

# Computergestützte Schattierung in der Kartografie

–

## Estompage assisté par ordinateur en cartographie

Diplomarbeit – Travail de Diplôme

Bernhard Jenny

École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL  
Génie Rural

Ausgeführt am Institut für Kartographie  
der Eidgenössischen Technischen Hochschule ETH Zürich

–

Réalisé à l'Institut de Cartographie  
de l'École Polytechnique Fédérale de Zurich

Unter der Leitung von – Sous la direction de  
Prof. Dr. L. Hurni

Februar 2000  
Février 2000

## Zusammenfassung

Schattierungen werden in der Kartografie zur plastischen Visualisierung des Geländes eingesetzt und können auf traditionelle, manuelle Art oder mittels Computerberechnungen hergestellt werden. Als Ausgangsbasis dient für beide Methoden ein Geländemodell: Für die manuelle Herstellung meist in Form von Höhenlinien, die computergestützte Herstellung setzt ein digitales Höhenmodell voraus.

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Kartographie der ETH Zürich im Rahmen einer Diplomarbeit. Es wurde ein Prototyp eines Programmes entwickelt, welches die analytische, computergestützte Schattierung ermöglicht. Mittels verschiedener Algorithmen wurde ein Relief digital erstellt. Ein Vergleich mit einer konventionell erstellten Schattierung zeigt die Einsatzmöglichkeiten und die Grenzen klar auf.

Der erstellte Prototyp übernimmt Techniken und Arbeitsschritte, welche für die zeichnerische Herstellung von Schattierungen entwickelt wurden. So ermöglicht die Software zum Beispiel, am Bildschirm Teilgebiete zu vektorisieren, für welche die Parameter der Schattierung angepasst werden können. Der Kartograf kann folgende Einstellungen vornehmen: Lichtrichtung, Kontrast des Bildes, Überhöhung des Geländes, Ebenenton und Helligkeit.

## Résumé

L'estompage est un moyen de visualisation du relief en cartographie, produit de manière traditionnelle (dessins) ou par des calculs assistés par ordinateur. Les deux méthodes utilisent un modèle du terrain comme point de départ: dans le cas des dessins il s'agit des courbes de niveau, les calculs informatiques ont besoin d'un modèle numérique de terrain.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un travail de diplôme à l'Institut de Cartographie de l'ETH Zurich. Un prototype d'un logiciel pour l'estompage analytique assisté par ordinateur a été développé. Un estompage pour une carte topographique a été produit à l'aide de différents algorithmes. Une comparaison avec un estompage produit de manière traditionnelle montre clairement les domaines et les limites des applications possibles.

Le prototype reprend certaines techniques et les étapes de travail développées pour l'estompages par dessin manuel. Ainsi l'utilisateur peut vectoriser des régions à l'intérieur desquelles les paramètres pour l'estompage peuvent être adaptés. Le cartographe peut configurer les paramètres suivants: Direction de la lumière, contraste de l'image, exagération verticale du terrain et luminosité.

## Abstract

Hill shadings are used in cartography for plastic visualizations of the terrain and can be produced in a traditional, manual manner or by means of computer calculations. Both methods need an elevation model as a starting point: For the manual production usually in the form of contour lines, the computer-assisted production presupposes a digital elevation model.

The present work was developed at the Institute of Cartography of the ETH Zurich in the context of a master thesis. A prototype of a program was developed, which allows analytical oblique hill shading. By means of different algorithms the relief for a map sheet was digitally created. A comparison with a conventionally created hill shading clearly shows possible applications and their limitations.

The created prototype adapts techniques and work procedures which were developed for traditional production of hill shadings. Thus the software allows to vectorize subsections of an area for which the parameters can be adapted. The cartographer can adjust the following settings: Light direction, contrast of the picture, vertical exaggeration of the terrain model, gray tone for flat areas and brightness.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Kartografische Geländedarstellung</b>	<b>6</b>
2.1	Historische Entwicklung . . . . .	6
2.2	Einzelkoten, Höhen- und Tiefenkurven und hypsometrische Farb- stufen . . . . .	6
2.3	Schraffen . . . . .	8
2.4	Schattierung . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Traditionelle Schräglichtschattierung</b>	<b>12</b>
3.1	Lichtrichtung . . . . .	12
3.2	Farben . . . . .	14
3.3	Modellierung der Formen . . . . .	14
3.4	Luftperspektive . . . . .	15
3.5	Generalisierung . . . . .	16
3.6	Druck . . . . .	16
3.7	Vor- und Nachteile der manuellen Herstellung . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Analytische Schräglichtschattierung</b>	<b>19</b>
4.1	Schattierung in der Computergrafik . . . . .	19
4.2	Bedürfnisse der Kartografie . . . . .	22
4.3	Anwendungen von Schattierungsmethoden in der Kartografie . .	23
4.4	Normalvektor . . . . .	26
4.5	Lichtrichtung . . . . .	27
4.6	Überhöhung . . . . .	28
4.7	Luftperspektive . . . . .	28
4.8	Generalisierung . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Prototyp <i>Shadow</i></b>	<b>30</b>
5.1	Lokale Anpassungen . . . . .	30
5.2	Benutzeroberfläche . . . . .	31
5.3	Implementation . . . . .	32
5.4	Erweiterungen . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Praktische Anwendungen</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>Schlussanmerkungen</b>	<b>47</b>
<b>A</b>	<b>Handbuch zu <i>Shadow</i></b>	<b>48</b>
<b>B</b>	<b>Kontrastanpassung</b>	<b>58</b>
<b>C</b>	<b>Dateiformate</b>	<b>59</b>

# 1 Einleitung

Die analytische Schattierung umfasst verschiedene computergestützte, mathematisch eindeutige Methoden zur Erstellung von Schattenbildern. Dies im Unterschied zur traditionell angefertigten Handschattierung, bei welcher der Kartograf das Relief gestaltet.

Wenn die nötigen Grundlagendaten (Höhenmodelle) vorhanden sind, können analytische Schattierungen viel effizienter und kostengünstiger hergestellt werden als manuelle Schattierungen. Die Resultate bisheriger Versuche fielen aber meist unbefriedigend aus. Die Gründe dafür sind digitale Höhenmodelle mit zu groben Auflösungen und ungenügende Computerprogramme. So ist es mit den bestehenden Anwendungen nicht möglich, lokale, der Geländeform angepasste Änderungen vorzunehmen. Den Programmen mangelt es häufig an Interaktivität, da viele der Algorithmen möglichst alle Arbeitsschritte automatisieren wollen.

Diese Arbeit basiert auf einer Vielzahl von Untersuchungen, die auf dem Gebiet der analytischen Schattierung durch verschiedene Autoren durchgeführt wurden. Sie versucht diese aber um die Möglichkeit lokaler Anpassungen zu erweitern. Ob die erreichte Qualität für anspruchsvolle Karten genügend ist, kann der Leser selbst beurteilen (Probedruck auf Seite 45).

Dieses Dokument gibt zuerst einen Überblick zur historischen Entwicklung der verschiedenen Methoden der kartografischen Geländedarstellung und stellt dann die zeichnerische Herstellung von Schattierungen vor. Im folgenden Kapitel soll ein Überblick über bestehende Methoden der analytischen Schattierung gegeben und mögliche Wege aufgezeigt werden, wie die bewährten Techniken der manuellen Schattierung auf die computergestützte Methode übertragen werden können. Abschliessend werden der erstellte Prototyp und eine praktische Anwendung vorgestellt.

Nachstehenden Personen möchte ich für ihre Hilfe und Anregungen herzlich danken: Prof. Dr. Lorenz Hurni, Stefan Räber, Hansruedi Bär und Andrea Terribilini, alle vom Kartographischen Institut der ETH Zürich; sowie Heinz Stoll, Felix Arnet, Paul Ehrlich und Rudolf Morf, alle vom Bundesamt für Landestopographie, Wabern.

## 2 Kartografische Geländedarstellung

Die Methoden zur Geländedarstellung können in zwei Klassen eingeteilt werden:

1. Techniken, die sich nur auf ein Höhenmodell stützen (Höhenlinien, hypsommetrische Farbstufen oder Koten)
2. Verfahren, die zusätzlich eine Belichtung einbeziehen (Schattenschraffen oder Schräglichtschattierung)

### 2.1 Historische Entwicklung

Es fällt relativ leicht, die beiden horizontalen Komponenten der Landschaft darzustellen. Die Wiedergabe der dritten Dimension im planaren Kartenblatt ist aber ungleich schwieriger. Kartografen aller Epochen haben verschiedene Lösungen für dieses Problem erarbeitet: Von Schrägansichten, welche Berge als Maulwurfshaufen oder Bergfiguren darstellten, bis zu Karten im Grundriss, welche das Relief anschaulich und plastisch wiedergeben<sup>1</sup>.

Ein erster Höhepunkt der Geländedarstellung und zugleich die früheste *Reliefkarte*<sup>2</sup> war 1664 das Kartengemälde der Stadt Zürich und ihrer Umgebung von Hans Conrad Gyger. Dieses stellte erstmals das gesamte Relief in einer annähernd senkrechten Perspektive dar. Das Werk galt als militärisches Geheimnis und blieb deshalb leider ohne Einfluss auf die zeitgenössische Kartografie.

Entscheidende Fortschritte kamen Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts aus Frankreich: Das Relief wurde auf einigen Karten mit Schraffen dargestellt (siehe dazu Abbildung 5, Seite 11).

Eine nächste wichtige Etappe in der Entwicklung der Reliefkartografie war die *Topographische Karte der Schweiz* oder Dufourkarte, publiziert zwischen 1844 und 1864. Das Gelände wird unter Annahme einer Nordwestbeleuchtung durch extrem fein gestochene Schattenschraffen dargestellt.

Seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wird die Technik der Lithographie für den Druck von Karten eingesetzt: Die Schraffen konnten nun durch Schummerungen ersetzt werden, und es entstanden die ersten mehrfarbigen Karten. Ausserdem konnte erstmals mit Flächenfarbtönen experimentiert werden und langsam setzten sich auch die Höhenkurven durch. Die amtlichen Karten der Schweiz erscheinen seit 1938 mit einem Reliefton.

### 2.2 Einzelkoten, Höhen- und Tiefenkurven und hypsommetrische Farbstufen

Als Kote bezeichnet man die Angabe der Meereshöhe einzelner, markanter Geländepunkte, deren Höhenlage durch andere Mittel der Reliefdarstellung nicht oder nicht genau ersichtlich ist.

Niveaulinien oder Isolinien sind Verbindungslinien von Punkten gleicher Höhe oder Horizontalschnitte des Geländes. Sie wurden bereits im 16. Jahrhundert in

<sup>1</sup>Einen guten Überblick zur Entwicklung der Reliefkartografie gibt *Farbe, Licht und Schatten. Die Entwicklung der Reliefkartographie seit 1660* [9].

<sup>2</sup>Unter Reliefkarten werden Karten verstanden, in denen die Formen der Geländeoberfläche schattiert werden, unter Annahme eines schrägen Lichteinfalls, meistens aus Nordwesten oder Süden. Nach Cavelti et al. [9]



Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Kartengemälde des Zürcher Gebietes von Hans Conrad Gyger (1664/67), Originalmassstab ca. 1:32'000, Abbildung verkleinert.

Seekarten als Tiefenlinien (Isobathen) verwendet, konnten sich aber zur Darstellung des Festlandes (Höhenlinien oder Isohypsen) erst viel später durchsetzen. Niveaulinien sind ein wichtiges Element der kartografischen Geländedarstellung, weil sie als einzige in der Lage sind, die Geländeform geometrisch exakt festzulegen. Sie dienen überdies als Grundlage für die übrigen Arten der Geländedarstellung.

Die Höhenabstufung kann auch durch eine Flächentönung dargestellt werden. Man spricht bei farbigen Höhenabstufungen von einer hypsometrischen Farbgebung. Die Höhenstufenfarben können mit Flächenfarben zur Darstellung der Bodenbedeckung kombiniert werden. Dazu können zum Beispiel die Vegetationsstufen verwendet werden.





Abbildung 3: Ausschnitt aus der *Reliefkarte der Centralschweiz*, Vogelschaukarte (1887). Gezeichnet von Xaver Imfeld.

gung des Geländes, sondern entspricht dem hell-dunkel Effekt eines schräg von oben beleuchteten Geländemodells. Die Helligkeit des Geländes wird auf diese Weise von der Exposition der Hänge zu einer (imaginären) Lichtquelle abhängig. Durch die Schattenschraffen gewinnt die Geländedarstellung an Plastizität und Anschaulichkeit. Dieses Verfahren wird heute nur noch in kleinstmässigen Atlaskarten angewendet. Als Beispiel sei auf die *Topographische Karte der Schweiz* (Dufourkarte, publiziert 1844 - 1864) oder die *Carte topographique de l'Archipel Toscan ou de l'île d'Elbe et des îles adjacentes* (1821) verwiesen. Die Schattenschraffen letzterer Karte sind so fein, dass sie beinahe wie eine Schummerung wirken.

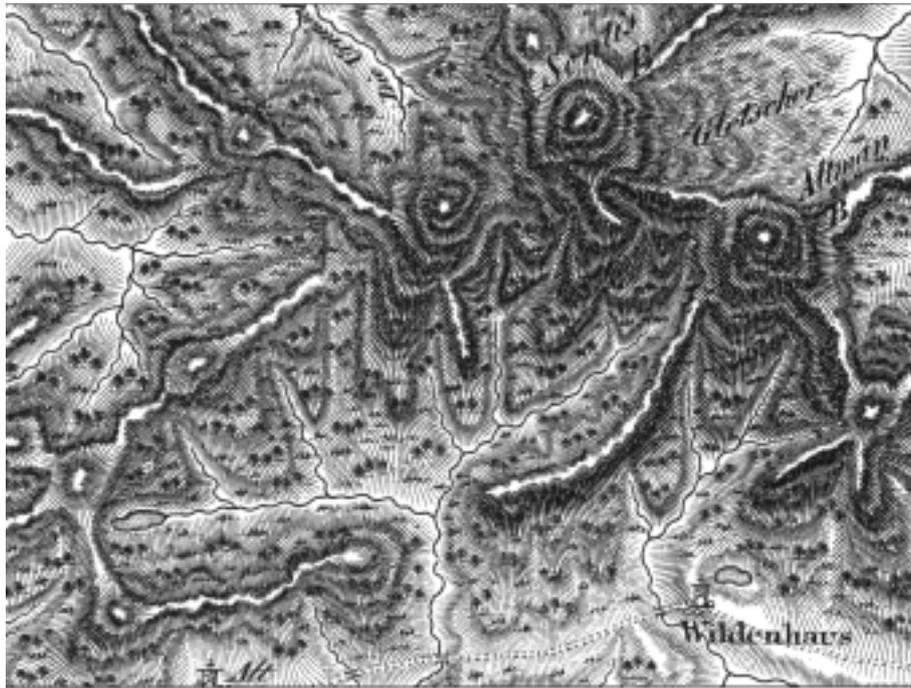


Abbildung 4: Ausschnitt aus dem Blatt *Sentis* der *Charte von Schwaben* 1:86'400, publiziert 1798 bis 1828

## 2.4 Schattierung

Im Gegensatz zu den Strichscharen der Schraffenmethode besteht die Schummerung aus flächenhaften Farbtönen. Schummerungen sind häufig monochrom und können nach irgendeinem Prinzip erarbeitet werden. Die Schattierung ist eine besondere Form der Schummerung, nämlich die Abbildung von Schattierungseffekten, welche durch eine Beleuchtung des Höhenmodells entstehen. Geometrisch exakte Informationen können durch eine Schattierung nicht vermittelt werden, vielmehr gibt die Schattierung den visuellen Charakter der Geländeformen wieder. Häufig wird die Schattierung in Kombination mit Höhenlinien eingesetzt, um die Geländeform zu verdeutlichen. Sie kann aber auch alleine bestehen. Nach Imhof [29] werden drei verschiedene Typen von Schummerungen unterschieden:

- Die Böschungsschummerung mit Tonabstufungen nach dem Prinzip *je steiler, desto dunkler*.
- Die Schräglightschattierung, welche das Schattenspiel wiedergibt, wie es bei schräg einfallendem Licht entsteht.
- Die kombinierte Schattierung, bei der die Effekte der Böschungsschummerung und der Schräglightschattierung kombiniert werden.

Wie bei den Böschungsschraffen bleiben bei der Böschungsschummerung die Ebenen weiss. Diese Technik versagt bei aneinanderstossenden Hängen gleicher

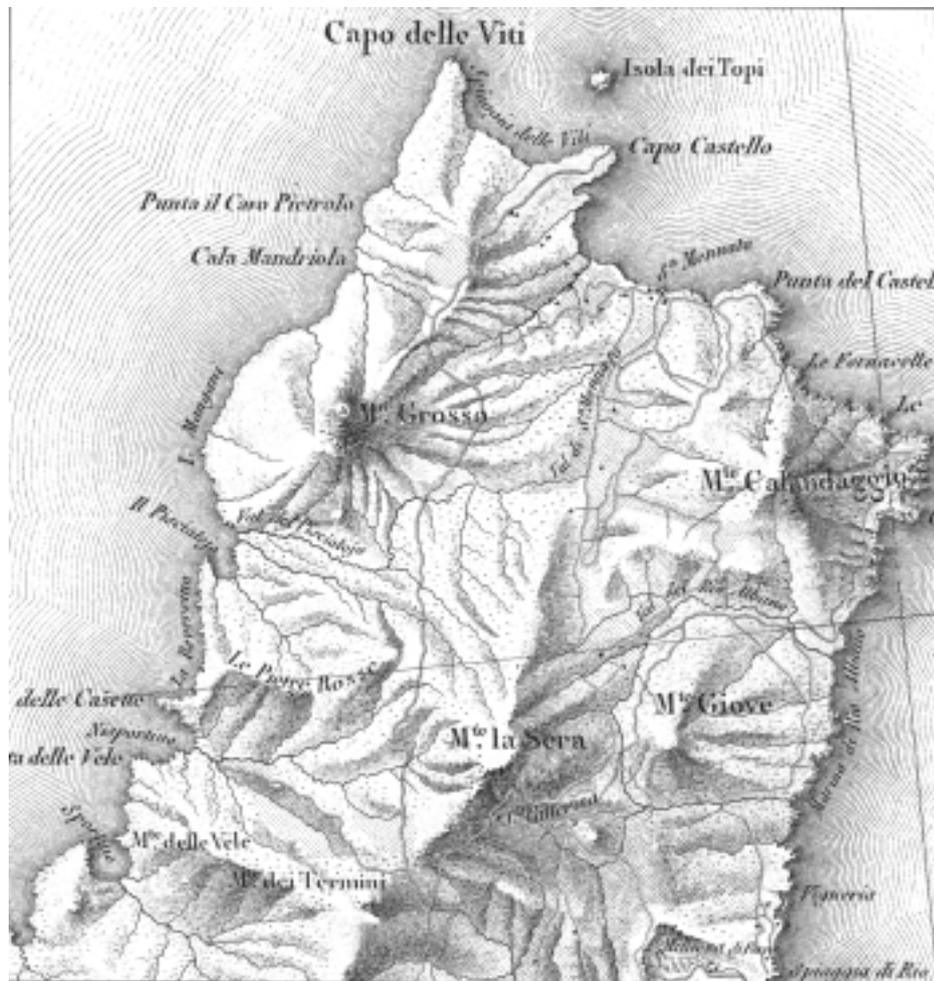


Abbildung 5: Ausschnitt aus der *Carte topographique de l'Archipel Toscan ou de l'île d'Elbe et des îles adjacentes* 1:50'000 (1821)

Neigung, da diese, wenn die Regeln streng angewendet werden, mit dem selben Farbton dargestellt werden. Diese Schummerungsart wurde früher als Nachfolger der Böschungsschraffen oft verwendet. Heute ist diese Technik aber überholt, weil sie unnatürlich und wenig anschaulich wirkt.

Die kombinierte Schattierung wurde vor der Schräglightschattierung entwickelt, auch sie lässt Ebenen weiss.

Von den drei möglichen Techniken hat sich die Schräglightschattierung durchgesetzt. Sie stellt die grössten Anforderungen an den Kartografen, bildet das Gelände aber viel anschaulicher und plastischer ab als die zwei andern Methoden (siehe dazu die Abbildung 6 auf Seite 13). Dies ist zu einem grossen Teil dem Ebenenton zuzuschreiben, der es ermöglicht, Schatten- und Lichthang in ein Gleichgewicht zu bringen.

### 3 Traditionelle Schräglichtschattierung

Die Schräglichtschattierung (Englisch: *oblique hill shading*) wird auch Schattenplastik genannt. Sie gibt den Eigenschatten eines Geländemodells wieder. Sie kann durch drei verschiedene Techniken erzeugt werden:

- Zeichnen der Schattierung auf Papier oder Folie<sup>3</sup>
- Fotomechanische Schummerung (oder Wenschow–Verfahren)
- Analytische, computergestützte Herstellung

Die Herstellung einer Schräglichtschattierung auf fotografischem Weg setzt ein Modell des Gebiets voraus. Es wurden spezielle Geräte entwickelt, um solche Modelle zumindest in ihrer Grobform relativ effizient aus einer Höhenlinienkarte abzuleiten. Das Modell muss sorgfältig ausgeleuchtet und fotografiert werden. Auch wenn die fotografischen Negative anschliessend retuschiert werden, um zum Beispiel Schlagschatten zu eliminieren, vermögen die so erzielten Resultate hohen Ansprüchen nicht zu genügen. Ausserdem ist die Herstellung der Modelle aufwendig und deshalb teuer. Aus diesen zwei Gründen werden nur wenige Schattierungen auf diesem Weg erstellt und die Technik wird hier auch nicht weiter beschrieben.

Die analytische Schattierung wird in Kapitel 4 vorgestellt, nachfolgend soll die zeichnerische Herstellung (vor allem basierend auf Imhof[29]) beschrieben werden.

#### 3.1 Lichtrichtung

Die Schräglichtschattierung schliesst mögliche Fehldeutungen wie im Falle der Böschungsschummerung weitgehend aus. Für die vorgängig beschriebenen Schattenschraffen und die Schräglichtschattierung ist die Wahl der Lichtrichtung dennoch von entscheidender Bedeutung. Sie muss so gewählt werden, dass auf dem Geländemodell eine möglichst günstige, reich differenzierte Gliederung von hell und dunkel entsteht, damit eine gute plastische Wirkung erreicht wird. Der Kartograf wählt eine Hauptrichtung und nimmt dann lokale Lichtdrehungen vor, um ungünstig zur Hauptrichtung stehende Formen besser zu modellieren. Dabei gilt es *stumme*, das heisst gebogene, aber dennoch gleichmässig getönte Flächen, sowie überbetonte Bildteile zu vermeiden. Die lokalen Abdrehungen des Lichts können auf verschieden grosse Gebiete angewendet werden: von Kleinstformen bis zu ganzen Gebirgszügen. Sie dürfen für den Betrachter der Karte jedoch nicht auf Anhieb erkennbar sein. Aus diesem Grund dürfen die lokal abgedrehten Lichtrichtungen nicht mehr als etwa 30° von der Hauptlichtrichtung abweichen und benachbarte Gebiete nicht aus ganz verschiedenen Richtungen beleuchtet werden.

---

<sup>3</sup>Wird die Schattierung mit Bleistift erstellt, spricht man von *schummern*.

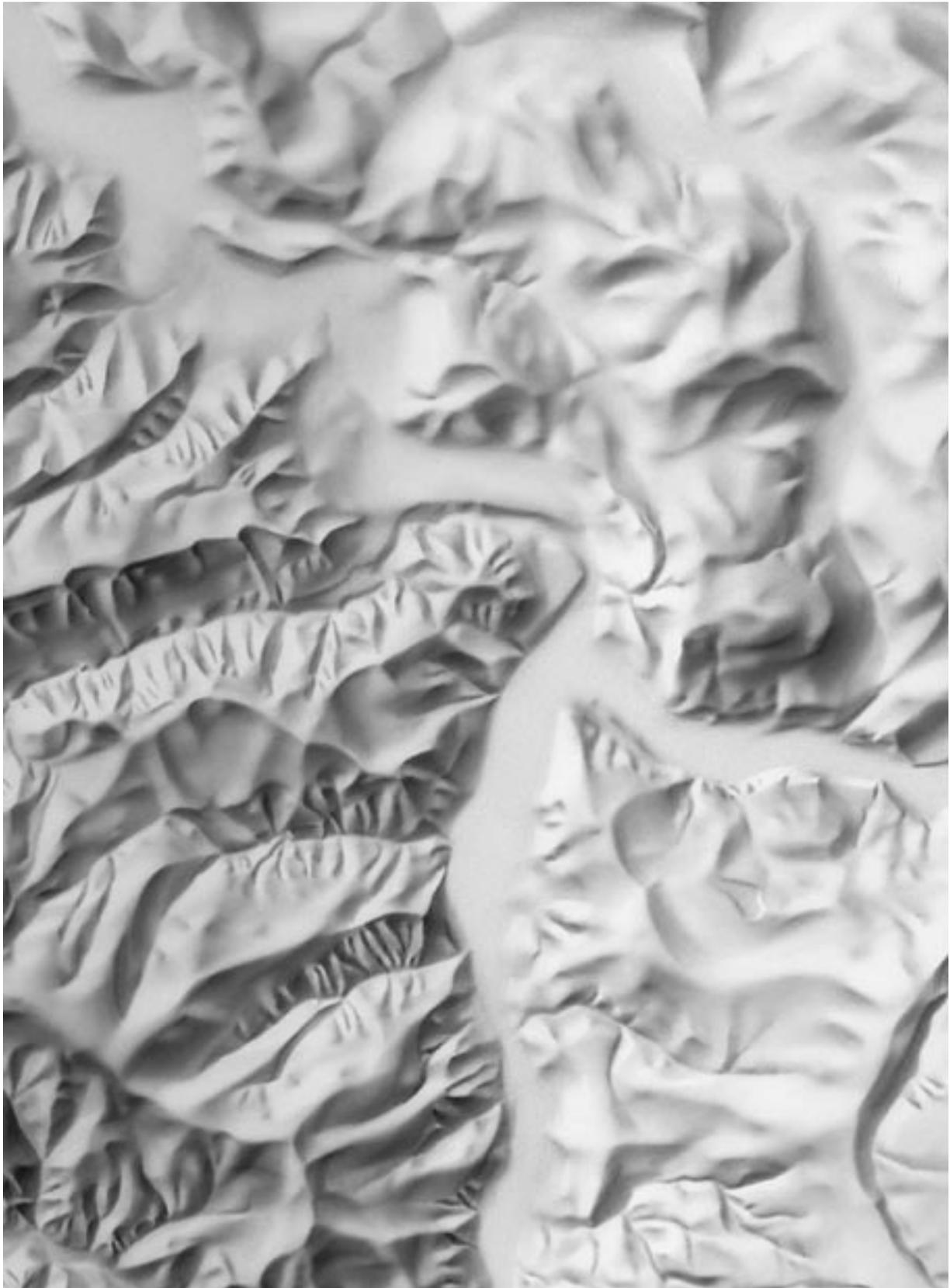


Abbildung 6: Ausschnitt aus dem manuell hergestellten Relief für die *Landes-*  
*karte der Schweiz*, Masstab 1:25'000, Blatt 1149 *Wolhusen*

Das gebräuchlichste Belichtungsmodell wendet einen schrägen Lichteinfall von links oben an. Die weite Verbreitung dieser Lichtrichtung hat ihre Ursprünge in der Schreibtechnik, wie sie in den abendländischen Schriftzügen angewendet wird (von links nach rechts) und in der Bevorzugung der rechten Hand. Ein Lichteinfall von links oben ist also beim schreiben oder zeichnen von Vorteil. Für die Nordhalbkugel wäre eine Südbeleuchtung (für nordorientierte Karten) durchaus natürlicher. Durch die Gewöhnung der meisten Kartenbenützer an eine Beleuchtung von links oben entsteht jedoch bei von unten beleuchteten Schattierungen häufig der Eindruck einer Negativform, man spricht von einer Reliefumkehr.

Nur am Rande wird in der Literatur die Wahl, respektive die Anpassung des Vertikalwinkels der Lichtrichtung behandelt. Imhof [29] empfiehlt für flaches Gelände einen Winkel von weniger als  $20^\circ$ . Für steile Hänge im Schatten soll ein Höhenwinkel von mehr als  $45^\circ$  gewählt werden, für steile Lichthänge aber ein flacherer Winkel, damit diese am hellsten erscheinen. Während der Ausarbeitung eines Schattenbilds berücksichtigen die meisten Kartografen jedoch nicht den Vertikalwinkel und dessen Anpassungen, sondern nehmen Aufhellungen und Abdunkelungen auf intuitive Weise vor. Es wird also nur der horizontale Beleuchtungswinkel dem Gelände angepasst.

Auf die Darstellung von Schlagschatten wird verzichtet, da diese das Kartenbild unnötig belasten und nicht zur Verbesserung der Plastik beitragen. Nur der so genannte Eigenschatten wird dargestellt. Imhof [29] spricht auch Glanzerscheinungen und Aufhellungen durch reflektiertes Licht jede Berechtigung ab, da beide nur verwirren.

## 3.2 Farben

Die Zeichnung soll zwischen tiefstem Schwarz und hellstem Weiss variieren. Erst bei der Aufbereitung für den Druck wird die Gradation optimiert und an das erwünschte Kartenbild angepasst.

Besondere Aufmerksamkeit erfordert der Ebenenton, welcher die Tonabstufung der restlichen Flächen bestimmt. Der Ebenenton wird im flachen Gebiet angewendet und darf nicht zu dunkel gewählt werden. Die übrigen Kartenelemente, welche in den Ebenen meist besonders dicht beieinander stehen, verlieren sonst an Gewicht und Klarheit. Hierdurch unterscheidet sich die Schräglightschattierung von der Böschungsschummerung, welche Ebenen weiss belässt.

Schattierungen werden meist in einem grauen oder grau-blauen Farbton gedruckt, es können aber auch ansprechende Resultate mit anderen Farben erzielt werden.

Die meisten Karten des schweizerischen Bundesamtes für Landestopographie werden zusätzlich mit einem Lichtton versehen. Dies soll eine Aufhellung der Sonnenhänge durch einen Gelbton simulieren. Als Druckvorlage für den Lichtton dient ein Negativ der eigentlichen Schattierung, es werden aber die Ebenen und Felspartien ausgespart.

## 3.3 Modellierung der Formen

Zur flächenhaften Tönung können Bleistift, Kohlestift oder Aquarellfarbe benützt werden. Die Aquarellfarbe wird mit Pinsel oder Spritzgerät (Aerograph

oder Airbrush) aufgetragen. Oft werden die verschiedenen Techniken kombiniert. Zum Beispiel werden Bleistiftschummerungen vielfach *laviert*: Mit stark verdünnter Tusche wird dem Original etwas vom Glanz des Graphits genommen. Ein so behandeltes Original eignet sich besser für die anschliessende fotografische Aufnahme. Bei der Bleistiftschummerung kann zudem der Kontrast an den höchsten Stellen im Relief verstärkt werden, indem Schattenseiten mit Feder und Tusche abgedunkelt und Lichtseiten mit weisser Farbe aufgehellt werden.

Als Zeichenuntergrund können transparente Folien oder Papier, das auf eine masshaltige Unterlage aufgezogen wurde (zum Beispiel Aluminiumplatten), verwendet werden. Auf Folien erreichen die Graustufungen des Bildes nicht den selben Kontrastumfang wie auf Papier.

Als Grundlage für die Schattierungsarbeiten dienen je nach Massstab Höhen- und Gewässerlinien, Felskanten und Strukturlinien. Wird Papier für die Zeichnung verwendet, werden diese Linien durch einen photochemischen Prozess (*Blaukopie*) aufgetragen. Nach Fertigstellung der Arbeit können die Linien ausgewaschen werden; oder es wird für die anschliessende Reproduktion ein Film verwendet, der unempfindlich ist für die Farbe der Linien. Wird auf Folie gezeichnet, können die Linien einfach hinterlegt werden.

Der Kartograf deckt zuerst alle ebenen Flächen (Terrassen, Tal- und Hochebenen) mit dem Ebenenton. Danach schwärzt er steile, dem Licht abgewandte Hänge. Dabei kümmert er sich nur um die Grossformen, Details wie Rippen oder Rinnen werden erst später bearbeitet. Den Höhenlinien folgend, arbeitet er sich um die Bergflanken herum bis zu den lichtzugewandten Partien. Um die Grossformen hervorzuheben, werden dem Licht zugewandte Seiten der Hauptkämme gesamthaft aufgehellt, vom Licht abgewandte Seiten abgedunkelt. Erst wenn die Grossformen plastisch herausgearbeitet sind, erfolgt die Modellierung der Kleinformen, die den Gesamteindruck im Grossen aber nicht stören dürfen. Erst nach und nach werden die Kontraste verstärkt, wobei besondere Aufmerksamkeit den Schattierungsübergängen zukommt. Scharfe Kanten verlangen schroffe Licht- und Schattenwechsel, gerundete Geländeteile aber weiche Übergänge. Es ist zudem möglich den Schummerton innerhalb einer nicht gebogenen Fläche zu einer Seite hin leicht zu verstärken, um eine bessere Kontrastwirkung mit einer anders orientierten Nachbarfläche zu bekommen. Bei all diesen Arbeiten werden nötige lokale Lichtabdrrehungen vorgenommen.

### 3.4 Luftperspektive

Die Atmosphäre enthält verschiedene Partikel wie Wassertropfen oder Staub, welche zu einer graublauen Verschleierung des Landschaftsbilds führen. Diese Erscheinung, auch Luftperspektive genannt, nimmt mit wachsender Distanz zu und hilft dem Betrachter einer Landschaft, Entfernungen besser zu schätzen. Kontraste zwischen hellen und dunklen Flächen werden mit zunehmender Distanz schwächer, dunkle Töne werden aufgehellt, sehr helle leicht abgedunkelt. Im Falle einer Karte sieht der Betrachter senkrecht von oben auf eine virtuelle Landschaft. Seine Distanz zu den Bergspitzen ist also kleiner also jene zu den tiefsten Punkten im Höhenmodell. Um die Luftperspektive nachzubilden, werden die Höhen deshalb mit stärkerem Kontrast gezeichnet als die Tiefen. Bei grossen Höhenunterschieden kann eine leichte Tonveränderung vorgenommen werden. Der Einbezug der Luftperspektive schützt vor der Reliefumkehr und hebt die Grossformen hervor.



Abbildung 7: Ausschnitt aus der *Landeskarte der Schweiz, Geophysikalische Ausgabe*, Massstab 1:1'000'000 (1994)

### 3.5 Generalisierung

Wird das fertige Schattenbild zu stark verkleinert, zerfällt es in viele Details, es wird unruhig und schwer lesbar. Es ist deshalb nötig eine Generalisierung des Höhenmodells in verschiedenen Etappen vorzunehmen. Der Generalisierungsgrad hängt ab vom Massstab, dem Kartentyp (Schulwandkarten, topographische Karten, Strassenkarten, etc.) und der Informationsdichte der Karte.

Im Falle einer kleinmassstäblichen Karte werden zuerst Details geglättet oder weggelassen. Danach können einzelne Täler eliminiert und Bergkämme zusammengefasst werden. Charakteristische Elemente wie zum Beispiel eine Klus werden vergrössert und hervorgehoben, Bergketten können überhöht werden. Der Kartograf wendet die Generalisierungsvorgänge an, mit denen er auch andere kartografische Elemente bearbeitet: Vereinfachen, vergrössern, verdrängen, zusammenfassen, auswählen, klassifizieren und bewerten (nach Hake und Grünreich [18]). Der Charakter des Geländes soll jedoch durch die Generalisierung nicht verloren gehen. Müssen zum Beispiel mehrere scharfkantige Bergketten zu einer einzigen zusammengefasst werden, so soll diese Kette die selben scharfen Kanten aufweisen (Abbildung 7).

### 3.6 Druck

Von der Originalzeichnung wird mittels einer fotografischen Aufnahme ein Negativbild angefertigt. Dieses Negativ wird durch einen zweiten fotografischen Prozess aufgerastert und seitenverkehrt auf einen Positivfilm belichtet, der anschliessend für den Offsetdruck verwendet wird. Durch die Rasterung werden die kontinuierlichen Farbverläufe von schwarz nach weiss in einzelne schwarze Punkte umgewandelt. Ein Grauton entsteht also durch eine bestimmte Dichte

von Punkten. Die Rasterung geschieht durch ein Kopieraster, welches zwischen Negativ und Positiv gelegt wird. Teilgebiete des Reliefs (und des Gelbtons) müssen durch eine Maske eliminiert werden, wie zum Beispiel Strassen, Seen oder Felsen.

Liegt das Relief in digitaler Form vor, kann das Maskieren und die Aufrasterung mit Computerprogrammen geschehen und die Filme für den Offsetdruck auf einem Filmbelichter erstellt werden. Es ist unwesentlich, ob die Bilder analytisch berechnet oder ob sie manuell hergestellt und anschliessend gescannt wurden.

Es ist wichtig, eine gute Tonstärke des Reliefs zu finden: Der kräftigste Schattenton soll noch durchsichtig erscheinen, zu blasser Schattenbilder verlieren hingegen an Plastizität.

### 3.7 Vor- und Nachteile der manuellen Herstellung

Gute, manuell hergestellte Schräglightschattierungen sind ein wichtiger Bestandteil moderner Karten und vermögen deren Lesbarkeit und Plastizität stark zu steigern. Eine gute Schattierung ist aber nicht unbedingt auf die übrigen Informationsebenen einer Karte angewiesen, sondern sie kann durchaus auch alleine bestehen und sogar zu eigentlichen Kunstwerken ausgearbeitet werden.



Abbildung 8: Ausschnitt aus dem *Relief der Schweiz*, Kartengemälde von Eduard Imhof, Massstab 1:300'000 (1982)

Qualitativ hochstehende Schräglightschattierungen können nur von erfahrenen Kartografen erarbeitet werden. Die Arbeit erfordert ein fundiertes Fachwissen, die Fähigkeit die Geländeform aus Kurvenbildern abzuleiten, Erfahrung im Umgang mit Zeichnungswerkzeugen und ein Talent für die grafische Gestaltung.

Die Erstellung eines Schattenbildes erfordert viel Zeit. Am Bundesamt für

Landestopographie der Schweiz benötigt ein Spezialist für das Relief eines Kartenblatts im Massstab 1:25'000 etwa 300 Arbeitsstunden. Diese Reliefs können jedoch für mehrere Ausgaben des selben Gebiets verwendet werden. Probleme ergeben sich, wenn das Bild nachgeführt werden muss. Dies kann besonders in Bergregionen nach Rutschungen oder im Falle von Gletscherbewegungen nötig werden. Häufige Korrekturen im selben Gebiet führen jedoch zu Qualitätsverlusten und das Bild vermag hohen Ansprüchen nicht mehr zu genügen. Eine komplette Neuerstellung des Reliefs ist in einem solchen Fall unumgänglich.

Auch lassen sich benachbarte, unabhängig voneinander schattierte Kartenblätter nur schwer zusammenfügen: Die Grautöne müssen über die Kartenblätter hinweg angepasst werden, um abrupte Übergänge zu vermeiden.

Nachführungen und Anpassungen der Grautöne über Kartenblätter hinaus können auch *manuell-digital* vorgenommen werden. Dazu müssen die Originale gescannt (Umwandlung in digitale Form) und mit einem Bildbearbeitungsprogramm editiert werden.

## 4 Analytische Schräglichtschattierung

In diesem Kapitel wird zuerst ein Überblick gegeben zu Schattierungsmethoden, wie sie in der Computergrafik angewendet werden [11, 43]. Danach werden die Anforderungen der Kartografie an eine computergestützte Schattierung aufgezeigt und abschliessend werden verschiedene, im Bereich der Computerkartografie durchgeführte Versuche zur analytischen Schattierung beschrieben und die Methoden, welche im Prototypen implementiert wurden, vorgestellt.

### 4.1 Schattierung in der Computergrafik

In verschiedenen Anwendungsbereichen der Computergrafik (CAD<sup>4</sup>, Ausbildung, Spiele, etc.) werden möglichst realitätsnahe, synthetische Bilder erzeugt. Es wurden dazu einige weit verbreitete und heute ausgereifte Methoden entwickelt, zu denen auch die Schattierung gehört. Zur Berechnung eines Bildes benötigt man zwei verschiedene Elemente: ein Schattierungsmodell<sup>5</sup> und ein Geometriemodell<sup>6</sup>. Die Schattierung der einzelnen Flächen des Geometriemodells ist durch drei Elemente bestimmt: die Position der Fläche, ihre Orientierung und die Oberflächencharakteristik. Die Interaktion zwischen Fläche und Licht kann durch optische und thermodynamische Gesetze beschrieben werden. Für die Berechnung von Schattierungen werden jedoch häufig empirische Regeln und Annäherungen verwendet, um die Berechnungen zu vereinfachen und zu beschleunigen oder weil genauere Modelle fehlen.

Mit allen Beleuchtungsmodellen lassen sich Graustufenbilder und Farbbilder berechnen. Für farbige Bilder müssen die einzelnen Farbkomponenten gesondert berechnet werden.

Es wird zwischen lokalen und globalen Beleuchtungsmodellen unterschieden: **Lokale Modelle** berücksichtigen lediglich die Interaktion zwischen einem Punkt der Oberfläche und der Lichtquelle; Effekte wie Spiegelung oder Strahlungsaustausch bleiben unbeachtet. Diese sind Gegenstand der **globalen Modelle**, wie *Ray Tracing* oder *Radiosity*.

Das wohl bekannteste lokale Modell ist das Phong-Beleuchtungsmodell. Es kombiniert folgende Elemente:

- Umgebungslicht
- diffus reflektiertes Licht
- spekulär reflektiertes Licht

**Umgebungslicht** (oder *ambient light*) trifft aus allen Richtungen auf die Oberfläche und wird auch gleichmässig in alle Richtungen reflektiert. Die Intensität des reflektierten Lichts hängt von der Intensität des Umgebungslichts und dem Reflexionsgrad der Oberfläche ab:

---

<sup>4</sup>CAD = *computer aided design*

<sup>5</sup>Ein Schattierungsmodell bestimmt für welche Punkte das Beleuchtungsmodell angewendet wird und welche Parameter dafür benutzt werden. Das Beleuchtungsmodell bestimmt die Farbe eines Punktes.

<sup>6</sup>Das Geometriemodell beschreibt die geometrischen Objekte, welche dargestellt werden sollen.

$$I_{amb} = I_a * k_a \quad (1)$$

wobei:

$I_{amb}$	Intensität des reflektierten Lichts
$I_a$	Intensität des Umgebungslichts
$k_a$	ambienter Reflexionsgrad

Der Faktor  $k_a$  nimmt einen empirischen Wert zwischen 0 und 1 an, das Modell entspricht also keiner physikalischen Realität.

Die **diffuse Reflexion** (oder Lambert-Reflexion) stellt eine Beziehung zwischen der Orientierung der Fläche und der Intensität eines Lichtstrahls her. Die Helligkeit ist gleich dem Kosinus des Winkels zwischen dem Lichtvektor und der Normalen auf dieser Fläche<sup>7</sup>:

$$I_{diff} = I_p * k_d * \cos \Theta \quad (2)$$

wobei:

$I_{diff}$	Intensität des diffus reflektierten Lichts
$I_p$	Intensität der direkten Beleuchtung
$k_d$	diffuser Reflexionsgrad
$\Theta$	Winkel zwischen Lichtvektor und Normale

Der empirische Faktor  $k_d$  beschreibt die diffuse Reflexionseigenschaft des Materials und hat einen Wert zwischen 0 und 1. Um die Berechnungen zu vereinfachen, wird für die diffuse Reflexion häufig paralleles Licht angenommen.

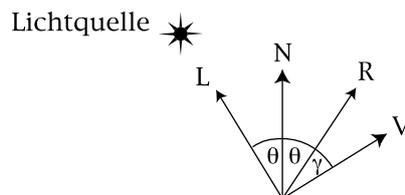
Die **spekulare Reflexion** (oder *specular reflection*) simuliert glänzende Oberflächen. Sie erzeugt richtungsabhängige Glanzlichter, es wird nicht in jede Richtung gleichviel Licht reflektiert. Die Helligkeit eines Punktes hängt von der Position des Beobachters ab:

$$I_{spec} = I_p * k_s * \cos^n \gamma \quad (3)$$

wobei:

$I_{spec}$	Intensität des spekulär reflektierten Lichts
$I_p$	Intensität der direkten Beleuchtung
$k_s$	spekularer Reflexionsgrad
$n$	Bündelung oder <i>shininess</i>
$\gamma$	Winkel zwischen Reflexionsvektor und Vektor zum Betrachter

Folgende Abbildung illustriert die verschiedenen Vektoren, die zur Berechnung der spekularen Reflexion bekannt sein müssen.



<sup>7</sup>Foley et al. [11] gibt eine geometrische Erklärung für dieses Gesetz.

wobei:

$L$	Lichtvektor
$N$	Normale
$R$	Reflexionsvektor
$V$	Vektor zum Betrachter

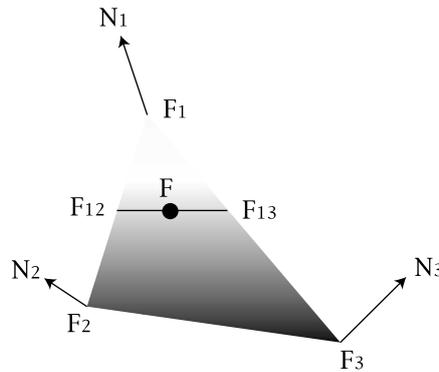
Ein perfekter Spiegel würde das auftreffende Licht nur in eine Richtung reflektieren. Die Lichtreflexionen eines realen Objekts hingegen sind mehr oder weniger fokussiert. Dieses Verhalten kann durch den Faktor  $n$  reguliert werden. Ist  $n$  gleich 1, wird das Licht nur schwach fokussiert reflektiert. Für einen perfekten Spiegel würde gelten:  $n = \infty$ .

Die Summe der Gleichungen 1, 2 und 3 wird als **Phong-Modell** bezeichnet:

$$I = I_{amb} + I_{diff} + I_{spec} \quad (4)$$

Geometriemodelle verwenden zur Abbildung von Objekten häufig Polygone, welche für die Berechnung der Schattierung verwendet werden. Der einfachste Schattierungsalgorithmus ist die konstante Schattierung oder **flat shading**. Dabei wird für jedes Polygon nur ein Farbwert berechnet, welcher anschliessend für das ganze Polygon verwendet wird. Geometriemodelle sind jedoch häufig nicht fähig, die exakte Form eines Objektes mit Polygonen wiederzugeben: Gebogene Flächen können häufig nur näherungsweise abgebildet werden. In solchen Fällen führt **flat shading** zu unbefriedigenden Resultaten: Die Kanten zwischen den einzelnen Polygonen treten zu stark in Erscheinung<sup>8</sup>.

Die **Gouraud-Schattierung** berechnet einen Farbwert für jeden Eckpunkt des Polygons und interpoliert anschliessend die Werte für jeden beliebigen Punkt innerhalb des Polygons. Auf diese Weise können Kanten zwischen den einzelnen Polygonen eliminiert werden.

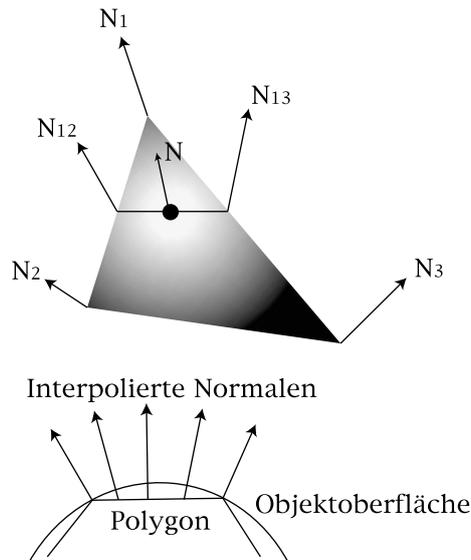


wobei:

$N_i$	Normalen in den drei Eckpunkten
$F_i$	Grauwerte berechnet aus den Normalen
$F_{ij}$	Interpolierte Grauwerte
$F$	Interpolierter Grauwert eines Punktes im Dreieck

<sup>8</sup>Die Kantenübergänge können etwas abgeschwächt werden, wenn die Punkte des Modells verdichtet werden. Es tritt dann aber der so genannte *Mach Band Effekt* auf[11].

Die **Phong-Schattierung**<sup>9</sup> liefert häufig bessere Resultate als die Gouraud-Schattierung. Statt den Farbwerten werden bei dieser Methode die Normalvektoren für jedes Pixel im Polygon interpoliert. Die resultierende Normale wird dann für die Berechnung des Farbwertes verwendet. Die Phong-Schattierung hat verschiedene Vorteile gegenüber der Gouraud-Schattierung. Vor allem können spekulare Reflexionen besser simuliert werden, da ursprünglich gekrümmte Flächen durch die Normaleninterpolation wieder hergestellt werden. Die Interpolation von Vektoren ist allerdings rechenintensiver und deshalb langsamer als die Interpolation von Grauwerten.



wobei:

- $N_i$  Normalen in den drei Eckpunkten
- $N_{ij}$  Interpolierte Normalen
- $N$  Interpolierte Normale eines Punktes im Dreieck

**Globale Modelle** erweitern die von den lokalen Modellen gebotenen Möglichkeiten, in dem sie erlauben, Spiegelungen und Refraktionen an (halb-) transparenten Körpern zu simulieren. Die bekanntesten globalen Modelle sind *Ray Tracing* und *Radiosity*. **Ray Tracing** eignet sich gut für die Simulation von Spiegelungen und Reflexionen, ist aber weniger geeignet für die Berechnung des Einflusses von Umgebungslicht. Die **Radiosity**-Methode stammt aus der Thermodynamik. Emissionen und Reflexionen von Lichtenergie werden mit thermischen Modellen berechnet. Einflüsse zwischen den Objekten können deshalb besonders gut simuliert werden.

## 4.2 Bedürfnisse der Kartografie

Analytisch hergestellte Schattierungen sollen die gleiche oder zumindest eine vergleichbare Qualität im gedruckten Kartenbild wie manuelle Schattierungen

<sup>9</sup>Der Phong-Schattierungsalgorithmus ist nicht mit dem Phong-Beleuchtungsmodell zu verwechseln.

aufweisen. Sie dürfen nicht übernommen werden, nur weil sie auf neuen, computergestützten Methoden beruhen, oder weil sie ein neues, ungewohntes Kartenbild ergeben.

Um dem erfahrenen Kartografen den Umstieg von der manuellen auf die analytische Methode zu erleichtern sowie um vorhandenes Wissen und Erfahrungen optimal weiter zu nutzen, sollen gewohnte manuelle Arbeitsschritte und -techniken von einem Computerprogramm soweit übernommen werden, wie dies sinnvoll erscheint. Folgende Techniken aus der manuellen Schattierung müssen simuliert werden:

- Abdrehen der Lichtrichtung
- Aufhellen und Abdunkeln von Bergflanken
- Anwendung eines konstanten Ebenentons auf alle Ebenen
- Kontrastanpassungen
- Generalisierung des Höhenmodells
- Einblenden von Höhenlinien, Gewässernetz und Felspartien

Alle Techniken müssen global (für das ganze Kartenblatt) und lokal (in definierbaren Ausschnitten) anwendbar sein, wobei die relevanten Parameter bequem einstellbar sein müssen. Der Einfluss jeder Änderung eines Parameters muss visuell (am Bildschirm) während der Bearbeitung überprüfbar sein. Das Programm soll möglichst viele Arbeitsschritte automatisieren. Gleichzeitig soll aber jeder Teil des Geländes und jeder Parameter durch den Benutzer angepasst werden können.

### 4.3 Anwendungen von Schattierungsmethoden in der Kartografie

Alle hier vorgestellten Methoden benötigen ein digitales Höhenmodell (DHM) als Ausgangsbasis. Ein digitales Höhenmodell enthält dreidimensionale Punkte, welche die Geländeoberfläche beschreiben. Höhenmodelle können aus unregelmässig angeordneten, durch Dreiecke verbundene Punkte (*TIN: Triangulated Irregular Network*) oder aus regelmässig angeordneten Punkten (*Grid: Englisch Gitter, Netz*) bestehen<sup>10</sup>. Höhenmodelle können photogrammetrisch aus Luftbildern oder durch Interpolation aus bestehenden Höhenkurven abgeleitet werden.

King [30] unterscheidet zwei prinzipiell verschiedene Methoden zur Erzeugung von Schräglightschattierungen: Die Vektormethode und die Differenzmethode.

#### Vektormethode

Die Vektormethode benützt die Tatsache, dass die Intensität des vom Gelände reflektierten Lichts abhängig von dessen Exposition zur Lichtquelle ist. Es wird

<sup>10</sup>Höhenmodelle enthalten nur Informationen zur Höhe des Geländes, Geländemodelle können auch andere Informationen beinhalten (zum Beispiel zur Bodenbedeckung).

also eine Beleuchtung simuliert. Bei allen Methoden wird eine Belichtungsrichtung (Höhenwinkel und Azimut) gewählt und für jeden Punkt im Rasterbild ein Normalvektor auf das Höhenmodell berechnet. Es können, wie in Kapitel 4.1 beschrieben wurde, verschiedene mathematische Relationen zur Berechnung des Grauwerts aus Normalvektor und Lichtvektor verwendet werden. Folgende Gruppierung kann vorgenommen werden:

- Phong- und Lambert-Modell
- *Shape-from-Shading*: Modelle aus der Photogrammetrie
- Andere empirische Modelle
- Globale Modelle

Erste Versuche mit der Vektormethode wurden von Yoéli [38, 39, 40, 41, 42] in den 60er Jahren durchgeführt. Er stützte sich dabei auf Arbeiten von Wiechel [37], der 1878 das **Lambert-Modell** zur Verwendung in der Kartografie vorschlug. Weil die technischen Möglichkeiten zur Zeit Yoélis für die Berechnung und Visualisierung noch nicht den heutigen Stand erreicht hatten, war die analytische Schattierung ein sehr arbeitsintensiver und zeitaufwändiger Prozess und die Resultate der Versuche fielen nicht überzeugend aus.

Lukas [31] stellt fest, dass in Schattierungen hergestellt mit dem Lambert-Modell, die Schattenhänge wenig differenziert sind und schwarz erscheinen. Er erweitert den Beleuchtungswinkel von  $180^\circ$  auf bis  $360^\circ$  und erhält damit besser strukturierte Schattenhänge. Einzelnen Facetten des Höhenmodells können mit dieser Methode also von unten beleuchtet werden.

Das **Phong-Modell** wurde bereits im Kapitel 4.1 erläutert. Versuche haben gezeigt, dass die spekulare Reflexion nur sparsam angewendet werden sollte.

In der Photogrammetrie wurden radiometrische Modelle entwickelt, um aus beobachteten Schatteneffekten auf die Gestalt eines beleuchteten Objektes rückzuschliessen. Diese Technik wird *Shape-from-Shading* genannt<sup>11</sup>. Aus einer einzigen Fotografie kann damit die Geometrie eines Objekts berechnet werden. Das Objekt muss dazu ein konstantes Reflexionsverhalten besitzen und aus einer bekannten Richtung beleuchtet werden. Horn [22] adaptiert solche Modelle zur Berechnung von Schattierungen<sup>12</sup>. Die Modelle ergeben allerdings nur kontrastarme Bilder.

Weitere **empirische Modelle** wurden von Gössmann et al. [12], von Hügli [23]<sup>13</sup> oder von Horn [22] vorgeschlagen. Letzterer berechnet zuerst für jeden Punkt die Steigungen parallel zu den horizontalen Koordinatenachsen X und Y. Aus diesen Werten wird anschliessend der Grauwert ermittelt, wobei Horn mit einer so genannten *Reflectance-map* arbeitet: Für alle möglichen Kombinationen der zwei Steigungen werden in einer ersten Etappe die Grauwerte berechnet und abgespeichert. Danach müssen nur noch die Steigungen berechnet werden, die Grauwerte können aus der Tabelle herausgelesen werden<sup>14</sup>. Durch dieses Vorgehen können die Berechnungen erheblich beschleunigt werden.

<sup>11</sup>*Shape-from-Shading*: Kraus [26]

<sup>12</sup>Horn [22] bespricht Modelle von *Minnaert* und *Lommel-Seeliger* (siehe auch Batson et al. [4]).

<sup>13</sup>Hügli macht Versuch mit Modellen von *Blinn* und *Torrance-Sparrow*

<sup>14</sup>Diese Technik wird in der Informatik als *look-up-table* bezeichnet. Sie wird auch von Niese und Weber [33] zur analytischen Herstellung von Schräglightschattierungen vorgeschlagen.

Bis anhin wurden nur wenige Schräglichtschattierungen publiziert, die mit **globalen Methoden** (siehe Kapitel 4.1) erzeugt wurden. Häfele [16, 17] hat Versuche mit *Ray Tracing* gemacht. Als Vorteile von *Ray Tracing* erwähnt er die Möglichkeit, mehrere Lichtquellen unterschiedlicher Art verwenden zu können. Atmosphärische Einflüsse (Dunst oder Nebel) können simuliert und die Oberfläche mit Texturen oder Reflexionseigenschaften versehen werden. Es fällt auf, dass Schattenseiten und tief eingeschnittene Täler besser als beispielsweise bei der einfachen Lambert-Methode ausgeleuchtet werden. Der grosse Nachteil von *Ray Tracing* ist die lange Rechenzeit.

### Differenzmethode

Die Differenzmethode verwendet richtungsabhängige Gradientenfilter, welche auf die Knoten des Höhenmodells (Grid) angewendet werden. So erzeugt ein Filter wie unten dargestellt ein Bild ähnlich einer Schräglichtschattierung mit einer Beleuchtung von oben links.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Der Wert 1 an der neunten Position der Matrize kann auch auf mehrere Stellen aufgeteilt werden, um das Azimut des Lichtvektors anzupassen. Der vertikale Winkel des Lichtvektors lässt sich mit dieser Methode nicht wählen. Böhm [5, 6, 7] kombiniert Graustufenbilder, die auf diese Weise berechnet werden, durch Addition, Subtraktion und logischen *Und*- respektive *Oder*- Operatoren. Ausserdem verwendet er Grauwerttransformationen (Gradationskurven), Bildverschiebungen und verschiedene Filter (Tiefpass, Hochpass, Bandpass<sup>15</sup>, etc.), die auf das Höhenmodell und den errechneten Graustufenraster angewendet werden. Er schlägt Abfolgen vor, mit denen diese drei Techniken kombiniert werden. Diese Operationen können zum grössten Teil auch mit rasterbasierten Grafikprogrammen ausgeführt werden wie King [30] aufzeigt. Die Abfolge der einzelnen Etappen ist allerdings relativ kompliziert und erfordert viel Vorstellungsvermögen und Erfahrung. Ausserdem können nur durch komplizierte Umwege (Masken) in Teilgebieten Korrekturen angebracht werden. Die Wahl der azimuthalen Richtung des Lichtvektors ist kompliziert, die vertikale Richtung kann wie erwähnt nicht gewählt werden. Trotz dieser Nachteile ist es möglich, ansprechende Resultate mit der Differenzmethode zu erreichen. Der Ansatz beider Autoren, senkrechte und schräge Lichtrichtungen zu kombinieren, ergibt kombinierte Schattierungen, welche jedoch, wie im Kapitel 2.4 gezeigt wurde, unerwünscht sind.

In den folgenden Kapiteln wird nicht mehr weiter auf die Differenzmethode eingegangen. Die meisten Ausführung sind aber für die Vektor- und die Differenzmethode gültig.

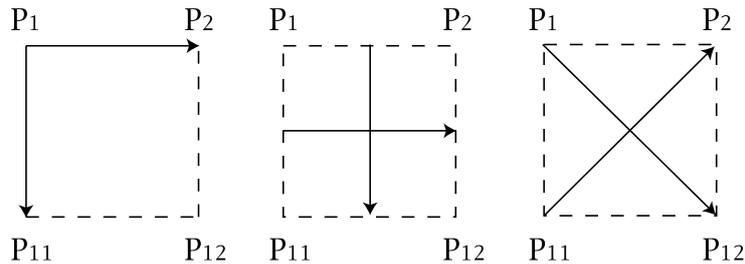
<sup>15</sup>Werden hohe Frequenzanteile (im Frequenzbereich) unterdrückt, spricht man von Tiefpassfiltern. Hochpassfilter ändern tiefe Frequenzen, Bandpassfilter ändern nur einen bestimmten Frequenzbereich. Im Ortsbereich wird nicht von Tiefpass- oder Hochpassfiltern gesprochen, sondern von Glättungs- und Differenzfiltern.

#### 4.4 Normalvektor

Höhenmodelle beschreiben das Gelände nur durch einzelne Punkte oder Linien. Soll ein Schattenwert berechnet werden, der nicht genau auf einen Punkt des Höhenmodells fällt, muss eine Methode gefunden werden, um den Wert zu interpolieren. Es bieten sich zwei Möglichkeiten für die Interpolation an: Es können die Grauwerte für die Punkte des Höhenmodells berechnet und dann der Schattenwert für den erwünschten Punkt interpoliert werden. Dies kann mit einer Gouraud-Schattierung (siehe Kapitel 4.1) oder im Falle von *Grids* mit *B-splines* (siehe Hügli [23]) oder andern mathematischen Funktionen geschehen. Als zweite Möglichkeit können die Normalvektoren für den erwünschten Punkt interpoliert werden. Hügli [23] zeigt, dass diese zweite Technik zu besseren Resultaten führt.

Für Höhenmodelle im *TIN*-Format bieten sich, wie bereits in Kapitel 4.1 erläutert, die Phong-Schattierung oder andere Interpolationstechniken an<sup>16</sup>. Zum Beispiel können zuerst die Normalvektoren aller Punkte des *TIN* berechnet werden, anschliessend kann für jeden beliebigen Punkt eine Normale in Funktion der Distanz zu den verschiedenen Normalen berechnet werden.

Für ein *Grid* existieren mehrere Möglichkeiten: Hügli [23] schlägt vor, für die Normalenberechnung einer Facette<sup>17</sup> das Vektorprodukt zu verwenden. Die nächste Abbildung zeigt verschiedene Vektoren, welche dazu verwendet werden können.



Soll die Normale eines Eckpunktes berechnet werden, können Vektoren zu beliebig vielen Nachbarn gebildet werden, aus je zwei Vektoren das Vektorprodukt und schliesslich ein Mittel berechnet werden. Hodgson [20] vergleicht verschiedene Algorithmen für die Berechnung von Normalvektoren und kommt zum Schluss, dass die besten Resultate erzielt werden, wenn vier der Nachbarpunkte berücksichtigt werden.

Gottschalk [13] schlägt vor, eine Ebene durch die vier nächsten Nachbarpunkte mit dem Verfahren der kleinsten Quadrate zu legen und daraus den Normalvektor abzuleiten.

Goss [15] berechnet die Normalvektoren auf Basis einer Fourier-Transformation. Die von ihm vorgelegten Resultate scheinen jedoch nicht geeignet für eine Anwendung für die Schattenberechnung, da kleine Unebenheiten zu stark in Erscheinung treten.

<sup>16</sup>Siehe Bartelme [3]

<sup>17</sup>Als Facette bezeichnet man eine Fläche, die durch drei oder mehr Punkte eines Graphen definiert wird (nach Bartelme [3]).

## 4.5 Lichtrichtung

Schon Yoéli [41] bemerkte bei seinen ersten Versuchen, dass eine Anpassung der **azimutalen Lichtrichtung** an die Geländeform wie bei der traditionellen, manuell hergestellten Schummerung unerlässlich ist. Er unterteilt deshalb der zu schattierende Perimeter in einzelne Teilgebiete, denen er jeweils eine eigene horizontale Lichtrichtung zuweist.

Um kleine Formen ebenfalls besser zu modellieren, entwickelt er einen Algorithmus, welcher eine **alternative Lichtquelle** benützt, wenn der Winkel zwischen Licht- und Normalvektor nahe bei  $90^\circ$  liegt. Beide Lösungen erzeugen aber durch die plötzlichen Lichtwechsel abrupte Übergänge.

Brassel [8] entwickelt eine relativ komplizierte Technik für die **semiautomatische Anpassung** der Lichtrichtung an die Geländeform<sup>18</sup>. Im Prinzip wird jedem Punkt des Höhenmodells (*Grid*) eine eigene Lichtrichtung zugewiesen, welche dann für die Schattierungsberechnung verwendet wird.

Zuerst müssen Kantenlinien des Höhenmodells manuell digitalisiert werden. Jede Linie bekommt nun ein Gewicht in Abhängigkeit der Wichtigkeit der Geländeform für welche sie steht. Auf diese Weise sollen Grossformen betont werden können. Jede Facette des Höhenmodells, die von einer solchen Linie geschnitten wird, bekommt eine Lichtrichtung zugewiesen, die aus der Orientierung der Linie berechnet wird. Um die Lichtrichtungen für Punkte, die nicht von Kantenlinien geschnitten werden, zu bestimmen, sucht ein rasterbasierter Algorithmus für jeden Punkt in Richtung der acht Nachbarn, bis er auf eine Kantenlinie stösst. Die endgültige Lichtrichtung für jeden Punkt wird dann aus den Richtungen der benachbarten Kantenlinien gemittelt. Als Gewichte werden die Distanzen zwischen dem Punkt und den Kantenlinien verwendet.

Der Algorithmus erzeugt gute, aber nicht perfekte Resultate. So kann er unter bestimmten Umständen grosse Sprünge der Lichtrichtung nicht vermeiden. Ein weiterer Schwachpunkt ist, dass während der Digitalisierung der Kantenlinien nicht klar ersichtlich ist, welchen Einfluss eine Linie auf ihre Umgebung haben kann und wie weit ihr Einfluss reichen wird. Nach Lukas [31] können durch den Einbezug der Kantenlinien zwar vorher stumme Kanten hervorgehoben, andere vorher gut ausgeleuchtete Kanten können jedoch abgeschwächt werden. Auch bemängelt Lukas, dass Grossformen nicht genügend hervorgehoben werden.

Die azimutalen Lichtrichtungen werden in Brassels Methode kontinuierlich variiert. Dies hat den Vorteil, dass, ähnlich wie im Kapitel 3.3 für die manuelle Schattierung beschrieben, innerhalb einer nicht gebogenen Fläche gegen Kanten hin eine kontinuierliche Aufhellung oder Abdunkelung automatisch erreicht wird. Es ist aber sehr schwierig, wenn nicht gar unmöglich, diese Anpassungen durch zusätzliche Kantenlinien lokal zu steuern.

Mark [32] schlägt vor, eine **Kombination von Schattenbildern** zu erstellen. Die einzelnen Bilder werden mit verschiedenen azimutalen Winkeln berechnet (zum Beispiel  $225^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $315^\circ$  und  $360^\circ$ ). Zur Gewichtung der Einzelbilder verwendet er die Orientierung (*aspect*) der Flächennormalen<sup>19</sup>. Lukas [31] adaptiert diese Methode für den Relieftyp der Alpen und vergleicht die Resultate dieser und anderer analytischer Schattierungstechniken. Er findet, dass Bilder,

<sup>18</sup>Gottschalk [14] stellt eine weiterentwickelte Version vor.

<sup>19</sup>Hobbs [19] verwendet diese Methode um farbige Reliefs zu erstellen.

welche mit der Technik von Mark berechnet werden, nur einen schwachen Kontrastumfang haben und Grossformen nur ungenügend hervortreten. Die Kleinstrukturen werden hingegen sehr gut modelliert.

Yoéli [41] und Brassel [8] passen auch den **Höhenwinkel** der Lichtrichtung der Steilheit des Geländes an. So soll verhindert werden, dass ein Steilhang, dessen Flächennormale flacher liegt als der Lichtvektor, abgedunkelt wird. Ist der Höhenwinkel der Flächennormalen kleiner als jener der Lichtrichtung, wird das Licht abgeflacht.

Verschiedene Autoren<sup>20</sup> haben Versuche mit **Schattenwurf** gemacht. Wie aber bereits im Kapitel 3.1 dargelegt, eignen sich solche Bilder normalerweise nicht als Basis für Karten.

## 4.6 Überhöhung

Der Kontrast und somit auch die plastische Wirkung des Schattenbildes können durch eine Überhöhung verbessert werden. Bereits Yoéli [41] hat damit experimentiert. Eine Überhöhung kann durch eine einfache Multiplikation der Höhenwerte mit einem beliebigen Faktor erreicht werden. Auch Lukas [31] machte dazu Versuche: Er wendet Überhöhungen in Funktion der Steigung an. Flache Gebiete werden mit einem kleineren Faktor multipliziert als steile Gebiete. Damit erzielt er in Kombination mit einer Lambert-Schattierung, die auf  $360^\circ$  erweitert wurde (siehe Kapitel 4.3), gute Resultate.

## 4.7 Luftperspektive

Die Luftperspektive kann, wie im Kapitel 3.4 gezeigt, durch zwei Arten simuliert werden:

- Kontraststeigerung in den hohen, respektive Kontrastminderung in den tiefen Geländeteilen
- In tiefen Lagen: Aufhellen von dunklen und leichtes Abdunkeln von hellen Farben

Luftperspektivische Korrekturen müssen also nach einer ersten Berechnung der Schattenwerte angewendet werden.

Brassel [8] stellt eine Methode vor, um Kontrastanpassungen in Abhängigkeit der Höhe vorzunehmen. Die vorgestellten Resultate sind gut und effektiv. Auch schlägt er vor, tiefe Stellen durch addieren von Weiss aufzuhellen. Diese Aufhellungen sollten jedoch nur sehr vorsichtig angewendet werden.

Patterson<sup>21</sup> benützt ein Graphikprogramm um mit Hilfe einer Graustufen-darstellung des Höhenmodells am Schattenbild Kontrastanpassungen vorzunehmen.

Atmosphärische Streuung kann durch ein Modell von Ding und Densham [10] simuliert werden. Aus der Geometrie der Nachbarpunkte wird ein so genannter *solid angle* berechnet: ein Mass für das Luftvolumen über und um den Punkt. Aus diesem *solid angle* kann die Streuung (oder diffuse Beleuchtung) berechnet werden, die zum vorher berechneten Schattierungswert addiert wird.

<sup>20</sup>Hügli [23, 24], Ware [35], Ding und Densham [10]

<sup>21</sup>Tom Patterson: Creating Swiss-style shaded relief in Photoshop  
<http://www.nps.gov/carto/silvretta/shading/Swiss.html>

## 4.8 Generalisierung

Weibel [36] unterteilt die Verfahren zur computergestützten Generalisierung in drei Gruppen:

- Filterorientierte Verfahren
- Informationsorientierte Verfahren
- Heuristische Verfahren

**Filterorientierte Verfahren** können im Frequenzbereich oder im Ortsbereich angewendet werden. Im Ortsbereich kann eine Glättung durch ein gleitendes Mittel erreicht werden. Dazu kann zum Beispiel folgende Matrize verwendet werden:

$$H = \frac{1}{9} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$H$  bezeichnet den neuen Wert für die Höhenkote. In diesem Beispiel wird ein arithmetisches Mittel aus der ursprünglichen Kote und den acht Nachbarn berechnet.

Die Grösse des Filters, die Gewichte an den verschiedenen Positionen sowie die Anzahl der Filterdurchgänge können variiert werden. Ist die Filtermaske gross, die Verteilung der Gewichte flach und werden mehrere Durchgänge gewählt, wird die Fläche stark geglättet.

Ein weiterer Filtertyp ist der Median-Filter, der den Höhenwert jedes Punktes durch den Median der Höhenwerte der Nachbarpunkte ersetzt.

Beide Filter (Median und Mittel) haben den Nachteil, das sie Kanten unscharf erscheinen lassen. Lukas [31] versucht dieses Problem zu lösen, indem er Punkte in der Nähe von Kanten von der Filterung ausschliesst.

Bär [2] stellt Werkzeuge vor, mit denen es möglich ist, interaktiv Höhenmodelle zu bearbeiten. Die Werkzeuge sind matrizenförmig und erlauben es, Schichten auf- oder abzutragen und die Oberfläche zu glätten.

Selektive oder **informationsorientierte Filter** erweitern obige Techniken, indem sie Punkte eliminieren, die nur wenig Information zur Beschreibung der Oberfläche beitragen. Das Resultat solcher Filterungen sind Höhenmodelle in *TIN*-Form. Ein Beispiel ist der Douglas-Peucker-Algorithmus [34].

**Heuristische Verfahren** versuchen die Arbeitsprozesse der manuellen Generalisierung zu imitieren. Sie basieren auf Strukturlinien (Tallinien, Kammlinien oder sonstige Geländekanten), die aus dem Höhenmodell automatisch extrahiert oder vom Benutzer digitalisiert werden müssen. Die Strukturlinien werden durch verschiedenen Prozesse generalisiert und anschliessend wird ein neues, generalisiertes Höhenmodell aus diesen Linien berechnet.

## 5 Prototyp *Shadow*

### 5.1 Lokale Anpassungen

Imhof [28] kritisiert an den ersten Versuchen zur analytischen Schräglightschattierung, dass die Programme keine oder nur ungenügende Möglichkeiten bieten, lokale Lichtdrehungen, lokale Helligkeitsanpassungen und Generalisierungen des Höhenmodells vorzunehmen. Um diese Änderungen auf intuitive und effiziente Weise vorzunehmen, bietet sich die interaktive Bearbeitung am Bildschirm an. Schon seit längerer Zeit sind die technischen Voraussetzungen dazu vorhanden: Bildschirme mit hoher Farbauflösung, genügend schnelle Rechenmaschinen und Entwicklungsumgebungen für die einfache Programmierung.

Das Programm muss es erlauben, die im Kapitel 4.2 aufgelisteten Änderungen auch in kleinen Ausschnitten vorzunehmen. Dazu müssen verschiedene Parameter angepasst werden können. Um den Einflussbereich der Parameter abzugrenzen, kann zwischen zwei verschiedenen Methoden gewählt werden:

Beim **vektorbasierter Ansatz** werden geometrische Formen (zum Beispiel Polygone oder Linien) digitalisiert, um ein Gebiet für Änderungen abzugrenzen. Die Vektoren werden mit Werkzeugen editiert, wie sie in CAD–Applikationen verbreitet sind.

Der **rasterbasierter Ansatz** weist jedem Höhenpunkt eines gitterförmigen Höhenmodells (*Grid*) einen eigenen Wert für den entsprechenden Parameter zu. Für die Berechnung des Schattenbildes können diese Parameterwerte wie die Höhenwerte interpoliert werden. Die Bearbeitung erfolgt mit virtuellen Werkzeugen.

Beide Methoden haben ihre Vor- und Nachteile:

Die Rastermethode vervielfacht die ursprüngliche Datenmenge des Höhenmodells, indem sie jedem Punkt des Modells eine ganze Reihe von Variablen zuweist. So werden grosse Datenmengen erzeugt, was einen leistungsfähigen Computer voraussetzt. Es können aber lokale, präzise Änderungen vorgenommen werden, die mit Vektoren nur schwierig realisierbar sind. Die Methode hat aber den Nachteil, dass es schwierig ist, den Überblick über die einzelnen Einstellungen zu wahren. Die Visualisierung der Werte der verschiedenen Parameter für jeden einzelnen Punkt des Höhenmodells ist schwierig, wenn nicht gar unmöglich.

Der vektorbasierte Ansatz erzeugt nur wenige Daten (die Koordinaten der Stützpunkte und ein Satz Parameter pro Vektoreinheit), er stellt aber Probleme, wenn fließende Übergänge der Parameter erzeugt werden sollen.

Für den Prototypen wurde die Vektormethode gewählt. Teilgebiete können mit Polygonen (*Fences*<sup>22</sup>) eingezäunt und mit eigenen Parametern versehen werden<sup>23</sup>. Wie bei der traditionellen, manuellen Schattierung sollen zuerst die Grossformen und erst später die Details bearbeitet werden. Dennoch muss sich der erfahrene Kartograf an eine veränderte Arbeitsweise gewöhnen: Das Programm schlägt eine erste Lösung vor, darauf basierend können Korrekturen

<sup>22</sup>Die Metapher *Fence* wird von verschiedenen CAD–Anwendungen verwendet, um Werkzeuge zu bezeichnen, mit welchen Objekte selektiert oder zusammengefasst werden können.

<sup>23</sup>Statt der Polygone wurden auch Versuche mit Rechtecken und Ellipsen gemacht. Diese einfachen Elemente konnten verschoben und in der Grösse angepasst werden. Es hat sich aber gezeigt, dass die starren geometrischen Formen zu wenig Möglichkeiten für Anpassungen an die Geländeform bieten.

vorgenommen werden. Die Kleinformen werden vom Algorithmus schon von Beginn an ausmodelliert, dies im Gegensatz zur traditionellen Schummerung, wo wie bereits beschrieben, zuerst die Grossformen gestaltet werden.

## 5.2 Benutzeroberfläche

Neben allgemeinen Eigenschaften eines Computerprogramms, wie zum Beispiel Stabilität oder Geschwindigkeit, verdient die Gestaltung der Benutzerschnittstelle besondere Aufmerksamkeit. Die wichtigsten Punkte laut der *Macintosh Human Interface Guideline* [1] werden nachfolgend zusammengefasst und es wird aufgezeigt, wie diese Anforderungen im Prototypen umgesetzt wurden<sup>24</sup>.

- Um Vorgänge und Konzepte zu vereinfachen, sollen Metaphern benützt werden.

*Der Prototyp verwendet nebst den Standardelementen des Betriebssystems (Fenster, Knöpfe, etc.) folgende Metaphern: Fence (Zaun) um Teilgebiete zu vektorisieren, Zoom um das Relief in verschiedenen Massstäben darzustellen und Sonne um Lichtrichtungen einzustellen.*

- Wird ein Objekt bearbeitet, soll es am Bildschirm sichtbar sein und Änderungen sofort widerspiegeln. Zuerst muss das Objekt aktiviert werden, danach kann es manipuliert werden.

*Ein Fence (Zaun) widerspiegelt alle Veränderungen seiner Form schon während der Konstruktion. Enthält das Kartenblatt mehrere solcher Polygone, ist jeweils nur eines aktiv, das heisst veränderbar. Ein Fence kann durch einen Mausklick aktiviert werden. Wird ein Parameter eines Polygons geändert, berechnet die Software das Schattenbild neu, um den Einfluss der Änderung sichtbar zu machen.*

- WYSIWYG (*What You See Is What You Get*): Die graphische Darstellung am Bildschirm muss mit der Druckausgabe übereinstimmen. Der Benutzer muss Inhalt und Format des Dokuments wählen können, Änderungen sollen schnell in der Anzeige sichtbar werden.

*Weil das Schattenbild mit weiteren kartografischen Elementen kombiniert wird, kann auf die Implementation der Druckausgabe für erste Versuche verzichtet werden. Stattdessen kann das berechnete Bild in einem Dokument gespeichert werden. Um eine bestmögliche bereinstimmung zwischen der Bildschirmansicht und dem Rasterbild im Dokument zu erreichen, wird für beide der selbe Algorithmus zur Berechnung der Grauwerte verwendet<sup>25</sup>. Versuche haben jedoch gezeigt, dass sich die Bildschirmansicht stark von der Druckausgabe unterscheidet.*

*Die Anzeige kann in verschiedenen Massstäben erfolgen. Der Ausschnitt kann mit so genannten Bildlaufleisten gewählt werden.*

- Der Benutzer soll informiert sein, woran das Programm arbeitet: Nachdem eine Aktion durch den Benutzer ausgelöst wurde, soll eine Reaktion des

<sup>24</sup>Hurni und Christinat [25] formulieren allgemeine Anforderungen an ein digitales kartografisches Produktionssystem.

<sup>25</sup>Die Berechnungen unterscheiden sich in der Auflösung (*dpi = dots per inch*), welche für die Ausgabe in ein *File* wählbar ist.

Systems erfolgen, um die Verarbeitung des Befehls zu bestätigen. Dauert die Abarbeitung des Befehls längere Zeit, soll sichtbar werden, wieviel Zeit bis zum Ende noch vergehen wird.

*Es ist wichtig, dass nach einer Parameteränderung das Programm in kurzer Zeit das neue Reliefbild darstellt, um dem Benutzer eine flüssige und produktive Arbeit zu ermöglichen. Die verschiedenen Berechnungen dürfen deshalb nur kurze Zeit dauern. Während einigen längeren Arbeitsschritten wird eine Statusinformation angezeigt und die Möglichkeit geboten, den Prozess abzubrechen. Bei der Programmierung wurden die verschiedenen Algorithmen nicht speziell für eine hohe Geschwindigkeit optimiert. Deshalb dauern einige Berechnungen noch zu lange.*

- Jeder Bearbeitungsschritt soll widerrufbar sein.

*Es können die meisten Arbeitsschritte, die seit dem Programmstart ausgeführt wurden, rückgängig gemacht werden.*

- Die Anwendung soll zusammen mit den Benutzern entworfen und getestet werden. Das Programm soll auch für unerfahrene Benutzer intuitiv erlernbar sein. Es sollten Standardelemente des Betriebssystems verwendet werden, da dies das Erlernen des Programms erleichtert.

*Die Benutzerführung wurde so einfach und intuitiv wie möglich gestaltet. Auf schwer konfigurierbare Techniken zur Schattierung wurde bewusst verzichtet<sup>26</sup>. Die Entwicklung und Optimierung wurde in Zusammenarbeit mit Kartografen durchgeführt.*

- Die Bearbeitungsschritte sollen auch auf zukünftige, verbesserte Höhenmodelle angewendet werden können. Alle Einstellungen müssen deshalb abspeicherbar und rekonstruierbar sein.

### 5.3 Implementation

Der erstellte Prototyp wurde auf den Namen *Shadow* getauft. Die beiliegende CD-ROM enthält das Programm (für Macintosh-Computer) sowie ein Handbuch (Anhang A) mit einer detaillierten Beschreibung der einzelnen Menüpunkte und Dialoge. Hier werden einige wichtige Algorithmen kurz beschrieben.

#### Schattierung

Die Schattierung wird mit einem erweiterten Phong-Modell berechnet. Dabei wird, wie von Lukas vorgeschlagen, das Lambert-Modell (welches Bestandteil des Phong-Modells ist) mit einem erweiterten Beleuchtungswinkel berechnet<sup>27</sup>. Zusätzlich kann auch Umgebungslicht *subtrahiert* werden, das heißt, der Term  $I_{amb}$  der Gleichung 4 (Seite 21) kann negative Werte annehmen. So können auf einfache Weise Formen abgedunkelt werden, ohne dass das Bild viel Kontrast verliert.

<sup>26</sup>Einige weniger wichtige oder kompliziert anzuwendende Bearbeitungen wurden wieder eliminiert. Zum Beispiel wurden Versuche mit Überhöhungen in Funktion der Steigung oder der Höhe des Geländes vorgenommen. Es hat sich aber gezeigt, dass dadurch die Berechnungszeit erheblich verlängert wird und die Parameter schwierig zu steuern sind.

<sup>27</sup>Phong-Modell Seite 21, Vorschlag Lukas' Seite 24

### Normalvektor

Für die Berechnung der Normalvektoren kann der Benutzer zwischen *Flat shading* und dem Phong-Schattierungsalgorithmus wählen<sup>28</sup>. Der *Flat shading*-Algorithmus ist schneller, da der Rechenaufwand geringer ist. Erfolgt die Darstellung mit dieser Technik aber in einem grossen Massstab, können die einzelnen Facetten des Höhenmodells sichtbar werden.

### Reduktion von Licht- und Normalvektor auf die Horizontalebene

*Shadow* bietet die Möglichkeit, für die Lambert-Schattierung den Lichtvektor  $L$  und den Normalvektor  $N$ , wie in Abbildung 9 gezeigt, auf die Horizontalebene zu projizieren. Der Grauwert wird aus dem Kosinuswert von  $\alpha'$  statt  $\alpha$  berechnet. Die Grauwerte werden also aus der Orientierung der einzelnen Facetten des Höhenmodells berechnet. Da jedoch die X- und Y-Komponenten der Normalvektoren für Punkte in flachem Gebiet sehr klein sind, nehmen die Grauwerte in diesen Regionen zufällige Werte an. Dies kann korrigiert werden, indem flache Gebiete mit einem Ebenenton abgedeckt werden. Die Abbildung 15 (Seite 44) zeigt einen Ausschnitt aus einem Schattenbild, das auf diese Weise berechnet wurde.

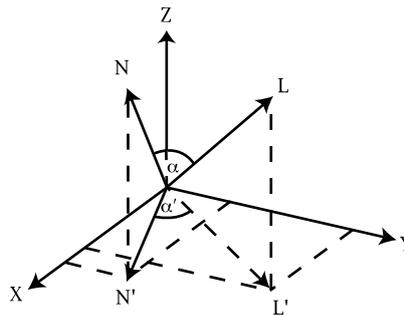


Abbildung 9: Projektion der Vektoren auf die Horizontalebene

### Atmosphäre

Atmosphärische Aufhellungen können durch hinzumischen von Weiss simuliert werden. Dabei wird der Weissanteil nicht durch eine mathematische Formel bestimmt, sondern durch eine konfigurierbare Tabelle (Abbildung Seite 54). Auf diese Weise kann der Effekt genau und bequem gesteuert werden.

### Kontrast

Zur Anpassung des Kontrasts in Funktion der Geländehöhe wurde Brassels Methode [8] erweitert. Anhang B erklärt dazu die Details. Abbildung 10 illustriert die Wirkung einer Kontrastanpassung. Das Bild links zeigt eine Schattierung

<sup>28</sup> *Flat shading* Seite 21 und Phong-Schattierungsalgorithmus Seite 22

ohne Korrektur, für den selben Ausschnitt wurde rechts der Kontrast an tieferen Stellen reduziert, an höheren verstärkt. Zusätzlich wurde ein Ebenenton hinzugefügt.

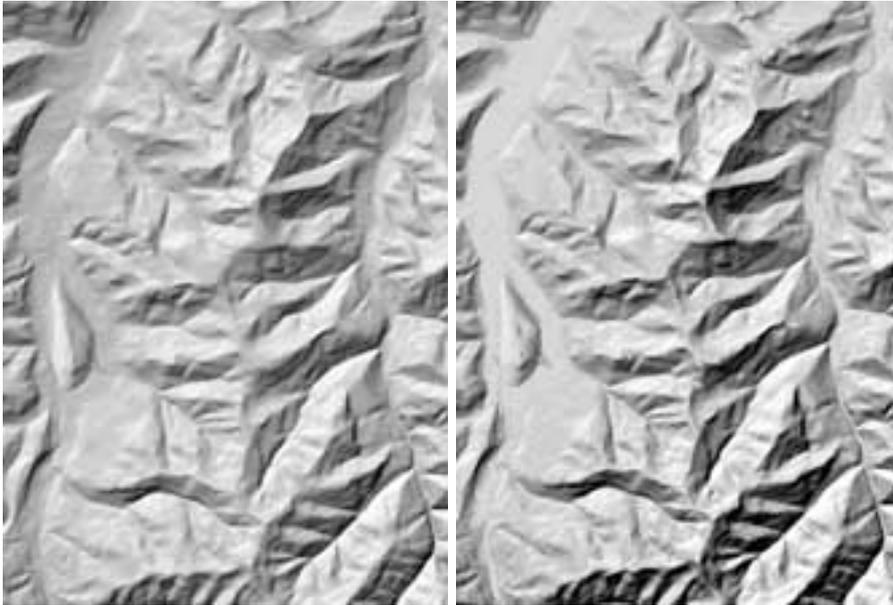


Abbildung 10: Ebenenton und Kontrastanpassung

### Ebenenton

Werden Schattierungen mit dem Phong-Schattierungsalgorithmus berechnet, erscheinen Ebenen zu dunkel. Deshalb kann mittels eines einfachen Algorithmus ein wählbarer Ebenenton mit den Grauwerten der Phong-Schattierung vermischt werden oder diese ganz ersetzen. Wie für die Atmosphäre kann das Mischverhältnis durch eine Tabelle interaktiv konfiguriert werden. Hier wird der Anteil des Effekts aber nicht in Abhängigkeit der Höhe, sondern in Funktion der Steigung berechnet<sup>29</sup>.

Abbildung 10 zeigt die Wirkung des Ebenentons. Da der Gebirgszug flachere Teilstücke enthält, werden diese auch mit dem Ebenenton zugedeckt. Auch fallen in den Ebenen Fehler im Höhenmodell auf, welche durch den globalen Ebenenton nicht überdeckt werden können. Beide Fehler liessen sich durch lokale Anpassungen eliminieren, indem die Ebenen durch *Fences* ausgeschieden würden.

---

<sup>29</sup>Als Versuch wurde auch ein ähnlicher Dialog zur Anpassung des Grauwerts des Ebenentons (und nicht des Mischverhältnisses) in Funktion der Steigung programmiert. Es hat sich aber gezeigt, dass die Konfiguration zu kompliziert und von nur geringem Nutzen ist. Deshalb wurde wieder darauf verzichtet.

### Lokale Einstellungen

Die *Fences* werden in einer Baumstruktur abgelegt. Programmiertechnisch ist jeder *Fence* als Objekt angelegt, das Zeiger auf weitere Objekte in seinem Inneren besitzt. Die Einstellungen der inneren Polygone überschreiben jene der äusseren. Folgende Einstellungen können für das Gebiet eines Zauns angepasst werden: Phong–Beleuchtung, Lichtrichtung, Überhöhung des Geländes, Atmosphäre, Kontrast und Ebenenton.

Als Konstruktionshilfen stehen das Verschieben, Snappen, Einfügen und Löschen von einzelnen Punkten zur Verfügung. Um abrupte Übergänge der Grauwerte am Rande der Polygone zu vermeiden, erzeugt das Programm ein zweites Polygon im Inneren des vektorisierten Polygons. Zwischen diesen zwei Vielecken wird eine Triangulation vorgenommen<sup>30</sup> und innerhalb jedes so entstandenen Dreiecks werden die Werte der Parameter mit der Gouraud–Technik interpoliert. Die Abstände der Punkte des inneren Zauns zu den äusseren Punkten kann einzeln oder gruppenweise mit einem *Slider* oder durch Verschieben mit der Maus geändert werden.

Einzelne Parametergruppen können ein– bzw. ausgeschaltet und Dialoge zu deren Konfiguration aufgerufen werden.

Es ist möglich, Polygone in schon existierenden Polygonen zu konstruieren<sup>31</sup>. In solchen Fällen ersetzt das innerer Polygon einzelne Parameter des äusseren. Welche Parameter überschrieben werden sollen, muss vom Benutzer bestimmt werden. Werden nachträglich am äusseren Polygon wieder Änderungen vorgenommen, gelten diese auch für die Fläche des inneren *Fence*, wenn dieser nicht explizit den entsprechenden Parameter überschreibt.

Abbildung 11 zeigt zwei *Screenshots* aus dem erstellten Programm. Das obere Bild zeigt das Gebiet ohne Anpassungen, darunter sind verschiedene Parameter in drei *Fences* verändert worden. Zur Berechnung beider Bilder wurden folgende globale Einstellungen gewählt:

- Lambert–Beleuchtung, Licht– und Normalvektoren auf die Horizontalebene projiziert
- Lichtrichtung: Azimut  $315^\circ$
- Überhöhung: Multiplikation der Höhenkoten mit 1.4
- Kontrast: Faktor 1.2. Unter 800 Meter Höhe wird der Kontrast abgeschwächt, darüber verstärkt

Das untere Bild wurde zusätzlich mit einem Ebenenton versehen: In den Ebenen bis  $5^\circ$  Steigung wurde 15% Grau hinzugemischt. Die Nummerierung wurde nachträglich angebracht, um die gewählten Parameter aufzuzeigen:

Polygon 1 zur Korrektur der Lichtrichtung

Die Lichtrichtung wurde auf  $345\frac{1}{4}$  gedreht, um die Grossformen besser hervorzuheben<sup>32</sup>. Um die Übergänge an den Kämmen schroff erscheinen zu lassen,

<sup>30</sup>Es kann garantiert werden, dass die beiden Polygone aus der gleichen Anzahl Stützpunkten bestehen.

<sup>31</sup>Im Prototyp ist es möglich überlappende Polygone zu konstruieren. Dies sollte jedoch vermieden werden.

<sup>32</sup>In der linken oberen Ecke des roten Polygons ist eine kleine *Sonne* sichtbar, mit welcher die Lichtrichtung gedreht werden kann.

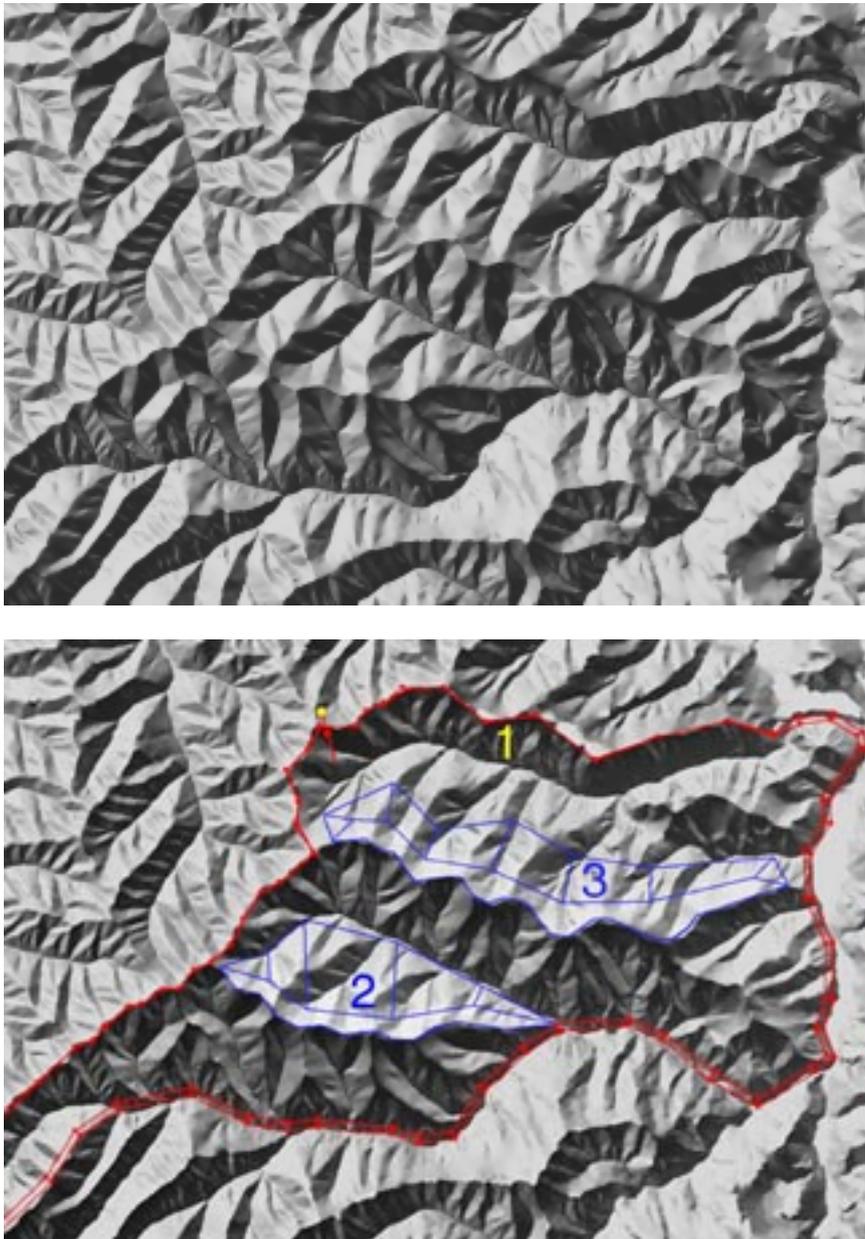


Abbildung 11: Lokale Anpassungen

wurde an diesen Stellen das innere Polygon auf das äussere gelegt<sup>33</sup>.

Polygone 2 und 3 zur Kontrasterhöhung entlang der Kammlinie  
Um das Bild von der Tal- zur Kammlinie hin aufzuhellen, wird Weiss hinzuge-

<sup>33</sup>Am oberen Rand wurde ausserhalb des Polygons ein Gebiet nahe dem Kamm mit dem Ebenenton eingefärbt (die Steigung ist hier nicht grösser als  $5^\circ$ ). Dies müsste durch ein weiteres Polygon korrigiert werden.

mischt. Um einen kontinuierlichen Übergang von unten nach oben zu erhalten, sind das innere und das äussere Polygon in tieferen Lagen weit voneinander entfernt. Entlang der Kammlinie liegen sie übereinander, um die Aufhellung abrupt enden zu lassen.

### Überlagerung von Rasterdaten

*Shadow* bietet die Möglichkeit beliebige Rasterbilder über das Relief zu legen. Wie bei der manuellen Schattierung sind Höhen- oder Gewässerlinien unerlässlich für die Modellierung der Schatten. Da die Skalierung von Rasterbildern relativ rechenaufwändig ist, wird jeweils ein Bild für jede Zoomstufe beim Einlesen der Datei berechnet. So dauert die Anzeige der Rasterbilder nur sehr kurze Zeit. Das Bild kann mit diesem Verfahren jedoch nur in vorbestimmten Massstäben angezeigt werden.

### Import und Export von Daten

*Shadow* kann Höhenmodelle in verschiedenen Formaten konvertieren und einlesen<sup>34</sup> und die berechneten Bilder in Rasterdateien ausgeben. Es besteht auch die Möglichkeit, Steigungs- und Orientierungsinformationen des Geländes aus zusätzlichen Dokumenten einzulesen.

Einzelne Ausschnitte von Höhenmodellen können in neuen Dateien abgespeicherte werden.

Die Einstellungen (globale und lokale Parameter und die Geometrie der Polygone) können abgespeichert und wieder eingelesen werden<sup>35</sup>.

### Median-Filter

Eventuelle Artefakte im Höhenmodell können mit einem Median-Filter geglättet werden. Die Grösse der Filtermaske kann gewählt werden. Abbildung 12 zeigt einen Ausschnitt aus einem Höhenmodell. Links sind einzelne Artefakte gut sichtbar, rechts wurden diese durch einen Median-Filter geglättet (Grösse der verwendeten Filtermaske: 5 \* 5 Punkte).

### Lichtton

*Shadow* bietet die Möglichkeit einen Lichtton zu berechnen<sup>36</sup>. Der Ebenenton kann dazu eigens gewählt werden. Ansonsten werden die selben Algorithmen wie für die Reliefberechnung verwendet, ausser dass am Schluss ein Negativbild aus dem Relief erzeugt wird.

## 5.4 Erweiterungen

Soll das Programm für eine professionelle Produktion eingesetzt werden, muss der vorliegende Prototyp um verschiedene Punkte erweitert werden. Die folgende Liste zeigt Verbesserungsmöglichkeiten auf:

<sup>34</sup>GTOPO30, DHM25, ESRI-ASCII-File und ein Format des Instituts für Kartographie (Dokumentation Seite 60).

<sup>35</sup>Dokumentation zum Dateiformat im Anhang A auf Seite 59

<sup>36</sup>Beschreibung Lichtton Seite 14

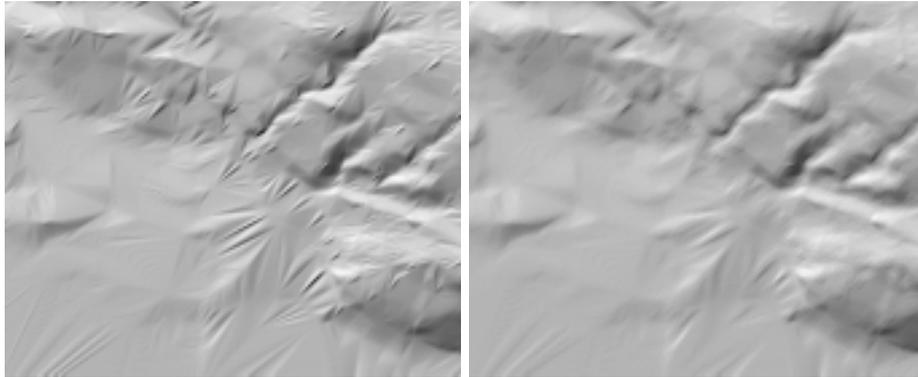


Abbildung 12: Median-Filter

- Die Schattierungen müssen blattübergreifend berechnet werden können. Es muss deshalb die Möglichkeit bestehen, mehrere benachbarte Höhenmodelle einzulesen und die Polygone blattübergreifend zu editieren. Die Polygone sollten in einer Datenbank oder einer datenbankähnlichen Struktur abgespeichert werden können, damit jeweils nur die gerade benötigten eingelesen werden müssen.
- Um Farbunterschiede zwischen der Bildschirmanzeige und der Druckausgabe zu minimieren, sind Farbmanagementsysteme zu unterstützen. Dazu müssen die Geräte farbkalibriert sein und beim Export der Bilder Farbprofile in die Rasterdokumente eingebettet werden.
- Sollen kleinmasstäbliche Reliefs erzeugt werden, muss das Bild in einer wählbaren Kartenprojektion angezeigt werden. Als Alternative können die einzelnen Punkte des Höhenmodells vor der Verarbeitung mit *Shadow* durch ein anderes Computerprogramm transformiert werden.
- Der Massstab der Anzeige sollte frei wählbar sein. Für eine bessere Gesamtübersicht und eine einfachere Navigation ist ein Übersichtsfenster nötig.
- Zur Visualisierung des Geländes sollten auch Vektordaten über das Schattenbild gelegt werden können. Sind die Höhenlinien weder im Raster- noch im Vektorformat vorhanden, sollten diese vom Programm aus dem Höhenmodell extrahiert werden können.
- Die Geometrie und die Attribute der Zäune sollten in verschiedenen Formaten für Vektordaten gelesen und geschrieben werden können.
- Für die Konstruktion und Bearbeitung der Polygone müssen zusätzliche Möglichkeiten geboten werden. Zum Beispiel müssen Überschneidungen verhindert werden, Polygone müssen kopiert und wieder eingefügt sowie als Ganzes verschoben werden können, etc.
- Es sind zusätzliche Rasterformate mit Komprimierungsmethoden zur Abspeicherung der berechneten Bilder zu implementieren.

- Um das Höhenmodell interaktiv in lokalen Ausschnitten zu bearbeiten, könnten virtuelle Werkzeuge verwendet werden. Mögliche Anwendungen sind die Generalisierung des Geländes, sowie die Elimination von Artefakten im Höhenmodell.

Eine Alternative sind Filter, deren Anwendungsbereich auf einzelne Polygone beschränkt ist und deren Eigenschaften zusammen mit den übrigen Parametern des Polygons abgespeichert werden können.

- Verschiedene Berechnungen des Programms sind noch zu langsam. Sie sind zu optimieren, damit eine produktive Arbeit möglich wird. Es sind auch noch einige Fehler vorhanden, die natürlich ausgemerzt werden müssen.

## 6 Praktische Anwendungen

Die Abbildungen 13 und 14 zeigen ein Schattenbild und eine Lichttonvorlage, welche mit dem Prototypen erstellt wurden<sup>37</sup>. Es wurde dazu eine Reihe von lokalen Anpassungen vorgenommen. Die Berechnungen erfolgten auf Basis eines Höhenmodells (*Grid*) mit 5 Metern Distanz zwischen den einzelnen Punkten<sup>38</sup>.

Eine kritische Betrachtung des Reliefs zeigt, dass in steilen Geländeteilen horizontale Strukturen ähnlich wie Felsbänder erscheinen, welche die vertikale Gliederung des Höhenzugs stören. Ein Vergleich mit der Karte bestätigt, dass an diesen Stellen die Höhenlinien, welche als Grundlage für die Berechnung des Höhenmodells dienten, besonders dicht beieinander stehen. Der verwendete Triangulations-, respektive der Interpolationsalgorithmus scheint für solche Geländetypen wenig geeignet zu sein.

Die Ebenen treten gut hervor, der Ebenenton bleibt konstant über das ganze Bild. Jedoch sind die Übergänge zwischen der Ebene und den steileren Schattenpartien an manchen Stellen etwas zu abrupt. Wo die Ebenen kontinuierlich in steileres Gelände übergehen und zu wenig genau vektorisiert wurde, bilden sich unnatürliche, scharfe Kanten (zum Beispiel in der Bildmitte).

Durch zusätzliche lokale Änderungen könnten einige Kleinformen besser modelliert werden. Darauf wurde jedoch bewusst verzichtet, da der Arbeitsaufwand gering gehalten werden sollte, um nicht den grossen Vorteil, die Geschwindigkeit, der computergestützten Schattierung zu verlieren.

Abbildung 15 zeigt den selben Ausschnitt wie Abbildung 13, hier wurden jedoch die Licht- und Normalvektoren auf die Horizontalebene projiziert<sup>39</sup> und flache Teile des Höhenmodells mit einem Ebenenton versehen<sup>40</sup>. Im Vergleich zur Abbildung 13 treten Kleinformen weniger stark hervor, die Grossformen werden deutlicher, da Kanten und Bergkämme akzentuiert werden. Die Kontraste sind sehr stark, der Tonumfang kleinerer Erhebungen musste deshalb abgeschwächt werden. Vor allem in den Schattenseiten gehen jedoch wichtige Details verloren.

Die Beurteilung der Schattierung muss im fertigen Kartenbild geschehen, weil primär das Zusammenspiel zwischen den einzelnen Kartenebenen über die Qualität der ganzen Karte entscheidet. Die Abbildungen 16 und 17 zeigen Kartenausschnitte (Landeskarte 1149 *Wolhusen*), welche die Schattierungen der Abbildungen 13 und 15 mit einem Lichtton und Rasterdaten<sup>41</sup> kombinieren.

Während der Bearbeitung verschiedener Schattenbilder konnte die Erfahrung gemacht werden, dass (wie bei der traditionellen Schummerung) das Augenmerk zuerst auf die Ebenen gelegt werden sollte. Es bieten sich zwei verschiedene Vorgehensweisen an: Für gebirgiges Gelände mit abrupten Übergängen zwischen den Ebenen und den Gebirgszügen kann für das ganze Kartenblatt der Ebenenton hinzugemischt werden. Da mit dieser Methode jedoch einzelne

<sup>37</sup>Eine Handschattierung des gleichen Ausschnitts zeigt Abbildung 6 (Seite 13).

<sup>38</sup>Das Höhenmodell wurde freundlicherweise vom Bundesamt für Landestopographie zur Verfügung gestellt. Es wurde aus gescannten Höhenlinien und Höhenkoten der *Landeskarte der Schweiz 1:25'000* abgeleitet. Zuerst wurde ein *TIN* berechnet mit automatisch interpretierten Kreten- und Tallinien und daraus ein *Grid* durch eine kubische Interpolation abgeleitet.

<sup>39</sup>Siehe Seite 33

<sup>40</sup>Zur Berechnung wurden Orientierungs- und Steigungsdaten (*aspect* und *slope*) des Bundesamts für Landestopographie verwendet, welche aus einem *TIN* interpoliert wurden.

<sup>41</sup>Pixelkarte PK25 des Bundesamts für Landestopographie

Bergkämme und Hochterrassen zu hell erscheinen können, werden lokale Korrekturen nötig. Sind die Höhenunterschiede jedoch gering oder treten die Höhenzüge nicht deutlich hervor, sollte der Ebenenton nur für die durch Polygone ausgedehnten Ebenen angewendet werden.

Neben dem Ebenenton sind die Möglichkeiten, das Gelände zu überhöhen und die azimutale Lichtrichtung anzupassen, die zwei wichtigsten Gestaltungsmittel. Vor allem Änderungen der Lichtrichtung mittels einer kleinen Sonne, die mit der Maus verschoben werden kann, sind anschaulich und bequem einstellbar. Um einzelne Geländeelemente mit stärkerem Kontrast darzustellen, bieten sich drei Möglichkeiten an: Die Höhenwerte eines Ausschnittes können mit einem beliebigen Faktor multipliziert werden, der Vertikalwinkel der Beleuchtung kann flacher gewählt werden oder der Kontrast kann mit der im Anhang B vorgestellten Technik angepasst werden. Es hat sich gezeigt, dass die Überhöhung des Geländes die einfachste und wirkungsvollste Technik ist. Je nach Geländetyp kann das ganze Kartenblatt mit einer leichten Überhöhung versehen werden. Damit werden speziell in flachen Gebieten die Geländestrukturen besser sichtbar.

Das Aufhellen der tiefen Geländeteile durch hinzumischen von Weiss, ist nur dezent anzuwenden. Ist die Aufhellung zu stark, kann der Kontrast verflachen, und das Bild an Plastizität verlieren.

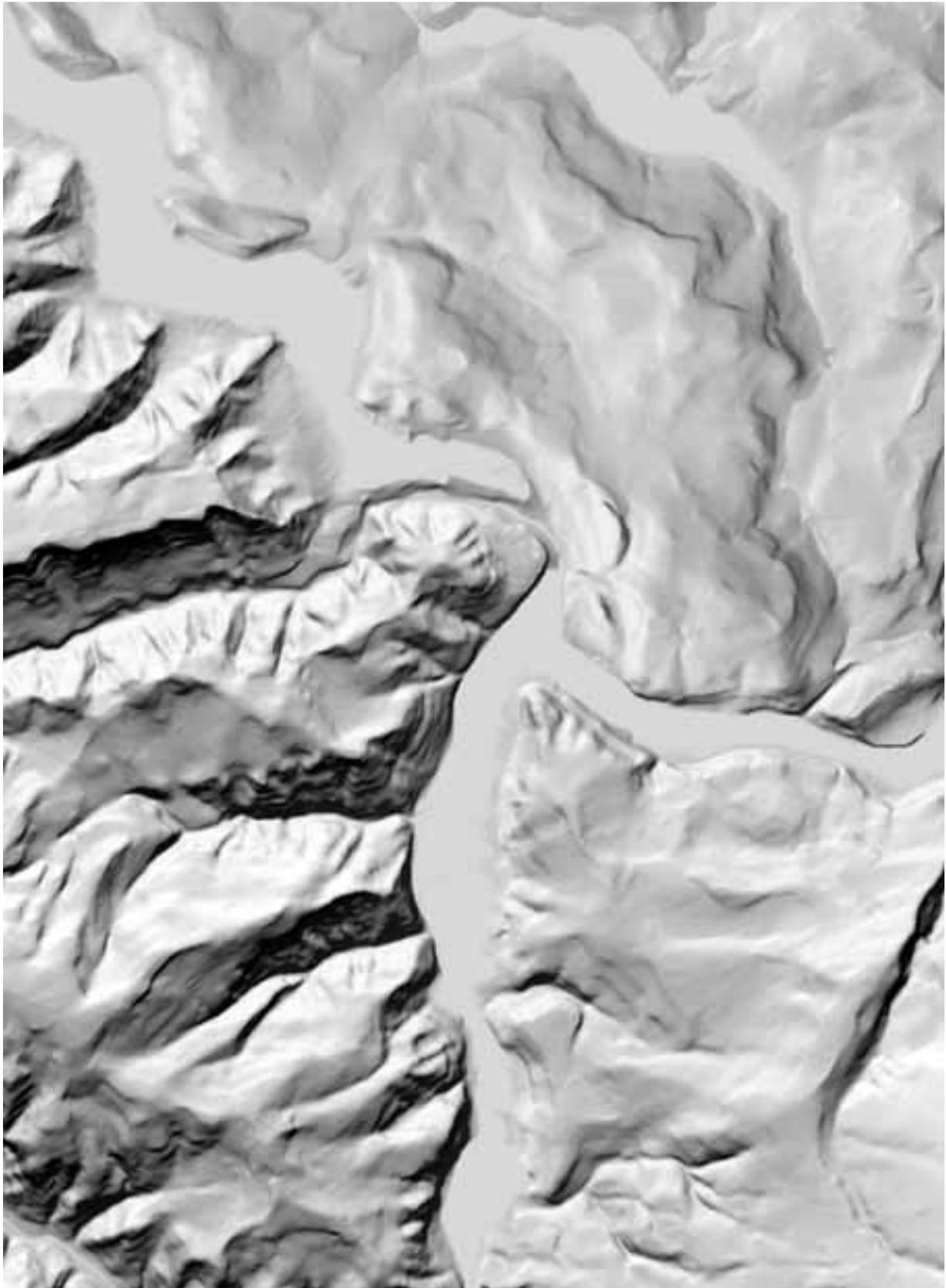


Abbildung 13: Berechnete Schattierung (1:25'000)

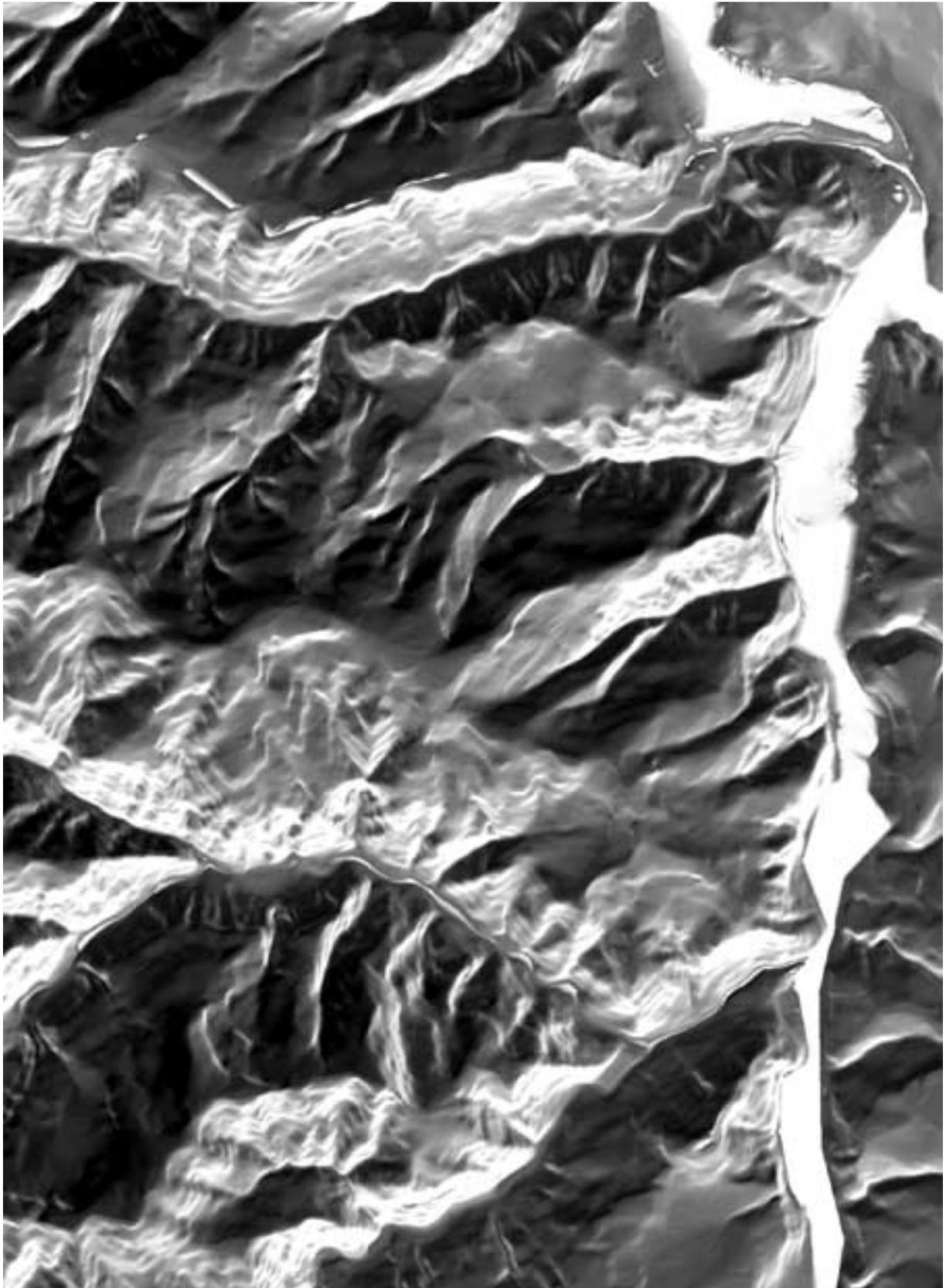


Abbildung 14: Berechneter Lichtton (1:25'000)



Abbildung 15: Schattierung berechnet aus Orientierung (1:25'000)

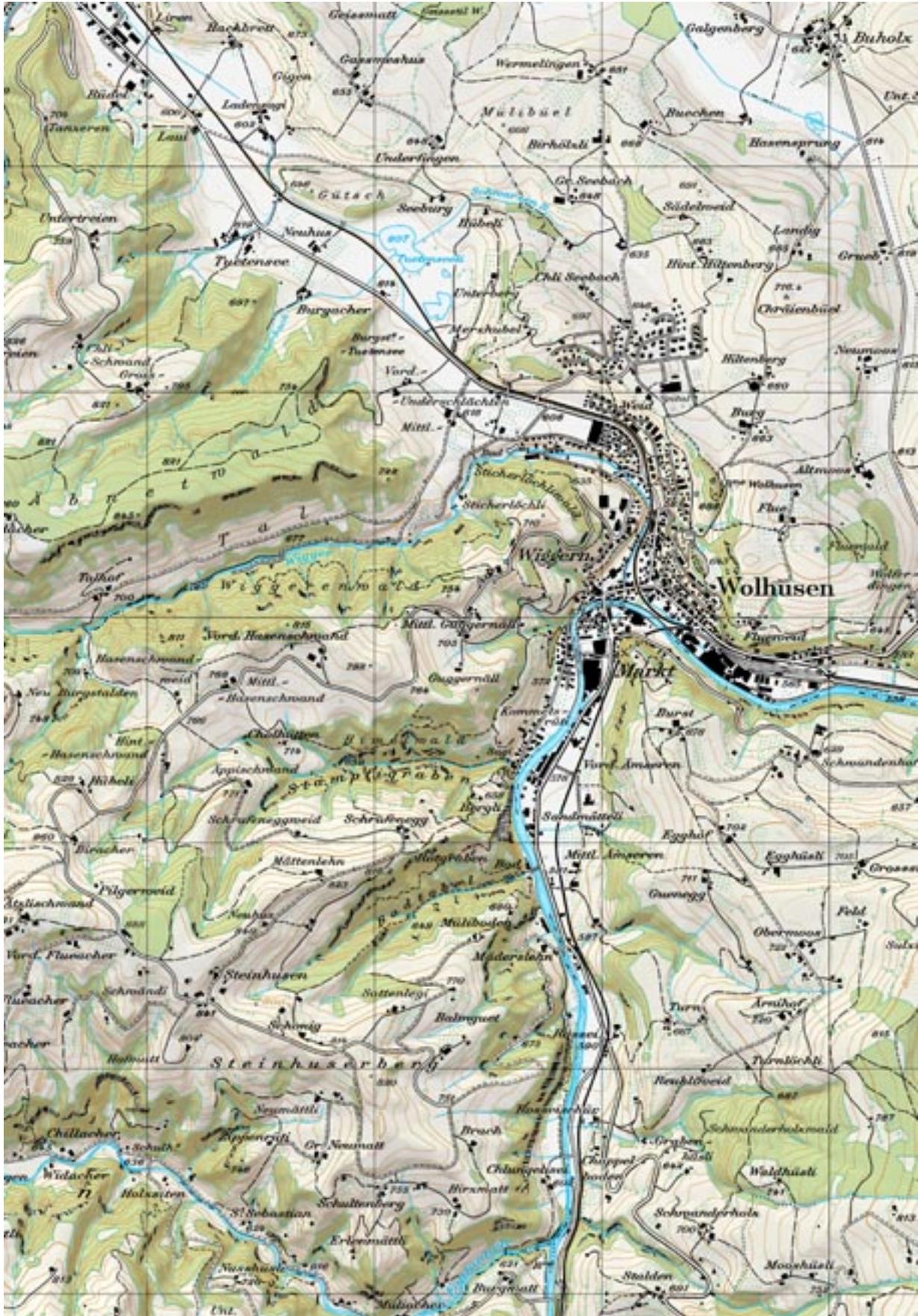


Abbildung 16: Schattierung und Lichtton mit Situation (1:25'000)



## 7 Schlussanmerkungen

Werden manuelle und berechnete Schattierungen miteinander verglichen, zeigt sich, dass die zwei Methoden zu Bildern unterschiedlicher Eigenschaften führen. Die Qualität und der Detailreichtum einer analytisch hergestellten Schattierung ist in hohem Masse von den Eigenschaften des zu Grunde liegenden Höhenmodells abhängig. Die analytische Schattierung kann das Gelände *objektiver* darstellen als die traditionelle Schummerung. Es ist jedoch falsch, der traditionellen Schummerung vorzuwerfen, sie stelle das Gelände falsch, verzerrt oder übertrieben dar. Die Modellierung durch hervorheben, verdrängen und vergrößern macht vielmehr den Wert eines Reliefs aus und hilft dem Kartenbetrachter ein Gesamtbild zu erlangen. Kartografische Gestaltung muss mehr als nur geometrische Genauigkeit sein.

Das erstellte Programm bietet einfache Möglichkeiten, das Relief zu gestalten. Wird nur wenig Zeit für lokale Anpassungen investiert, ist die Qualität der berechneten Beispiele ausreichend, um sie als Grundlage für topographische Karten zu verwenden. Wie beschrieben, scheinen weitere Verbesserungen des Programms jedoch möglich.

Zurzeit ist keine Computerprogramm in der Lage, die Qualität einer Handschattierung eines künstlerisch anspruchsvollen Kartengemäldes zu erreichen. Mit dem vorliegenden Prototypen konnten jedoch Wege aufgezeigt werden, wie eine rein analytisch berechnete Schattierung interaktiv bearbeitet werden kann.

## A Handbuch zu *Shadow*

Das Programm wurde für das MacOS-Betriebssystem geschrieben und setzt einen Macintosh-Computer mit PowerPC-Prozessor voraus. Die Programmierung erfolgte mit *Metrowerks CodeWarrior Pro* und der Klassenstruktur *PowerPlant*.

Das Programm soll zusammen mit dem hier folgenden Handbuch im Internet veröffentlicht werden. Aus diesem Grund wurde der Text in (einer Art) Englisch geschrieben.

### Shadow 1.0

This manual explains the different options in Shadow 1.0, a program for oblique relief shading used in cartography. This version of Shadow is a prototype. Shadow 1.0 was written by Bernhard Jenny. All rights reserved. February 2000.

#### Window

The shaded relief can be displayed in variable scales. Use the *Zoom* menu to select a particular scale. To zoom in or out, press one of the two small buttons in the left down corner of the window or use **Zoom** – **Zoom In** or **Zoom** – **Out** (shortcuts: *Command +* and *Command -*). The text box beside the two buttons indicates the actual scale.

#### Selecting Parameters For Shading

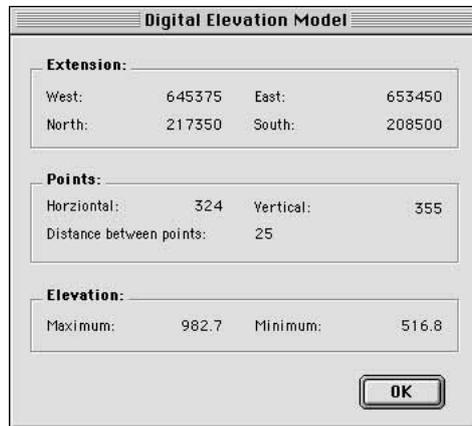
Parameters can be adjusted globally (for the whole digital elevation model) and locally for specified areas delimited by *fences*. Every change (with the exception of median filters) can be undone and redone: use **Edit** – **Undo** and **Edit** – **Redo**. If Shadow has sufficient memory, undoing is possible for every step since the start up of the application.

#### Opening, Converting And Saving Digital Elevation Models

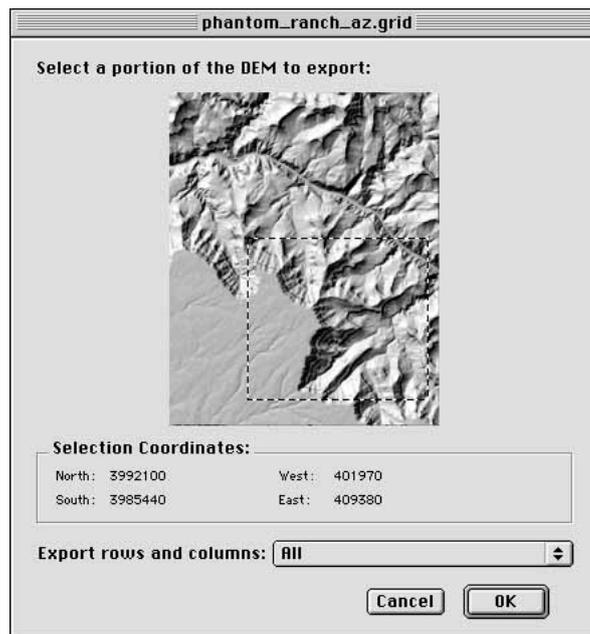
The calculation of a shaded relief needs a digital elevation model (DEM) as input. Shadow only uses digital elevation models in form of grids (regular distances between points), not TINs (irregular distances between points). At first, the data has to be converted to a proper format. The following grid data can be converted: ESRI-ASCII, GTOPO30 and DHM25. (The latter is used in Switzerland only.) Use the corresponding command in the *File* menu.

Optionally Shadow can import aspect and slope data. This may result in a better shading. This kind of data also has to be converted first. Use **File** - **Open Slope & Aspect** to read in the files.

**DEM – Information...** displays important information about the DEM in the dialog shown above.



The whole terrain model or parts of it can be exported to a file. Calling **File – Export DEM...** opens the following dialog:



Click and drag the mouse in the small view of the shaded relief to select a portion of the DEM to export. According to the value of the menu below, all columns and rows or only every other, third or fourth are exported. This is useful to lower the data size of very large DEMs. The height values are not reinterpolated, but the points are just omitted.

The size of the current selection is displayed below the shaded relief.

## Saving Raster Data

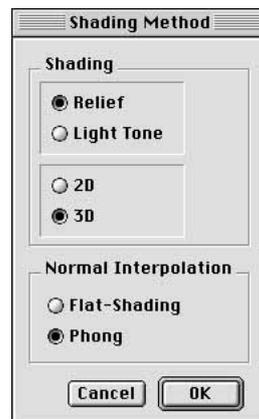


The relief shading can be saved in raster files (*File – Save Raster*). Shadow produces Windows Bitmap files (bmp), which can be read by most graphic applications. You should indicate the desired resolution in dots per inch (dpi) and the scale. Both values are important for accurate outputs.

## Saving And Reading Settings

All parameters and the geometry of the fences can be saved in a file (*File – Save Settings*). By opening a previously saved file (*File – Open Settings*) all current settings will be replaced, all currently existing fences will be deleted.

## Shading Method



Selecting *Shading – Shading Method* shows a dialog that lets you choose whether Shadow should do normal relief shading or calculate a so called light tone (*Normal Relief* or *Light Tone*). This light tone can be used for adding a yellow color to the relief. However, Shadow only calculates gray values. Use a graphic program such as Photoshop to color it yellow and to mix it with the normal relief.

Select *2D* to calculate the hill shading in two dimensions only. With this method flat areas show arbitrary gray values. Use *Shading – Global Tone in Flat Areas* to replace the gray values in flat areas (see the next section). The *3D* option usually gives better results.

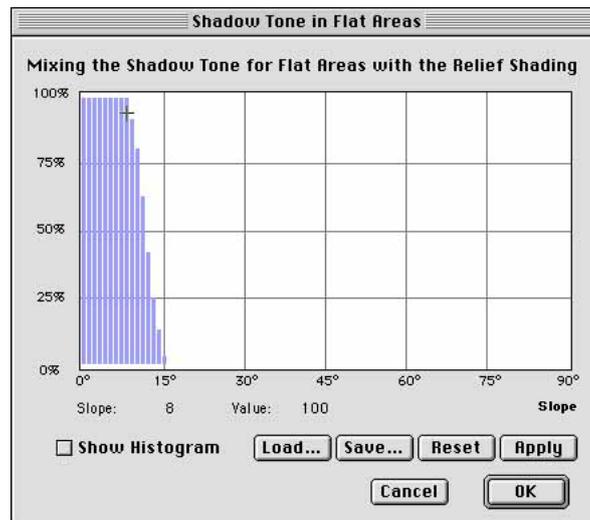
*Normal Interpolation* determines whether only one normal is calculated per facet of the DEM (*Flat – Shading*) or whether the normals are interpolated for every single pixel (*Phong*). The calculations are faster for *Flat – Shading* but depending on the scale, the facets can become visible. This only applies for

displaying on the computer screen. When saving the picture to a file, Shadow always uses *Phong* interpolation.

## Gray Tones For Flat Areas



The gray tone for flat areas can be chosen by selecting *Shading – Gray Tones in Flat Areas*. Type the values in percents for normal relief shading and for the light tone (white = 0%, black = 100%). In order to guarantee a homogenous gray tone for flat area over the whole sheet, this values can't be changed for individual fences. A good choice for relief shading is about 15%, for the light tone 0%.



*Shading – Global Tone in Flat Areas* shows the above dialog. The gray value calculated from the DEM can (partially) be replaced by the gray tone for flat areas that can be selected as explained above. The diagram shows the slope in the horizontal direction and the weight of the tone for flat areas. In the picture above, all calculated gray values are completely replaced by the gray tone for flat areas where the slope is flatter then 8 degrees. Between 8 degrees and 15 degrees the replacement is only partial, gray values above 15 degrees remain unchanged.

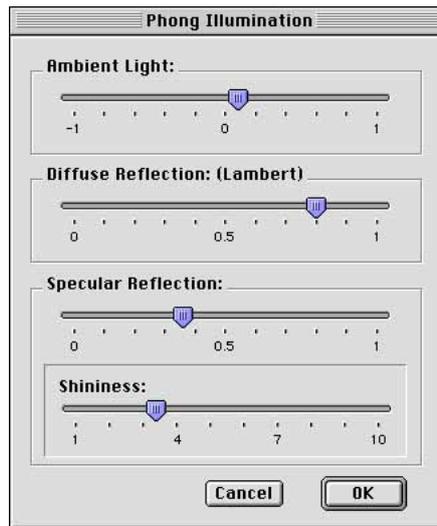
Click and drag the mouse to adjust the values. Press *Apply* or *OK* to see the influence of the changes. The *Load...* and *Save...* buttons let you write and

read the values. Shadow uses ASCII text files, which can be viewed and edited by any text editor.

Below the diagram, the importance of the gray tone for flat areas is displayed. Move the cursor around to see the different values in function of the slope.

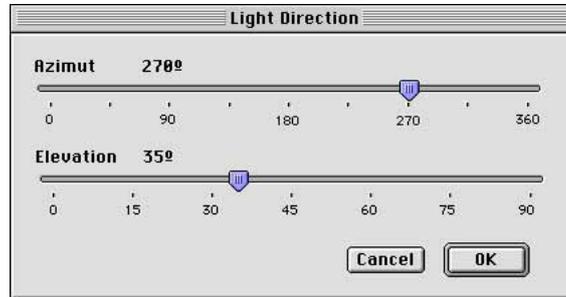
The *Show Histogram* check box lets you hide and show a histogram of the slopes either of the whole DEM area or of the fence that you are configuring.

## Illumination



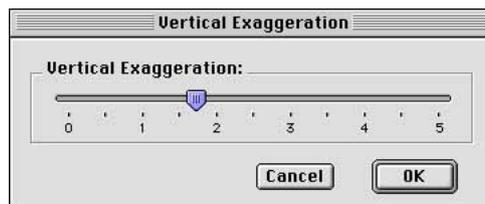
Select *Shading – Global Illumination* to configure the illumination model used for shading (Phong model). The *Ambient Light* slider regulates the brightness of the shading. Adjust the importance of the Lambert component with *Diffuse Reflection* and the importance of the specular component with the third slider. *Shininess* is a parameter for finer regulation of the reflection and is only used and available when *Specular Reflection* is larger than 0.

## Light Direction



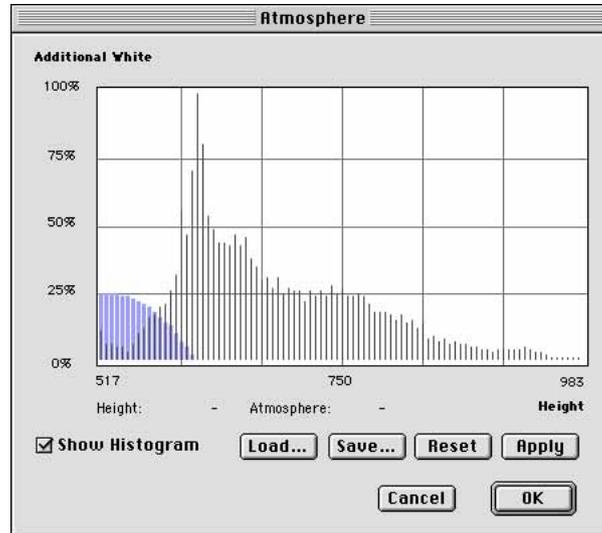
Use *Shading – Global Light Direction* to select the vertical and horizontal direction of the illumination. The horizontal direction is counted clockwise, beginning in the north. The vertical angle is counted from the horizon to the zenith.

## Vertical Exaggeration



*Shading – Global Vertical Exaggeration* lets you choose a multiplier for the heights of the digital terrain model. Exaggerating the heights results in a picture with better contrast. This is especially useful in flat areas.

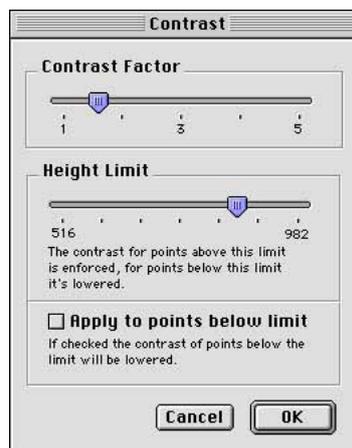
## Atmosphere



To simulate atmospheric perspective use *Shading – Global Atmosphere* and *Shading – Contrast*. With the dialog above you can add white color to the picture in function of the height of the terrain. Click and drag the mouse to adjust the values. The other elements in the dialog behave exactly in the same way as the elements of the *Global Tones in Flat Areas* do, see page 51.

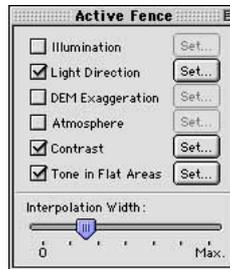
This feature should be applied very carefully, take the picture above as a starting point.

## Contrast



The contrast (*Shading – Global Contrast*) can be adjusted in function of the height. With *Contrast Factor* the changes are adjusted. Shadow increases the contrast for points above *Height Limit* and lowers the contrast for points below this limit. If *Apply to points below limit* is not checked, points below the limit remain unchanged.

## Fences and the *Active Fence* Palette



Portions of the terrain can be delimited for local changes of the different parameters. To construct a fence just click in the rendered picture. Every click adds a point, to close the fence click on the first point or let the new line intersect with an existing line of the new fence. (In the latter case, points before the intersection will be deleted.) When closing a fence, the program constructs a second fence inside the first fence. All parameters between the inner and the outer fence will be interpolated. The region inside the inner fence will be shaded with the parameters you chose for the fence. For the region between the two fences the parameters are interpolated from 100% on the inner fence to 0% on the outer fence. See the information palette to observe how parameters are interpolated (*Active Fence – Weight*).

To delete the last point during the construction of the fence just press the *Backspace* or *Delete* key. Pressing this keys after finishing the construction deletes the active fence or the activated points if there are any. To activate a different fence, click near the inner or outer line. To activate a point of an activated fence click on the point. By pressing the *Shift* key, more than one point can be activated. Points can be displaced by clicking on them and dragging the cursor while keeping the mouse button pressed.

If there is an active fence, the different items in the *Active Fence* palette are highlighted. All parameters can be adjusted for the whole digital elevation model as for each individual fence. For every group of parameters first select the check box on the left side, then use the *Set...* button to configure the settings. The check boxes comfortably allow to enable and disable the group of parameters. If checked, the global parameters are overwritten by the local fence's parameters. Fences can be constructed inside other fences, the inner fence simply overwrites the settings of the outer fence.

The horizontal light direction of the active fence can also be adjusted by dragging a little sun that is drawn inside the fence.

The slider called *Interpolation Width* in the *Active Fence* palette regulates the distance used for the construction of the inner fence. When multiple points are activated and the *Shift* key is pressed while the slider is displaced, only this activated points will be displaced.

**Fences – Fences Visible** shows and hides the fences. To construct a new fence, first check this menu flag if it's disabled. **Fences – Apply Fences** enables and disables the effect of the fences. The color for active and inactive fences can be adapted with **Fences – Select Colors**.

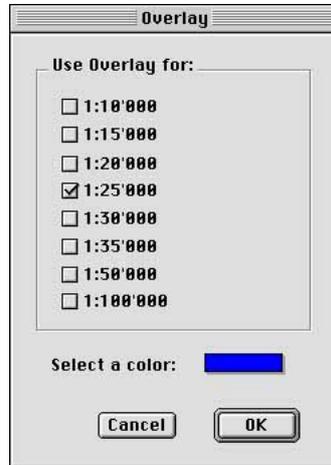
## Information Palette



This palette indicates information for the point in the picture under the cursor. *Height: DEM* and *Height: Ex.* show the height in the terrain model. The latter is the height multiplied with the vertical exaggeration factor that applies to this point. *Light* indicates the direction of illumination, *Grid* and *Slope* show the facet in the DEM (the origin is the top left corner) and the slope respectively. *Gray* indicates the gray value in the picture. The first number is a *byte* value: 0 meaning black, 255 meaning white. The second number indicates the gray value in percents: 0% for white and 100% for black. All this indications are very useful if you want to adjust a parameter specifically for one section of the DEM. The values in the palette are being updated even when another dialog stays in the foreground.

The last two rows in the dialog indicate information about the currently active fence. *Azimut* shows the horizontal direction of the illumination, starting with 0° in the north (counted clockwise). *Weight* indicates the interpolation between the the inner and the outer border of the active fence. Move the mouse within the two borders and observe how the weight for the parameters changes.

## Overlays



Contour lines can be laid over the shaded relief picture to better visualize the terrain. The contour lines (or other information) must be in a raster format. The file has to cover the same area as the digital terrain model does. After selecting the file (*Overlay – Select Overlay*) you have to indicate the scales for which you want Shadow to display the contour lines. Importing and scaling the pictures may take some time. However, overlaying contour lines does not slow down the display or the calculations once they are imported.

The overlays can be hidden and made visible with *Overlay – Overlay Visible*. The color of the overlay can be adjusted with *Overlay – Select Color*.

## Median Filter



A median filter can smooth the DEM and eliminate some artifacts, but it can also eliminate important details. Chose *DEM – Median Filter* and select the size of the filter matrix and the number of loops to apply. With a bigger size of the filter matrix and a bigger number of loops, the smoothing becomes stronger. Please be aware of the fact that the effect of the median filter can't be undone using the *Edit – Undo* command. To undo a median filter you have to close and reopen the DEM.

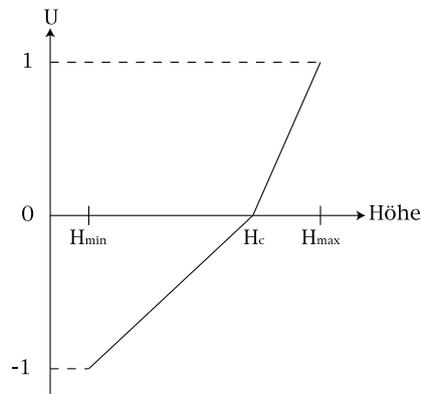
Since errors in the DEM appear especially in flat areas, another efficient method to eliminate this artifacts is to apply the gray tone for flat areas using *Shading – Global Tone in Flat Areas* (see page 51).

## B Kontrastanpassung

Brassel [8] stellt eine Methode zur Kontrastanpassung vor. Damit können luftperspektivische Effekte simuliert werden. Die Punkte werden dazu in zwei Klassen eingeteilt: Befindet sich ein Punkt über einer gewissen Höhe, wird sein Kontrast verstärkt, dies lässt Gebirgskämme stärker hervortreten. Liegt der Punkt hingegen unter dem Schwellenwert, wird der Kontrast reduziert. Die Täler werden dadurch matter dargestellt.

Der Algorithmus wurde um folgende Möglichkeiten erweitert: Die Höhe zur Aufteilung der Punkte in die zwei Klassen kann gewählt und die Kontrastverminderung für Punkte unter dieser Höhe ausgeschaltet werden.

Zuerst wird ein Mass für die Höhenlage  $U$  des Punktes berechnet (zwischen  $-1$  und  $+1$ ). Dazu wird das Diagramm der Abbildung 18 verwendet. Die wählbare Höhe  $H_c$  teilt die Punkte in zwei Klassen auf.



- $H_{max}$ : Höchster Punkt im Geländemodell
- $H_{min}$ : Tiefster Punkt im Geländemodell
- $H_c$ : Wählbarer Schwellenwert

Figure 18: Mass für die Höhenlage eines Punktes

Daraus wird mit folgender Formel der neue Grauwert berechnet:

$$T' = (T - T_{Ebene}) * e^{U * \ln c} + T_{Ebene} \quad (7)$$

wobei:

- $T$  Unkorrigierter Grauwert
- $T'$  Korrigierter Grauwert
- $T_{Ebene}$  Grauwert der Ebene
- $U$  Mass für die Höhenlage
- $c$  Kontrastfaktor

Obige Formel ändert den Grauton eines Punktes nicht, wenn der Grauton gleich dem Ebenenton ist, der Punkt auf der Höhe des Schwellenwerts liegt oder der Kontrastfaktor gleich 1 ist. Für den Kontrastfaktor sollte normalerweise ein Wert zwischen 1 und 3 gewählt werden.

## C Dateiformate



### Tabellen

Der Prototyp erlaubt es, diverse Einstellungen in Funktion der Steigung oder der Höhe vorzunehmen. Diese Werte können in ASCII-Dateien gespeichert und später wieder eingelesen werden. Die einzelnen Werte können durch *return*, Leerschlag, Tabulator, Doppelpunkt oder Strichpunkt getrennt werden. Das Dokument muss gesamthaft 91 Einträge enthalten.



### Geometrie und Parameter der Polygone

Die globalen und lokalen Einstellungen können zusammen mit der Geometrie der Polygone in einer Datei gespeichert werden. Zuerst wird eine Versionsnummer mit Wert 1 geschrieben (Typ: *long*, 4 Bytes). Daran anschliessend werden die globalen Einstellung gespeichert, dazu wird folgende Struktur verwendet:

```
struct parameterSet
{
    short        normalMethod;        // 1: Flat, 2: Phong
    short        grayToneRelief;      // Ebenenton in Relief
    short        grayToneLight;      // Ebenenton für Lichtton
    Boolean      reliefLightTone;    // True: Relief, false: Lichtton
    Boolean      d2;                  // 2D oder 3D - Relief
    double       ambientLight;       // Phong illumination
    double       diffReflection;
    double       specReflection;
    double       shininess;
    short        azimuth;             // Lichtrichtung von 0 bis 359
    short        zenith;              // Höhenwinkel
    double       verticalEx;          // Vertikale Überhöhung
    short        atmos[91];          // Atmosphäre in Funktion der Höhe
    double       contrast;            // Kontraststärke
    uns short    contrastHeight;     // Kontrasthöhe
    Boolean      contrastBelow;      // true: Kontrast wird unter
                                     contrastHeight abgewschwächt
    short        flatTone[91];       // Ebenenton
    Boolean      applyPhong;          // folgende sechs Variablen sind
    Boolean      applyDirection;     // nur für Polygone definiert.
    Boolean      applyExageration;
    Boolean      applyAtmosphere;
    Boolean      applyFlatAreas;
    Boolean      applyContrast;
    void *       reserved;           // reserviert
}
```

Anschliessend werden für jedes Polygon zuerst die Parameter (mit obiger Struktur) und danach die Geometrie geschrieben: Zuerst die Anzahl Punkte (Typ: *long*) und dann die Koordinaten der einzelnen Punkte. Zuerst wird das äussere, dann das innere Polygon gespeichert. Die Koordinaten werden mit folgender Struktur gespeichert:

```
struct polyPoint
{
    double    h;        // horizontal Koordinate
    double    v;        // vertikale Koordinate
    Boolean   active;   // nicht genutzt
}

```



## Höhenmodelle

Der Prototyp kann Höhenmodelle einlesen, wenn sich diese im folgenden Format befinden: Ein *Header* gefolgt von den Knoten der einzelnen Punkte. Die Speicherung der einzelnen Punkte erfolgt zeilenweise in *unsigned short*. Der *Header* hat folgende Form:

```
struct gridHeader
{
    long        south;    // Ausdehnung des Höhenmodells
    long        west;
    long        north;
    long        east;
    long        hSize;    // Distanz zwischen den Punkten in
                        // horizontaler
    long        vSize;    // und vertikaler Richtung
    unsigned short cols;  // Anzahl Kolonnen
    unsigned short rows;  // Anzahl Reihen
    short       factor;   // Multiplikationsfaktor für die
                        // Höhenwerte
    short       base;     // Additionsfaktor für die
                        // Höhenwerte
    short       missing;  // Code für fehlende Höhenwerte
    unsigned short byteorder; // 0 für Motorola, Intel ≠ 0
    unsigned short min;   // minimaler Höhenwert
    unsigned short max;   // maximaler Höhenwert
}

```

Das Programm ignoriert die Variablen *base*, *missing* und *byteorder*. Es können auch Winkel (Steigung und Orientierung) in diesem Dateiformat abgelegt werden. Horizontale Winkel variieren im Uhrzeigersinn zwischen 0° und 360°, vertikale Winkel werden als *signed short* zwischen -90° und +90° abgespeichert.

## Literatur

- [1] Apple Computer, Inc. Macintosh Human Interface Guideline. Addison-Wesley Publishing Company, 1992
- [2] Hansruedi Bär. Interaktive Bearbeitung von Geländemodellen. Dissertation Universität Zürich, 1995
- [3] Norbert Bartelme. Geoinformatik – Modell Strukturen Funktionen. Springer Verlag, 1995
- [4] R.M. Batson, Kathleen Edwards, E.M. Eliason. Computer-generated shaded-relief images Jour. Research U.S. Geol. Survey, vol. 3 – 1975
- [5] Rolf Böhm. Herstellung und Gestaltung von Schummerungen aus Rasterhöhendaten. Kartographische Nachrichten, 4 – 1991
- [6] Rolf Böhm. Kartographische Reliefdarsellung mittels digitaler Bildfilterverfahren. Dissertation Technische Universität Dresden, 1998
- [7] Rolf Böhm. Filter-Kombinationsschummerung mittels adaptiver Operatoren. Kartographische Nachrichten, 6 – 1999
- [8] Kurt Brassel. Modelle und Versuche zur automatischen Schräglichtschattierung. Dissertation Universität Zürich, 1973
- [9] Madlena Cavelti Hammer, Hans-Uli Feldmann, Markus Oehrli. Farbe, Licht und Schatten. Die Entwicklung der Reliefkartographie seit 1660. Cartographica Helvetica, 1997
- [10] Yuemin Ding, Paul J. Densham. A loosely synchronous, parallel algorithm for hill shading digital elevation models. Cartography and Geographic Information Systems, vol. 231 – no. 1 – 1994
- [11] Foley, vanDam, Feiner, Hughes. Computer Graphics: Principles and Practice. Addison-Wesley Publishing Company, 1990, 2nd ed.
- [12] Matthias Gössmann, Jens Volkert, Hans Zischler. Realisierung von Aufgaben aus der Kartographie auf der Multiprozessoranlage EGPA. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, 94 – 1984
- [13] Hans-Jörg Gottschalk. Automatische Schummerung. Probleme der Geländedarstellung, Deutsche Gesellschaft für Kartographie. Herausgegeben von H. Bosse, 1976
- [14] Hans-Jörg Gottschalk. Einige Probleme der Schräglichtschattierung. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe 1, 1981
- [15] Michael E. Goss. Normal vector generation for sampled data using Fourier filtering. The Journal of Visualisation and Computer Animation, Vol. 4 – 1993
- [16] Georg Häfele. Methoden zur Herstellung einer digitalen Schräglichtschattierung in der Kartographie. Diplomarbeit Universität Wien, Geographie, 1992

- [17] Georg Häfele. Herstellung von digitaler Schräglichtschattierung in Verbindung mit GIS. Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Band 6 – 1993
- [18] Günter Hake, Dietmar Grünreich. Kartographie. Verlag Walter de Gruyter, Berlin – New York, 1994 7. Auflage
- [19] F. Hobbs. The rendering of relief images from digital contour data. The Cartographic Journal, vol. 32 – 1995
- [20] Michael E. Hodgson. Comparison of Angles from Surface Slope / Aspect Algorithms. Cartography and Geographic Information Systems, vol. 25 – 1998
- [21] Walther Hofmann. Geländeaufnahme – Geländedarstellung. Georg Westermann Verlag, 1971
- [22] Berthold K.P. Horn. Hill shading and the reflectance map. Geo-Processing, 2 – 1982
- [23] Heinz Hügli. De la synthèse d'images appliquée aux maquettes de terrain numérique. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Mitteilung Nr. 28, 1980
- [24] Heinz Hügli. Vom Geländemodell zum Geländebild: Die Synthese von Schattenbildern. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik. 10 – 1997
- [25] Lorenz Hurni und Rolf Christinat. Anforderungen an ein modernes digitales kartographisches Produktionssystem, in *Kartographie im Umbruch – neue Herausforderungen, neue Technologien*. Kartographie Kongress 1996, Interlaken
- [26] Karl Kraus. Photogrammetrie. Band 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Verlag Dümmler, Bonn
- [27] Ivan Kupčik. Alte Landkarten. Artia Verlag, Prag, 1980
- [28] Eduard Imhof. Cartographic Relief Presentation. Verlag Walter de Gruyter, Berlin – New York, 1982
- [29] Eduard Imhof. Kartographische Geländedarstellung. Verlag Walter de Gruyter & Co. Berlin, 1965
- [30] Ralf King. Analytische Schummerung mit Hilfe von digitalen Bildverarbeitungsalgorithmen. Diplomarbeit FH Karlsruhe, 1993
- [31] Karl Lukas. Evaluation und Weiterentwicklung von Methoden der computergestützten Schräglichtschattierung. Diplomarbeit Geographisches Institut Universität Zürich, 1994
- [32] Robert K. Mark. A multidirectional, oblique-weighted, shaded-relief of the Island of Hawaii. Open-File Report 92 – 422
- [33] Detlef Niese, Wigand Weber. Vektorisierte Rasteralgorithmen zur Verarbeitung von Höhenschichten. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Nummer 99

- [34] Andrea Terribilini. Dissertation am Kartographischen Institut der ETH Zürich. Dokument in Vorbereitung
- [35] Colin Ware. Fast hill shading with cast shadows. *Computers & Geosciences*, vol. 15 – no. 8 – 1989
- [36] Robert Weibel. Konzepte und Experimente zur Automatisierung der Reliefgeneralisierung. *Geoprocessing Reihe Vol. 15*. Geographisches Institut Universität Zürich, 1989
- [37] H. Wiechel. Theorie und Darstellung von nicht gestzesmässig gebildeten Flächen mit Rücksicht auf die Bergzeichnung. *Der Civilingenieur*, 1878
- [38] Pinhas Yoéli. Analytische Schattierung. Ein kartographischer Entwurf. *Kartographische Nachrichten*, 4 – 1965
- [39] Pinhas Yoéli. Analytische Schattierung und Dichte. *Kartographische Nachrichten*, 1 – 1966
- [40] Pinhas Yoéli. Die Mechanisierung der analytischen Schattierung (Facettenmethode). *Kartographische Nachrichten*, 5 – 1966
- [41] Pinhas Yoéli. Die Richtung des Lichtes bei analytischer Schattierung. *Kartographische Nachrichten*, 2 – 1967
- [42] Pinhas Yoéli. Topographische Karten und Rechenautomaten. *Kartographische Nachrichten*, 4 – 1967
- [43] Marc Zanini. Dreidimensionale synthetische Landschaften – Wissensbasierte dreidimensionale Rekonstruktion und Visualisierung raumbezogener Informationen. Dissertation ETH Zürich, 1998

Weitere Publikationen zur analytischen Schattierung finden sich in einer umfangreichen Liste von Horn [22].

## Abbildungsverzeichnis

1	Ausschnitt aus dem Kartengemälde des Zürcher Gebietes von Hans Conrad Gyger (1664/67), Originalmassstab ca. 1:32'000, Abbildung verkleinert. . . . .	7
2	Ausschnitt aus dem Blatt XXIII der <i>Topographischen Karte der Schweiz</i> oder <i>Dufourkarte</i> 1:100'000, publiziert 1844 bis 1864 . . . . .	8
3	Ausschnitt aus der <i>Reliefkarte der Centralschweiz</i> , Vogelschaukarte (1887). Gezeichnet von Xaver Imfeld. . . . .	9
4	Ausschnitt aus dem Blatt <i>Sentis</i> der <i>Charte von Schwaben</i> 1:86'400, publiziert 1798 bis 1828 . . . . .	10
5	Ausschnitt aus der <i>Carte topographique de l'Archipel Toscan ou de l'île d'Elbe et des îles adjacentes</i> 1:50'000 (1821) . . . . .	11
6	Ausschnitt aus dem manuell hergestellten Relief für die <i>Landeskarte der Schweiz</i> , Massstab 1:25'000, Blatt 1149 <i>Wolhusen</i> . . . . .	13
7	Ausschnitt aus der <i>Landeskarte der Schweiz, Geophysikalische Ausgabe</i> , Massstab 1:1'000'000 (1994) . . . . .	16
8	Ausschnitt aus dem <i>Relief der Schweiz, Kartengemälde von Eduard Imhof</i> , Massstab 1:300'000 (1982) . . . . .	17
9	Projektion der Vektoren auf die Horizontalebene . . . . .	33
10	Ebenenton und Kontrastanpassung . . . . .	34
11	Lokale Anpassungen . . . . .	36
12	Median-Filter . . . . .	38
13	Berechnete Schattierung (1:25'000) . . . . .	42
14	Berechneter Lichtton (1:25'000) . . . . .	43
15	Schattierung berechnet aus Orientierung (1:25'000) . . . . .	44
16	Schattierung und Lichtton mit Situation (1:25'000) . . . . .	45
17	Schattierung und Lichtton berechnet aus Orientierung mit Situation (1:25'000) . . . . .	46
18	Mass für die Höhenlage eines Punktes . . . . .	58

Die Abbildung 1 stammt aus [27], die Abbildungen 2, 3, 4, 5 und 6 aus [9].

Abbildungen 7 und 8: Copyright *Bundesamt für Landestopographie*.