

Jeder Kante wird beidseitig ein Grauwert zugewiesen (helle vs. dunkle Seite), sodass das spätere Relief an den Skelettlinien die richtigen Kontraste trägt (Abbildung 4). Die Zuweisung läuft in mehreren Pässen wachsender Toleranz: zuerst erhalten die *wichtigsten* Linien (nach der Gewichtsordnung aus Stufe 3) ihren Wert, dann breitet sich die Zuweisung auf gleichgerichtete Nachbarn aus, danach werden verbleibende Linien gewichtet aufgelöst, und schließlich werden *widersprüchliche* Zuweisungen zugunsten der höher gewichteten Linie verworfen. Dieser mehrstufige, graph-gewichtete Prozess ist der algorithmisch heikelste Teil der Pipeline und zugleich — wie die Validierung zeigt (Abschnitt 6.1) — der Punkt, an dem unsere Reproduktion am stärksten von der Referenz abweicht.



Klassifiziertes Skelett

Skelett-Gerüst

Stützstellen-Maske

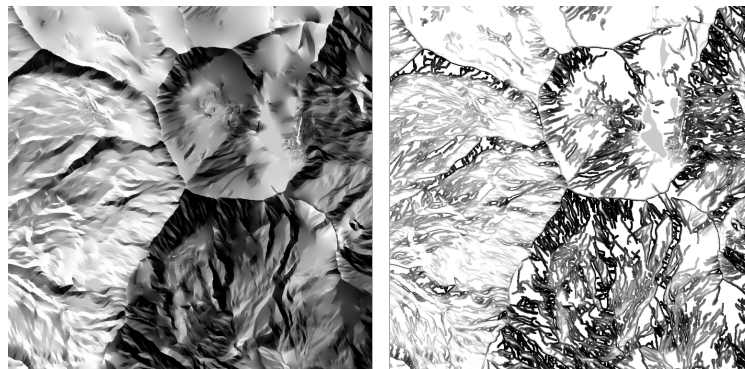
Abbildung 4: Stufe 4: klassifiziertes Skelett, Skelett-Gerüst und Stützstellen-Maske der Schattierung.

4.6 Stufe 5 — Flächenschattierung

Zwischen den Skelettlinien wird die Fläche schattiert, indem ein Laplace-Problem gelöst wird:

$$\nabla^2 u = 0 \quad \text{auf } \Omega, \quad u = g \quad \text{auf } \partial\Omega,$$

wobei die Skelettlinien die Dirichlet-Randwerte g — fest vorgegebene Helligkeiten an bekannten Linien — setzen (Grate hell, Rinnen dunkel) und ein iterativer Löser die Fläche dazwischen glatt interpoliert. Wo die Referenz einen Gauss-Seidel-Löser verwendet, setzen wir bewusst eine *Jacobi*-Iteration ein: sie ist vektorisierbar und kachelbar und damit Voraussetzung für den Skalierungs-Weg (Abschnitt 5). Aus dem Linien-Gerüst wird so eine durchgehende, plastische Relieffläche (Abbildung 5).



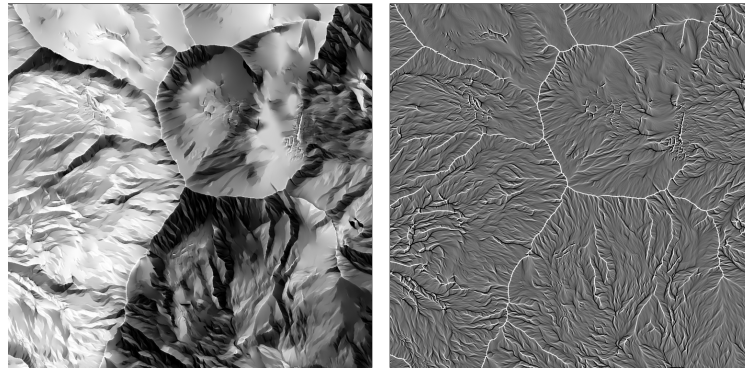
Flächenschattierung

Skelett + Fläche

Abbildung 5: Stufe 5: die aus dem Skelett interpolierte Flächenschattierung, mit überlagertem Gerüst.

4.7 Stufe 6 — Politur

Das Relief wird verfeinert. Ein Konvergenz-Index (Abbildung 6, rechts) betont Kämme und Mulden richtungsunabhängig und wird eingemischt, um lichtabgewandte Steilflächen zu strukturieren; flache Bereiche werden zum Mittelwert gezogen und eine Textur-Diffusion glättet die Übergänge. Ergebnis ist das fertige Schummerungs-Relief X_r — die plastische Grundlage der Schraffur.



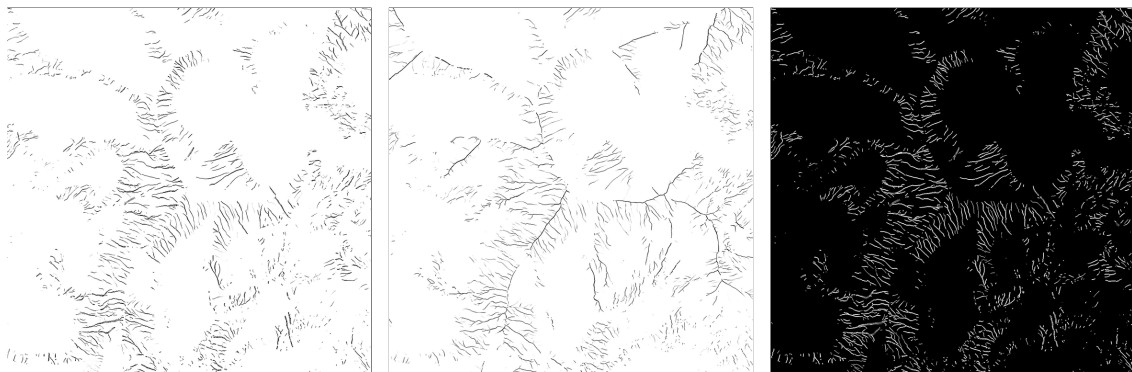
Poliertes Relief

Konvergenz-Index

Abbildung 6: Stufe 6: das polierte Schummerungs-Relief X_r und der strukturbetonende Konvergenz-Index.

4.8 Stufe 7 — Form- und Konturstriche

Entlang der Kanten entstehen mehrere Akkumulator-Raster: Formlinien, Grat-Linien und Mach-Band-Streifen (Abbildung 7), die den Kontrast an Kanten verstärken. Sie werden im Finale über die Schraffur gelegt.



Formlinien

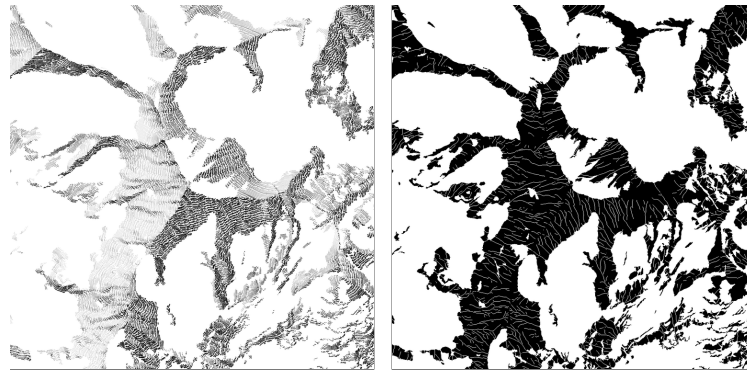
Grat-Linien

Mach-Bänder

Abbildung 7: Stufe 7: Formlinien, Grat-Linien und Mach-Bänder zur Kanten-Kontrastverstärkung.

4.9 Stufe 8 — Fels-Schraffur

Der eigentliche Zeichenschritt. Ein Stromlinien-Renderer platziert gleichabständige Striche entlang des Falllinienfeldes (n_x, n_y) ¹¹. Die Strichdichte richtet sich nach der Steilheit; leichte zufällige Variationen (Markov-Ketten) verhindern den mechanischen Eindruck und lassen die Zeichnung handgezeichnet wirken (Abbildung 8). Steile Felskanten (Cliffs) werden gesondert betont; die Zeichen-Maske begrenzt die Striche auf die Felsflächen.



Fels-Schraffur

Zeichen-Maske

Abbildung 8: Stufe 8: die gezeichnete Fels-Schraffur und die zugehörige Zeichen-Maske.

4.10 Stufe 9 — Endkomposition

Alle Ebenen werden pixelweise zusammengerechnet: Schraffur, Form- und Konturstriche, Grat-Linien und Mach-Bänder mischen sich zum fertigen 0..1-Grau- Bild (Abbildung 9). Transparent hinterlegt liegt es über der Reliefschummerung und den Höhenlinien der Karte; erst dieses Zusammenspiel ergibt das eigentliche Kartenbild (Abbildung 10).

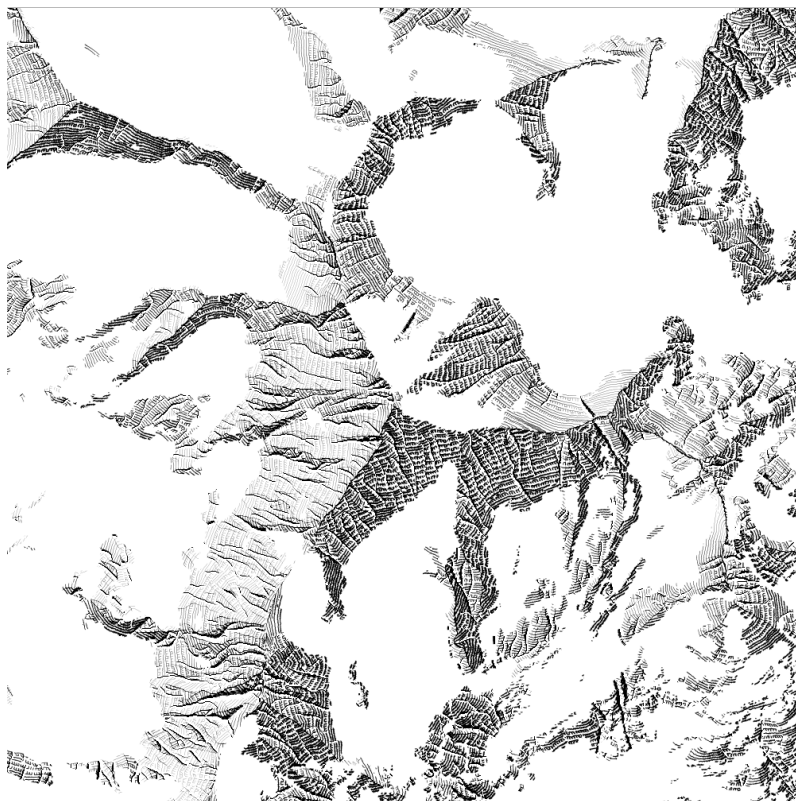


Abbildung 9: Stufe 9: die fertige, komponierte Fels-Zeichnung (Weisshorn) — das Endergebnis der Pipeline, transparent hinterlegbar über Schummerung und Höhenlinien.

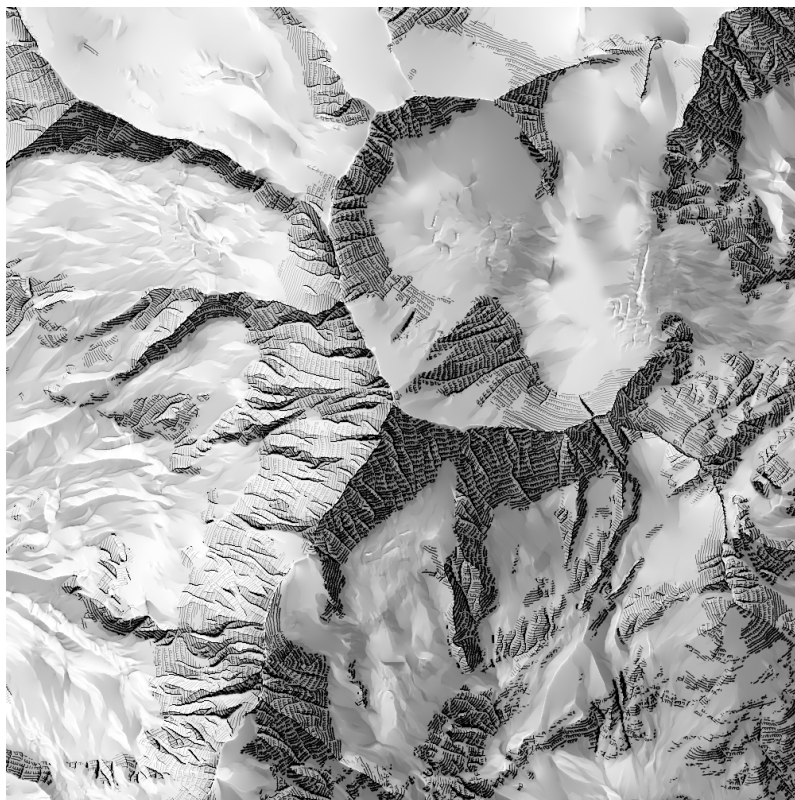


Abbildung 10: Das Kartenergebnis: die Fels-Schraffur über der Reliefschummerung X_r (Weisshorn). So erscheint die Zeichnung im Kartenbild — die Schummerung trägt die räumliche Plastik, die Striche die Felsstruktur.

5 Skalierung auf Ländermaßstab

Der beschriebene Algorithmus ist speicherintensiv: mehrere Fließkomma-Raster in Bildgröße, ein Pfad-Graph, iterative Löser. Auf einer Test-Kachel ist das unkritisch; auf einem landesweiten Raster — die Schweiz umfasst bei 5 m rund $3,3 \cdot 10^9$ Pixel — ist eine zusammenhängende Berechnung nicht praktikabel. Dies ist der Punkt, an dem unsere Arbeit über die Reproduktion hinausgeht.

5.1 Ein verworfener Weg: Out-of-Core

Wir haben zunächst eine *Out-of-Core*-Architektur entwickelt, die eine große, zusammenhängende Berechnung ermöglichen sollte: Zwischenprodukte auf speicherabgebildete Dateien ausgelagert, ein Mehrgitter-Löser mit Checkpoint/Resume für Stufe 5, dazu eine optionale native (Rust-)Portierung der heißen Pfade in Stufe 2. Dieser Ansatz ließ sich auf einer Pilot-Kachel demonstrieren, lief aber im alpenweiten Maßstab nicht zuverlässig durch. Wie stark er die Übereinstimmung mit der Referenz beeinträchtigt, haben wir anschließend quantitativ gemessen (Abschnitt 6.5): die Out-of-Core-Ausgabe driftet auf der finalen Schraffur deutlich von der Referenz ab, während die Rust-Beschleunigung die Übereinstimmung praktisch nicht verändert. Produktiv setzen wir daher die monolithische Pipeline ein (gekachelt mit Halo); die Out-of-Core-Variante und die Rust-Hot-Stages bleiben als getestete, optionale Bausteine im Code erhalten.

5.2 Der Produktions-Weg: gekachelte Berechnung mit Halo

Der tatsächlich eingesetzte Weg ist einfacher und robuster. Das Land wird in Kacheln fester Größe zerlegt (5×5 km, rund 1 Megapixel), von denen jede klein genug für den Arbeitsspeicher ist. Jede Kachel wird **unabhängig** mit der unveränderten, monolithischen Pipeline gerechnet; die

Kacheln lassen sich beliebig parallelisieren. Anschließend werden sie zu einem landesweiten Raster zusammengesetzt.

Damit die Kachelränder nahtlos anschließen, rechnet jede Kachel mit einem umlaufenden **Halo** — einem Überlappungsstreifen, der beim Zusammensetzen verworfen wird. Die Halo-Breite ist ein Kompromiss: zu wenig, und Faltungen sowie Stromlinien nahe dem Rand sind unvollständig; zu viel, und Halo-eigene Pfade verzerren das Ergebnis. Wir haben sie empirisch kalibriert (Abschnitt 6.2); 2000 m sind der Arbeitspunkt.

5.3 Nahtlosigkeit

Das Zusammensetzen wirft zwei unterschiedliche Naht-Probleme auf, je nachdem, ob die Ebene aus diskreten Strichen oder aus einem kontinuierlichen Grauwertfeld besteht.

Strichzeichnung — exakte Ausrichtung. Die Schraffur ist eine Strichzeichnung; hier müssen die Kacheln pixelgenau aneinanderstoßen. Fallen die Kachelgrenzen nicht glatt auf das 5-m-Raster — reale Kacheln messen etwa 5005,7 m = 1001,14 px —, akkumuliert sich der Bruchteil von 0,14 px über mehrere Kacheln, bis er eine Rundungsschwelle überschreitet. Dann wird ein Zielausschnitt um ein Pixel breiter als die geschriebenen Daten, die letzte Spalte bleibt leer, und es entsteht eine ein Pixel breite schwarze Naht — an rund 1 % der Kachelgrenzen, im Browser deutlich sichtbar. Die Behebung stellt sicher, dass jede Kachel ihren vollen Zielausschnitt füllt und das fehlende Pixel aus dem Halo deckt, sodass die Kacheln lückenlos und überlappungsfrei aneinandergrenzen; ein Regressionstest über einen mehrkacheligen Streifen echter Geometrie sichert dies ab.

Grauwertfeld — weicher Übergang. Die Reliefschummerung (das Zwischenprodukt X_r aus Stufe 6) ist ein kontinuierliches Grauwertfeld. Hier genügt exaktes Aneinandersetzen nicht: schon geringe Helligkeitssprünge zwischen benachbarten Kacheln sind als Naht sichtbar, weil jede Kachel ihren Grauwert unabhängig skaliert. Ein hartes Zusammensetzen scheidet damit aus — ohne eine Kopplung ließe sich die Schummerung gar nicht alpenweit darstellen. Wir lassen die Kacheln daher an ihren Rändern *ineinander überlaufen*: ein iteratives Poisson-Verfahren (Schwarz-Alternating-Methode, Jacobi-Kopplung zwischen Kacheln) sammelt in jeder Runde die Werte an den Nähten als Dirichlet-Randbedingungen ein und relaxiert jede Kachel gegen diese Werte, während der Bildinhalt im Kachelinneren erhalten bleibt. Der Start erfolgt warm (Initialisierung mit dem eigenen X_r), die Konvergenz wird über den mittleren Naht-Sprung (MAD — mittlere absolute Abweichung — an der Naht) geprüft; Eckpixel, die von mehreren Nähten gesetzt werden, werden gemittelt statt überschrieben — damit ist das Ergebnis unabhängig von der Iterationsreihenfolge. Für den alpenweiten Datensatz — rund 156 GB X_r — läuft dies im Streaming-Modus mit einem Arbeitsspeicher-Bedarf von etwa 200 MB. Tabelle 1 zeigt die Reduktion des Naht-Sprungs; das Verfahren konvergiert in einem einzigen Durchgang.

Datensatz	MAD vorher	MAD nachher	Faktor
Mont Blanc, 3×3 Kacheln	0,059	0,00003	≈ 2000
Alpen, 100 Kacheln	0,062	0,00006	≈ 1000
Alpen, 12 085 Kacheln	0,053	0,000045	≈ 1200

Tabelle 1: Mittlerer Naht-Sprung (MAD) der Reliefschummerung vor und nach der Schwarz-Alternating-Kopplung. Ein Durchgang genügt — auch alpenweit.

Man könnte einwenden, dass der kalibrierte Halo (Abschnitt 5.2) die Nähte doch bereits schließen müsste. Das tut er nicht — und der Grund ist aufschlussreich. Die Halo-Kalibrierung misst die *globale* Korrelation einer Kachel gegen die ungekachelte Berechnung; eine Naht ist aber nur ein wenige Pixel schmaler Streifen in einer Kachel von einer Million Pixeln und bewegt einen solchen

globalen Mittelwert kaum. Eine Kachel kann daher im Kachelinneren strukturell hervorragend mit der ungekachelten Referenz übereinstimmen und *zugleich* eine sichtbare Naht tragen: In unseren Messungen erreicht die Reliefschummerung bei 2000 m Halo eine Korrelation von $\approx 0,96$ gegen die ungekachelte Berechnung, während der rohe Naht-Sprung an der Kachelgrenze über alle drei Testregionen bei einem MAD von 0,03 bis 0,04 liegt (Tabelle 6) und sich auch mit breiterem Halo nicht schließt — für das Auge, das durchgehende Kanten verfolgt, sofort erkennbar. Der Halo und die Schwarz-Kopplung wirken also auf *orthogonalen* Achsen: der Halo sichert die globale Struktur-Treue des Kachelinneren, die Kopplung die naht-lokale Kontinuität. Ein global gemitteltes Kriterium wie die Korrelation kann eine Naht prinzipiell nicht erfassen; dafür braucht es ein naht-lokalisiertes Maß (MAD am Rand) und ein Verfahren, das die Randwerte explizit koppelt.

5.4 Extremrelief: vom Deadlock zur berechenbaren Kachel

Der Kachel-Ansatz macht die meisten Kacheln billig, aber nicht alle. In extremem Hochgebirgsrelief geriet Stufe 2 in einen praktischen Deadlock. Konkret betraf dies *zwei benachbarte* Kacheln am Mont-Blanc-Massiv — die Gipfelkachel und die unmittelbar angrenzende —, in denen mehrere iterative Teilschritte der Stufe 2 nicht in vertretbarer Zeit konvergierten: der Poisson-Löser des nahtlosen Klonens, der Line-Integral-Convolution-Walk und der Wettstreit konkurrierender Schräglucht-Stromlinien. Die dichte, senkrechte und vielfach gekammerte Geometrie erzeugt so viele konkurrierende Linien, dass allein der Kontest-Schritt über 24 Stunden in einer einzigen Kachel lief und den gesamten alpenweiten Durchlauf blockierte. Die Wurzel liegt bereits in der Referenz: der publizierte Poisson-Löser terminiert allein über eine Residuumsschwelle, *ohne Iterationsobergrenze*. Bei so langsam konvergierendem Extremrelief terminiert er ohne diese Obergrenze nicht in praktikabler Zeit — der Deadlock ist damit keine Eigenheit unserer Reimplementierung, sondern dem unbeschränkten iterativen Löser des Verfahrens inhärent.

Die Behebung hat drei Teile. Erstens haben wir den Kern des Wettstreits neu gefasst (*LineContestFast*): die drei-fach verschachtelten Schleifen sind durch komprimierte (CSR-)Indexstrukturen und einen Schnellpfad für nicht kollidierende Pfade ersetzt. Entscheidend ist, dass die Gewinner-Auswahl dabei *bit-identisch* zur ursprünglichen Fassung bleibt — ein Paritätstest vergleicht sowohl die Gewinner-Listen als auch die resultierende Schummerung Pixel für Pixel auf Mont-Blanc- und Mercantour-Kacheln. Zweitens erlaubt ein Iterations-Profilung die gezielte Kalibrierung der Iterationsobergrenzen von Poisson-Löser und LIC-Walk anhand konvergierter Nachbarkacheln, statt sie global konservativ zu wählen. Drittens bleibt eine Ausnahmeliste als Sicherheitsnetz, um eine einzelne pathologische Kachel nötigenfalls vom automatischen Lauf auszunehmen, ohne diesen zu blockieren.

Der Laufzeit-Gewinn ist stark von der Kantendichte abhängig (Tabelle 2): moderate Voralpen-Kacheln werden geringfügig schneller, die zuvor nicht terminierende Mont-Blanc-Gipfelkachel läuft in 2–3 Stunden durch. Damit ist Extremrelief nicht mehr eine ausgenommene Lücke, sondern berechenbar.

Kachel-Typ	Laufzeit-Gewinn
Voralpen (moderate Kanten)	$\approx 1,3 \times$
Mont-Blanc-Nachbar (extreme Steilwände)	$\approx 3,4 \times$
Mont-Blanc-Gipfel (Extremrelief)	24 h+ Deadlock $\rightarrow$ 2–3 h

Tabelle 2: Laufzeit-Gewinn von LineContestFast nach Kantendichte (bit-identische Gewinner-Auswahl). Der Extremfall wechselt von nicht-terminierend zu berechenbar.

6 Validierung

Die Absicherung erfolgt auf mehreren Ebenen: der stufenweise Vergleich der monolithischen Pipeline gegen die Referenz (Abschnitt 6.1), die Kalibrierung der Kachelung (6.2) und ihre Konsistenz über Regionen (6.3), die Qualität der Fels-Maske (6.4) sowie der quantitative Vergleich aller Implementierungs-Varianten (6.5). Die stufenweisen Vergleiche verwenden, wo nicht anders angegeben, die Testregion Blümlisalp (5×5 km) und die min/max-normalisierten Referenz-Ausgaben pro Stufe.

Weil im Folgenden mehrere Bezugsgrößen auftreten, halten wir vorab fest, was jeweils *Referenz* heißt. Drei sind zu unterscheiden: erstens die **externen Referenz-Ausgaben** des Geisthövel-Werkzeugs, gegen die die Reproduktions-Treue gemessen wird (6.1, 6.5); zweitens die **ungekachelte Eigenpipeline**, gegen die die gekachelte Berechnung als interner Paritätsmaßstab antritt (6.2, 6.3); drittens die **amtliche Fels-Ausweisung** aus swissTLM3D, gegen die die Qualität der Fels-Maske bewertet wird (6.4). Vergleiche gegen die externe Referenz messen die Treue zum publizierten Verfahren, interne Paritätstests die Treue der Skalierung zur eigenen monolithischen Pipeline.

6.1 Reproduktions-Treue (Stufe für Stufe)

Die Reimplementierung wird Stufe für Stufe gegen die Referenz geprüft. Die frühen, deterministischen Stufen sind praktisch identisch; die Differenz wächst erst in den Stufen mit iterativen Lösern und stochastischer Platzierung. Tabelle 3 fasst die Pearson-Korrelation r ausgewählter Zwischenprodukte zusammen.

Stufe	Ausgabe	r
1	Hangneigung	0,994
1	Schräglichkeit (LIC)	0,998
2	Schräglichkeit-Ebene	0,995–0,997
2	Kanten (Canny)	0,955–0,997
4	Skelett (Xass1)	0,758
4	Skelett (Xunass)	0,235
5	Flächenschattierung	0,820–0,851
6	Konvergenz-Index	0,954
9	Endkomposition	0,786

Tabelle 3: Korrelation r ausgewählter Stufen-Ausgaben gegen die Referenz (Blümlisalp). Frühe Stufen praktisch identisch; das Reliefskelett (Stufe 4) ist der größte echte Drift.

Zwei Punkte sind hervorzuheben. Erstens ist die **Endkomposition** mit $r = 0,78$ scheinbar moderat — doch die Pearson-Korrelation ist für Strichzeichnungen ein *strenges* Maß: ein um wenige Pixel versetzter Strich wird hart bestraft, obwohl das Bild perzeptuell nahezu identisch ist. Das Vergleichswerkzeug erfasst daher zusätzlich die *strukturelle Ähnlichkeit* (SSIM — ein Maß für wahrgenommene strukturelle Ähnlichkeit statt pixelgenauer Deckung, für Strichzeichnungen daher oft aussagekräftiger als reine Korrelation) als perzeptuell robusteres Maß: für die Endkomposition liegt sie mit SSIM $\approx 0,84$ spürbar über der Pearson-Korrelation (Tabelle 8). Zweitens ist das **Reliefskelett** (Stufe 4) die größte verbleibende Abweichung zur Referenz: die Klassifikation der unzugeordneten Pfade (Xunass, $r \approx 0,24$) driftet am stärksten und propagiert in die folgenden Stufen. Die Ursache ist keine numerische Instabilität, sondern *Ordnungssensitivität*: die mehrpassige Zuweisung (Abschnitt 4, Stufe 4) hängt an der exakten Delaunay-Adjazenz, der Gewichtsordnung und der Auflösung von Gleichständen im Konflikt-Pass. Wo mehrere Pfade denselben Rang oder Grauwert beanspruchen, entscheidet die Iterationsreihenfolge — ein Detail, das die Dissertation im Pseudocode nicht bis zur

Eindeutigkeit festlegt und das unsere Reimplementierung daher nur näherungsweise trifft. Der Effekt bleibt lokal auf die *unzugeordneten* Pfade beschränkt (die zugewiesenen Skelettlinien korrelieren deutlich höher); wir dokumentieren ihn offen, weil er die verbleibende Lücke zur Referenz am ehesten erklärt.

6.2 Kalibrierung des Halos

Die Halo-Breite (Abschnitt 5.2) bestimmt, wie gut die gekachelte Berechnung eine ungekachelte approximiert. Zur Messung zerlegen wir eine 15×15 -km-Region in 3×3 Kacheln, rechnen jede mit dem jeweiligen Halo und vergleichen die zentrale Kachel (Reliefschummerung X_r) mit einem ungekachelten 15×15 -km-Lauf derselben Region. Tabelle 4 zeigt die Korrelation über verschiedene Halo-Breiten.

Halo	r	Bewertung
0 m	0,719	nicht akzeptabel
500 m	0,889	sichtbare Differenz
1000 m	0,930	grenzwertig
2000 m	0,960	Arbeitspunkt
3000 m	0,961	marginal besser, +28 % Aufwand
4000 m	0,959	schlechter (zu viele Halo-Pfade)

Tabelle 4: Korrelation der gekachelten gegen die ungekachelte Berechnung (Reliefschummerung, zentrale 5×5 -km-Kachel), nach Halo-Breite — Region Blümlisalp. 2000 m ist der Arbeitspunkt.

Bemerkenswert ist, dass die Korrelation jenseits von 2000 m nicht weiter steigt, sondern bei 4000 m wieder fällt: ein zu breiter Halo bringt kachelfremde Pfade ins Bild, die das Ergebnis verzerren. 2000 m sind das Optimum aus Genauigkeit und Rechenaufwand.

6.3 Konsistenz über Regionen

Der in Tabelle 4 für Blümlisalp bestimmte Arbeitspunkt (2000 m Halo) wird mit demselben Verfahren — gekachelter Lauf gegen ungekachelte 15×15 -km-Referenz — auf weiteren alpinen Testregionen mit anderem Fels-Charakter geprüft (Weisshorn, kristallin und steil; Säntis, Kalk-Karst). Tabelle 5 zeigt den vollen Sweep pro Region.

Halo	Blümlisalp	Weisshorn	Säntis
0 m	0,719	0,838	0,855
500 m	0,889	0,901	0,938
1000 m	0,930	0,944	0,949
2000 m	0,960	0,939	0,966
3000 m	0,961	0,942	0,959
4000 m	0,959	0,949	0,939

Tabelle 5: Korrelation r (Reliefschummerung) über die Halo-Breite, drei Regionen. Der Anstieg bis 2000 m und das anschließende Plateau sind über alle Regionen stabil — das Verhalten ist algorithmisch, nicht geländespezifisch.

Am Arbeitspunkt (2000 m) liegt die Korrelation über alle drei Regionen im engen Band 0,94 bis 0,97 (Mittel $\approx 0,95$); die verbleibenden Regionsunterschiede liegen in der Größenordnung des Tile-

zu-Tile-Rauschens. Das Plateau ist damit eine Eigenschaft des Verfahrens, nicht des Geländes.¹

Der Halo verbessert die globale Struktur-Treue des Kachelinneren — aber er schließt die *Naht* nicht. Aus demselben Sweep misst Tabelle 6 den rohen Naht-Sprung (MAD der Reliefschummerung an der Kachelgrenze, vor der Schwarz-Kopplung aus Abschnitt 5.3) über die Halo-Breite.

Halo	Blümlisalp	Weisshorn	Säntis
500 m	0,091	0,064	0,088
1000 m	0,057	0,044	0,060
2000 m	0,043	0,029	0,033
3000 m	0,034	0,025	0,028

Tabelle 6: Roter Naht-Sprung (MAD der Reliefschummerung X_r an der Kachelgrenze, vor der Schwarz-Kopplung) über die Halo-Breite, drei Regionen. Ab 500 m — bei 0 m ist bereits das Kachelinnere unbrauchbar (Tabelle 5, $r \approx 0,72$), der Naht-Wert dort ist gegenstandslos.

Die beiden Sweeps laufen gegenläufig: Während die Korrelation bis 2000 m auf $\approx 0,95$ klettert (Tabelle 5), sinkt der Naht-Sprung nur von $\approx 0,08$ auf ein Plateau um 0,03 und schließt sich mit noch breiterem Halo nicht weiter. Das belegt die in Abschnitt 5.3 beschriebene Orthogonalität empirisch und über alle drei Regionen: der Halo sichert das Kachelinnere, die Naht verlangt ein eigenes, rand-lokales Verfahren — die Schwarz-Kopplung, die den Sprung auf $\approx 0,00004$ drückt (Tabelle 1).

6.4 Fels-Maske

Die aus swissTLM3D abgeleitete Maske erreicht auf CH-Testregionen einen F1-Wert von 0,68 bis 0,87 gegen die amtliche Referenz — die Obergrenze der Genauigkeit, die außerhalb der Schweiz mit weniger vollständigen Datenquellen erreichbar ist.

6.5 Varianten: Out-of-Core und native Beschleunigung

Neben der monolithischen Pipeline sind aus Skalierungs- und Geschwindigkeits- Motiven zwei Varianten entstanden (Abschnitt 5.1): eine *Out-of-Core*- Implementierung (speicherabgebildete Zwischenprodukte, Mehrgitter-Löser in Stufe 5, gehacktes Daten-Prep) für den Speicherbedarf, und eine optionale *native (Rust-)Beschleunigung* der dict-lastigen heißen Pfade in Stufe 2 (Kanten-Topologie, Pfad-Wettstreit). Beide werfen dieselbe Frage auf: Weichen sie vom Verhalten der monolithischen Pipeline ab — und wenn ja, wie sehr?

Absicherung auf zwei Ebenen. Auf Einheits-Ebene ist die Out-of-Core-Variante Stufe für Stufe gegen die monolithische Pipeline paritäts-getestet (über ein Dutzend Tests, je Stufe von 0 bis 9); die native Stufe 2 hat eigene Paritäts- und Smoke-Tests. Diese Tests binden den *numerischen Fehler pro Stufe* innerhalb einer Toleranz. Auf System-Ebene vergleichen wir zusätzlich jede Variante als Ganzes gegen die externe Referenz, mit demselben Werkzeug wie in Abschnitt 6.1. Tabelle 7 fasst die Test-Familien der Pipeline zusammen.

¹Die vollständigen Sweep-Daten (Korrelation je Halo-Breite und Region) liegen als CSV im Validierungs-Verzeichnis des Repositorys; den Naht-Sprung aus demselben Sweep zeigt Tabelle 6.

Test-Familie	Was geprüft wird
Out-of-Core $\leftrightarrow$ mono	Stage-Outputs numerisch gleich, Stufen 0 und 2–9
Native (Rust)	Bit-identische Gewinner-Auswahl + Smoke
Löser	Mehrgitter- und RAS-Löser gegen direkte Lösung
Naht-Korrektur	Schwarz-XR-Konvergenz, Eck-Fairness, Naht-Helfer
Integration	Vollständiger Pipeline-Durchlauf end-to-end
Deploy / Kacheln	Tile-Merge, Alpha-Integrität, Rsync-Optionen

Tabelle 7: Automatisierte Test-Familien der Pipeline (Auswahl). Die Varianten sind *by design* an die monolithische Pipeline gebunden — Abweichungen im Endergebnis müssen daher Toleranz-Akkumulation oder nicht abgedeckte Effekte sein, nicht unentdeckte Regressionen.

Aufbau. Wir haben drei alpine 5×5 -km-Regionen mit unterschiedlichem Fels-Charakter gewählt — Blümlisalp (gemischt), Weisshorn (kristallin, steil), Säntis (Kalk-Karst) — und für jede vier Varianten gerechnet: monolithisch, monolithisch + Rust, Out-of-Core, Out-of-Core + Rust. Alle vier Varianten *und* die Referenz erhalten bit-identisch dasselbe Höhenmodell und dieselbe Fels-Maske — dieselben exportierten Grid-Dateien werden an das Referenz-Werkzeug *und* an jede Variante gegeben. Der Vergleich isoliert damit ausschließlich den Algorithmus, nicht die Eingabe.² Tabelle 8 zeigt Korrelation und SSIM der finalen Schraffur gegen die Referenz.

Variante	Blümlisalp	Weisshorn	Säntis	$\bar{r}$
monolithisch	0,786 / 0,837	0,759 / 0,811	0,853 / 0,888	0,799
monolithisch + Rust	0,801 / 0,845	0,751 / 0,804	0,856 / 0,889	0,803
Out-of-Core	0,695 / 0,712	0,651 / 0,680	0,641 / 0,661	0,662
Out-of-Core + Rust	0,695 / 0,713	0,638 / 0,674	0,619 / 0,649	0,651

Tabelle 8: Finale Schraffur gegen die Referenz, drei Regionen $\times$ vier Varianten (Pearson r / SSIM). Die monolithische Pipeline ist durchweg am treuesten; die native Beschleunigung ist nahezu neutral, die Out-of-Core- Variante driftet deutlich.

Drei Befunde, teils gegen die ursprüngliche Erwartung:

- 1. Die monolithische Pipeline ist deutlich treuer als Out-of-Core.** Über alle drei Regionen liegt sie bei $r \approx 0,80$, die Out-of-Core-Variante bei $r \approx 0,66$ — eine über alle drei Regionen stabile Lücke von rund 0,14. Das ist der quantitative Grund, im Produktivbetrieb die monolithische Pipeline (gekachelt mit Halo, Abschnitt 5.2) einzusetzen und nicht die Out-of-Core-Variante.
- 2. Die Rust-Beschleunigung verändert die Korrelation praktisch nicht.** Auf der monolithischen Pipeline ist der Effekt im Mittel neutral ($+0,003$; Streuung $-0,008$ bis $+0,015$ je Region), auf Out-of-Core leicht negativ ($\approx -0,012$). Eine frühere Annahme, Rust koste spürbar Korrelation, bestätigt sich damit *nicht*. Wir halten Rust dennoch *opt-in*: der Standard-Pfad (reines Python) ist bit-treu zur Referenz-Logik, während Rust einen kleinen, nicht-referenzgleichen Drift einführt — bei vernachlässigbarem Gewinn an Übereinstimmung.
- 3. Die Abweichung von Out-of-Core entsteht diskret, nicht kontinuierlich.** Auf der kontinuierlichen Reliefschummerung hält Out-of-Core mit der monolithischen Pipeline mit (teils darüber, $r = 0,92$ – $0,95$); erst die finale Schraffur bricht ein. Eine stufenweise Gegenüberstellung lokalisiert dies: bis Stufe 2 sind beide identisch, ab Stufe 4 (Pfad-Zuweisung) und Stufe 5 (Mehrgitter-Löser) entstehen kleine, flächige Unterschiede ($r \approx 0,90$), die aber gut korreliert bleiben —

²Als Höhenmodell dient ein aus dem alpenweiten 3035-Mosaik auf EPSG:2056 reprojizierter Ausschnitt — für alle Varianten, die Referenz und den stufenweisen Vergleich (Tabelle 3) derselbe. Alle Fidelity-Zahlen dieses Papiers stehen damit auf einer Datenbasis.

bis die diskrete Strich-Schwellung in Stufe 8 sie verstärkt und die Korrelation auf $r \approx 0,61$ fällt (Tabelle 9).

Stufe	Ausgabe	r
1	Schräglichkeit (Hillshade)	1,000
2	Pfade / Kanten	0,99
4	Skelett (Xass1)	0,874
5	Flächenschattierung	0,905
6	Schummerung (X_r)	0,916
6	Konvergenz-Index	1,000
8	Fels-Füllung (Striche)	0,608
9	Endkomposition	0,718

Tabelle 9: Korrelation der Out-of-Core-Ausgabe gegen die monolithische Pipeline, Stufe für Stufe (Blümlisalp). Bis Stufe 2 identisch; kleine Feld-Unterschiede ab Stufe 4–5 bleiben gut korreliert, bis die diskrete Strich-Schwellung in Stufe 8 sie verstärkt.

Daraus ergibt sich eine Vermutung, warum Out-of-Core gerade auf der Schraffur schlechter abschneidet: Der alternative Löser und die gekunkelte Pfad-Zuweisung erzeugen numerisch kleine, aber flächendeckende Unterschiede im kontinuierlichen Feld. Solange das Ergebnis kontinuierlich bleibt, fallen sie kaum ins Gewicht — die Schwellwert-Entscheidung des Strich-Zeichnens (Strich oder kein Strich) macht sie jedoch an marginalen Pixeln sichtbar und verstärkt sie nichtlinear. Genau diese Verstärkung binden die stufenweisen Paritätstests *nicht*: sie können grün sein, während die finale Single-Tile-Korrelation abweicht. Das ist die derzeitige Grenze der Absicherung — und der Ansatzpunkt, falls Out-of-Core je produktiv treu werden soll.

7 Diskussion und Ausblick

Die Reproduktion zeigt, dass sich das Geisthövel-Verfahren¹ aus der publizierten Beschreibung zuverlässig rekonstruieren lässt. Der eigene Beitrag liegt in der Skalierung auf Ländermaßstab: die gekachelte Berechnung mit kalibriertem Halo (Abschnitt 5.2) macht das Verfahren auf landesweite Eingaben anwendbar; der neu gefasste, bit-identische Kontest-Kern (Abschnitt 5.4) macht selbst Extremrelief wie den Mont Blanc berechenbar, wo zuvor ein Deadlock stand; und die Schwarz-Alternating-Kopplung der Schummerungs-Kacheln (Abschnitt 5.3) erlaubt erst die nahtlose alpenweite Darstellung. Der alternative Weg über eine Out-of-Core-Architektur wurde erprobt, aber verworfen — die Varianten-Validierung (Abschnitt 6.5) belegt quantitativ, dass die monolithische Pipeline der Referenz deutlich treuer bleibt.

Auf algorithmischer Seite bleiben drei Punkte offen, die wir an ihren jeweiligen Stellen dokumentiert haben und hier bündeln: die *Ordnungssensitivität der Pfad-Zuweisung* in Stufe 4 (Abschnitt 6.1), die den größten Drift zur Referenz verursacht und aus einer im Pseudocode nicht vollständig festgelegten Gleichstand-Auflösung rührt; die *Orthogonalität von Halo und Naht* (Abschnitt 5.3), derzufolge die korrelationsbasierte Halo-Kalibrierung die Helligkeitsnaht der Schummerung prinzipiell nicht erfassen kann und eine separate Kopplung braucht; und die *Konvergenz iterativer Löser bei Extremrelief* (Abschnitt 5.4), deren Wurzel im unbeschränkten Löser der Referenz liegt und die wir durch beschränkte, kalibrierte Iteration entschärfen, aber nicht grundsätzlich lösen.

Die *wesentliche* Grenze liegt jedoch nicht im Algorithmus, sondern in der **Fels-Maske**: in der Schweiz ist sie dank swissTLM3D amtlich abgesichert, in anderen Ländern hängt ihre Qualität von der jeweiligen Datenlage ab. Eine datengetriebene Fels-Erkennung, die von amtlichen Ausweisungen

unabhängig ist — etwa aus multispektralen und morphometrischen Merkmalen —, ist Gegenstand einer begleitenden Arbeit und würde die Methode über die Schweiz hinaus konsistent machen.

Bei einer Übertragung auf andere Gebirgsräume oder Kartenstile lohnt es, zwei Ebenen zu trennen. Der *geometrische Kern* — LIC-Generalisierung, Kantenextraktion, Skelett-Relief, gleichabständige Stromlinien und die gekachelte Skalierung — ist weitgehend stilunabhängig und setzt allein ein hinreichend feines Höhenmodell und eine Fels-Ausweisung voraus. Stilgebunden an die Schweizer Tradition sind dagegen die *ästhetischen Kalibrierungen*: Strichdichte und -breite als Funktion der Steilheit, die Schräglicht-Konvention (Azimut 315°) und die Betonung von Graten und Kanten, die Jenny et al.⁵ als Swiss-Style-Gestaltungsprinzipien formalisiert haben. Eine Übertragung etwa auf den tschechischen Stil¹⁵ beträfe daher primär diese Parameter, nicht den geometrischen Kern — was die Reichweite des Verfahrens über die Schweiz hinaus plausibel, aber kalibrierungsabhängig macht.

Der Referenz-Algorithmus stammt aus R. Geisthövel, *Automatic Swiss Style Rock Depiction*, ETH Zürich 2017 (<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000201368>). Diese Arbeit ist eine eigenständige Reimplementierung mit Erweiterungen für den Ländermaßstab und erhebt keinen Anspruch auf die ursprüngliche Methode.

8 Referenzen

- [1] R. Geisthövel, „Automatic Swiss Style Rock Depiction“, Dissertation, 2017. doi: 10.3929/ethz-b-000201368.
- [2] E. Imhof, *Cartographic Relief Presentation*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1982.
- [3] L. Hurni, „Cartographic Relief Presentation Revisited — Forty Years after Eduard Imhof“, in *Landform — Structure, Evolution, Process Control*, Bd. 115, J.-C. Otto und R. Dikau, Hrsg., in *Lecture Notes in Earth Sciences*, vol. 115., Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, S. 1–20. doi: 10.1007/978-3-540-75761-0_1.
- [4] B. Jenny, J. Gilgen, R. Geisthövel, und L. Hurni, „Rock Drawing for Topographic Maps“, in *Proceedings of the 25th International Cartographic Conference (ICC)*, Paris, 2011.
- [5] B. Jenny, J. Gilgen, R. Geisthövel, B. E. Marston, und L. Hurni, „Design Principles for Swiss-style Rock Drawing“, *The Cartographic Journal*, Bd. 51, Nr. 4, S. 360–371, 2014, doi: 10.1179/1743277413Y.0000000052.
- [6] R. Geisthövel und L. Hurni, „Automatic Rock Depiction via Relief Shading“, in *Proceedings of the 27th International Cartographic Conference (ICC)*, Rio de Janeiro, 2015.
- [7] R. Geisthövel und L. Hurni, „Automated Swiss-Style Relief Shading and Rock Hachuring“, *The Cartographic Journal*, Bd. 55, Nr. 4, S. 341–361, 2018, doi: 10.1080/00087041.2018.1551955.
- [8] B. Cabral und L. C. Leedom, „Imaging Vector Fields Using Line Integral Convolution“, in *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '93)*, 1993, S. 263–270. doi: 10.1145/166117.166151.
- [9] J. Canny, „A Computational Approach to Edge Detection“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Bd. PAMI-8, Nr. 6, S. 679–698, 1986, doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [10] P. Pérez, M. Gangnet, und A. Blake, „Poisson Image Editing“, in *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2003)*, 2003, S. 313–318. doi: 10.1145/882262.882269.
- [11] B. Jobard und W. Lefer, „Creating Evenly-Spaced Streamlines of Arbitrary Density“, in *Visualization in Scientific Computing '97*, 1997, S. 43–55. doi: 10.1007/978-3-7091-6876-9_5.
- [12] B. Jenny, „Terrain generalization with line integral convolution“, *Cartography and Geographic Information Science*, Bd. 48, Nr. 1, S. 78–92, 2021, doi: 10.1080/15230406.2020.1833762.
- [13] L. Hurni, T. Dahinden, und E. Hutzler, „Digital Cliff Drawing for Topographic Maps: Traditional Representations by Means of New Technologies“, *Cartographica*, Bd. 38, Nr. 1–2, S. 55–65, 2001.
- [14] T. Dahinden, „Methoden und Beurteilungskriterien für die analytische Felsdarstellung in topografischen Karten“, Doctoral dissertation, 2008.
- [15] J. Lysák, „An Algorithm for Automated Digital Rock Drawing in the Style Used in Czech Topographic Maps“, *AUC Geographica*, Bd. 51, Nr. 1, 2016.
- [16] B. Jenny, M. Heitzler, D. Singh, M. Farmakis-Serebryakova, J. C. Liu, und L. Hurni, „Cartographic Relief Shading with Neural Networks“, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Bd. 27, Nr. 2, S. 1225–1235, 2020, doi: 10.1109/TVCG.2020.3030456.
- [17] swisstopo, „swissALTI3D — Das hoch aufgelöste Terrainmodell der Schweiz“. 2024.

- [18] swisstopo, „swissTLM3D — Das grösste dreidimensionale Topografiemodell der Schweiz“. 2024.