

Bericht 18

September 2001

Interpolation von DHM25 Level 2

**Interpolation eines digitalen Höhenmodells aus
Höhenkurven, Zwischenkurven, Seeufern,
Bruchkanten, Gewässerlinien und Höhenkoten
mittels Dreiecksvermaschung**

Felix Arnet

Interpolation von DHM25 Level 2

**Interpolation eines digitalen Höhenmodells aus
Höhenkurven, Zwischenkurven, Seeufern,
Bruchkanten, Gewässerlinien und Höhenkoten
mittels Dreiecksvermaschung**

Felix Arnet

© 2001
Bundesamt für Landestopographie
Office fédéral de topographie
Ufficio federale di topografia
Uffizi federal da topografia
Federal Office of Topography

Redaktion: A. Wiget

Auflage: 200 Exemplare
Druck: EDMZ

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Basisdaten und deren Vorbereitung.....	1
2.1	Ersterfassung	1
2.1.1	DHM25 Level 1.....	1
2.1.2	DHM25 Level 2.....	1
2.2	Nachführung.....	2
3	Interpolation eines digitalen Höhenmodells aus Höhenkurven, Zwischenkurven, Seeufern, Bruchkanten, Gewässerlinien und Höhenkoten mittels Dreiecksvermaschung	2
3.1	Theoretischer Exkurs zur mathematischen Interpolation zwischen Höhenkurven	2
3.2	Dreiecksvermaschung.....	4
3.2.1	Integration von impliziter Information in das Höhenmodell	5
3.2.2	Bereinigen der Artefakte von Höhenkurven.....	5
3.2.3	Modell mit Höhenkurven und Koten.....	9
3.2.4	Unterbrochene Höhenkurven, Zwischenkurven, Koten und Punkte im "falschen" Höhenintervall	10
3.2.5	Weitere Höheninformationen.....	11
3.2.6	Zusammenstellung	13
3.3	Höheninterpolation in TIN-Modellen.....	14
3.3.1	Lineare Interpolation.....	14
3.3.2	Kubische Interpolationen.....	15
3.3.3	Pseudoquadratische Interpolation zur Bestimmung von Neigung	16
3.4	Matrixmodell von DHM25 Level 2.....	16
4	Vergleich von DHM25 Level 2 mit anderen Höhenmodellen.....	16
4.1	Vergleich Basismodelle DHM25 Level 1 und Level 2.....	16
4.2	Vergleich der Matrixmodelle DHM25 Level 1 und Level 2.....	16
4.3	Vergleich zwischen Basismodell und Matrixmodell von DHM25 Level 2.....	17
4.4	Vergleich mit fotogrammetrischen Passpunkten.....	20
	Anhang A : Programm mesh_z	22

Vorwort

Seit dem Start der Reihe "Berichte aus der L+T" im Jahre 1994 ist es ein lange gehegter Wunsch, in solchen "gelben Heften" auch Fragen aus dem Bereich des Topografischen Informationssystems (TIS) zu behandeln. Knappe personelle Ressourcen und der damit verbundene Zwang, sich in Form der Produktinformationen stets auf die für Kundinnen und Kunden unmittelbar nötigen Informationen zu beschränken, haben ausführlichere, auf die wissenschaftliche Dokumentation hin ausgerichtete Veröffentlichungen bisher leider verunmöglicht.

Mit dem vorliegenden Bericht vermag Felix Arnet in einem wichtigen Punkt diese Lücke zu schliessen. Obwohl auch er als Leiter des Teilprozesses "Kompetenzzentrum Geografisches Informationssystem" (CC-GIS) mit Arbeit überhäuft ist, hat er die Aufgabe übernommen, die für den Level 2 des DHM25 verwendeten Interpolationsalgorithmen umfassend zu beschreiben. Neben seinem Arbeitsschwergewicht im Rahmen der Geotopografischen Datenbank (GTDB) war es ihm stets ein Anliegen, seine grossen programmiertechnischen Fähigkeiten und Interessen auch im Rahmen der Neukonzeption der Höheninterpolation des DHM25 anzuwenden. Mit dem vorliegenden Bericht werden die dabei umgesetzten Ideen und Grundsätze nun für die interessierten Kreise dokumentiert.

Unsere Freude über das Erscheinen dieses Berichts ist allerdings gleichzeitig auch von Wehmut durchzogen, denn Felix Arnet wird uns nach fünfjährigem grossem Einsatz für das TIS verlassen und eine berufliche Herausforderung in der Privatwirtschaft antreten, welche ihm geographisch näher liegt und seinen Arbeitsweg bedeutend schrumpfen lässt. Möge dieses vorliegende "Vermächtnis" aber Anstoss zu weiteren Berichten aus dem Bereich Topografie bilden.

Wabern, im Oktober 2001

Martin Rickenbacher

1 Einleitung

Für die Interpolation des Matrixmodells von DHM25 Level 1 wurde beim Bundesamt für Landestopographie ab 1995 eine im Programm dhm_int des IGP-ETHZ implementierte Methode verwendet, die entlang von 8 regelmässig verteilten Richtungen jeweils die Höhen anhand der Schnittpunkte mit den Höhenkurven interpolierte und die erhaltenen Werte gewichtet mittelte [1]. Diese Methode war eine Weiterentwicklung des Programms CONGRID, welches 1988 an der L+T entwickelt worden war und auf der Interpolation innerhalb von Profilen Nord-Süd und West-Ost beruhte [4]. Sie lieferte nun zwar bessere Resultate, wies aber immer noch verschiedene Nachteile auf: Höhenknoten konnten nur indirekt für die Interpolation verwendet werden und in flachen Gebieten ergaben sich Stufen.

In den Jahren 1994 bis 1998 wurden zudem alpine Hauptbruchkanten fotogrammetrisch ausgewertet. Diese Gründe führten dazu, dass sich eine nochmalige Ableitung des Matrixmodells mit einer neuen Interpolationsmethode aufdrängte, welche die obigen Punkte berücksichtigt.

Zur Interpolation von Höhen werden zur Zeit vor allem Dreiecksvermaschungen verwendet. Diese Methode ist relativ einfach und führt zu guten Resultaten bei unregelmässig verteilten Punkten. Werden Höhenkurven und Seen verwendet, führt die reine Dreiecksvermaschung zunächst zu unerwünschten Artefakten. Mit Hilfe von zusätzlichen Strukturen, die aus dem Verlauf der Höhenkurven interpretiert werden, können diese Störungen eliminiert werden. Eine solche Methode wurde zur Berechnung des Matrixmodells von DHM25 Level 2 verwendet.

Dieser Bericht beschränkt sich auf die Beschreibung dieser neuen Interpolationsmethode. Für allgemeine Angaben zum Datensatz wird auf die Produktinformation verwiesen [11].

2 Basisdaten und deren Vorbereitung

Als Grundlage zur Bestimmung von Höhen werden auf topografischen Karten meistens Höhenkurven und Knotenpunkte verwendet. Um Höhen aus topografischen Karten effizient mit Computern berechnen zu können, müssen diese Elemente vektorieLL vorliegen. Diese Vektordaten bilden das sogenannte Basismodell.

2.1 Ersterfassung

Bis 1986 lagen die Landeskarten des Bundesamtes für Landestopographie nur als Farbauszüge auf Glasplatten und als gedruckte Karten vor. Es waren also keine vektorieLLen Daten vorhanden.

2.1.1 DHM25 Level 1

Die Basisdaten wurden grösstenteils zwischen 1986 und 1996 im Rahmen des Projektes DIKART [5] für das DHM25 Level 1 erfasst. Dabei wurden Höhenkurven, Zwischenkurven, Seeufer, Seebodenkurven und Höhenknoten ab eingescannten Farbauszügen der Landeskarten 1:25'000 digitalisiert [8, 9]. Als wesentliche Qualitätsmerkmale dieser Daten können genannt werden:

- Die Daten wurden blattweise erfasst
- Die Höhenkurven wurden an den Blatträndern aufeinander abgestimmt
- Der Perimeter umfasst das gesamte Gebiet der LK25 plus den der LK50 in Deutschland, Frankreich und Österreich.
- Keine Schnittpunkte von Höhenkurven
- Innerhalb der Schweiz und Liechtenstein sind bei 100m-Höhenkurven keine Lücken vorhanden
- Aus technischen Gründen gab es am westlichen und nördlichen Rand eines Kartenblattes je eine Lücke von rund 1.5 m

2.1.2 DHM25 Level 2

Für das Basismodell von Level 2 wurden zunächst die 1.5 m breiten Lücken an den Blatträndern bereinigt. Verschiedene Test wurden danach zum Teil als Wiederholung durchlaufen und die Daten wo nötig angepasst:

- Keine Schnittpunkte von Höhenkurven
- Innerhalb der Schweiz und Liechtenstein sind bei 100m-Höhenkurven keine Lücken vorhanden
- Kleine Linienunterbrüche wurden geschlossen
- Linien mit weniger als einer Mindestanzahl Stützpunkte wurden überprüft

Um die Genauigkeit des Modells im Gebirge zu verbessern, wurden zwischen 1994 und 1997 zusätzlich alpine Hauptbruchkanten fotogrammetrisch 3-dimensional erfasst. Da der Verlauf der Höhenkurven in felsigen Gebieten oft nur aus der Felszeichnung heraus interpretiert wurde, gab es zum Teil grosse Abweichungen zwischen Höhenkurven und Bruchkanten. Diese wurden dadurch beseitigt, indem die Höhenkurven an die Bruchkanten angepasst wurden.

Weitere Qualitätssteigerungen konnten erreicht werden :

- Die Höhenkurven wurden so gerichtet, dass in Digitalisierungsrichtung das Gelände nach links steigt.
- Höhenkoten und Höhenkurven wurden auf ihre gegenseitige Plausibilität untersucht.

Als weitere Geländeinformationen wurden noch Teile des Gewässernetzes verwendet. Dieses wurde in VECTOR25 2-dimensional erfasst. Durch Verschneiden mit den Höhenkurven wurden daraus zumindest für den Objekttyp "Fluss" (Achsen doppellinig dargestellter Flüsse) [10] 3D-Linien abgeleitet.

2.2 Nachführung

Vor allem in Gletscherregionen gab es in den letzten Jahren zum Teil grosse Änderungen an der Geländeoberfläche. Der neue Verlauf der Gletscherhöhenkurven wurde grösstenteils anhand der neuesten Pixelkarten im Basismodell angepasst. Wo digitale fotogrammetrische Nachführungselemente vorhanden waren, wurden diese direkt in den Datensatz integriert.

3 Interpolation eines digitalen Höhenmodells aus Höhenkurven, Zwischenkurven, Seeufern, Bruchkanten, Gewässerlinien und Höhenkoten mittels Dreiecksvermaschung

Das Basismodell alleine genügt nicht, um Höhen per Computer interpolieren zu können. Es muss noch eine Funktion definiert werden, wie die Höhen zwischen den Höhenkurven und anderen vektoriellen Informationen interpoliert werden kann. Eine solche Funktion zu definieren ist das Ziel dieses Kapitels.

Für die meisten Situationen soll angenommen werden, dass die Interpolation im Gebiet zwischen zwei Höhenkurven unabhängig vom Verlauf des Geländes ausserhalb dieser Region sein soll. Im Allgemeinen ist nicht zu erwarten, dass eine andere Annahme zu einer erhöhten Genauigkeit führt. Ausnahmefälle werden im Kapitel 3.2.4 behandelt.

3.1 Theoretischer Exkurs zur mathematischen Interpolation zwischen Höhenkurven

Das Ziel dieses Exkurses ist es nicht, eine praktikable Lösung zu entwickeln, sondern gewisse mathematische Ansätze und Ideen aufzuzeigen.

Zusammen mit dem virtuellen Verlauf der Falllinien, die senkrecht zu den Höhenkurven stehen, bilden die Höhenkurven ein orthogonales Netz mit Quellen bei Hügeln und Senken bei Senken. Dieses Netz enthält Unstetigkeiten bei Tälern (Flüsse), Kreten und bei weiteren Bruchkanten.

Mathematisch betrachtet wird ein orthogonales Netz mittels einer analytischen Funktion wieder in ein orthogonales Netz abgebildet. Dies soll im Bezug auf Höhenkurven hier kurz untersucht werden.

Wegen der vielen Unstetigkeiten im Höhenkurvenmodell (Geradensegmente) ist es sinnvoll, eine solche Funktion lokal zu definieren, wo die Höhenkurven stetig sind, das heisst zwischen zwei benachbarten Segmenten. Es sollen im Moment nur 2 benachbarte Segmente betrachtet werden und versucht werden dazugehörige Falllinien zu finden. Dabei wird ein möglichst einfacher Ansatz

gewählt: Die Verlängerung der Linien schneiden sich im Punkt $z_0 = (x_0, y_0)$, womit sich im lokalen Modell eine Höhenkurvenquelle an diesem Ort befindet (Abbildung 1). Ein orthogonales Netz mit dieser Eigenschaft lässt sich aus dem kartesischen Netz $w = (u, v)$ mit der Funktion $1/w + z_0$ erzeugen. In diesem Fall können Höhenkurven als Bilder der Parallelen zur x -Achse und die Falllinien als Parallelen der y -Achse aufgefasst werden. Die Falllinien bilden dabei Kreise um den Punkt z_0 . Die Höhen können linear entlang der Falllinien interpoliert werden, womit eine kontinuierliche Fläche definiert ist. Weiter zeigt sich, dass die 2 Tangentialpunkte eines Kreises, der beide Höhenkurven berührt, auf derselben Falllinie liegen (Abbildung 2).

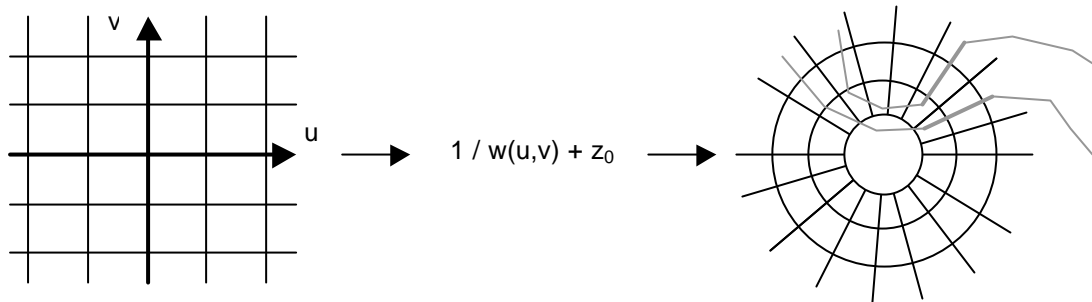


Abbildung 1 Übergang von einem kartesischen Netz in ein orthogonales Netz, wo je ein Segment von zwei Höhenkurven auf einem Abbild einer Parallelen der u -Achse liegt. Die Falllinien entsprechen den Bildern der Parallelen der v -Achse und sind konzentrische Kreise um z_0 .

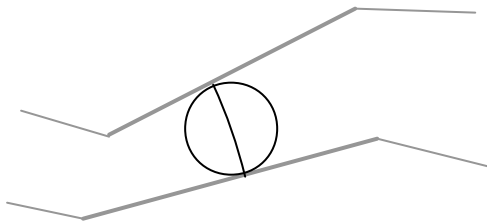


Abbildung 2 Zusammenspiel von Berührungskreis von Höhenkurven und Falllinien

Bei aufeinanderfolgenden Segmenten ergibt sich aus dem obigen Ansatz eine gebietsweise definierte Fläche. Dabei kann gesagt werden, dass wenn ein Kreis genau zwei benachbarte unterschiedlich hohe Höhenkurvensegmente berührt und keine weiteren schneidet, kann die Höhe entlang der Falllinie zwischen den Berührungspunkten eindeutig interpoliert werden. Allerdings gibt es zahlreiche Gebiete, wo mit diesen Einschränkungen keine Höhe interpoliert werden kann. Bei gewissen Fällen können durch Extrapolation und Verschnitt benachbarter Gebiete Höhen berechnet werden. Bei näherer Untersuchung zeigt sich rasch, dass die Bestimmung, wo welche Teilfläche Gültigkeit hat, sehr aufwendig werden kann.

Bei ausgeprägten Tälern und Kreten, wo keine unterschiedlich hohen Höhenkurven vorhanden sind, führt eine Extrapolation wie sie oben erklärt ist, zu kaum zulässigen Ergebnissen. Hier könnte versucht werden, das Gelände aus dem übrigen Verlauf zu interpretieren. Allerdings kann das zu Übertreibungseffekten führen. Eine andere Möglichkeit, die von der Idee her im Kapitel 3.2 umgesetzt wird, ist die Annahme, dass die tiefste Linie eines Tales der geometrische Ort aller Punkte ist, die von zwei gleich hohen Höhenkurven gleich weit entfernt sind. Bildlich lässt sich diese Gerippelinie so vorstellen, dass ein Kreis so in ein Tal hinein verschoben und seine Grösse verändert wird, dass er immer mindestens zwei Segmente berührt und keines schneidet \emptyset . Die Gerippelinie entspricht dann dem Verlauf des Kreismittelpunktes. Damit ergibt sich bei allen Höhenkurvenwinkeln, die kleiner als 180° sind, eine Gerippelinie (rote Linie in). Bei ausgeprägten Tälern und Kreten kann es auch zu Scharen von Gerippelinien kommen. Weiter kann noch die Verbindung zur nächsten Höhenkurve mit unterschiedlicher Höhe zur Gerippelinie oder Gerippelinien­schar hinzugefügt werden (grüne Linie in). Damit sind Anfangs- und Endhöhe einer Gerippelinien­schar definiert. Ein topologisch und hydrologisch korrektes Resultat wird erhalten, wenn die Höhe entlang der Gerippelinien linear interpoliert wird. Dabei soll rekursiv jeweils die Gerippelinie mit minimalstem absolutem Gefälle interpoliert werden.

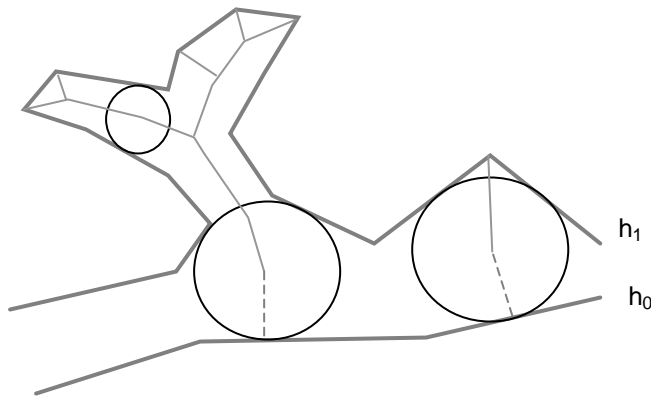


Abbildung 3 Ein Inkreis verschiebt sich in ein Tal und der Weg seiner Mittelpunkte soll die tiefsten Stellen des Tales markieren

Auf diese Weise können weitere, implizite Informationen in das Modell eingeführt werden. Wie Höhen in der Umgebung von Gerippelinien interpoliert werden sollen, dazu wurden keine genaueren Überlegungen angestellt. Es drängt sich aber ein Weg über eine bilineare Interpolation zwischen Höhenkurven und Gerippelinien auf.

Bemerkenswert am Ansatz, wo mit Inkreisen zum Auffinden von Fall- und Gerippelinien gearbeitet wird, ist, dass er sich genau gleich formulieren lässt, wenn die Höhenkurven nicht als Liniensegmente vorliegen, sondern in irgend einer Geometrie.

In gewissen Fällen kann der obige Ansatz zu markanten systematischen Verfälschungen führen, nämlich beim Zusammenkommen von Flächen mit stark unterschiedlichen Neigungen (Abbildung 4). Allerdings scheint es, dass sich solche Situationen nur durch Einbezug von grösseren Gebieten, die auch ausserhalb eines Höhenkurvenintervalls liegen, korrekt und signifikant zu erkennen sind. Dementsprechend wird das Modell massiv komplizierter. Es wurden keine weiteren Überlegungen dazu angestellt.



Abbildung 4 Systematische Verfälschung beim Zusammenkommen von Flächen mit stark unterschiedlicher Neigung verglichen mit einer Situation mit "sinnvoller" Gerippelinie.

In der Praxis wäre alleine schon die Bestimmung, auf welcher Falllinie ein Punkt liegt, sehr rechenintensiv. Daher drängen sich Näherungslösungen auf. Eine gute und schnelle Methode bildet zum Beispiel die Dreiecksvermaschung.

3.2 Dreiecksvermaschung

Für die Dreiecksvermaschung (triangulated irregular network, TIN) wurde die Methode nach Delaunay verwendet.

Dabei wurden zunächst alle Stützpunkte des Basismodells verwendet. Anschliessend wurden im TIN Zusatzpunkte so eingefügt, dass die Segmente der linearen Elemente (Höhenkurven, Seeufer,...) auf Verbindungen des TIN liegen. Damit ist gewährleistet, dass bei einer linearen Interpolation innerhalb

der Dreiecke die Höhe eines Punktes, der auf einer Höhenkurve oder anderen Linie liegt, die gleiche Höhe beibehält.

Allerdings zeigt es sich, dass häufig Artefakte vorkommen, insbesondere dort, wo drei Punkte der selben Linie ein Dreieck des TINs bilden. Bei Höhenkurven ergeben sich dabei flache Dreiecke in Tälern, Kreten, Hügeln und Senken. Bei Bruchkanten und Gewässerlinien ergeben sich Dreiecke, die für eine lineare Interpolation fragwürdig erscheinen. Artefakte können auch sich bei unvollständigen Zwischenkurven ergeben. Um diese Artefakte zu beseitigen, wurden verschiedene weitere Schritte eingeführt.

3.2.1 Integration von impliziter Information in das Höhenmodell

Zunächst muss gesagt werden, dass alle zwingenden Informationen des Basismodells mit der TIN-Methode vollständig verwendet wurden. Es gibt viele Ansätze, wie die oben erwähnten Artefakte eliminiert werden können. Die meisten versuchen in der Nähe der Artefakte die TIN-Struktur anzupassen und/oder Zusatzstrukturen einzubauen ([2],[3],[6],[7]). Für die Zusatzstrukturen wird oft das Gelände in der Umgebung der Artefakte interpoliert. Für die Interpolation des DHM25 wurden die Strukturen zunächst mit Hilfe von Zusatzpunkten und -linien topologisch bereinigt und anschliessend diesen Strukturen sinnvolle Höhen zugeordnet (siehe auch Kapitel 3.1).

3.2.2 Bereinigen der Artefakte von Höhenkurven

Zunächst soll ein Modell untersucht werden, das nur aus Höhenkurven besteht. Diese Kurven sollen sich weiter dadurch auszeichnen, dass sie innerhalb des Modells vollständig sind und keine Unterbrüche aufweisen. Dann können sich in Tälern und Senken und auf Kreten und Hügeln sowie Pässen flache Dreiecke ergeben (Abbildung 5). Zunächst soll gezeigt werden, wie die flachen Dreiecke auf Kreten und in Tälern eliminiert werden können. Horizontale Dreiecke können hier zu Gebieten zusammengefasst werden, die zusammen ein Tal, eine Kreta oder einen Pass bilden. Täler und Kreten, die vollständig innerhalb des Modells liegen, werden dabei überall bis auf ein einziges Segment s von einer Höhenkurve abgegrenzt. Bei einem Pass gibt es im allgemeinen zwei solche Segmente, es könne aber auch mehr sein, je nachdem wie viele "einfache" Passflächen sich berühren. Ein angesprochenes Segment s gehört zu zwei Dreiecken, A, B, wovon A Teil eines horizontalen Gebietes ist. Die zwei Enden von s liegen damit gleich hoch. Der dritte Punkt, P, des anderen Dreiecks B weist demnach eine andere Höhe auf. Zusätzlich kann gesagt werden, dass keines der 3 Segmente des Dreiecks B zu einer Höhenkurve gehört: s definitionsgemäss, die zwei anderen, weil der dritte Punkt P von B eine andere Höhe hat. Von solchen Punkten P aus sollen nun die horizontalen Dreiecke von Tälern, Kreten, und Passflächen sukzessive mittels Zusatzstrukturen eliminiert werden.

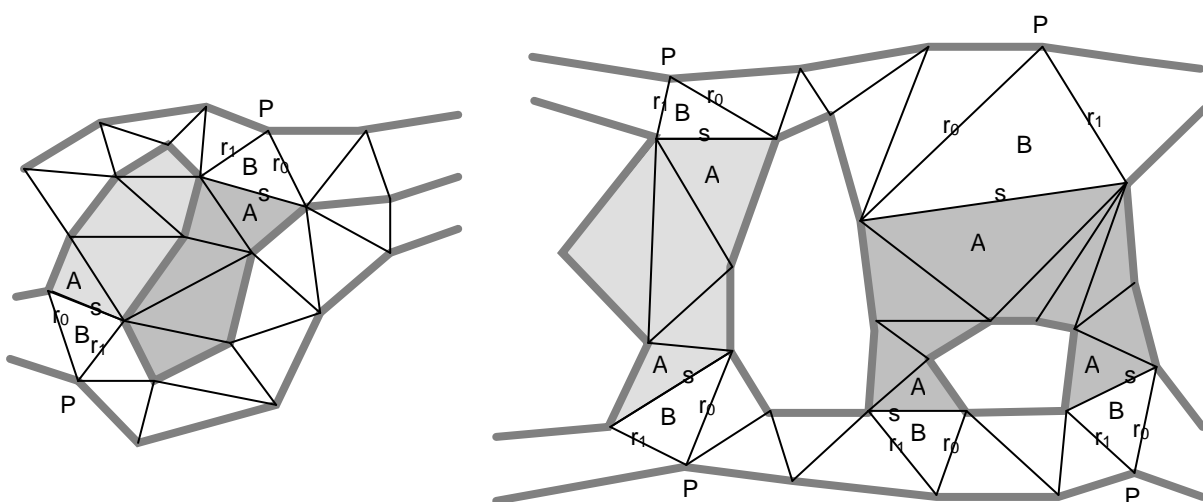


Abbildung 5 Flache Dreiecke bei Tälern und Kreten und bei Pässen

Interpolationen höheren als 1. Grades führen bei aus Höhenkurven abgeleiteten Geländemodellen nicht zu wesentlichen Genauigkeitssteigerungen. Aus diesem Grund sollen möglichst einfache Strukturen eingefügt werden. Empirisch ergeben sich sinnvolle Strukturen, wenn man wie folgt vorgeht (Abbildung 6)

1. Suchen von Dreiecken der Art B
2. "Fixieren" der Schenkel r_0 , r_1 von B (siehe Bemerkung)
3. Einfügen eines Zusatzpunktes P_1 im Inkreismittelpunkt von B (graue gestrichelte Linien)
4. Verbinden von P und P_1 (graue, durchgezogene dünne Linien)
5. Suchen von Dreiecken der Art B, (mit Segment s und Punkt P_i = im i. Durchgang hinzugefügter Punkt)
6. Fixieren der Schenkel r_0 , r_1 von B (graue gestrichelte Linien)
7. Einfügen eines Zusatzpunktes P_{i+1} im Inkreismittelpunkt von B
8. Verbinden von P_i und P_{i+1}
9. weiter mit 5. bis keine Segmente der Art s mehr auftreten

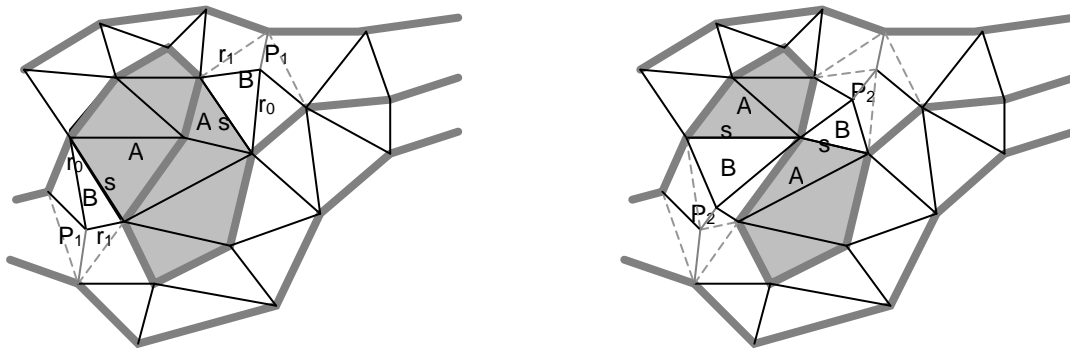


Abbildung 6 Schritte 1 bis 4 und 5 bis 9

Die Grundidee dieses Vorgehens besteht darin, dass man eine Annäherung an die Gerippelinien, wie sie in 3.1 beschrieben wurden, damit rekursiv pro Tal respektive Krete von einem Ausgangspunkt her konstruieren kann. Der Vorteil gegenüber einer Methode, welche für jedes flache Dreieck eine Verbesserung durch einen Zusatzpunkt und/oder -linie sucht, besteht darin, dass mit diesem Vorgehen direkt topologisch verknüpfte Elemente der Gerippelinien erhalten werden.

Das Hauptaugenmerk ist also auf die Topologie und weniger auf die Geometrie gerichtet. Dies zeigt sich um so mehr, als mit der obigen Beschreibung noch nichts darüber ausgesagt wurde, welche Höhen die neu eingefügten Punkte haben sollen. Das entpuppt sich aber als weiterer Vorteil, da damit die Höhen entsprechend irgendeinem Kriterium, in dem die topologischen Verknüpfungen der Gerippelinien auch einbezogen werden können, nachträglich berechnet werden können. Im allgemeinen wird es das Ziel sein, eine hydrologisch korrekte Topografie zu erhalten.

Bemerkung:

Ein Segment ist fixiert, wenn es beim Einfügen von weiteren Punkten bestehen bleiben soll. Die Segmente, die mit Höhenkurven und auch allen anderen vorgegebenen Linien wie Seeufer, Bruchkanten, usw., sind während dem Einfügen von Zusatzstrukturen fixiert. Dadurch können im TIN-Modell Dreiecke entstehen, die nicht mehr den allgemeinen Bedingungen der Delauny-Triangulation entsprechen. Man soll sich dabei aber bewusst sein, dass die TIN-Struktur im wesentlichen etwas über die Nachbarschaft der Objekte aussagen kann und soll und nicht unbedingt als Selbstzweck verstanden werden soll

Die Schenkel r_0 und r_1 müssen vor der Integration des Zusatzpunktes fixiert werden. Sonst kann es vorkommen, dass bei speziellen Verläufen der Höhenkurven einzelne Täler oder Kreden, die nahe beieinander liegen, die Verläufe der Gerippelinien zu wenig stabil sind und von einem intuitiven

korrekten Tal in ein anderes wechseln können. Dadurch würden wesentliche Änderungen an der Topografie verursacht (Abbildung 7).

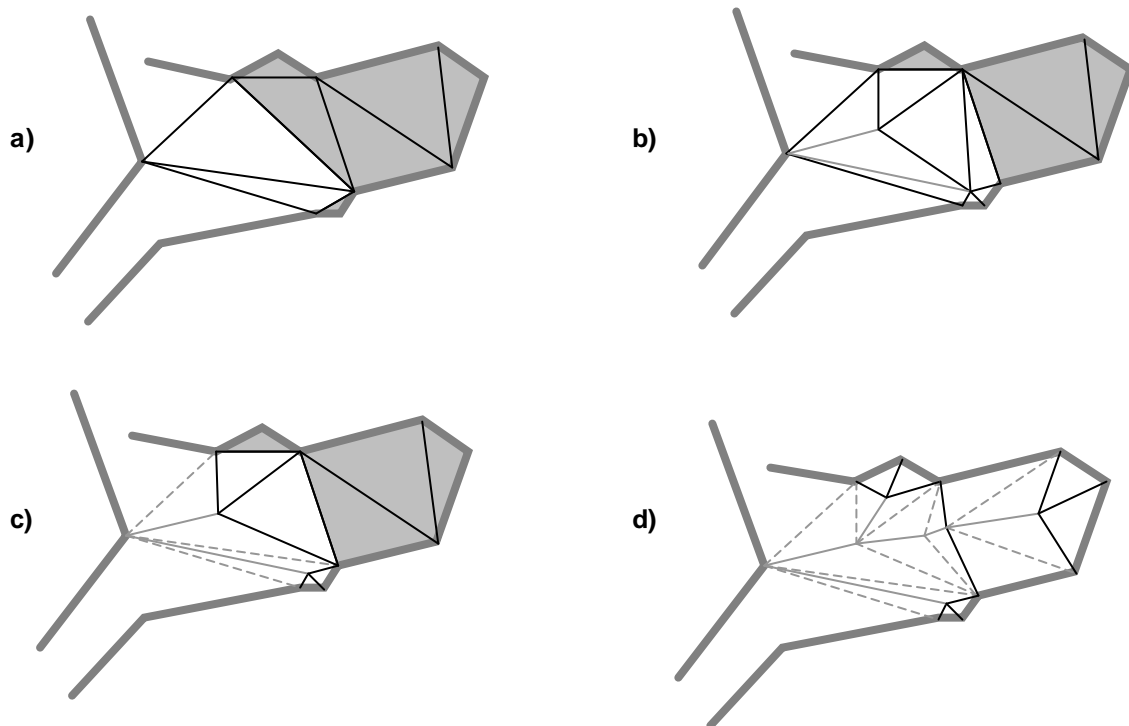


Abbildung 7 a) Ausgangslage, gerastertes Haupttal, schraffiertes Nebental
 b) geänderte Lage nach erstem Schritt ohne fixieren der Segmente r: Die Verbindung zum schraffierten Seitental wird im Haupttal fortgesetzt
 c) mit fixieren der Segmente r. Die Täler verlaufen richtig
 d) Vollständig aufgelöste flache Dreiecke

Wenn keine Dreiecke der Art B mehr vorkommen, wurden alle flachen Dreiecke in Tälern und auf Kreten topologisch aufgelöst (Abbildung 8). Allerdings haben die Punkte P_i wie schon erwähnt noch keine Höhe zugewiesen erhalten.

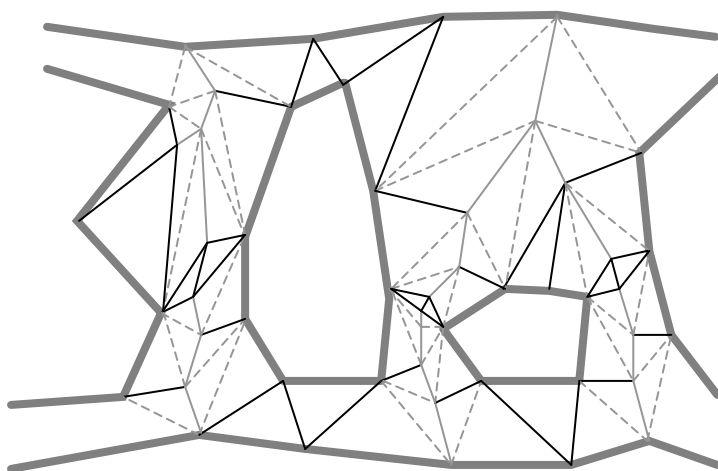


Abbildung 8 Aufgelöste flache Dreiecke mit Gerippelinien

3.2.2.1 Zusätzliche Kriterien bei Pässen

Wenn die Distanz zu einem Pass von zwei Seiten her stark unterschiedlich ist, so kann es bei obigen Kriterien vorkommen, dass der höchste Punkt nicht an einer intuitiv vernünftigen Stelle liegt (Abbildung 9). Um das zu vermeiden kann ein zusätzliches Kriterium eingebaut werden, das besagt, dass ein Segment s_{i+1} nicht mehr als ein Faktor f (Verengungsfaktor) länger sein darf als das letzte aufgelöste Segment s_i , sonst soll ein Dreieck nicht aufgelöst werden. Empirisch zeigt es sich, dass ein Faktor 2 zu guten Resultaten führt.

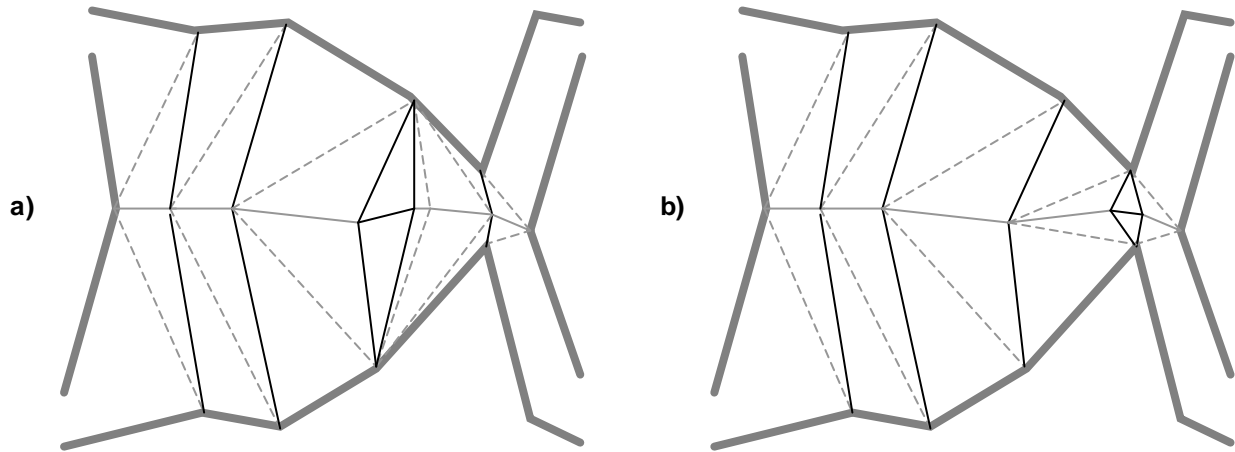


Abbildung 9 a) Pass ohne Erweiterungskriterium

b) Pass mit Erweiterungskriterium

Wenn mit einem Verengungsfaktor $f \neq 0$ keine kritischen Dreiecke gefunden werden, soll er Faktor auf 0 gesetzt werden und dann wieder mit Punkt 5 weitergefahren werden. Sonst kann es vorkommen, dass gewisse sackförmige Strukturen nicht aufgelöst werden (Abbildung 10).

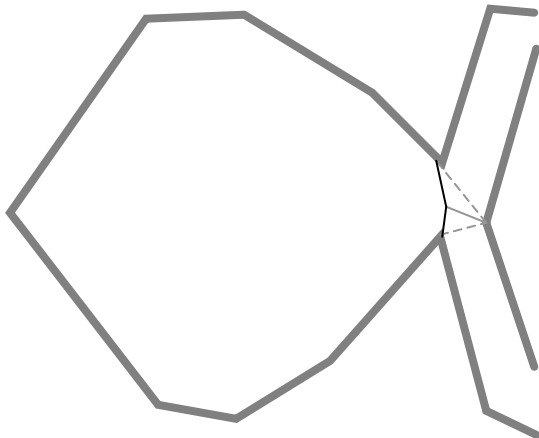


Abbildung 10 Unaufgelöster Sack

3.2.2.2 Berechnen der Höhen der neuen Punkte

Nachdem die Topologie der Gerippelinien bestimmt wurde, sollen nun noch die Höhen der einzelnen neuen Stützpunkte berechnet werden. Dies geschieht durch lineare Interpolation. Dazu werden die Strukturen mit dem gleichen ersten Segment zunächst zu Gruppen zusammengefasst. Von jeder Struktur innerhalb einer Gruppe wird dann die Länge und Endhöhe bestimmt. Bei Strukturen, die bei anderen Höhenkurven enden, ist die Endhöhe gleich dieser der Höhenkurve und die Länge entspricht der Summe der Längen der einzelnen Segmente plus dem Abstand zur nächsten Höhenkurve in Verlängerung des letzten Segments zur nächsten Kurve (Abbildung 11, dicke ausgezogene schwarze Linien).

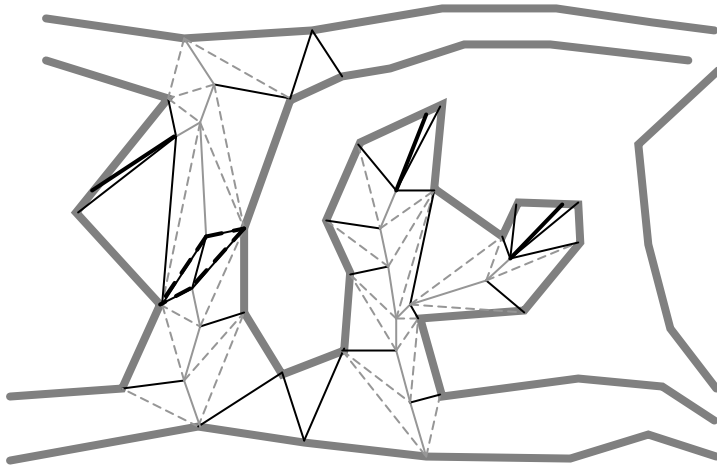


Abbildung 11 Grüne Hilfsflächen bei Tälern / Kloten und Pässen

Bei Passstrukturen wird als Endhöhe die der benachbarten Kurve angenommen. Die Länge einer Struktur ist die Summe der Länge ihrer Segmente plus der Hälfte der Summe der Distanzen vom Endpunkt der Struktur zu den Endpunkten der zuletzt fixierten Linien (Abbildung 11, gestrichelte schwarze Linien).

Innerhalb einer Gruppe werden zuerst die Höhen der Struktur mit der kleinsten absoluten Steigung zugewiesen. Anschliessend werden die geänderten Steigungen der übrigen Strukturen neu berechnet. Danach werden wiederum die Höhen linear entlang der Struktur mit der kleinsten absoluten Steigung interpoliert. So wird fortgefahren, bis innerhalb einer Gruppe alle Höhen bestimmt sind.

3.2.2.3 Hügel und Senken

Flache Dreiecke gibt es ausser in Tälern und auf Kloten auch auf Hügeln und Senken. Nach den obigen Schritten 1.-9. können diese allerdings nicht aufgelöst werden, da die erforderliche Start-situation nicht auftritt. Das Problem kann gelöst werden, indem auf Hügeln und Senken möglichst an den höchsten Punkten ein virtueller Kotenpunkt eingefügt wird. Wenn das geschehen ist, kann anschliessen entsprechend dem Kapitel 3.2.3.2, Modell mit Höhenkurven und Koten, weitergefahren werden.

Topologisch gesehen können Hügel und Senken in zwei Kategorien aufgeteilt werden. Innerhalb der ersten Kategorie existiert mindestens ein Dreieck, vom dem keine Seite mit einer Höhenkurve zusammenfällt. Hügel resp. Senken der zweiten Kategorie haben keine solche Dreiecke.

Wenn zuerst nach obiger Methode alle Täler, Kloten und Pässe aufgelöst wurden, so existieren flache Dreiecke ohne Höhenkurven nur noch auf Hügeln resp. in Senken der Kategorie 1. In den Schwerpunkten all dieser Dreiecke wird nun ein virtueller Kotenpunkt gesetzt. Damit kann die erste Kategorie anhand dem Kapitel 3.2.3.2 aufgelöst werden.

Danach gibt es flache Dreiecke nur noch bei Hügeln und Senken der zweiten Kategorie. Flache Dreiecke werden dann zu zusammenhängenden Flächen gruppiert. Innerhalb jeder Gruppe wird das längste Segment bestimmt, das mit keiner Höhenkurve zusammenfällt. In der Mitte dieser Linie wird wiederum eine virtuelle Kote eingefügt und nach Kapitel 3.2.3.2 weitergefahren.

Dadurch sind im TIN-Modell keine flachen Dreiecke mehr vorhanden.

Es ist keine explizite Information vorhanden, wie viel höher als die letzte Höhenkurve ein Hügel tatsächlich ist. Es könnte versucht werden, aus der umliegenden Geländestruktur eine Höhe zu interpolieren. Der verwendete pragmatische Ansatz besteht darin, dass die Höhendifferenz der eingefügten Kote zur dazugehörigen Höhenkurve für die 1. Kategorie $\frac{1}{3}$ der Äquidistanz, für die 2. Kategorie $\frac{1}{4}$ der Äquidistanz beträgt.

3.2.3 Modell mit Höhenkurven und Koten

Als nächstes soll das Vorgehen diskutiert werden, falls neben Höhenkurven noch Koten im Modell vorhanden sind. Dabei soll zunächst angenommen werden, dass die Höhe einer Kote, die zwischen zwei Höhenkurven liegt, im entsprechenden Höhenintervall liegt.

3.2.3.1 Koten in Tälern und auf Kreden

Zunächst werden auch hier die Gerippelinien anhand den Schritten 1.-9. konstruiert. Wird eine Linie wegen einer Kote nicht weitergeführt (Abbildung 12), so wird die Linie mit einer Endhöhe gleich der Kote abgeschlossen. Die Länge der Struktur wird als die Summe der Länge der Segmente plus die Distanz vom Linienende bis zur Kote berechnet. Eine neue Gerippelinie wird dann am Kotenpunkt gestartet, falls der Kotenpunkt in einem Dreieck der Art B liegt.

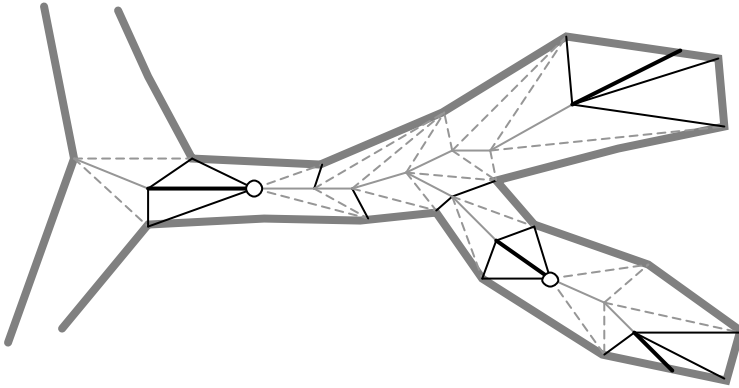


Abbildung 12 Gerippelinien mit Koten

Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis keine Dreiecke B mehr in Tälern und auf Kreden vorhanden sind. Eine Ausnahme bilden Täler resp. Kreden mit starken Verengungen und Ausbuchtungen. Falls in einer solchen Ausbuchtung ein Kotenpunkt liegt, so wird diese Ausbuchtung gleich behandelt wie ein Hügel mit Kote (siehe Kapitel 3.2.3.2). Andernfalls werden die kritischen Dreiecke aufgelöst, wenn der Verengungsfaktor f zurück auf 0 gesetzt wird.

3.2.3.2 Koten auf Hügeln und in Senken

Hier ist einzig der 1. Schritt des Vorgehens leicht abgeändert. Anstatt dass der Punkt P auf einer Höhenkurve mit unterschiedlicher Höhe zu liegen braucht, ist P ein Kotenpunkt. Das restliche Vorgehen bleibt gleich.

3.2.4 Unterbrochene Höhenkurven, Zwischenkurven, Koten und Punkte im "falschen" Höhenintervall

In Situationen mit vollständigen Höhenkurven und Koten im richtigen Höhenintervall sind nach einer Dreieckstriangulation nur horizontale Dreiecke topologisch nicht korrekt, abgesehen von einigen Effekten, die an Rändern entstehen können. Mit den Vorgehen wie sie in den Kapiteln 3.2.2 und 3.2.3 beschrieben sind, können alle diese Artefakte vollständig zum Verschwinden gebracht werden.

Oft kommt es allerdings vor, dass zur besseren Geländedarstellung in Gebieten mit unregelmässiger Topografie unvollständige Zwischenkurven verwendet werden, oder dass in felsigen Gebieten Höhenkurven aus kartografischen Gründen weggelassen werden. Kleinere Hügel, die grafisch mit einer Höhenkurve nicht darstellbar sind, werden zum Teil nur mit einem Kotenpunkt bezeichnet. All das kann im reinen TIN-Modell zu weiteren topologischen Artefakten führen, auf die hier näher eingegangen werden soll.

Die beschriebenen Artefakte sind dadurch gekennzeichnet, dass das TIN-Modell auf beiden Seiten einer Höhenkurven oder eines Teils davon je steigt resp. fällt (Abbildung 13). Die Artefakte können wieder zu Gebieten zusammengefasst werden, in denen eine lineare Interpolation innerhalb des TIN-Modells zu topografisch-hydrologisch falschen Ergebnissen führt. Bei solchen Situationen muss zunächst entschieden werden, auf welcher Seite der beteiligten Höhenkurven das Gelände nun tatsächlich fällt respektive steigt.

Im Allgemeinen kann der Fallsinn einer Höhenkurve aus den Höhenunterschieden zu den benachbarten Höhenkurven abgeleitet werden, in Spezialfällen führen genauere Untersuchungen zum gewünschten Ergebnis. Im Basismodell des DHM25 Level2 sind die Höhenkurven so orientiert, dass links der Digitalisierungsrichtung das Gelände steigt, rechts davon fällt.

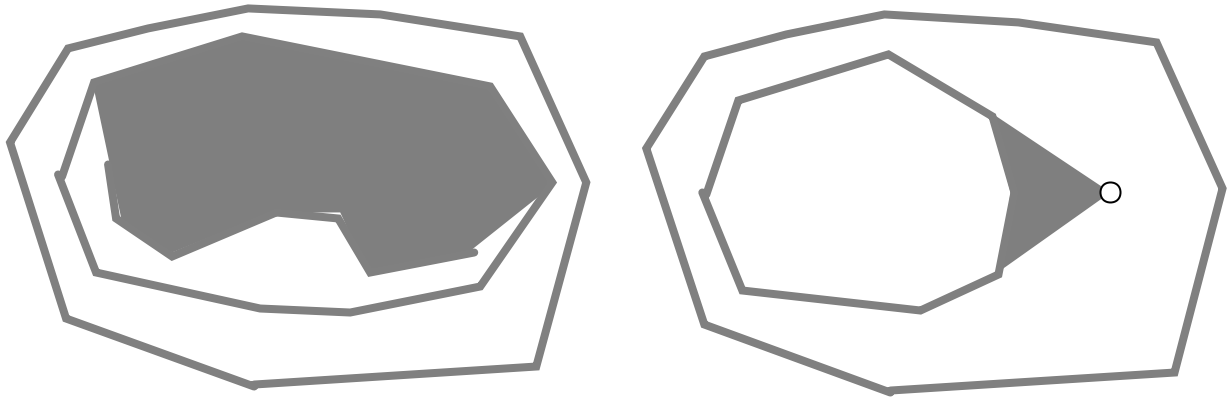


Abbildung 13 Artefakt durch unvollständige Höhenkurve resp. Kotenpunkt als kleine Kuppe

Diese Artefakte werden mit einem Zwischenschritt so vorbereitet, dass sie in einem zweiten Schritt analog Kapitel 3.2.2 bearbeitet werden können: Es werden zusätzliche Zwischenkurven interpoliert, die auf der gleichen Höhe liegen wie Kurve, wo der Fehler auftritt.

Um die Artefakte zu beheben, wird an den kritischen Stellen der Geländeverlauf wenn möglich linear aus benachbarten korrekten Regionen extrapoliert. Das Vorgehen läuft konkret so ab: Zuerst wird ein Segment s_k am Rand einer Fläche von Artefakten gesucht. Das Vorzeichen der Steigung dieses Segments s_k , abgeleitet aus den Höhen der beiden Endpunkte, stimmt in einem Endpunkt P_0 , im anderen Endpunkt P_1 stimmt sie nicht. Im korrekten Endpunkt P_0 wird eine Tangentialfläche aus den Steigungen der TIN-Dreiecke auf der gegenüberliegenden Seite der Höhenkurve interpoliert. Dann wird der Punkt P_{m0} gesucht, der auf dieser Tangentialebene in Richtung des Segments s_k auf Höhe des Punktes P_1 befindet. Liegt dieser Punkt P_{m0} näher bei P_1 als bei P_0 oder nicht innerhalb des Segments s_k oder ist die Tangentialebene horizontal oder kann nicht bestimmt werden, so wird P_{m0} in die Mitte zwischen P_0 und P_1 gesetzt (Abbildung 14).

Von diesem Punkt P_{m0} her wird geschaut, ob ein benachbartes Dreieck mit einem kritischen Segment existiert. Falls ja, wird mit diesem Segment gleich vorgegangen wie oben und der neu eingefügte Punkt P_{m1} mit P_{m0} durch eine Zwischenhöhenkurve verbunden. Dieser Schritt wird so lange wiederholt, bis kein kritisches Segment mehr gefunden wird.

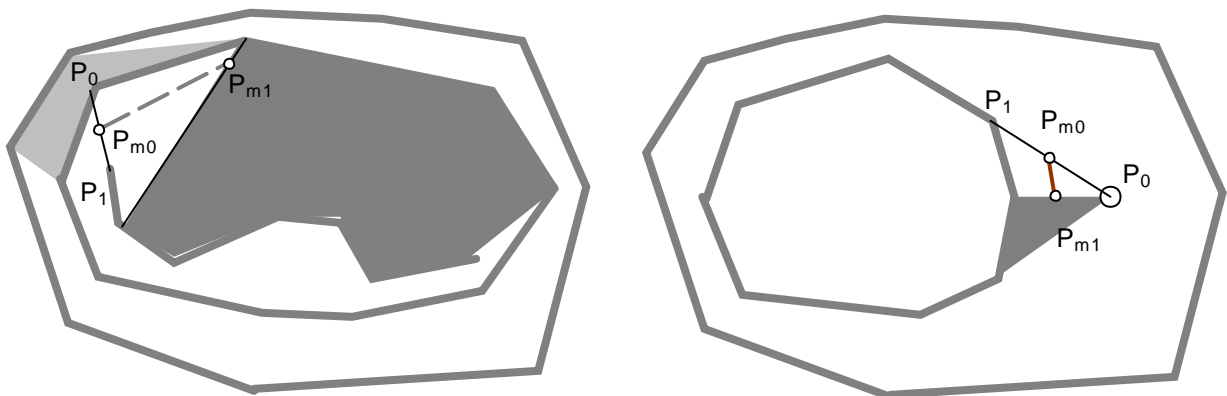


Abbildung 14 Auflösung von Artefakten von einem Rand her. Blau sind die Dreiecke, die für die Interpolation der Tangentialebene in P_0 verwendet werden.

3.2.5 Weitere Höheninformationen

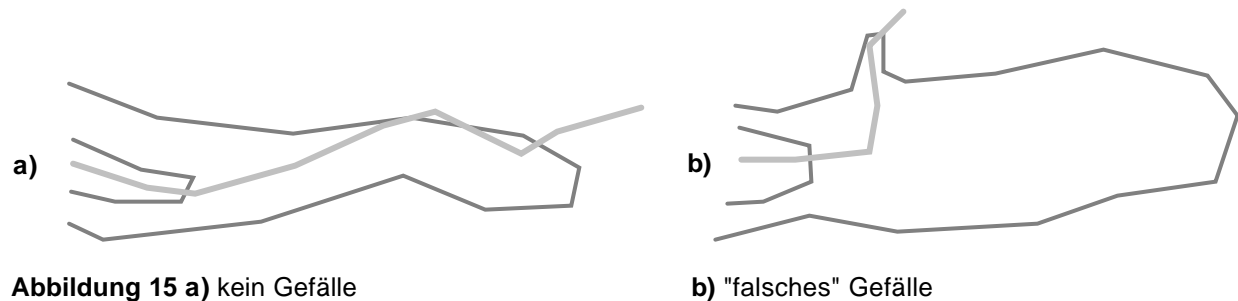
Neben Höhenkurven, Zwischenkurven und Kotenpunkten existieren noch weitere Höheninformationen im DHM25 Basismodell. Dazu gehören die Seekonturen und Bruchkanten. Als Stützinformationen können Gewässerlinien aus VECTOR25 verwendet werden.

3.2.5.1 Vorbereitung von Gewässerlinien

VECTOR25 Daten sind grundsätzlich nur zweidimensional erfasst. Im Allgemeinen bilden Fließgewässer gleichzeitig auch die tiefste Stelle in einem Tal. Dadurch ist eine weitere Information für das Höhenmodell vorhanden, welche verwendet werden soll.

Den Gewässerlinien können Höhen zugeordnet werden, indem zunächst den zweidimensionalen Schnittpunkten der Gewässerlinien mit den Höhenkurven die entsprechenden Höhen zugeordnet werden. Anschliessend werden zwischen benachbarten Schnittpunkt die Höhen der restliche Stützpunkt linear interpoliert. Dabei wird, ähnlich wie bei den Gerippelinien, rekursiv das jeweils kleinste Gefälle der noch nicht interpolierten Teilabschnitte gesucht und verarbeitet.

Da die Höhenkurven des DHM25 und die Fließgewässer von VECTOR25 nicht aufeinander abgestimmt sind, kann es zu steigenden oder flachen Fließgewässern kommen. Solche Abschnitte werden nicht berücksichtigt. Bei unten an solchen Stücken anschliessenden fallenden Gewässer sind die Höhen ebenfalls systematisch verfälscht und werden nicht verwendet (Abbildung 15 a). Weiter können spezielle Verläufe dazu führen, das Gefälle des benachbarten Geländes subjektiv nicht der Wirklichkeit entspricht. Solche Fälle treten vor allem bei Bächen auf (Abbildung 15 b). Da zudem häufig keine wesentliche zusätzliche Höheninformation aus Bächen gewonnen wird, wird das Bachnetz nicht in das Höhenmodell integriert. Von den Fließgewässern von VECTOR25 werden deshalb nur korrekt fallende Flussachsen (objectval = ‚Fluss‘) für die Interpolation verwendet.



3.2.5.2 Seekonturen

Mit den Höhenkurven zusammen wurden im Basismodell des DHM25 ebenfalls die Seekonturen erfasst. Die Höhen der Ufer wurden anhand von Knotenpunkten bestimmt. Auf der Seeseite soll die Fläche naturgemäss eben sein. Auf der anderen Seite können die Uferlinien wie Höhenkurven angesehen werden.

Neben den Seekonturen wurden auch die Seebodenkurven in den Seen digitalisiert. Für ein Oberflächenmodell werden diese Informationen nicht benötigt. Für eine Interpolation der Seeböden können sie wie Höhenkurven verwendet werden. Für eine solche Interpolation sind auch die Seekonturen wie normale Höhenkurven anzusehen.

3.2.5.3 Bruchkanten und Gewässerlinien

Alpine Hauptbruchkanten wurden speziell fotogrammetrisch als 3D-Linien erfasst um Verbesserungen in Felsregionen zu erhalten. Um ein konsistentes Modell zu erhalten, wurden die Kurven des DHM25 an die Bruchkanten manuell angepasst.

Weiter oben wurde beschrieben, wie 2D-Gewässerlinien 3-dimensional interpoliert werden können. Diese Linien können in der Dreiecksvermaschung mitverwendet werden.

Mit diesen zusätzlich Linien werden die Anzahl der möglich Artefakte erhöht. Allerdings können alle Fälle analog dem Vorgehen im Kapitel 3.2.2 bereinigt werden, indem der erste Schritt verallgemeinert wird:

Es sollen Dreiecke gesucht werden, die keine Liniensegmente als Ränder aufweisen. Zwei Punkte des Dreiecks müssen dabei zu selben Linientyp gehören (Höhenkurve, Seeufer, Bruchkante, ...) und der dritte zu einem weiteren, eventuell gleichen Typ. Falls die ersten zwei Punkte zu Höhenkurven gehören, müssen zudem die Richtungssinne der Höhenkurven gleich sein und der dritte Punkt entsprechend dieser Richtungssinne höher oder tiefer liegen.

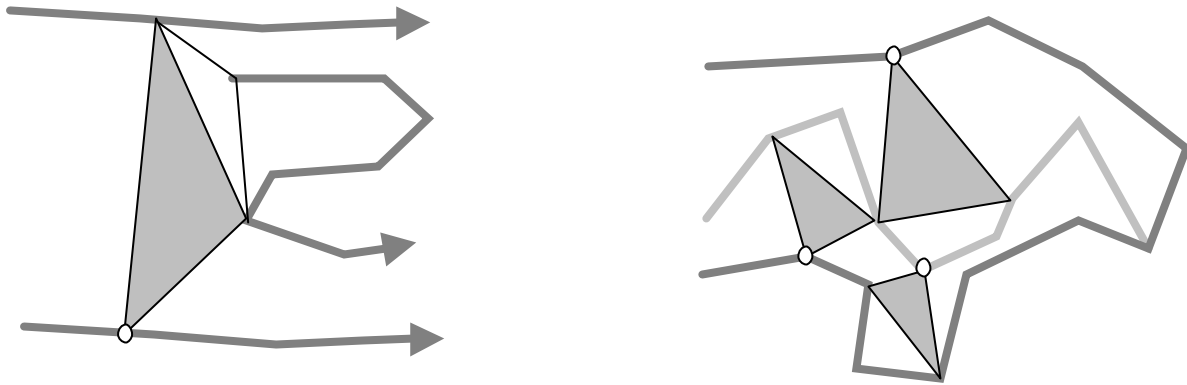


Abbildung 16 Ausgewählte Situationen für Startdreiecke für unvollständige Höhenkurven und Situation mit Gewässer

3.2.6 Zusammenstellung

Das Basismodell des DHM25 hat folgende Merkmale:

- Es besteht aus Höhenkurven inklusive Zwischenkurven, Seekonturen, Höhenkoten und Bruchkanten.
- Höhenkurven sind so erfasst, dass das Gelände links der Digitalisierungsrichtung steigt.
- Höhenkurven sind an die Bruchkanten angepasst.
- Für Interpolationen können automatisch ausgewählte und verarbeitete Gewässerlinien verwendet werden.

Um ein verbessertes TIN-Modell aus dem Basismodell des DHM25 zu erzeugen, werden folgende Schritte mit dem C-Programm mesh_z der Landestopographie (siehe Anhang A) durchgeführt:

1. Triangulieren von Höhenkurven, Zwischenkurven, Höhenkoten, Seekonturen Bruchkanten und ausgewählten Gewässerlinien mit Linien als vorgegebenen Verbindungen
2. Unvollständige Höhenkurvensituationen bereinigen
3. Kreten und Mulden bereinigen

Startpunkt	Nachbarpunkte	Verengungsfaktor
Höhenkurve	Höhenkurve	2.
See	Höhenkurve	2.
Bruchkante / Gewässerlinie	Höhenkurve	2.
Höhenkote	Höhenkurve	2.
Höhenkurve	See	0.
Bruchkante / Gewässerlinie	See	0.
Höhenkote	See	0.
Höhenkurve	Bruchkante / Gewässerlinie	2.
Höhenkote	Bruchkante / Gewässerlinie	2.
Gerippelinie	Höhenkurve	0.

4. Grosse Hügel / Senken bereinigen
5. Kleine Hügel / Senken bereinigen
6. Höhen der Gerippelinien interpolieren

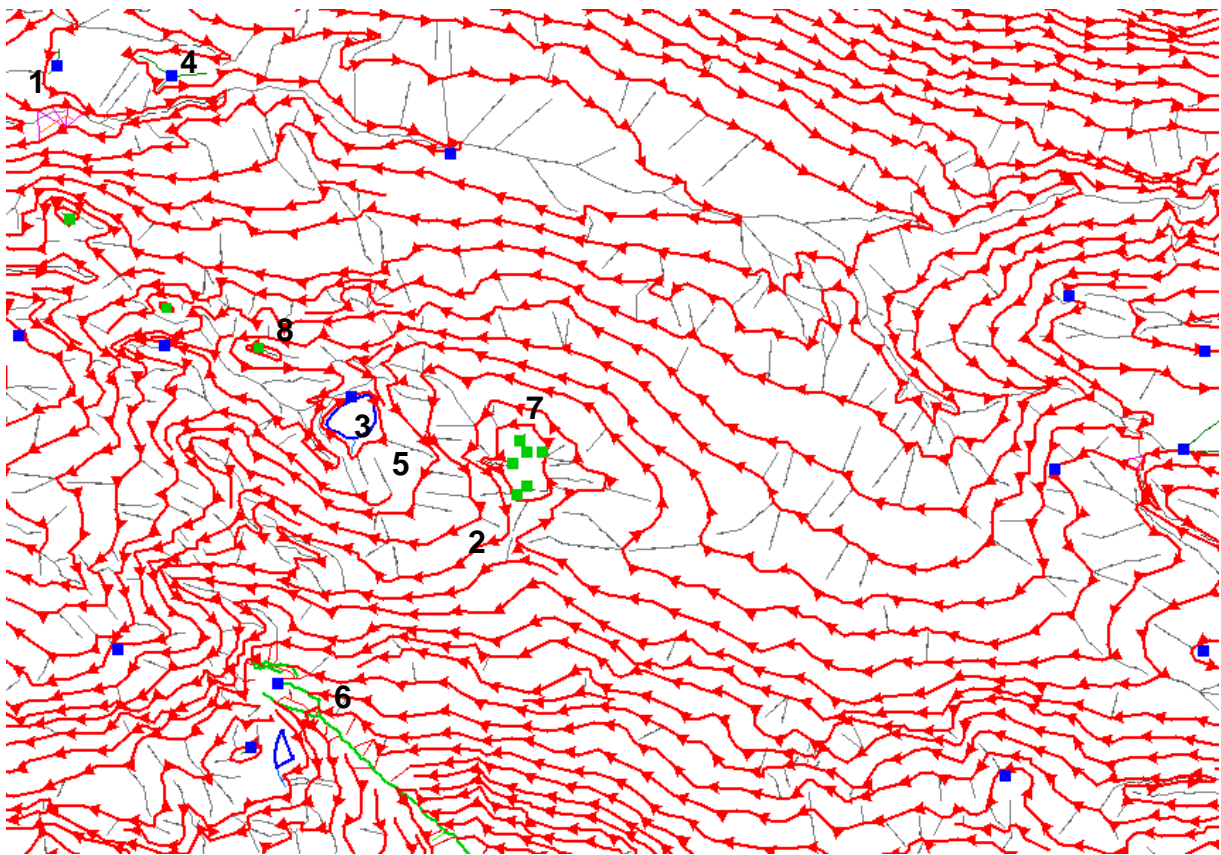


Abbildung 17 Beispiel eines Gebietes mit eingefügten Gerippelinien. Als Input-Daten wurden gerichtete Höhenkurven (Linien mit Pfeilen), Bruchkanten (dicke grüne Linien (bei 6)), Seekonturen (dicke blaue Linien (bei 3)) sowie Höhenkoten (grosse blaue Quadrate) verwendet.

Unvollständige Höhenkurven wurden bei 1 ergänzt (magenta Linien: zunächst topografisch falsche Segmente, helle Linie: hinzugefügte Höhenlinie). Von Höhenkurven gebildete Täler, Kreten und Pässe (bei 2) wurden durch die dünnen Linien bereinigt. Bei 3 wurde ein Tal in der Nähe eines Sees behandelt. 4: flache Dreiecke auf Kreten in der Nähe von Höhenkoten wurden aufgelöst. 5: Behandlung einer Krete in der Nähe eines Endes einer Höhenkurve. 6: Bruchkantenartefakte wurden bereinigt. 7: Hinzufügen von Zusatzpunkten (grosse grüne Quadrate) und Gerippelinien auf einem Hügel der 1. Kategorie. 8: Hinzufügen von Zusatzpunkten (kleine Quadrate) und Gerippelinien auf einem Hügel der 2. Kategorie.

3.3 Höheninterpolation in TIN-Modellen

Mit dem TIN-Modell kann aus einem Basismodell ein Oberflächenmodell erzeugt werden. Von der Theorie her sind die Höhen bis jetzt aber erst an den Stützpunkten und Verbindungslinien wie Höhenkurven und Bruchkanten definiert. Die Bestimmung einer Höhe an irgend einem Punkt soll als nächstes angeschaut werden.

Grundsätzlich wird bei allen folgenden Methoden eine einheitliche Funktion pro Dreieck definiert. Als erster Schritt muss deshalb bestimmt werden, in welchem Dreieck ein zu interpolierender Punkt liegt.

3.3.1 Lineare Interpolation

Bei jedem Dreieck sind die Höhen der drei Eckpunkte bekannt. Damit ist eine Ebene definiert und die Höhe z an jedem Punkt bestimmt :

$$\text{Gleichung 1} \quad z = a_{10} x + a_{01} y + a_{00}$$

Die Vorteile dieser Methode sind, dass sie sehr einfach und schnell ist, und dass bei einer Interpolation eines Punktes, der auf einer Höhenkurve oder ähnlichen Verbindungslinie liegt, die Höhe unverändert bleibt. Als Nachteil ist, dass schon die erste Ableitung nicht stetig ist. Damit führt diese Metho-

de bei Reliefberechnung, wo direkt auf die Neigung des Geländes und damit auf die erste Ableitung zugegriffen wird, oft zu Ergebnissen, in denen die Dreiecksstruktur des TIN-Modells erkennbar ist.

3.3.2 Kubische Interpolationen

Um die Unstetigkeit der ersten Ableitung zu umgehen, kann für die Höhe z eine Funktion höheren Grades zur Interpolation eingeführt werden.

Um genauer abschätzen zu können, wie viele Parameter pro Teilfunktion für die Interpolation des Höhenmodells notwendig sind, ist es nützlich folgende TIN Eigenschaften zu kennen:

Gleichung 2 $t \sim 2 \cdot p$ $l \sim 3 \cdot p$

- Mit: p : Anzahl Punkte
 t : Anzahl Dreiecke
 l : Anzahl Verbindungsstücke

Aus der vorgegebenen Höhe in den Stützpunkten ergeben sich pro Dreieck 3 Gleichungen, insgesamt $3 \cdot t$ Gleichungen. Wird als Bedingung noch eingeführt, dass jedem Stützpunkt die Ableitung sowohl in x - als auch in y -Richtung stetig ist, so ergeben sich nochmals $2 \cdot 3 \cdot t - 2 \cdot p \sim 5 \cdot t$ Gleichungen (Ableitung im einem Dreieck = Ableitung benachbartes Dreieck, pro Punkt ist eine Nachbarschaftsbeziehung redundant,). Das heisst, pro Dreieck muss eine Funktion mit mindestens 8 Parametern zur Verfügung stehen.

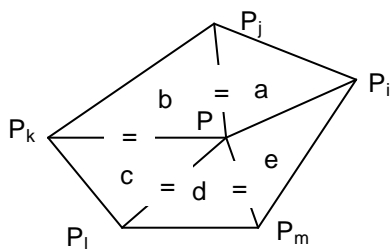


Abbildung 18 Bedingung: Gleiche Ableitungen in x - und y -Richtung in P : Aus $f_a(P) = f_b(P)$ und $f_b(P) = f_c(P)$ und $f_c(P) = f_d(P)$ und $f_d(P) = f_e(P)$ folgt $f_e(P) = f_a(P)$; mit f = Ableitung nach x - resp. y -Richtung.

Damit das Modell nicht über den gesamten Perimeter angeschaut werden muss, werden oft zusätzlich die Neigungen in den Stützpunkten vorgegeben. Das ist eine weitere Modellannahme. Zu vernünftigen Neigungen gelangt man, wenn man die Vektorprodukte der einzelnen Dreiecke, die in einem Punkt zusammenkommen, zusammenzählt.

Gleichung 3 $\vec{n}(\vec{P}) = \sum (\vec{P}_{i+1} - \vec{P}) \times (\vec{P}_i - \vec{P})$

Wird die Ableitung in den Stützpunkten so vorgegeben, so werden pro Dreieck mindestens 9 Parameter benötigt.

Mit der Vorgabe der konstanten Ableitungen in den Stützpunkt ist die Funktion aber nicht unbedingt in allen Punkten stetig und noch weniger ist das die erste Ableitung stetig.

Bei einem biquadratischen Polynom ($z = a_{20} x^2 + a_{11} xy + a_{02} y^2 + a_{10} x + a_{01} y + a_{00}$) gibt es 6 Parameter, bei einem bikubischen Polynom ($z = a_{30} x^3 + a_{21} x^2 y + a_{12} xy^2 + a_{03} y^3 + a_{20} x^2 + a_{11} xy + a_{02} y^2 + a_{10} x + a_{01} y + a_{00}$) sind es 10. Deshalb muss für eine je stetige Funktion und Ableitung mindestens ein bikubisches Polynom verwendet werden. Wenn ein kubisches Polynom verwendet wird, ist zudem gleichzeitig gegeben, dass bei der Höhenfunktion an den Rändern keine Sprünge auftreten, da die Funktion entlang den Dreiecksgrenzen gleich sein müssen: Es sind kubische Funktionen, wo am Start und am Ende je Wert und 1. Ableitung gegeben sind. Dadurch ist die Funktion eindeutig bestimmt.

Allerdings ist die 1. Ableitung nur innerhalb der Flächen und den Stützpunkten stetig. Auf den Dreiecksgrenzen kann sie weiterhin Sprünge aufweisen. Die Ableitung dort auch noch stetig zu machen gelingt, indem man jedes Dreieck in drei Teildreiecke aufteilt. Dann können zusätzliche Bedingungen so gestellt werden, dass sowohl Funktion als auch die erste Ableitung über das gesamte Gebiet stetig

ist. Allerdings ergeben sich dann 30 Parameter pro Dreieck, die bestimmt werden müssen. Damit wird die Berechnung sehr aufwendig im Gegensatz zur linearen Interpolation, wo pro Dreieck nur 3 Parameter bestimmt werden müssen.

Ein weiterer Nachteil der kubischen Interpolation besteht darin, dass die Höhen auf den Dreiecksrändern nicht linear verlaufen. Im Ausgangsmodell mit Höhenkurven und weiteren vorgegebenen Linien ist aber genau das eine wesentliche Aussage.

Aus diesen Gründen wurde zur Interpolation von DHM25 Level2 Matrixmodell die lineare Interpolation vorgezogen. Um den Ansprüchen von Schräglightschattierungen und Reliefs gerecht zu werden, können andere Ansätze zum Ziel führen.

3.3.3 Pseudoquadratische Interpolation zur Bestimmung von Neigung

Damit die erste Ableitung stetig ist, muss die Ausgangsfunktion nicht unbedingt stetig sein. Genau das ist der Idee, die zur Berechnung von Neigung und Exposition verwendet werden. Mit der Methode von Gleichung 3 kann die Neigung in den Stützpunkten berechnet werden. Anschliessend können diese Neigungen innerhalb der Dreiecke interpoliert werden. Das ist gleichzusetzen mit einer linearen Interpolation der ersten Ableitung. Wenn diese Ableitung integriert wird, ergibt sich eine quadratische Funktion. Allerdings geht diese Funktion nicht durch die Stützpunkte.

3.4 Matrixmodell von DHM25 Level 2

Wird in regelmässigen Abständen sowohl in x- als auch in y-Richtung Höhen interpoliert, so erhält man ein Matrixmodell. Wegen der einfachen Struktur können viele Berechnungen in diesem Modell schnell und effizient durchgeführt werden. Das Matrixmodell von DHM25 Level 2 wurde über den gesamten Perimeter des Basismodells in einer Maschenweite von 25 m berechnet. Dabei wurde die lineare Interpolationsmethode im nach Kapitel 3.2 erstellten TIN verwendet.

4 Vergleich von DHM25 Level 2 mit anderen Höhenmodellen

4.1 Vergleich Basismodelle DHM25 Level 1 und Level 2

Grundsätzlich wurden für das DHM25 Level 1 und Level 2 das gleiche Basismodell verwendet. Einige qualitative Verbesserungen konnten erreicht werden:

- Durch das Einführen von fotogrammetrisch erfassten alpinen Hauptbruchkanten gibt es in diesen Regionen bedeutende Genauigkeitssteigerungen.
- Die Höhenkurven sind an die Bruchkanten angepasst.
- Im DHM25 Level 1 waren an den nördlichen und westlichen Blatträndern Lücken von rund 1.5 Metern vorhanden. Diese Lücken wurden geschlossen.
- Kleinere Unterbrüche von Höhenkurven wurden für den Level 2 zum Teil beseitigt.
- Die Höhenkurven wurden so gerichtet, dass links der Digitalisierungsrichtung das Gelände steigt.

Weitere Qualitätsmerkmale von DHM25 Level 1 wurden beibehalten:

- Innerhalb der Schweiz weisen die 100m-Höhenkurven keine Lücken auf.
- Das Höhenkurvenmodell wurde auf Schnittpunkte untersucht und wo nötig bereinigt. Zwischen Höhenkurven, Seeufnern und Seebodenkurven gibt es je unter sich und gegeneinander keine Überschneidungen.

Zusätzlich ist noch zu bemerken, dass die Höhenkurven in den Gletscherregionen auf den neuesten Stand der Landeskarten 1:25'000 gebracht wurden. Dabei entstanden zum Teil massive Änderungen an der Geometrie.

4.2 Vergleich der Matrixmodelle DHM25 Level 1 und Level 2

Ein Vergleich quantitativer Vergleich der Matrixmodelle von DHM25 Level1 und Level2 ist nicht angebracht, da die beiden Modelle auf der gleichen Grundlage basieren und dementsprechend ungefähr

gleich genau sein müssen. Qualitative Unterschiede, die von den unterschiedlichen Interpolationsmethoden her rühren, lassen sich allerdings feststellen. Die Methode zur Berechnung des Matrixmodells von Level1 beruhte auf einer Interpolation der Höhen entlang 8 verschiedener Richtungen und einer anschliessenden gewichteten Mittelung dieser Werte. Für das Matrixmodell wurde die richtungsunabhängigen Ansätze von Kapitel 1 verwendet.

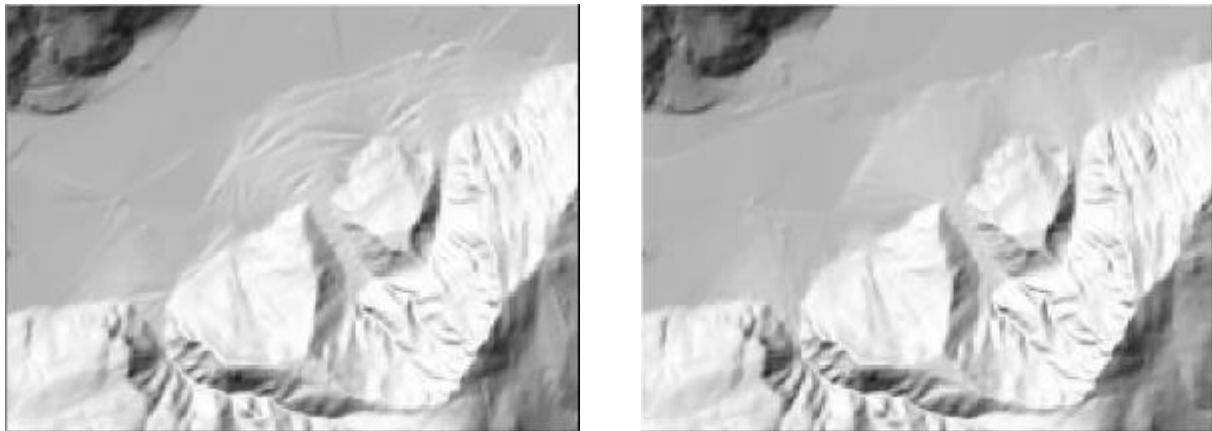


Abbildung 19 Vergleich einer Schräglightschattierung von DHM25 Level1 (links) und Level2 (rechts) im Churer Rheintal.

Anhand von Schräglightschattierungen (Abbildung 19) ist leicht ersichtlich, dass bei gewissen Höhenkurvenkonstellationen im Matrixmodell von DHM25 Level 1 unnatürliche Stufen vorkommen. Die Richtungen dieser Stufen entsprechen genau denjenigen, entlang welcher die Höhen interpoliert wurden. Tendenziell kann gesagt werden, dass die Höhen unter Level 1 in Tälern eher zu hoch und auf Kreten eher zu tief berechnet wurden. Solche Artefakte sind im Matrixmodell von DHM25 Level 2 nicht mehr erkennbar. Als weitere Zusatzinformation wurden für die Interpolation noch die Flussachsen aus VECTOR25 beigezogen, die als negative Bruchkanten die tiefsten Stellen in den Tälern markieren. Dadurch können hydrologisch zuverlässigere Modelle erwartet werden.

4.3 Vergleich zwischen Basismodell und Matrixmodell von DHM25 Level 2

Werden Höhen direkt aus dem TIN-Oberflächenmodell, das ohne Generalisierung aus dem Basismodell abgeleitet wurde, interpoliert, ist anzunehmen, dass diese genauer sind als Höhen, die aus dem abgeleiteten Matrixmodell nochmals interpoliert werden. Um eine Abschätzung des Genauigkeitsverlustes bei der Erzeugung des Matrixmodells zu erhalten wurden die Differenzen der Höhenkoten des Basismodells mit den Höhen interpoliert aus dem Matrixmodell verglichen. Es kann noch darauf hingewiesen werden, dass die Höhenkoten im TIN-Oberflächenmodell exakt abgebildet werden. Die ermittelten Genauigkeitsverluste, die an den Triangulationspunkten des Basismodells bei einer bilinearen Interpolation im Matrixmodell gegenüber dem Basismodell entstehen, sind in Tabelle 1 zusammengefasst (Abbildung 20 und Abbildung 21).

Geländetyp	Mittelwert DHM25 Level 2 Matrixmodell - Triang.punkte	Standardabweichung DHM25 Level 2 Matrixmodell - Basismodell
Mittelland	0 bis -1 m	1 bis 2 m
Jura	0 bis -1 m	1 bis 3 m
Voralpen	-1 bis -2 m	2 bis 4 m
Alpen	-1 bis -3 m	3 bis 6 m

Tabelle 1 Genauigkeitsverlust durch Matrixinterpolation gegenüber TIN-Oberflächenmodell

Es fällt auf, dass bei den Höhenkoten das DHM25 Matrixmodell im Mittel tiefer liegt als die gemessenen Höhenkoten. Daraus auf eine generelle systematische Verfälschung bei der Interpolation zu schliessen ist aber nicht zulässig, da viele Höhenkoten an exponierten Stellen liegen wie auf Bergspitzen liegen. Die Feststellung ist mehr so, dass im Matrixmodell die Extrempunkte (Maxima und Minima) nicht mehr so klar modelliert sind.

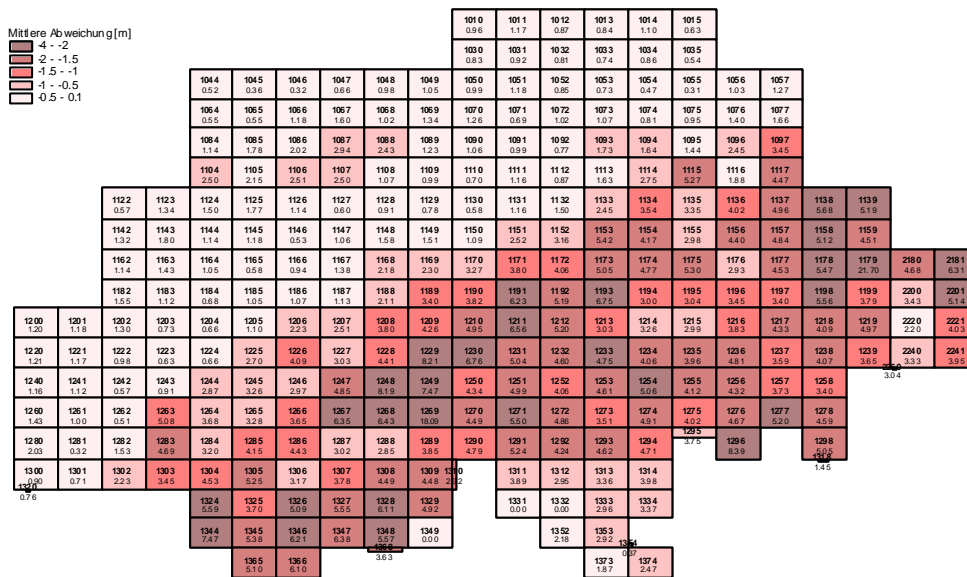
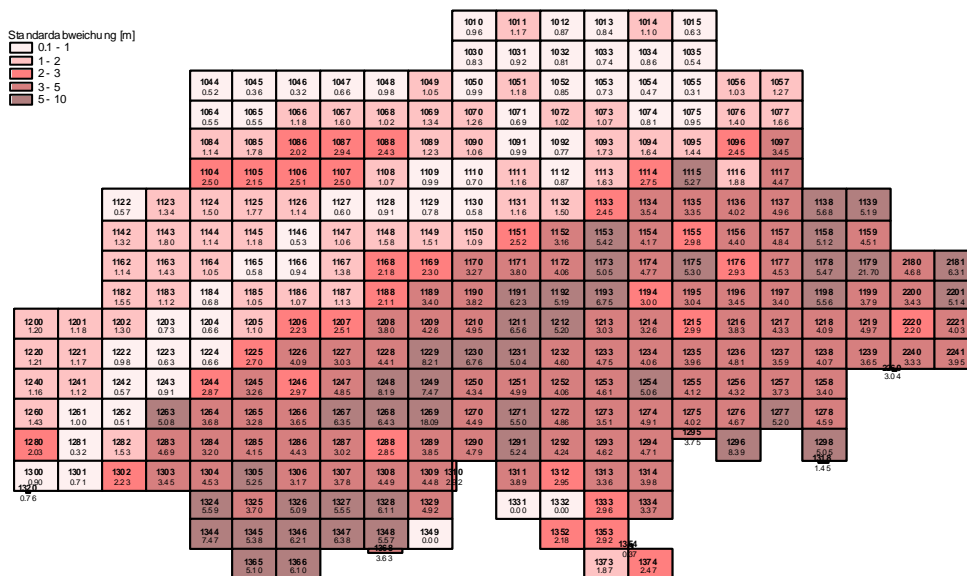


Abbildung 20 Mittlere Abweichung zwischen den Höhenkoten des Basismodells und den an den entsprechenden Stellen interpolierten Höhen des Matrixmodells.



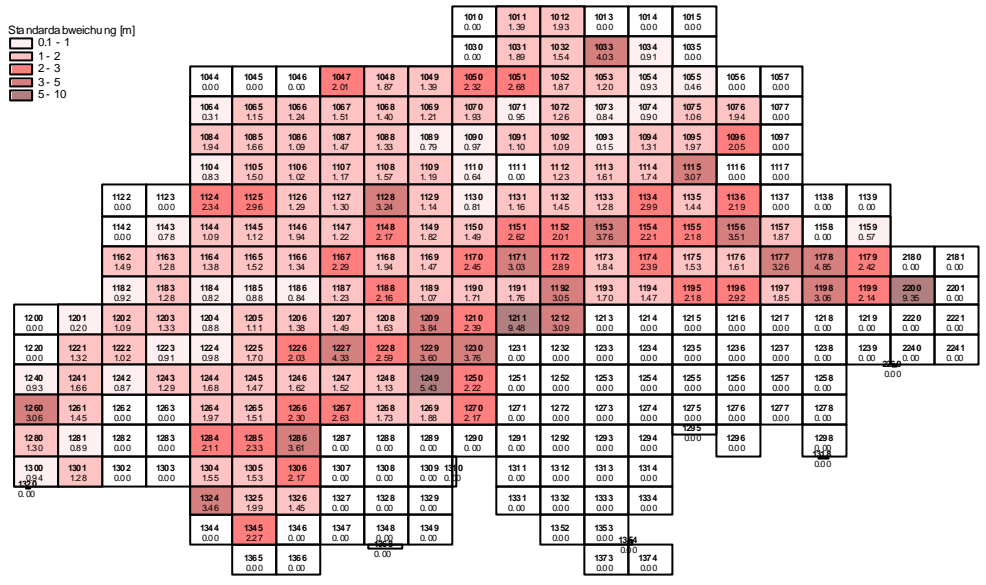


Abbildung 22 Standardabweichung zwischen TIN-Oberflächenmodell mit linearer Interpolation und fotogrammetrischen Passpunkten (weiss: fehlende Passpunkte)

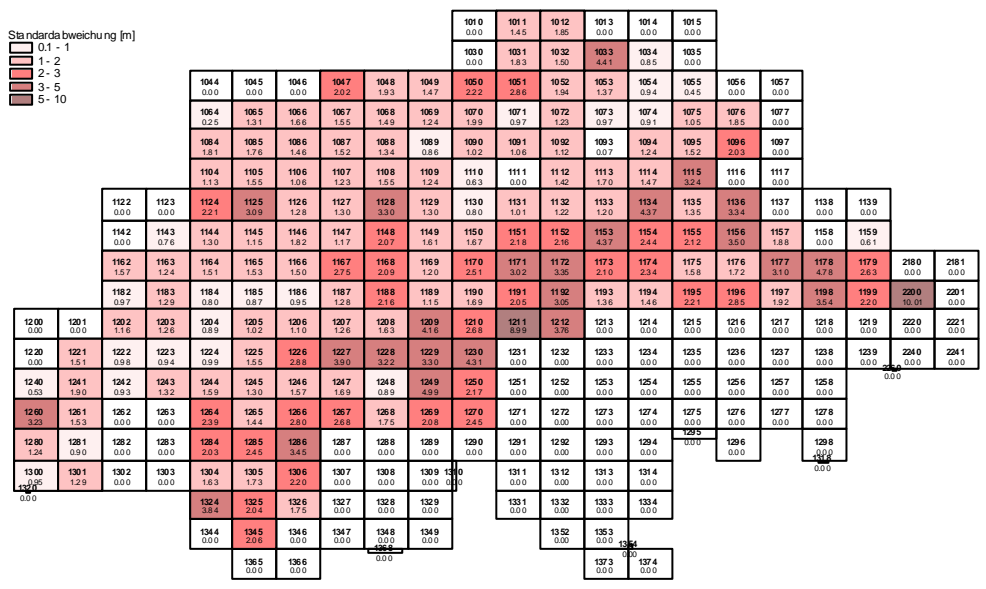


Abbildung 23 Standardabweichung zwischen Matrixmodell mit bilinearer Interpolation und fotogrammetrischen Passpunkten (weiss: fehlende Passpunkte)

4.4 Vergleich mit fotogrammetrischen Passpunkten

Für die Nachführung der Landeskarten sind pro Kartenblatt einige hundert Punkte fotogrammetrisch eingemessen worden. Diese Punkte liegen bei fotogrammetrisch markanten Punkten und können sich irgendwo im Gelände befinden. Triangulationspunkte werden häufig verwendet, aber auch Masten, Strassenkreuzungen, Felsvorsprünge, Diese Punkte können für einen Qualitätsvergleich des DHM25 Level 2 gebraucht werden, da die Messungen grösstenteils unabhängig von den Elementen des Basismodells erfasst wurden. Um weitere Abhängigkeiten zu vermeiden, muss vermieden werden, dass Passpunkte, die ebenfalls als Knotenpunkte im Basismodell vorhanden sind, für einen Vergleich genommen werden. Deshalb wurden Passpunkte, die näher als 50 m an einem Knotenpunkt liegen, nicht verwendet.

Grosse Probleme für einen Vergleich bildeten die Hochpunkte auf Masten, Kirchtürmen, ... unter den Passpunkten. Diese sind in den Datensätzen nicht zuverlässig erkennbar, liegen aber nicht auf der Geländeoberfläche. Der Aufwand, diese Punkte manuell herauszufiltern, wurde nicht durchgeführt. Es wurde dafür die Annahme getroffen, dass die Differenzen zwischen den Höhen der Passpunkte auf dem Gelände und den Höhen interpoliert aus dem DHM25 normalverteilt und im Mittel gleich 0 sind. Dadurch wird es zulässig, dass für eine statistische Auswertung nur Punkte verwendet werden, wo die Höhe des DHM25 höher ist als die des fotogrammetrischen Passpunktes. Werden die fotogrammetrischen Passpunkte als fehlerfrei gegenüber dem Gelände betrachtet, so ergibt sich eine Abschätzung für die Genauigkeit des DHM25. Die erhaltenen Werte sind in Tabelle 2 aufgelistet und in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt.

Geländetyp	DHM25 Level 2 Basismodell lineare Interpolation	DHM25 Level 2 Matrixmodell bilineare Interpolation
Mittelland	1 - 2 m	1 - 2 m
Jura	1 - 3 m	1 - 3 m
Voralpen	2 - 3 m	2 - 3 m
Alpen	2 - 4 m	2 - 4 m

Tabelle 2 Richtwerte für die mittlere Genauigkeit des DHM25 Level 2 gegenüber den fotogrammetrischen Passpunkten der Landeskarten.

Literaturverzeichnis

- [1] Blaser, Andreas (1996): Neue Methoden zur Berechnung von Digitalen Höhenmodellen & Programmbeschreibung *dhm_int*, 232 S., unveröffentlichtes Manuskript für die Schriftenreihe "Berichte des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie" der ETHZ.
- [2] Brändli, Martin (1992): A Triangulation-Based Method for Geomorphological Surface Interpolation from Contour Lines. Proceedings EGIS '92, Munich, Germany, 1992, pp. 691-700.
- [3] Brändli, Martin (1991): Oberflächeninterpolation aus Höhenkurven. Masters Thesis, Geoprocessing Series Vol. 11, Department of Geography, University of Zurich, 1991 (in German).
- [4] Dufour, Dominique (1987): CONGRID Benutzeranleitung. In: Bulletin des Rechenzentrums des Bundesamtes für Landestopographie, Nr.13, Januar 1988, S. 14-24.
- [5] Dufour, Dominique und Eidenbenz, Christoph (1988): Das digitale Höhenmodell der Landestopographie. In: Bulletin des Rechenzentrums des Bundesamtes für Landestopographie, Nr.13, Januar 1988, S. 1-13.
- [6] Heitzinger, David (2000): Knowledge-Based 3D Surface Reconstruction. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B3/1, Amsterdam 2000, pp. 381 - 388.
- [7] Heitzinger, David (2000): Wissensbasierte 3D-Oberflächenrekonstruktion (Dissertation). Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation (VGI), 88. Jahrgang, Heft 3/2000, 176-177.
- [8] Rickenbacher, Martin (1992): Das digitale Höhenmodell DHM25 und seine möglichen Anwendungen in der amtlichen Vermessung. In: VPK 90, 12 (1992) S. 735-737.
- [9] Rickenbacher, Martin (1992): Die DHM-Factory oder wie DIKART aus Landeskarten Spaghettidaten fabriziert! In: Topo [71] (1992) S. 11-14.
- [10] VECTOR25 - Das digitale Landschaftsmodell der Schweiz (Produktinformation). Bundesamt für Landestopographie, 2000.
- [11] DHM25 - Das digitale Höhenmodell des Bundesamtes für Landestopographie (Produktinformation für den Level 2). Bundesamt für Landestopographie, 2001.

Programm mesh_z

mesh_z ist ein C-Programm, das zur Erstellung von 3D-TIN-Modellen nach Delauny geschrieben worden ist. Es ist aus verschiedenen Programmteilen aufgebaut; die wesentlichen sind hier aufgeführt:

- mesh.c : Routinen zur Erzeugung von 2D-TIN-Modellen nach Delauny
- mesh_seg.c : Routinen zur Erzeugung von constrained TINs (Vorgegebene Verbindungen)
- mesh_z.c : Routinen zum Einfügen von Zusatzstrukturen und Gerippelinien bei 3D-Modellen aus Höhenkurven und anderen Informationen
- mesh_int.c : Routinen zur 3D-Interpolation
- mesh_z_io.c : Hauptprogramm mit User-Interface (Keyboard)
- tree2.c : Routinen zum Aufbau und Verwaltung eines räumlich Quad-Tree Indexes. Ein räumlicher Index kann die Geschwindigkeit zur Berechnung von TIN markant steigern.

Vektordaten des Basismodells können im ArcView-Shape-Format oder im Topvec3-Format eingelesen werden. Programmintern werden die Vektordaten im Topvec3-Format verwaltet, die TIN-Daten in einer geeigneten Struktur.

Syntax :

```
mesh_z [input-File]
```

Ohne input-File wird beim Programmstart das interaktive User-Interface geöffnet. Wird ein Input-File angegeben, werden die Befehle aus dem Input-File ausgeführt und danach das Programm ohne interaktiven Teil beendet.

Dialog :

input [-l *ltype*] dataset

Einlesen der Datensätze. Datensätze können Punkte und/oder Linien enthalten und können im ArcView-Shape-Format (PointZ, LineZ) oder Topvec3-Format vorliegen. Für Liniendaten kann noch ein Typ angegeben werden, wie die Linien zu betrachten sind (-l *ltype*) (Siehe unter Linien-Typen). Getestet für **input** wurden nur die Typen **form**, **lake** und **break**, andere Typen führen wahrscheinlich zu Programmabstürzen, wenn nach dem Befehl **mesh** noch Änderungen am TIN vorgenommen werden.

fuzzy value

Bis zu einer Distanz von value sollen Punkte als identisch angenommen werden.

mesh

Erstellt ein TIN aus den mit **input** eingelesenen Datensätzen. Wurde ein TIN erstellt, können keine weiteren externen Datensätze mehr hinzugefügt werden.

Vor den folgenden Befehle muss schon ein TIN erstellt worden, d.h **mesh** schon ausgeführt worden sein.

borderclean angle {**single** | **repeated** }

Eliminiert am Rande des triangulierten Gebietes Dreiecke, deren grösster Winkel weniger als angle von einem 180° Winkel abweicht. angle wird in Grad eingegeben. **single** (Default-Einstellung) bewirkt, dass nur einmal alle Randdreiecke geprüft und eventuell elimiert werden. **repeated** bewirkt, dass wiederholt alle, auch im Verlaufe dieses Prozesses entstandene, Randdreiecke geprüft und eventuell eliminiert werden.

direction

Versucht programmintern alle Linien so zu richten, das links der Richtung das Gelände steigt und rechts fällt. Die Richtung der Linie wird bei Höhenkurven in anderen Schritten verwendet (formtest, complete, enhance).

formtest

Überprüft alle Segmente des TINs auf ihre topografische Korrektheit. Segmente, die von Anfangs- und Endpunkt aus anhand der Höhenkurvenrichtung und Höhenwerte je steigen resp. fallen müssten, werden als **error**-Segmente markiert.

complete

Versucht, die Stellen, wo unter **formtest** error-Segmente markiert wurden, durch hinzufügen von Höhenkurvenstücken zu bereinigen (siehe Kapitel 3.2.4, Unterbrochene Höhenkurven, Zwischenkurven, Koten und Punkte im "falschen" Höhenintervall).

enhance { **type** *ptype0 ptype1 [ptype2 ...]* [dh-value] | **factor** value | **largehill** value | **smallhill** value | **height** }

siehe Kapitel 3.2.2, Bereinigen der Artefakte von Höhenkurven

Hinzufügen von Gerippelinien mit gleichzeitigem fixieren von Segmenten. Gerippelinien-Segmente werden als Typ **ridge** eingeführt, fixierte Segement nach **border** umklassiert.

type *ptype0 ptype1 [ptype2 ...]* [dh-value] : Einführen von Gerippelinien und -strukturen. *ptype0* gibt den Typ des Startpunktes (P in Abbildung 5) der Gerippelinie oder -struktur an, *ptype1 [ptype2 ...]* die Liste der möglichen Punkttypen, zu denen die anderen Punkte der Dreiecke B_i gehören müssen, die auf der eingefügten zur Gerippelinie liegen. dh-value gibt an, ob bei Höhenkurven auch Dreiecke der Art B, wo die Höhen der Stützpunkt alle gleich sind, als Startdreiecke verwendet werden dürfen (dh-value = 0, default = 1)

factor value: Gibt den Verengungsfaktor an (siehe Kapitel 3.2.2.1)

largehill value: Setzt Hilfskoten (*ptype* = **point**) auf Hügeln und in Senken der 1. Kategorie (siehe Kapitel 3.2.2.3). value gibt die absolute Höhendifferenz zur zugehörigen Höhenkurve an. Ob es sich um einen Hügel oder eine Senke handelt wird anhand der Richtung der Höhenkurve bestimmt.

smallhill value: Setzt Hilfskoten (*ptype* = **point**) auf Hügeln und in Senken der 2. Kategorie (siehe Kapitel 3.2.2.3). value gibt die absolute Höhendifferenz zur zugehörigen Höhenkurve an. Ob es sich um einen Hügel oder eine Senke handelt wird anhand der Richtung der Höhenkurve bestimmt.

border value: Fügt am Perimeterrand zusätzliche Punkte ein, um Artefakte zu beseitigen.

height: Interpoliert die Höhen der Gerippelinienstrukturen (siehe Kapitel 3.2.2.2)

retriangulate: Setzt den Segmenttyp der Liniensegmente **bord** zurück auf **null**, und versucht, wo möglich diese Liniensegmente des Typs **bord** entsprechend den Delauny-Anforderungen umzulegen.

export [-t *topology*] [-l *ltype*] [-p *ptype*] [-f *format*] dataset

Exportiert Daten.

Wertebereich von *topology* :

point: Punkte

line: Linien. Kann verwendet werden, um mit **direction** gerichtete Linien zu exportieren.

net (default): Einzelne Segmente

ltype siehe Linien-Typen und *ptype* siehe Punkt-Typen. Defaultmässig ist kein Typ definiert.

Wertebereich von *format* :

topvec (default): Topvec3-Format

generate: ArcInfo-Generate-Format

triout [-f {**binar** | **ascii** }] filename

Exportiert das TIN in ein File (proprietäre Strukturen)

-f **binar** (default): Binäres Format

-f **ascii**: ASCII Format

grid {**extent** {x0 y0 x1 y1 | **auto**} | **size** dx }

Setzt die Rastergrösse für Berechnungen in **height** und **shade**.

extent x0 y0 x1 y1 setzt den Bereich fest (links unten, rechts oben)

extent auto setzt den Bereich auf die BoundingBox des TINs

size dx setzt die Maschgrösse auf dx. (Ausgangswert bei Programmstart dx = 1.)

height [-g **gridsize** | -p **point-file**] [-e] [-i *interpolation-method*] [-f *file-format*] **export-file** [dh]

Berechnet Höhen

-g **gridsize** berechnet die Höhen in einem regelmässigen Raster. **gridsize** übersteuert den Maschengrössen-Defaultwert, der mit **grid size** gesetzt werden kann

-p **point-file** berechnet die Höhen an den Punkten, die in **point-file** definiert sind.

Option -g und -p können nicht gleichzeitig angegeben werden. Ist keine der beiden Optionen vorhanden, so wird ein regelmässiges Raster mit Maschengrössen-Defaultwert berechnet.

-e Extrapolation mit der Annahme, dass bei Gebieten, die ausserhalb des TINs liegen, sich ein grosser See befindet, dessen Ufer nicht vollständig in das Modell integriert wurde.

Wertebereich von *interpolation-method*:

linear (default): lineare Interpolation

cubic: Kubische Interpolation, eine Funktion pro Dreieck

adjusted-cubic: Kubische Interpolation, 3 Funktionen pro Dreieck

Wertebereich von *file-format* (nur ohne Option -p)

grid: ArcInfo-Grid

tiff (default): TIFF-Format (256 Graustufenbild)

postscript: Postscript (256 Graustufenbild)

export-file ist der Name des erzeugten Files

dh (default = 1) ist ein Faktor, mit dem die berechneten Höhen multipliziert werden sollen. Bei den Rasterbildformat **tiff** und **postscript** ist er ein Mass, wie breit ein Höhenintervall ist, in dem die Werte zwischen weiss und schwarz wechseln.

shade [-g **gridsize**] [-i *interpolation-method*] [-r *relief-type*] [-f *file-format*] **export-dataset** [x y z] [shadename]

-g **gridsize** berechnet die Höhen in einem regelmässigen Raster. **gridsize** übersteuert den Maschengrössen-Defaultwert, der mit **grid size** gesetzt werden kann

Wertebereich von *interpolation-method*:

linear (default): lineare Interpolation

cubic: Kubische Interpolation, eine Funktion pro Dreieck

adjusted-cubic Kubische Interpolation, 3 Funktionen pro Dreieck

Wertebereich von *relief-type*:

lambert: Berechnet eine Lambert-Schattierung

relief (default): Berechnet eine Schattierung mit abgeschwächten Bodentönen

slope: Berechnet die Steigungen

exposition: Berechnet die Ausrichtungen des Geländes

Wertebereich von *file-format*:

grid: ArcInfo-Grid

tiff (default): TIFF-Format (256 Graustufenbild)

postscript: Postscript (256 Graustufenbild)

export-file ist der Name des erzeugten Files

x y z gibt die Richtung des Beleuchtung an. Default = -1 1 1.414, Nordwestbeleuchtung

shadeset gibt ein File an, in dem lokale Lichtrichtungswechsel definiert sind.

set { **time** { **on** | **off** } | **message** { **status** | **warning** | **error** } { **on** | **off** | filename } }

time on: Nach jedem Befehl wird verbrauchte Zeit angegeben

message { **status** | **warning** | **error** } gibt an wie mit Meldungen umgegangen wird.

on: Output = Default-Output (**status** = stdout, **warning,error** = stderr)

off: Meldungen werden unterdrückt (Default für **status**-Meldungen)

filename: Meldungen werden in das File filename geschrieben

Linien-Typen

form (Default-value): Höhenkurven, die Oberfläche verläuft kontinuierlich

lake: Seeufer, auf der einen Seite dieser Linie ist die Oberfläche eben

break: Bruchkante, Fließgewässer, das Gelände verläuft nicht kontinuierlich und / oder die Linie markiert die höchste Stelle eine Grates oder die tiefste Stelle eines Tales

null: Bei der Triangulierung entstandenes Segment.

error: In **formtest** als topografisch falsch erkannte Segmente.

ridge: Gerippelinie

bord: Fixiertes Segment

Punkt-Typen

point: Einzelpunkt, Höhenkote, der in einem Datensatz eingelesen wurde, oder Hilfhöhenkote

form: Punkt einer form-Linie

end: Punkt am Ende einer form-Linie

lake: Punkt einer lake-Linie

break: Punkt einer break-Linie

ridge: Punkt einer ridge-Linie (ausser Anfangspunkt einer Gerippelinienstruktur)

Beispiel

Es folgt ein Beispiel einer Serie von Befehlen, wie sie verwendet werden, um aus dem Basismodells des DHM25 ein sinnvolles Raster-Höhenmodell erzeugen. Optionale Befehle sind kursiv geschrieben. (Siehe auch Kapitel 3.2.6 und Abbildung 17).

```
import point_data          /* Punktdaten (Triangulationspunkte) importieren
import -l lake lake_data   /* Seeufer importieren
import -l break river_data /* Flussachsen importieren
import -l break break_data /* Bruchkanten importieren
import contour_lines      /* Höhenkurven importieren
mesh                       /* Triangulieren der Daten
```



```

direction                /* nur, falls die Höhenkurven nicht gerichtet importiert wurden !
formtest                 /* Auffinden von topografisch inkonsistenten Stellen
export -l error error_segments /* Exportiert die Segmente an inkonsistenten Stellen
complete                /* Ergänzt bei inkonsistenten Stellen die Höhenkurven
export -l form add_forms /* Exportiert alle Höhenkurvenssegmente inklusive ergänzte
enhance setfactor 2.    /* setzt den Verengungsfaktor
enhance type form form end 1 /* Fügt Gerippelinien in Täler und Kreten ein (Höhenkurven)
enhance type lake form end 1 /* bereinigt Täler in der Nähe von Seen
enhance type break form end 1 /* bereinigt Artefakte in der Nähe von Flüssen und Bruchkanten
enhance type point form end 1 /* bereinigt Artefakte in der Nähe von Triangulationspunkten
enhance type end form end 1 /* bereinigt Artefakte in der Nähe von unvollständigen Höhenkurven
enhance setfactor 0.    /* setzt Verengungsfaktor auf 0. um die Umgebung von Seen zu be-
                        arbeiten
enhance type form lake 1 /* bereinigt Kreten in der Nähe von Seen
enhance type break lake 1 /* bereinigt Situationen mit Seen und Flussachsen / Bruchkanten
enhance type point lake 1 /* bereinigt Situationen mit Seen und Triangulationspunkten
enhance type end lake 1 /* bereinigt Artefakte in der Nähe von unvollständigen Höehnkurven
                        und Seen
enhance setfactor 2.    /* setzt den Verengungsfaktor zur Bereinigung der Umgebung von
                        Bruchkanten und Flussachsen

enhance type form break 1
enhance type point break 1
enhance type end break 1
enhance setfactor 0.    /* setzt den Verengungsfaktor auf 0. um Sacksituationen zu
                        bereinigen

enhance type ridge form end 1
enhance type ridge lake 1
enhance type ridge break 1
enhance largehill 2.    /* fügt auf Hügeln und Senken der 1. Kategorie Punkte ein
enhance type point form end 1 /* bereinigt Artefakte auf Hügeln und Senken der 1. Kategorie
enhance smallhill 1.    /* fügt auf Hügeln und Senken der 1. Kategorie Punkte ein
enhance type point form end 1 /* bereinigt Artefakte auf Hügeln und Senken der 1. Kategorie
export -l ridge raw_ridges /* Exportiert Gerippelinien. Die exportierten z-Werte werden für pro-
                        gramminterne Zwecke benötigt und haben keinen Bezug zur Höhe
enhance height 1.      /* berechnet die Höhenwerte der Gerippelinien
enhance retriangulate  /* Setzt die Liniensegment bord zurück
export -l ridge ridges /* Exportiert Gerippelinien mit interpolierten Höhen
grid extent 742487.5 121987.5 760012.5 134012.5
                        /* Setzt die Rasterausdehnung
height -g 25. -f grid ascii_grid /* berechnet Höhen in einem 25 m Raster und erzeugt ein ArcInfo-
                        ASCII-Grid
quit                    /* beendet das Programm

```

Bugs

Entstehen bei der Triangulierung zu irgend einem Zeitpunkt sehr spitze Dreiecke, kann das zu Programmfehlern und -abstürzen führen. Es wurde versucht, an allen Orten, wo Abstürze vorkommen können, Informationen, wo möglich mit Koordinaten, anzugeben. Mit dem Befehl **mesh** werden die Punkte in der Reihenfolge in das TIN eingeführt, in der in den datasets vorliegen, die unter **input** eingelesen wurden. Spitze Dreiecke können entstehen, wenn die Reihenfolge der Punkte in eine Richtung sortiert sind (z.B. von Norden nach Süden wie bei "gecleanten" ArcInfo-Coverages). Nach Möglichkeit ist daher zu versuchen, dass die ersten eingelesenen Punkte möglichst nicht sortiert sind und über das gesamte Gebiet verteilt sind. Ein anderer Ansatz wäre eine Programmerweiterung, die im Programmschritt **mesh** eine vernünftige Verteilung der Punkte erlaubt (**mesh [distribute]**). Spitze Dreiecke können auch entstehen, wenn zwei Punkte sehr nahe beieinander liegen. Kann durch die ausgegebenen Meldungen erkannt werden, wo das Problem lokalisiert ist, so empfiehlt sich eine Bereinigung der Daten an der betreffenden Stelle. Eine andere Möglichkeit ist die Änderung der Fuzzy-Toleranz, wo angegeben wird, bis zu welcher Distanz zwei Punkt als identisch angenommen werden.

Interpolationen mit kubischen Funktionen sind nicht auf ihre Richtigkeit geprüft.

Nicht sinnvolle Reihenfolgen der Befehle werden nicht abgefangen.